

# بررسی ژئومکانیکی ایجاد شکاف در مخازن تخلیه شده

پوریا بهنودفر و محمد جواد عامری\*

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۳/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۴/۸/۳۰

## چکیده

از نظر ژئومکانیکی با تولید از مخزن و تخلیه تدریجی آن، تغییراتی در مخزن ایجاد می‌شود. در این مقاله امکان ایجاد شکاف و شکستگی در مخازن تخلیه شده بررسی شده است. به سه روش امکان شکل‌گیری شکاف در این نوع مخازن وجود دارد. ممکن است در مخزن به علت تولید، گسل درست شود. گاهی لازم است به منظور رسیدن به لایه‌های پایین‌تر، مخزن تخلیه شده حفاری شود. چون در اثر تخلیه فشار منفذی کاهش می‌یابد، موقع حفاری وزن گل معمولی نیز می‌تواند شکاف ایجاد کند و هرزروی گل رخ بدهد. شکاف حالت سوم مربوط به زمانی است که در مخزن در حال تخلیه عملیات شکاف هیدرولیکی انجام شود. هنگام ایجاد شکاف هیدرولیکی، کاهش فشار منفذی عامل مساعدی است و با فشار پمپ کمتر می‌توان به هدف رسید. در این مقاله امکان چرخش تنش‌های افقی نیز بررسی می‌شود که در این صورت، می‌توان با شکاف هیدرولیکی به نقاط جدیدی از مخزن دست یافت. در آخر با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی یکی از مخازن میدان پارس جنوبی، امکان ایجاد گسل و چرخش تنش‌ها بر اثر تولید پیش‌بینی می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ایجاد شکاف، فشار منفذی، تخلیه مخزن، میدان پارس جنوبی، ژئومکانیک

## مقدمه

بعضی اوقات لازم است جهت دستیابی به مخزن موجود در لایه‌های زیرین، مخزن تخلیه شده حفاری شود. برای مثال در میدان نفتی اهواز بعد از سال‌ها برداشت از مخزن کم عمق تر، عملیات حفاری به منظور برداشت از مخزن عمیق تر صورت می‌گیرد. در اثر کاهش فشار منفذی در سازندهای تخلیه شده، برای جلوگیری از شکاف و هرزروی در زمان حفاری لازم است از وزن گل پایینی استفاده شود. این در حالی است که برای جلوگیری از ورود سیالات لایه‌های بالاتر به درون چاه، وزن گل از حد مشخصی نباید پایین تر بیاید.

در اثر تولید، مخزن تخلیه می‌شود. این مخازن می‌توانند رفتارهای متفاوتی نسبت به حالت اولیه از خود نشان بدهند. اتفاقی که در اثر تخلیه می‌افتد، کاهش فشار منفذی است. این کاهش تأثیرات مختلفی دارد. می‌تواند باعث ایجاد مشکلات شود و با به عنوان عامل مساعد به حساب بیاید. ممکن است در اثر تولید، گسل در مخزن ایجاد شود. کاهش فشار منفذی و رسیدن مسیر تنش به مقدار بحرانی عامل این اتفاق هستند.

\*مسئول مکاتبات

Ameri@aut.ac.ir

آدرس الکترونیکی

می‌توان به مناطق جدیدی از مخزن دست یافت. در این مقاله به نحوه ایجاد این سه نوع شکاف درون مخزن تخلیه شده پرداخته می‌شود. برای این منظور ابتدا پارامتر مسیر تنش تعریف شده و سپس به کاهش مقدار فشار منفذی در اثر تخلیه پرداخته می‌شود. در ادامه شرایط لازم جهت چرخش تنش‌های افقی بررسی خواهد شد و در آخر نیز با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی یکی از مخازن میدان پارس جنوبی هرکدام از موارد بیان شده مطالعه می‌شود.

### ایجاد گسل در اثر تولید

مطالعات زیادی در حالت‌هایی که هم برداشت سیال و هم تزریق سیال باعث فعال شدن گسل در مخازن نفت و گاز می‌شود، انجام شده است. براساس مطالعات انجام شده بر تزریق در کوه‌های راکی و میدان نفتی رنجلی در کلرادو، ایجاد گسل در مخازن نفت و گاز معمولاً در اثر افزایش فشار منفذی با سیلاب‌زنی و شکاف هیدرولیکی رخ می‌دهد. علت لغزش گسل ایجاد شده در این حالت‌ها افزایش فشار منفذی و در نتیجه کاهش تنش نرمال موثر بر صفحه گسل است [۷]. این در حالی است که تولید نیز می‌تواند عامل ایجاد گسل باشد. در این قسمت مکانیزم ایجاد گسل نرمال در اثر تولید، زمانی که مسیر تنش به اندازه کافی بزرگ است بررسی می‌شود.

### مسیر تنش

نظریه پورو الاستیک را می‌توان برای پیش‌بینی مقدار تغییرات تنش در اثر تخلیه به کار برد. در یک مخزن ایزوتروپیک<sup>۱</sup> و الاستیک که به طور بی‌نهایت گسترده شده، اگر تنها منبع تنش فشاری افقی توسط بار گرانشی اعمال شود، رابطه بین تنش موثر عمودی و تنش موثر افقی متناظر با فرض کرنش سطحی<sup>۲</sup> به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]:

با حفاری در نواحی تخلیه شده تغییرات زیادی در گرادیان فشار رخ می‌دهد. این تغییرات می‌تواند عامل مشکلات زیادی باشد که با روش‌های سنتی حفاری نمی‌توان آنها را حل نمود [۱]. روش‌های مختلفی برای حفاری مخزن تخلیه شده استفاده می‌شود. می‌توان هنگام استفاده از وزن گل بیشتر از کمترین تنش اصلی، با حفاری در جهت مناسب از ایجاد شکاف هیدرولیکی نزدیک چاه جلوگیری کرد. استفاده از افزودنی‌هایی جهت جلوگیری از نفوذ گل به سازند و یا افزودنی‌های مقاوم کننده برای سیمان کردن دانه‌های سازند در دیواره چاه هم برخی از مشکلات را کم می‌کنند [۲]. افزودن مواد جلوگیری کننده از هرزروی می‌تواند باعث کاهش هرزروی بشود. البته مواردی مشاهده شده است حتی با وجود مواد جلوگیری کننده تا ۱۰۰۰ بشکه گل هرز رفته است [۳]. سیستم‌های مدیریت فشار گل نیز برخی از مشکلات مخارن تخلیه شده را بر طرف می‌کنند. در این سیستم‌ها که مخصوص حفاری در دریا هستند، پمپی کف دریا نصب شده و سطح گل در رایزر را تغییر می‌دهد. در نتیجه فشار هیدرواستاتیکی در کف چاه کنترل می‌شود [۴]. با استفاده از مواد مقاوم کننده هم می‌توان از ایجاد شکاف در دیواره جلوگیری کرد. برای مثال سیلیکات‌ها دیواره چاه را مستحکم و به پایداری چاه کمک کنند. عیب استفاده از این مواد آسیب آنها به سازند است [۵]. برای جبران کاهش تولید گاهی عملیات مشبک کاری را دوباره انجام می‌دهند. این در حالی است که با انجام عملیات شکاف‌دار کردن می‌توان تولید را تقریباً به اندازه اول رساند [۶].

در حالی که تخلیه در بعضی از مخازن می‌تواند مشکلات دشواری را ایجاد کند، می‌تواند تاثیر سودمندی هم بر عملکرد مخزن داشته باشد. برای مثال ایجاد شکاف هیدرولیکی در مخازن تخلیه شده نسبت به شکاف در همان مخزن قبل از تخلیه آسان‌تر است. در واقع با فشار کمتری شکاف ایجاد می‌شود. همچنین در صورت چرخش جهت تنش‌ها

1. Plane Strain  
2. Isotropic

گسل نرمال در حالت تعادلی اصطکاکی قرار دارد که رابطه زیر برقرار باشد:

$$\frac{S_V - (P_p - \Delta P_p)}{(S_h - \Delta S_h) - (P_p - \Delta P_p)} = f(\mu) \quad (5)$$

که در آن:

$$f(\mu) = (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 \quad (6)$$

با ساده کردن رابطه ۴ و ۵، رابطه زیر حاصل می شود:

$$\frac{S_V - P_p}{S_h - P_p} = f(\mu) \left( 1 - \frac{-\Delta P_p + \Delta S_h}{S_h - P_p} \right) - \left( \frac{\Delta P_p}{S_h - P_p} \right) \quad (7)$$

با توجه به رابطه ۵، زمانی که گسل های نرمال در تعادل اصطکاکی هستند، رابطه ۷ به صورت زیر در می آید [۹].

$$f(\mu) = f(\mu) - f(\mu) \left( \frac{-\Delta P_p + \Delta S_h}{S_h - P_p} \right) - \left( \frac{\Delta P_p}{S_h - P_p} \right) \quad (8)$$

با توجه به تعریف مسیر تنش و قرار دادن  $A = \Delta S_h - \Delta P_p$  میزان بحرانی مسیر تنش  $(A^*)$  از رابطه ۹ حاصل می شود. همان طور که بیان شد، اگر مسیر تنش از  $A^*$  بیشتر شود، در اثر تولید گسل نرمال ایجاد می شود.

$$A^* = 1 - \frac{1}{(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2} \quad (9)$$

برای  $\mu = 0.6$  مسیر تنش تئوری مرتبط با گسل نرمال، تقریباً برابر با ۰/۶۷ خواهد بود. این امر نشان گر این مطلب است که با زیادتر شدن مسیر تنش از ۰/۶۷ حالت ناپایدار می شود. در این موارد در نهایت با تخلیه به اندازه کافی، گسل ایجاد می شود. این در حالی است اگر مسیر تنش کمتر از ۰/۶۷ باشد، بدون توجه به مقدار تخلیه هرگز گسل ایجاد نمی شود [۱۰].

شکل ۱ نشان می دهد که در حالت اول در اثر تولید به طور حتم گسل ایجاد خواهد شد. حالت دوم مسیر تنش تقریباً برابر مسیر تنش بحرانی است و باز هم امکان ایجاد گسل وجود دارد. در حالت سوم بدون در نظر گرفتن مدت و مقدار تولید، هرگز گسلی ایجاد نخواهد شد.

$$S_{Hor} = \left( \frac{g}{1-g} \right) (s \cdot g) + \alpha P \left( 1 - \frac{g}{1-g} \right) \quad (1)$$

که  $S_{Hor}$  نماینده  $S_{Hmax}$  و  $S_{Hmin}$  است و هر دو را می توان به جای  $S_{Hor}$  قرار داد [۸].  $\alpha$  ضریب بیوت و  $g$  نسبت پواسون است. اگر از دو طرف نسبت به فشار منفذی مشتق گرفته شود:

$$\Delta S_{Hor} = \alpha \left( \frac{1-2g}{1-g} \right) \Delta P_p \quad (2)$$

با منظم کردن معادله ۲ می توان مسیر تنش برای یک مخزن را تعریف کرد که برابر نسبت تغییر تنش افقی به تغییر در فشار منفذی است [۹].

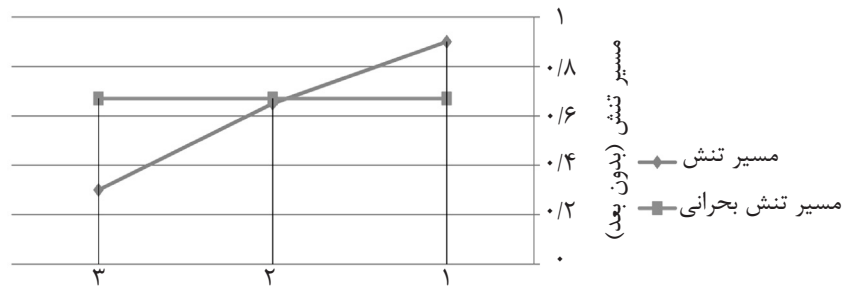
$$\Lambda = \alpha \left( \frac{1-2g}{1-g} \right) = \frac{\Delta S_{Hor}}{\Delta P_p} \quad (3)$$

واضح است که چون رابطه ۲ برای یک مخزن بی نهایت افقی و دارای ضخامت محدود به دست آمده است، تنش عمودی تغییر نمی کند. به وسیله مدل سازی فشردگی مخزن نشان داده شده است که اگر نسبت گسترش جانبی به ضخامت یک مخزن بیشتر از ۱۰ به ۱ باشد (که معمولاً هست)، معادله ۲ با دقت بالایی درست است. بنابراین در مخازنی که در مقایسه با ضخامتشان به طور جانبی گسترش یافته اند تنش های افقی با تخلیه شدن کاهش می یابند و تنش عمودی ضرورتاً ثابت می ماند [۱۰].

با توجه به اینکه در اثر تخلیه مخزن  $P_p$  کاهش می یابد، اگر مسیر تنش تخلیه از مقدار بحرانی بیشتر باشد، امکان ایجاد گسل نرمال درون مخزن وجود دارد. مقدار بحرانی برای ایجاد گسل نرمال را می توان از شرط شکست موهبر- کولومب محاسبه کرد. برای یک مخزن که به طور جانبی گسترده شده و با توجه به تغییرات فشار منفذی در یک بازه زمانی، اگر فشار اولیه  $P_p$  و تنش اولیه  $S$  باشد، بعد از مدتی فشار و تنش به اندازه  $\Delta P_p$  و  $\Delta S$  کاهش می یابند. با توجه به روابط اندرسون برای گسل نرمال می توان رابطه ذیل را بیان کرد [۹]:

$$\frac{\dot{\sigma}_1}{\dot{\sigma}_3} = \frac{S_V - P_p}{S_{Hmin} - P_p} \leq (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 \quad (4)$$

با توجه به کاهش فشار مندی و تنش افقی، زمانی



شکل ۱ مقایسه مسیر تنش و مسیر تنش بحرانی در سه حالت فرضی. مورد فرضی مطالعه شده

از نمودارهای ارتباط دهنده  $\psi$  و فشار کمک گرفت. به این منظور با محاسبه  $\psi$  می توان فشار مربوط را پیدا کرد. زمانی گسل ایجاد می شود که اختلاف فشار حاصل برابر طرف چپ رابطه ۱۱ شود. زیرا شرط لازم برای ایجاد گسل خارج شدن محیط از تعادل اصطکاکی است. در اثر رسیدن اختلاف فشار به مقدار محاسبه شده در سمت چپ رابطه ۱۱، محیط از تعادل اصطکاکی خارج و گسل ایجاد می شود. همچنین پارامترهای رابطه ۱۲ به صورت زیر تعریف می شوند:

$$q_D = \frac{1.417 * 10^6 T q_{sc}}{kh \psi_i} \quad (13)$$

$$\bar{A}P_D = \frac{2t_D}{r_{eD}^2} + \ln(0.472 r_{eD}) \quad (14)$$

در رابطه ۱۳،  $\psi$ ،  $T$ ،  $k$ ،  $q_{sc}$  به ترتیب، دبی در حالت استاندارد، دما، تراوایی و شبه فشار است. در رابطه ۱۴ پارامترهای بدون بعد به کار رفته به صورت زیر تعریف می شوند:

$$t_D = \frac{0.0002637 k t}{\phi \mu c r_w^2} \quad (15)$$

$$r_{eD} = \frac{r_e}{r_w} \quad (16)$$

همچنین زمان تبدیل حالت جریان از ناپایدار به شبه پایدار از رابطه زیر به دست می آید:

$$t_{pss} = \frac{\phi \mu c r_w^2}{0.0002637 k t} \quad (17)$$

### ایجاد شکاف در هنگام حفاری مخزن تخلیه شده

در بعضی از موارد لازم است که مخزن تخلیه شده حفاری شود تا بتوان به لایه های پایین تر

### مدت زمان لازم برای ایجاد گسل در اثر تولید

با آغاز تولید از یک مخزن گازی، فشار مخزن در در حالت گذرا و طبق رابطه ۱۰ تغییر می کند [۱۱]:

$$P^2(r,t) = P_i^2 - \left[ \frac{1637QTz\mu}{kh} \right] \left[ \log \frac{kt}{\mu c r^2 \phi} - 3.23 \right] \quad (10)$$

که در اینجا  $k$  و  $\mu$ ،  $z$ ،  $c$ ،  $Q$ ،  $T$  به ترتیب عبارتند از: ثابت گازها، لزجت، دما، دبی، قابلیت فشرده گی و تراوایی (md) است.

با توجه به این که رابطه ۵ برای گسل نرمال صادق است، با استفاده از رابطه ۵ و به دست آوردن تغییرات فشار در طول زمان از رابطه ۱۰، زمان لازم برای ایجاد گسل محاسبه می شود. پس از گذشت مدت زمان  $t$  که در رابطه ۱۱ صدق می کند، گسل نرمال ایجاد می شود.

$$\frac{S_V - f(\mu)Sh - (1-f(\mu))Pp}{f(\mu) - Af(\mu) - 1} = P_i - \sqrt{P_i - \left[ \frac{1637QTz\mu}{kh} \right] \left[ \log \frac{kt}{\mu c r^2 \phi} - 3.23 \right]} \quad (11)$$

در صورتی که زمان به دست آمده بیشتر از زمان اتمام جریان ناپایدار و رسیدن حالت جریان مخزن به شبه پایدار باشد، لازم است اختلاف فشار ایجاد شده در اثر تولید به صورت زیر محاسبه شود [۱۲]:

$$\psi_2 = \psi_i - \psi_i \Delta P_D q_D \quad (12)$$

در اینجا  $\psi$  شبه فشار<sup>۱</sup> است. بر اساس  $\psi_2$  می توان فشار را پس از مدت زمان معینی که از تولید می گذرد محاسبه کرد. برای این منظور می توان

1. Pseudo Pressure

زیاد نیست، شکاف هیدرولیکی بیشتر به صورت عمودی گسترش می‌یابد و میزان گسترش افقی آن به اندازه لازم نخواهد بود. پس از تخلیه مخزن و کاهش فشار منفذی و تنش‌های افقی، گسترش افقی شکاف افزایش می‌یابد. شکل ۲ چگونگی تاثیر اختلاف تنش افقی در لایه مورد نظر و لایه‌های مجاور را نشان می‌دهد.

#### چرخش تنش‌ها در اثر تخلیه

همان‌طور که در بالا بحث شد، تخلیه در یک مخزن که به طور جانبی گسترده شده باعث کاهش تنش‌های افقی به طور مساوی می‌شود. در چنین حالتی انتظار نمی‌رود که در جهت تنش‌ها تغییری رخ بدهد. اما بر اساس اندازه‌گیری جهت تنش‌های وارد بر چاه‌ها در چند میدان این‌طور مشخص می‌شود که در نزدیک گسل‌ها جهت تنش‌ها تغییر می‌کند [۱۴].

در این قسمت به بررسی تخلیه یک میدان ایده آل محدود که توسط یک گسل نا تراوا احاطه شده است، پرداخته می‌شود. چون گسل به عنوان یک معبر برای جریان سیال عمل می‌کند، تغییرات تنش‌ها در هنگام تخلیه ایزوتروپیک نخواهد بود. شکل ۳ به صورت شماتیکی گسلی را به عنوان مرز مخزن و با زاویه مشخصی با بیشترین تنش اصلی نشان می‌دهد. [۹]

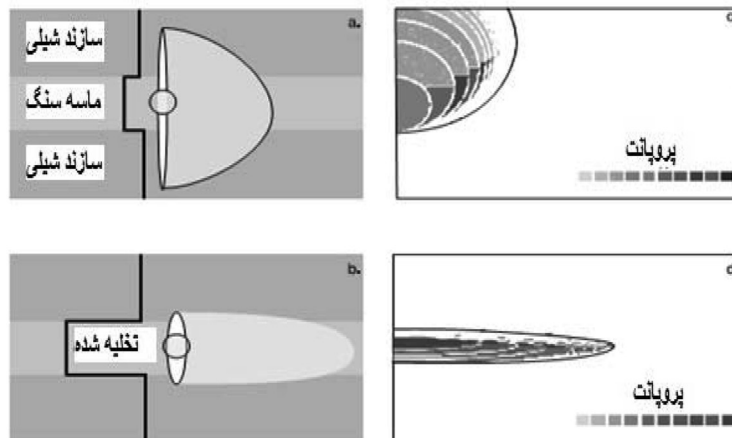
دسترسی پیدا کرد. چون در اثر تخلیه فشار منفذی کاهش می‌یابد، امکان ایجاد شکاف و در نتیجه هرزروی گل وجود دارد. هنگام حفاری باید برای جلوگیری از ورود سیال احتمالی از لایه بالای مخزن، فشار را تنظیم کرد. اما اگر با همان فشار گل در حفاری اولیه مخزن تخلیه شده حفاری شود، ممکن است دیواره چاه بشکند و هرزروی رخ بدهد. در واقع وزن گل لازم برای حفاری لایه تخلیه شده پایین‌تر از وزن لازم برای حفاری لایه بالای آن است. این امر که خلاف تجربیات حفاری در لایه‌های معمولی است، می‌تواند باعث ایجاد مشکل بشود.

$$P_w^{frac} = 2\sigma_h - P_f + T_0 \quad (18)$$

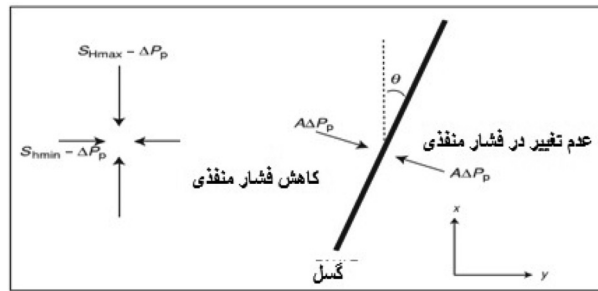
که در این جا  $P_w$  فشار درون چاه و  $P_f$  فشار منفذی است.  $T_0$  استحکام کششی سنگ است که در مقایسه با استحکام فشاری بسیار کوچک‌تر است. با توجه به کاهش همزمان فشار منفذی و تنش افقی، حد بالای فشار کاهش می‌یابد. در نتیجه در صورت ادامه حفاری با وزن گل سابق چاه دچار شکاف می‌شود.

#### ایجاد شکاف در اثر شکاف هیدرولیکی

در اثر تخلیه و در نتیجه کاهش فشار منفذی می‌توان با اعمال فشار کمتری در مخزن شکاف ایجاد کرد. همچنین در مناطقی که تفاوت تنش افقی کمینه بین لایه مورد نظر و لایه‌های اطراف



شکل ۲ a: نحوه گسترش شکاف هیدرولیکی در یک مخزن ماسه‌ای که تنها تفاوت کمی بین کمترین تنش مخزن و لایه‌های اطراف وجود دارد. مقدار کمترین تنش افقی با خط مستقیم نشان داده شده است. b: در اثر تخلیه تفاوت تنش افقی میان مخزن و لایه‌های اطراف افزایش یافته است [۱۱].



شکل ۳ تخلیه در یک طرف گسل و در نتیجه کاهش تنش نرمال در سرتاسر گسل به اندازه  $A\Delta P$  [۱۰].

گذشت زمان و انجام عملیات شکافت هیدرولیکی می‌توان به نقاط جدیدی از مخزن دست یافت.

#### مطالعه موردی یکی از مخازن میدان پارس جنوبی

میدان گازی پارس جنوبی بزرگترین میدان گازی جهان است. این میدان در فاصله ۱۰۰ km از ساحل ایران در خلیج فارس قرار دارد و دارای مساحتی حدود  $9700 \text{ km}^2$  است. حدود  $3700 \text{ km}^2$  آن در آب‌های جمهوری اسلامی ایران واقع شده است. مخزن این میدان در عمقی بین ۲۷۰۰ تا ۳۱۰۰ m از کف دریا واقع شده و ضخامت متوسط آن برابر با ۴۰۰ m می‌باشد. از دیدگاه زمین‌شناسی این مخزن در پهنه زاگرس واقع شده و دو سازند کربناتی دالان و کنگان مخازن این میدان را تشکیل می‌دهند. مخزن مورد مطالعه دارای لایه‌های متنوعی می‌باشد ولی در مجموع شش لایه شاخص از نظر خصوصیات مکانیکی در این مخزن شناسایی شد [۱۶].

#### مشخصات ژئومکانیکی مخزن مورد مطالعه

به منظور ساخت مدل مکانیکی و به دست آوردن تنش‌های برجا و خصوصیات مکانیکی مخزن، داده‌های مختلفی استفاده می‌شوند. برای مثال می‌توان به داده لاک‌های مختلف، گزارش‌های حفاری و مغزه‌گیری اشاره کرد. در صورت نبود هر یک از داده‌ها، محاسبات با استفاده از روابط تجربی بیان شده انجام می‌گیرد.

فشار روباره را می‌توان با استفاده از داده‌های لاک

$$\sigma_v = \int_0^H \rho_b(h) dh \quad (25)$$

که در اینجا  $\rho_b$  چگالی سنگ است. با استفاده رابطه ۲۶ که یک رابطه تجربی است، می‌توان سرعت

حالت تنش جدید در مخزن و نزدیک گسل طبق شکل ۳ به صورت زیر خواهد بود [۱۵]:

$$S_x = S_{Hmax} - A\Delta P_p - \frac{A\Delta P_p}{2}(1 - \cos 2\theta) \quad (19)$$

$$S_y = S_{Hmin} - A\Delta P_p - \frac{A\Delta P_p}{2}(1 + \cos 2\theta) \quad (20)$$

$$\hat{\sigma}_{xy} = \frac{A\Delta P_p}{2} \sin 2\theta \quad (21)$$

چرخش بزرگترین تنش افقی اصلی نزدیک به گسل نسبت به آزمون  $S_{Hmax}$  اولیه، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{\alpha} = 0.5 \tan^{-1} \left[ \frac{2\tau_{xy}}{S_x - S_y} \right] = 0.5 \tan^{-1} \left[ \frac{A\Delta P_p \sin 2\theta}{(S_H - S_h) + A\Delta P_p \cos 2\theta} \right] \quad (22)$$

q را به عنوان نسبت تغییرات فشار منفذی به تفاوت تنش‌های افقی اولیه تعریف می‌شود و مقدار آن برای تخلیه مثبت در نظر گرفته می‌شود:

$$q = \frac{\Delta P_p}{S_{Hmax} - S_{Hmin}} \quad (23)$$

می‌توان چرخش تنش را با جایگزینی q در معادله ۲۲ به سادگی به عنوان تابعی از q، مسیر تنش (A) و جهت گسل ( $\theta$ ) بیان کرد [۱۵]:

$$\tilde{\alpha} = 0.5 \tan^{-1} \left[ \frac{Aq \sin 2\theta}{1 + Aq \cos 2\theta} \right] \quad (24)$$

در اثر چرخش تنش‌ها و به خصوص تنش افقی کمینه، می‌توان عملیات ایجاد شکاف هیدرولیکی را مدیریت کرد. با توجه به این که شکاف هیدرولیکی عمود بر تنش افقی کمینه گسترش می‌یابد، در اثر چرخش تنش‌های افقی شکاف هیدرولیکی نیز در جهت‌های جدیدی گسترش می‌یابد. در نتیجه با

می‌توان گفت زمانی شکست رخ می‌دهد که شرط زیر برقرار باشد:

$$\sigma'_3 = T_0 \quad (۳۵)$$

همچنین با توجه به این که  $\sigma'_r = P_w$  یکی دیگر از تنش‌های اصلی است، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$\tan(2\beta) = \frac{2\tau_{\theta\zeta}}{\sigma'_\theta - \sigma'_\zeta} \quad (۳۶)$$

باید توجه داشت که طبق فرض بالا، رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$\frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} = 0 \quad (۳۷)$$

که در اینجا خواهیم داشت [۲۰]:

$$\frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} + \frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} \right) - \frac{1}{4} \sqrt{(\sigma'_\theta - \sigma'_\zeta)^2 + 4\tau_{\theta\zeta}^2} \left( 2(\sigma'_\theta - \sigma'_\zeta) \left( \frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} + \frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} \right) + 8\tau_{\theta\zeta} \frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} \right) \quad (۳۸)$$

$$\frac{\partial \delta'_3}{\partial \theta} = 4(\sigma_x - \sigma_y) \sin(2\theta) - 8\tau_{\theta\zeta} \cos 2\theta \quad (۳۹)$$

در مرحله بعد، با استفاده از ماتریس تبدیل مختصات تنش‌ها از مختصات محلی چاه به مختصات تنش‌های برجا تبدیل می‌شوند.  $P_w$  و  $\gamma$  از داده‌های چاه به دست می‌آیند.  $\gamma$  زاویه چاه با خط عمود است. با استفاده از لاگ FMI، دو پارامتر  $\beta$  و  $\theta$  که به ترتیب عبارتند از زاویه شکستگی در صفحه افقی و زاویه شکستگی در صفحه عمودی به دست می‌آیند. با حل همزمان سه معادله ۳۵، ۳۶ و ۳۷، دو تنش افقی و همچنین  $\phi$  که آزیموت تنش‌های افقی نسبت به مختصات چاه است، به دست می‌آیند. در این مقاله از روش حل نیتون رافسون غیر خطی برای حل همزمان سه معادله استفاده شده است. نتایج در جدول ۱ قابل مشاهده است. طبق رابطه ۳ و با استفاده از جدول ۲ می‌توان مسیر تنش را برای لایه‌های مختلف مخزن مورد مطالعه به دست آورد. شکل ۴ مسیر تنش را برای شش لایه نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه ۹ نیز مقدار مسیر تنش بحرانی ( $A^*$ ) برای لایه‌های مختلف محاسبه و در شکل ۴ با هم مقایسه شده‌اند.

موج برشی را از موج فشاری به دست آورد [۱۸].

$$V_c = 1.16 V_s + 1.36 \quad (۲۶)$$

که در اینجا  $V_c$  سرعت موج فشاری و  $V_s$  سرعت موج برشی است. سرعت‌ها بر حسب km/s هستند. خصوصیات ژئومکانیکی سنگ مخزن از روابط زیر به دست می‌آیند. بررسی این خصوصیات به منظور مطالعه مخزن مورد نظر و همچنین به دست آوردن تنش‌های برجا اهمیت دارد.

$$G_{dyn} = 13474.45 \frac{\rho_b}{(\Delta t_s)^2} \quad (۲۷)$$

$$E_{dyn} = 2G(1 + \nu) \quad (۲۸)$$

$$\rho_{dyn} = \frac{0.5 \left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1}{\left( \frac{\Delta t_s}{\Delta t_c} \right)^2 - 1} \quad (۲۹)$$

که در روابط بالا،  $G_{dyn}$  مدول برشی و  $E_{dyn}$  مدول یانگ در حالت دینامیک هستند.  $\Delta t$  معکوس سرعت موج است [۹]. می‌توان با استفاده از رابطه زیر پارامتر دینامیکی به استاتیکی تبدیل کرد [۱۹].

$$E_{sta} = 0.4145 E_{dyn} - 1.0593 \quad (۳۰)$$

در این مقاله با استفاده از لاگ FMI و شکست‌های القایی ایجاد شده در حین حفاری تنش‌های افقی برجا محاسبه می‌شوند. به این منظور، از لاگ FMI میانگین زاویه شکست‌های ایجاد شده به دست می‌آید. می‌توان تنش‌های موثر وارد بر دیواره چاه را به شکل زیر نمایش داد:

$$\sigma' = \begin{bmatrix} \sigma'_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma'_\theta & \tau_{\theta\zeta} \\ 0 & \tau_{\theta\zeta} & \sigma'_\zeta \end{bmatrix} \quad (۳۱)$$

تنش‌های اصلی موثر در دیواره چاه را می‌توان از روابط زیر محاسبه کرد:

$$\sigma'_1 = \sigma'_r \quad (۳۲)$$

$$\delta'_2 = \frac{(\sigma'_\theta + \sigma'_\zeta) + \sqrt{(\sigma'_\theta - \sigma'_\zeta)^2 + 4\tau_{\theta\zeta}^2}}{2} \quad (۳۳)$$

$$\delta'_3 = \frac{(\sigma'_\theta - \sigma'_\zeta) - \sqrt{(\sigma'_\theta - \sigma'_\zeta)^2 + 4\tau_{\theta\zeta}^2}}{2} \quad (۳۴)$$

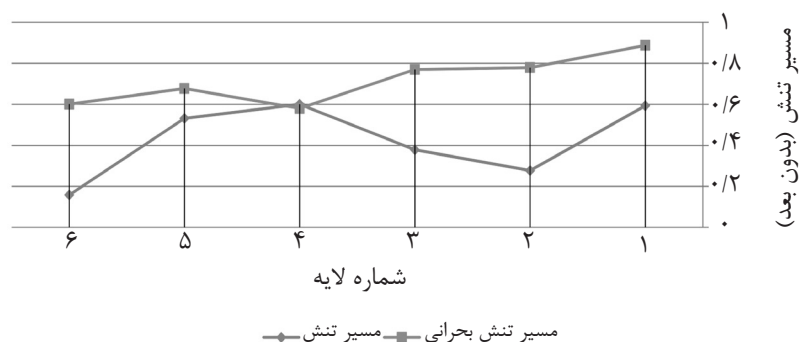
با فرض اینکه  $\sigma'_3$  کمترین تنش اصلی است در نتیجه

جدول ۱ تنش‌های برجای منطقه.

$S_h$ (MPa)	$S_H$ (MPa)	$S_v$ (MPa)
۴۰/۵۰	۴۷/۶۲	۵۴/۲۰

جدول ۲ خصوصیات ژئومکانیکی لایه‌های شاخص مخزن پارس جنوبی.

شماره لایه	لایه (جنس)	ضخامت	مدول باتگ (E) (bar)	نسبت پواسون	ضریب بیوت	زاویه اصطکاک داخلی ( $\theta$ )
۱	GRAINSTONE (Coarse grained)	۱۴/۷	۷۶۰۰۰	۰/۲۵	۰/۸۹	۵۲/۹
۲	MUDSTONE	۱۴۱/۳	۳۶۳۰۰۰	۰/۴۰	۰/۸۳	۳۹/۶
۳	PACKSTONE (Fine grained)	۵۰/۹	۲۳۸۰۰۰	۰/۳۵	۰/۸۲	۳۸/۷
۴	MASSIVE GRAINSTONE	۵۸/۷	۷۲۰۰۰	۰/۲۵	۰/۹۰	۲۰/۱
۵	PACKSTONE (Coarse grained)	۴۷/۴	۱۰۶۰۰۰	۰/۳۰	۰/۹۳	۳۰/۷۵
۶	GRAINSTONE (Fine grained)	۲۵/۳	۲۵۳۰۰۰	۰/۴۵	۰/۸۷	۲۵/۴



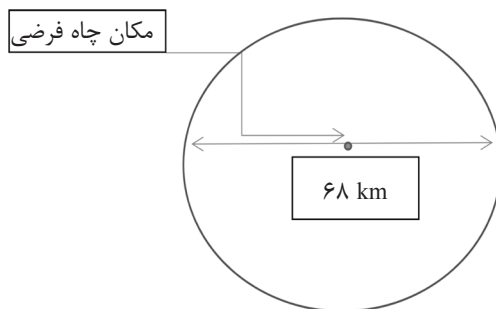
شکل ۴ مقایسه مسیب تنش و مسیب تنش بحرانی در ۶ لایه مخزن پارس جنوبی.

شکل ۶ نمایش داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که زمان لازم بر حسب دبی تولید می‌تواند تغییرات زیادی داشته باشد.

برای دو لایه ابتدایی مخزن مورد مطالعه، نمودار چرخش جهت تنش افقی با زاویه بین تنش اولیه و گسل در شکل ۷ و ۸ نمایش داده شده است. با چرخش تنش‌های افقی جهت شکاف‌های هیدرولیکی جدید هم تغییر می‌کند. با توجه به گسترش شکاف در جهت عمود بر تنش افقی کمینه، میزان چرخش تنش‌های افقی کمینه و بیشینه با میزان تغییر در جهت شکاف‌های جدید برابر است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود تنها در لایه چهارم امکان ایجاد گسل وجود دارد. در بقیه لایه‌ها بدون توجه به مقدار تولید و تخلیه شدن، امکان تشکیل گسل وجود ندارد. وجود گسل برای ادامه حفاری و یا ایجاد شکاف هیدرولیکی چالش‌ها و مشکلات جدیدی را به وجود می‌آورد. برای مثال می‌تواند باعث هرزروی گل شود. برای محاسبه زمان ایجاد گسل لایه چهارم، فرض می‌شود که مخزن به شکل دایره است. همچنین تولید به صورت تک فاز و تنها گاز انجام می‌گیرد. همچنین مانند شکل ۵ تولید تنها از یک چاه در مرکز مخزن انجام می‌شود. با استفاده از پارامترهای جدول ۱، ۲، ۳ و ۴، زمان ایجاد گسل بر حسب دبی تولید در نمودار





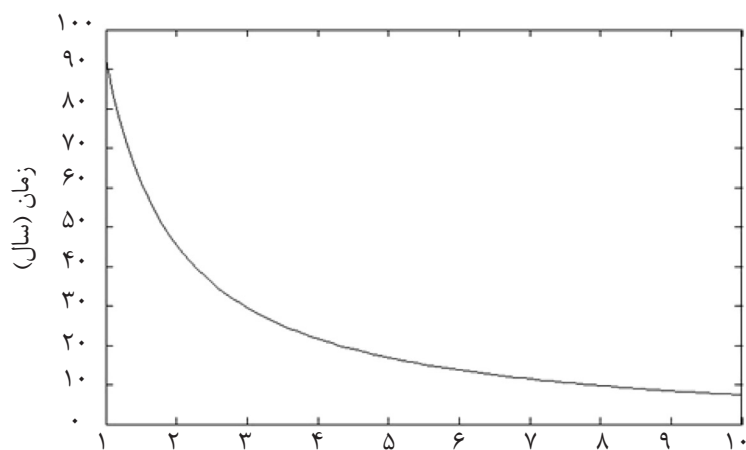
شکل ۵ تولید از تنها یک چاه فرضی در مرکز مخزن.

جدول ۳ پارامترهای ناحیه مورد بررسی [۱۷].

عمق (m)	قابلیت فشردگی ( $pa^{-1}$ )	شعاع مخزن (m)	تخلخل	تراوایی (md)	فشار اولیه (MPa)
۳۱۰۰	۷/۵۸	۳۳۸۰۲	٪۱۰	۲۷	۳۶/۵

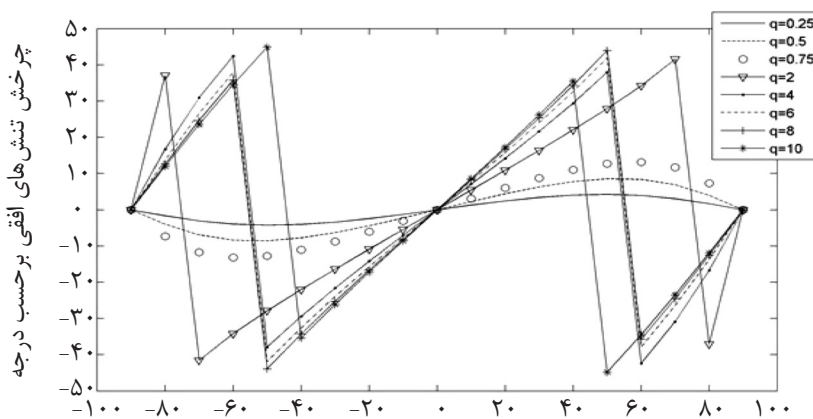
جدول ۴ مشخصات گاز تولیدی فرضی.

$\Psi_i$	دما (R)	Z	ویسکوزیته (cp)
۱۰۰۰	۷۰۰	۰/۹۴۴	۰/۰۲۳



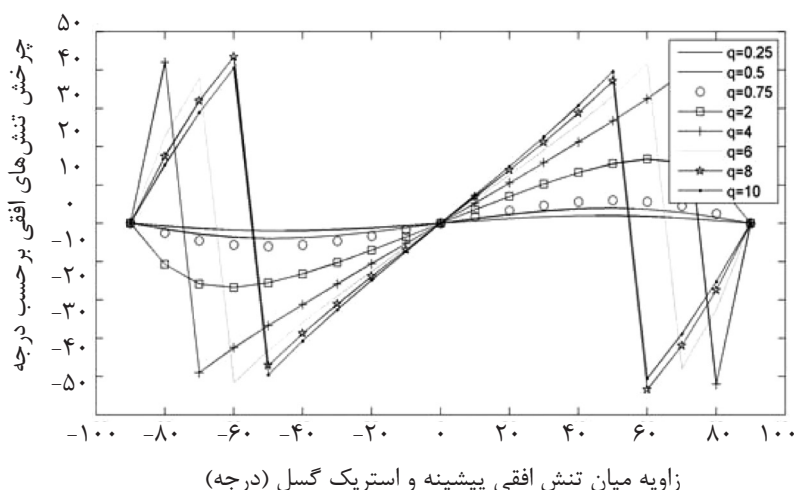
میزان تولید بر میلیون متر مکعب استاندارد

شکل ۶ مدت زمان لازم برای ایجاد گسل بر حسب دبی تولیدی در لایه چهارم.



زاویه میان تنش افقی پیشینه و استریک گسل (درجه)

شکل ۷ میزان تغییر جهت تنش براساس زاویه ابتدایی آن با گسل برای لایه اول ( $A=۰/۵۹۳$ )



شکل ۸ میزان تغییر جهت تنش براساس زاویه ابتدایی آن با گسل برای لایه دوم ( $A=0.276$ )

### نتیجه‌گیری

مورد مطالعه، انجام شکافت هیدرولیکی می‌تواند میزان تولید را افزایش دهد و تولید از مناطق جدیدی انجام شود.

۳- احتمال ایجاد گسل تنها در لایه چهارم مخزن مورد مطالعه در پارس جنوبی وجود دارد. در دیگر لایه‌ها در طول زمان تولید هرگز گسل ایجاد نخواهد شد.

۴- با تولید 7 MMscf از تنها یک چاه حفر شده در مرکز مخزن گازی پارس جنوبی، پس از ده سال در دیواره چاه گسل نرمال ایجاد می‌شود.

۵- در مخزن پارس جنوبی هرچه  $q$  و زاویه اولیه تنش با گسل بیشتر باشد، چرخش جهت تنش هم در اثر تخلیه بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه  $q$  وابسته به تغییر فشار منفذی است، هرچه تخلیه بیشتر شود چرخش جهت تنش‌ها هم بیشتر می‌شود.

۱- در حالت کلی وزن گل لازم برای حفاری لایه تخلیه شده پایین‌تر از وزن گل لایه بالایی آن است. این موضوع خلاف حفاری لایه‌های عادی است که با افزایش عمق فشار گل لازم نیز زیاد می‌شود. در صورت عدم توجه به وزن گل مناسب برای لایه تخلیه شده، ایجاد شکست و هرزروی گل رخ می‌دهد. این موضوع در حفاری چاه‌های جدید در مخزن میدان پارس جنوبی پس از تخلیه آن بسیار اهمیت دارد.

۲- به طور کلی تخلیه و کاهش فشار منفذی باعث می‌شود که برای ایجاد شکاف هیدرولیکی به فشار پمپ کمتری نیاز باشد. در اثر چرخش جهت تنش‌ها، شکاف هیدرولیکی در جهت‌های جدیدی گسترش می‌یابند و می‌توان به نقاط جدیدی از مخزن دست یافت. با گذشت زمان و تولید از مخزن

### منابع

- [1]. Fekete P. and Paul O., "Wellbore stability management in depleted and low pressure reservoirs", 2013, SPE 167543.
- [2]. Oort V. and Gradisher E., "Accessing deep reservoirs by drilling severely depleted formations", 2003, SPE 79861. SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Society of Petroleum Engineers.
- [3] Shaughnessy J., Fuqua R. and Roma L., "Successfully drilling highly depleted sands", 2001, SPE/IADC 67744.
- [4] Fossli B. and Roger S., "Drilling depleted reservoirs using controlled mud level technology in mature subsea

- fields*", 2014, SPE-169178-MS.
- [5]. Byrne M. and Oyovwevotu J., "Drilling Depleted reservoirs- Is formation damage sometimes a good thing?", 2013, SPE 165114.
- [6]. Ataur R., Tolulope M., Yaseen H. and Khnaifir K., "Refracturing in old Mature and depleted carbonate reservoirs in Saudi Arabia for production enhancement", 2014, IPTC 17665.
- [7]. Raleigh C. B. and Healy J. H., "Faulting and crustal stress at rangely, colorado", Flow and Fracture of Rocks. J. C. Heard. Washington, D.C., American Geophysical Union, pp. 275–284, 1972.
- [8]. Lorenz J. C., Teufel L. W. and WARPINSKI N. R., "Regional fractures I: A mechanism for the formation of regional fractures at depth in flat-lying reservoirs", Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull., Vol. 75, Issue 11, pp. 1714–1737, 1991.
- [9]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics", Cambridge publication, 2007.
- [10]. Zinke J. C. and Zoback M. D., "Structure-related and stress-induced shear-wave velocity anisotropy: Observations from microearthquakes near the Calaveras fault in central California", Bulletin of Seismological Society of America, 90, pp. 1305–1312, 2000.
- [11] Ahmed T., "Reservoir engineering hand book", 2010, Gulf Professional Publication.
- [12] Amanat U., chaudhury, "Gas well testing handbook", 2003, Gulf Professional Publishing.
- [13] Fjaer E., Holt R. M., Hordrud P., Raaen A. M. and Risnes R., "Petroleum related rock mechanic", Developments in Petroleum Science, Elsevier, 2008.
- [14] Wright C. A., Stewart D. W., "Reorientation of propped refracture treatments in the Lost Hills field", SPE 27896. SPE Western Regional Meeting, Long Beach, California, 1994.
- [15]. Zoback M. D., Day Lewis A. and Kim S. M., "Predicting changes in hydrofrac orientation in depleting oil and gas reservoirs", Patent Application Pending, 2007.
- [16]. Taherynia M., Fatemi Aghda M. and Ghazifard A., "Modeling of Land Subsidence in the South Pars Gas Field (Iran)", International Journal of Geosciences 4, pp. 1095-1100, 2013.
- [17]. Rahimpour Bonab H., Esrafilizaji B. and Tavakoli V., "Dolomitization and anhydrite prediction in PERMO-TRIASSIC carbonates at the south Pars gas field", Journal of Petroleum Geology, Vol. 33, Issue 1, 2010.
- [18]. Castagna J. P., Batzle M. L. and Eastwood R. L., "Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rock", Geophysics, Vol. 50, No. 4, 1985.
- [19]. Afshari M., Ghaffori M. R. and Roostaean M., "Mechanical earth model: an effective tool for borehole stability analysis and manager pressure drilling", SPE Conference 118780, 2009.
- [20]. Huang J. and Wong S., "New inversion method to determine in-situ stress from borehole induced fractures", IPTC-18000-MS, 2014.