

# تعیین تنش برجا جهت بررسی آنالیز پایداری چاه تحت شرایط همسان‌گردی عرضی

رامین محمدی و حمیدرضا رمزی\*

دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۶/۳/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۵

## چکیده

تنش‌های برجا فاکتوری کلیدی است که در بسیاری از مسائل مرتبط با سنگ و در زمینه‌های مهندسی نفت نظیر پایداری دیواره چاه و شکست هیدرولیکی از اهمیت بالایی برخوردار است. عمدتاً از روش‌های مستقیم که پرهزینه و زمان‌بر هستند؛ جهت تخمین تنش‌های برجا استفاده می‌شود. همچنین روش‌های مستقیم نتایج را محدود به عمق خاصی می‌کنند که نمی‌توان آن‌را به کل چاه تعمیم داد. در این مقاله از دو روش غیرمستقیم پرکاربرد در تخمین تنش برجا یعنی مدل مبتنی بر مدول برشی و روابط پوروالاستیک در محیطی تحت شرایط همسان‌گردی عرضی، استفاده و نتایج مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. محاسبه پارامترهای الاستیکی، مقاومت سنگ و تنش برجا بر اساس فرضیات هر روش برای یک چاه عمودی حفر شده در جنوب غربی ایران نشان داد روش مبتنی بر مدول برشی روش پیشنهادی برای پیش‌بینی حداکثر تنش افقی است. در این روش مقدار ضریب آکوستوالاستیک  $0.52$  در نظر گرفته شد. همین‌طور نسبت  $C_{66}/C_{44}$  کمتر از  $3$  است که چندان قابل قبول نیست. تنش‌های برجای به‌دست آمده با این روش با مغزه‌ها کالیبره شده‌اند. هرچند این روش رژیم گسلی منطقه را درست پیش‌بینی کرده ولی مقدار تنش با توجه به مدل مکانیکی ساخته شده کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است و نتایج با نمودار کالیپر همخوانی ندارد. اما مدل مکانیکی ارائه شده به‌وسیله روابط پوروالاستیک که یک رویکرد بهتری در پیش‌بینی تنش برجا تحت شرایط همسان‌گردی عرضی داشته تطابق بهتری با نمودار کالیپر دارد و فواصلی که دچار شکستگی برشی و کششی شده بخوبی نشان داده‌اند که این می‌تواند به علت وجود لایه‌های شیلی درون سازند باشد.

**کلمات کلیدی:** تنش برجا، همسان‌گردی عرضی، مدل مکانیکی، مدول برشی، روابط پوروالاستیک

## مقدمه

و مباحثی همچون شکست هیدرولیکی، گسیختگی چاه و غیره است [۱]. شناخت دقیق تنش‌های سازند در مدیریت هرچه بهتر مخازن در برابر شکست‌های ناشی از کاهش فشار منفذی و افزایش تنش موثر بسیار مهم است [۲].

در صنعت نفت و گاز، تنش برجا یک پارامتر کلیدی در طول عملیات حفاری و تولید مواد هیدروکربوری

\*مسئول مکاتبات  
آدرس الکترونیکی  
ramazi@aut.ac.ir  
شناسه دیجیتال (DOI: 10.22078/pr.2018.2758.2278)

گزارش حفاری و مغزه کالیبره شوند قابل اعتماد نیز خواهند شد. تخمین تنش برجا براساس روش‌های مستقیم و غیرمستقیم در برخی موارد به علت وجود شرایط مختلف زمین‌شناسی و ساختاری سنگ با پیچیدگی‌هایی همراه است. بنابراین تعیین مقادیر تنش تحت شرایط ناهمسان‌گردی به نظر پیچیده‌تر خواهد بود. برای محاسبه تنش برجا تحت شرایط همسان‌گرد و ناهمسان‌گرد می‌توان از روابط کاربردی پوروالاستیک<sup>۳</sup> [۱۵] و مدول برشی بهره برد. تخمین تنش بر مبنای مدول برشی به وسیله سینها براساس اختلاف در پارامترهای سفتی برشی و ارتباط آن با تنش‌های اصلی ارائه شده است [۱۶]. روابط پوروالاستیک نیز یکی از مهم‌ترین رویکردها در ارائه مدل مکانیکی زمین هستند که در تعیین تنش‌های افقی تحت شرایط همسان‌گرد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. روابط پوروالاستیک برای استفاده تحت شرایط ناهمسان‌گردی عرضی<sup>۴</sup> به وسیله هیگینس [۱۷] اصلاح شدند. در این رویکرد، از تغییرات پارامترهای سفتی الاستیکی ناشی از ناهمسان‌گردی ساختاری چاه برای پیش‌بینی تنش‌های افقی حداقل و حداکثر استفاده می‌شود. در این مقاله، دو روش تخمین تنش برجا به منظور ارزیابی مکانیکی یک چاه عمودی در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

### روش‌های تخمین تنش برجا

تنش برجا در چاه‌های نفتی از چند بخش مهم جهت مطالعه و بررسی تشکیل شده است که شامل حالت تنش، مقدار و جهت مؤلفه‌های تنش نسبت بهم است. یکی از نمودهای مطالعه تنش برجا در میادین هیدروکربوری، استفاده از نتایج آن در ساخت مدل مکانیکی مخازن است.

به‌طور کلی، حالات تنش با تانسور تنش نشان داده می‌شوند. در حوضه‌های رسوبی تانسور تنش به‌شکل ساده در خواهد آمد و به سه تنش عمودی، افقی ماکزیمم و مینیمم تبدیل خواهد شد [۳]. به علت اهمیت بالای این تنش‌ها، روش‌های مختلفی برای محاسبه آنها وجود دارد. این روش‌ها در علوم مهندسی سنگ به دو گروه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. از روش‌های کارآمد مستقیم می‌توان به شکست هیدرولیکی و بیش مغزه‌گیری اشاره کرد [۴ و ۵]. دو روش مذکور به عملیات میدانی نیاز دارند. از آنجا که این روش‌ها عمدتاً روش‌های مبتنی بر عملیات میدانی و برداشت مغزه‌های حفاری هستند؛ بیشتر به‌عنوان روش جایگزین مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. علاوه بر روش‌های ذکر شده، دو روش اثر کایزر<sup>۱</sup> و بازیابی کرنش غیرالاستیک<sup>۲</sup> از مهم‌ترین روش‌های مبتنی بر مغزه هستند که برای اندازه‌گیری مقادیر تنش‌های برجا در مخازن و چاه‌های نفتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، برای دستیابی به نتایج قابل قبول به ترکیبی از روش‌های مختلفی مانند شکست هیدرولیکی [۷]، شکست برشی چاه [۸]، انتشار آکوستیک [۹]، بازیابی کرنش غیرالاستیک [۱۰] و آنالیز منحنی کرنش تفاضلی [۱۱] نیاز خواهد بود. هادسون و همکاران [۱۲] و الجونگرن و همکاران [۱۳] اصول کلی روش‌های مختلفی که در بالا ذکر شده را به‌طور خلاصه بیان نمودند. اگرچه روش‌های مختلفی برای تعیین تنش برجا به روش مستقیم ارائه شده ولی برخی از محدودیت‌ها نظیر بحث اقتصادی، زمان و ابزارهای مورد نیاز باعث شده تا روش‌های دیگر مورد بررسی قرار گیرند. به‌علاوه هیچ‌یک از روش‌های مستقیم توانایی محاسبه تمام طول چاه را ندارند [۱۴]. بنابراین معادلات توسعه یافته‌ای به‌عنوان روش‌های غیرمستقیم برای پیش‌بینی تنش برجا تعریف شده‌اند. این معادلات قادر به تخمین مقادیر پیوسته تنش برجا خواهند بود و زمانی که با داده‌های حاصل از

1. Kaiser Effect  
2. Anelastic Strain Recovery  
3. Poroelastic Equation  
4. Transverse Isotropic

$$C_{66} = \rho V_{stoneley}^2 \quad (۶)$$

که در روابط ۱ تا ۳،  $A_E$  ضریب آکستوالاستیک است که به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$A_E = 2 + \left( \frac{C_{456}}{G} \right) \quad (۷)$$

در رابطه بالا،  $G$  مدول برشی سازند و  $C_{456}$  به عنوان پارامتر سفتی غیرخطی سازند تعریف می‌شود:

$$C_{456} = \frac{C_{155} - C_{166}}{2} \quad (۸)$$

با استفاده از ابزار دو قطبی برشی می‌توان ضریب آکستوالاستیک را از رابطه ۷ و تنش‌های افقی را از روابط ۱ تا ۳ محاسبه نمود. هرچند، از این سه رابطه تنها دو رابطه مستقل هستند. به علاوه وقتی بزرگی تنش افقی مینیمم و تنش روباره در دسترس باشد، می‌توان پارامتر  $A_E$  یا همان ضریب آکستوالاستیک را به صورت زیر محاسبه نمود:

$$A_E = \frac{C_{55} - C_{66}}{\sigma_v - \sigma_h} \quad (۱۰)$$

هنگامی که پارامتر آکستوالاستیک تعیین گردید، می‌توان بزرگی تنش افقی ماکزیمم را در عمق خاص با کمک رابطه ذیل محاسبه کرد که در آن  $\delta$  پارامتر تامسون می‌باشد

$$\frac{C_{66}}{C_{44}} = 1 + 2\delta \quad (۱۱)$$

#### روابط پوروالاستیک

رابطه بسیار رایج برای محاسبه مقدار تنش افقی موثر، رابطه تجربی پوروالاستیک<sup>۳</sup> است که در آن از فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکتونیک استفاده شده است [۲۲].

$$\sigma_h = \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot (\sigma_v - \alpha \cdot P_p) + \alpha \cdot P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\nu^2)} \cdot (\varepsilon_x + \nu \cdot \varepsilon_y) \quad (۱۲)$$

$$\sigma_H = \frac{\nu}{(1-\nu)} \cdot (\sigma_v - \alpha \cdot P_p) + \alpha \cdot P_p + \frac{E_{sta}}{(1-\nu^2)} \cdot (\varepsilon_y + \nu \cdot \varepsilon_x) \quad (۱۳)$$

که با در نظر گرفتن رفتار همسان‌گردی عرضی سنگ مخزن، بزرگی تنش برجا به وسیله روابط ذیل تعیین می‌گردد [۱۵].

در این بخش، تنش برجا تحت شرایط همسان‌گردی عرضی با استفاده از دو روش مدول برشی و روابط پوروالاستیک محاسبه و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

#### روش مبتنی بر مدول برشی

ناهمسان‌گردی صوتی چاه به وسیله ابزار دو قطبی صوتی<sup>۱</sup> و با استفاده از داده‌های امواج برشی محاسبه می‌گردد. در اغلب موارد فرض شده در غیاب ناهمسان‌گردی ذاتی، حداکثر سرعت موج خمشی به جهت حداکثر تنش فشاری که بر چاه وارد می‌شود وابسته است [۱۸ و ۱۹]. باید توجه داشت تنش‌های اطراف چاه بعد از عملیات حفاری از حالت طبیعی خارج می‌شوند. بنابراین، فواصل عمقی با لیتولوژی و دمای یکسان برای محاسبه تغییرات سرعت امواج باید انتخاب گردند. در غیر این صورت، تغییرات اندازه‌گیری شده سرعت، به بزرگی تنش سازند وابسته نخواهد بود. بر طبق مطالعات انجام شده در مورد سنگ‌های همگن مشخص شد، اختلاف موجود در مدول‌های برشی با اختلاف موجود در تنش‌های اصلی در ارتباط است [۲۰]. این ارتباط بین سه مدول برشی ( $C_{66}$  و  $C_{44}$ ،  $C_{55}$ ) و تنش‌های اصلی ( $\sigma_v$  و  $\sigma_h$ ،  $\sigma_H$ ) و همچنین ضریب آکستوالاستیک<sup>۲</sup> برقرار است. بنابراین بعد از تعیین تنش روباره و فشار منفذی به وسیله مدل مکانیکی زمین، تنش‌های افقی به عنوان تابع عمق، قابل پیش‌بینی هستند. سه مدول برشی به وسیله داده‌های صوتی چاه یعنی امواج استونلی ( $C_{66}$ ) و سرعت امواج برشی ( $C_{55}$  و  $C_{44}$ ) تعیین می‌گردند. روابط ذیل جهت تخمین تنش‌های افقی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰].

$$C_{44} - C_{66} = A_E (\sigma_v - \sigma_H) \quad (۱)$$

$$C_{55} - C_{66} = A_E (\sigma_v - \sigma_h) \quad (۲)$$

$$C_{55} - C_{44} = A_E (\sigma_H - \sigma_h) \quad (۳)$$

که در آن،  $C_{55}$ ،  $C_{44}$  و  $C_{66}$  به ترتیب مدول‌های برشی هستند که به وسیله روابط ذیل محاسبه می‌گردند:

$$C_{44} = \rho V_{S(slow)}^2 \quad (۴)$$

$$C_{55} = \rho V_{S(fast)}^2 \quad (۵)$$

1. Dipole Shear Sonic Imager (DSI)  
2. Acoustoelastic Coefficient  
3. Poroelastic

کم عمق به ضخامت ۸۲۱ m و رخساره‌ای دیگری شامل آهک‌های لایه نازک و تیره رنگ است. سازند سروک توالی ضخیمی از سنگ‌های کربناته با سن آلبین-تورونین است و یکی از مخازن مهم هیدروکربوری در جنوب ایران محسوب می‌شود [۲۵]. شکل ۱ نقشه گسلی ایران را نشان می‌دهد که در آن رژیم گسلی معکوس، رژیم غالب است. از آنجا که بسیاری از مخازن نفتی و گازی ایران در بخش جنوبی و جنوب غربی واقع شده‌اند، حالات تنش نشان می‌دهد این رژیم گسلی، مسئله اصلی ناپایداری دیواره چاه‌های عمودی این منطقه است. بنابراین، ساخت مدل مکانیکی دقیق از مخازن نفتی ایران یک گام مهم در جهت کاهش مشکلات ناپایداری چاه قبل از حفاری خواهد بود.

#### داده‌ها و مغزه‌های مورد استفاده در این مطالعه

در میدان نفتی مورد مطالعه تعدادی چاه جهت استخراج مواد هیدروکربوری حفر شده است که در تحقیق حاضر از اطلاعات یک چاه برای مطالعه موردی و بررسی پایداری دیواره چاه استفاده شده است.

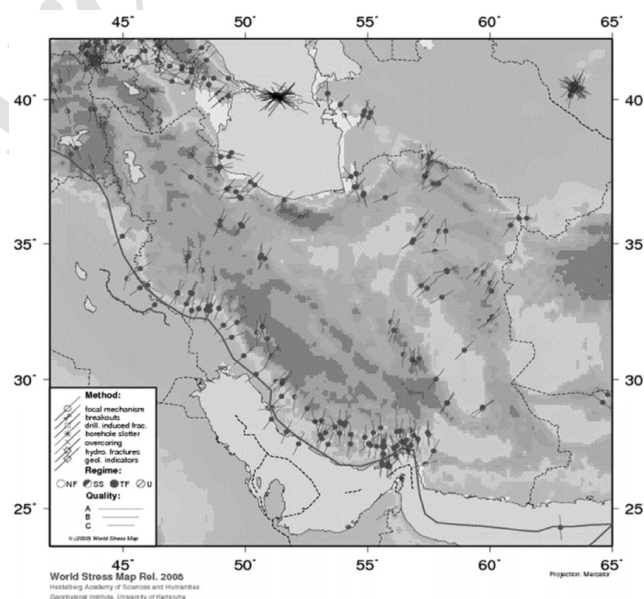
$$\sigma_h = \frac{E_{11}}{E_{33}} \frac{\nu_{31}}{(1-\nu_{12})} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{11}}{(1-\nu_{12}^2)} \varepsilon_h + \frac{E_{11}\nu_{12}}{(1-\nu_{12}^2)} \varepsilon_H \quad (14)$$

$$\sigma_H = \frac{E_{11}}{E_{33}} \frac{\nu_{31}}{(1-\nu_{12})} (\sigma_v - \alpha P_p) + \alpha P_p + \frac{E_{11}}{(1-\nu_{12}^2)} \varepsilon_H + \frac{E_{11}\nu_{12}}{(1-\nu_{12}^2)} \varepsilon_h \quad (15)$$

در روابط بالا،  $E_{11}$  و  $E_{33}$  مدول یانگ عمودی و افقی،  $\nu_{31}$  و  $\nu_{12}$  نسبت پواسون عمودی و افقی،  $S_v$  تنش روباره،  $\alpha$  ضریب بایوت،  $P_p$  فشار منفذی و  $\varepsilon_h$  و  $\varepsilon_H$  پارامترهای کرنش تکتونیکی می‌باشند [۲۳]. در ادامه موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی میدان نفتی که چاه مورد مطالعه در آن قرار گرفته ارائه می‌گردد.

#### موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه

چاه مورد بررسی در این مطالعه در میدان نفتی واقع در جنوب باختری ایران و در نزدیکی مرز ایران و عراق است. سازندهای این میدان نفتی به ترتیب سازندهای آسماری، جهرم، پابده، گورپی، ایلام، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان، گرو و گوتنجان هستند [۲۴]. بخش عمده مخزن در سازند سروک واقع شده است که شامل یک رخساره



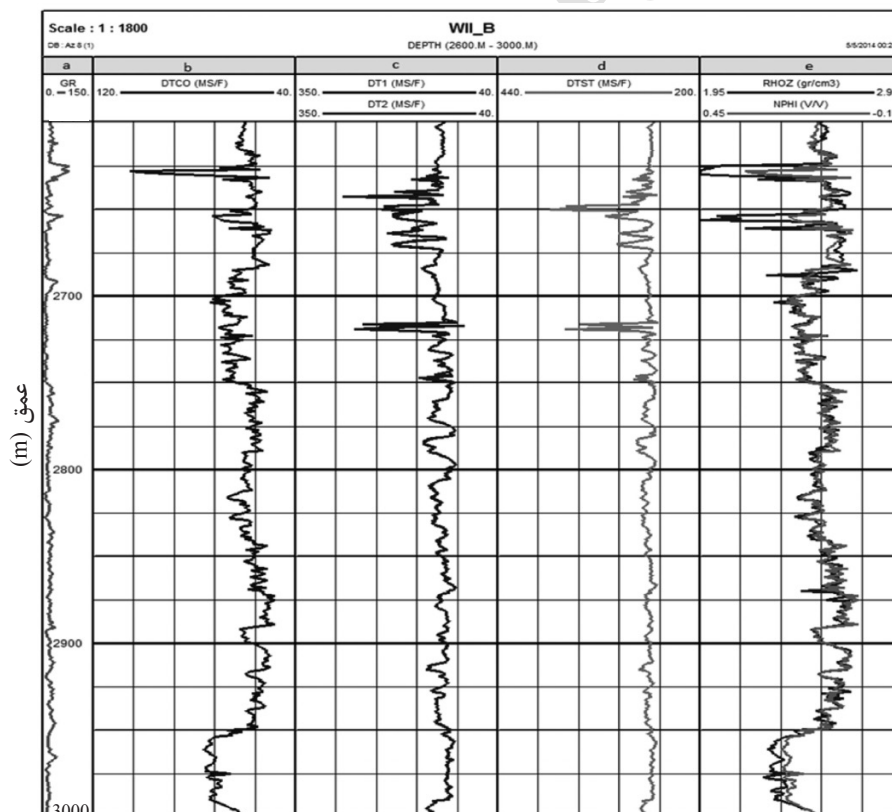
شکل ۱ نقشه تنش ایران که در آن رژیم تنش و جهت تنش افقی ماکزیمم مشخص شده است [۲۶]

استونلی و ستون (e) تخلخل نوترونی و چگالی نشان داده شده است.

### آنالیز مکانیکی

مدل مکانیکی زمین به‌طور گسترده‌ای در صنعت نفت و گاز مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل ترکیبی از ویژگی‌های مکانیکی زمین و تنش‌های برجای موثر است [۲۷]. مدل مکانیکی زمین با استفاده از ویژگی‌های الاستیکی و مکانیکی استخراج شده می‌تواند وضعیت تنش را از داده‌های موجود در یک میدان نفتی محاسبه کند [۱۴]. در ادامه ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌های مخزن تحت شرایط همسان‌گردی و همسان‌گردی عرضی محاسبه می‌گردد.

در چاه مورد مطالعه که اصطلاحاً به آن چاه B گفته می‌شود، نمودارهای چاه‌پیمایی مانند نمودار گاما (GR)، چگالی (RHOZ)، تخلخل نوترونی (NPHI)، زمان گذر امواج صوتی برشی ( $DT_1$  و  $DT_2$ )، زمان گذر امواج صوتی فشاری (DTCO)، زمان گذر امواج استونلی (DTST)، نمودار تصویرری صوتی دوقطبی (DSI)، نمودار کالیپر (CAL) برداشت شده است. افزون بر نمودارهای چاه‌پیمایی، داده‌های تست سازند (MDT)<sup>۱</sup> و تست نشت (LOT)<sup>۲</sup> نیز برداشت شده است. در این تحقیق تلاش می‌شود تنش‌های برجا تحت شرایط همسان‌گردی عرضی به‌کمک داده‌های فوق محاسبه شوند. شکل ۲ نمودارهای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد که در آن ستون (a) عمق چاه و نمودار گاما، ستون (b) و (c) زمان گذر امواج برشی و فشاری، ستون (d) موج



شکل ۲ تغییرات نمودار گاما ستون (a)، صوتی ستون (b)، زمان گذر امواج صوتی برشی ستون (c)، زمان گذر امواج استونلی ستون (d) و تخلخل نوترونی و چگالی ستون (e) نسبت به عمق چاه مورد مطالعه

1. Modular Dynamic Tester  
2. Leak off Test

ستون (b) شکل ۳ پارامترهای الاستیکی تخمین زده شده توسط نمودارهای چاه را نشان می‌دهند. در این بخش، مدول یانگ استاتیکی ارائه شده توسط نگار صوتی، به کمک آزمایش‌های استاتیکی که روی نمونه مغزه‌های تهیه شده از اعماق مختلف چاه در شکل ۴ انجام شده کالیبره شده است. برآزش خوب داده‌های آزمایشگاهی و نمودار تخمینی حاکی از آن است که این روش به خوبی توانسته نتایج را اعتبارسنجی کند. در ستون (c) شکل ۳ نسبت پواسون با میانگین حدود ۰/۳ نشان داده شده است. مقاومت فشاری تک محوره (UCS) <sup>۱</sup> به کمک روابط بردفورد و همکاران [۲۹] قابل محاسبه است که مدول یانگ استاتیکی را به مقاومت فشاری تک محوره مرتبط می‌سازد. تخمین نمودار مقاومت فشاری تک محوره به وسیله داده‌های تست سه محوره کالیبره شده است.

### ویژگی‌های مکانیکی سازند تحت شرایط همسان‌گردی

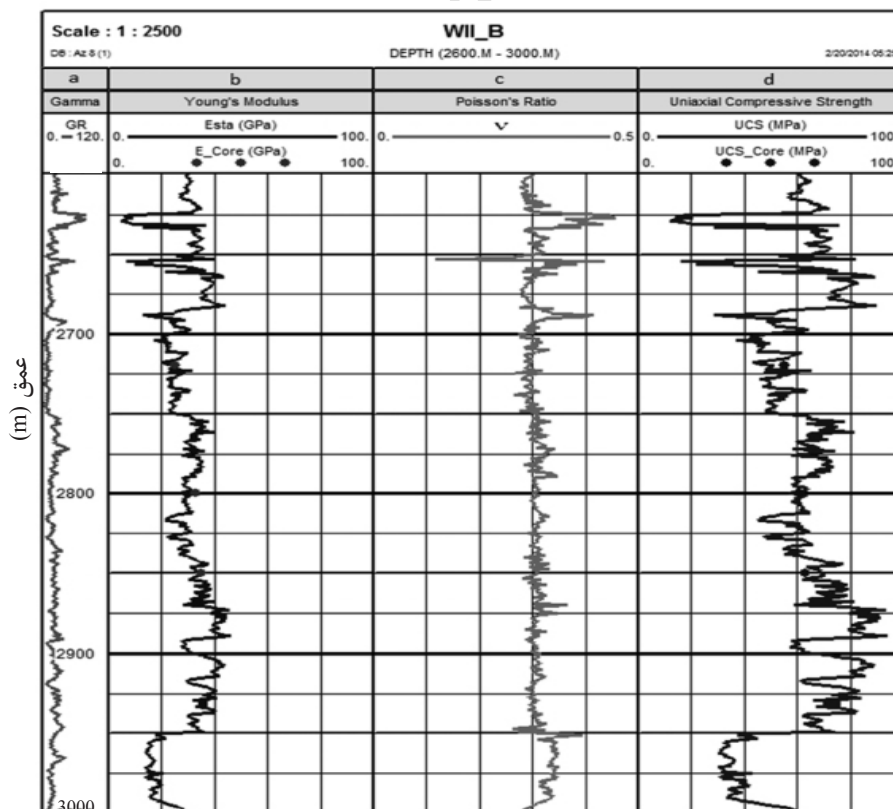
برای تعیین ویژگی‌های مکانیکی سازندها، پارامترهای الاستیکی دینامیکی سنگ مخزن به صورت تابعی از سرعت امواج فشاری، سرعت امواج برشی و چگالی سازند تخمین زده می‌شود.

$$E_{Dyn} = \rho V_s^2 \frac{3 \left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 4}{\left( \frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1} \quad (19)$$

$$V_{Dyn} = \frac{1}{2} \frac{(V_p - V_s)^2 - 2}{2(V_p - V_s)^2 - 1} \quad (20)$$

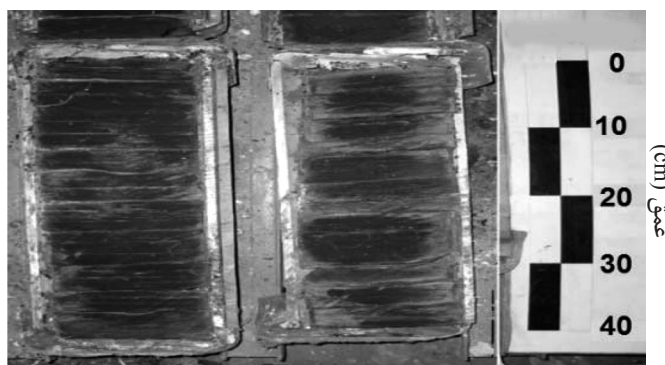
که در آن،  $E_{Dyn}$  و  $V_{Dyn}$  به ترتیب مدول دینامیکی یانگ و نسبت پواسون سنگ مخزن هستند. مدول دینامیکی موجود در رابطه ۱۹ تعیین شده، به کمک رابطه ۲۱ به مدول استاتیکی تبدیل می‌شود [۲۸]:

$$E_{sta} = 0.77 E_{dyn} + 0.02 \quad (21)$$



شکل ۳ ستون (b) مدول یانگ که با نمونه‌های مغزه کالیبره شده نسبت پواسون در ستون (c) و در ستون (d) مقاومت فشاری تک محوره که کالیبره شده تحت شرایط همسان‌گردی عرضی نشان داده شده است

1. Uniaxial Compressive Strength



شکل ۴ مغزه‌های تهیه شده از اعماق مختلف در چاه مورد بررسی

داخلی تخمین زده شده در در ستون c شکل ۵ و نشان داده شده است. پارامتر موثر دیگر، تنش عمودی اصلی ( $\sigma_v$ ) است که به وزن روباره اطلاق می‌گردد و از طریق انتگرال‌گیری از چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق مورد نظر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_v = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \bar{\rho} g z \quad (24)$$

که در آن،  $p(z)$  چگالی توده سنگ در عمق  $Z$ ،  $g$  شتاب گرانش و  $\bar{\rho}$  چگالی متوسط لایه‌های سنگی می‌باشد. در اعماق مناسب جهت اکتشاف نفت، تنش عمودی تغییراتی بین ۱۸/۱ تا ۲۲/۶ kPa/m دارد [۳۱].

#### ویژگی‌های مکانیکی سازند تحت شرایط همسان‌گردی عرضی

برای تعیین ویژگی‌های الاستیکی سازندها تحت شرایط همسان‌گردی عرضی، پنج پارامتر سفتی ( $C_{ij}$ ) تعریف می‌گردد. پارامترهای سفتی به کمک سرعت امواج فشاری و برشی در جهات افقی و عمودی تعیین می‌گردند. برای رسیدن به این هدف، دو فرضیه به منظور تخمین پارامترهای ناهمسان‌گردی مطرح شده است. در بخش اول فرض شد ناهمسان‌گردی مشاهده شده در بخشی از امواج برشی تنها به دلیل ویژگی‌های لایه‌بندی شیل بوده، بنابراین سنگ پس‌زمینه همسان‌گرد در نظر گرفته شد که به عنوان نتیجه این فرضیه، در نظر گرفته شده است.

$C_{12} = C_{13}$  در نظر گرفته شده است.

نتایج نشان می‌دهد نمودار تخمین زده شده به خوبی با تست مغزه همخوانی دارد.

در مرحله بعدی، فشار منفذی یکی از مهم‌ترین پارامترهای درگیر در ساخت مدل مکانیکی تخمین زده می‌شود. تغییرات فشار منفذی به کمک رابطه ایتون محاسبه می‌گردد:

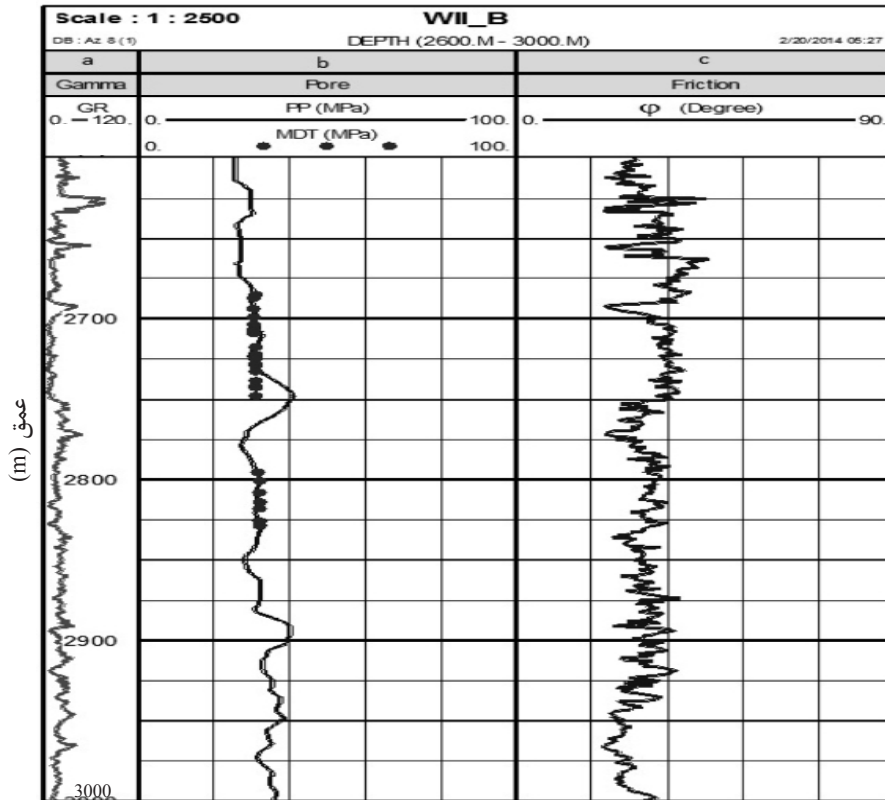
$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{pn}) \left( \frac{NCT}{\Delta t} \right)^3 \quad (22)$$

که در رابطه بالا،  $P_{pg}$  گرادیان فشار منفذی سازند؛  $P_{gn}$  گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیکی (psi/ft) (۰/۴۵)؛  $OBG$  گرادیان تنش روباره و  $NCT$  زمان گذر امواج صوتی یا کندی امواج تحت فشار نرمال است که از طریق برازش منحنی بر زمان عبور موج فشاری به دست می‌آید، در حالی که  $\Delta t$  زمان گذر امواج صوتی به دست آمده از نمودار صوتی است. نتایج به دست آمده فشار منفذی به کمک نمودار صوتی، به وسیله داده‌های MDT کالیبره شده است. همان‌طور که در ستون b شکل ۵ مشاهده می‌شود مقادیر تخمینی با داده‌های تست سازند کالیبره شده‌اند. که نتایج رضایت بخش بوده است. برای تخمین زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) از رابطه پلامب [۳۰]، استفاده شده است:

$$\phi = 26.5 - 37.4 \times (1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (23)$$

که در آن،  $NPHI$  نمودار تخلخل و  $V_{shale}$  به وسیله نمودار گاما محاسبه می‌گردد. نتایج زاویه اصطکاک

1. Normal Compacted Trend Line



شکل ۵ نمودار فشار منفذی ستون (b) که به وسیله داده‌های تست سازند کالیبره شده و ستون (c) زاویه اصطکاک داخلی را نشان می‌دهد

مشابهی را نسبت به عمق طی می‌کنند. در شکل ۶، مدول یانگ دینامیکی و نسبت پواسون تحت شرایط همسان گرد آورده شده که با نتایج بخش شرایط ناهمسان گرد قابل مقایسه هستند. نتایج نشان می‌دهد مدول یانگ محیط همسان گرد ( $E_{dyn}$ ) بسیار نزدیک به مدول یانگ عمودی ( $E$ ) می‌باشند، به جزء در فواصلی که لایه‌بندی از شیل تشکیل شده است. سازندها تحت شرایط همسان گردی عرضی قرار دارند. بنابراین، مقاومت در جهت‌های مختلف یکسان نیست. با این حال، برای محاسبه مقاومت فشاری تک محوره ارتباط بین مدول یانگ عمودی و مقاومت فشاری تک محوره بر طبق آنالیز مغزه‌های موجود ایجاد گردید. شکل ۷ مقاومت فشاری تک محوره را نشان می‌دهد. بر طبق این شکل، روابط زیر بین مدول یانگ عمودی و مقاومت فشاری تک محوره بر قرار خواهد بود.

در فرضیه دوم، پارامتر ناهمسان گردی تامسون ( $\delta$ ) [۳۲] نزدیک به صفر در نظر گرفته شده است. برطبق رابطه تامسون، پارامتر  $\delta$  به کمک رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

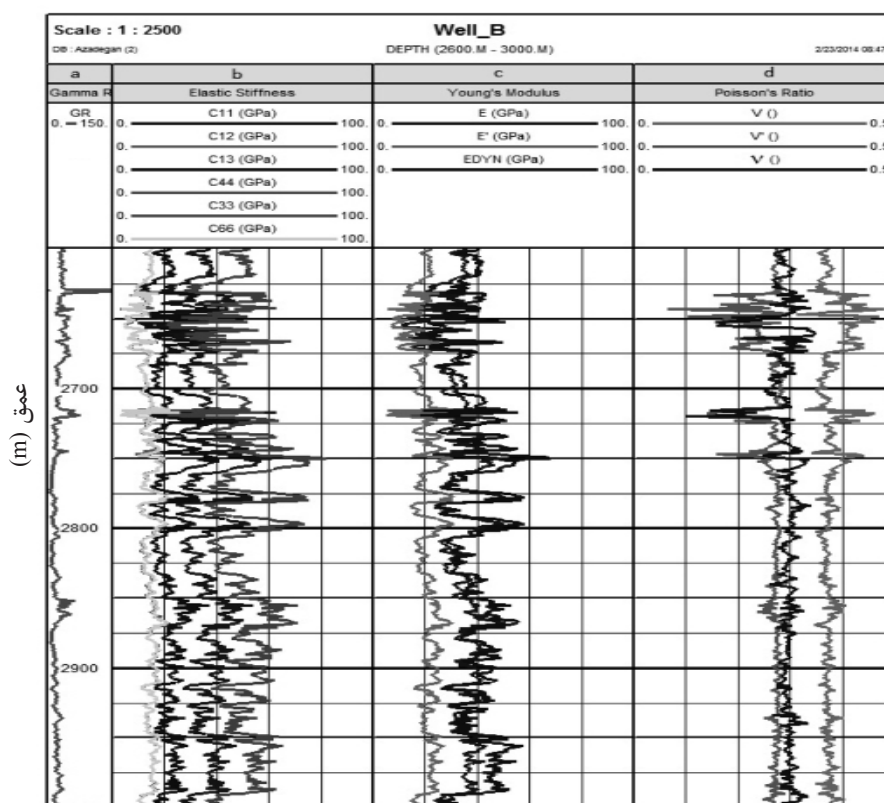
$$\delta = \frac{(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33} - C_{44})} \quad (25)$$

که اگر پارامتر  $\delta$  به صفر میل کند رابطه ۲۵ به شکل زیر در خواهد آمد:

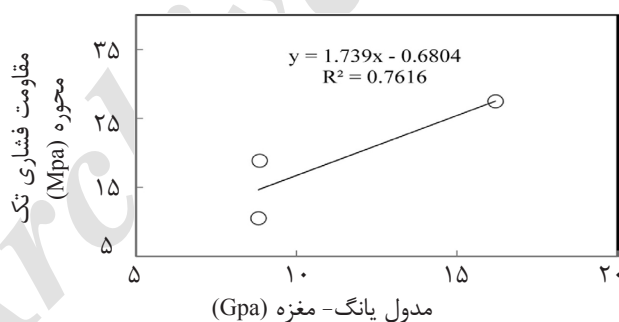
$$C_{13} + 2C_{44} - C_{33} = 0 \quad (26)$$

بنابراین از پنج پارامتر مستقل برای تخمین پارامترهای الاستیکی، سه پارامتر  $(C_{33}, C_{44} (=C_{55}), C_{66})$  مستقیماً به وسیله سرعت امواج فشاری و برشی محاسبه می‌شوند. دو پارامتر دیگر یعنی  $C_{12}$  با  $C_{13}$  به ترتیب به کمک رابطه ۲۶ و فرضیه همسان گرد بودن محیط پس‌زمینه قابل محاسبه می‌باشند. شکل ۶ پارامترهای سفتی، نسبت پواسون، مدول یانگ افقی و عمودی را نشان می‌دهد. که نتایج نشان می‌دهد هر ۶ پارامتر سفتی روند





شکل ۶ تعیین پارامترهای سفتی در ستون (b) و پارامترهای الاستیک تحت شرایط همسان‌گردی عرضی مدول یانگ دینامیکی و استاتیکی و نسبت پواسون در ستون‌های (c) و (d) نشان داده شده است.



شکل ۷ ارتباط بین مدول یانگ عمودی و مقاومت فشاری تک محوره براساس آنالیز مغزه

پوروالاستیک مورد ارزیابی قرار بگیرند.

### روش بر مبنای مدول برشی

برای تعیین تنش افقی ماکزیمم و مینیمم به کمک روابط ۱ تا ۳، تعیین پارامتر  $A_E$  ضروری است. مقدار این پارامتر از تست نشت ( $A_E=0.52$ ) در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترهای موجود در روابط ۱ تا ۳ یعنی پارامترهای سفتی الاستیکی و تنش عمودی قبلاً محاسبه شده‌اند. بنابراین تنش افقی ماکزیمم و مینیمم قابل محاسبه هستند.

$$UCS=1.739E-0.6804$$

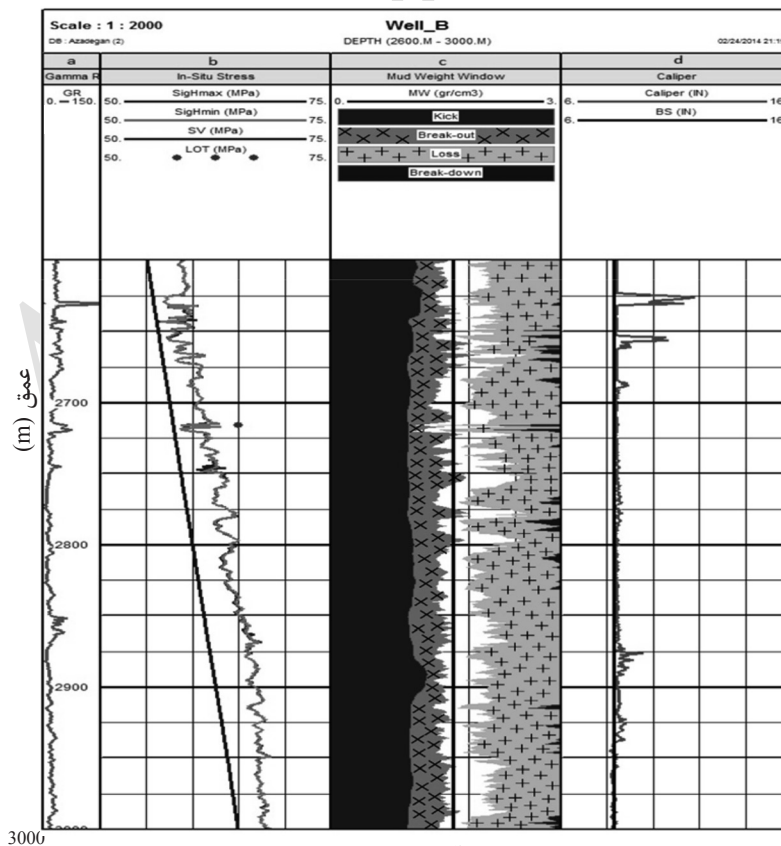
(۲۷)

### بحث و نتایج

برطبق نتایج به دست آمده از آنالیز مکانیکی تحت شرایط همسان‌گردی عرضی، امکان مقایسه ضریب بهره‌وری مدول برشی و روابط پوروالاستیک در پیش‌بینی تنش برجا وجود خواهد داشت. از معیار موهر- کلمب برای پیش‌بینی شکستگی برشی مشاهده شده در نمودار کالیپر استفاده شد تا نتایج تخمین تنش برجا به وسیله دو روش مدول برشی و

توسط معیار موهر- کولمب با استفاده از تنش برجا را با شکستگی برشی مشاهده شده در نمودار کالیپر مقایسه کرد. در شکل ۸، ستون (a) عمق و نمودار گاما را نشان می‌دهد. در ستون (b) و (c) تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم، تنش عمودی و پنجره ایمن گل حفاری به ترتیب نمایش داده شده است. تنش افقی به‌کمک تک داده تست نشست کالیبره شده که نتیجه قابل قبولی را ارائه نکرده است. ناحیه سیاه در پنجره گل حفاری نشان دهنده ضربه سازند در سازند می‌باشد. از طرف دیگر، اگر وزن گل حفاری از ناحیه حاوی علامت به‌علاوه یا ضربدر تجاوز کند پدیده هرزروی گل را به‌دنبال خواهد داشت که نهایتاً به شکست چاه منجر می‌گردد. بنابراین، ناحیه سفید در وسط پنجره گل حفاری منطقه ایمن جهت حفاری به‌شمار می‌رود. نمودار کالیپر مربوط به چاه B در ستون (d) شکل ۸ نشان داده شده است.

رابطه مذکور، به‌دلیل داشتن مقدار کمتر از ۳ نسبت  $C_{66}/C_{44}$ ، روشی کارآمد نیست. از این رو، با توجه به مطالعه سینها و همکاران، یک محدوده برای  $C_{66}$  در نظر گرفته شد و مقدار این پارامتر چندین بار برای پیدا کردن مقدار مناسب بین تنش افقی حداقل و تست نشست تغییر داده شد [۲۰]. ستون (b) شکل ۸ رژیم تنش به‌دست آمده از روابط بر مبنای مدول برشی را نشان می‌دهد. با بررسی در این ستون و رژیم تنش می‌توان پی‌برد رژیم گسل منطقه از نوع معکوس ( $\sigma_v < \sigma_{hmin} < \sigma_{Hmax}$ ) بوده، که برطبق نقشه گسل ایران این نتیجه منطقی به‌نظر می‌رسد. همان‌طور که از ستون (b) شکل ۸ بر می‌آید مقادیر تنش افقی حداکثر و حداقل به هم نزدیک هستند ولی مقدار میانگین تنش افقی حداکثر کمی بیشتر از میانگین تنش افقی مینیمم است. از این رو، با یک بینش بهتر نسبت به دقت و صحت نتایج، می‌توان داده‌های شکستگی برشی پیش‌بینی شده



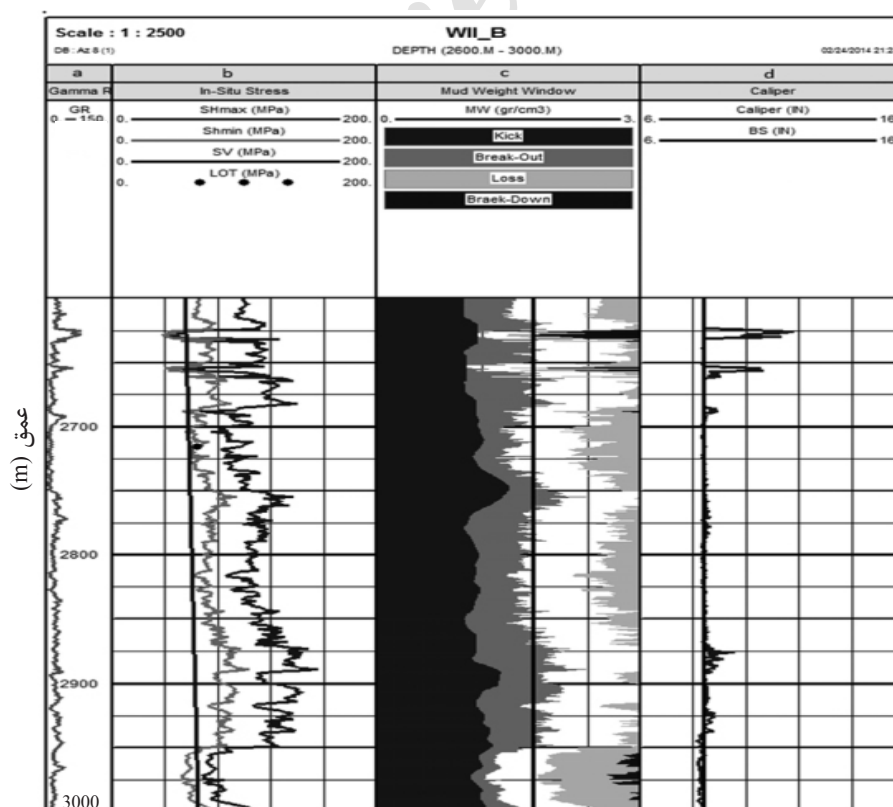
شکل ۸ رژیم تنش برجا و داده‌های تست نشست در ستون (b) و آنالیز پنجره ایمن گل حفاری محاسبه شده با روابط مبتنی بر مدول برشی در ستون (c) و نمودار کالیپر که در ستون (d) نشان داده شده است

نتایج برآورد تنش برجا با استفاده از روابط پوروالاستیک در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که رژیم گسل منطقه از نوع معکوس ( $\sigma_v < \sigma_{hmin} < \sigma_{Hmax}$ ) است. از آنجایی که رژیم گسلی معکوس، رژیم تنش غالب در جنوب ایران به‌شمار می‌رود بنابراین نتایج ارائه شده در این بخش نیز به نظر قابل اعتماد هستند. همچنین، نتایج با گزارشات میدانی و نمودار کالیپر اعتبارسنجی شده است. شکل ۹ آنالیز پنجره گل حفاری را با استفاده از معیار موهر-کلمب نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، به نظر می‌رسد روابط پوروالاستیک نسبت به روش دیگر مقدار تنش برجا را بهتر تخمین زده و همچنین نتایج حاصل از آنالیز پنجره گل حفاری نیز بر مناسب بودن این روابط اشاره دارد.

به‌طور کلی هدف از این مطالعه پیش‌بینی شکستگی برشی با استفاده از روابط مدول برشی بود. نکته منفی معیار موهر-کلمب این است که این معیار تاثیر تنش میانی را در نظر نمی‌گیرد. برآورد تنش‌های برجا به نظر غیر قابل اعتماد می‌رسد زیرا همخوانی خوبی با نقاط کالیبراسیون دارد ولی برای به‌دست آوردن نتایج بهتر همچنان باید تلاش کرد.

### روش پوروالاستیک

برای تخمین تنش‌های افقی ماکزیمم و مینیمم از روابط ۱۴ و ۱۵ استفاده شده است. پارامتر  $\alpha$  نیز یک در نظر گرفته می‌شود. بزرگی پارامترهای فشار تکتونیکی ( $\epsilon_H$  و  $\epsilon_h$ ) با تغییر در مقادیر آنها تا رسیدن به نتیجه مناسب که بین داده‌های تست نشت و تنش افقی مینیمم و ماکزیمم قرار دارد، محاسبه می‌گردد. این تنها راه محاسبه این مقادیر است.



شکل ۹ رژیم تنش برجا و داده‌های تست نشت (LOT) در ستون (b) و آنالیز پنجره ایمن گل حفاری محاسبه شده با روابط پوروالاستیک در ستون (c) و نمودار کالیپر که در ستون (d) نشان داده شده است

## نتیجه گیری

اعتماد نیست زیرا مدل طراحی شده با نمودار کالیپر همخوانی مناسبی ندارد و فواصلی که دچار شکستگی برشی شده را به خوبی نشان نمی دهد. اما نتایج به دست آمده از روابط پوروالاستیک دقت بیشتری در محاسبه تنش برجا داشته است. مدل مکانیکی طراحی شده به کمک روابط پوروالاستیکی و معیار موهر- کلمب نشان داد در برخی فواصل (۲۷۵۰ و ۲۸۵۰ تا ۲۹۵۰ m) چاه دچار شکستگی برشی می شود و نیاز به نگهداری دارد.

نتایج هر دو روش مدول برشی و پوروالاستیک نشان داد رژیم گسل منطقه از نوع معکوس بوده (یعنی  $\sigma_v < \sigma_{hmin} < \sigma_{Hmax}$ ) که بر طبق نقشه گسل ایران این نتیجه منطقی به نظر می رسد. مدل های مختلف مکانیکی تحت شرایط همسان گردی عرضی و همسان گردی به ترتیب برای مدول های برمی نای امواج برشی و روابط پوروالاستیک ساخته شد. نتایج به دست آمده به وسیله روش مدول برشی قابل

## مراجع

- [1]. Berard T., Sinha B., VanRuth P., Dance T., John Z. and Tan P., "Stress estimation at the Otway CO<sub>2</sub> storage site," Australia: Presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, pp. 1–26. 2008.
- [2]. Barton A., Catillo A., Moss B., Peska P. and Zoback D., "Charactering the full stress tensor based on observation of drilling induced wellbore failures vertical and inclined borehole leading to improved wellbore stability and permeability prediction," APPEA Journal, pp. 466-488, 1988.
- [3]. Tingay P., Hillis R., Morley K., King C., Swarbrick E. and Damit R., "Present-day stress and neotectonics of Brunei: implications for petroleum exploration and production," AAPG Bull. Vol. 93, No. 1, pp. 75–100, 2009.
- [4]. Ulusay R. and Hudson J. A., "The Complete ISRM Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring," 1974–2006. ISRM, 2007.
- [5]. Zang A. and Stephansson O., "Stress field of the earth's crust," Springer, p. 322, 2010.
- [6]. Zhang L. and Radha K. C., "Stability analysis of vertical boreholes using a three- dimensional Hoek–Brown strength criterion. In: Proceedings of the GeoFlor- ida," West Palm Beach, Florida, 2010.
- [7]. Peng H., Xiu M. and Jiang J., "Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the Northern Longmen Mountains," J. Geomech. (in Chinese with English abstract), Vol. 15, pp. 114-130, 2009.
- [8]. Cui W., Wang J., Li W., Tang M. and Sun S., "Wellbore breakouts of the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) and determination of the present tectonic stress state," Tectonophysics Vol. 475, pp. 220–225, 2009.
- [9]. Wang J., Li W., Cui W. and Ding C., "Determination of the present crustal stress state by using acoustic emission in the main borehole of the Chinese continental scientific drilling," Geol. China (in Chinese with English abstract), Vol. 32, No. 2, pp. 259–264, 2005.
- [10]. Lin W., Kwasniewski M., Imamura T. and Matsuki K., "Determination of three dimensional in-situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth," Tectonophysics, Vol. 426, pp. 221–238, 2006.
- [11]. Simmons G., Siegfried W. and Feves M., "Differential strain analysis: a new method for examining cracks in rocks," Journal of Geophysical Research, Vol. 79, No. 29, pp. 4383-4385, 1974.

- [12]. Hudson J. A., Cornet F. H. and Christiansson R., "ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 1: strategy for rock stress estimation," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 40, pp. 991–998, 2003.
- [13]. Ljunggren C., Chang Y., Janson T. and Christiansson R., "An overview of rock stress measurement methods," Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 40, pp. 75–89, 2003.
- [14]. Rasouli V., Zacharia J. and Elike M., "The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: A case study in Blacktip field, North Australia," J. Petrol. Sci. Eng., Vol. 76, pp. 37-50, 2011.
- [15]. Higgins S., Goodwin S. and Donal S., "Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale," SPE 115736, 2008.
- [16]. Sinha B. K., "Determining stress parameters of formations from multi-mode velocity data," U.S. Patent No. 6, 351,991. 5 Mar. 2002.
- [17]. Higgins S., Goodwin S. and Donal S., "A anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale," SPE 115736, 2008.
- [18]. Esmersoy C., Koster K., Williams M., Boyd A. and Kane M., "Dipole shear anisotropy logging": 64<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, pp. 1139-1142, 1994.
- [19]. Mueller M., Boyd A. and Esmersoy C., "Case studies of the dipole shear anisotropy log": 64<sup>th</sup> Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys, Expanded Abstracts, pp. 1143-1146, 1994.
- [20]. Sinha K., Wang J., Kisra S., Li J., Pistre V., Bratton T. and Sanders M., "Estimation of formation stresses using borehole sonic data," SPWLA 49<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, May 25-28, 2008.
- [21]. Boness L. and Zoback D., "A multiscale study of the mechanisms controlling shear velocity anisotropy in the san andreas fault observatory at depth," Geophysics, Vol. 71, PP. 131–146, 2006.
- [22]. Zoback D., "Reservoir geomechanic," Cambridge University Press, p. 450, 2007.
- [23]. Zoback D., Barton A., Brudy M., Castillo A., Finkbeiner T., Grollimund R., Moos B., Peska P., Ward D. and Wiprut J., "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells," Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 40, pp. 1049-1076, 2003.
- [24]. Heydari M. and Rezaee M., "Interpretation of 2-D reflection seismic data and seismic stratigraphy of darquain field," SW of Iran. Petroleum Engineering and Development Company, pp. 1-87, 2003.
- [25]. Eghtesadi T., Kohansal Ghadimvand N. and Taati F., "Facies analysis, depositional environments and diagenesis of the Sarvak formation in Azadegan oil field," The 1<sup>st</sup> International Applied Geological Congress, Department of Geology, Islamic Azad University Mashad Branch, Iran, 26-28 April, 2010.
- [26]. Heidbach O., Tingay M., Barth A., Reinecker J., Kurfe D. and Muller B., "The World Stress Map database release," 2008
- [27]. Bratton T., Bricout V., Lam R., Plona T., Sinha K., Tagbor A., Venkitaraman T. and Borbas T., "Rock strength parameters from annular pressure while drilling and dipole sonic dispersion analysis," Presented at the SPWLA, 45<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, Society of Petrophysicists & Well Log Analysts, pp. 1–14. 2004.
- [28]. Eissa A. and Kazi A., "Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks," Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 25, No. 6, PP. 479– 482, 1988.
- [29]. Bradford R., Fuller J., Thompson J. and Walsgrove R., "Benefits of assessing the solids production risk in a

*North Sea reservoir using elastoplastic modeling,*" SPE/ISRM Eurock 98 held in Trondheim, Norway, Vol. 10, pp. 261–269, 1998.

[30] Plumb A., "*Influence of Composition and Texture on the Failure Properties of Clastic Rocks*", Eurocks 94, Rock Mechanics in Petroleum Engineering Conference, Delft, Netherlands, pp. 13-20, 1994.

[31]. Fjaer E., Holt M., Horsrud P., Raaen M. and Risnes R., "*Geological aspects of petroleum related rock mechanics*," Development of Petroleum Science, Vol. 33, pp. 89–108, 1992.

[32]. Thomsen L., "Weak elastic anisotropy," Geophysics Journal, Vol. 51, pp. 1954–1966. 1986.

Archive of SID