

پیش‌بینی ماسه‌دهی با استفاده از نگارهای چاه در یکی از میادین نفتی جنوب ایران

شاهو ملکی^{*}، علی مرادزاده^۲، رضا قوامی ریابی^۳، فرهاد صادق‌زاده^۴ و رامین محمدی^۱

۱- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

۳- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۴- شرکت نفت و گاز اروندان، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۷

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۱۵

چکیده

ماسه‌دهی در خلال استخراج و بهره‌برداری از چاه‌های نفتی یکی از مشکلات بسیار مهم در به تأخیر انداختن عملیات بهره‌برداری است. روش‌های مختلفی برای پیش‌بینی ماسه‌دهی در درون چاه‌هایی که سنگ مخزن آن‌ها کربناته یا ماسه سنگی است، ارائه شده است. این روش‌ها معمولاً شامل آزمایشات مکانیک سنگ (مانند آزمایش مقاومت تراکمی تک محوره و یا سه محوره)، آزمایشات کانی‌شناسی و یا استفاده از نگارهای چاه است. آزمایشات مکانیک سنگ، آزمایشات کانی‌شناسی و یا آزمایشات دیگری که برای تجزیه و تحلیل چاه به کار می‌روند نسبت به نگارهای متداول چاه‌نگاری بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بردار هستند. از این‌رو در مقاله حاضر، از نگارهای چاه برای پیش‌بینی ماسه‌دهی یکی از چاه‌های نفتی در جنوب ایران استفاده شده است. برای این منظور، با در اختیار داشتن نگارهای متداول پتروفیزیکی از جمله نگار صوتی، ابتدا مدول‌های الاستیک سنگ و مقاومت فشاری تک محوره و سپس مقدار فشار منفذی نیز محاسبه شده است و این مقادیر با مقادیر واقعی کالیبره گردید. از آنجایی که تعیین مقدار تنش‌های برجا در اعماق زیاد برای پیش‌بینی ماسه‌دهی چاه مورد مطالعه ضروری بود با در دست داشتن مقادیر به‌دست آمده از مدول‌های الاستیک، مقاومت فشاری تک محوره و فشار منفذی، تنش‌های برجای افقی و تنش عمودی محاسبه شد. در نهایت با استفاده از معیار شکست موهر-کلمب و نگار کالیپر، پنجره بهینه گل برای پیش‌بینی زون‌های دارای پتانسیل ماسه‌دهی، محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: ماسه‌دهی، نگارهای چاه، تنش، معیار شکست، پنجره بهینه گل

مقدمه

ذرات ریز جامد (ماسه‌دهی) می‌شوند [۱ و ۲]. این سنگ‌ها که از لحاظ زمین‌شناسی معمولاً جوان هستند، دلیل عمده سست بودنشان فرآیندهای طبیعی سیمانی شدن دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ و ته نشینی مواد معدنی می‌باشد که به خوبی انجام نشده است [۳].

طبق تحقیقاتی که صورت گرفته حدود ۷۰٪ از سنگ مخزن‌های تشکیل‌دهنده مخازن هیدروکربنی در دنیا تا حدودی سست هستند و باعث تولید

رابطه کرج^{۱۴} را نام برد [۱۶]. بعد از محاسبه تنش‌های اصلی می‌توان با استفاده از معیارهای شکست سنگ، پدیده تولید ماسه را در چاه‌های مورد مطالعه بررسی کرد و محل‌های دقیق آن‌ها را برای نصب پکرها پیش‌بینی کرد.

در کل، تعیین تنش‌های اصلی به‌صورت مستقیم (یعنی از طریق آزمایشات مکانیک سنگی) هزینه بر، وقت‌گیر، پر خطر و تعداد این آزمایشات محدود و برای عمق‌های خاصی امکان‌پذیر است (یعنی به‌صورت گسسته بوده) و همچنین این آزمایشات برای تعدادی از چاه‌های نفتی و برخی میادین قابل انجام نیست. از این‌رو، هدف از مطالعه حاضر تعیین این تنش‌ها به‌صورت غیر مستقیم (از نگارهای چاه) و کاربرد آن‌ها در بررسی ماسه‌دهی چاه‌ها می‌باشد. برای این منظور پنجره بهینه گل^{۱۵} از طریق نگاه‌ها محاسبه گردید و با به‌کارگیری آن در کنار نگار کالیپر^{۱۶} در چاه مورد مطالعه از میدان مورد نظر مکان‌های مستعد برای ماسه‌دهی پیش‌بینی شد.

تعیین تنش‌های برجا از طریق نگارهای چاه

در روابط کلی که جهت تعیین مقدار تنش‌های برجا استفاده می‌شود فرض می‌کنند که از میان تنش‌های موجود در لایه‌های زیرسطحی یکی از تنش‌ها به‌صورت قائم و دو تنش دیگر به‌صورت افقی باشد. نحوه تعیین تنش‌های برجا در ادامه شرح داده شده است.

پدیده تولید ماسه ممکن است در حجم کم تا حجم وسیعی اتفاق بیفتد. مخصوصاً برای مخازنی که تغییرات زیاد تنش‌های برجا، نرخ بالای استخراج نفت، وجود آب در سازندهای زیرسطحی و یا پدیده فروپاشی دیواره چاه‌های حفاری شده وجود داشته باشد [۴-۷]. وقتی چاه گاز یا نفت در داخل سازند غیرمستحکم^۱ حفر می‌شود بحث در مورد کنترل ماسه‌دهی^۲ یا ذرات ریز جامد^۳ امری منطقی به نظر می‌رسد. ولی تصمیم‌گیری در مورد نصب یا عدم نصب پکرها^۴ نیاز به بررسی بیشتری دارد. اگر پدیده تولید ماسه رخ دهد و پکرهایی جهت جلوگیری از تولید ماسه نصب نشده باشد، مشکلات به موازات تولید ماسه افزایش می‌یابند. انواع مشکلاتی که در هنگام تولید ماسه ممکن است با آن روبرو شویم عبارتند از فرسایش تجهیزات ته چاهی^۵، ناپایداری چاه^۶، مچاله شدن لوله جداری^۷، هزینه جداسازی ماسه^۸ و مشکلات محیطی زیستی^۹ [۸-۱۲]. بنابراین، پدیده تولید ماسه یکی از مهم‌ترین موارد جهت بررسی در حین عملیات حفاری و یا استخراج و بهره‌برداری از چاه‌های نفتی و یا گازی می‌باشد. برای پیش‌بینی ماسه‌دهی چاه‌های هیدروکربوری، اولین کاری که باید انجام گیرد تشریح کامل میدان تنش‌ها در زمین است. برای انجام این کار باید مقدار و جهت تنش‌های اصلی محاسبه گردد [۱۳ و ۱۴]. روش‌های متعددی برای این کار وجود دارد، اگر بخواهیم جهت تنش‌های اصلی را محاسبه کنیم می‌توان از روش‌های عددی و یا از نگارهای تصویری مانند FMS^{۱۰}، FMI^{۱۱} و UBI^{۱۲} استفاده کرد [۱۵]. برای محاسبه مقدار تنش‌های اصلی روش‌های گوناگونی وجود دارد یکی از این روش‌ها استفاده از آزمایش‌های مقاومت تراکمی^{۱۳} تک محوره و یا سه محوره است و روش دیگر استفاده از روابط ارائه شده توسط محققین چاه‌نگاری و حفاری براساس نگاره‌های چاه می‌باشد که از این میان می‌توان

1. Unconsolidated
2. Sand production
3. Particulate Solid
4. Packer
5. Wear of Downhole
6. Borehole Instability
7. Casing Collapse
8. Sand Separation Costs
9. Environmental Problems
10. Formation Micro-Scanner
11. Formation Micro Imager
12. Ultrasonic Borehole Imager
13. Compressive Strength
14. Kirch
15. Safe Mud Window
16. Caliper Log

تعیین تنش عمودی

برای تعیین تنش روباره مقدار چگالی سنگ مورد نیاز است. ابزار چاه‌نگاری برای تعیین چگالی سازند، از ابزار اشعه گاما فعال برخوردار است. تنش قائم برابر با تنش روباره می‌باشد. با در نظر گرفتن این شرایط، مقدار تنش روباره یا تنش عمودی (S_v) توسط انتگرال گیری چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق مورد نظر از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۵ و ۱۷].

$$S_v = \int_0^z \rho(z)gz dz \cong \bar{\rho}gz \quad (1)$$

در رابطه بالا S_v تنش روباره، g شتاب گرانش، $\rho(z)$ چگالی سنگ در عمق z و $\bar{\rho}$ چگالی متوسط لایه‌های سنگی می‌باشد.

بنابراین می‌توان گفت که اندازه تنش قائم (S_v) در واقع برابر است با انتگرال چگالی سنگ‌ها از سطح تا عمق مورد نظر. از آنجا که نگار چگالی از سطح تا عمق مد نظر در دسترس نمی‌باشد، می‌توان با استفاده از برون‌یابی نگار دانسیته یا از طریق نگارهای دیگر مقدار چگالی را تعیین کرد. برای نواحی دریایی براساس عمق آب تصحیحات لازم انجام می‌گیرد و مقدار تنش روباره از رابطه زیر تعیین می‌گردد [۸ و ۱۵].

$$S_v = \rho_w gz_w + \int_{z_w}^z \rho(z)gz dz \approx \rho_w gz_w + \bar{\rho}g(z - z_w) \quad (2)$$

در رابطه بالا S_v تنش روباره، (ρ_w) چگالی آب، Z_w عمق آب، Z مورد نظر و g شتاب گرانش است.

تعیین تنش‌های افقی

برای محاسبه ماسه‌دهی چاه، تعیین دقیق مقدار تنش‌های افقی ضروری خواهد بود. از طریق تخمین دقیق این تنش‌ها می‌توان از به وجود آمدن ترک یا شکستگی دیواره چاه پیشگیری نمود. تخمین تنش‌های افقی به مراتب سخت‌تر از تعیین تنش قائم است [۱۸]. تنش‌های افقی شامل دو تنش افقی حداکثر (σ_{Hmax}) و حداقل (σ_{Hmin}) می‌باشند. تعیین تنش‌های افقی به دو روش مستقیم و غیر مستقیم امکان‌پذیر است. در روش مستقیم تنش‌های افقی از طریق آزمایشات مکانیک سنگی و در روش

غیر مستقیم از طریق نگارهای حاصل از چاه‌نگاری محاسبه می‌شوند.

تعیین تنش افقی حداقل

حداقل تنش افقی می‌تواند از طریق داده‌های لیک آف تست^۱، شکست هیدرولیکی^۲، آزمون شکاف کوچک^۳ و داده‌های هرزروی گل^۴ برای نقاط خاصی از چاه و به صورت گسسته به دست آید [۱۵]. همان‌طور که ذکر گردید، اگر داده‌های حاصل از این آزمایشات محدود باشند، جهت تعیین پیوسته این تنش می‌توان از روابط تجربی استفاده نمود، بدین منظور روابط تجربی مختلفی جهت تخمین تنش افقی حداقل ارائه شده که در ادامه ذکر خواهند شد. بریکلز و وان ایکلن برای تخمین تنش افقی حداقل رابطه‌ای تجربی ارائه دادند [۱۹]. این رابطه بر مبنای اطلاعات شکست هیدرولیکی بوده و براساس اطلاعات چندین منطقه مختلف حاصل شده است. رابطه مذکور به صورت زیر است:

$$\sigma_h = 0.0053D^{1.145} + 0.46(p_f - p_{fn}) \quad D < 3500 \text{ m} \quad (3)$$

$$\sigma_h = 0.0264D - 31.7 + 0.46(p_f - p_{fn}) \quad D > 3500 \text{ m} \quad (4)$$

در روابط بالا، D عمق بر حسب متر، p_f فشار منفذی بر حسب مگا پاسکال، p_{fn} فشار منفذی نرمال و σ_h مقدار تنش افقی حداقل بر حسب مگا پاسکال هستند. از آنجایی که سنگ‌های رسوبی متخلخل و حاوی سیال می‌باشند، فشار منفذی نرمال در عمق H برابر وزن ستون سیال بالایی در همان عمق خواهد بود. بنابراین، فشار منفذی نرمال (P_{fn}) از طریق رابطه ۵ تعیین می‌گردد.

$$P_{fn} = \int_0^H \rho_f(z)gz dz \quad (5)$$

یکی از روابط بسیار رایج و پرکاربرد برای محاسبه مقدار تنش افقی حداقل، رابطه پوروالاستیک^۵ می‌باشد. در این رابطه از فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکتونیک استفاده می‌شود [۲۰].

1. Leak off Test
2. Hydraulic Fracturing
3. Mini-Fracture Test
4. Mud Loss
5. Poroelastic

شکستگی‌های برشی در چاه یا روابط تجربی پوروالاستیک به‌دست آید. روابط پوروالاستیک جز روابطی هستند که عموماً جهت تخمین مقدار تنش افقی حداکثر استفاده می‌شوند. رابطه پوروالاستیک براساس فشار روباره، فشار منفذی، نسبت پواسون و کرنش‌های تکتونیک برای تعیین تنش افقی حداکثر مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل کلی این رابطه به‌صورت زیر است [۲۰].

$$\sigma_H = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_H}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \varepsilon_h}{1-\nu^2} \quad (10)$$

در رابطه بالا σ_H تنش افقی حداکثر، α ضریب بایوت، ν نسبت پواسون، P_p فشار منفذی، ε_H و ε_h کرنش در جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل می‌باشند.

مطالعه موردی

زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

چاه مورد مطالعه در یکی میدان نفتی جنوب، در استان خوزستان و در نزدیکی مرز ایران و عراق قرار گرفته است. این میدان تاقدیسی ملایم با جهت شمالی-جنوبی است که در فرو افتادگی دزفول قرار گرفته و در هنگام بسته شدن دریای نئوتتیس^۱، در سومین فاز کوه زایی زاگرس تشکیل گردیده است. ساختار فرو افتادگی دزفول شامل تاقدیسی طولانی با جهت شمال غربی-جنوب شرقی است که از خطوط فرا زمین (هرگاه قطعه‌ای از پوسته زمین، بر اثر دو گسل نرمال با لغزش از یکدیگر جدا شده و یکی بالاتر از دیگری قرار گیرد، ساختی به نام فرا زمین را ایجاد می‌کند) حوضه پیروی می‌کند. مخزن نفتی در میدان مورد مطالعه، در سازند فهلیان قرار گرفته است. با بررسی سازند فهلیان می‌توان به این نتیجه رسید که ته نشست این سازند در دوران بریازین-والانژینین^۲ و در خلال یک فاز دینامیکی کم اثر اتفاق افتاده است [۲۳].

1. Louisiana Gulf
2. Texas Gulf
3. Neo-Tethys sea
4. Berriasian- Valanginian

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_V - \frac{\nu}{1-\nu} \alpha P_p + \alpha P_p + \frac{E \varepsilon_h}{1-\nu^2} + \frac{\nu E \varepsilon_H}{1-\nu^2} \quad (6)$$

در رابطه بالا σ_h تنش افقی حداقل، α ضریب بایوت، ν نسبت پواسون، P_p فشار منفذی، ε_H و ε_h کرنش در جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل می‌باشند.

ماتیوس و کیلی فرمولی برای تعیین تنش افقی حداقل با استفاده از فشار منفذی ارائه دادند [۲۱]:

$$S_{h \min} = K_i (S_v - P_p) + P_p \quad (7)$$

در رابطه بالا K_i تابعی از عمق می‌باشد. این رابطه براساس داده‌های ساحل خلیج لویزیانا^۱ و خلیج تگزاس^۲ به‌دست آمده است. ایتون رابطه‌ای را براساس مقدار نسبت پواسون، تنش روباره و فشار منفذی برای تعیین مقدار حداقل تنش افقی ارائه کرده است که به‌صورت زیر است [۲۲]:

$$S_{h \text{ calc}} = \left(\frac{\nu}{1-\nu} \right) (S_v - P_p) + P_p \quad (8)$$

در میان روابط ذکر شده، رابطه پوروالاستیک بیشترین کاربرد را برای تعیین حداقل تنش افقی دارد. البته استفاده از این رابطه به معنای صحیح بودن مقدار حداقل تنش افقی به‌دست آمده نیست و مقادیر باید از طریق داده‌های لیک آف تست، مینی فراچر تست و ... کالیبره گردد. در این تحقیق از داده‌های هرزروی گل جهت کالیبراسیون استفاده شده است. بدین منظور، برای نواحی که هرزروی گل اتفاق افتاده بود، وزن گل به فشار گل تبدیل شد (رابطه ۹) و جهت کالیبراسیون مقدار تنش حداقل افقی استفاده شد.

$$MP = MW \cdot g \cdot h \quad (9)$$

در رابطه بالا MP فشار گل (مگا پاسکال)، MW وزن گل (مگا پاسکال)، g شتاب گرانش زمین (متر بر مجذورثانیه) و h عمق مورد نظر بر حسب متر می‌باشد.

تعیین تنش افقی حداکثر ($S_{H \max}$) با استفاده از نگارهای چاه

براساس آنچه که بیان شد، اگر مقادیر تنش‌های $S_{H \min}$ و $S_{H \max}$ تعیین شده باشند، مقدار $S_{H \max}$ می‌تواند از طریق تئوری گسلس آندرسون و استفاده از عرض

$$E_{dyn} = \rho V_S^2 \frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \quad (14)$$

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)} \quad (15)$$

در روابط بالا، V_S و V_P سرعت موج فشاری و برشی (این مقادیر برای این مطالعه از نگار DSI محاسبه گردید)، ν نسبت پواسون، E_{dyn} مدول یانگ، G_{dyn} مدول برشی، λ_{dyn} مدول لامه و K_{dyn} مدول بالک دینامیکی است.

هدف از تعیین مدول‌های الاستیک سنگ در این مقاله، استفاده از آن‌ها جهت محاسبه تنش‌های وارد بر دیواره چاه می‌باشد. اما طبق مطالعات انجام گرفته مدول‌های دینامیکی اختلاف زیادی با مدول‌های استاتیکی دارند [۸ و ۱۵ و ۲۴].

جامبونیسن رابطه زیر را برای سنگ‌های کربناته مانند سنگ آهک ارائه داد [۲۴].

$$E_{Static} = 1.43 E_{dyn} - 32 \quad (16)$$

بنابراین، در این مطالعه با استفاده از رابطه ۱۶ مدول یانگ دینامیکی به استاتیکی تبدیل شد و از طریق داده‌های مغزه آزمایش شده (شیب نمودار تنش- کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره) کالیبره گردید (شکل ۱).

تعیین فشار منفذی

فشار منفذی در حوضه‌های عمیق رسوبی تنها از نوع هیدرواستاتیکی نخواهد بود، بلکه می‌تواند به فشار لیتواستاتیک نیز نزدیک شود، به طوری که گاهی این فشار تا دو برابر فشار هیدرواستاتیک نیز می‌رسد. عبور از مرز فشار هیدرواستاتیک در عمق عموماً فشار زمین نامیده می‌شود [۲۵]. علت فشارهای منفذی غیر عادی می‌تواند تبدیل هیدروکربن‌های سنگین‌تر به هیدروکربن‌های سبک‌تر، مهاجرت و انبساط سیالات و شرایط تکتونیک باشد [۲۶]. در حین حفاری چاه‌های نفتی فشار منفذی در عمق از طریق داده‌های MDT اندازه‌گیری می‌شود.

آب‌های کربناته کم عمق مربوط به این دوران نشان می‌دهد که طبقات این سازند با سازندهای Habshan، Minagis، Yamama و Rayda متشابه است. این تشابه گویای آن است که بخش‌های قابل ملاحظه‌ای از سازند فهلیان در اثر گسترش قسمت شرقی صفحه عربستان به وجود آمده‌اند. سازندهای منطقه مورد مطالعه از جدید به قدیم به ترتیب شامل سازندهای آسماری، جهرم، پابده، گورپی، ایلام، سروک، کژدمی، داریان، گدوان، فهلیان، گرو و گوتیان می‌باشند.

داده‌های چاه‌نگاری و مغزه

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق متعلق به چاه نفتی B در میدان مورد مطالعه می‌باشد. داده‌های این چاه شامل نگارهای پتروفیزیکی مانند چگالی (RHOZ)، تخلخل نوترونی (NPHI)، صوتی (DT)، مقاومت ویژه (RT)، گاما (GR)، نگار تصویری صوتی دوقطبی (DSI)، کالیپر (CAL)، داده‌های MDT^۲ و داده‌های مغزه می‌باشد. نگارهای چاه محدود به عمق قرارگیری مخزن در فواصل بین ۴۰۵۰ تا ۴۵۵۵ m می‌باشد. علاوه بر آن، نگار تصویری صوتی دوقطبی برداشت شده برای چاه مورد مطالعه تنها برای اعماق ۴۲۹۵ تا ۴۵۵۵ m موجود بود، بنابراین بیشتر تمرکز مطالعه حاضر در بازه این نگار انجام شده است.

تعیین مدول‌های الاستیک

براساس روابط الاستیکی دینامیکی در صورت داشتن سرعت امواج فشاری و برشی و در اختیار داشتن چگالی لایه‌های زیر سطحی می‌توان پارامترهای الاستیک سنگ را تعیین نمود [۸ و ۱۵]. بر این اساس، پارامترهای الاستیک سنگ می‌توانند از طریق روابط زیر تعیین گردند.

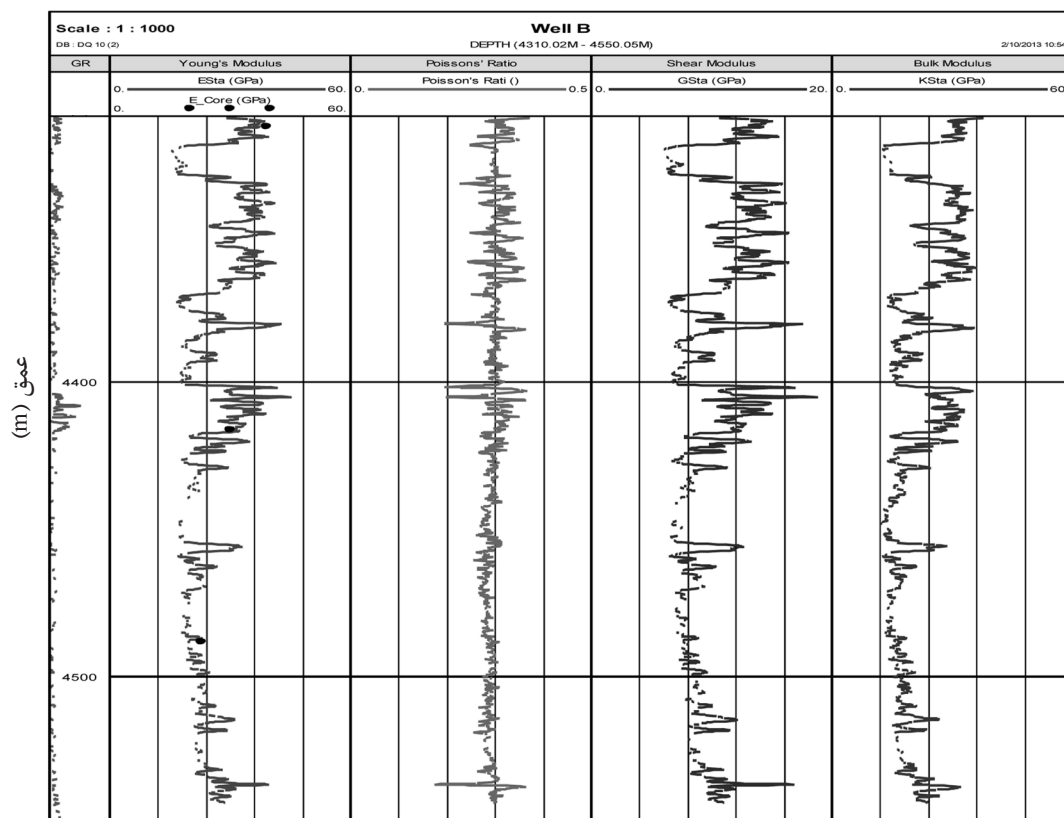
$$G_{dyn} = \rho V_s^2 \quad (11)$$

$$\lambda_{dyn} = \rho V_s^2 - 2\rho V_p^2 \quad (12)$$

$$K_{dyn} = \rho V_p^2 - \frac{4}{3} \rho V_s^2 \quad (13)$$

1. Dipole Sonic Imager (DSI)

2. Modular Formation Dynamics Tester (MDT)



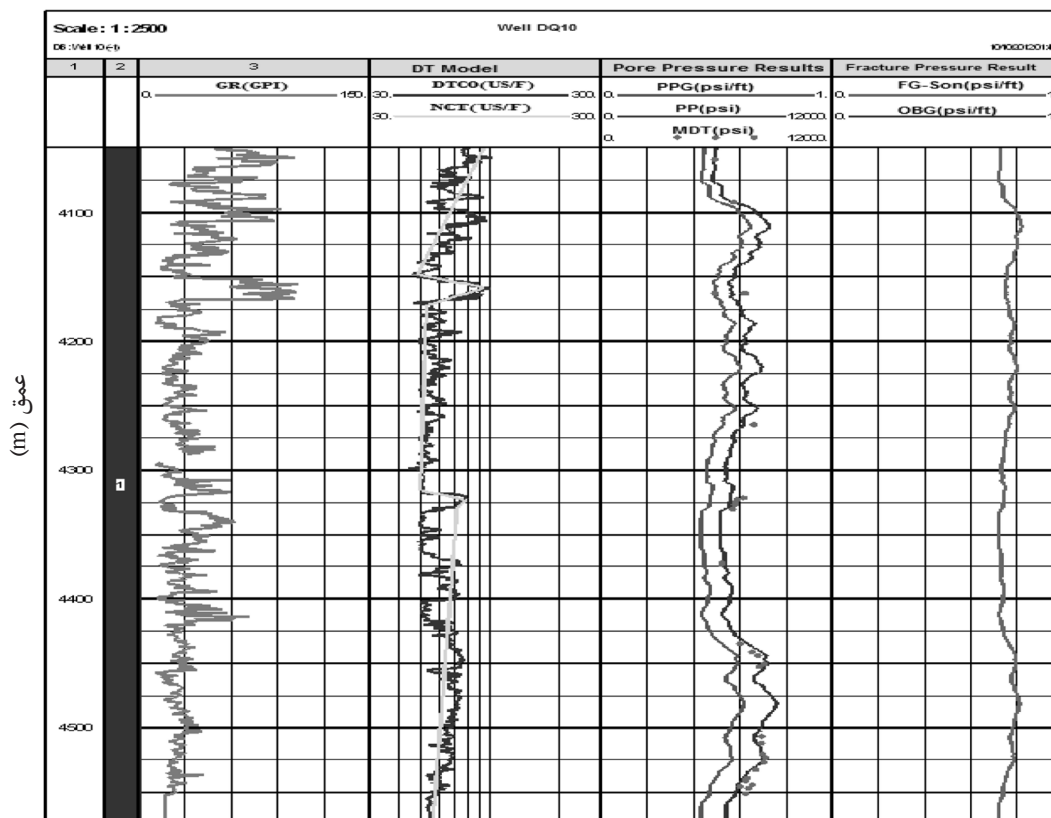
شکل ۱- پارامترهای الاستیکی محاسبه شده از نگارهای چاه B و کالیبراسیون رابطه جامبونیسن با نمونه مغزه

است. البته استفاده از این رابطه به معنای صحیح بودن مقدار فشار منفذی به دست آمده نیست و نیازمند به کالیبره شدن با داده‌های تست فشار منفذی واقعی سازند است که با ابزار MDT به دست می‌آید. بنابراین، از رابطه ایتون برای تعیین فشار منفذی از طریق نگار صوتی استفاده شد و مقادیر فشار منفذی به دست آمده با داده‌های MDT کالیبره گردید. شکل ۲ مقدار فشار منفذی و گرادیان فشار منفذی پیش‌بینی شده از رابطه ایتون است که با استفاده از نگار صوتی به دست آمده است. در این شکل مدل حاصل از نگار صوتی (DT) نرمالایز شده (NCT-Son) و مقدار فشار منفذی پیش‌بینی شده از رابطه ایتون (PP-Son) نشان داده شده است. بعد از کالیبراسیون نگار فشار منفذی با استفاده از داده‌های MDT می‌توان گفت که رابطه ایتون در پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از نگار صوتی (DT) عملکرد مناسبی داشته است.

اندازه‌گیری داده‌های MDT مربوط به چند عمق خاص (به صورت گسسته) می‌باشد، بنابراین نیاز به روش‌هایی است که بتواند مقادیر فشار منفذی را به صورت پیوسته ارائه نماید. روش‌های مختلفی جهت محاسبه فشار منفذی ارائه شده است که عموماً شامل روش‌های تجربی می‌شوند [۲۷]. در زیر یکی از روابط پرکاربرد و متداول که در این مطالعه نیز به کار گرفته شده است، معرفی شده است. ایتون رابطه تجربی زیر را برای پیش‌بینی گرادیان فشار منفذی از طریق زمان عبور موج فشاری ارائه داد [۲۸]:

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^3 \quad (17)$$

در رابطه بالا P_{pg} گرادیان فشار منفذی سازند (psi)، OBG گرادیان تنش روباره (psi)، P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک (که معمولاً برابر با $0.45 psi/ft$ می‌باشد)، Δt_n زمان عبور موج یا کندشدگی در فشار نرمال ($\mu s/ft$) و Δt زمان عبور موج به دست آمده از نگار صوتی چاه (بر حسب $\mu s/ft$)



شکل ۲- فشار منفذی به دست آمده از رابطه ایتون با استفاده از نگار DT در چاه مورد مطالعه (در این شکل ستون اول عمق و ستون سوم نگار گاما، ستون چهارم مدل حاصل از نگار صوتی (DT) نرمالایز شده (NCT-Son))

در جهت عکس آن می باشد.

تعیین زاویه اصطکاک^۱

در بیشتر مخازن نفتی به دلیل ضعیف بودن سنگ مخزن تغییرات زاویه داخلی بسیار بالا است و بین زاویه اصطکاک داخلی و شکستگی های مکانیکی بسیار ریز سنگ ها (سفتی سنگ مخزن به طور گسترده ای به سیمانی شدن و تخلخل آن بستگی دارد) ارتباط بسیار پیچیده ای وجود دارد. از این رو، روابط بسیار کمی برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی از طریق اندازه گیری های ژئوفیزیکی ارائه شده است. یکی از روابط متداول و پرکاربرد برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی از طریق نگارهای چاه در سال ۱۹۹۴ توسط پلوم ارائه شد [۲۹]. شکل کلی این رابطه به صورت زیر می باشد:

$$\varphi = 26.5 - 37.6 \times (1 - NPHI - V_{shale}) + 62.1 \times (1 - NPHI - V_{shale})^2 \quad (18)$$

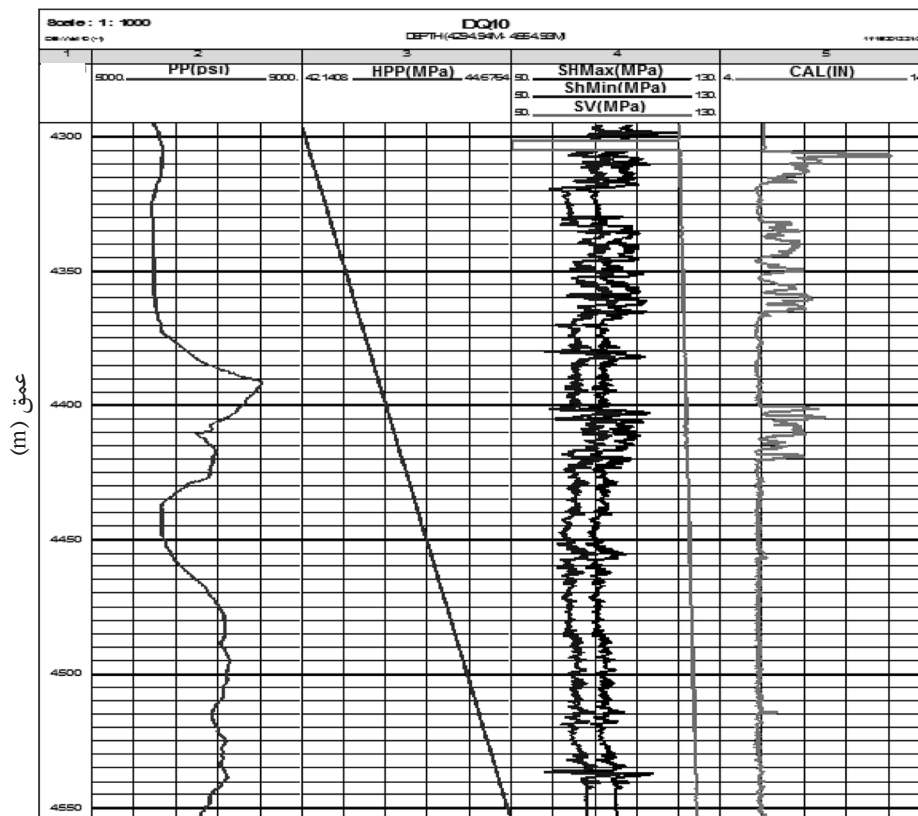
1. Friction Angel

زیرا مقادیر فشار منفذی پیش بینی شده در این چاه به مقادیر فشار منفذی واقعی بسیار نزدیک است. در این رابطه مقدار گرادیان تنش روباره از رابطه ۱ حاصل شده است.

تعیین تنش های برجا

در این مطالعه، از روابطی که در بخش دوم معرفی شده است مقدار تنش های برجا را محاسبه نموده و برای بحث پیش بینی تولید ماسه که تعیین پنجره بهینه گل مد نظر است، به کار گرفته می شود. در این راستا، برای تعیین تنش بر جای عمودی از رابطه ۱ و برای تعیین تنش های افقی حداکثر و حداقل از روابط پوروالاستیک (روابط ۶ و ۱۰) استفاده شد و سپس مدل سازی گردید. نتایج این مدل سازی در شکل ۳ (بخش ۴) نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در این مطالعه با توجه به گزارشات زمین شناسی جهت تنش های اصلی حداقل به صورت شمال غربی - جنوب شرقی و تنش های اصلی حداکثر



شکل ۳- نمایی شماتیک از نگار کالیپر، فشار هیدرو استاتیکی، فشار منفذی، تنش روباره، تنش حداقل افقی و تنش حداکثر افقی به‌دست آمده از رابطه پوروالاستیک برای چاه مورد مطالعه (در این شکل ستون اول عمق، ستون دوم فشار منفذی، ستون سوم فشار هیدرو استاتیکی، ستون چهارم تنش های اصلی و ستون پنجم نگار کالیپر می باشد)

بین برد. این امر از طریق داده‌های چاه‌نگاری و محاسبه پنجره بهینه گل با استفاده از معیارهای شکست سنگ و مقایسه آن‌ها با نگار کالیپر امکان‌پذیر است. یعنی این مشکل می‌تواند از طریق انتخاب یک معیار شکست مناسب که شرایط تنش‌های به دست آمده را به خوبی مدل‌سازی می‌کند، برطرف گردد. در ادامه معیار شکست موهر-کلمب که عموماً در مسائل مربوط به پایداری چاه و انتخاب پنجره بهینه گل استفاده می‌شوند، مورد بحث قرار خواهند گرفت.

تعیین پنجره گل براساس معیار موهر-کلمب

تنش‌های اطراف دیواره چاه عبارتند از تنش‌های مماسی (σ_θ)، تنش شعاعی (σ_r) و تنش محوری (σ_z). تغییرات تنش شعاعی و مماسی را می‌توان با تغییر فشار گل (P_m) به نوعی کنترل نمود، اما این در مورد تنش محوری درست نیست.

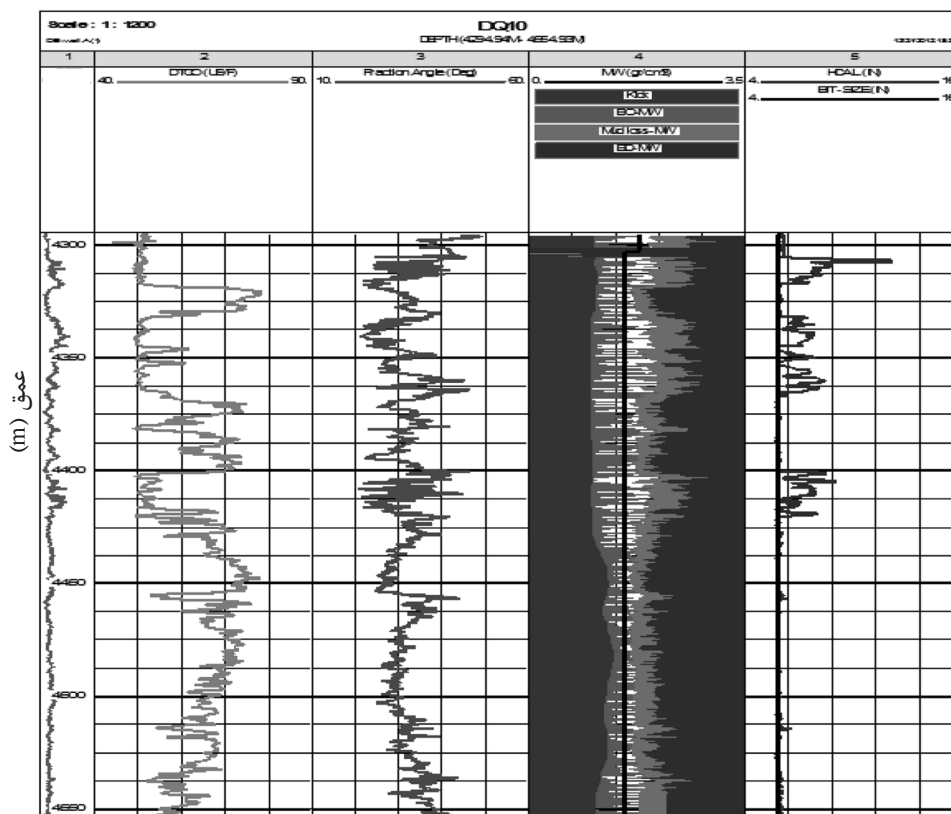
در رابطه ذکر شده ϕ زاویه اصطکاک داخلی، NHPI تخلخل حاصل از نگار نوترونی (V_{shale}) و حجم شیل (بدون بعد) است که از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V_{shale} = \frac{(GR)_{log} - (GR)_{cleansand}}{(GR)_{shale} - (GR)_{cleansand}} = \frac{(GR)_{log} - (GR)_{min}}{(GR)_{max} - (GR)_{min}} \quad (19)$$

در این مطالعه زاویه اصطکاک داخلی از طریق رابطه ۱۸ محاسبه و در شکل ۴ نشان داده شده است.

معیارهای شکست

پیش‌بینی تولید ماسه در خلال استخراج و بهره‌برداری یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که در بحث تولید مطرح می‌شود. زیرا پیش‌بینی به موقع و نسب پکرها در بخش‌هایی از مخزن که استعداد تولید ماسه را دارند، می‌تواند مشکلاتی که در اثر ماسه‌دهی به وجود می‌آید را می‌تواند از



شکل ۴- پنجره وزن پهینه گل حفاری براساس معیار موهر- کلمب- در ستون ۳ زاویه اصطکاک داخلی، در ستون ۴ این شکل وزن گل با خط سیاه (MW)، کیک سازند با رنگ آبی (Kick)، شکستگی برشی با رنگ سبز (BO-MW)، هرز روی گل با رنگ قرمز (Mud Loss-)، شکستگی کششی با رنگ قهوه‌ای (BD-MW) و در ستون ۵ نگار کالیپر مدل شده است.

بنابراین هر گونه تغییری در فشار گل فقط روی تنش

$$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z - 1$$

$$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta - 2$$

$$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta - 3$$

در راستای $\theta = 0$ یا $\theta = 0$ مقدار تنش مماسی حداقل است و شکست کششی در جهت σ_H گسترش می‌یابد و متناسب با آن سه تنش اصلی در دیواره چاه به صورت زیر خواهند بود [۳۰]:

$$\sigma_r = P_m, \quad \sigma_\theta = D - P_m, \quad \sigma_z = E \quad (20)$$

در رابطه بالا مقادیر D و E برابرند با:

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (21)$$

وقتی که مقدار P_m کم شود، مقدار σ_θ به سمت مقاومت فشاری حداکثر افزایش می‌یابد. بنابراین حد پایین فشار مجاز گل (P_{mb}) در ارتباط با شکستگی برشی دیواره چاه است. مانند قبل، سه حالت وجود دارد که باید برای تعیین حد پایین فشار مجاز گل وجود دارد مد نظر قرار گیرد:

بنابراین هر گونه تغییری در فشار گل فقط روی تنش مماسی و شعاعی تأثیرگذار خواهد بود. دو نوع از ناپایداری عموماً در دیواره چاه به وجود می‌آید [۳۰]. حالت اول: $\sigma_r \leq \sigma_\theta$ که مرتبط با شکستگی برشی است. یعنی افزایش بیش از اندازه تنش مماسی باعث شکستگی برشی در دیواره چاه می‌شود.

حالت دوم: $\sigma_r \geq \sigma_\theta$ مرتبط با شکستگی‌های کششی است. یعنی افزایش بیش از حد تنش شعاعی باعث شکستگی‌های کششی دیواره چاه می‌شود.

با افزایش فشار هیدرواستاتیک گل حفاری (P_m)، تنش شعاعی (σ_r) افزایش می‌یابد و مقدار تنش مماسی (σ_θ) به سمت مقاومت کششی سنگ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین حد بالای فشار گل (P_{mf}) در ارتباط با شکستگی کششی بوده طوری که باید کمتر از مقدار σ_θ باشد. با توجه به شرایط بیان شده سه حالت زیر برای تنش‌های اصلی ($\sigma_z, \sigma_\theta, \sigma_r$) وجود دارد که حد

بیان شده در جدول ۲ به‌دست می‌آیند. با توجه به روابط بالا اگر فشار چاه کمتر از P_{mf} باشد ($P_m \geq P_m$)، شکستگی‌ها کششی در چاه رخ می‌دهد [۳۰].

معیار شکست موهر-کلمب یک معیار دو بعدی است که تنها براساس تنش اصلی حداکثر و حداقل بیان می‌شود. در این تحقیق برای تعیین بازه پنجره بهینه گل از این معیار استفاده شده است. برای استفاده از این معیار ابتدا می‌بایست مقدار تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر محاسبه گردد که در بخش‌های قبلی محاسبه گردیدند. سپس رابطه دوم از جدول ۱ و ۲ که بدترین حالت برای حد پایین و حد بالای فشار گل می‌باشند برای تعیین وزن مجاز گل استفاده شدند. برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی نیز از معادلات ۱۸ استفاده شده است. برای تعیین کیک سازند و هرزروی گل نیز از رابطه زیر استفاده شد:

$$P = \rho gh \quad (24)$$

در این حالت برای تعیین کیک سازند مقدار P را برابر فشار منفذی، و برای تعیین مقدار هرز روی گل مقدار P را برابر حداقل تنش افقی در نظر می‌گیرند.

$$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r - 1$$

$$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r - 2$$

$$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z - 3$$

در این حالت برای ایجاد شکستگی برشی که در راستای $\theta = \pm \pi/2$ ایجاد خواهد شد، مقادیر تنش مماسی و شعاعی و محوری در دیواره چاه به‌صورت زیر محاسبه خواهند شد.

$$\sigma_r = P_m, \quad \sigma_\theta = A - P_m, \quad \sigma_z = B \quad (22)$$

در رابطه بالا A و B برابرند با:

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad B = \sigma_v + 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (23)$$

با جایگزینی معادلات (۲۰) و (۲۱) در معیار موهر-کلمب، حد پایین فشار گل در سه حالت ذکر شده، مطابق با روابط ذکر شده در جدول ۱ به‌دست می‌آیند.

در جدول ۱ نحوه محاسبه مقادیر A و B از رابطه ۲۳ به‌دست می‌آیند. c و q نیز از رابطه موهر-کلمب حاصل می‌شوند. اگر فشار چاه به بیشتر از P_{mb} برسد ($P_m \leq P_{mb}$) شکستگی برشی در دیواره رخ خواهد داد. بنابراین، می‌توان گفت که خردشدگی در چاه با توجه به معیار موهر-کلمب زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از سه حالت فوق اتفاق بیفتد. برای شکست کششی نیز با جایگذاری معادلات (۲۲) و (۲۳) در معیار موهر-کلمب روابط

جدول ۱- تعیین حد پایین فشار گل (P_{mb}) با استفاده از معیار موهر-کلمب [۳۰]

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	شکست زمانی اتفاق می‌افتد که $P_m \leq P_{mb}$ باشد. P_{mb} برابر است با:
۱	$\sigma_z \geq \sigma_\theta \geq \sigma_r$	$P_{mb1} = (B - C) / q$
۲	$\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	$P_{mb2} = A - C - qB$
۳	$\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	$P_{mb3} = A - C - qB$

جدول ۲- تعیین حد بالای فشار گل (P_{mf}) با استفاده از معیار موهر-کلمب [۳۰]

حالت	$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$	شکست زمانی اتفاق می‌افتد که $P_m \geq P_{mf}$ باشد. P_{mf} برابر است با:
۱	$\sigma_r \geq \sigma_\theta \geq \sigma_z$	$P_{mf1} = C + qE$
۲	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_\theta$	$P_{mf2} = (C - qD) / (1 + q)$
۳	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_\theta$	$P_{mf3} = (C - E) / (q + D)$

عبور کند. پس از مطالعات تجربی بر روی این میدان و چاه مورد نظر می‌توان به این نتیجه رسید که هرزروی گل ناشی از شکستگی‌های کششی اتفاق افتاده است. از این‌رو، به مطالعه کامل‌تر این معیار پرداخته و دیده می‌شود که این یکی از ضعف‌های معیار مورد نظر است که به دلیل نادیده گرفتن تنش‌های میانی اتفاق افتاده است. یعنی معیارهای دو بعدی فقط تنش اصلی حداقل و حداکثر را در نظر می‌گیرند و این باعث می‌شود که محافظه کارانه‌تر عمل کنند. همان‌طور که در مدل رسم شده توسط معیار موهر-کلمب در شکل ۴ مشاهده می‌شود (توجه به رنگ سبز)، شکستگی برشی در اعماق مختلفی از چاه رخ داده است که این مطابق با نتایج حاصل از گزارشات است. نگار کالیبر نیز این مدل را تأیید می‌نماید. البته از روی نگار کالیبر می‌توان فهمید که این معیار در بسیاری موارد اعماق شکستگی برشی را به خوبی پیش‌بینی کرده است (مقادیر سبز رنگ از خط سیاه که همان وزن بهینه گل به کار رفته در چاه بوده عبور کرده است). در حالت کلی می‌توان محل شکستگی‌های برشی و کششی را که از تعیین پنجره بهینه گل حاصل شده، به عنوان نقاط مستعد برای قابلیت تولید ماسه در نظر گرفت. در این تحقیق نقاطی را که این پیش‌بینی برای تعیین شکستگی‌ها نشان داده بود، به‌طور تجربی در چاه مورد نظر بررسی قرار گرفته است. نتایج مشاهدات نشان داد که در این چاه، برای نقاط پیش‌بینی شده در شکستگی‌های برشی گسترده، خرده سنگ‌های تولید شده یعنی ماسه‌دهی اتفاق افتاده بود و در محل این شکستگی‌ها پکرها برای جلوگیری از تولید ماسه نسب شده بودند.

در نهایت برای تعیین پنجره گل تمام واحدها به کار گرفته در حالت شکستگی برشی^۱، شکستگی کششی^۲، یک سازند (دامنه گرادیان فشار منفذی)^۳ و همچنین واحد هرزروی گل باید همانند واحد چگالی برحسب gr/cm^3 نوشته شود. در نهایت نتایج مدل‌سازی برای بررسی پایداری دیواره چاه مورد مطالعه با استفاده از معیار موهر-کلمب به صورت شکل ۴ رسم گردید. در این شکل، وزن گل برای یک و هرزروی گل همان‌طور که ذکر گردید از طریق مقادیر به دست آمده برای فشار منفذی و تنش حداقل افقی محاسبه شده است. شکل ۴ حد بالا و پایین وزن گل، یک سازند و هرزروی گل را در کنار نگار کالیبر نشان می‌دهد. در این شکل وزن گل با خط سیاه نشان داده شده است، یک سازند (Kick) با رنگ آبی (شکل ۴ ستون ۴) ارائه شده است، مقدار هرزروی گل (Mud Loss-MW) با رنگ قرمز (شکل ۴ ستون ۴) نشان داده شده است و شکستگی برشی (BO-MW) با رنگ سبز (شکل ۴ ستون ۴) ارائه شده است و در نهایت شکستگی کششی (BD-MW) با رنگ قهوه‌ای (شکل ۴ ستون ۴) نشان داده شده است.

برای مخازن ماسه سنگی یا آهکی دو نوع شکستگی داریم، یکی شکستگی بر اثر شکاف سنگ (شکستگی کششی) و دیگری خرد شدن سنگ (شکستگی برشی) می‌باشد هر دو حالت شکستگی (شکستگی برشی و شکستگی کششی) پتانسیل تولید ماسه را دارند. در این تحقیق همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است برای پیش‌بینی شکستگی‌های برشی و کششی از معیار موهر-کلمب استفاده نموده و پنجره بهینه گل را برای اطمینان از دقت این معیار مدل شده است. براساس نتایج این مدل از معیار موهر-کلمب در این چاه شکستگی‌های کششی در چند قسمت به صورت جزئی رخ داده است. مقادیر هرزروی گل (قهوه‌ای رنگ) از خط سیاه که همان وزن بهینه گل به کار رفته در چاه بوده،

1. Breakout

2. Breakdown

3. Magnitude of the pore pressure gradient

نتیجه‌گیری

از طریق نگرهای چاه، شکستگی‌های برشی و کششی با استفاده از معیار موهر-کلمب برای پیش‌بینی تولید ماسه محاسبه گردید. نتایج این محاسبات در کنار نگار کالیپر برای بازه مشخصی که نگار DSI موجود بود مدل‌سازی گردید. براساس مدل‌سازی‌های انجام شده در این مطالعه نتایج زیر به‌دست آمده است:

۱- دو مکانیزم شکستگی (برشی و کششی) دلیل اصلی تولید ماسه در چاه مورد مطالعه می‌باشد

(شکل ۴).

۲- معیارهای دو بعدی برای پیش‌بینی، به دلیل نبودن تأثیر تنش میانی در بحث پیش‌بینی شکستگی‌های کششی ضعیف‌تر عمل می‌کنند و این می‌تواند در پیش‌بینی تولید ماسه محافظه‌کارانه‌تر عمل کند.

۳- دلیل اصلی تولید ماسه در مخزن مورد مطالعه، با توجه به فشار منفذی پیش‌بینی شده در شکل ۲ می‌تواند دبی بالای سیالات درون مخزن باشد.

مراجع

- [1]. Nouri A., Vaziri H., Belhaj H., and Islam R., "Effect of volumetric failure on sand production in oil-wellbore", SPE pp. 84448, Presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition Jakarta, Indonesia, 2003.
- [2]. Nouri A., Vaziri H., Belhaj H., and Islam R., "Comprehensive transient modeling of sand production in horizontal wellbores", SPE Paper 84500, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition Denver, Colorado, 2003b.
- [3]. Dees J. V. M., *Method of sand consolidation with resin*, United States Patent 5178218, 1993.
- [4]. Abass H. H., Nasr-El-Din H. A., and BaTaweel M. H., "Sand control: sand characterization", Failure Mechanisms And Completion Methods, SPE pp. 77686, Presented at the SPE Annual Technical Conference And Exhibition San Antonio, Texas, 2002.
- [5]. Wang Z., Peden J. M., and Damasena E. S. H., "The prediction of operating conditions to constrain sand production from a gas well", SPE pp. 21681, Presented at the Production Operations Symposium Oklahoma City, 1991.
- [6]. Kooijman A. P., Van den Hoek P. J., Bree Ph. D., Kenter C. J., Zheng B. V. Z., and Khodaverdian M., "Horizontal wellbore stability and sand production In weakly consolidated sandstones", SPE pp. 36419, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition Denver, Colorado, 1996.
- [7]. Morita N., Whitfill D. L., Fedde Ø. P., and Løvik T. H., "Parametric study of sand production prediction", Analytical Approach, SPE pp. 16990, Presented at the 62nd Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers Dallas, Texas, 1987.
- [8]. Fjaer E., Holt R. M., Horsud P., Raaen A. R., and Risnes R., "Petroleum Related Rock Mechanics", 1sted. Elsevier Science Publishers BV, Amsterdam, The Netherlands., pp. 338, 2008.
- [9]. Morita N., Boyd P. A., "Typical sand production problems: case studies and strategies for sand control", SPE pp. 22739, Presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers Dallas, Texas, 1991.
- [10]. Weaver J. D. and Murphey J. R., *Method of particulate consolidation*, United States Patent 4936385, 1990.
- [11]. Todd B., Slabaugh B. F., Powell R. J., Yaritz J. G., *Resin composition and methods of consolidating particulate solids in wells with or without closure pressure*, United States, Patent 6311773. 2001.

- [12]. Talaghat M. R., Esmailzadeh F., and Mowla D., "Sand production control by chemical consolidation", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 67, pp. 34-40, 2009.
- [13]. Chin L. and Ramos G., *Predicting volumetric sand production in weak reservoirs*, paper SPE/ISRM 78169 presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving, Texas, 2002.
- [14]. Ghalambor A., "A study of relevant parameters to predict sand production in gas wells", paper SPE 77979 presented at the SPE Latin America/Carribbean Conference, Buenos Aires., pp. 27-29. 1994.
- [15]. Zoback M., *Reservoir geomechanic*, Cambridge University Press, 2007.
- [16]. Nelson E. J., "Transverse drilling-induced tensile fractures in the West Tuna area", Gippsland Basin, Australia: implications for the in situ stress regime, Vol. 42, pp. 361-371, 2005.
- [17]. Zoback M. D. and Barton C. B., "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40, pp. 1049-1076, 2003.
- [18]. John A., Hudson P., and John P., "Engineering rock mechanics: an introduction to the principles", Published by Elsevier Science Ltd. 1997.
- [19]. Breckels I. M. and Van Eekelen H. A. M., "Relationship between horizontal stress and depth in sedimentary basins", Paper SPE10336, 56th Annual Fall Technical Conference, Society of Petroleum Engineers of AIME, San Antonio, Texas, Oct. pp. 5-7, 1981.
- [20]. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., and Risnes R., "Chapter 3 geological aspects of petroleum related rock mechanics", Dev. Petrol. Sci, Vol. 33, pp. 89-108, 1992.
- [21]. Matthews W. R. and Kelly J., "How to predict formation pressure and fracture gradient", Oil and Gas Journal, February, pp. 92-106, 1967.
- [22]. Eaton B. A., "Fracture gradient prediction and its application in oilfield operations", Journal of Petroleum Technology, Vol. 246, pp. 1353-1360, 1969.
- [23]. Cavalli C. and Magistronic C., "Iran, Darquain Field, Structural and Fracture Study of the Coherency", Volume Petroleum Engineering and Development Company, 2001.
- [24]. Jambunathan V., *Study of mechanical properties of carbonates*, Doctoral dissertation, university of Oklahoma, 2008.
- [25]. Kan T. K. and Swan H. W., "Geopressure prediction from automatically derived seismic velocities", Geophysics, Vol. 66, pp. 1937-1946, 2001.
- [26]. Chopra S. and Huffman A., "Velocity determination for pore pressure prediction", CSEG Recorder, pp. 28-46, 2006.
- [27]. Zhang J., "Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches", Earth-Science Reviews, Vol. 108, pp. 50-63, 2011.
- [28]. Eaton B. A., "The equation for geopressure prediction from well logs", Society of Petroleum Engineers of AIME, paper SPE 5544, 1975.
- [29]. Rasouli V., Pallikathekathil Z. J., and Mawuli E., "The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy: A case study in Blacktip field", North Australia, Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 76, pp. 37-50, 2011.
- [30]. Al-Ajmi A. M. and Zimmerman R. W., "Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi-Coulomb failure criterion", Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 43, pp. 1200-1211, 2006.