تخمین جهت و مقدار تنش‌های برجا به‌روش تحلیل بریکات در یکی از چاه‌های نفت جنوب غرب ایران

علیرضا نجیبی، محمد غفوری*، غلامرضا لشکری‌پور؛
دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین‌شناسی
محمدرضا آصف؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکدهٔ علوم زمین

تاریخ: دریافت ٩٤/٠٩/١٧ **پذیرش** ٩٥/٠٨/٠١

چکیده

تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا پیش‌نیاز اساسی در حفر چاه‌های نفت و انجام عملیات توسعه میادین نظیر شکافت هیدرولیکی محسوب می‌شود. تحلیل شکستگی‌های برشی یکی از روش‌های تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا است. شکستگی‌های برشی به‌دلیل اعمال فشار گل حفاری کم‌تر از مقدار بهینه، به موازات جهت تنش برجای افقی حداقل (S_h) در دیواره چاه گسترش می‌یابند. در این پژوهش، جهت و مقدار این تنش‌ها در یکی از چاه‌های نفت منطقه اهواز به‌روش تحلیل شکستگی‌های برشی اندازه‌گیری شده است. بر این اساس، جهت تنش برجای افقی حداکثر (S_H) در امتداد N٣٥E و جهت S_h نیز در راستای N٥٥W قرار دارد. بزرگای تنش برجای قائم (S_V) کم‌تر از مقدار S_H و بیش‌تر از مقادیر S_h است که بیان‌گر وجود رژیم تکتونیک امتدادلغز در منطقه است. تعیین جهت و مقدار این تنش‌ها امکان تخمین فشار بهینه گل حفاری و انتخاب مسیر مناسب حفاری در حفر چاه‌های انحرافی را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تنش‌های برجا، شکستگی‌های برشی چاه، ژئومکانیک، شکستگی، اهواز

مقدمه

آگاهی از جهت و مقدار تنش‌های برجا نقش مهمی در تحلیل پایداری دیواره چاه‌های نفت و گاز ایفا می‌کند [١]. روش‌های مختلفی برای تعیین جهت و بزرگای تنش‌های برجا وجود دارد

*نویسنده مسئول ghafoori@um.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

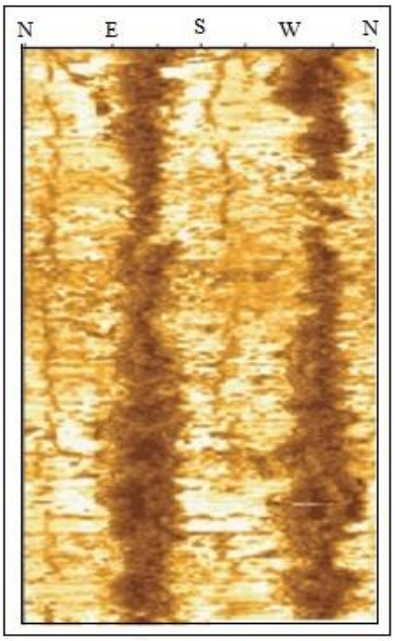
دارد که یکی از آن‌ها روش آنالیز شکل هندسی شکستگی‌های برشی چاه[1] است [٢]. این شکستگی‌ها هنگامی تشکیل می‌شوند که فشار گل حفاری اعمال شده به سازند کم‌تر از مقدار فشار بهینه گل باشد. حد پایین فشار بهینه گل حفاری تا حدودی با فشار منفذی متناظر است که با معیارهای شکست گمانه تعیین می‌شود و حد بالای آن نیز با تنش برجای افقی حداکثر برابر است. چنان‌چه فشار گل حفاری اعمال شده به سازند کم‌تر از مقدار بهینه شود، چاه در حالت فشارش قرار می‌گیرد و شکستگی‌های برشی در دو طرف چاه و در جهت عمود بر تنش برجای افقی حداکثر گسترش می‌یابند [٣]. این شکستگی‌ها در لاگ‌های تصویرگر به‌صورت نقاطی تیره و متقارن در دو سوی چاه مشخص می‌شوند و به‌عنوان ابزاری برای تعیین جهت تنش‌های برجا استفاده می‌شوند [٤] (**شکل ١**). اندازه و شکل این شکستگی‌ها به بزرگای تنش‌های برجا بستگی دارد. بنا براین محققان زیادی پیشنهاد کردند که با تحلیل شکل هندسی شکستگی‌های برشی چاه می‌توان کمّیت تنش‌های برجا را نیز تخمین زد [٥]. البته عواملی نظیر کاهش مقاومت توده سنگ به‌دلیل نوسانات دمایی، ترکیب شیمیایی سیالات حفاری و هوازدگی دیواره چاه نیز باعث تشکیل شکستگی‌های برشی می‌شوند. به‌همین دلیل در استفاده از این روش به‌منظور تخمین تنش‌های برجا باید با احتیاط عمل کرد [٦].

در این پژوهش، با بررسی شکستگی‌های برشی موجود در یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال اهواز، جهت و مقدار تنش‌های برجا تعیین می‌شود. لازم به ذکر است، اطلاعات مربوط به تنش‌های برجا در نقاط مختلف دنیا به‌قدری حائز اهمیت است، که یک پروژه جهانی به‌نام "نقشهٔ جهانی تنش"[2] تشکیل شده است تا این اطلاعات را از نقاط مختلف جهان جمع‌آوری و در اختیار علوم مختلف قرار دهد. بر اساس اطلاعات ارائه شده در وب سایت این پروژه، مکان‌هایی که در کشور ایران تنش‌های برجا برای آن‌ها گزارش شده است، بسیار محدود است. بنا براین باید تلاش بیش‌تری برای تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا در ایران انجام گیرد. با افزایش اطلاعات تنش‌های برجا در نقاط مختلف ایران، تحلیل‌های ژئومکانیکی با خطای کم‌تر و ضریب اطمینان بیش‌تر قابل استفاده هستند. بنا براین هر نوع فعالیت برای تحلیل جهت و

1. Borehole Breakout
2. World Stress Map

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

مقدار تنش‌های برجا در نقاط مختلف ایران، خصوصاً نقاطی که دارای ذخایر زیرزمینی با ارزش هستند، درخور توجه است و پیش‌نیاز مطالعات ژئومکانیک مانند تحلیل پایداری دیواره چاه و تعیین امتداد مناسب در چاه‌های جهت‌دار است.



شکل ۱ نمایش شکستگی برشی چاه در لاگ تصویرگر [۱]

مروری بر پژوهش‌های گذشته

برای اولین بار لیمان (۱۹٦٤) از شکستگی‌های برشی چاه برای بررسی تنش‌های برجا استفاده کرد [۷]. وی بیان داشت که ناپایداری چاه به‌دلیل افزایش تنش‌های فشاری، اطلاعاتی از تغییرات تنش در سنگ ارائه می‌دهد. بل و گوف (۱۹۷۹) با بررسی برخی چاه‌های نفت منطقه آلبرتا در کانادا نشان دادند که شکستگی های فشاری برشی دارای سطح مقطع مثلثی هستند که به صفحات برش محدود می‌شوند [۸]. این صفحات بر دیواره چاه مماس است و با زاویهٔ $\pi/٤-\varphi/٢$ نسبت به جهت تنش برجای افقی حداکثر (S_H) قرار گرفته‌اند (φ زاویهٔ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

اصطکاک داخلی). دارت و زوبک (۱۹۸۹) با بررسی شکستگی‌های برشی موجود در ۲۰۰ حلقه چاه در ۱۵ منطقه مختلف ایالات‌متحده آمریکا، به این نتایج دست یافتند [۹]:

- شکستگی‌های برشی سطح مقطع بیضوی دارند که قطر بزرگ آن موازی جهت تنش برجای افقی حداقل است.
- شکستگی‌های برشی در تمام سنگ‌ها و مناطق تکتونیکی تشکیل می‌شوند.
- شکستگی‌های برشی در چاه‌های با ساختارهای تکتونیکی مشابه، دارای امتداد مشابه هستند.
- جهت تنش‌هایی که از روش تحلیل شکستگی‌های برشی به‌دست آمده‌اند، مشابه جهتی است که از روش‌های دیگر مانند سازوکار کانونی زلزله و شکست هیدرولیکی به‌دست می‌آیند.

زوبک (۱۹۹۲) برای تعیین درجه و کیفیت نتایج حاصل از اندازه‌گیری جهت تنش‌های برجا به‌وسیلهٔ مشاهدات شکستگی‌های برشی، آن‌ها را در ۵ گروه طبقه‌بندی کرد [۱۰]. بر این اساس، جهت تنش‌های برجایی که از تحلیل بیش از ۳۰۰ متر شکستگی‌های برشی و با انحراف استاندارد کم‌تر از ۱۲ درجه به‌دست آیند، در درجهٔ کیفی (۱) قرار می‌گیرند (**جدول ۱**). این درجه‌بندی، استاندارد پروژه "نقشهٔ جهانی تنش" برای تعیین مقدار کیفیت جهت تنش‌های برجا بر اساس بررسی شکستگی‌های برشی است.

جدول ۱. استاندارد نقشهٔ جهانی تنش برای تعیین درجه کیفیت جهت تنش‌های برجا بر اساس مطالعه شکستگی‌های برشی [۱۰]

شکستگی‌های برشی	درجهٔ کیفیت
فاصلهٔ زون‌های شکستگی‌های برشی ≤ ۱۰ و طول کلی ≤ ۳۰۰ متر در چاهی با انحراف معیار ≥ ۱۲ درجه	درجهٔ (۱) انحراف معیار تعیین جهت تنش: ± ۱۰ تا ۱۵ درجه
فاصلهٔ زون‌های شکستگی‌های برشی ≤ ٦ و طول کلی ≤ ۱۰۰ متر در چاهی با انحراف معیار ≥ ۲۰ درجه	درجهٔ (۲) انحراف معیار تعیین جهت تنش: ± ۱۵ تا ۲۰ درجه
فاصلهٔ زون‌های شکستگی‌های برشی ≤ ٤ و طول کلی ≤ ۳۰ متر در چاهی با انحراف معیار ≥ ۲۵ درجه	درجهٔ (۳) انحراف معیار تعیین جهت تنش: ± ۲۰ تا ۲۵ درجه
فاصلهٔ زون‌های شکستگی‌های برشی < ٤ و طول کلی < ۳۰ متر در چاهی با انحراف معیار < ٤۰ درجه	درجهٔ (٤) انحراف معیار تعیین جهت تنش: > ۲۵ درجه
شکستگی‌های برشی مشخصی در چاه مشاهده نمی‌شود. جهت‌های تشخیص داده شده پراکنده هستند. میانگین مشخصی تعیین نمی‌شود (انحراف معیار > ٤۰ درجه).	درجهٔ (۵) جهت معینی تشخیص داده نمی‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

لی و هیمسون (۲۰۱۵) با حفاری آزمایشگاهی تعدادی ماسه‌سنگ آرکوزی و کوارتزی در شرایط نامساوی تنش‌های قائم و افقی، دریافتند که در مقادیر ثابت تنش برجای قائم (S_V) و افقی حداقل (S_h)، عمق و زاویه شکستگی‌های برشی تابع تنش برجای افقی حداکثر (S_H) است [۱۱]. لین و همکاران (۲۰۱۰) با بررسی شکستگی‌های برشی موجود در یکی از چاه‌های تایوان، تغییرات جهت تنش‌های برجا در اطراف زون‌های گسلی را بررسی کردند [۱۲]. بر اساس نتایج پژوهش‌های آن‌ها، جهت تنش‌های برجای افقی در اطراف گسل‌ها ممکن است به‌صورت ناگهانی و یا تدریجی تغییر کند، و در برخی موارد ممکن است بدون تغییر بماند. بررسی شکستگی‌های برشی در پروژه‌های حفاری عمیق نظیر کجن پاس کالیفرنیا [۱۳]، پروژه حفاری عمیق سیجان [۱۴]، کی تی بی آلمان [۱۵]، فورمسراک سوئد [۱۶] و پروژه حفاری قاره‌ای چین [۱۷] بیان‌گر کارایی بالای روش بررسی شکستگی‌های برشی در تخمین جهت و بزرگای تنش های برجای افقی است. به همین دلیل حدود ۲۰ درصد از اطلاعات نقشه جهانی تنش از بررسی شکستگی‌های برشی تهیه شده‌اند [۱۸].

نحوهٔ اندازه‌گیری تنش‌های برجا به‌روش مشاهدات شکستگی‌های برشی

سنگ های درون زمین تحت تأثیر تنش اصلی قائم (S_V)، تنش افقی حداقل (S_h) و تنش افقی حداکثر (S_H) قرار می‌گیرند. با فرض وجود شرایط ایزوتروپ، هموژن و الاستیک خطی برای سنگ‌های محیط، اجزای تنش در نقطه‌ی (r,θ) در صفحه‌ی افقی اطراف چاه به‌صورت زیر بیان می‌شوند [۱۹]، [۲۰].

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(S_H + S_h)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2}(S_H - S_h)\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta + \frac{\Delta P R^2}{r^2} \quad (۱)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(S_H + S_h)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2}(S_H - S_h)\left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta - \frac{\Delta P R^2}{r^2} \quad (۲)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{1}{2}(S_H + S_h)\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta \quad (۳)$$

که در آن σ_r تنش شعاعی، σ_θ تنش مماسی، $\tau_{r\theta}$ تنش مماسی برشی، R شعاع چاه، r فاصله تا مرکز چاه، θ زاویه امتداد مورد نظر با جهت S_H و ΔP اختلاف فشار بین چاه و سازند است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

(مثبت نشان‌دهندهٔ فشار اضافی در چاه است). بزرگای تنش های عمـودی و برشـی در صـفحهٔ دارای پتانسیل شکست در تابعی از (r,θ) تغییر می‌کند. با توجه به معیار موهر-کلمب، تنش‌های برشی و قائم در سطح شکست به‌صورت (٤) نوشته می‌شوند [٢٠].

$$|\tau| = C + \mu\,\sigma_n \qquad (٤)$$

که در آن C مقاومت چسبندگی و $\mu = \tan\varphi$ ضریب اصطکاک داخلی است. حداکثر مقاومـت چسبندگی که شکست در آن اتفاق می‌افتد برابر است با [٢١]:

$$C = (1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}\left[\left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2}\right)^2 + \tau_{r\theta}^2\right]^{\frac{1}{2}} - \mu\left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2}\right) \qquad (٥)$$

از آن‌جا که ضریب اصطکاک داخلـی بـیش‌تـر سـنگ‌هـا بـین ٠/٦ تـا ١ اسـت و مقاومـت چسبندگی آن‌ها از چند مگاپاسکال تا کم‌تر از چند ده مگاپاسـکال تغییـر مـی‌کنـد [٢٠]، بـرای مقادیر مشخصی از S_H، S_h، و μ، در مقادیر اندک مقاومت چسـبندگی شکسـتگی‌هـای برشـی عریض‌تر و عمیق‌تر می‌شوند. به‌عنوان مثال اگـر S_h=١٠ MPa، S_H=١٥ MPa، μ=٠/٥ و مقاومـت چسبندگی بیش از ١٠ مگاپاسکال باشد، هـیچ شکسـتگی‌برشـی تشـکیل نخواهـد شـد و اگـر مقاومت چسبندگی کم‌تر از ٦ مگاپاسکال باشد، شکستگی‌هـا بـه‌قـدری بـزرگ مـی‌شـوند کـه سرتاسر چاه چاه را فرا می گیرند [٢١]. با قرار دادن روابط (١) تا (٣) در رابطـه (٥)، مقاومـت چسبندگی در نقطه شروع شکستگی برشـی $C(R,\theta_b)$ و در عمیـق‌تـرین نقطـه آن $C(r_b, \pi/2)$ (**شکل ٢**) به‌صورت (٦) و (٧) بیان می‌شود [٢١].

$$C(R,\theta_b) = \frac{1}{2}[(a_1+a_2)S_H + (b_1+b_2)S_h] + e\Delta P \qquad (٦)$$

$$C\left(r_b, \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}[(c_1+c_2)S_H + (d_1+d_2)S_h] + f\Delta P \qquad (٧)$$

که

$$a_1 = -\mu(1 - 2\cos 2\theta_b)$$

$$a_2 = (1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}(1 - 2\cos 2\theta_b)$$

$$b_1 = -\mu(1 + 2\cos 2\theta_b)$$

$$b_2 = (1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}(1 + 2\cos 2\theta_b)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

$$c_2 = (1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}\left(1-\frac{R^2}{r_b^2}+\frac{3R^4}{r_b^4}\right)$$

$$d_1 = -\mu\left(1-\frac{2R^2}{r_b^2}\right)$$

$$d_2 = (1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}(-1+\frac{3R^2}{r_b^2}-\frac{3R^4}{r_b^4})$$

$$e = -(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$f = -(1+\mu^2)^{\frac{1}{2}}\frac{R^2}{r_b^2}$$

و اگر فرض کنیم که مقاومت چسبندگی در نقطه شروع و عمیق‌ترین نقطه شکستگی برشی با هم برابر باشند، داریم:

$$C(R,\theta_b) = C(r_b,\frac{\pi}{2}) \quad (۸)$$

$$S'_h = 2\frac{(a_1+a_2)(C+f\Delta P)-(c_1+c_2)(C-e\Delta P)}{(a_1+a_2)(d_1+d_2)-(b_1+b_2)(c_1+c_2)} \quad (۹)$$

$$S'_H = 2\frac{(d_1+d_2)(C-e\Delta P)-(b_1+b_2)(C-f\Delta P)}{(a_1+a_2)(d_1+d_2)-(b_1+b_2)(c_1+c_2)} \quad (۱۰)$$

$$\frac{S'_H}{S'_h} = \frac{(d_1+d_2)(C-e\Delta P)-(b_1+b_2)(C-f\Delta P)}{(a_1+a_2)(C+f\Delta P)-(c_1+c_2)(C-e\Delta P)} \quad (۱۱)$$

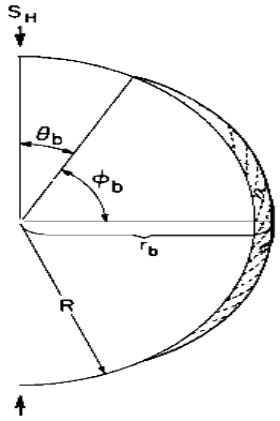
که در آن‌ها S'_h و S'_H به‌ترتیب بیانگر تنش برجای افقی حداقل مؤثر و حداکثر مؤثر است.

تنش برجای قائم نیز با استفاده از لاگ دانسیته، با رابطهٔ (۱۲) قابل اندازه‌گیری است که از تفاضل آن با فشار منفذی، تنش برجای قائم موثر حاصل می‌شود [٦].

$$S_v = \int_0^Z \rho_{(Z)}\, g\, dZ \cong \rho\bar{g}Z \quad (۱۲)$$

که در آن $\rho(Z)$ دانسیته در عمق Z و g شتاب گرانش زمین است. چنان‌که در بالا اشاره شد، با استفاده از نگار تصویرگر چاه که شکل شکستگی برشی را مشخص می‌سازد، و با در دست داشتن مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی، می‌توان بزرگای تنش‌های برجای افقی را تخمین زد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]



شکل ۲. عرض (φ_b) و عمق شکستگی برشی (rb) و مقدار زاویه با S_H (θ_b) [۲۱].

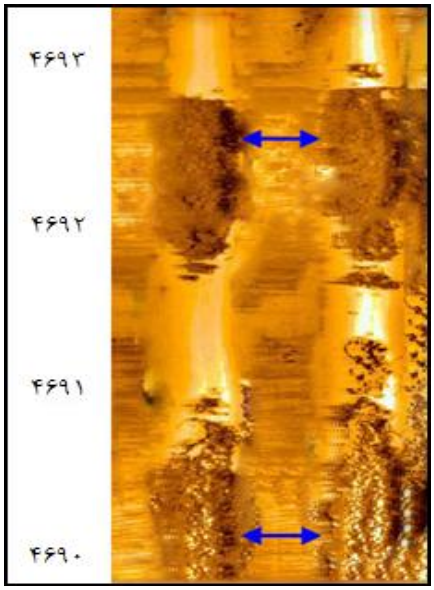
منطقهٔ بررسی شده

پژوهش حاضر در مخزن بنگستان میدان نفتی کوپال، در شمال استان خوزستان، در بخش میانی حوضه فرو افتاده دزفول، و در فاصلهٔ ٦٠ کیلومتری شرق شهر اهواز انجام شده است. مخزن بنگستان در این میدان از سازندهای ایلام و سروک تشکیل شده است. سازند ایلام به سن سانتونین، دارای سنگ آهک‌های رسی به‌همراه لایه‌های نازک شیل است. سازند سروک نیز از سنگ آهک‌های توده‌ای کرم تا خاکستری به سن آلبین پسین، سنومانین و تورونین تشکیل شده است.

تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا در چاه مورد مطالعه

چنان‌که پیش‌تر بیان شد، شکستگی‌های برشی در جهت تنش برجای افقی حداقل گسترش می‌یابند. این شکستگی‌ها در لاگ‌های تصویرگر به‌صورت نقاطی تیره در دو سوی چاه قابل مشاهده هستند و به‌عنوان ابزاری برای تعیین جهت و بزرگای تنش‌های برجای افقی استفاده می‌شوند. درون سازند سروک چاه بررسی شده، هنگام حفاری با مته ۵/۸۷۵ اینچ، شکستگی‌های برشی ایجاد شد که وجود آن‌ها به‌وسیله لاگ‌های تصویرگر به اثبات رسیده است (**شکل ۳**). **جدول ۲** شرایط چاه و ویژگی‌های شکستگی‌های برشی تشکیل شده را نشان می‌دهد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]



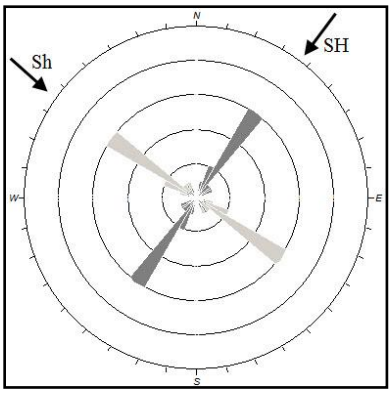
شکل ۳. عرض شکستگی برشی در لاگ تصویرگر چاه بررسی شده

جدول ۲. ویژگی‌های چاه و شکستگی‌های برشی تشکیل شده.

اختلاف فشار (مگاپاسکال)	عمق شکستگی (اینچ)	امتداد شکستگی (درجه)	شیب شکستگی (درجه)	عمق چاه (متر)
٦/٦	٦/٦٥	٣٠٠/٥٥	٨٦/٥٨	٤٦٩٢/٩
٣/٠	٦/٧٤	٣١١/١٦	٨٥/٣٣	٤٦٧٦/٤٣
٤/٦	٦/٦٧	٣٠١/١٩	٨٦/٢٨	٤٦٦٨/٧١
٦/٠	٦/٦٨	٢٩٤/٦٥	٨٦/٩٩	٤٦٦١/٦٦
٣/٠	٦/٧٥	٣٠٢/٥٢	٨٥/٥٠	٤٦٥٠/١٠
٤/٦	٦/٧٠	٣٠٣/٥٠	٨٦/٤٦	٤٥٩٧/٧١
٣/٨	٦/٧٣	٣٠٧/٠٧	٨٥/٧١	٤٥٧٥/٩٥
٣/٣	٦/٧٣	٣٢٨/٨٥	٨٦/٥٠	٤٥٦٣/٠٨
٣/٣	٦/٧٤	٢٨٨/٠٩	٨٨/٣٢	٤٥٥٩/٦١
٣/٤	٦/٧١	٣٣٤/١٥	٨٧/٣٥	٤٥٣١/٢١
١/٦	٦/٨٠	٣٠٥/٧٦	٨٦/٧٧	٤٤٩٤/٥٧
٣/٥	٦/٧٠	٢٩٣/٤٤	٨٦/٠٣	٤٤٧٠/٠٣

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

از آن‌جا که شکستگی‌های برشی در جهت تنش برجای افقی حداقل گسترش می‌یابند، با قرار دادن شیب و امتداد آن‌ها در نمودار گل سرخی، جهت تنش‌های برجا تعیین می‌شود (**شکل ٤**). چنان‌که در **شکل ٤** نشان داده شده است، شکستگی‌های برشی چاه بررسی شده با شیب ٨٥ درجه، در امتداد ٣٠٥ درجه گسترش یافته‌اند. بنا براین جهت تنش برجای افقی حداقل به موازات راندگی زاگرس و در امتداد N55W قرار دارد. تنش برجای افقی حداکثر نیز در امتداد N35E و به موازات جهت حرکت صفحهٔ عربستان به‌سمت فلات ایران قرار دارند. شایان ذکر است که جهت تنش‌های برجا علاوه بر نیروهای تکتونیکی بزرگ مقیاس، تحت تأثیر گسل‌های محیطی نیز قرار می‌گیرند. به‌دلیل نداشتن فعالیت گسل در میدان بررسی شده، جهت تنش‌های برجا متأثر از نیروهای تکتونیکی بزرگ مقیاس و دور از میدان هستند. مجموع شکستگی‌های برشی چاه بررسی شده ١١٢ متر و انحراف استاندارد جهت آن‌ها ١٣ درجه برآورد شد. با توجه به استاندارد نقشهٔ تنش جهانی [١٠]، جهت‌های تعیین شده دارای درجهٔ کیفی (٢) هستند.

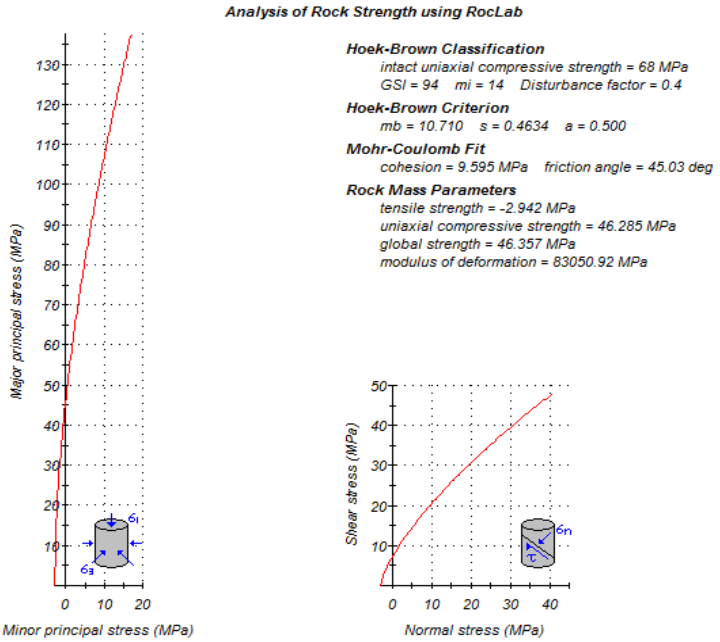


شکل ٤. امتداد شکستگی‌های برشی و جهت تنش‌های برجا در چاه بررسی شده

پس از تعیین جهت تنش‌های برجا، بزرگای آن‌ها نیز با استفاده از لاگ دانسیته، زاویهٔ اصطکاک داخلی، مقاومت چسبندگی مغزه سنگ، اختلاف فشار سازند و عمق شکستگی‌ها تعیین می‌شوند. بنا براین، با انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوره بر اساس استاندارد ASTM D٢٦٦٤ و ASTM D٥٤٠٧ روی ٧ عدد مغزه نفتی سازند سروک، زاویهٔ اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از این آزمایش نشان می‌دهد که

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

مقادیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی مغزه‌های نفتی این سازند به‌ترتیب ۵/۵ ±۵۰ درجه و ۳/۵± ۱۲ مگاپاسکال است (**شکل ۵**).



شکل ۵. منحنی معیار شکست و تعیین زاویهٔ اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی نمونه شماره ۱۳

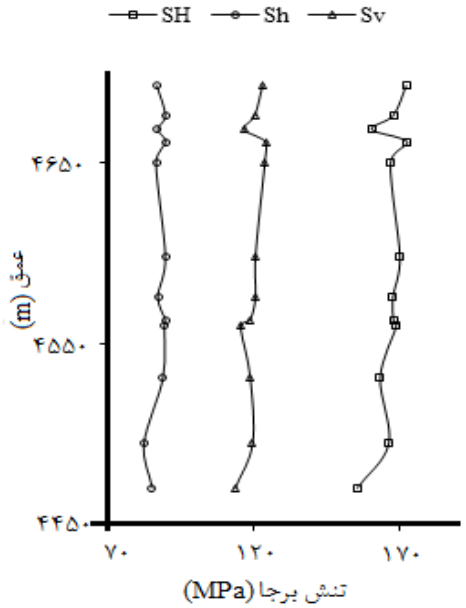
عمق شکستگی برشی یکی از پارامترهای اساسی در تعیین بزرگای تنش‌های برجای افقی است که به‌وسیلهٔ لاگ کالیپر تعیین می‌شوند (این لاگ تغییرات قطر چاه را در اعماق مختلف نشان می‌دهد). اختلاف فشار سازند نیز با توجه به اختلاف فشار منفذی و فشار گل حفاری تعیین می‌شود که در این تحقیق فشار منفذی با اجرای "آزمایش تکرار سازند"[1] در شرایط برجا اندازه‌گیری شد. با قرار دادن مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در روابط (۹) و (۱۰)، مقادیر تنش‌های برجای افقی حداقل و حداکثر محاسبه شد. **جدول ۳** و **شکل ٦** و مقادیر تنش‌های برجای افقی و قائم چاه بررسی شده را نشان می‌دهد.

1. Repeat Formation Test

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

جدول ٣. مقادیر تنش‌های برجا در چاه بررسی شده

عمق (متر)	S_V (مگاپاسکال)	S_H (مگاپاسکال)	S_h (مگاپاسکال)
٤٦٩٢/٩	١٢٣	١٧٢	٨٧
٤٦٧٦/٤٣	١٢٠	١٦٨	٩٠
٤٦٦٨/٧١	١١٧	١٦٠	٨٧
٤٦٦١/٦٦	١٢٤	١٧٢	٩٠
٤٦٥٠/١٠	١٢٤	١٦٧	٨٦
٤٥٩٧/٧١	١٢٠	١٧٠	٩٠
٤٥٧٥/٩٥	١٢٠	١٦٨	٨٧
٤٥٦٣/٠٨	١١٩	١٦٨	٩٠
٤٥٥٩/٦١	١١٥	١٦٨	٨٩
٤٥٣١/٢١	١١٩	١٦٣	٨٩
٤٤٩٤/٥٧	١١٩	١٦٦	٨٢
٤٤٧٠/٠٣	١١٤	١٥٥	٨٥



شکل ٦. تغییرات تنش‌های برجا با عمق در چاه بررسی شده

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

چنان‌که در **شکل ٦** نشان داده شده است، رژیم تکتونیکی امتدادلغز در مخزن چاه بررسی شده برقرار است. بر اساس نظریه گسلش اندرسون [٦]، در شرایط امتدادلغز تنش برجای قائم بزرگ‌تر از تنش برجای افقی حداقل و کوچک‌تر از تنش برجای افقی حداکثر است ($S_H > S_V > S_h$). به‌دلیل فشارش صفحه عربستان به ایران، شرایط تکتونیکی معکوس ($S_H > S_h > S_V$) در سطح زمین منطقه مورد بررسی برقرار بوده و این شرایط برای اعماق زمین نیز انتظار می‌رود. موس و زوبک (۱۹۹۰) ضمن بررسی رژیم تکتونیکی در خلیج مکزیک اظهار داشتند که افزایش فشار منفذی در اعماق زیاد و در شرایط مخزن نفتی، موجب تبدیل رژیم‌های تکتونیکی به یک‌دیگر می‌شود و رژیم‌های عادی و یا معکوس به امتدادلغز می‌شود [۲۲]. بنا براین به‌دلیل افزایش فشار منفذی ناشی از تشکیل مخزن نفتی در منطقهٔ بررسی شده، با افزایش عمق رژیم تکتونیکی معکوس به امتداد لغز تبدیل شده است. شرایط امتدادلغز در سراسر مخزن چاه مورد بررسی برقرار بوده و نسبت بین حداکثر و حداقل تنش برجای افقی (S_H/S_h) حدود ۱/۸۵ برآورد شده است. وجود تکتونیک فعال در پوسته زمین موجب تغییر نسبت بین تنش‌های در مجاورت گسل می‌شود. با توجه به عملکرد گسل در چاه بررسی شده که وجود آن به‌وسیلهٔ لاگ‌های تصویرگر به اثبات رسیده است.

نتیجه‌گیری

در هنگام حفاری یکی از چاه‌های میدان نفتی کوپال اهواز، به‌دلیل اعمال نامناسب فشار گل حفاری در برخی اعماق، چاه در حالت فشارش قرار گرفت و شکستگی‌های برشی در آن ایجاد شد. این شکستگی‌ها در جهت تنش برجای افقی حداقل گسترش می‌یابند و به‌عنوان ابزاری برای تعیین جهت و بزرگای تنش‌های برجا استفاده می‌شوند. شکستگی‌های برشی چاه بررسی شده با شیب ۸۵ درجه، در امتداد N۵۵W گسترش یافته‌اند که بیان‌گر جهت تنش برجای افقی حداقل است. تنش برجای افقی حداکثر، عمود بر این جهت و در راستای N۳۵E قرار دارد. جهت‌های یاد شده دارای انحراف استاندارد ۱۳ درجه است و بر اساس استاندارد نقشهٔ تنش جهانی، دارای درجه کیفی (۲) هستند. هم‌چنین، با استفاده از پارامترهایی مانند زاویهٔ تشکیل شکستگی‌های برشی نسبت به جهت تنش برجای افقی حداکثر، عمق

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

شکستگی‌ها، اختلاف فشار سازند و چاه، دانسیته سازند، زاویهٔ اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی مغزه‌های نفتی مقادیر تنش‌های برجای قائم و افقی حداقل و حداکثر در نقاط وقوع شکستگی‌ها اندازه‌گیری شد. تحلیل مقادیر اندازه‌گیری شده نشان‌دهندهٔ وجود رژیم تکتونیکی امتدادلغز در محیط است. به‌دلیل اعمال فشارهای تکتونیکی از طرف صفحه عربستان به ایران، وجود شرایط تکتونیکی معکوس در منطقه مورد انتظار است، ولی افزایش فشار منفذی ناشی از وجود مخزن نفتی در اعماق زیاد، باعث تبدیل محیط‌های تکتونیکی معکوس و عادی به امتدادلغز می‌شود که این وضعیت در چاه بررسی شده ملاحظه شده است. هم‌چنین، شرایط تکتونیک و نسبت بین تنش‌های برجا درون مخزن چاه بررسی شده ثابت است که بیان‌گر نبودن گسل فعال در مخزن بررسی شده است. تعیین جهت و مقدار تنش‌های برجا کاربرد فراوانی در توسعه میادین نفتی نظیر اجرای عملیات شکافت هیدرولیکی، تخمین فشار بهینه گل حفاری و انتخاب مسیر مناسب حفاری در حفر چاه‌های انحرافی دارد.

منابع

1. Zoback M., et al., "Determination of stress orientation and magnitude in deep wells", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (7) (2003) 1049-1076.
2. Walton G., et al., "Borehole Breakout Analysis to Determine the In-Situ Stress State in Hard Rock", in 49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 2015, American Rock Mechanics Association: San Francisco, California.
3. Amadei B., Stephansson O., "Rock stress and its measurement", Springer Science & Business Media (1997).
4. Kim G.Y., Narantsetseg B., "Fractures and Breakouts Analysis from Borehole Image Logs: Preliminary Results for Interpretation of Stress History and In Situ Stress State", Marine Georesources & Geotechnology, (2014) (just-accepted).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

5. Haimson B., Lee H., "Borehole breakouts and compaction bands in two high-porosity sandstones", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41(2004) 287-301.
6. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics", (2007).
7. Leeman E., "The measurement of stress in rock", National Mechanical Engineering Research Institute (1964).
8. Bell J., Gough D., "Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells. Earth and Planetary Science Letters, 45(2) (1979) 475-482.
9. Dart R. L., Zoback M. L., "Wellbore breakout stress analysis within the central and eastern continental United States", The Log Analyst, 30 (01) (1989).
10. Zoback M., "First-and second-order patterns of tectonic stress: The World Stress Map Project", Journal of Geophysics Research, 97 (B8) (1992) 11703-11728.
11. Lee H., Haimson B., "Borehole breakouts and in-situ stress in sandstones", Vitrification in Assisted Reproduction, (2015) 201.
12. Lin W., et al., "Localized rotation of principal stress around faults and fractures determined from borehole breakouts in hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP)", Tectonophysics, 482 (2010) 82-91.
13. Shamir G., Zoback M. D., "Stress orientation profile to 3.5 km depth near the San Andreas fault at Cajon Pass, California", Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 1992. 97(B4): p. 5059-5080.
14. Zajac B. J., Stock J. M., "Using borehole breakouts to constrain the complete stress tensor: Results from the Sijan Deep Drilling Project and

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]

offshore Santa Maria Basin, California", Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 102 (B5) (1997) 10083-10100.

15. Te Kamp L., Rummel F., Zoback M., "Hydrofrac stress profile to 9 km at the German KTB site", in Proc. Workshop on Rock Stresses in the North Sea (1995).
16. Ask D., Ask M., "Detection of potential borehole breakouts in boreholes KFM01A and KFM01B", SKB P-report in prep (2006).
17. Cui J.-w., et al., "Wellbore breakouts of the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) and determination of the present tectonic stress state", Tectonophysics, 475 (2009) 220-225.
18. Heidbach O., et al., "Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008". Tectonophysics, 482 (1) (2010) 3-15.
19. Kirsch G., "Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre", (1898) Springer.
20. Jaeger J. C., Cook N. G. W, Zimmerman R., "Fundamentals of rock mechanics" (2009).
21. Zoback M. D., et al., "Well bore breakouts and in situ stress", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90 (B7) (1985) 5523-5530.
22. Moos D., Zoback M. D., "Utilization of observations of well bore failure to constrain the orientation and magnitude of crustal stresses: application to continental, Deep Sea Drilling Project, and Ocean Drilling Program boreholes", Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012), 95 (B6) (1990) 9305-9325.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.4.7.0]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.4.455]