

## ساخت و تحلیل مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان در میدان کوپال

شهرزاد سیدسجادی<sup>۱</sup>، محمدعلی عقیقی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد دانشگاه بین المللی امام خمینی کارشناس اداره پتروفیزیک شرکت نفت و گاز اروندان، sh\_sajadi66@yahoo.com

۲- استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی قزوین، aghighi@eng.ikiu.ac.ir

(دریافت ۶ اردیبهشت ۱۳۹۳، پذیرش ۶ بهمن ۱۳۹۳)

### چکیده

سازندهای کربناته مانند سازند آسماری، ایلام، سروک و غیره از مهم ترین مخازن نفت و گاز ایران محسوب می شوند. با وجود مشکلات فراوان ناشی از فرایندهای ژئومکانیکی مانند گیر کردن لوله حفاری، هرزروی گل و تولید ماسه، تاکنون مطالعات ژئومکانیکی چندانی برای رفع چنین مشکلاتی انجام نگرفته است. اغلب اطلاعات لازم برای ساخت مدل ژئومکانیکی مانند نمودار DSI، اطلاعات آزمایش ریزشکافت و نتایج آزمایش های مکانیک سنگ روی مغزه ها در میادین هیدروکربوری ایران موجود نیست و همین موضوع ساخت مدل ژئومکانیکی را مشکل ساخته است. در این مطالعه مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان (در چاه شماره ۲۰ میدان کوپال) با استفاده از نمودارهای رانده شده در چاه، آزمایشات مکانیک سنگ، اطلاعات RFT، فشار هرزروی گل و غیره ساخته می شود و پنجره وزن گل ایمن برای حفاری پیشنهاد می شود. در پایان صحت نتایج مدل با استفاده از مشاهدات هرزروی گل در گزارشات حفاری و اطلاعات نمودار کالیپر، سنجیده می شود.

### کلمات کلیدی

مدل ژئومکانیکی، پایداری چاه، تنش های برجا، وزن گل

## ۱- مقدمه

یک مدل جامع ژئومکانیکی مخزن شامل وضعیت تنش و فشار منفذی به صورت تابعی از عمق، خصوصیات سنگ از جمله پارامترهای مرتبط با تغییر شکل سنگ شامل مدولهای الاستیک و پارامترهای مقاومتی سنگ مانند مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ است. دستیابی به چنین اطلاعات کاملی همیشه آسان نیست و توجه به این نکته لازم است که همواره در اجزای مختلف مدل ژئومکانیکی، عدم قطعیت وجود دارد. امروزه تهیه مدل ژئومکانیکی به منظور تحلیل مطالعات پایداری چاه، بررسی عملیات شکست هیدرولیکی، مدیریت تولید ماسه و غیره مهم است.

در مطالعه ای ارزشمند، یک الگوریتم ریاضی برای مدل سازی خواص ژئومکانیکی سازندهای خوف و پری خوف در میدان قوار عربستان، ارائه شده است [۱]. این الگوریتم روشی برای محاسبه روش مند خصوصیات مکانیکی سنگ و مقدار تنش افقی برجا با استفاده از داده های نمودارهای صوتی فشاری و برشی است. مدل با داده های آزمایشگاهی و همچنین با نتایج چندین آزمایش میدانی شکافت کوچک و ریزشکست کالیبره شده بود. آن ها نشان دادند که وجود جزء تکتونیکی معادله ی تخمین تنش افقی حداقل به عنوان تابعی از مدول یانگ، به دلیل وجود نیروهای تکتونیکی که روی این مخازن عمیق عمل می کنند، ضروری است [۱].

در تحقیقی دیگر، مدل ژئومکانیکی سه بعدی سازند خوف در میدان قوار عربستان تهیه شده است [۲]. در این مطالعه در چاه های مورد نظر، روابطی بین ویژگی های ژئومکانیکی و زمین شناسی معرفی شده است. این روابط به همراه یک مدل زمین شناسی، برای به تصویر کشیدن ویژگی های ژئومکانیکی سازند در فضای سه بعدی بین چاه ها استفاده شده اند. اعمال ویژگی های ژئومکانیکی در مدل زمین شناسی بدین صورت انجام شده است: مدل سازی با استفاده از لرزه نگاری، مدل سازی با استفاده از نمودارگیری چاه ها و مدل سازی با استفاده از نمودارگیری چاه به همراه تخریل سه بعدی سازند. در مطالعه ای دیگر، عده ای از محققین از مدل ژئومکانیکی استفاده کرده و بهترین مسیر و جهت حفاری چاه های عمیق گازی در میدانی در عربستان را با در نظر گرفتن جهت تنش های برجا، شناسایی کردند. آن ها با توجه

به این موضوع که مکان شکست های ریزشی در چاه های شیب دار تابعی از مسیر چاه و تنش های وارده بر دیواره ی چاه است، با شناسایی مشخصات شکست های ریزشی، مقادیر تنش های برجا، مقاومت مؤثر سنگ و جهت تنش ها در سازند را مشخص کردند. در این مطالعه با استفاده از چندضلعی تنش، برای تنش افقی حداکثر محدوده ای از مقادیر به دست آمد [۳].

در میدانی در عمان، مطالعه ای برای ساخت مدل ژئومکانیکی با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در تراکم یک سازند کربناته انجام شد و توسط این مدل، میزان فرونشست میدان در سال های آینده پیش بینی شد. در این مطالعه لازم بود که همراه با مدل ژئومکانیکی، مدل ساختمانی میدان نیز مورد بحث و تحلیل قرار گیرد [۴].

در مطالعه ای دیگر، محققین برای پیش بینی خواص مکانیکی سنگ در سازند کربناته عرب در میدان قوار عربستان از نمودارهای کابلی چاه استفاده کردند. چهارصد پلاگ نمونه از مغزه های مخزن، تحت آزمایش سه محوره قرار گرفتند. از آنجایی که خواص مکانیکی سنگ نمی توانند به طور مستقیم از اطلاعات نمودارها تخمین زده شوند، باید از یک روش غیرمستقیم استفاده کرد. چنین روشی نمودارهای  $V_p$  را به پارامترهای مکانیکی سنگ به دست آمده از آزمایشگاه مرتبط می سازد و یک سری روابط ایجاد می شوند. به دلیل کمبود روش های تئوری، بیشتر تلاش ها برای تخمین خواص مکانیکی سنگ بر اساس روابط تجربی می باشند. نتایج این بررسی نشان داد که پارامترهای مکانیکی سنگ در درجه اول تابعی از تخریل و پس از آن تابعی از کانی شناسی، بافت سنگ و نوع تخریل می باشند. این مطالعه منجر به ساخت روابط تجربی برای به دست آوردن خواص مکانیکی سنگ از روی تخریل شد [۵].

در یک تحقیق، گروهی از محققان مشکلات ناپایداری چاه به وجود آمده در یک مخزن ماسه ای در عربستان را بررسی کردند. آن ها با مجموعه ای از آنالیزهای آماری و ساخت مدل ژئومکانیکی دلایل ناپایداری چاه را شناسایی و پنجره وزن گل ایمن برای حفاری این سازند را پیش بینی کردند [۶].

در یک بررسی دیگر، محققین ناپایداری چاه در سازند شیلی نهر عمر در کشور عمان را مطالعه کردند. آن ها برای بررسی

- طبیعت سازندهای موجود در میداین ایران پیچیده است.

علاوه بر مسائلی که ذکر شد، دولتی بودن شرکت های بهره بردار، وجود منابع هیدروکربوری زیاد و تولید آسان از این منابع منجر بی توجهی به مسائل ژئومکانیکی و کاربردهای آن در صنعت نفت ایران شده است.

در این مطالعه سعی بر آن است که با استفاده از اطلاعات موجود از چاه شماره ۲۰ میدان کوپال، مدل ژئومکانیکی مخزن بنگستان ساخته شود و بدین وسیله پنجره وزن گل ایمن برای حفاری چاه پیشنهاد داده می شود. در این چاه اطلاعات نمودار DS<sub>I</sub> وجود دارد و به همین دلیل محاسبه پارامترهای الاستیک سنگ با دقت بیشتری انجام می گیرد. در مطالعاتی که پیش از این برای ساخت مدل ژئومکانیکی در میداین ایران انجام شده است، نمودار سرعت موج برشی توسط روابط به دست آمده از آزمایشگاه و از نمودار سرعت موج فشاری به دست می آمد و همین امر دقت مدل های ساخته شده را پایین آورده است.

## ۲- میدان کوپال

میدان نفتی کوپال در ۶۰ کیلومتری شرق شهرستان اهواز واقع شده است. وجود نفت در این میدان نفتی در سال ۱۳۴۴ با حفر اولین چاه به اثبات رسید و بهره برداری از آن با نصب تجهیزات فراورش از سال ۱۳۴۹ آغاز شد. طول این میدان ۶۰ کیلومتر و عرض آن یک و نیم کیلومتر و شامل دو مخزن آسماری و بنگستان است. مخزن بنگستان شامل دو سازند ایلام و سروک است. ایلام و سروک هر دو از کربناته هستند و پس از سازند آسماری مهم ترین سنگ مخزن های نفتی کشور می باشند. تاکنون تعداد ۴۸ حلقه چاه در این میدان حفاری شده و در حال حاضر از ۳۲ حلقه چاه فعال مجموعاً ۹۴ هزار بشکه در روز نفت تولید می شود.

## ۳- اطلاعات در دسترس

برای ساخت مدل ژئومکانیکی، از داده های چاه شماره ۲۰ میدان کوپال (مخزن بنگستان) استفاده شد. این چاه یک چاه عمودی بوده و اطلاعات در دسترس شامل نمودارهای چگالی، نمودار اشعه ی گاما، نمودارهای سرعت موج فشاری و برشی، نمودار تخلخل و مقاومت و نمودارهای کالیپر به همراه اطلاعات RFT، عمق سرسازندها، اعماق مربوط به هرزروی گل و اطلاعات مغزه است.

نایابداری دیواره چاه از مدل جامع ژئومکانیکی استفاده کردند حداقل وزن گل و مقاومت فشاری تک محوره مورد نیاز برای جلوگیری از شکست چاه را در آزمایش ها و شیب های مختلف ارائه دادند [۷].

در مطالعه ای دیگر، محققین نایابداری شیل نهر عمر در میدان زکوم امارات را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، برای انجام آزمایشهای مکانیکی روی سنگ روش جدیدی معرفی شد که در آن از ابزار آزمایش برش مستقیم شیبدار برای نمونه های مغزه در اندازه های کوچک تر استفاده می شود. محققین معتقد بودند که برای آنالیز دقیق این سازند باید از یک مدل تخلخل دو گانه- تراوایی دو گانه که در آن عامل زمان، اثرات شیمیایی و شبکه های شکاف نیز وارد شده باشند، استفاده کرد [۸].

تعدادی از محققین، نایابداری چاه و مشکلات حفاری در میدان های شمالی عراق را با توجه به نقش ژئومکانیک در این مباحث، بررسی کردند. مدل ژئومکانیکی سازند کلوش با تخمین خواص مکانیکی سنگ و مقادیر تنش های برجا ساخته شد و در پایان پیش بینی مدل در مورد ریزش چاه با داده های کالیپر مقایسه شد [۹].

به علت عدم توجه به جمع آوری اطلاعات مکانیک سنگ در میداین هیدروکربوری ایران، تحلیل پایداری چاه به دقت انجام نشده و چاهها با مشکلات زیادی مانند هرزروی گل در حین حفاری و تولید ماسه در زمان بهره برداری مواجه هستند. مهمترین مشکلاتی که برای تهیه مدل ژئومکانیکی در ایران وجود دارد شامل موارد زیر می شود:

- نمودارهای اندازه گیری سرعت موج برشی در بیشتر چاه های کشور رانده نشده اند.

- اغلب آزمایش های مکانیک سنگ روی مغزه های به دست آمده از چاهها انجام نمی گیرد و همین امر باعث شده است که بانک اطلاعاتی ژئومکانیکی کاملی وجود نداشته باشد.

- اغلب آزمایش های شکافت کوچک، ریزشکست و LOT<sup>۱</sup> در چاه های میداین ایران انجام نمی شود.

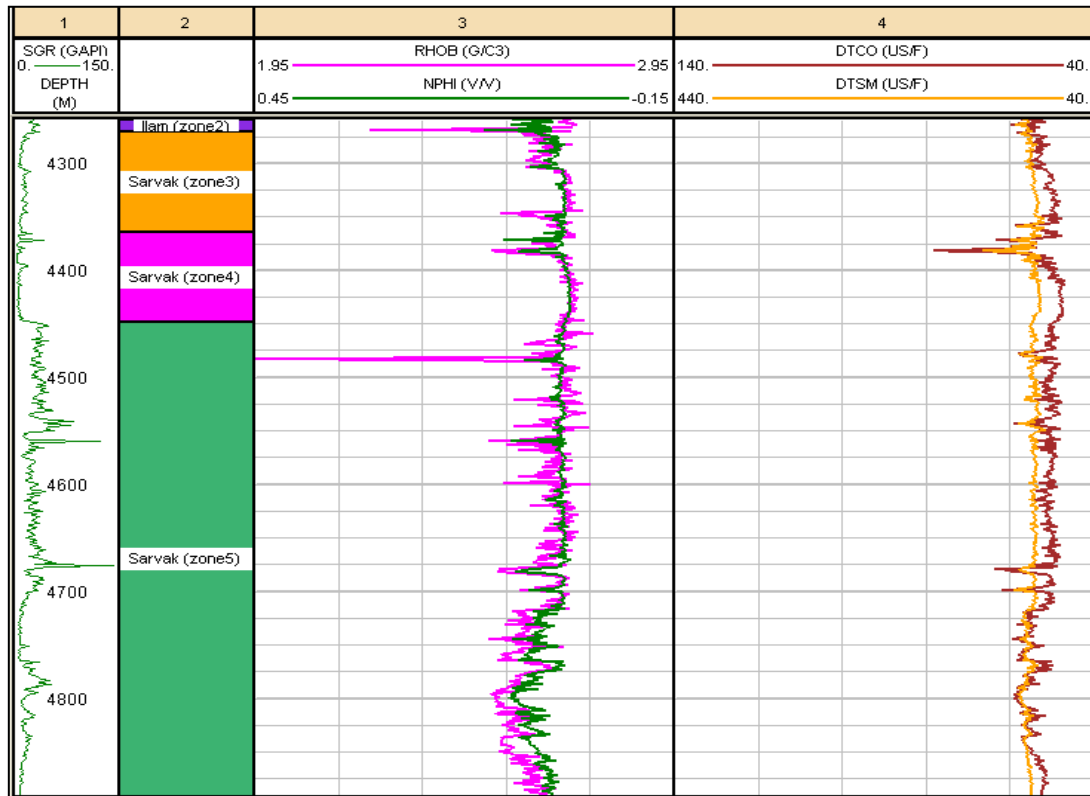
- بیشتر اوقات، اندازه گیری فشار منفذی تنها در تعداد نقاط اندکی از چاه انجام می گیرد و اطلاعاتی از روند تغییرات فشار سازند موجود نیست.

## ۴- روش ساخت مدل ژئومکانیکی

یک مدل ژئومکانیکی شامل مقادیر و جهت تنش به همراه فشار منفذی و خواص مکانیکی سنگ‌ها در اعماق مختلف است. در بخش‌های زیر به روش تعیین هر یک از مقادیر بالا پرداخته شده است.

## ۴-۱- تعیین پارامترهای الاستیک دینامیکی سنگ

نمودارهای اولیه‌ی مورد نیاز برای محاسبه پارامترهای مکانیکی مخزن بنگستان شامل نمودارهای اشعه گاما، چگالی، تخلخل و نمودارهای صوتی موج فشاری و برشی است، که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند.



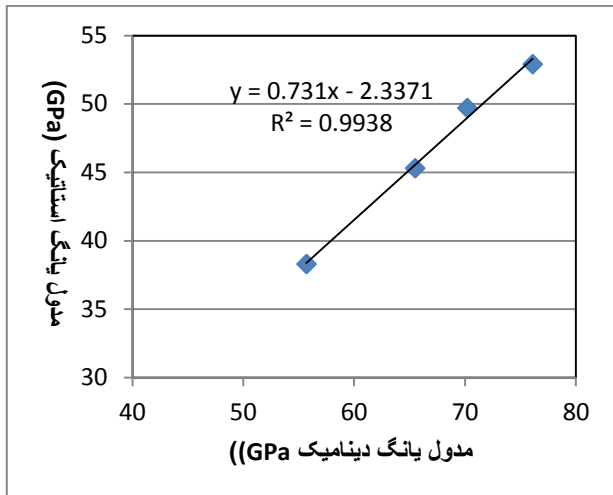
شکل ۱: نمودارهای به‌دست آمده از چاه در مخزن بنگستان

دو نمودار تقریباً روی یکدیگر منطبق باشند، جنس سازند از سنگ آهک است. در این شکل، به غیر از بازه پایینی دو نمودار روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و این مسئله نیز تأیید می‌کند که جنس سازند مورد مطالعه از سنگ آهک است.

پس از وارد کردن اطلاعات ورودی که همان نمودارهای رانده شده در چاه می‌باشند، در قدم اول باید پروفایل خواص الاستیک دینامیک سنگ در عمق را به‌دست آورد. به این منظور، فرمول‌های موجود برای محاسبه پارامترهای الاستیک به نرم‌افزار داده می‌شوند. مدول یانگ دینامیک و نسبت پواسن با استفاده از اطلاعات نمودار چگالی و نمودارهای زمان عبور امواج صوتی محاسبه شده و دیگر مدول‌های الاستیک (مدول برشی و مدول بالک) توسط مدول یانگ و نسبت پواسن

در ستون اول نمودار اشعه گاما در عمق‌های مختلف نشان داده شده است. اشعه گاما برای سنگ‌شناسی ستون چاه اهمیت دارد. به‌طور کلی جاهایی که این نمودار مقادیر بیشتری داشته باشد، می‌تواند نشان‌دهنده افزایش میزان شیل باشد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مقادیر این پارامتر در کل بازه عمقی مورد مطالعه تقریباً ناچیز است و این موضوع با این مطلب که جنس سازند سروک اغلب از سنگ آهک است همخوانی دارد.

در قسمت بعدی دو نمودار چگالی توده‌ای و نوترون آورده شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت، زمانی که نمودار چگالی بالک در سمت راست نمودار نوترون قرار بگیرد جنس سنگ از دولومیت است. وقتی نمودار چگالی در سمت چپ نمودار نوترون قرار بگیرد، سازند ماسه سنگی است و هنگامی که این



شکل ۲: نمودار ارتباط تجربی بین مدول یانگ دینامیک و استاتیکی

دیگر مدول‌های الاستیک استاتیکی ( $G_s$  و  $K_s$ ) به ترتیب ضریب برشی و ضریب حجمی استاتیکی (نیز با داشتن مدول یانگ استاتیکی و توسط رابطه‌های ۶ و ۷ محاسبه می‌شوند) [۱۰]:

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\nu)} \quad (۶)$$

$$K_s = \frac{E_s}{3(1-2\nu)} \quad (۷)$$

در شکل ۳ نمودارهای پارامترهای الاستیک به‌دست آمده برای مخزن بنگستان نشان داده شده‌اند.

به‌دست می‌آیند. روابط ۱ تا ۴ برای محاسبه مدول‌های الاستیک دینامیک مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]:

$$E_d = \frac{\left(\frac{\rho}{\Delta t_p^2}\right)(3\Delta t_p^2 - 4\Delta t_s^2)}{\Delta t_p^2 - \Delta t_s^2} \quad (۱)$$

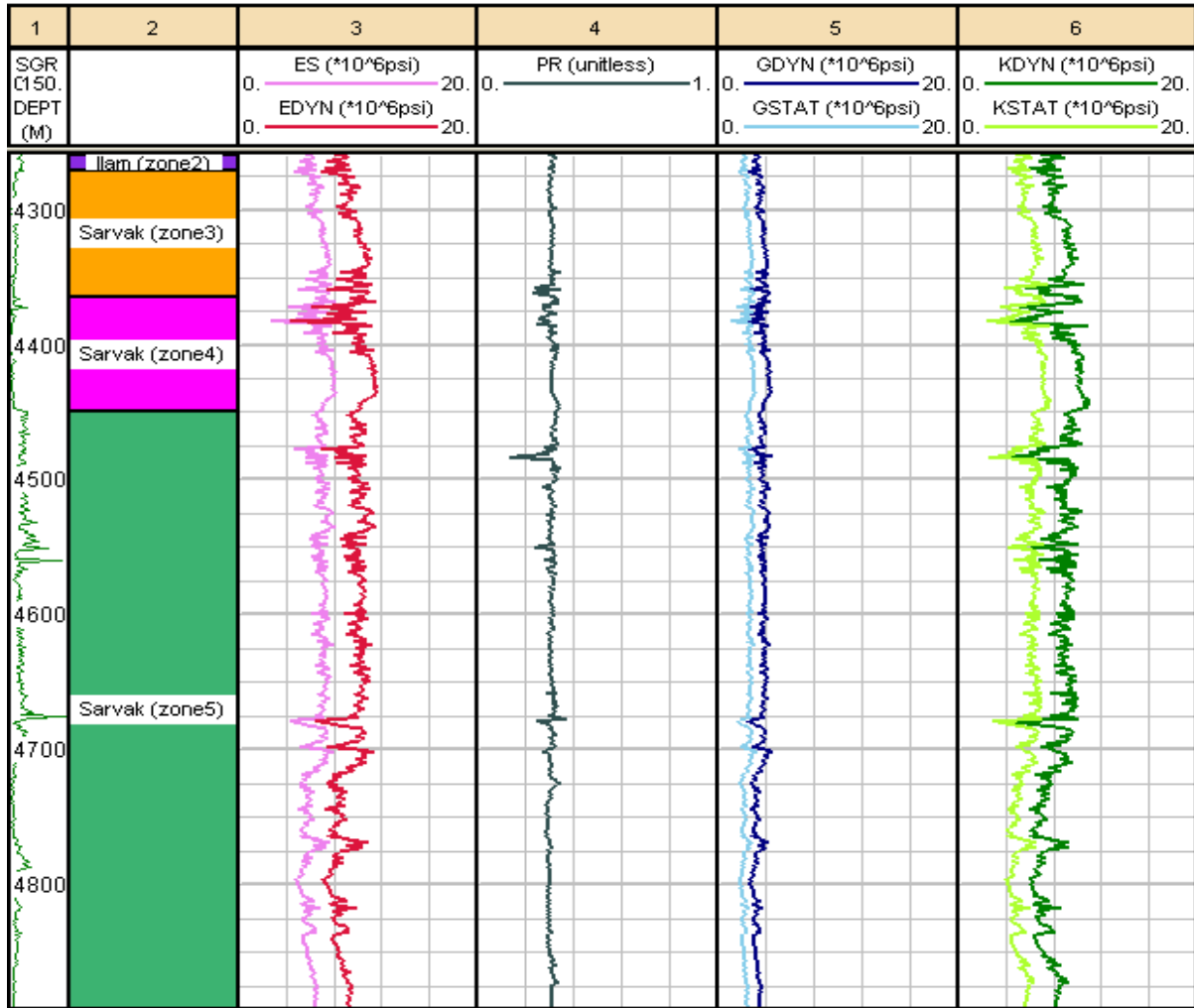
$$\nu_d = \frac{\frac{1}{2}(\Delta t_p^2 - 2\Delta t_s^2)}{\Delta t_p^2 - \Delta t_s^2} \quad (۲)$$

$$G_d = \frac{E_d}{2(1+\nu)} \quad (۳)$$

$$K_d = \frac{E_d}{3(1-2\nu)} \quad (۴)$$

که در آن‌ها  $E_d$  ضریب یانگ دینامیک،  $\nu_d$  نسبت پواسون دینامیک،  $G_d$  ضریب برشی دینامیک،  $K_d$  ضریب حجمی دینامیک،  $\rho$  چگالی سنگ،  $\Delta t_p$  زمان سیر امواج فشاری و  $\Delta t_s$  زمان سیر امواج برشی می‌باشد. از مقادیری که در آزمایشگاه برای ضریب یانگ دینامیک و استاتیکی در آزمایش سه محوره به‌دست آمده است، می‌توان در ساخت یک رابطه تجربی برای به‌دست آوردن ضریب یانگ استاتیکی  $E_s$  از دینامیک در مخزن بنگستان استفاده کرد ((معادله ۵) و شکل ۲).

$$E_s = 0.731 * E_d - 2.337 \quad (۵)$$



شکل ۳: نمودارهای به دست آمده برای مدولهای الاستیک سنگ مخزن بنگستان، میدان کوپال

جدول ۱: مقادیر ماکزیمم، میانگین و مینیمم پارامترهای الاستیک سنگ مخزن بنگستان در میدان کوپال

| مینیمم | میانگین | ماکزیمم | ضرائب                                    |
|--------|---------|---------|--|
| ۴,۱۰   | ۹,۵۴    | ۱۳,۳۶   | ضریب یانگ دینامیک (*10 <sup>6</sup> psi) |
| ۲,۶۶   | ۶,۶۳    | ۹,۴۳    | ضریب یانگ استاتیک (*10 <sup>6</sup> psi) |
| ۰,۱۱   | ۰,۳۰    | ۰,۳۷    | نسبت پواسون                              |
| ۱,۵۸   | ۳,۶۴    | ۵,۲۸    | ضریب برشی دینامیک (*10 <sup>6</sup> psi) |
| ۱,۰۲   | ۲,۵۳    | ۳,۷۳    | ضریب برشی استاتیک (*10 <sup>6</sup> psi) |
| ۳,۳۳   | ۸,۳۸    | ۱۱,۲۲   | ضریب حجمی دینامیک (*10 <sup>6</sup> psi) |
| ۲,۱۸   | ۵,۸۳    | ۷,۸۴    | ضریب حجمی استاتیک (*10 <sup>6</sup> psi) |

## ۴-۲- محاسبه پارامترهای مقاومتی سنگ

به کار می رود و توسط پلامب<sup>۳</sup> (معادله ۹) به دست آمده است، استفاده می شود [۱۱].

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

که در آن  $\phi$  تخلخل،  $NPFI$  تخلخل نوترون و  $V_{shale}$  حجم شیل است. متغیرهای موجود در این معادله، مقدار تخلخل خوانده شده توسط نمودار نوترون و همچنین حجم شیل می باشد. حجم شیل نیز با استفاده از نمودار اشعه گاما ( $SGR^4$ ) و طبق رابطه ۱۰ بدست می آید [۱۱]:

$$V_{shale} = \frac{GR - GR_{min}}{GR - GR_{max}} \quad (10)$$

که در آن  $GR$  مقدار اشعه گاما،  $GR_{min}$  برابر با حداقل مقدار اشعه گاما و  $GR_{max}$  برابر با حداکثر مقدار اشعه گاما است.

مقاومت کششی سنگ،  $T_0$  نیز بر اساس نوع سازند از  $\frac{UCS}{12}$  تا  $\frac{UCS}{8}$  تغییرپذیر است که برای سازندهای کربناته شکافدار از کمترین مقدار استفاده می شود (رابطه ۱۱) [۱]:

$$T_0 = \frac{UCS}{12} \quad (11)$$

نمودارهای خواص مقاومتی سنگ مخزن بنگستان در شکل (۵) نشان داده شده اند.

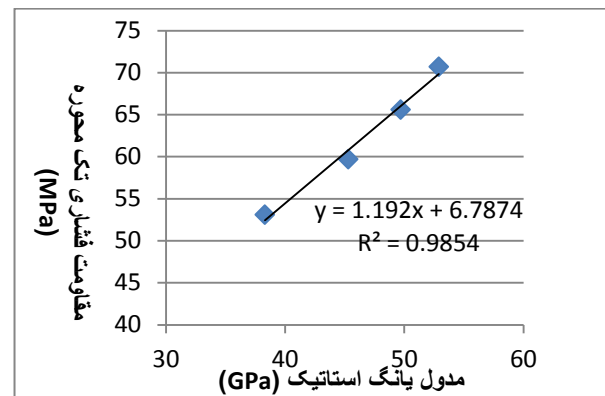
همان گونه که در شکل ۵ دیده می شود، در عمق هایی از سازند که مقدار چگالی بالک افزایش پیدا کرده مقاومت تک محوره سنگ نیز زیاد شده است و این موضوع را می توان با تطابق مقادیر حداکثر در این نمودارها تأیید کرد. همچنین آن جایی که زاویه اصطکاک داخلی سنگ میزان ارتباط و همبستگی بین دانه ها در سنگ را نشان می دهد، با زیاد شدن شیل، میزان زاویه اصطکاک داخلی کمتر می شود. در جدول ۲ مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین پارامترهای مقاومتی سنگ مخزن بنگستان نشان داده شده است.

در مرحله بعدی باید پروفایل مربوط به خواص مقاومتی سنگ را نسبت به عمق به دست آورد. پارامترهای مقاومتی سنگ شامل مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ می باشند. برای به دست آوردن پروفایل پیوسته ای از مقاومت فشاری تک محوره نیز باید از یک رابطه تجربی به دست آمده از آزمایشگاه استفاده کرد. این رابطه می تواند از رسم منحنی مربوط به مقادیر  $UCS^2$  در مقابل تخلخل یا مدول یانگ استاتیک ایجاد شده باشد.

با استفاده از مقادیری که برای پارامترهای مدول یانگ استاتیک و مقاومت فشاری تک محوره در آزمایشگاه به دست آمده است، می توان یک رابطه تجربی بین این دو پارامتر ایجاد کرد و از آن برای تخمین  $UCS$  در مخزن بنگستان استفاده کرد.

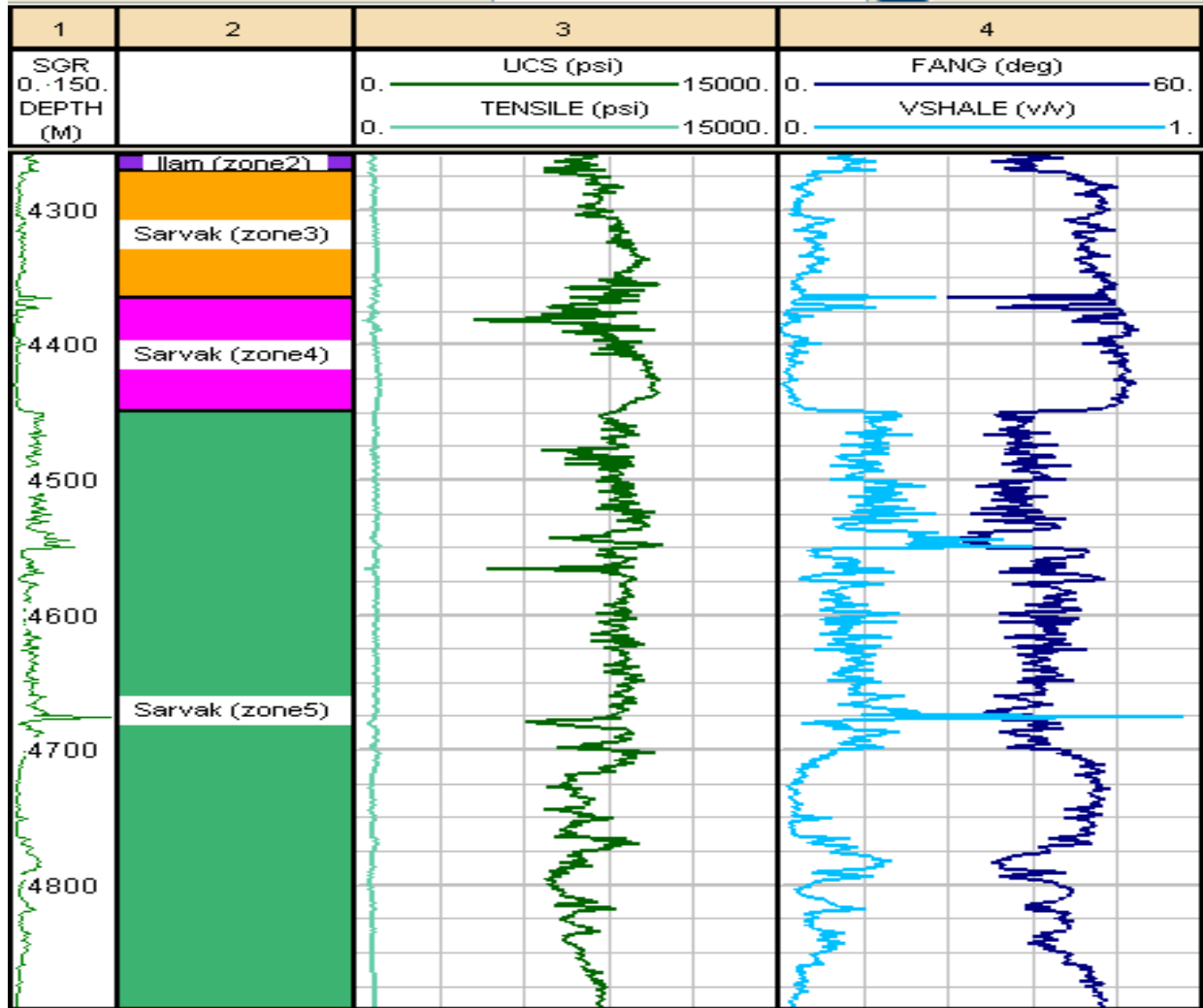
نمودار و رابطه تجربی به دست آمده از ارتباط پارامترهای مدول یانگ استاتیک و  $UCS$  در آزمایشگاه، مطابق با شکل ۴ به دست می آید.

$$UCS = 1.192 * E_s + 6.787 \quad (8)$$



شکل ۴: نمودار و فرمول تجربی به دست آمده برای مقاومت فشاری تک محوره در مقابل مدول یانگ استاتیک حاصل از اطلاعات آزمایش روی مغزه

برای محاسبه زاویه اصطکاک داخلی سنگ از یک رابطه تجربی متداول در مکانیک سنگ که برای ماسه سنگ ها و کربنات ها



شکل ۵: نمودارهای به دست آمده برای خواص مقاومتی سنگ در مخزن بنگستان، میدان کوپال

۳-۴- محاسبه تنش های برجا و فشار منفذی

در مرحله بعد، باید مقادیر تنش های اصلی تخمین زده شود. تنش عمودی از رابطه زیر و با استفاده از نمودار چگالی بالک به دست می آید (معادله ۱۲) [۱۰]:

$$S_v = \int \rho g dz \quad (12)$$

که در آن  $S_v$  تنش قائم،  $g$  شتاب جاذبه و  $z$  عمق از سطح مبنا است. با توجه به اینکه نمودار چگالی بالک اغلب در بخش مخزنی رانده می شود، باید رگرسیون این نمودار تا سطح زمین و با داشتن چگالی سنگ های سطح زمین به دست آید (شکل

جدول ۲: مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین خواص مقاومتی سنگ مخزن بنگستان در میدان کوپال

| پارامتر                     | ماکزیمم  | مینیمم  | میانگین |
|-----------------------------|----------|---------|---------|
| مقاومت فشاری تک محوره (psi) | ۱۲۲۳۵٫۱۵ | ۴۱۶۱٫۶۲ | ۸۸۹۸٫۵۳ |
| مقاومت کششی (psi)           | ۱۰۱۹٫۵۹  | ۳۴۶٫۸   | ۷۴۱٫۵۴  |
| زاویه اصطکاک داخلی (deg)    | ۵۰٫۷۹    | ۲۰٫۸۶   | ۴۰٫۳۰   |



$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} S_v - \frac{v}{1-v} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s \varepsilon_x}{(1-v^2)} + v \frac{E_s \varepsilon_y}{(1-v^2)} \quad (13)$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v} S_v - \frac{v}{1-v} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E_s \varepsilon_y}{(1-v^2)} + v \frac{E_s \varepsilon_x}{(1-v^2)} \quad (14)$$

در این روابط  $\sigma_h$  و  $\sigma_H$  به ترتیب تنش های افقی حداقل و حداکثر می‌باشند. نماد  $\alpha$  نشان‌دهنده ضریب تنش مؤثر یا ضریب بایوت است که اغلب برای سنگ‌های مخزنی بین ۰٫۷ تا ۱ تغییر می‌کند و یا به صورت تابعی از تخلخل بیان می‌شود. این ضریب به صورت رابطه ذیل تعریف می‌شود:

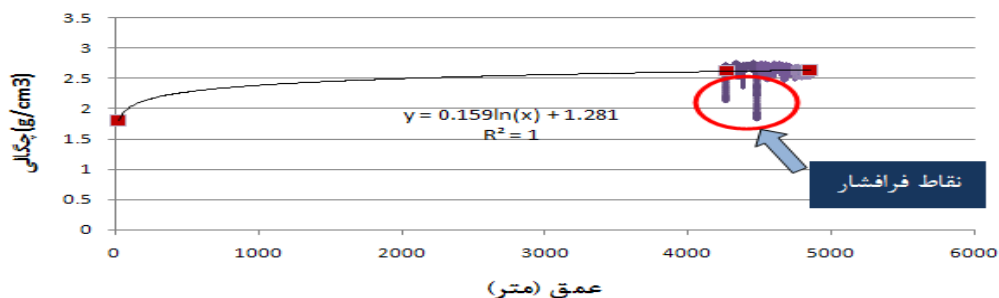
$$\alpha = 1 - \frac{K_b}{K_g} \quad (15)$$

که در آن  $k_b$  ضریب حجمی توده سنگ و  $k_g$  ضریب حجمی دانه های سنگ است. در این تحقیق مقدار محافظه کارانه این ضریب برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. همچنین  $\varepsilon_x$  و  $\varepsilon_y$  کرنش‌های افقی به ترتیب در جهت تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر هستند. در مورد میادینی که تحت تأثیر نیروهای تکتونیکی قرار دارند (از جمله میادین کشورهای حوزه خلیج فارس و ایران) در نظر گرفتن این پارامترها برای کالیبره کردن نمودار تنش افقی حداقل ضروری است. در حالت ایده‌آل مقدار تنش افقی حداقل را باید با مقادیر به دست آمده از آزمایش شکافت کوچک یا LOT کالیبره کرد.

۶) گرادیان تنش عمودی در این سازند در حدود ۲۴/۱ kPa/m به دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل ۶ نیز نشان داده شده است، در عمق‌هایی از چاه، چگالی بالک به شدت کاهش یافته است و با توجه به اینکه جنس سازند در تمامی بازه عمقی مورد مطالعه غالباً از سنگ آهک است و تغییر نکرده، می‌توان گفت که در این نقاط تخلخل افزایش یافته و در نتیجه فشار منفذی نیز بیشتر شده است. فشار منفذی سازند با توجه به مقدار گرادیان‌های فشاری که از مخزن بنگستان در مراجع و منابع وجود دارد و همچنین توسط اطلاعات RFT و با استفاده از رابطه عکس مقدار فشار منفذی و مقدار چگالی بالک در بازه های مختلف عمقی تعریف می‌شود [۱۲ و ۱۳]. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که گرادیان فشار منفذی در طول مخزن از ۹ تا ۱۲ kPa/m تغییر می‌کند. گرادیان‌های اندازه‌گیری شده توسط RFT در این چاه نیز برای کالیبره کردن نمودار فشار منفذی استفاده می‌شوند.

در مرحله بعد باید تنش‌های افقی حداقل و حداکثر تعیین شوند. از آنجا که در چاه مورد نظر آزمایشات LOT یا مشابه آن انجام نشده است، برای تعیین مقادیر تنش افقی از روشی مبتنی بر روابط پورولاستیک (۱۳ و ۱۴) استفاده می‌شود. در این روابط تنش‌های افقی از جمع اثرات پواسون، فشار منفذی و تکتونیک به دست می‌آیند. [۱]:



شکل ۶: رگرسیون نمودار چگالی بالک تا سطح زمین برای محاسبه تنش برجا

منطقه و نقشه جهانی تنش معادل N50E-S50W در نظر گرفته می‌شود.

#### ۵- محاسبه وزن گل در انواع حالات ناپایداری چاه

در قدم بعدی باید وزن و فشار گل در چهار حالت ناپایداری شامل ریزش چاه، جریان سیال سازندی به چاه<sup>۵</sup>، هرزروی سیال حفاری<sup>۶</sup> و فروشکست کششی<sup>۷</sup> تخمین زده شود.

آستانه وزن گل برای هرزروی معادل شیب شکست است که اغلب با تنش اصلی حداقل برابر فرض می‌شود. برای تخمین وزن گلی که سبب ایجاد هرزروی گل در سازند می‌شود از رابطه (۱۶) استفاده می‌شود [۱۰]:

$$MW_{loss} = \frac{\sigma_h}{gD} \quad (16)$$

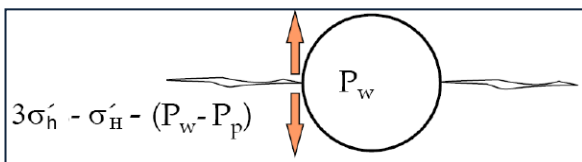
که در آن  $g$  شتاب جاذبه و  $D$  عمق است.

تنش‌های مماسی مؤثر در دیواره چاه برای بررسی انواع حالات ناپایداری اهمیت دارند و معادلات کرش<sup>۸</sup> برای تخمین این تنش‌ها استفاده می‌شوند. وقتی تنش مماسی در دیواره چاه کششی شود و از مقاومت کششی سنگ تجاوز کند، شکست کششی رخ می‌دهد (شکل ۸). این موضوع می‌تواند در اثر زیاد شدن فشار چاه اتفاق بیفتد. بدین ترتیب روابط (۱۷) و (۱۸) به‌عنوان معیار ایجاد شکست کششی به نرم افزار داده می‌شوند:

$$P_{BD} = 3\sigma_h - \sigma_H - P_p + T \quad (17)$$

$$MW_{BD} = \frac{P_{BD}}{gD} \quad (18)$$

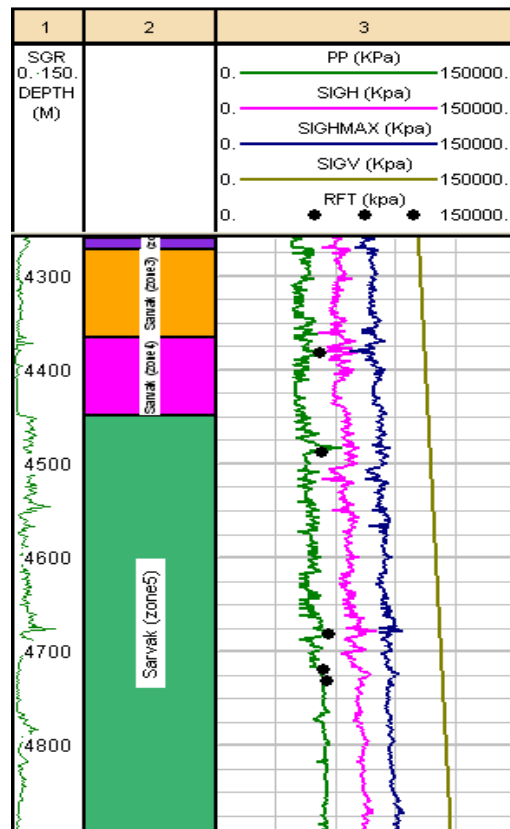
که در آن  $P_{BD}$  فشار آستانه فروشکست کششی و  $MW_{BD}$  وزن گل آستانه فروشکست کششی است.



شکل ۸: نمایی از تنش مماسی کششی مؤثر در دیواره چاه

شکست برشی در سنگ زمانی اتفاق می‌افتد که تنش مماسی مؤثر در دیواره چاه، فشاری شود و از مقاومت برشی سنگ تجاوز نماید (شکل ۹). این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که وزن گل مورد استفاده در چاه کمتر از حد مورد نیاز باشد. معیار

محاسبه پروفایل تنش‌های افقی برجا به سادگی میسر نیست، زیرا اطلاعات LOT یا نظایر آن برای کالیبره کردن نمودار تنش افقی حداقل موجود نیست. تنها اطلاعاتی که وجود دارد مقدار فشار هرزروی گل است که چون مخزن بنگستان یک سازند کربناته شکاف‌دار است، مقدار آن می‌تواند به مقدار تنش افقی حداقل نزدیک باشد. فشار هرزروی سیال در این مخزن در حدود  $12,42 \text{ kPa/m}$  است. بنابراین با بررسی حالات مختلف (اعمال  $\epsilon_y, \epsilon_x$  های مختلف) در یک فرایند تکرار، حالتی که در آن نتیجه‌ی مدل با رویدادهای مشاهده شده در چاه مطابقت داشته باشد و گرادیان تنش افقی حداقل تا حد امکان به مقدار فشار هرزروی گل نزدیک باشد، انتخاب می‌شود. شکل ۷ نمودارهای تنش‌های به‌دست آمده از این فرایند در سازندهای مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۷: نمودار تنش در در مخزن بنگستان

با توجه به نمودارهای تنش در شکل ۷، رژیم تنش نرمال است. در رژیم تنش نرمال، تنش عمودی بزرگترین مقدار و تنش افقی حداقل، کمترین مقدار را دارد. جهت تنش افقی حداکثر در این مطالعه با استفاده از جهت‌گیری غالب تنش در این

$$MW_{kick} = \frac{P_p}{gD} \quad (25)$$

که در آن  $MW_{kick}$  وزن گل آستانه جریان سیال سازندی به درون چاه است.

### نتایج مدل سازی ژئومکانیکی و اعتبار سنجی آن

مدل ژئومکانیکی در سه بخش ایجاد می‌شود. در بخش اول نمودار تنش ها و فشار منفذی، در بخش دوم نمودار مقادیر وزن گل برای چهار حالت ذکر شده و در بخش سوم مقادیر نمودار کالیپر برای صحت سنجی نتایج دو بخش اول، آورده می‌شود. بدین ترتیب مدل ژئومکانیکی یک بعدی آماده می‌شود. در شکل (۱۰) مدل ژئومکانیکی نهایی به دست آمده برای مخزن بنگستان در میدان کوپال نشان داده شده است.

وزن گلی که بین مقدار شکست ریزشی و هرزروی یعنی به ترتیب  $MW_{BO}$  و  $MW_{loss}$  قرار می‌گیرد، محدوده وزن گل ایمن برای حفاری را معین می‌کند. بدیهی است که اگر وزن گلی کمتر از حد پایینی وزن گل ایمن استفاده شود، چاه دچار شکست برشی (ریزشی) و در نهایت فروپاشی<sup>۹</sup> می‌شود. همچنین اگر وزن گلی بیشتر از پنجره وزن گل ایمن استفاده گردد، هرزروی گل و در نهایت شکست کششی در دیواره چاه به وجود می‌آید. در اعماقی که نمودار وزن گل مورد استفاده، از ناحیه‌ی شکست ریزشی یا جریان سازندی به داخل چاه گذشته باشد، نمودار کالیپر نیز باید مقادیر بیشتری را نمایش دهد و در اعماقی که نمودار وزن گل ناحیه‌ی هرزروی یا فروشکست را قطع می‌کند، باید در گزارشات حفاری، زمین شناسی و تصاویر چاه به هرزروی گل یا ایجاد شکست های کششی اشاره شده باشد. بنابراین، صحت مدل ژئومکانیکی توسط گزارشات حفاری و اطلاعات کالیپر ها بررسی می‌شود.

توجه به این نکته لازم است که هرچه تست های آزمایشگاهی و میدانی بیشتری برای کالیبره کردن مدل در دسترس باشند، نتایج مدل قابلیت اطمینان بیشتری خواهند داشت.

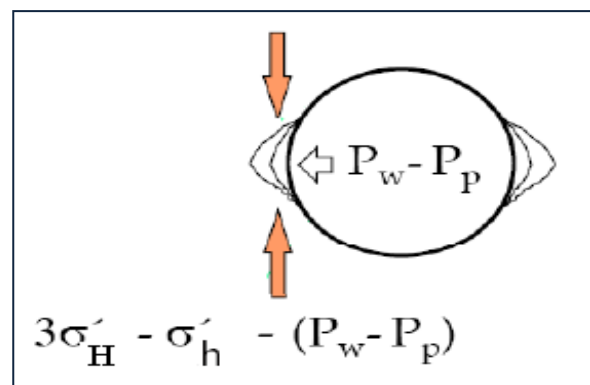
همان‌طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، در عمق‌هایی که وزن گل استفاده شده ناحیه شکست ریزشی را قطع کرده است، ریزش دیواره چاه رخ داده است و بزرگ شدن مقادیر نمودار کالیپر، درستی این مسئله را تصدیق می‌کنند. همچنین در برخی از اعماق چاه با توجه به وزن گل استفاده شده،

موهر - کلمب ( معادلات ۱۹ و ۲۰) برای به دست آوردن رابطه‌ی مربوط به شکست برشی استفاده می‌شود.

$$\sigma_1 = \sigma_3 N_\phi + UCS \quad (19)$$

$$N_\phi = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (20)$$

که در آن  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل،  $UCS$  مقاومت فشاری تک‌محوره،  $N_\phi$  ضریب زاویه پوش معیار شکست کلمب در صفحه تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر و  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی برای سنگ مورد نظر است.



شکل ۹: نمایی از تنش مماسی فشاری مؤثر در دیواره چاه

$$\sigma_1 = \sigma_{\theta max} = 3\sigma_H - \sigma_h - (P_w - P_p) \quad (21)$$

$$\sigma_3 = P_w - P_p \quad (22)$$

با جایگزینی معادلات (۲۱) و (۲۲) در معادله (۱۹)، فشار و وزن گل معادل با ایجاد شکست ریزشی (برشی) مطابق با معادلات ۲۳ و ۲۴ به دست می‌آیند:

$$P_{BO} = 3\sigma_H - \sigma_h - P_p - UCS + \left( P_p \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) / \left( 1 + \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) \quad (23)$$

$$MW_{BO} = \frac{P_{BO}}{gD} \quad (24)$$

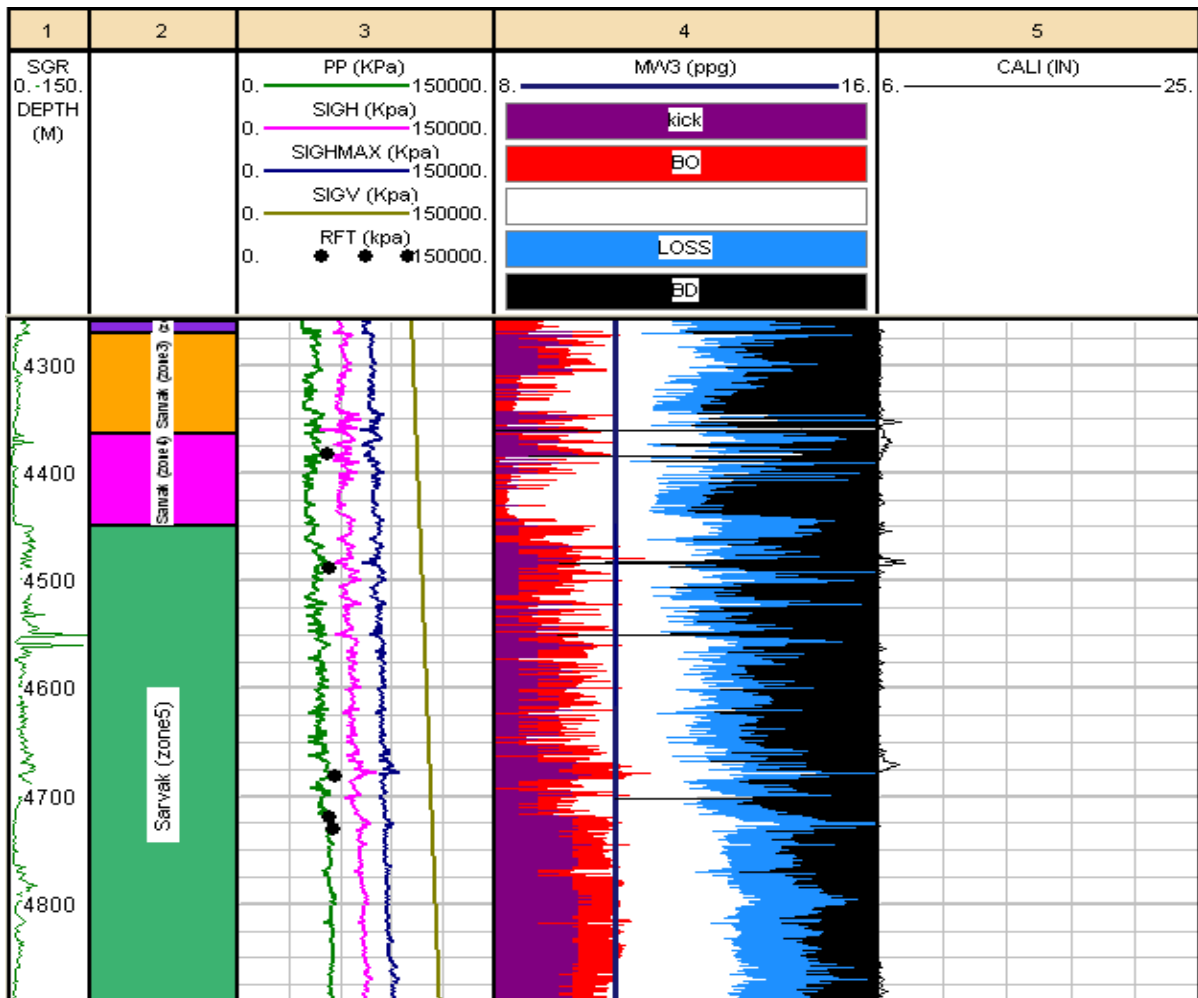
که در آن  $P_{BO}$  فشار آستانه شکست ریزشی و  $MW_{BO}$  وزن گل آستانه شکست ریزشی است.

اگر فشار گل کمتر از فشار سازند شود، جریان سازندی اتفاق می‌افتد و رابطه (۲۵) که بر همین اساس برقرار است به عنوان آخرین فرمول به نرم افزار داده می‌شود:

مورد نظر نامناسب‌تر است و از به‌وجود آمدن آن حالت پرهیز نماید. برای مثال اگر هرزروی گل مشکل اساسی ایجاد می‌کند، باید وزن گل را کاهش داد و ریسک ایجاد شکست برشی در چاه را پذیرفت.

شکست کششی در دیواره چاه رخ می‌دهد، که این مسئله نیز با گزارش هرزروی کامل گل حفاری در اعماق ۴۳۸۱ متر، ۴۴۰۱ متر، ۴۴۸۰ متر، ۴۵۶۰ متر و ۴۷۰۲ متر در گزارشات حفاری تأیید می‌شود.

در برخی از اعماق چاه نیز، مرز مشخصی بین شکست برشی و کششی وجود ندارد. در چنین موقعیتی، مهندس حفار باید با توجه به شرایط انتخاب کند که کدام وضعیت شکست در عمق



شکل ۱۰: مدل ژئومکانیکی ساخته شده برای مخزن بنگستان در میدان کوپال

## ۶- نتیجه گیری

مدل ژئومکانیکی ساخته شده، بخش‌هایی از چاه که در آنجا شکست ریزشی رخ داده است با نمودارهای کالیپر تطابق دارند. پنجره وزن گل ایمن به دست آمده در چاه شماره ۲۰ میدان کوپال برای مخزن بنگستان باریک است و همین امر کار مهندسين حفار در انتخاب وزن گل مناسب را دشوار می‌سازد.

## تشکر و قدردانی

از شرکت مناطق نفت خیز جنوب به دلیل حمایت از انجام این تحقیق و اجازه انتشار اطلاعات تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین نویسندگان مقاله مایلند از کمک های آقایان مهندس حسین طالبی و مهندس مسعود نعمت الهی قدردانی نمایند.

## منابع

- [1] Al-Qahtani, M.Y. and Rahim, Z. (2001) "A mathematical algorithm for modeling geomechanical rock properties of the Khuff and Pre- Khuff reservoirs in Ghawar field", SPE 68194.
- [2] Al-Ruwaili, S.B. and Chardoc, O. (2003) "3D model for rock strength & insitu stresses in the khuff formation of Ghawar field, methodologies & applications" SPE 81476.
- [3] Ahmed, M.S. , Finkbeiner, T. and Kannan, A.A (2007) "Using geomechanics to optimize field development strategy of deep gas reservoirs in Saudi Arabia", SPE 110965.
- [4] Dudley, J.W., Van der Linden, A. and Muller, G.F. (2005) "Geomechanical modeling of a pore collapsing carbonate: compaction and subsidence of a field in Oman", IPTC 10680.
- [5] Ameen, M. S., Smart, G. D., Hammilton, S. and Naji, N. A. (2009) "Predicting rock mechanical properties from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia)", marine & petroleum geology, vol.26, pp.430- 444.
- [6] Mohiuddin, M.A., Awal, M.R., Abdulraheem, A. and Khan, K. (2001) "A New Diagnostic Approach to Identify the Causes of Borehole Instability Problems in an Offshore Arabian Field", SPE 68095.
- [7] Al-Wardy, W. and Urdaneta, O. (2010) "Geomechanical modeling for wellbore stability during drilling Nahr Umr shales in a field in petroleum development Oman", SPE 138214.
- [8] Znugyen, V., Abousleiman, Y. and Hoang, S. (2007) "Analysis of wellbore instability in drilling

وجود نمودار سرعت موج برشی از مخزن بنگستان در چاه شماره ۲۰ میدان کوپال، امکان ساخت مدل ژئومکانیکی با دقت بیشتری را در میدان کوپال فراهم کرده است. خواص ژئومکانیکی مخزن بنگستان را می‌توان بر اساس یک الگوریتم ریاضی محاسبه کرد. انجام آزمایش‌های مکانیک سنگ بر روی مغزه، برای آنالیز مسائل ژئومکانیکی مخازن ایران به شدت مورد نیاز است. از نتایج مطالعات آزمایشگاهی می‌توان برای ساخت روابط تجربی در تخمین پروفایل پیوسته‌ای از پارامترهای الاستیک استاتیک و خصوصیات مقاومتی سنگ استفاده کرد.

مقدار میانگین برای ضریب یانگ دینامیک، ضریب یانگ استاتیک و نسبت پواسن در مخزن بنگستان به ترتیب برابر با  $10^6 \times 9,54$  پام،  $10^6 \times 6,63$  پام و  $0,3$  به دست می‌آید. مقدار میانگین برای مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ مخزن بنگستان به ترتیب برابر با  $8898,53$  پام،  $741,54$  پام و  $40,3$  درجه به دست می‌آید. گرادیان تنش عمودی در مخزن بنگستان میدان کوپال توسط رسم رگراسیون نمودار چگالی بالک تا سطح زمین، برابر با  $24,1$  kPa/m به دست می‌آید. گرادیان فشار منفذی در مخزن بنگستان توسط اطلاعات تست RFT اندازه‌گیری شده است و از  $9$  تا  $12$  kPa/m تغییر پذیر است. با رسم رگراسیون نمودار چگالی از مخزن تا سطح زمین، نقاط فرافشار در این مخزن قابل تشخیص هستند. آزمایش‌هایی مانند نشت و شکافت کوچک برای کالیبراسیون مدل تنش برجا ارزشمند هستند و اجرای عملیات‌هایی نظیر آن برای بالا بردن دقت مدل‌های ژئومکانیکی در ایران مورد نیاز است. برای سازندهای کربناته شکافدار از جمله مخازن گروه بنگستان، می‌توان گفت مقدار فشار افقی حداقل نزدیک به فشار هرزروی گل خواهد بود. فشار هرزروی گل در این مخزن حدود  $12,4$  kPa/m است. جزء تکتونیک معادله ی تخمین  $\sigma_1$ ، به دلیل وجود نیروهای تکتونیک موجود در میدین هیدروکربنی ایران برای کالیبره کردن نمودار تنش افقی بسیار مهم است. با رسم نمودارهای تنش برای مخزن بنگستان رژیم تنش در میدان کوپال، رژیم تنش نرمال به دست می‌آید. مدل ژئومکانیکی تهیه شده، در نقاط متعددی از چاه ایجاد شکست کششی و هرزروی کامل گل در مخزن بنگستان در میدان کوپال را تأیید می‌کند. در

*through chemically active fractured rock formations: Nahr Umr shale*", SPE 105383.

[9] Abalioglu, I., Legarre, H. and Sallier, B. (2011) "*The role of geomechanics in diagnosing hazards and providing solutions to the northern Iraq fields*", SPE 142022.

[10] Zoback, M.D. (2007) **Reservoir Geomechanics**, 1<sup>st</sup> Ed., Cambridge University Press.

[11] Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P. and Raaen, A.M. (2008) **Petroleum Related Rock Mechanics** (2<sup>nd</sup> edn), Elsevier publishing.

[12] Stunes, S. (2012) "*Methods of Pore Pressure Detection from Real-time Drilling Data*", Norwegian University of Science and Technology publishing.

[13] <http://www.NISOC.com> (July 23, 2011)

#### پانویس ها

- 
- Leak Off Test <sup>۱</sup>
  - Unconfined Compressive Strength <sup>۲</sup>
  - Plumb <sup>۳</sup>
  - Spectral Gamma Ray <sup>۴</sup>
  - kick <sup>۵</sup>
  - mudloss <sup>۶</sup>
  - breakdown <sup>۷</sup>
  - Kirsch <sup>۸</sup>
  - collapse <sup>۹</sup>