تعیین تنش‌های برجا و بررسی پتانسیل فعالیت مجدد شکستگی‌ها و گسل‌ها جهت تزریق CO_2 برای ازدیاد برداشت نفت در میدان نفتی گچساران

محمدکاظم امیری، غلامرضا لشکری پور*، سیاوش قابزلو،
ناصر حافظی مقدس؛ دانشگاه فردوسی مشهد
مجتبی حیدری تجره؛ شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب

تاریخ: دریافت ۹۶/۱۱/۰۸ پذیرش ۹۷/۰۷/۲۴

تزریق CO_2 در سازندهای زمین‌شناسی، مانند مخازن تخلیه شده نفت و گاز، علاوه بر مزیت‌های زیست‌محیطی یکی از روش‌های مؤثر ازدیاد برداشت نفت به‌عنوان ازدیاد برداشت ثالثیه است. وجود مخازن دارای افت فشار و نیازمند به تزریق گاز در جنوب غرب ایران از یک طرف و داشتن اثرات فنی و زیست‌محیطی از طرف دیگر سبب ایجاد پتانسیل مناسبی جهت تزریق گاز CO_2 برای ازدیاد برداشت در این منطقه شده است. برای انجام یک پروژه تزریق CO_2، در اولین گام، یک ارزیابی از وضعیت فشار منفذی مخزن، مقادیر و جهت‌گیری تنش‌های برجا و وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌ها مورد نیاز است. در این پژوهش، ابتدا فشار منفذی بر اساس روش ایتون تغییر یافته[1] برای ٤٧ چاه برآورد و با داده‌های آزمون مجدد سازند[2] و فشار گل اعتبارسنجی شد. مقادیر تنش‌های برجا برای ٤٧ چاه در طول میدان گچساران، با استفاده از روابط پوروالاستیک، تخمین زده و با استفاده از داده‌های آزمون‌های نشت و نشت تمدید یافته[3] اعتبارسنجی شد. سپس جهت‌گیری تنش‌های برجای افقی و شکستگی‌ها بر استفاده نگاره‌های تصویری بررسی شد. رژیم تنش در میدان بررسی شده نرمال تعیین شد. در نهایت با استفاده تئوری گسل در حالت تنش بحرانی وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌ها از نظر فعالیت هیدرولیکی و مکانیکی ارزیابی شد. در این بررسی

*نویسنده مسئول lashkaripour@um.ac.ir

1. Modified Eaton
2. Repeat Formation Test (RFT)
3. Leak of Test (LOT) and Extended Leak of Test (XLOT)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

گسل‌های شمارهٔ ۱۵، ٦، ۱۰ و ۲ به‌ترتیب مستعدترین گسل‌ها برای فعالیت مجدد در طی تزریق CO_2 بودند.

واژه‌های کلیدی: تزریق CO_2، تخمین فشار منفذی، مشخصه‌سازی تنش‌های برجا، فعالیت مجدد گسل‌ها و شکستگی‌ها

مقدمه

گرمایش جهانی یکی از مسائل حیاتی است که بشر طی چند دههٔ گذشته با آن روبه‌رو بوده است. دانشمندان در جستجوی راه‌هایی برای کاهش انتشار CO_2 در جو و تکنیک‌هایی برای کنترل گرمایش جهانی بوده‌اند [۱]،[۲]. یکی از این روش‌ها تزریق CO_2 در سازندهای زمین‌شناسی مانند مخازن نفت و گاز تخلیه شده یا دارای افت فشار است. این روش به‌عنوان روشی مؤثر برای ذخیره‌سازی CO_2 است [۳]، [٤]، [٥]، [٦]، [۷]، [۸]، [۹]. این کار هم‌چنین سبب ازدیاد برداشت نفت[1] به‌عنوان یک فرآیند ازدیاد برداشت ثالثیه[2] می‌شود که CO_2-EOR نامیده می‌شود [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱٤]. ایران یکی از ده کشور بزرگ تولید کننده CO_2 در دنیاست [۱٥]. از طرفی ایران دارای چهارمین ذخایر بزرگ نفت و دومین ذخایر بزرگ گاز در دنیا است [۱٦]. عمدهٔ این مخازن در جنوب غرب ایران واقع شده‌اند و برخی از آن‌ها دارای افت فشار است و نیازمند تزریق برای ازدیاد برداشت نفت هستند. تزریق در مخزن CO_2 دارای مزیت‌های فنی مانند: افزایش ضریب بازیافت نسبت سایر روش‌های ازدیاد برداشت، حلالیت زیاد دی‌اکسید کربن در نفت خام، افزایش حجم و انبساط نفت خام و کاهش ویسکوزیته نفت خام است که درنهایت به ازدیاد برداشت نفت بهتر نفت کمک می‌کند. وجود مخازن دارای افت فشار و نیازمند به تزریق برای ازدیاد برداشت، داشتن اثرات فنی ذکر شده در صورت تزریق CO_2، کاهش اثرات گلخانه‌ای گاز CO_2 و صرفهٔ اقتصادی استفاده نکردن گاز طبیعی دلایل مناسب بودن گاز CO_2 برای تزریق در مخازن دارای افت فشاری است که در جنوب غرب ایران وجود دارند.

1. Enhanced Oil Recovery
2. Tertiary Enhanced Oil Recovery

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

طراحی و اجرای هر طرح تزریق اعم از تزریق انواع گاز یا آب شور به مخزن نیازمند بررسی‌ها و بررسی‌های اولیه است. یکی از اولین گام‌ها در هر پروژه تزریق به مخزن شناسایی تنش‌های برجا، فشار منفذی اولیه، شکستگی‌ها و گسل‌ها در مخزن و بررسی رفتار آنها در طی تزریق به مخزن، برای اطمینان از ایمنی و حفظ یک‌پارچگی مخزن طی عملیات تزریق است [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]. شناسایی موارد ذکر شده، می‌تواند در بررسی پایداری دیواره چاه، ارزیابی پایداری سازند طی تزریق، فعالیت مجدد گسل‌ها، شکست هیدرولیکی و بررسی یک‌پارچگی پوش‌سنگ استفاده شود [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]. بررسی وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌ها از نظر فعال یا غیرفعال بودن به لحاظ مکانیکی و هیدرولیکی به‌وسیلهٔ تئوری گسل در حالت تنش بحرانی بررسی میشود [۲۳].

تخمین مقدار و جهت تنش‌های برجا در برخی از میادین ایران بررسی شده است [۲٤]، [۲۵]، [۲٦]. اما در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده، نتایج به‌دست آمده با بررسی شکستگی‌ها و گسل‌ها، برای بررسی پتانسیل فعالیت مجدد گسل‌ها و شکستگی‌ها، همراه نشده است. از این‌رو، این مقاله ابتدا شناسایی تنش‌ها برجا، فشار منفذی، شکستگی‌ها و گسل‌ها را ارائه می‌کند. مقادیر تنش‌های برجا با استفاده از روش پوروالاستیک برآورد می‌شود و سپس بر اساس نتایج آزمایش‌های نشت سازند و نشت تمدید یافته اعتبارسنجی می‌شود. جهت تنش‌های برجا و جهت‌گیری شکستگی‌ها با استفاده از تفسیر نگاره‌های تصویری به‌دست آورده و فشار منفذی بر اساس روش ایتون[1] [۲۷] تغییر یافته محاسبه می‌شود. در نهایت با استفاده از مشخصه‌سازی تنش‌های برجا، فشار منفذی و جهت‌گیری شکستگی‌ها و گسل‌ها، پتانسیل فعالیت آن‌ها با استفاده از تئوری گسل در حالت تنش بحرانی[2] ارائه شده به‌وسیلهٔ بارتون و همکاران[3] [۲۳] بررسی می‌شود.

خصوصیات زمین‌شناسی منطقه

منطقهٔ بررسی شده در فروافتادگی دزفول در زون زاگرس چین‌خورده واقع شده است. این منطقه به‌دلیل وجود سنگ منشأ و مخازن غنی، پوش‌سنگ‌های نفوذناپذیر و تاقدیس‌های

1. Eaton
2. Critically-stressed-fault
3. Barton et al

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

فراوان به‌عنوان یکی از غنی‌ترین حوضه‌های نفتی دنیا شناخته می‌شود [۲۸]. وجود سیستم‌های نفتی کرتاسه تا میوسن پیشین یکی از غنی‌ترین مناطق نفتی دنیا را در این منطقه تشکیل داده است که در حدود ۸ درصد نفت دنیا را در خود ذخیره دارد [۲۹]. این سیستم از دو سنگ منشأ، شامل سازندهای کژدمی و پابده، دو سنگ مخزن، شامل سازندهای آسماری و سروک–ایلام، و دو پوش‌سنگ، شامل سازندهای گچساران و گورپی تشکیل شده است. سنگ مخزن آسماری ۷۵ درصد مخازن خشکی ایران را تشکیل می‌دهد [۳۰]. این سازند از سنگ آهک که در بخش‌هایی از آن دولومیتی شدن رخ داده، تشکیل شده است. این سازند به‌وسیلهٔ سازند گچساران پوشیده شده است. قدیمی‌ترین عضو سازند گچساران عضو[1] یک نام دارد که پوش‌سنگ مخزن آسماری است و از انیدریت، سنگ آهک، مارن خاکستری، شیل‌های بتومن‌دار تشکیل شده است [۳۱]، [۳۲]. تصویری شماتیک از سیستم نفتی در منطقهٔ بررسی شده ارائه شده است (شکل ۱). عمق مخزن بالا[2] و پایین[3] مخزن در چاه‌های بررسی شده در میدان متفاوت است. حداقل و حداکثر عمق بالای مخزن به‌ترتیب ۱۵٤٦ متر و ۳۰۳۰ متر، حداقل و حداکثر عمق پایین مخزن ۲۱۱٤ متر و ۳٤۳۵ متر است. عمق مخزن به‌طور میانگین ۲۷٤۵ متر است.

تخمین فشار منفذی

فشار منفذی پارامتری مهم برای محاسبه تنش‌های برجا، تحلیل پایداری چاه و تحلیل شکستگی‌ها و گسل‌ها طی برداشت از مخزن و تزریق در آن است. ایتون (۱۹۷۵) رابطهٔ تجربی زیر را برای پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از نگارهٔ سرعت گذر موج تراکمی ارائه کرد:

$$P_{pg} = S_g - \left(S_g - P_{ng}\right)\left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t}\right)^n \qquad (۱)$$

که در آن P_{pg} گرادیان فشار منفذی در سازند، S_g گرادیان تنش روباره، P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک، Δt_n زمان گذر موج تراکمی در شیل در فشار نرمال و Δt زمان گذر

1. Member
2. Reservoir Top
3. Reservoir Bottom

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

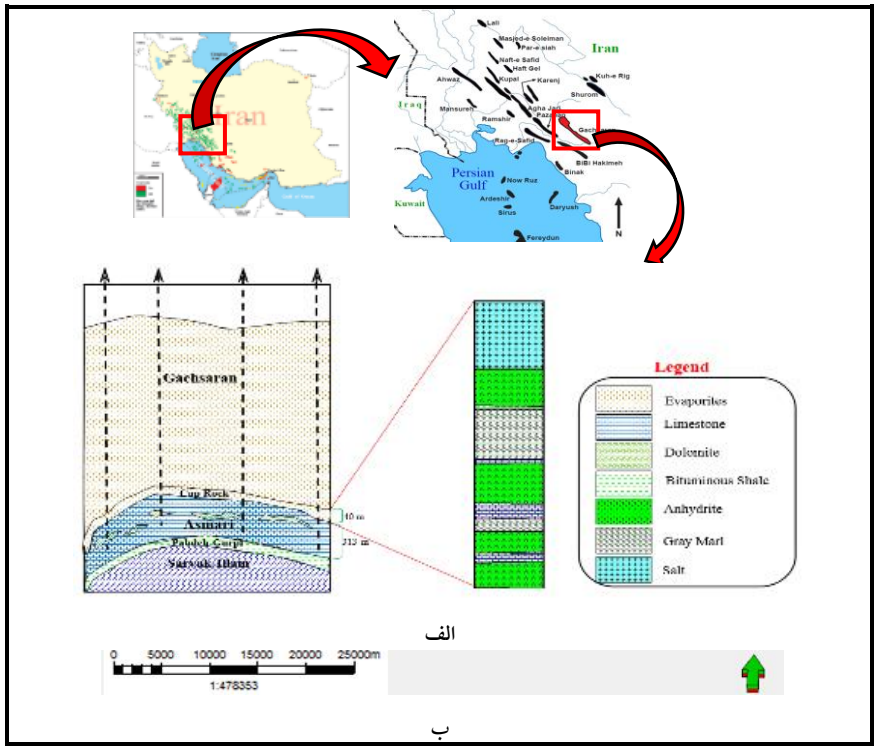
موج تراکمی در شیل است. سپس آزادپور[1] و همکاران (۲۰۱۵) بر اساس بررسی‌هایی که روی مخازن کربناته در جنوب ایران انجام دادند رابطهٔ ایتون را به‌روزرسانی کردند و رابطهٔ زیر را برای تخمین فشار منفذی ارائه کردند [۳۳]:

$$P_{pg} = S_g - \left(S_g - P_{ng}\right)\left(\frac{50+(185-50)e^{-0.00137z}}{\Delta t}\right)^{x} \quad (۲)$$

z عمق است. بر اساس پژوهش‌های آزادپور و همکاران مقدار ضریب x برای مخازن کربناته ایران ۰/۵ در نظر گرفته شد. در مخازن کربناته ایران فشار منفذی هیدرواستاتیک برابر با ۰/٤٦٤ psi/ft است. هم‌چنین گرادیان فشار روباره از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید [۳۳]:

$$S_g = 0.433\rho_b \quad (۳)$$

ρ_b چگالی بالک است.

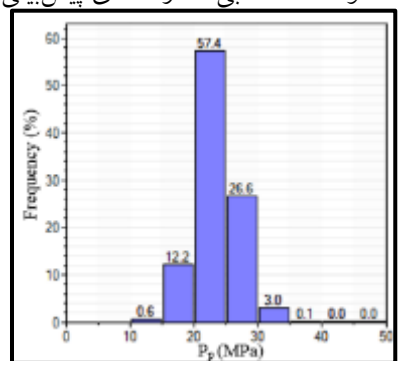


شکل ۱. الف) سیستم نفتی و زمین‌شناسی، ب) موقعیت‌های چاه‌های بررسی شده در میدان

1. Azadpour

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

در این پژوهش فشار منفذی بر اساس روش ایتون تغییر یافته و سایر تصحیحات ارائه شده به‌وسیلهٔ آزادپور و همکاران [۳۳] محاسبه و با داده‌های فشار گل[1] در حین حفاری (Pmw) و اندازه‌گیری‌های مستقیم حاصل از تست مجدد سازند (Pp RFT) اعتبارسنجی شد. توزیع آماری فشار منفذی تخمین زده شده در میدان و پروفایل فشار منفذی برای یک چاه نشان داده شده است (شکل ۲ و ۵). پنجره گل ایمن در محدودهٔ بین فشار منفذی (حد پایین) و مقاومت کششی به‌علاوه تنش افقی حداقل (حد بالا) می‌شود. بنابراین باید فشار منفذی پیش‌بینی شده مقداری کم‌تر از فشار گل استفاده شده داشته باشد که شکل ۵ این موضوع را خاطر نشان می‌کند و صحت نسبی فشار منفذی پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. توزیع آماری فشار منفذی اولیه در میدان

تنش‌های برجا

۱. تخمین مقادیر تنش‌های برجا

سنگ‌ها در درون زمین تحت تأثیر تنش قائم (S_V)، تنش افقی حداکثر (S_H) و حداقل (S_h) است که این تنش‌ها در عمق به‌صورت عمود برهم به سنگ اعمال می‌شوند. مقدار تنش برجای عمودی (S_V) بر اساس انتگرال‌گیری از دانسیتهٔ سنگ از سطح تا عمق به‌دست می‌آید [۳٤]:

$$S_V = \int_0^z \rho(z) g dz \cong \rho_{av} g z \quad (٤)$$

1. Mud Pressure

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

$\rho(z)$ دانسیته به‌عنوان تابعی از عمق، g ثابت شتاب گرانش، ρ_{av} میانگین دانسیتهٔ روباره و z عمق است. برای تعیین تنش‌های برجای افقی از روش‌هایی مانند تست نشت، تست نشت تمدید یافته، بازیابی کرنش[1]، مکانیزم کانونی[2] و روش جک[3] استفاده می‌شود [۳٤]، [۳۵]. یکی از روش‌های استفاده شده برای تعیین مقادیر تنش‌های برجای افقی استفاده از روابط پوروالاستیک است [۳٦]، [۳۷]، [۳۸]، [۳۹]:

$$S_h = \frac{v}{1-v}S_V - \frac{v}{1-v}\alpha P_P + \alpha P_P + \frac{E}{1-v^2}\varepsilon_x + \frac{vE}{1-v^2}\varepsilon_y \quad (۵)$$

$$S_H = \frac{v}{1-v}S_V - \frac{v}{1-v}\alpha P_P + \alpha P_P + \frac{Ev}{1-v^2}\varepsilon_x + \frac{E}{1-v^2}\varepsilon_y \quad (٦)$$

S_h و S_H تنش‌های برجای افقی حداقل و حداکثر، v ضریب پواسون، P_p فشار منفذی، α ضریب بایوت، E مدول یانگ، ε_x و ε_y کرنش در جهت S_H و S_h است که از روابط (۷) و (۸) به‌دست می‌آیند [٤۰]:

$$\varepsilon_x = \frac{S_V \times \nu}{E} \times \left(\frac{1}{1-\nu} - 1\right) \quad (۷)$$

$$\varepsilon_y = \frac{S_V \times \nu}{E} \times \left(1 - \frac{\nu^2}{1-\nu}\right) \quad (۸)$$

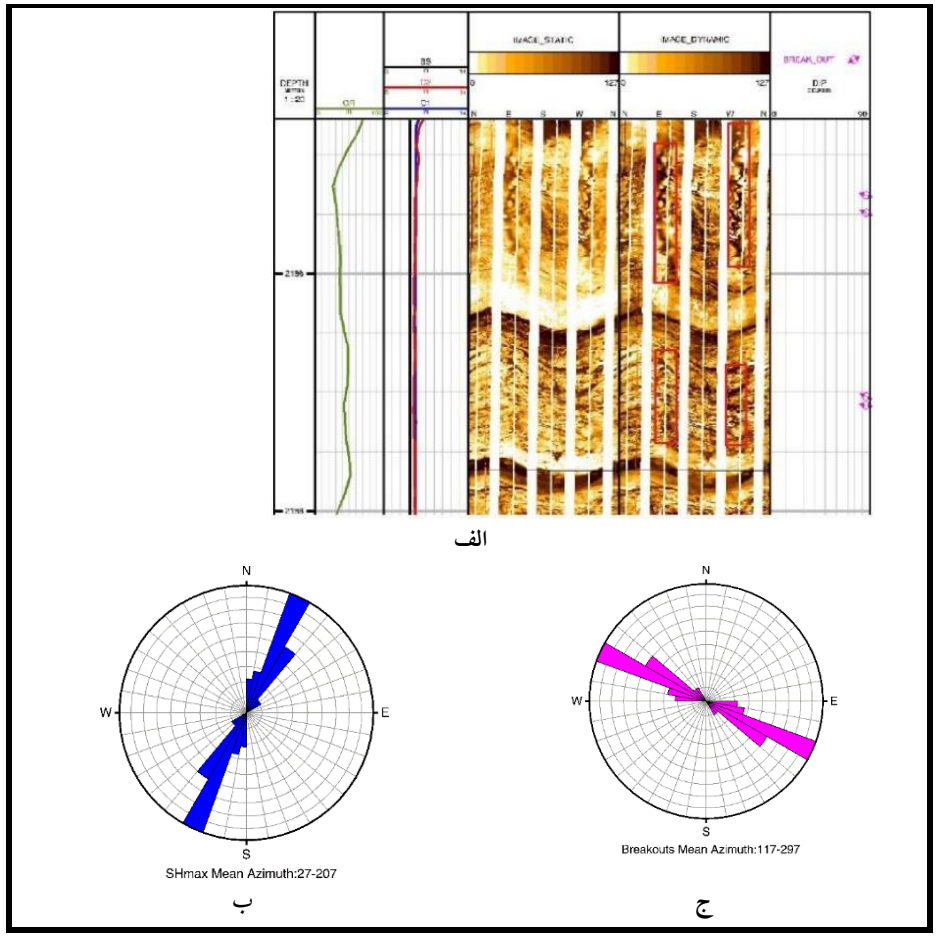
در این پژوهش تنش‌های برجای افقی با استفاده از روابط پوروالاستیک تعیین و سپس با استفاده از داده‌های آزمون نشت و نشت تمدید یافته اعتبارسنجی شد (شکل۵). بر اساس نتایج به‌دست آمده و برخلاف نقشهٔ جهانی تنش [۳۸] رژیم تنش در میدان بررسی شده نرمال است. دلیل آن می‌تواند این مسئله باشد که گسل امتدادلغز کازرون و فروافتادگی دزفول به‌عنوان یک حوضهٔ کششی عمل می‌کنند که سبب ایجاد یک رژیم تنش نرمال محلی در منطقه شده است [٤۱]، [٤۲]. توزیع آماری مقادیر تنش‌های برجا برآورد شده در میدان ارائه شده است (شکل ٤).

۲. جهت تنش‌های برجا افقی

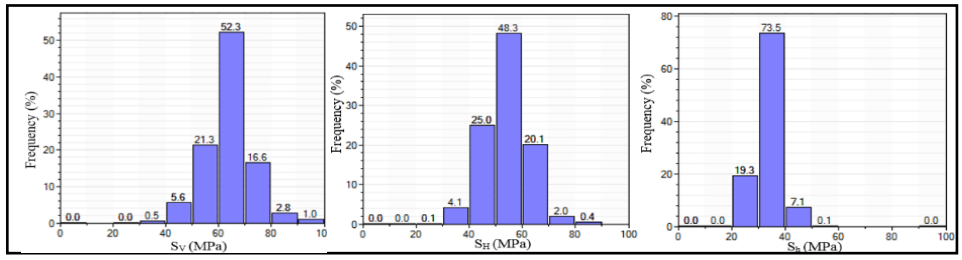
یکی از قابل اعتمادترین روش‌ها برای تعیین جهت تنش‌های برجا استفاده از تفاسیر نگاره‌های تصویری است. وقتی چاهی حفاری می‌شود سنگ‌های اطراف آن در معرض یک

1. Strain recovery
2. Focal mechanism
3. Jacking

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]



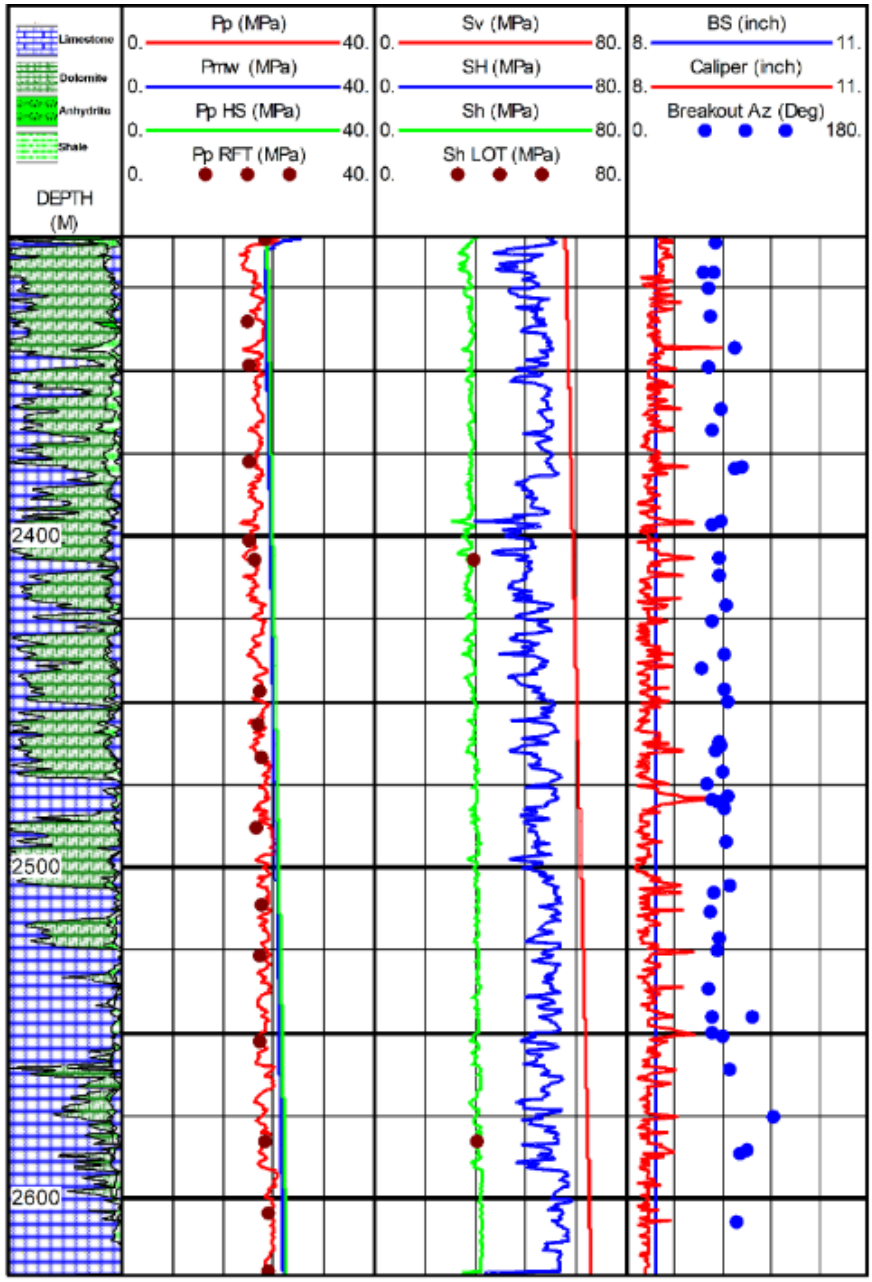
شکل۳. الف) نگاره تصویری تفسیر شده ب)، ج) به‌ترتیب جهت تنش‌های افقی حداکثر و حداقل



شکل ٤. توزیع آماری تنش‌های برجا در میدان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]



شکل ۵. پروفایل فشار منفذی و تنش‌های برجا در یکی از چاه‌های میدان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

سیستم تنش نامتعادل قرار می‌گیرند. تمرکز تنش در اطراف چاه منجر به شکل‌گیری شکستگی‌های فشارشی و کششی در دیواره چاه می‌شود. شکستگی‌های فشارشی بریکات[۱] نامیده می‌شود و در جهت تنش اصلی حداقل به وقوع می‌پیوندد. به شکستگی‌های کششی رخ داده در دیواره چاه شکستگی‌های کششی القایی ناشی از حفاری[۲] گفته می‌شود که در جهت تنش اصلی حداکثر به وقوع می‌پیوندند [۳٤]، [٤۳]. نگاره‌های میکرو-تصویرگر پایه نفتی[۳]، تصویرگر التراسونیک چاه[٤] و کالیپر[٥] معمول‌ترین نگاره‌ها برای تخمین جهت تنش‌های افقی و جهت‌گیری شکستگی‌ها است [٤٤]. در این پژوهش جهت تنش‌های برجا افقی با استفاده از نگاره‌های UBI، کالیپر و اندازه مته[٦] تعیین شد (شکل۳ و ٥). روی نگارهٔ UBI بریکات‌ها به‌صورت زون‌های عریض با دامنه پایین نمایان هستند. نگارهٔ کالیپر نشان‌دهندهٔ قطر چاه در هر عمق است. پس از حفاری، به‌دلیل توزیع ناهمگون تنش در دیواره، چاه از حالت دایره خارج می‌شود. در اعماقی که مقدار نگارهٔ کالیپر بیش‌تر از مقدار نگارهٔ اندازهٔ مته باشد، چاه در حالت فشارش قرار گرفته و شکستگی فشارشی یا بریکات رخداده است. قرار دادن جهت بریکات‌های تشخیص داده شده، نگاره‌های کالیپر و اندازه مته در کنار هم به‌خوبی این مسئله را تأیید کرد.

شناسایی شکستگی‌ها و گسل‌ها

۱. شناسایی شکستگی‌ها

شکستگی‌ها ممکن است بسته، باز یا پرشده با برخی از کانی‌ها مانند کلسیت، رس، پیریت، انیدریت و غیره باشند. روی تصاویر UBI و OBMI شکستگی‌ها به‌صورت سیماهای خطی نمایان می‌شوند (شکل ٦) [٤٥]. در این پژوهش از نگاره‌های UBI، OBMI و FMI[۷] برای شناسایی شکستگی‌ها استفاده شد. شکستگی‌های بسته، شکستگی‌های باز و پر

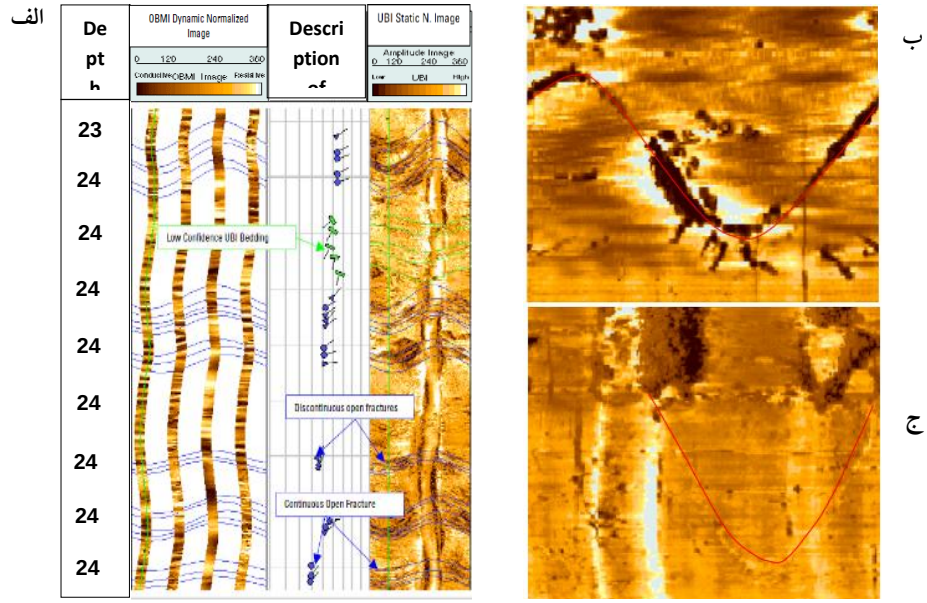
1. Breakout
2. Drilling induced-tensile-fractures
3. Oil Base Micro-Imager (OBMI)
4. Ultrasonic Borehole Imager
5. Caliper
6. Bit Size (BS)
7. Formation Micro-Imager(FMI)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

پر شده به‌وسیلهٔ کانی‌های ثانویه، به‌صورت خطوط مقاوم[1] و تیره بر نگاره‌های تصویری دیده می‌شود. اما شکستگی‌های باز تیره‌تر و شکستگی‌ها بسته با دامنهٔ کم‌تر و به‌صورت روشن‌تر روی نگاره‌های تصویری دیده می‌شوند.

بیش‌ترین مقدار شکستگی در ۲۰ تا ۲۵ متری زیر پوش‌سنگ مشاهده شد. بر اساس پیوستگی خط اثرهایی با دامنه پایین[2] روی تصاویر UBI، شکستگی‌ها در چهار گروه طبقه‌بندی شدند:

۱. شکستگی‌های باز و ناپیوسته
۲. شکستگی‌های باز پیوسته
۳. شکستگی‌های باز احتمالی
۴. شکستگی‌های بسته



شکل ٦. الف) پردازش نگاره‌های تصویری OBMI و UBI در چاه C، ب و ج) به‌ترتیب شکستگی‌های باز و بسته

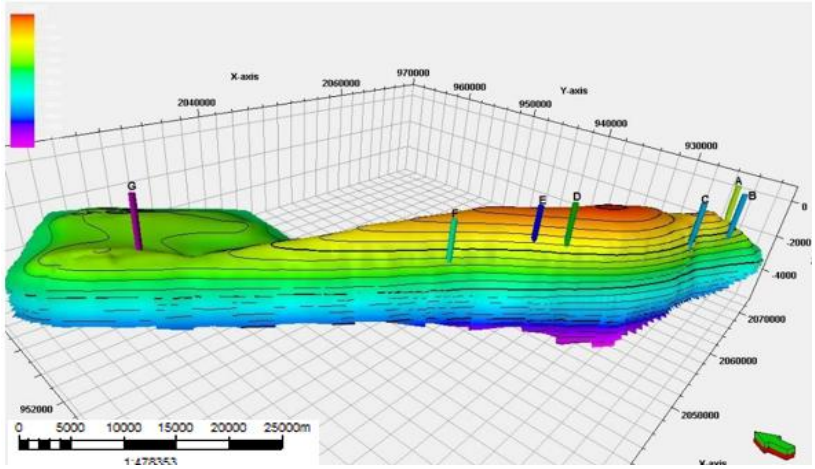
1. Resistive
2. Low Amplitude Traces

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

پردازش نگاره‌های تصویری در ۷ چاه انجام شد (شکل ۷). نوع نگاره‌های تصویری استفاده شده، متراژ بازه طولی دارای نگاره تصویری در هر چاه ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱. نام چاه و متراژ اینتروال مخزنی دارای نگاره تصویری

نام چاه	متراژ (m)	نوع نگاره تصویری
A	۲٤٥	OBMI, UBI
B	٤۳۱	OBMI, UBI
C	٥۷٦	OBMI, UBI
D	٥٦٦	OBMI, UBI
E	۳٤۰	OBMI, UBI
F	۳٥٦	OBMI, UBI
G	۳٥۰	FMI



شکل ۷. موقعیت چاه‌هایی که نگاره‌های تصویری آن بررسی شده

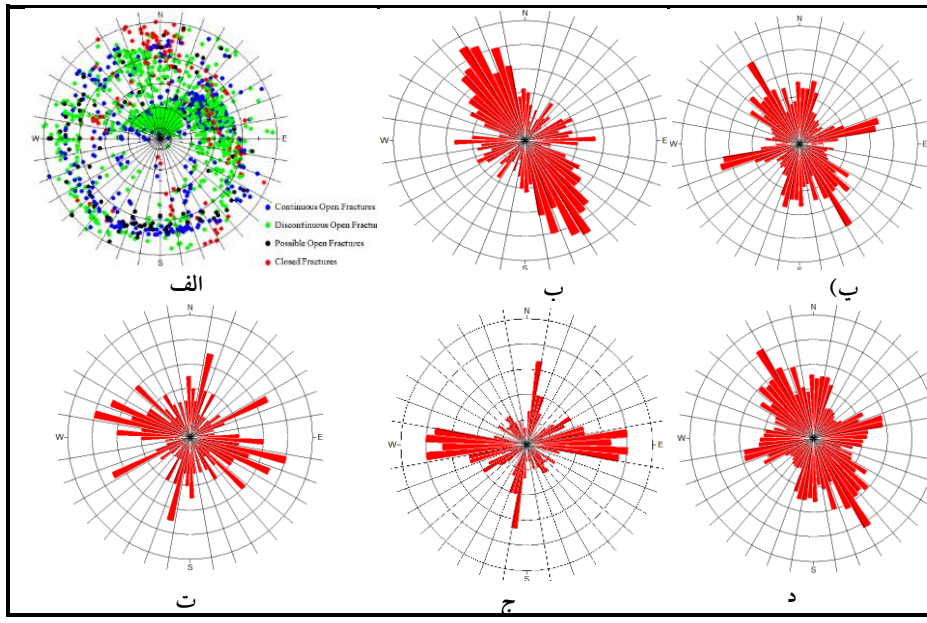
بر اساس پردازش نگاره‌های تصویری UBI، OBMI و FMI، در نرم‌افزار ژئولاگ[1]، ۱۹۲۲ شکستگی شناسایی شد که شامل ۵۷۷ شکستگی باز پیوسته، ۱۰٦٦ شکستگی باز ناپیوسته، ۱۲٤ شکستگی باز احتمالی و ۱۵۵ شکستگی بسته بود. نمودار آماری شیب و امتداد شکستگی‌ها در همهٔ چاه‌ها و به تفکیک برای هر چاه به‌وسیلهٔ نرم‌افزار دیپس[2] ترسیم و ارائه شده است (شکل ۸ و ۹). هم‌چنین خلاصهٔ تحلیل آماری شکستگی‌ها نیز ارائه شده است (جدول ۲).

1. Geolog
2. Dips

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

جدول ۲. خلاصهٔ آماری آنالیز شکستگی‌ها در ۷ چاه

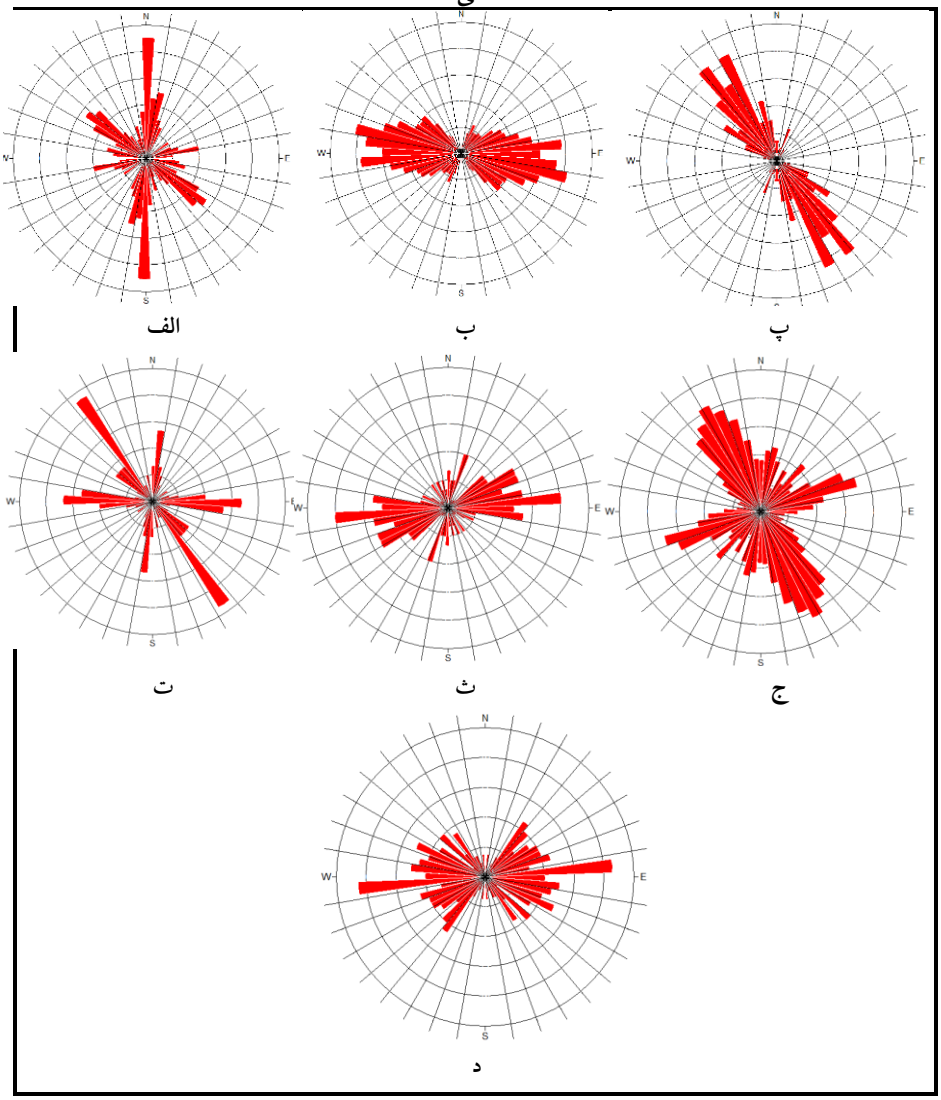
نوع شکستگی	آماره	شیب	امتداد
شکستگی‌های باز پیوسته	بیشینه	۸۹/۰۲	۳۵۹/۷۹
	کمینه	۳/۲۸	۰/۳۹
	میانگین	۵۰/۲۸	۱۵۱/۷۸
شکستگی‌های باز ناپیوسته	بیشینه	۸۹/٦۸	۳۵۳/۱۲
	کمینه	٤/۱۷	۲۱٦/۳۲
	میانگین	٤۹/٤٦	۲٦۹/٤۰
شکستگی‌های باز احتمالی	بیشینه	۸۹/٦٦	۳۳٦/۲۱
	کمینه	۳۳/۹۰	۲/۰۸
	میانگین	٦٦/۳۲	۱۷۲/٤۷
شکستگی‌های بسته	بیشینه	۸۹/٦۳	۳۵۹/۵۷
	کمینه	۱۷/۱٤	۲/۲۱
	میانگین	٦۷/۸۷	۱٦۱/٦۲
همه شکستگی‌ها	بیشینه	۸۹/٦۸	۳۵۹/۹۵
	کمینه	۳/۲۸	۰/۱۵
	میانگین	۵۲/٦۰	۱٤۵/۱۱



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

شکل. الف) دیاگرام شیب همه شکستگی‌ها ب، پ، ت، ج و د) به‌ترتیب دیاگرام امتداد و شیب شکستگی‌ها پیوسته باز، شکستگی‌ها ناپیوسته باز، شکستگی‌ها باز احتمالی، شکستگی‌ها بسته و همه شکستگی‌ها هستند.



شکل ۹. رز دیاگرام چاه‌های بررسی شده، الف، ب، پ، ت، ث، ج و د) به‌ترتیب رز دیاگرام شکستگی‌ها در چاه‌های A، B، C، D، E، F و G است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

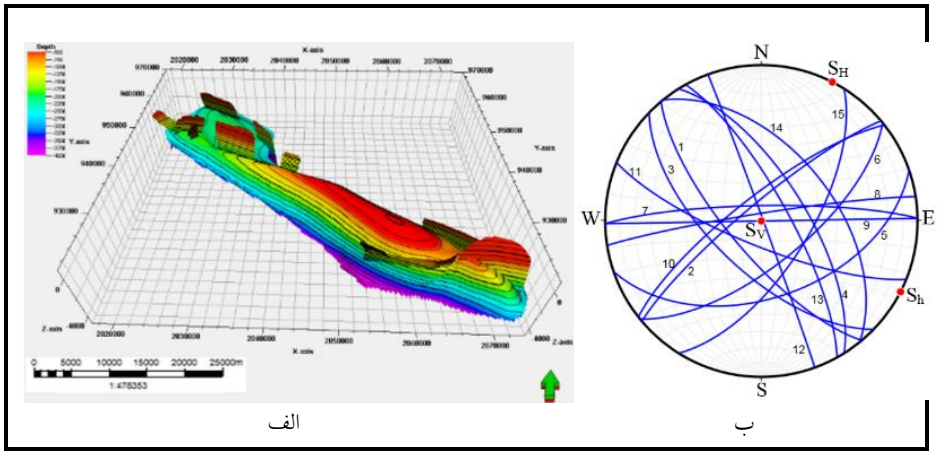
۲. شناسایی گسل‌ها

بر اساس تفسیرهای لرزه‌ای انجام‌شده به‌وسیلهٔ شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، ۱۵ گسل در میدان گچساران شناسایی شده است (شکل ۱۰). این گسل‌ها دارای دو جهت‌گیری غالب هستند:

۱. برخی در امتداد کمربند چین‌خورده–تراستی زاگرس با جهت‌گیری (NW-SE) هستند: این گسل‌ها دارای سازوکار معکوس با مؤلفهٔ امتداد چپ‌گرد هستند.

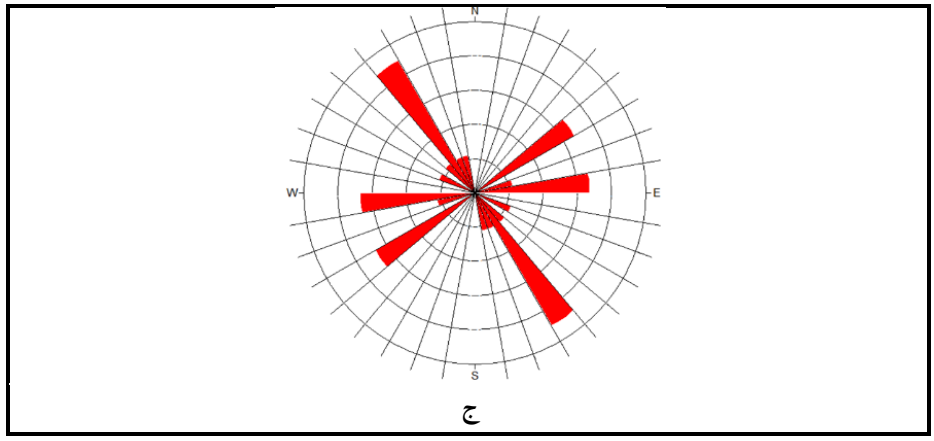
۲. عمود بر کمربند چین‌خورده– تراستی زاگرس (NE-SW) هستند: این گسل‌ها عمدتاً دارای سازوکار نرمال هستند.

سازوکار گسل‌ها در میدان بررسی شده و مکانیسم ایجاد آن‌ها نشان داده شده است (شکل ۱۱) [٤٦]. گسل‌های معکوس هم‌جهت با گسل اصلی زاگرس بوده است و حاصل رژیم فشارشی ایجاد شده ناشی از همگرایی صفحه عربستان و صفحه ایران است. زون کششی ایجاد شده در محل تقاطع دو زون برشی شمالی–جنوبی و شرقی–غربی باعث تشکیل گسل‌ها نرمال در منطقه شده است [٤٦].



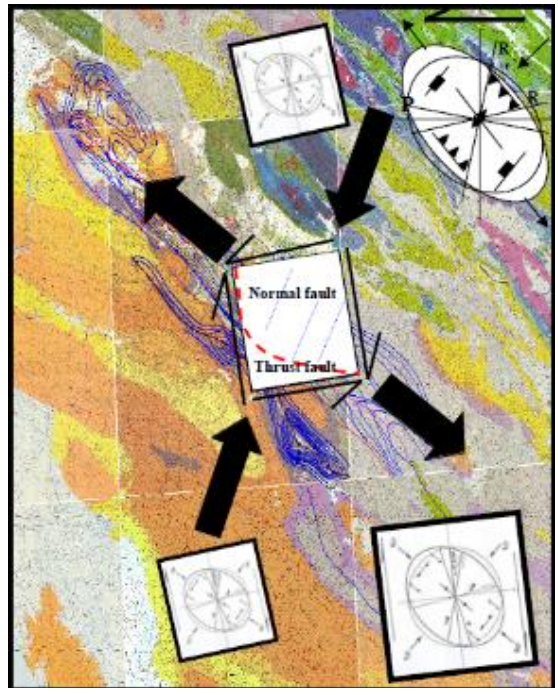
الف ب

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]



ج

شکل ۱۰. الف) گسل‌های شناسایی شده در مخزن، ب) شیب و امتداد گسل‌ها، ج) رز دیاگرام گسل‌ها



شکل ۱۱. مکانیسم تشکیل گسل‌ها در میدان [٤٦]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

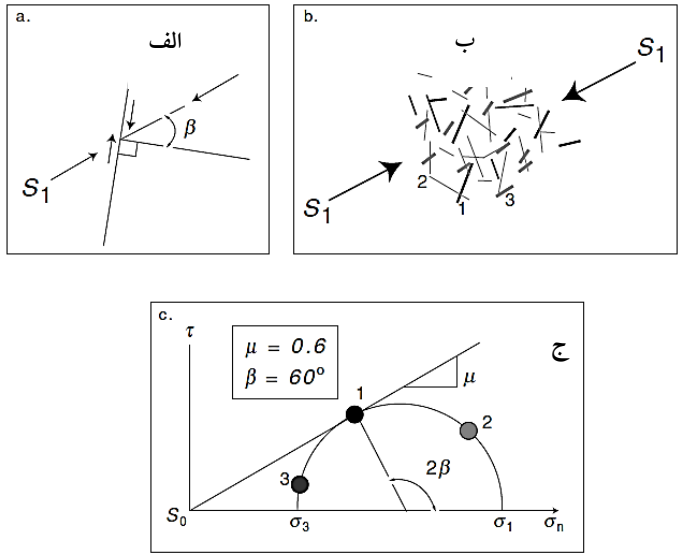
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

ارزیابی شکستگی‌ها و گسل‌ها با استفاده از تئوری گسل در حالت تنش بحرانی

وجود گسل‌ها، شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌های جهت‌گیری شده‌ای که در پوستهٔ زمین وجود دارند مقادیر تنش را محدود می‌کنند، جیگر[1] و همکاران (۱۹۷۱) نشان دادند که نسبت محدودکنندهٔ تنش مؤثر حداکثر اصلی (σ_1=S_1-P_p) و تنش مؤثر حداقل اصلی (σ_3= S_3 - P_p) در عمق به‌وسیلهٔ رابطهٔ (۹) تعیین می‌شود [٤٧]:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{(S1 - Pp)}{S3 - Pp} = [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2 \qquad (۹)$$

در این تئوری فرض می‌شود که تنش در پوسته زمین نمی‌تواند از مقاومت اصطکاکی گسل‌ها و شکستگی‌ها از پیش موجود فراتر رود (شکل ۱۲).



شکل ۱۲. الف) لغزش اصطکاکی روی سطح گسل، ب) وجود شکستگی‌ها و گسل‌ها با جهت‌گیری مختلف، ج) دایره موهر برای گسل‌هایی با جهت‌گیری متفاوت [٤٤]

فعالیت و تراوا بودن شکستگی‌ها و گسل‌ها روی جریان سیال و پایداری مخزن در طی تزریق CO_2 تأثیرگذار است. تئوری گسل در حالت تنش بحرانی به‌وسیلهٔ بارتون و همکاران

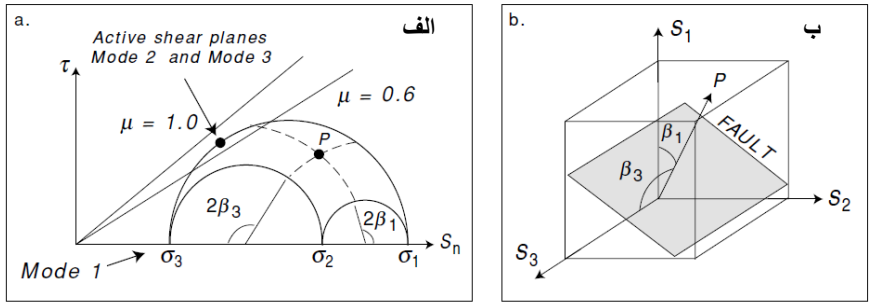
1. Jaeger

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

[۲۳] ارائه شد. این تئوری بیان می‌کند در یک سازند که دارای شکستگی‌ها و گسل‌هایی با زوایای مختلف نسبت به تنش‌های برجا است، تراوایی گسل‌ها به‌وسیله جهت‌گیری تنش‌های برجا و جهت‌گیری این ناپیوستگی‌ها نسبت به تنش‌های برجا کنترل می‌شود. هم‌چنین این تئوری بیان می‌کند که گسل‌ها و شکستگی‌هایی که امروزه از لحاظ هیدرولیکی تراوا هستند همان شکستگی‌ها و گسل‌هایی هستند که در شرایط کنونی تنش[1] در شرایط بحرانی قرار دارند [۲۳]. ناپایداری شکستگی‌ها و گسل‌ها به‌وسیلهٔ مؤلفه‌های تنش برشی و عمودی روی سطح آن‌ها و جهت‌گیری تنش‌های برجا نسبت به این ناپیوستگی‌ها و فشار تزریق CO_2 کنترل می‌شود. برای تعیین وضعیت گسل‌ها و شکستگی‌ها از لحاظ فعالیت مکانیکی و هیدرولیکی با استفاده از تئوری گسل در حالت تنش بحرانی، ابتدا باید مؤلفه‌های تنش برشی و نرمال روی سطح گسل به‌دست آورده شود.

۱. نحوهٔ محاسبهٔ مؤلفه تنش روی سطح گسل و شکستگی و تشکیل دایره موهر سه‌بعدی

یکی از راه‌های کلاسیک برای محاسبه مؤلفه‌های تنش نرمال و برشی روی سطح گسل استفاده از دایره سه‌بعدی موهر است [٤٤]. برای ترسیم این دایره نیاز به مقادیر تنش عمودی، تنش‌های افقی حداقل و حداکثر است (شکل ۱۳ الف) روی این دایره هر صفحه به‌صورت یک نقطه در فضای بین دوایر کوچک‌تر و دایره بزرگ نشان داده می‌شود. به‌طور گرافیکی موقعیت نقطه در دایره سه‌بعدی موهر با استفاده از دو زاویهٔ β_1 و β_3 تعریف می‌شود که این زوایا به‌ترتیب زاویه‌های بین عمود بر گسل با تنش اصلی حداکثر و حداقل است (شکل ۱۳ ب).



شکل ۱۳. تنش برشی و نرمال مؤثر روی سطح گسل الف) نحوهٔ ساخت دایره موهر سه‌بعدی با استفاده از محاسبات ارائه شده در ادامه متن، ب) زوایای β_1 و β_3 [٤٤]

1. Current stress filed

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

برای محاسبهٔ مقادیر مؤلفه‌های تنش برشی و نرمال روی صفحات ناپیوستگی از دو روش استفاده می‌شود. در روش اول از تنش اصلی مؤثر و جهت‌گیری صفحات شکستگی و گسل نسبت به میدان تنش استفاده می‌شود. تنش نرمال و برشی مؤثر به‌صورت (۱۰) به‌دست می‌آید [٤٤]:

$$\tau = a_{11}a_{12}\sigma_1 + a_{12}a_{22}\sigma_2 a_{13}a_{23}\sigma_3 \quad (۱۰)$$

$$\sigma_n = a_{11}^2\sigma_1 + a_{12}^2\sigma_2 + a_{13}^2\sigma_3 \quad (۱۱)$$

$\boldsymbol{a_{ij}}$ کسینوس جهت است [٤٧]:

$$A = \begin{bmatrix} \cos\gamma\ \cos\lambda & \cos\gamma\ \sin\lambda & -\sin\gamma \\ -\sin\lambda & -\cos\lambda & 0 \\ \sin\gamma\ \cos\lambda & \sin\gamma\ \sin\lambda & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

مقدار $\boldsymbol{\gamma}$ زاویه بین عمود بر گسل و S_3 و مقدار $\boldsymbol{\lambda}$ زاویهٔ بین تصویر جهت امتداد گسل و S_1 در صفحه S_1-S_2 است.

بنابراین تنش برشی و نرمال با استفاده از تبدیلات تانسوری به‌دست می‌آید. اگر تنش‌های اصلی در عمق به‌صورت (۱۳) ارائه شود:

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{bmatrix} \quad (۱۳)$$

می‌توان تنش در سیستم مختصات جغرافیایی را با تبدیل زیر بیان کرد:

$$S_g = R_1' S R_1 \quad (۱٤)$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos a\ \cos b & \sin a \cos b & -\sin b \\ \cos a \sin b \sin c - \sin a \cos c & sina \sin b \sin c + \cos a \cos c & \cos b \sin c \\ \cos a\ sin\ b \cos c + \sin a \sin c & \sin a \sin b \cos c - \cos a \sin c & \cos b \cos c \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

و زاویهٔ دوران اویلر بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$a=\text{trend of } S_1 \quad (۱٦)$$

$$b=\text{-plunge of } S_1 \quad (۱۷)$$

$$c=\text{rake } S_2 \quad (۱۸)$$

اگر رژیم تنش نرمال باشد زوایا بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$a=\text{trend of } S_H - \pi/2 \quad (۱۹)$$

$$b=\text{-trend of } S_1 \quad (۲۰)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

$$c=0 \quad (۲۱)$$

با استفاده از سیستم مختصات جغرافیایی، می‌توان تانسور تنش روی سطح گسل را محاسبه کرد. برای محاسبه تانسور تنش روی یک‌یک دستگاه مختصات سطح گسل، S_f، به‌صورت (۲۲) است:

$$S_f = R_2 S_g R_2' \quad (۲۲)$$

و

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos(str) & \sin(str) & 0 \\ \sin(str)\cos(dip) & -\cos(str)\cos(dip) & -\sin(dip) \\ -\sin(str)\sin(dip) & \cos(str)\sin(dip) & -\cos(dip) \end{bmatrix} \quad (۲۳)$$

$\boldsymbol{str}$ امتداد گسل و $\boldsymbol{dip}$ شیب گسل است. تنش برشی و تنش نرمال که روی سطح لغزش گسل عمل می‌کنند بدین‌صورت به‌دست می‌آید:

$$\tau = S_r(3,1) \quad (۲۴)$$

$$S_n = S_f(3,3) \quad (۲۵)$$

و

$$S_r = R_3 S_f R_3'(3,3) \quad (۲۶)$$

و

$$R_3 = \begin{bmatrix} \cos(rake) & \sin(rake) & 0 \\ -\sin(rake) & \cos(rake) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (۲۷)$$

۲. نتایج و تفسیر ارزیابی شکستگی‌ها و گسل‌ها با استفاده از تئوری گسل در حالت تنش بحرانی

تحلیل شکستگی‌ها و گسل‌ها بسیار حائز اهمیت است، در اثر تزریق CO_2 شکستگی‌ها می‌توانند به‌سمت پوش‌سنگ توسعه پیدا کنند و باعث از دست رفتن یک‌پارچگی پوش‌سنگ شوند و هم‌چنین گسل‌ها می‌توانند مجدداً فعال‌شده و زلزله‌هایی را ایجاد کنند. بنابراین تحلیل شکستگی‌ها و گسل‌ها به پیش‌بینی مسیرها نشست CO_2 و پیدا کردن گسل‌ها و شکستگی‌هایی که از نظر پتانسیل فعالیت مجدد در شرایط بحرانی هستند کمک می‌کند. از این‌رو وضعیت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

شکستگی‌ها و گسل‌ها ازنظر تراوایی جریان سیال و بحرانی بودن از لحاظ فعالیت در شرایط تنش کنونی به‌وسیلهٔ این تئوری بررسی شد. شکستگی‌ها و گسل‌ها در دایره موهر سه‌بعدی نرمال شده (نرمال شده نسبت به تنش عمودی) ترسیم شد و گسل‌ها و شکستگی‌ها بحرانی تعیین شد. برای این کار از نرم‌افزار موهرپلاتر[1] استفاده شد.

در اثر برداشت از میدان گچساران فشار در مخزن به‌طور میانگین به‌میزان ۸/۷۶ (ΔP_p) کاهش یافته است. با در نظر گرفتن اثر افت فشار و تخلیه مخزن، وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌ها ابتدا در شرایط اولیه تنش و سپس در شرایط تنش جدید[2] ناشی برداشت به‌وسیلهٔ دایره موهر سه‌بعدی بررسی شد (شکل ١٤ و ١٥). بر اساس توزیع آماری پارامترهای S_v، S_H، S_h، P_p، در میدان، از مقادیر میانگین این پارامترها برای ساخت دایره موهر سه‌بعدی و بررسی ارزیابی وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌ها به‌وسیلهٔ تئوری گسل در حالت تنش بحرانی استفاده شد (جدول ۳). بر اساس بررسی انجام شده به‌وسیلهٔ بایرله[3] [٤٨] مقدار ضریب اصطکاک برای انواع سنگ‌های پوسته زمین بین ۰/٦ تا ۱ است. در این پژوهش مقدار ضریب اصطکاک برابر با ۰/٦ که حد پایین و محافظه‌کارانه این بازه است در نظر گرفته شد.

جدول ۳. پارامترهای استفاده شده برای ترسیم دایره موهر سه‌بعدی (مقادیر، میانگین پارامترها در میدان هستند)

S_V (MPa)	S_H (MPa)	S_h (MPa)	P_p (MPa)	C (MPa)	μ
٦٥	٥٥	٣٥	٢٥	٠	٠/٦

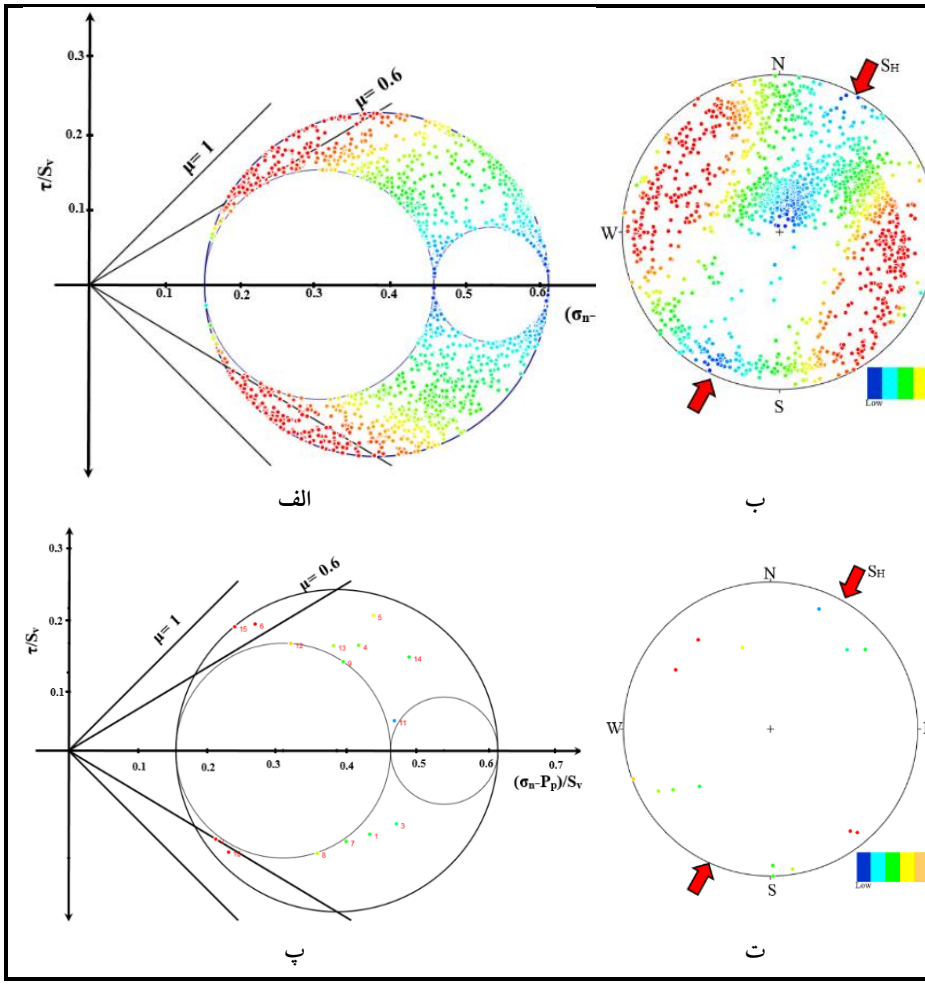
بر اساس معیار موهر–کلومب مقاومت شکستگی‌ها و گسل‌ها به‌وسیلهٔ رابطهٔ (۲۸) بیان می‌شود:

$$\tau_f = c + \mu(\sigma_n - \alpha P_p) \quad (۲۸)$$

c چسبندگی، σ_n تنش عمودی روی سطح گسل، P_p فشار منفذی، μ ضریب اصطکاک و α ضریب بایوت است. در این پژوهش ضریب بایوت برابر یک و ضریب اصطکاک برابر ۰/٦ در نظر گرفته شد.

1. MohrPlotter
2. New stress state
3. Byerlee

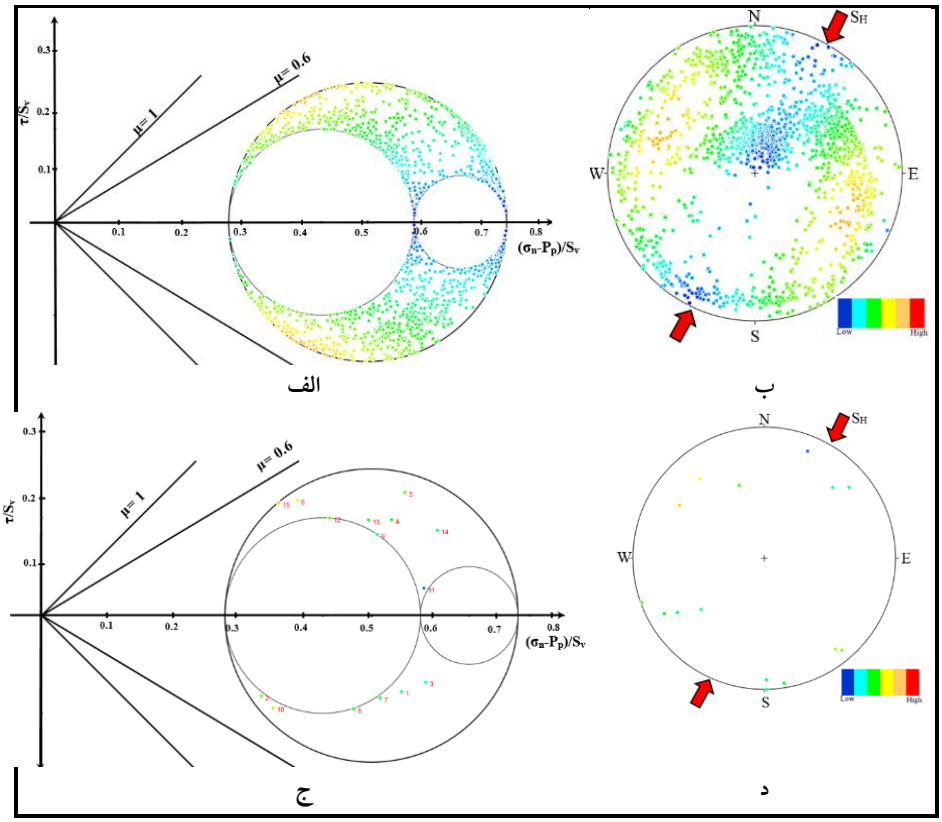
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]



شکل ١٤. دیاگرام موهر سه‌بعدی برای شکستگی‌ها و گسل‌ها برای پیدا کردن گسل‌ها و شکستگی‌ها بحرانی و تراوا الف و پ) دیاگرام موهر سه‌بعدی برای شکستگی‌ها و گسل‌ها است، ب و ت) استریو نت‌هایی هستند که قطب صفحات شکستگی و گسل را نشان می‌دهند (رنگ‌های گرم نشان‌دهندهٔ پتانسیل زیاد برای فعالیت و رنگ‌های سرد نشان‌دهندهٔ پتانسیل کم برای فعالیت است.)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]



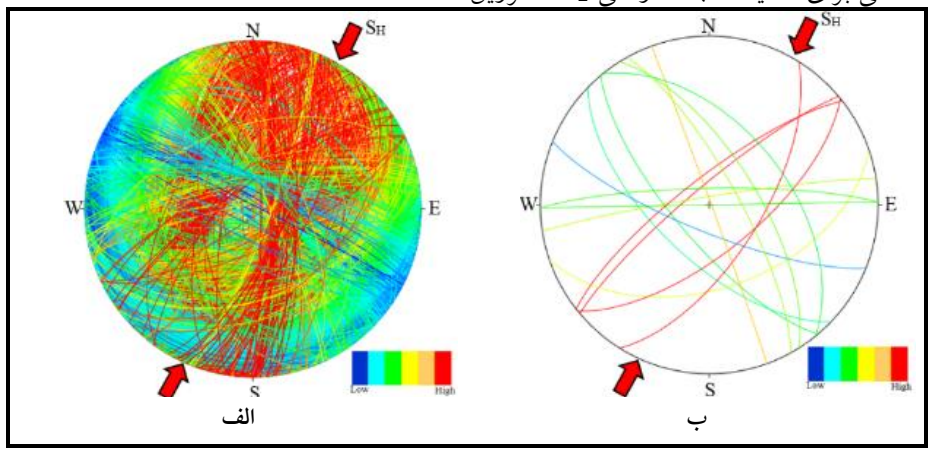
شکل ۱۵. الف و ب) وضعیت شکستگی‌ها بعد از برداشت و افت فشار در مخزن به میزان ۸/۷۶ مگاپاسگال، ج و د) وضعیت گسل‌ها بعد از برداشت و افت فشار در مخزن را نشان می‌دهند (رنگ‌های گرم نشان‌دهندهٔ پتانسیل زیاد برای فعالیت و رنگ‌های سرد نشان‌دهندهٔ پتانسیل کم برای فعالیت است.)

چنان‌که مشاهده می‌شود برداشت و تخلیه مخزن سبب افزایش پایداری شکستگی‌ها و گسل‌ها شده است. لازم به ذکر است که این نتایج بدون در نظر گرفتن رفتار توأمان فشار منفذی تنش[1] و با استفاده از مفهوم تنش مؤثر ترزاقی ($\alpha = 1$) است. بر اساس دایره موهر سه‌بعدی نرمال شده و تئوری گسل در حالت تنش بحرانی، گسل‌ها و شکستگی‌هایی که جهت‌گیری آن‌ها در جهت S_H است اغلب از لحاظ مکانیکی و هیدرولیکی فعال بود. در

1. Pore pressure stress coupling (PSC)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

رژیم تنش نرمال، گسل‌ها و شکستگی‌هایی که در جهت S_H هستند مستعدترین گسل‌ها و شکستگی‌ها برای فعالیت مجدد است، زیرا این گسل‌ها و شکستگی‌ها کم‌ترین مقدار مؤلفهٔ تنش نرمال و بیش‌ترین مقدار مؤلفهٔ تنش برشی را روی سطح خود دارند (شکل ١٤). به‌همین دلیل در صورت فشار افزایی، با تحمل کم‌ترین تنش به حالت ناپایدار در می‌آیند. بنابراین این شکستگی‌ها و گسل‌ها بیش‌ترین پتانسیل برای فعالیت مجدد در حین تزریق CO_2 را دارند (شکل ١٦). بدین‌ترتیب گسل‌های شمارهٔ ١٥، ٦، ١٠ و ٢ مستعدترین صفحات گسلی برای فعالیت مجدد در طی CO_2 تزریق هستند.



شکل ١٦. مستعدترین صفحات شکستگی و گسلی در میدان، الف) شکستگی‌ها ب) گسل‌ها، (رنگ‌های گرم نشان‌دهندهٔ پتانسیل زیاد برای فعالیت و رنگ‌های سرد نشان‌دهندهٔ پتانسیل کم برای فعالیت است.)

نتیجه‌گیری

ارزیابی وضعیت فشار منفذی، تنش‌های برجا، جهت‌گیری شکستگی‌ها و گسل‌ها یکی از مهم‌ترین الزامات قبل از هر پروژه ازدیاد برداشت نفت از طریق تزریق است. در این پژوهش، این ویژگی‌ها در میدان نفتی گچساران بررسی شد. سپس به یا استفاده از تئوری گسل در حالت تنش بحرانی وضعیت شکستگی‌ها و گسل‌ها از نظر مستعد بودن برای فعالیت مجدد بررسی شده. این نتایج از پژوهش انجامشده به‌دست آمد:

- بیش‌ترین توزیع آماری فشار منفذی در مخزن بین ٢٠ تا ٢٥ مگاپاسگال و میانگین آن ٢٥ مگاپاسگال بود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

- برخلاف نقشهٔ تنش جهانی رژیم تنش در میدان نرمال بود و میانگین تنش اصلی قائم، افقی حداکثر و افقی حداقل به ترتیب ۶۵، ۵۵ و ۳۵ مگاپاسگال است.
- آزیموت جهت‌گیری تنش‌های برجا افقی حداقل و حداکثر به‌ترتیب ۱۱۷ و ۲۰۷ درجه بود.
- شکستگی‌ها دارای دو جهت اصلی NW-SE و NE-SW هستند.
- گسل‌ها دو جهت اصلی دارند، برخی در امتداد کمربند چین‌خورده- تراستی زاگرس با جهت‌گیری (NW-SE) هستند: این گسل‌ها دارای سازوکار معکوس با مؤلفه امتداد چپ‌گرد هستند. و برخی عمود بر کمربند چین‌خورده- تراستی زاگرس (NE-SW) است: این گسل‌ها عمدتاً دارای سازوکار نرمال هستند.
- بر اساس تحلیل شکستگی‌ها و گسل‌ها به‌وسیلهٔ تئوری گسل در حالت تنش بحرانی، در رژیم تنش نرمال، گسل‌ها و شکستگی‌هایی که در جهت S_H هستند مستعدترین گسل‌ها و شکستگی‌ها برای فعالیت مجدد هستند، زیرا این گسل‌ها و شکستگی‌ها کم‌ترین مقدار مؤلفهٔ تنش نرمال و بیش‌ترین مقدار مؤلفهٔ تنش برشی را روی سطح خود دارند. به‌همین دلیل در صورت فشارافزایی، با تحمل کم‌ترین تنش به حالت ناپایدار در می‌آیند. بنابراین این شکستگی‌ها و گسل‌ها بیش‌ترین پتانسیل برای فعالیت مجدد در حین تزریق CO_2 را دارند. از این‌رو گسل‌های شمارهٔ ۱۵، ۶، ۱۰ و ۲ به‌ترتیب مستعدترین گسل‌ها برای لغزش در اثر تزریق CO_2 هستند.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت دانشگاه فردوسی مشهد (طرح شمارهٔ ۳/۳۷۶۰۲)، صندوق حمایت از پژوهش‌گران معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (طرح ۹۴۸۱۰۶۹۹) و شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب انجام گرفته است. از این‌رو، از همهٔ این عزیزان قدردانی می‌شود.

منابع

1. Bachu S., "Sequestration of CO_2 in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change", Energy Convers Mgmt, 41(9) (2000) 953–970.
2. Preston B. L., Jones R. N., "Climate change impacts on Australia and the benefits of early action to reduce global greenhouse gas emissions",

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

Climate Change Impacts on Australia, CSIRO (2006), Available at: http://csiro.au/files/files/ p6fy.pdf.

3. Herzog H., Drake E., Adams E., "CO2 Capture, Reuse, and Storage Technologies for Mitigating Global Climate Change: A White Paper", Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (1997).
4. Bachu S., "Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO2 in geological media in response to climate change", Environ. Geol. 44 (2003) 277–289. http://dx.doi.org/10.1007/s00254-003-0762-9.
5. Lackner K., "A guide to CO2 sequestration", Science 300 (2003) 1677–1678, http://dx.doi.org/10.1126/science.1079033.
6. Qi D., Zhang S., Su K., "Risk assessment of CO2 geological storage and the calculation of storage capacity", Petrol. Sci. Technol. 28 (2010) 979-986.
7. Nordbotten J. M., Celia M. A., "Geological storage of CO2: modeling approaches for large-scale simulation", John Wiley & Sons (2011).
8. Bai M., "Risk assessment for CO2 leakage along abandoned wells using a Monte Carlo simulation in a CO2 sequestration site", Petrol. Sci. Technol. 32 (2014) 1191-1200.
9. Bachu S., "Identification of oil reservoirs suitable for CO2-EOR and CO2 storage (CCUS) using reserves databases, with application to Alberta, Canada", Int. J. Greenh. Gas Control 44 (2015) 152-165.
10. Thomas S., "Enhanced oil recovery an overview", Oil Gas Sci. Technol. 63 (2008) 9-19, http://dx.doi.org/10.2516/ogst:2007060.
11. Lake L., "Enhanced Oil Recovery", Society of Petroleum Engineers (2010).
12. Alam M. M., Hjuler M. L., Christensen H. F., Fabricius I. L., "Petrophysical and rock-mechanics effects of CO 2 injection for enhanced oil recovery: Experimental study on chalk from South Arne

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

field, North Sea", Journal of Petroleum Science and Engineering 122 (2014) 468-487.

13. Seyyedsar S. M., Farzaneh S. A., Sohrabi M., "Experimental investigation of tertiary CO_2 injection for enhanced heavy oil recovery", Journal of Natural Gas Science and Engineering 34 (2016) 1205-1214.
14. Kumar S., Mandal A., "A comprehensive review on chemically enhanced water alternating gas/CO2 (CEWAG) injection for enhanced oil recovery", Journal of Petroleum Science and Engineering 157 (2017) 696-715.
15. Burck J., Marten F., Bals Ch., "The Climate Change Performance Index", Results 2016, (2016) 9-29, This publication can be downloaded at: www.germanwatch.org/en/ccpi.
16. Iran Oil., "Country Analysis Briefs", US Energy Information Administration (EIA)" (2015).
17. Shukla R., Ranjith P. G., Choi S.K., Haque A., "Study of caprock integrity in geosequestration of carbon dioxide", Int. J. Geomech. 11 (2011) 294-301.
18. Colucci F., Guandalini R., Macini P., Mesini E., Moia F., Savoca D., "A feasibility study for CO_2 geological storage in Northern Italy", International Journal of Greenhouse Gas Control 55 (2016) 1-14.
19. Keating E., Bacon D., Carroll S., Mansoor Sun Y., Zheng L., Harp D., Dai Zh., "Applicability of aquifer impact models to support decisions at CO2 sequestration sites", Int. J. Greenh. Gas Control 52 (2016) 319-330.
20. Plumb R. A., Edwards S., Pidcock G., Lee D., "The mechanical earth model and its application to high-risk well construction projects", In: Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference New Orleans, Paper SPE 59128 (2000).
21. Ringrose P. S., Mathieson A. S., Wright I. W., Selama F., Hansen O., Bissell R., Saoula N., Midgley J., "The In Salah CO2 storage project:

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

lessons learned and knowledge transfer", Energy Procedia 37 (2013) 6226-36.

22. Rutqvist J., Cappa F., Rinaldi A. P., Godano M., "Modeling of induced seismicity and ground vibrations associated with geologic CO2 storage, and assessing their effects on surface structures and human perception", Int. J. Greenh. Gas Control 24 (2014) 64-77.
23. Barton C. A., Zoback M. D., Moos D., "Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock", Geology 23 (8) (1995) 683-686.

٢٤. مروجی‌فر م.، حسنی ح.، جواهریان ع.، کاظمی م.، "تحلیل شکستگی‌ها و تعیین جهت تنش‌های برجا با استفاده از نمودار تصویری FMI دریک چاه درمیدان گازی پارس جنوبی"، سومین کنفرانس بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، تهران، (۱۳۹۵).

٢٥. مهدور م.، فارسی‌مدان م.، کمالی ز.، "بررسی عملکرد شکستگی‌ها و تعیین تنش برجا در سازند مخزنی آسماری میدان نفتی مارون (بر اساس تفسیر نتایج نمودارهای تصویرگر)"، فصلنامهٔ زمین‌ساخت، دورهٔ ۱، شمارهٔ ۲ (۱۳۹٤).

٢٦. نجیبی ع.، غفوری م.، لشکری‌پور غ.، آصف م.، "تخمین جهت و مقدار تنش‌های برجا بهروش تحلیل بریکات در یکی از چاه‌های نفت جنوب غرب ایران"، نشریهٔ زمین‌شناسی مهندسی، جلد ۱۱، شمارهٔ ٤ (۱۳۹٤).

27. Eaton B. A., "The equation for geopressure prediction from well logs", Society of Petroleum Engineers of AIME. Paper SPE 5544 (1975).
28. Bordenave M. L., Hegre J. A., "Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems", Geological Society, London, Special Publications 330(1) (2010) 291-353.
29. Bordenave M. L., Hegre J. A., "The influence of tectonics on the entrapment of oil in the Dezful Embayment, Zagros Fold belt", Iran. Journal of petroleum Geology 28(4) (2005) 339-368.
30. Salati S., Van Ruitenbeek F. J., Carranza, E. J. M., Van der Meer F. D., Tangestani, M. H., "Conceptual modeling of onshore hydrocarbon seep

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

occurrence in the Dezful Embayment, SW Iran", Marine and petroleum geology 43 (2013) 102-120.

31. Setudehnia A., "Iran du sud-ouest. Lexique Stratigraphique International III, Fascicule 9b", Center National de la, Iran (1972).
32. Alsharhan, A. S., Nairn A. E. M., "Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East", first ed. Elsevier, Amsterdam (1997).
33. Azadpour M., Shad Manaman N., "Determination of Pore Pressure from Sonic Log: a Case Study on One of Iran Carbonate Reservoir Rocks", Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology 4 (3) (2015) 37-50.
34. Zoback M. D., Barton C. A., Brudy M., Castillo D. A., Finkbeiner T., Grollimund B. R., Moos D. B., Peska P., Ward C. D., Wiprut D. J., "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells", Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. 40 (7-8) (2003) 1049-1076.
35. Zang A., Stephansson O., "Stress field of the Earth's crust", Springer Science & Business Media (2010).
36. Ostadhassan M., Zeng Z., Zamiran S., "Geomechanical modeling of an anisotropic formation-Bakken case study", 46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association (2012).
37. Higgins S. M., Goodwin S. A., Bratton T. R., Tracy G. W., "Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter Shale", In SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. Denver, 21-24 September, SPE 115736 (2008).
38. Heidbach O., Rajabi M., Reiter K., Ziegler M., WSM Team: "World Stress Map Database Release 2016", (2016), GFZ Data Services, doi:10.5880/WSM.2016.001.
39. Thiercelin M. J., Plumb R. A., "Core based predictions of lithologic stress contrasts in east Texas formations", J. SPE Formation Evaluation. 9 (14) (1994) 251-258.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]

40. Kidambi T., Kumar S. G., "Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf", Journal of Petroleum Science and Engineering 141 (2016) 38-51.
41. Sepehr M., Cosgrove J. W., "Role of the Kazerun Fault Zone in the formation and deformation of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran", Tectonics, 24 (5) (2005) 1-15.
42. Jarahi H., Naraghiaraghi N., Nadalian M., "Persian Gulf Fault: new seismotectonic element on seabed", Can J Basic Appl Sci, 3 (3) (2015) 85-92.
43. Kingdon A., Fellgett M. W., Williams J. D. O., "Use of borehole imaging to improve understanding of the in-situ stress orientation of Central and Northern England and its implications for unconventional hydrocarbon resources", Mar. Pet. Geol. 73 (2016) 1-20.
44. Zoback Mark D., "Reservoir geomechanics", Cambridge University Press (2010).
45. Movahed Z., Junin R., Bakhtiari H. A., Safarkhanlou Z., Movahed A. A., Alizadeh M., "Introduction of sealing fault in Asmari reservoir by using FMI and RFT in one of the Iranian naturally fractured oil fields", Arabian Journal of Geosciences 8(12) (2015) 10919-10936.
٤٦. نریمانی ح .،"تحلیل هندسی -جنبشی چین‌های ناحیه دو گنبدان؛ زاگرس چین خورده-رانده"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، رشتهٔ زمین‌شناسی گرایش تکتونیک، دانشکدهٔ علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس تهران (۱۳۸۸).
47. Jaeger J. C., Cook N. G. W., "Fundamentals of Rock Mechanics", London, Chapman and Hall (1971).
48. Byerlee J. D., "Friction of rock", Pure & Applied Geophysics, 116 (1978) 615-626.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.3.5]