



مقاله پژوهشی

تعیین وزن بهینه گل برای حفاری چاه قائم در حضور شکستگی‌ها: مطالعه موردی چاه SIE-04 در میدان نفتی سیری

محمد کمیلیان^{۱*}، امید سعیدی^۲، مهدی رهبر^۲

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

۲. اداره زمین‌شناسی، شرکت نفت فلات قاره، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۳ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۱۰

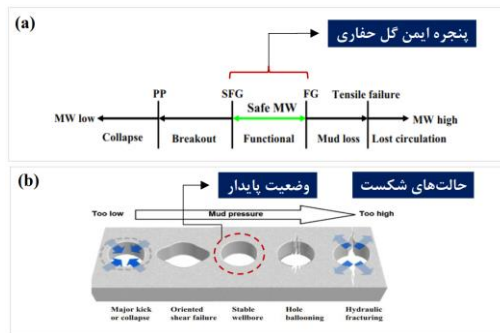
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2019.199176.1103

واژگان کلیدی	چکیده
<p>ارزیابی پایداری چاه شکستگی پنجره ایمن گل حفاری گرادیان شکست برشی گرادیان شکستگی روش المان مجزا</p>	<p>فشار گل پایداری ارزیابی پایداری چاه در مرحله اول به‌منظور تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری است. تعیین حد پایین فشار گل حفاری به‌منظور جلوگیری از وقوع شکست برشی در دیواره چاه و حد بالای فشار گل به‌منظور جلوگیری از وقوع شکست کششی (شکست هیدرولیکی)، بر اساس گرادیان شکست برشی (SFG) و گرادیان شکستگی (FG) انجام می‌شود. در این مقاله به‌منظور بررسی اثر حضور شکستگی‌ها در مکانیسم‌های شکست چاه و تعیین پنجره ایمن گل حفاری، روابط تحلیلی و مدل‌سازی عددی به روش المان مجزا ارائه شده است. برای این منظور از معیار موهر کولمب - جی‌گر به‌منظور بررسی شکست برشی با در نظر گرفتن اثر حضور ناپیوستگی‌ها در مجاورت دیواره چاه استفاده شده است. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که در بازه‌های مشخصی از (β) که معرف نحوه جهت‌گیری ناپیوستگی در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه است، حضور شکستگی‌ها اثری بر مقاومت نهایی توده سنگ نخواهد داشت. همچنین برخلاف این تصور که شکست برشی در امتداد تنش افقی کمینه رخ می‌دهد (در این مقاله منظور برای حالتی است که $\theta = 0$)، در حالتی که اثر حضور ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته شود، بیشترین از به‌منظور جلوگیری از شکست و لغزش در امتداد چاه در زاویه $\beta = 45 +$ و $\frac{\phi_w}{2} = 52.25$ ($\theta = 84.25$) است. همچنین در بازه $(17.5 \leq \theta \leq 46.5)$ شکستگی‌ها اثر در مقاومت نهایی شکست نخواهند داشت. فشار گل عملیاتی برای چاه موردنظر بر اساس گزارش‌های حفاری شرکت نفت فلات قاره ($40.55 MPa$) است. بر اساس روابط تحلیلی این فشار ($36.92 MPa$) تعیین شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی به روش المان مجزا نشان داد که گسترش زون شکست پلاستیک، بیشترین جابه‌جایی دیواره، لغزش در امتداد شکستگی‌ها و شکست‌های کششی در دو فشار تعیین شده تقریباً مشابه است. در حالتی که نسبت تنش افقی بیشینه به کمینه برابر با $(\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.65)$ در نظر گرفته شود، لغزش در امتداد شکستگی‌ها و گسترش شکستگی‌ها (زون شکست پلاستیک) در مجاورت چاه بیشتر است.</p>

* کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده معدن و متالورژی؛ دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ ایران؛ تهران؛ خیابان انقلاب؛ ضلع شمال شرق چهارراه ولیعصر؛ کوچه شهید بالاور؛ مرکز فناوری و توسعه نوآوری دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ پلاک ۷؛ طبقه اول؛ کدپستی: ۱۵۹۱۶۳۹۷۲۳؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱۶۶۴۸۳۴۰۶؛ رایانامه: komaylian@aut.ac.ir

۱. پیشگفتار

سازند) مکانیسم‌های منجر به شکست در چاه متفاوت و پیچیده است.



شکل ۱. رابطه شماتیک (طرح‌واره) فشار گل (وزن گل، MW) و شکست چاه (Zhang J., 2013). بازه ایمن گل حفاری بر اساس گرادیان شکستگی و گرادیان شکست برشی. (b) حالت‌های شکست در مقایسه با مقادیر مختلف فشار گل.

به‌منظور حفظ پایداری چاه در سازند دارای شکستگی، افزایش وزن گل حفاری پیشنهاد می‌شود. هرچند به علت حضور شکستگی‌ها، افزایش وزن گل می‌تواند احتمال هرز روی سیال حفاری را به‌طور فزاینده‌ای افزایش دهد (Zhang J., 2013). در این شرایط ارزیابی پایداری چاه و تعیین پنجره گل دشوار و نیازمند بررسی توأمان پارامترهای متعددی از قبیل نسبت تنش‌های برجا، فشار منفذی، گرادیان شکستگی، گرادیان شکست برشی و همچنین اثر ناهمسانگردی در مقاومت توده سنگ و تنش‌ها (متأثر از حضور شکستگی‌ها) است. تاکنون مطالعات متعددی در زمینه‌ی ارزیابی پایداری چاه و تعیین

ناپایداری چاه یکی از مهم‌ترین مشکلات عملیات حفاری است. ناپایداری چاه منجر به افزایش زمان و به‌تبع آن هزینه حفاری خواهد شد. به‌طورمعمول ۱۰٪ از زمان حفاری صرف رفع مشکلات ناشی از ناپایداری چاه می‌شود (Li S. a., 2012). وزن گل حفاری به‌عنوان مهم‌ترین عامل برای حفظ پایداری چاه، می‌تواند از مشکلاتی نظیر گیر لوله حفاری^۱، گیر اختلاف فشاری^۲، هرز روی گل حفاری یا فوران چاه جلوگیری کند. بنابراین تعیین دقیق پنجره وزن گل (فشار گل) در حفاری چاه به‌خصوص در سازندهای با پنجره عملیات باریک، بسیار حائز اهمیت است. بر اساس رابطه بین وزن گل و شکست‌های محتمل در چاه، در حالتی که فشار گل از فشار منفذی سیال^۳ پایین‌تر باشد، چاه دچار فرو-ریختگی^۴ (ریزش دیواره و یا جمع شدگی دهانه) می‌شود (شکل ۱). در حالتی که فشار گل از گرادیان شکست برشی^۵ (SFG) پایین‌تر است، دیواره چاه دچار شکست برشی جهت‌دار^۶ خواهد شد. در صورتی که فشار گل حفاری از آستانه گرادیان شکستگی^۷ تجاوز کند، شکست‌های هیدرولیکی القایی^۸ (شکست کششی) در چاه به وقوع می‌پیوندد که منجر به هرز روی و یا از دست رفتن چرخه‌ی گل حفاری^۹ می‌شود (Zhang J., 2013). هرچند در حضور شکستگی‌ها و صفحات سست ناپیوستگی، تعیین مکانیسم‌های شکست و پیاده-سازی یک الگوی حفاری کارآمد (تعیین پنجره گل) به‌منظور جلوگیری از وقوع ناپایداری چاه دشوار است (Lang, 2011). در این حالت (حضور شکستگی در

¹ Stuck pipe

² Differential Pressure Sticking

³ Pore pressure

⁴ Collapse

⁵ Shear failure gradient (SFG)

⁶ Oriented shear failure

⁷ Fracture gradient

⁸ Induced hydraulic fractures

⁹ Drilling mud circulation

فرمولاسیون این روش‌ها در حالتی که مسئله مورد نظر شامل ناپیوستگی و سطوح شکستگی متقاطع باشد، محدود است (Itasca, 2016). بهره‌گیری از روش المان مجزا^{۱۱} (DEM) در مدل‌سازی محیط‌های دارای ناپیوستگی برخی از محدودیت‌های روش‌های بر پایه محیط پیوسته را مرتفع می‌کند. در مدل‌سازی به روش المان مجزا، توده سنگ به صورت مجموعه‌ای متشکل از بلوک‌های صلب و یا تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته می‌شوند. در این روش سطوح ناپیوستگی به‌مانند مرزهای مجزای اندرکنشی در بین این بلوک‌ها فرض می‌شوند (Itasca, 2016). روش المان مجزا در مطالعات متعددی مرتبط با مسئله دفع زباله‌های هسته‌ای (Cappa, 2006)، مدل‌سازی تنش‌های میدانی (Hart, 2003)، شکست هیدرولیکی (Nagel, 2013)، نفوذپذیری وابسته به تنش^{۱۲} (Min, 2004) و ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی (Sapigni, 2003) به کار گرفته شده است. این روش اثبات کرده است که یک ابزار حیاتی در فهم مکانیسم‌های شکست در توده سنگ‌های درزه‌دار و ارزیابی پایداری چاه در سازند-های دارای شکستگی است (Zhang X. a., 1999). با توجه به اهمیت ویژه بررسی مکانیسم‌های هیدرو مکانیکی چاه در سازند دارای شکستگی و تعیین وزن گل (فشار گل حفاری) برای حفظ یکپارچگی چاه و جلوگیری از هرز روی سیال، در این مقاله مدل‌سازی عددی سه‌بعدی یک چاه قائم به روش المان مجزا (نرم‌افزار 3DEC) در یکی از میدان‌های نفتی در خلیج فارس ارائه شده است. به‌منظور تعیین یک راهکار مناسب و کارآمد در ارزیابی پایداری چاه‌ها در سازند دارای شکستگی، ابتدا روش تحلیلی در بررسی پایداری چاه و تعیین وزن گل حفاری (پنجره گل) در شرایط حضور و عدم حضور نا-پیوستگی‌ها بیان و در ادامه بر اساس مشخصات تعیین‌شده برای پنجره گل، خصوصیات ژئومکانیکی سازند حفاری شده و

فشار گل حفاری با استفاده از روش‌های تحلیلی و مدل‌سازی-های عددی ارائه شده است (Zhang J. , 2013) (Meng, Yousefian,) (Taheri, 2018) (Karatela, 2016) (2019). در این بین به بررسی مکانیسم‌های هیدرو مکانیکی چاه در سازند دارای شکستگی و تعیین وزن مناسب گل حفاری بر اساس نتایج آن کمتر توجه شده است (Taheri, 2018). از آنجایی که مکانیسم‌های ناپایداری چاه در سازندهای دارای شکستگی بسیار پیچیده و شناخت آن‌ها دشوار است، این مسئله نیازمند انجام مطالعات جامع‌تری است. با توجه به گسترش روزافزون روش‌های عددی و افزایش قابلیت‌های نرم-افزاری در شبیه‌سازی شرایط پیچیده هیدرو مکانیکی، امکان انجام مطالعات دقیق‌تر فراهم شده است. مطالعات عددی انجام شده در راستای بررسی مکانیسم‌های هیدرو مکانیکی در سازندهای دارای شکستگی اغلب به‌منظور توصیف خصوصیات اختصاصی توده سنگ‌ها بوده است و کمتر به بررسی مکانیسم‌های هیدرو مکانیکی مؤثر در پایداری چاه و تعیین خصوصیات گل (وزن گل) بر اساس آن پرداخته شده است. باید به این نکته اشاره کرد که در این مطالعات شکستگی‌ها اغلب به‌صورت صریح و با تعریف خصوصیات آن‌ها به‌صورت مستقیم در مدل‌های عددی بررسی شده است. این در حالی است که پیچیدگی سیستم و عدم وجود اطلاعات کافی از ماهیت هندسی این ناپیوستگی‌ها در لایه‌های زیرسطحی از جمله موارد دشوار در این بخش از مطالعات عددی است. هرچند روش‌های جدیدی مانند شبکه شکستگی‌های مجزا^{۱۰} (DFN) با قابلیت ایجاد یک مدل سه‌بعدی از سیستم شکستگی‌ها به‌صورت تصادفی و بر اساس پارامترهای آماری و توابع توزیع احتمال مشخص، برخی از این دشواری‌ها را تسهیل نموده است (Lei, 2017). در ارزیابی پایداری چاه‌ها روش‌های عددی مختلفی به‌کاررفته است. روش المان محدود، تفاضل محدود و المان مرزی از این جمله است. باید توجه داشت که این روش‌ها به‌طور غالب برای شبیه‌سازی محیط-های پیوسته بوده است (Salehi, 2010). علاوه بر این،

¹⁰ Discrete fracture network (DFN)

¹¹ Distinct element (DEM)

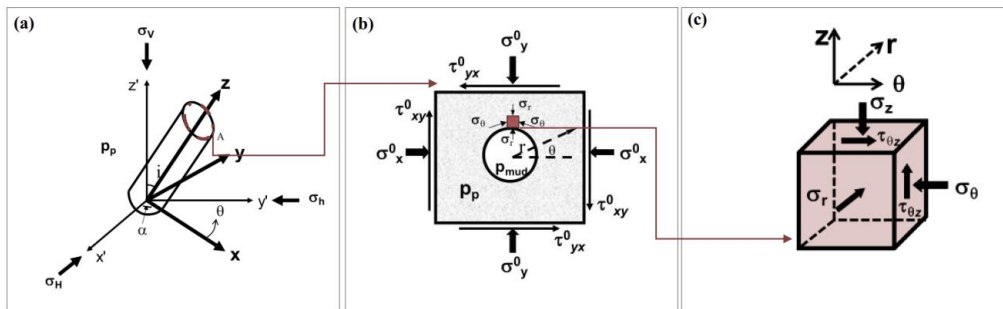
¹² Stress dependent permeability

سنگ، شکست و یا عدم شکست چاه تخمین زده می‌شود. معمولاً فرض می‌شود تنش‌های برجا متشکل از سه مؤلفه تنش اصلی متعامد شامل: تنش قائم (σ_v)، تنش افقی کمینه (σ_h) و بیشینه (σ_H). در حالت عادی، سازندهای زیرسطحی تحت یک رژیم تنش معین قرار دارند. با حفاری، توزیع تنش‌ها در نزدیکی چاه تغییر کرده و توزیع مجدد آن‌ها متناسب با تنش‌های میدان دور^{۱۴} انجام می‌شود. در شکل ۲ تنش‌های برجا و تنش‌های القایی (ناشی از حفاری) مجاور دیواره چاه نمایش داده شده است. ارزیابی پایداری در چاه مایل دشوارتر است، چراکه تنش‌های میدان دور در مختصات چاه مایل به صورت تنش‌های اصلی نیست و تنش‌های برشی در سطح مقطع عرضی چاه معرفی می‌شود. در این حالت ابتدا باید تنش‌های برجا در مختصات محلی چاه مایل محاسبه و سپس تنش‌های القایی مجاور چاه (ناشی از حفاری) متناسب با تنش‌های برجا جدید (تنش‌های برجای محاسبه شده متناسب با مختصات محلی چاه مایل) و فشار منفذی تعیین شود (ضمیمه ۱). به منظور ارزیابی پایداری چاه داده‌های اولیه موردنیاز به صورت: (۱) تنش‌های برجا (تنش‌های افقی کمینه و بیشینه) و جهت‌گیری آن‌ها، (۲) فشار منفذی، (۳) امتداد (مسیر حفر) چاه و (۴) مشخصه‌های ژئومکانیکی سازند و خصوصیت‌های مقاومتی توده سنگ تعریف می‌شوند.

وضعیت چاه در میدان موردنظر، ارزیابی پایداری چاه به روش عددی ارائه می‌شود.

۲. ارزیابی پایداری چاه و تعیین پنجره گل حفاری به روش تحلیلی

ارزیابی پایداری چاه در درجه اول به منظور تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری (فشار گل) است. بر این اساس چگالی گل به اندازه کافی بالا در نظر گرفته می‌شود تا بتوان پایداری چاه راه حفظ و درعین حال از ایجاد شکستگی در سازند مجاور چاه (شکستگی القایی و هرز روی سیال) جلوگیری شود؛ بنابراین وزن گل حفاری (فشار گل) باید از فشار منفذی (P_p) سازند مجاور چاه و گرادیان شکست برشی (SFG) بزرگ‌تر و از گرادیان شکستگی (FG) کمتر باشد (Zhang J. , 2013). مرحله اول در تعیین پنجره ایمن وزن گل، ارزیابی توزیع تنش‌های مجاور چاه است. باید در نظر داشت که رژیم تنش‌ها در مجاورت چاه (المان سنگی در مجاورت دیواره) در اثر فرایند حفاری دچار آشفتگی و وضعیت توزیع تنش‌ها تغییر خواهد کرد. سپس با استفاده از یک معیار شکست^{۱۳} مناسب (در این پژوهش از معیار موهر – کولمب استفاده شده است) و در مقایسه با توزیع تنش‌ها در اطراف چاه و مقاومت توده



شکل ۲. نمایش موقعیت تنش‌های برجا میدان اصلی (σ_h , σ_H , σ_v) و تنش‌های برجا در مختصات محلی در مجاورت دیواره چاه مایل (τ_{xy}^0 , τ_{yx}^0 , σ_x^0 , σ_z^0 , σ_y^0) انتقال مختصات تنش برجا برای چاه مایل. (a) نمایش سه بعدی چاه مایل. (b) نمایش تنش‌های برجا در مختصات محلی برای مقطع عرضی عمود بر محور چاه مایل. (c) المان مکعبی به منظور نمایش تنش‌های برشی و نرمال در دیواره چاه. θ زاویه محور چاه با امتداد قائم، α زاویه امتداد حفاری چاه در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه (Zhang J. , 2013)

¹³Failure criterion

¹⁴ Far-field stress

۲.۱ بر آورد حد پایین گرادیان شکستگی (حد بالای

فشار گل حفاری)

$$\sigma_v = \int_{Surface}^{TVD} \rho g dz \quad ۲.$$

در این رابطه (TVD) عمق قائم واقعی، (ρ) چگالی لایه‌های بالایی، (g) شتاب گرانش و (dz) تغییرات در عمق است. همان‌طور که بیان شد به منظور ارزیابی پایداری چاه و تخمین پنجره ایمن گل حفاری دو پارامتر اصلی محاسبه می‌شود. (۱) حد پایین وزن گل حفاری (گرادیان شکست برشی) به منظور حفظ پایداری چاه و جلوگیری از وقوع شکست برشی (فرو-ریختن چاه) و (۲) حد بالای وزن گل برای جلوگیری از ایجاد شکست کششی (شکست هیدرولیکی) در چاه. در عمل گرادیان شکستگی همان حد بالای وزن گل در مقطعی مشخص از حفاری چاه است. در این حالت از وقوع شکست هیدرولیکی و در نتیجه هرز روی سیال و ناپایداری چاه جلوگیری می‌شود. حد پایین گرادیان شکستگی از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود و محتمل‌ترین گرادیان شکستگی^{۲۲} (فشار شکستگی) بر اساس رابطه ۳ بیان می‌شود ($Zhang, 2011$).

$$P_{FP} = \frac{3v}{2(1-v)} (\sigma_v - \alpha p_p) \times \alpha p_p \quad ۳.$$

که در این رابطه (P_{FP}) محتمل‌ترین فشار شکستگی است.

۲.۲ تخمین گرادیان شکست برشی (حد پایین وزن

گل حفاری)

تنش افقی کمینه یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی پایداری و تعیین پنجره گل حفاری است. گرادیان شکستگی می‌تواند بر اساس تنش افقی کمینه محاسبه شود. به‌طور معمول تنش افقی کمینه معادل با حد پایین گرادیان شکستگی است ($Zhang, 2011$) ($Zhang J. a., 2008$). تنش افقی کمینه می‌تواند به‌طور مستقیم با استفاده از روش شکست میکرو هیدرولیکی^{۱۵} ($Haimson, 2003$) تخمین زده شود و یا از طریق روش معادل میدانی آن (آزمایش برجا درون چاه) یعنی آزمایش نشست^{۱۶} (LOT) یا نشست توسعه‌یافته^{۱۷} (XLOT)، ($Zhang J. a., 2010$) به دست آید. تنش افقی کمینه بر اساس مدل کرنش تک‌محوری^{۱۸} نیز محاسبه می‌شود. در این مدل محاسبه تنش افقی کمینه بر اساس پارامترهای تنش روباره (σ_v)، فشار منفذی و نسبت پواسون به دست می‌آید ($Meng Z. a., 2011$). در حالتی که وضعیت تنش‌های برجا به‌صورت رژیم تنش گسلش نرمال^{۱۹} (NF) باشد، تنش افقی کمینه، معادل تنش اصلی بر جای کمینه^{۲۰} است و از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود

$$\sigma_h = \frac{v}{1-v} (\sigma_v - \alpha p_p) \times \alpha p_p \quad ۱.$$

در این رابطه (σ_h) تنش افقی کمینه، (v) نسبت پواسون، (p_p) فشار منفذی و (α) ثابت بایوت^{۲۱} است. (σ_v) تنش روباره است و از طریق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

¹⁵ Micro-hydraulic fracturing

¹⁶ Leak-off test (LOT)

¹⁷ Extended leak-off test (XLOT)

¹⁸ Uniaxial strain model

¹⁹ Normal faulting stress regime

²⁰ Minimum principal in-situ stress

²¹ Biot's constant

²² Most likely fracture gradient (pressure)

$$\sigma'_1 \leq UCS + q\sigma'_3 \quad ۵.$$

در این رابطه (σ'_1) و (σ'_3) به ترتیب تنش مؤثر اصلی بیشینه (σ'_θ) و کمینه (σ'_r) در دیواره چاه است. $(UCS = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi})$ مقاومت فشاری تک‌محوره^{۲۴} (در رابطه معرف مقدار UCS پارامتر C چسبندگی سنگ است) و (q) یک پارامتر وابسته به زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) است که به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود.

$$q = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad ۶.$$

با جایگزینی رابطه ۴ (مقادیر تنش‌های اصلی مؤثر که برای المان سنگی مجاور دیواره چاه ارائه شده است) در رابطه ۵، فشار گل یا همان فشار شکست برشی (p_m) به منظور جلوگیری از وقوع شکست برشی در مجاورت دیواره چاه به صورت رابطه ۷ ارائه می‌شود (این رابطه در حالتی است که ناپیوستگی در ساختار سنگ در نظر گرفته نمی‌شود).

$$p_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min} - 2(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cos 2\theta - UCS + \alpha(q-1)p_p}{q+1} \quad ۷.$$

بر اساس رابطه ۷ می‌توان فشار گل حفاری به منظور جلوگیری از فروشکست (ریزش دیواره) و وقوع شکست برشی در مجاورت چاه را به دست آورد. در واقع مقدار به دست آمده حد پایین فشار گل است (شکل ۱). همان‌طور که بیان شد به طور معمول شکست برشی در امتداد تنش افقی کمینه $(\sigma_{min} = \sigma_h)$ رخ می‌دهد (شکل ۳، a). بنابراین در $(\theta = 90)$ که معرف امتداد تنش افقی کمینه است، می‌توان حد پایین فشار گل برای حفظ پایداری چاه را به دست آورد. در $(\theta = 90)$ المان سنگی مجاور دیواره چاه بیشترین تنش مماسی مؤثر (σ'_θ) را متحمل می‌شود (Zhang J. , 2013). آنچه بیان شد بر اساس محاسبه تنش‌های مؤثر در مجاورت دیواره چاه در حالتی است ناپیوستگی در سازند مجاور چاه در

کمترین فشار گل حفاری به منظور حفظ پایداری چاه است و با عنوان فشار فروشکست چاه و یا فشار شکست برشی معرفی می‌شود. فشار شکست برشی می‌تواند به فرم گرادیان شکست برشی با تقسیم بر عمق قائم واقعی ارائه و یا به صورت وزن گل کمینه بیان شود. فشار شکست برشی (برای حالتی که نا-پیوستگی در سازند لحاظ نشود) به صورت تحلیلی و از طریق راه حل الاستیک کرش^{۲۳} محاسبه می‌شود (Peng, 2007) (Fjar, 2008). در واقع با استفاده از رابطه کرش تنش‌های اعمالی به المان سنگی مجاور دیواره چاه محاسبه می‌شود. تنش مؤثر در دیواره چاه قائم به صورت رابطه ۴ است (Zhang J. , 2013).

$$\sigma'_r = p_{mud} - \alpha p_p$$

$$\sigma'_\theta = \sigma_{max} + \sigma_{min} - p_{mud} - \alpha p_p - 2(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cos 2\theta \quad ۴.$$

$$\sigma'_z = \sigma_{axis} + \sigma_{min} - \alpha p_p - 2\nu(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cos 2\theta$$

در این رابطه (σ'_r) ، (σ'_θ) و (σ'_z) به ترتیب تنش مؤثر شعاعی، تنش مؤثر مماسی و تنش مؤثر محوری در دیواره چاه است (شکل ۲). (σ_{max}) و (σ_{min}) به ترتیب تنش بیشینه و کمینه اصلی در سطح مقطع برش عرض از چاه و (p_{mud}) فشار گل حفاری است. برای چاه قائم $(\sigma_{max} = \sigma_H)$ ، $(\sigma_{min} = \sigma_h)$ و $(\sigma_{axis} = \sigma_v)$ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت مؤلفه‌های تنش‌های مؤثر (σ'_r) ، (σ'_z) ، (σ'_θ) در رابطه ۴، تنش‌های اصلی است. بنابراین به منظور ارزیابی شکست برشی می‌توان از معیار موهر کولمب استفاده کرد (در حالتی که ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته نشود). در این صورت تنش مماسی مؤثر (σ'_θ) و تنش شعاعی مؤثر (σ'_r) به ترتیب تنش اصلی بیشینه و کمینه در نظر گرفته می‌شود (Zhang J. , 2013) (شکل ۲، b). در معیار شکست موهر کولمب فرض می‌شود که تنش‌های اصلی مؤثر قبل از وقوع شکست برشی در رابطه ۵ صدق می‌کنند (در حالت آزمایش ۳ محوره) (Ambrose, 2014).

²³ Kirsch's elastic solution

²⁴ Uniaxial compressive strength

نظر گرفته نمی‌شود. در صورت حضور صفحات سست نا-پیوستگی برآورد پنجره ایمن گل حفاری متفاوت خواهد بود. در ادامه ارزیابی پایداری چاه و تعیین وزن ایمن گل (فشار گل) در حالتی که چاه در مجاورت ناپیوستگی‌ها حفر شده است ارائه می‌شود.

۲.۳ تخمین پنجره گل حفاری در سازند دارای شکستگی

در شرایطی که وزن گل حفاری پایین است، چاه دچار شکست برشی خواهد شد و این شکست در امتداد تنش بر جای کمینه است (شکل ۳، a). این در حالی است که با حضور صفحات سست ناپیوستگی و شکستگی‌های طبیعی در سازند حفاری-شده، مکانیسم شکست چاه متفاوت است. در این حالت نه تنها شکست در امتداد تنش افقی کمینه بر جا رخ می‌دهد، بلکه در مجاورت صفحات سست ناپیوستگی و در محدوده‌ی شکستگی‌های موجود نیز وجود خواهد شد. این بدین علت است که در سازندهای دارای شکستگی مقاومت توده سنگ پایین‌تر و علاوه بر این، تمرکز تنش در صفحه مشترک بین توده سنگ مقاوم (سنگ مجاور ناپیوستگی) و صفحه سست نا-پیوستگی بیشتر است (Zhang J. a.-C., 2002). مطالعات آزمایشگاهی بر روی وضعیت تنش‌ها و اثر آن بر شکست در توده سنگ‌های دارای صفحات سست ناپیوستگی (توده سنگ ناهمسانگرد) که به صورت آزمایش فشار سه محوره و یا چند محوره ($\sigma_1 < \sigma_2 \leq \sigma_3$) انجام گرفته، نشان می‌دهد که مقاومت سنگ، به جهت اعمال تنش و وضعیت جهت‌گیری صفحات در مقایسه با امتداد تنش‌های اعمال شده وابسته است (Naumann, 2008) (Liu, 2011) (Amadei, 1996). در شکل (c، ۳) نمایش طرح‌واره منتسب به نتایج حاصل از آزمایش تجربی در بررسی نمونه سنگی با حضور صفحات سست ناپیوستگی درج شده است. در این شکل تغییرات مقاومت فشاری در مقابل تغییرات جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها در مقایسه با امتداد اعمال تنش (تنش بیشینه) نمایش

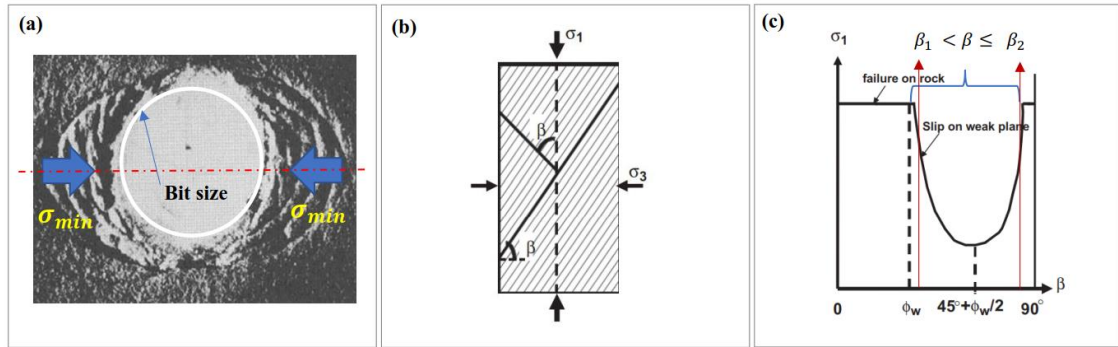
داده شده است. در شکل (۳، c) تنش اصلی نهایی (σ_1) برای شکست سنگ در مقابل تغییرات زاویه (β) نمایش داده شده است. بیشترین احتمال وقوع شکست در توده سنگ دارای شکستگی برای حالتی است که زاویه (β) نزدیک به زاویه شکست سنگ بکر (η) است ($\beta = 45 + \frac{\phi}{2}$)، (Zhang J. , 2013). تنش‌های اصلی کمینه و بیشینه در توده سنگ دارای صفحات سست ناپیوستگی به منظور ارزیابی شکست برشی (لغزش در امتداد ناپیوستگی‌ها و تخمین حد پایین وزن گل حفاری) بر اساس معیار شکست موهر کولمب و جی‌گر^{۲۵} محاسبه می‌شود (رابطه ۸) (Deangeli, 2018) (Zhang J. , 2013). رابطه (۸) معرف حالت تنش‌های اصلی مؤثر برای وقوع شکست برشی در امتداد ناپیوستگی‌ها است (Jaeger, 2007). در واقع رابطه (۵) شکست برشی در سنگ بکر و رابطه (۸) لغزش در امتداد شکستگی‌ها است.

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \frac{2(C_w + \mu_w \sigma'_3)}{(1 - \mu_w \cot \beta) \sin 2\beta} \quad \text{۸}$$

در این رابطه (β) زاویه بین (σ'_1) و بردار نرمال بر صفحه سست ناپیوستگی است (شکل ۳، b). همان‌طور که قبلاً معرفی شد، ($\sigma_{max} = \sigma_H = \sigma'_1$) و ($\sigma_{min} = \sigma_h = \sigma'_3$) به ترتیب تنش‌های اصلی مؤثر بیشینه و کمینه (برای چاه قائم موردنظر در این پژوهش) است و (β) به صورت ($90^\circ > \beta > \phi_w$) تعریف می‌شود (در ادامه نحوه تعریف این بازه بیان می‌شود). زاویه اصطکاک داخلی سطح شکستگی است. (μ_w) ضریب اصطکاک داخلی ناپیوستگی است که به صورت ($\mu_w = \tan \phi_w$) بیان می‌شود. در این رابطه (C_w) معرف چسبندگی سطح ناپیوستگی است. همان‌طور که در شکل (c، ۳) مشاهده می‌شود، در حالتی که ($\beta = 45 + \frac{\phi_w}{2}$) کمترین مقاومت برای سنگ تعریف می‌شود (Ambrose, 2014). با توجه به رابطه (۸) برای حالتی که ($\beta = 90$) و ($0 < \beta \leq \phi_w$) صفحات سست ناپیوستگی اثری بر مقاومت سنگ ندارند (شکست برشی در این حالت بر اساس رابطه ۵ ارائه می‌شود). بنابراین در محاسبات به منظور تعیین حد آستانه فشار گل

²⁵ Jaeger

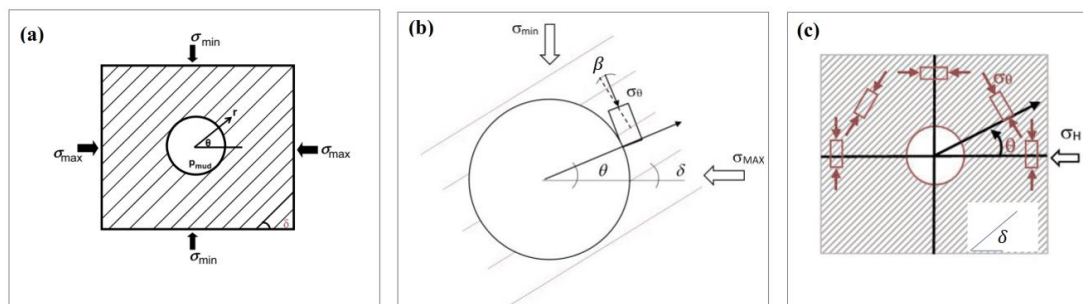
برای جلوگیری از بروز لغزش در امتداد ناپیوستگی‌ها (β) به صورت ($\phi_w < \beta < 90^\circ$) یا به طور دقیق‌تر ($\beta_1 < \beta < \beta_2$) تعریف می‌شود (شکل ۳، c) (Deangeli, 2018) (Zhang J., 2013).



شکل ۳. (a) نمایش شکست برشی در مقطع چاه در مقایسه با جهت تنش افقی کمینه. (b) و (c) نمایش طرح‌واره تغییرات مقاومت اوج سنگ در مقایسه با تغییرات (β) در آزمایش سه محوره با فشار محصورکننده ثابت (Deangeli, 2018) (Zhang J., 2013).

تنش‌های اصلی مؤثر (σ'_1 و σ'_3) در رابطه (۸)، وزن گل کمینه یا همان فشار حد پایین گل (P_w^{slip}) برای جلوگیری از وقوع شکست برشی در امتداد ناپیوستگی‌ها را به دست آورد. کمترین فشار گل برای جلوگیری از وقوع لغزش در امتداد شکستگی‌ها که با عنوان گرادیان شکست برشی در حالت حضور ناپیوستگی‌ها معرفی می‌شود بر اساس رابطه (۹) ارائه می‌شود (Zhang J., 2013).

همان‌طور که برای رابطه ۵ تنش‌های مؤثر اصلی بر اساس روابط کرش محاسبه شد، در حالتی که ناپیوستگی‌ها در سازند در نظر گرفته شود، تنش‌های اصلی مؤثر برای المان سنگی مجاور دیواره چاه (شکل ۴، c) نیز بر اساس رابطه ۴ محاسبه می‌شود. تنش‌های اصلی مؤثر (σ'_1 و σ'_3) در دیواره چاه برای هر مقطع از آن می‌تواند از طریق تانسور تنش به دست آمده برای دیواره چاه (بر اساس رابطه ۴) محاسبه شود (شکل ۴). برای مثال می‌توان در چاه قائم بر اساس رابطه (۴) تنش‌های اصلی مؤثر در دیواره را محاسبه کرد. سپس با جایگزینی



شکل ۴. (a) و (b) نمایش مقطع برش عرض از چاه و حضور ناپیوستگی‌ها در مقایسه با جهت تنش‌های افقی بیشینه و کمینه. (زاویه (δ) معرف جهت شکستگی‌ها در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه است)

$$P_w^{slip} = \frac{[\sigma_{max} + \sigma_{min} - 2(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cos 2\theta](1 - \mu_w \cot \beta) \sin 2\beta - 2C_w + 2\mu_w p_p}{2[\mu_w + (1 - \mu_w \cot \beta) \sin 2\beta]} \quad ۹$$

از طرفی مقدار (β) در محدوده مشخص $(\beta_1 < \beta < \beta_2)$ در رابطه ۹ صدق می کند. بنابراین رابطه $(\beta = |\theta - \delta|)$ می - بایست در بازه مشخص از (θ) و (δ) تعریف شود. برای مثال فرض کنید که مشخصات فشار گل در یک سازند دارای شکستگی در محدوده دیواره چاه مورد نظر است. با فرض تقارن چاه فشار حد پایین گل صرفاً برای بازه $(0 < \theta < 180)$ محاسبه می شود (نیمه بالایی دیواره چاه). در حالتی که زاویه $(\delta = 32)$ و $(\phi_w = 14.5)$ است، بر اساس رابطه $(\beta = |\theta - \delta|)$ ، برای بازه $(17.5 < \theta < 46.5)$ ، مقادیر به دست - آمده برای (β) در بازه $(\beta < 14.5)$ جای می گیرد (شکل c.۳). چون مقدار (β) در این حالت از مقدار (ϕ_w) کمتر به دست می آید در نتیجه رابطه ۹ صحیح نیست (Deangeli, 2018). مسئله بعدی در مورد رابطه ۹ اختلاف به دست آمده برای مقادیر فشار گل در $(\theta = 0)$ و $(\theta = 180)$ است. در صورت صحیح بودن پاسخ به دست آمده از این رابطه می بایست فشار گل در این دو حالت برابر باشد (به علت تقارن)، هر چند نتایج به دست آمده دارای اختلاف است. بنابراین به منظور محاسبه (P_w^{slip}) و تعریف بازه صحیح (β) رابطه ۱۰ ارائه می - شود (Deangeli, 2018).

$$P_w^{slip} = AS - B + C, \quad \beta \\ = \begin{cases} \beta = |\theta - \delta|, & 0 < \theta < \delta + 90 \\ \beta = 180 - |\theta - \delta|, & \delta + 90 < \theta < 180 \end{cases}$$

$$A = \frac{(1 - \frac{\tan \phi_w}{\tan \beta}) \sin 2\theta}{2D}$$

$$D = \left[\tan \phi_w + \left(1 - \frac{\tan \phi_w}{\tan \beta}\right) \sin 2\theta \right] \quad ۱۰$$

$$S = \sigma_{max} + \sigma_{min} - 2(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cos 2\theta$$

$$B = \frac{C_w}{D}$$

$$C = \frac{\tan \phi_w \times p_p}{D}$$

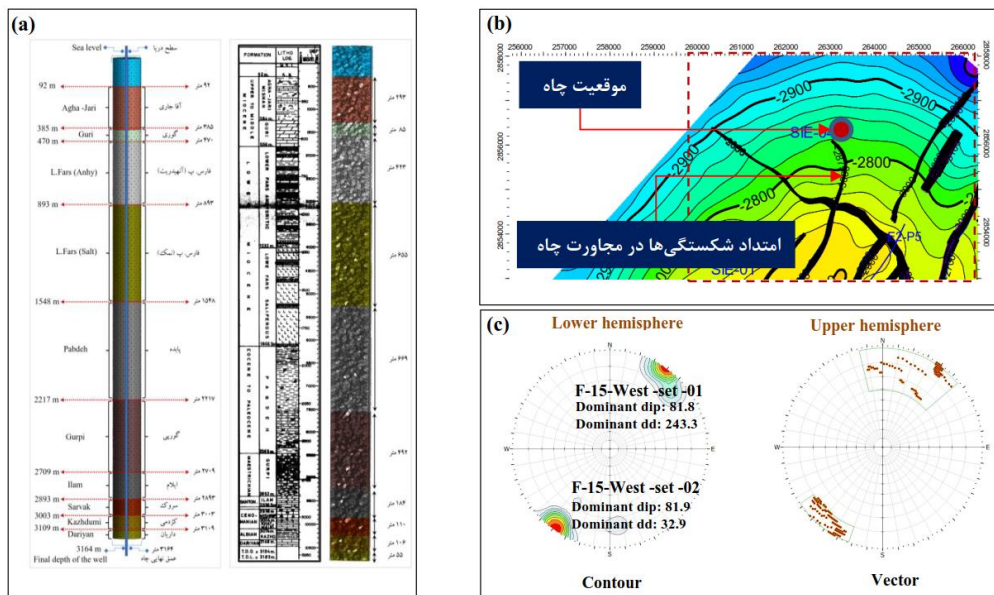
که در این رابطه (P_w^{slip}) کمترین وزن گل (فشار گل) مورد - نیاز برای جلوگیری از لغزش در امتداد ناپیوستگی ها است. (θ) زاویه تعریف شده بر اساس شکل (۴) است. برای چاه قائم $(\sigma_{max} = \sigma_H)$ و $(\sigma_{min} = \sigma_h)$ در نظر گرفته می شود. در حالتی که وضعیت جهت گیری ناپیوستگی ها به صورت $(\beta = 45 + \frac{\phi_w}{2})$ در نظر گرفته شود، بیشترین وزن گل (فشار شکست برشی، (P_w^{slip})) به منظور جلوگیری از وقوع لغزش در امتداد ناپیوستگی ها نیاز است. باید به این نکته توجه شود که حتی اگر شیب و جهت شیب ناپیوستگی ثابت در نظر گرفته شود، زاویه (β) در امتداد چاه (برای هر مقطع مشخص) متغیر بوده و وابسته به زاویه (θ) است (شکل b.۴). رابطه ۹ معرف حد پایین فشار برای حفظ پایداری چاه است. هر چند باید به این نکته توجه کرد که محاسبات ارائه شده در این راستا بر اساس بازه $(\beta_1 < \beta < \beta_2)$ معرفی شده در شکل (c.۳). از آنجایی که محاسبات برآورد حد پایین فشار گل برای جلوگیری از وقوع لغزش در امتداد شکستگی وابسته به زاویه (β) است، و این زاویه با توجه به زاویه (θ) در مجاورت چاه متغیر است، بنابراین رابطه ۹ در بازه های مشخصی تعریف می شود. در واقع در بازه مشخصی از زاویه (β) که معرف امتداد نا - پیوستگی با تنش افقی مؤثر بیشینه است (شکل b.۳)، نا - پیوستگی ها اثری بر رفتار مقاومتی سنگ نخواهند داشت (Ambrose, 2014) (Zhang J., 2013). در شکل (c.۳) در بخش هایی که نمودار تغییرات مقدار تنش اصلی بیشینه به - صورت افقی است، معرف بازه از زاویه (β) است که در آن بازه ناپیوستگی اثر بر مقاومت سنگ ندارد (Deangeli, 2018). بنابراین می بایست به منظور تعیین وزن گل، بازه مشخص (β) که رابطه ۹ در آن صدق می کند ارائه شود. در رابطه ۹ به منظور تعیین مقدار زاویه (β) بر اساس زاویه (θ) و (δ) از رابطه $(\beta = |\theta - \delta|)$ استفاده شده است (زاویه δ در شکل b.۴ ارائه شده است). همان طور که بیان شد، محدوده تعریف - شده برای (β) در رابطه ۹ بر اساس مقدار (θ) و (δ) است. و

(گرادیان لغزش در امتداد شکستگی) بر اساس رابطه (۱۰) است. در این حالت می‌توان با توجه به جهت‌گیری شکستگی-ها، تنش‌های برجا افقی کمینه و بیشینه، فشار منفذی و سایر خصوصیت‌های ژئومکانیکی سازند و شکستگی‌ها در چاه مورد-نظر، به بررسی وضعیت پایداری چاه و تعیین حد آستانه فشار گل (پنجره ایمن گل) به‌منظور جلوگیری از وقوع شکست‌های برشی (حد پایین وزن گل از حد بهینه) و شکست‌های کششی (شکست هیدرولیکی) در اثر بالا بودن وزن (فشار گل) پرداخت. با توجه به قائم بودن چاه، محاسبات ارائه‌شده در رابطه (۴) و (۱۰) با فرض $(\sigma_{max} = \sigma_H)$ و $(\sigma_{min} = \sigma_h)$ جایگزین می‌شوند. سیستم ناپیوستگی‌ها در منطقه موردنظر بر اساس نقشه‌های ساختاری (شکل ۵) در امتداد چاه تعیین شده است. بر اساس پردازش استریو گرام و تعیین شیب و جهت شیب غالب، مشخصات اصلی ناپیوستگی‌ها در جدول ۲ ارائه‌شده است (شکل ۶). با توجه به گزارش‌های حفاری (ناپایداری و هرز روی سیال بر اثر حضور ناپیوستگی‌ها) در چاه موردنظر، لایه ایلام به‌منظور بررسی و ارزیابی وضعیت پایداری چاه انتخاب شده است. مشخصات ژئومکانیکی سازند موردنظر (ایلام) در جدول ۱ درج شده است.

محاسبه زاویه (β) به‌منظور ترسیم نمودارهای فشار گل بر اساس رابطه ۱۰ در بازه $(0 < \theta < \delta + 90)$ بر اساس $(\beta = |\theta - \delta|)$ و در بازه $(\delta + 90 < \theta < 180)$ بر اساس $(\beta = 180 - |\theta - \delta|)$ به دست خواهد آمد. قابل ذکر است که نمودار حاصل ناپیوسته است.

۳. ارزیابی پایداری و تعیین بازه فشار گل حفاری برای چاه قائم در میدان نفتی موردنظر

به‌منظور بررسی پایداری و تعیین حد ایمن برای فشار گل حفاری در سازند دارای شکستگی، یک چاه در یکی از میدان-های نفتی خلیج فارس انتخاب شده است. عمق کل حفاری معادل ۳۱۶۴ متر است. برای چاه موردنظر ۹ سازند با مشخصات لایه‌بندی و شکستگی‌ها مندرج در شکل ۵ ارائه-شده است. همان‌طور که بیان شد به‌منظور تعیین پنجره ایمن وزن گل حفاری (فشار گل حفاری) دو بخش اصلی یعنی: ۱- گرادیان شکستگی و ۲- گرادیان شکست برشی بررسی می-شود. بر اساس آنچه در بخش قبل ارائه شد، در حالت حضور ناپیوستگی محاسبات در راستای تعیین گرادیان شکستگی



شکل ۵. (a) مشخصات لایه‌بندی در چاه موردنظر (b) نمایش موقعیت چاه و سیستم شکستگی‌ها منطقه. (c) داده‌های پردازش-شده در استریو گرام برای شکستگی‌های مؤثر در محل حفاری چاه.

جدول ۱. مشخصات ژئومکانیکی سازند مورد مطالعه (بر اساس گزارش آزمایش‌های برجا شرکت نفت فلات قاره ایران)

Density	Porosity	Friction	Shear M.	Poisson ratio	Young M.	Bulk M.	پارامتر	سازند
g/cm ³	m ³ /m ³	Deg	GPa		GPa	GPa	واحد	ایلام
2/64	0/06	37/57	15/58	0/33	10/62	10/70		
Cohesion	UCS		Mud Pressure (P _m)	Pore Pressure (P _p)	σ _v	σ _h	σ _H	پارامتر
MPa	MPa		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	واحد
29/70	124/98		40/55	14/28	71/46	42/49	45/04	ایلام

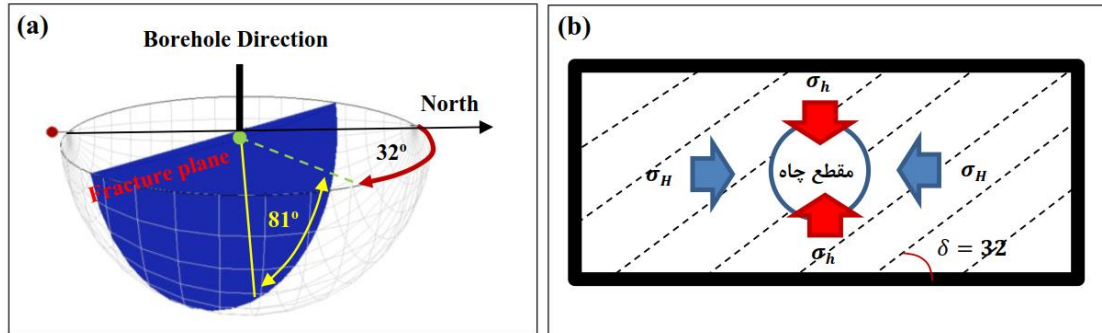
جدول ۲. مشخصه شکستگی‌های منطقه (بر اساس گزارش آزمایش‌های برجا شرکت نفت فلات قاره ایران)

Residual aperture	Internal friction angle (φ _w)	Inclination (δ)	Cohesion (C _w)	Normal stiffness	Zero normal stress aperture	Shear stiffness
m	Deg	deg	MPa	GPa	M	GPa
0/000125	14/5	32	1/37	9	0/00025	6

برای چاه مورد نظر زاویه ($\delta = 32$) تعیین شده است. بر همین اساس مقادیر (β) برای معادله ۱۰ ارائه می‌شود (بازه‌های تعریف شده برای θ در رابطه ۱۰ بیان شده است). از آنجایی که زاویه (β) در محدوده دیواره چاه متغیر است، مقادیر به دست آمده برای حد پایین فشار گل نیز در محدوده دیواره (متناسب با تغییرات θ) متغیر است (شکل ۷). در واقع در بازه‌های مشخصی از زاویه (θ)، جهت‌گیری شکستگی‌ها در مقایسه با تنش‌های مماسی (ارائه شده در رابطه ۴) به گونه‌ای است که تأثیری در مقاومت نهایی سنگ نخواهد داشت (شکل ۴، c) (Zhang J. , 2013) (Ambrose, 2014) (Deangeli, 2018). در این بازه‌های مشخص مقادیر به دست آمده برای حد پایین فشار گل بر اساس رابطه ۷ است.

۳.۱ تخمین حد پایین وزن گل حفاری بر اساس روابط تحلیلی

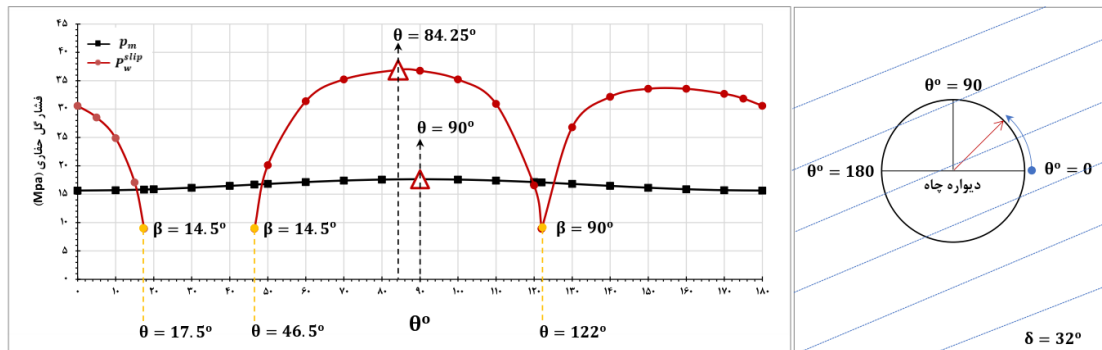
همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، برای چاه حفر شده در سازند بدون شکستگی، بازه ایمن گل (حد پایین فشار گل حفاری) به منظور جلوگیری از وقوع شکست برشی بر اساس رابطه ۷ به دست می‌آید (شکل ۷). هر چند در حالتی که صفحات سست ناپیوستگی در مجاورت چاه در نظر گرفته شود، تعیین پنجره ایمن گل بر اساس رابطه ۱۰ انجام می‌شود. در شکل ۶ مشخصات جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها در مقایسه با امتداد تنش‌های برجای افقی کمینه و بیشینه درج شده است.



شکل ۶. (a) و (b) نمایش مقطع برش عرض از چاه و حضور ناپیوستگی‌ها در مقایسه با جهت تنش‌های افقی بیشینه و کمینه. (زاویه δ) معرف جهت شکستگی‌ها در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه است)

که $\beta = 45 + \frac{\phi_w}{2}$ است. در حالتی که $\beta = 45 + \frac{\phi_w}{2}$ (که $\beta = 45 + \frac{\phi_w}{2}$) همان سنگی مجاور دیواره چاه کمترین حد مقاومت را از خود نشان می‌دهد (شکل ۴، c). بنابراین به منظور جلوگیری از وقوع لغزش در امتداد شکستگی‌ها، فشار گل حفاری بالاتری نیاز است. باید ذکر شود که ساختار سنگی در سازند ایلام دارای مقاومت فشاری تک‌محوری بالایی (124.98 MPa) است. به همین دلیل فشار گل موردنیاز در حالتی که شکستگی‌ها اثری در مقاومت سنگ نداشته باشد ($\theta \leq 17.5$ ، $\theta \leq 46.5$ ، پایین است و بر اساس رابطه ۷ محاسبه می‌شود (شکل ۷).

در شکل ۷ مقادیر محاسبه شده برای فشار گل حفاری به منظور جلوگیری از شکست برشی (p_m) و لغزش در امتداد شکستگی (P_w^{slip}) درج شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، در حالتی که شکستگی‌ها در مجاورت چاه در نظر گرفته نشود، بیشترین فشار گل (p_m) به منظور جلوگیری از فروشکست چاه و وقوع شکست برشی در امتداد تنش افقی کمینه ($\theta = 90$) است. این در حالی است که با در نظر گرفتن حضور شکستگی‌ها در مجاورت چاه، شرایط شکست (لغزش) متفاوت است. در این حالت بیشترین فشار گل حفاری به منظور جلوگیری از وقوع لغزش در امتداد شکستگی‌ها وقتی رخ خواهد



نمودار ۷. در این نمودار (P_w^{slip}) و (p_m) به ترتیب معرف مقادیر فشار گل موردنیاز برای جلوگیری از لغزش در امتداد شکستگی‌ها و شکست برشی (توده سنگ) است. از آنجایی که در بازه‌های مشخصی از (θ) شکستگی‌ها اثری بر مقاومت نهایی سنگ ندارند، نمودار حاصل ناپیوسته است. در بازه ($17.5 \leq \theta \leq 46.5$) نمودار ناپیوسته است چراکه در این بازه مقادیر به دست آمده برای (β) کمتر از (ϕ_w) است.

برای بازه‌های مشخصی از فشار گل (وزن گل) می‌توان پایداری نسبی چاه را حفظ نمود. هرچند بالا بردن وزن گل می‌تواند منجر به افزایش احتمال هرز روی سیال حفاری در سازند شکسته مجاور چاه شود. بنابراین تعیین حد پایین وزن گل اهمیت زیادی خواهد داشت. در شرایطی که اثر شکستگی در مکانیسم‌های برش و لغزش برای چاه در نظر گرفته نشود، حد پایین فشار گل کمتر خواهد بود. در این حالت فشار بهینه گل برای حفظ پایداری چاه بر اساس خصوصیات یک توده سنگ بدون شکستگی به دست خواهد آمد. بنابراین مقاومت سنگ در این حالت بالاتر فرض خواهد شد که در نتیجه آن شکست برشی در چاه کمتر رخ خواهد داد. برای چاه موردنظر بر اساس خصوصیات سازند ایلام و فشار منفذی در مقطع حفاری، در حالتی که فرض شود هیچ‌گونه ناپیوستگی در محل حفاری وجود ندارد، حد پایین فشار گل حفاری برابر با $(p_m = 17.64 \text{ MPa})$ به دست می‌آید. این مقدار به‌دست‌آمده نشان‌دهنده یک اختلاف زیاد بین فشار گل در حالت حضور شکستگی و عدم حضور شکستگی برای حفظ پایداری چاه است.

۳.۲ ارزیابی پایداری چاه به روش عددی (المان مجزا)

به‌منظور بررسی نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل شکست و تعیین حد بهینه وزن گل حفاری، مدل‌سازی عددی به روش المان مجزا برای چاه موردنظر انجام گرفته است. بهره‌وری از روش المان مجزا این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان اثر حضور شکستگی‌ها در رفتار نهایی چاه به‌خوبی در نظر گرفته شود. در واقع در این روش صفحات ناپیوستگی باقابلیت جریان سیال در درون آن‌ها و شبیه‌سازی مکانیسم‌های هیدرو مکانیکی به‌خوبی پیاده‌سازی می‌شود. خصوصیات ژئومکانیکی سازندهای منطقه و مشخصات شکستگی‌ها در جدول (۱ و ۲) درج شده است. این داده‌ها بر اساس آزمایش‌های برجا برای چاه مورد-نظر تهیه شده است. هندسه مدل به‌صورت یک بلوک مکعبی

در واقع بیشتر فشار گل به‌منظور حفظ پایداری چاه و جلوگیری از فروشکست (شکست برشی - لغزش در امتداد شکستگی‌ها) چاه در حالتی که ناپیوستگی‌ها لحاظ شود، در جهت تنش افقی کمینه رخ نخواهد داد (در شرایطی که وزن گل حفاری پایین است، چاه دچار شکست برشی خواهد شد و این شکست در امتداد تنش بر جای کمینه است) (شکل ۳، a). برای چاه موردنظر و با توجه به جهت‌گیری شکستگی‌ها در محل حفر چاه، بیشترین فشار گل موردنیاز برای جلوگیری از لغزش در امتداد شکستگی‌ها در زاویه $(\theta = 84.25)$ رخ می‌دهد (شکل ۷). در این حالت $(\beta = 45 + \frac{\phi_w}{2})$ است. همان‌طور که بیان شد فشار گل حفاری در محدوده دیواره چاه متغیر است. این مسئله به علت وابستگی زاویه (β) به مقادیر (θ) و (δ) است. بنابراین در محدوده دیواره چاه در حضور ناپیوستگی‌ها، نقاط اوج متفاوتی برای فشار گل تعیین می‌شود. در واقع برای المان‌های سنگی در محدوده دیواره چاه در هر زاویه مشخص از (θ) نحوه اثرگذاری صفحات سست ناپیوستگی بر مقاومت آن المان سنگی متفاوت است. بر اساس گزارش‌های حفاری برای چاه موردنظر (شرکت نفت فلات قاره ایران) برای چاه مذکور در مقطع منتسب به لایه ایلام، فشار گل در حین حفاری (40.55 MPa) تعیین شده است. با توجه به مقادیر محاسبه‌شده در روش تحلیلی (شکل ۷)، مقدار فشار گل حفاری بر اساس مشخصات ناپیوستگی‌ها و خصوصیات ژئومکانیکی این سازند (36.92 MPa) به‌دست‌آمده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، حد بالای فشار گل به‌منظور جلوگیری از وقوع شکست کششی (شکست هیدرولیکی) که با عنوان گرادیان شکستگی معرفی می‌شود، برابر با مقدار تنش افقی کمینه (P_{FP}) است (رابطه ۳). برای سازند ایلام این مقدار برابر با (42.49 MPa) تعیین شده است. بر اساس آنچه بیان شد در حالتی که شکستگی‌ها در امتداد چاه در نظر گرفته شود، وضعیت شکست‌ها و لغزش‌ها متفاوت خواهد بود. در نتیجه تعیین پنجره ایمن گل حفاری نیز بر اساس روابط تحلیلی ارائه‌شده قابل محاسبه است. اختلاف به-دست‌آمده در فشار گل (آنچه در عمل حین حفاری به‌کاررفته و آنچه بر اساس روابط محاسبه‌شده است) نشان می‌دهد که

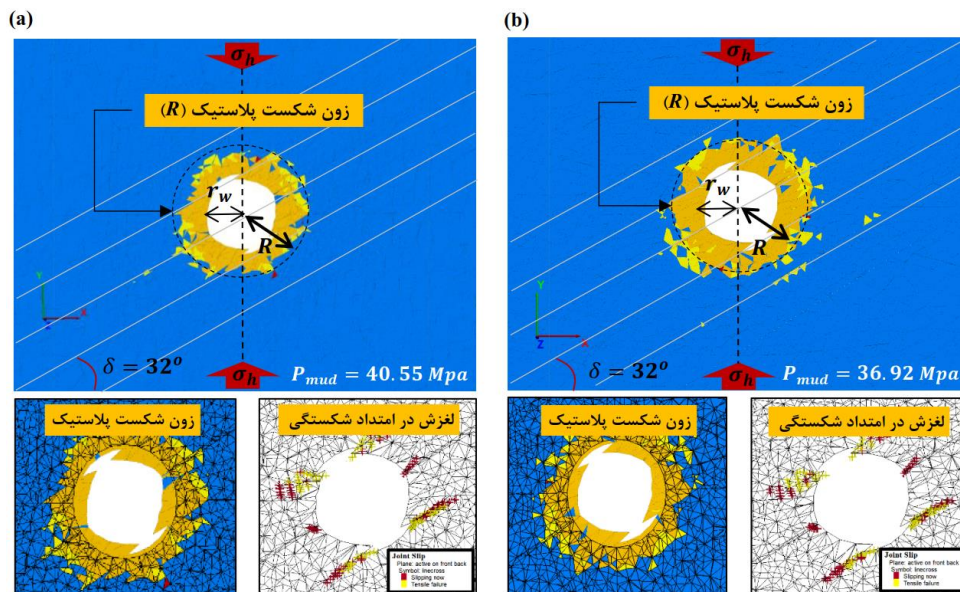
که بیان شد دیواره چاه‌ها ممکن است در اثر تجاوز تنش‌های القایی از حد آستانه مقاومت کششی یا برشی توده سنگ‌های دارای شکستگی، دچار فروشکست و ناپایداری شوند. مکانیسم‌های پاسخ چاه در حین حفاری به شرایط پیچیده زمین‌شناسی، تنش‌های برجای میان دور و ناحیه‌ای و ... بستگی دارد. بنابراین تعیین یک آستانه مشخصی از جابه‌جایی برای یک شرایط خاص عملاً غیرممکن است. هرچند بر اساس فرضیات پذیرفته‌شده‌ای، بعضی از آشفته‌گی‌های ایجادشده در اثر حفاری در سازندهای دارای شکستگی، مشترک در نظر گرفته می‌شود. بر همین اساس، تغییر شکل‌های کلی در اندازه چاه برای بازه ۱۰٪ به‌عنوان حد آستانه پایداری چاه در نظر گرفته می‌شود. این معیار به‌صورت رابطه (۱۱) بیان می‌شود (Karatela, 2016).

$$\text{Relative displacement (\%)} = \frac{\text{Maximum displacement}}{\text{Borehole diameter}} \times 100 \quad (11)$$

بیشترین جابه‌جایی‌ها در محدوده دیواره چاه تعیین و بر اساس رابطه بالا با تقسیم بر قطر اولیه چاه، نرمال می‌شوند. معیار بعدی برای تعیین حد آستانه پایداری چاه معیار زون شکست پلاستیک است. بر این اساس، گسترش زون تسلیم در محدوده اطراف دیواره چاه که بر اثر تنش‌های القایی ایجادشده است، با استفاده از شعاع زون تسلیم نرمال شده، اندازه‌گیری می‌شود (Karatela, 2016). شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده در واقع حاصل تقسیم شعاع زون تسلیم (R) به شعاع اولیه چاه (r_w) است. در یک شرایط حفاری متداول، بازه ۱٫۴ تا ۱٫۵ برای نسبت ($\frac{R}{r_w}$)، به‌عنوان آستانه پایداری چاه در نظر گرفته می‌شود. شعاع زون تسلیم نرمال شده به‌عنوان معیاری برای اعتبار سنجی مدل نیز به کار گرفته می‌شود (Taheri, 2018). در شکل ۸ مقطع برشی افقی از مرکز چاه در شرایط حضور شکستگی‌ها را نمایش می‌دهد.

(۲×۲×۳) و یک چاه استوانه‌ای به قطر ۲۰ سانتی‌متر در مرکز مدل ایجادشده است. به‌منظور بررسی رفتار غالب چاه، ۸ نقطه پایش در محدوده دیواره چاه تعیین شده است. کف مدل به‌طور ثابت در نظر گرفته شده است. بر اساس داده‌های ژئومکانیکی موجود در منطقه گرادیان تنش قائم به‌صورت 25 MPa/Km تعیین شد. وزن روباره به‌صورت تنش قائم (σ_p) ثابت بر اساس رابطه (۲) به مدل اعمال گردید. شکستگی‌ها بر اساس مشخصات شیب و جهت شیب به‌صورت مجموعه ناپیوستگی-های موازی در امتداد چاه برای مدل تعریف شده است. در این بخش از مطالعه ۴ حالت متفاوت برای مدل عددی بررسی شده است. ابتدا مدل بر اساس مشخصات ژئومکانیکی محل حفاری تنظیم و سپس منطبق بر فشار گل عملیاتی (40.55 MPa)، وضعیت چاه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور میانگین شعاع زون شکست پلاستیک نرمال شده^۶، لغزش در امتداد ناپیوستگی‌ها، شکست کششی و بیشترین جابه‌جایی مجاز دیواره چاه به‌عنوان پارامترهای معرف وضعیت رفتاری چاه بررسی شده است. در ادامه فشار گل (36.92 MPa) که بر اساس روابط تحلیلی محاسبه شده است برای مدل پیاده-سازی شد. از آنجایی که نسبت تنش‌های برجا برای محل حفاری ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.06$) است، به‌منظور بررسی واضح‌تر از نحوه وقوع شکست و لغزش در امتداد شکستگی‌ها در حالتی که نسبت‌های تنش‌های برجا بالا باشد، علاوه بر حالت واقعی برای این نسبت، نسبت فرضی ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.65$) نیز در بررسی نهایی لحاظ شده است. همان‌طور که بیان شد در شرایط که شکستگی‌ها در امتداد چاه در نظر گرفته نشود، حد پایین فشار گل حفاری موردنیاز برای حفظ پایداری چاه در مقایسه باحالتی که ناپیوستگی‌ها لحاظ شود، کمتر خواهد بود. برای چاه موردنظر در حالتی که ناپیوستگی‌ها در نظر گرفته نشود، فشار گل ($p_m = 17.64 \text{ Mpa}$) تعیین شده است. به‌منظور بررسی مکانیسم رفتاری چاه در این حالت، مدل عددی ارائه شده برای این مقدار از فشار گل نیز تنظیم شده است. نرخ تزریق سیال در مدل‌سازی معادل با ۲۵ بشکه بر ساعت تعیین شده است. چگالی گل نیز (1.47 SG) است. همان‌طور

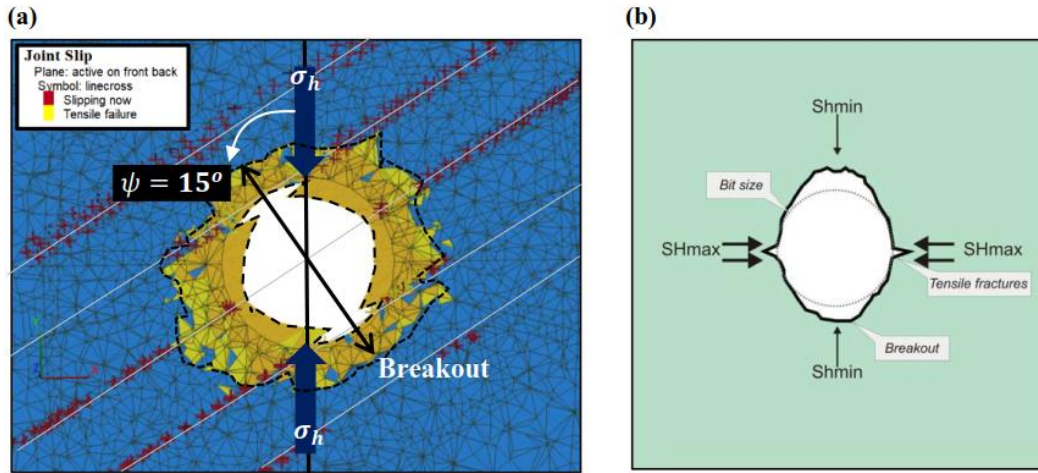
26 Normalized yield zone radius



شکل ۸. (a) نمایش مقطع برش افقی از مرکز چاه و زون های شکست پلاستیک برای فشار گل (۴۰/۵۵) و (b) برای فشار گل (۳۶/۹۲) مگا پاسکال. در دو فشار گل تعیین شده، وضعیت چاه تقریباً مشابه به دست آمده است.

مقادیر به دست آمده برای دو فشار گل حفاری متفاوت نشان دهنده پاسخ مناسب روابط تحلیلی به منظور تعیین حد پایین وزن گل حفاری است. همان طور که بیان شد در حالت حضور شکستگی ها، وضعیت شکست در دیواره در راستای تنش افقی کمینه نخواهد بود. همچنین شکست ها در مجاورت شکستگی ها رخ خواهد داد (شکل ۹). به منظور بررسی امتداد شکست ها و مقایسه وضعیت برش در امتداد شکستگی ها، مدل بر اساس نسبت تنش $\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.65$ تنظیم و امتداد جابه جایی ها در مقایسه با تنش افقی کمینه بررسی شده است (شکل ۹، a). همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود با افزایش نسبت تنش های افقی بیشینه به کمینه، گسترش لغزش ها در امتداد شکستگی ها بیشتر خواهد بود. در این حالت شکست برشی در دیواره در جهت تنش افقی کمینه نبوده و با زاویه (ψ) در شکل ۹ نمایش داده شده است.

در این شکل برای دو حالت متفاوت فشار گل حفاری، گسترش شعاع زون شکست پلاستیک، لغزش های برشی و شکست های کششی در امتداد ناپیوستگی ها نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با فرض مشخصات واقعی برای فشار گل (آنچه در عملیات حفاری شرکت نفت فلات قاره مورد استفاده قرار گرفته است) و مقایسه نتایج با فشار گل (36.92 MPa) که از طریق روابط تحلیلی ارائه شده است، تفاوت چندانی در شرایط مجاور دیواره چاه مشاهده نمی شود. در حالتی که فشار گل حفاری (40.55 MPa) است، گسترش شعاع زون شکست پلاستیک $\left(\frac{R}{r_w} = 1.42\right)$ به دست آمده است. بر اساس حد مجاز ۱/۵ برای این نسبت، دیواره چاه در این حالت از پایداری نسبی برخوردار است. همچنین بیشترین جابه جایی نسبی مجاز دیواره (۰/۶) به دست آمده است که بر اساس حد ۱۰٪ مجاز، چاه پایدار است. برای حالتی که فشار گل حفاری (36.92 MPa) در نظر گرفته شود، میانگین شعاع زون شکست پلاستیک و بیشترین جابه جایی نسبی به ترتیب $\left(\frac{R}{r_w} = 1.44\right)$ و (۰/۸) تعیین شده است. اختلاف پایین بین



شکل ۹. نمایش گسترش زون شکست پلاستیک در مجاورت دیواره برای نسبت تنش‌های برجای $(\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.65)$. (a) شکست برشی در امتداد تنش افقی کمینه نبوده و لغزش‌های برشی در امتداد شکستگی‌ها گسترش بیشتری خواهند داشت. (b) نمایش وضعیت شکست برشی در چاه در شرایطی که صفحات سست ناپیوستگی در مجاور چاه حضور ندارند.

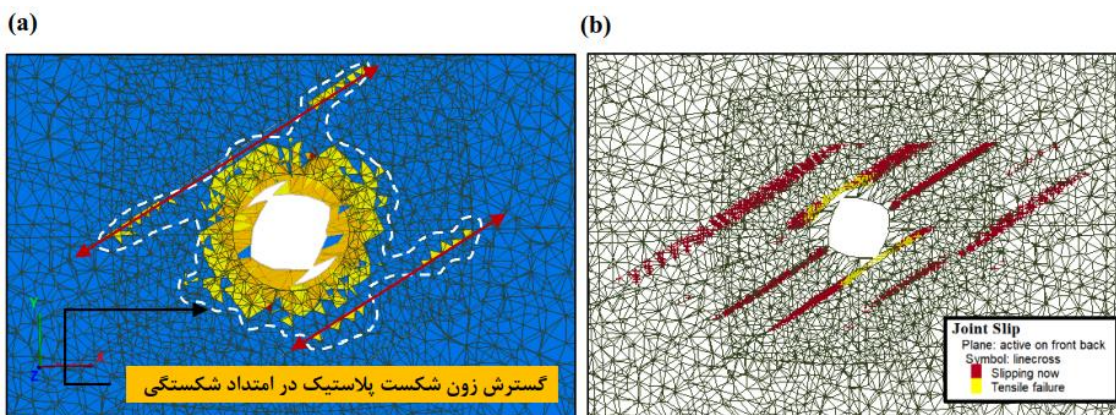
مؤثر بر سطح ناپیوستگی خواهد شد. در این حالت شکست-های کششی در اثر تزریق سیال به وجود می‌آید. در امتداد دورتر از دیواره، لغزش در امتداد ناپیوستگی‌ها ایجاد خواهد شد. این مسئله منتج از وقوع یک فرآیند هیدرو مکانیکی است که اثر تزریق سیال به درون چاه رخ می‌دهد. در یک فرآیند هیدرو مکانیکی شبیه‌سازی شده با استفاده از روش المان مجزا این امکان وجود دارد که بر اساس تغییر شکل‌های مکانیکی، نفوذپذیری هیدرولیکی^{۲۷} در مدل بررسی شود. بررسی یک مدل هیدرو مکانیکی با فرآیندهای توأمان مبتنی بر موارد زیر است (Itasca, 2016):

۱. بررسی اثر فشار منفذی بر تغییر شکل‌ها و مقاومت توده سنگ دارای شکستگی.
۲. بررسی اثر تغییر شکل‌های مکانیکی بر نفوذپذیری توده سنگ و فشار منفذی سازند. باید در نظر داشت که بررسی نفوذپذیری سازند در روش المان مجزا بر اساس تغییرات در بازشدگی شکستگی‌ها^{۲۸} است (Itasca, 2016).

از آنجایی که فشار گل محاسبه شده در حالت عدم حضور شکستگی‌ها کمتر از فشار مورد نیاز برای جلوگیری از لغزش در امتداد ناپیوستگی‌ها است، مدل عددی بر اساس فشار گل $(p_m = 17.64 \text{ MPa})$ که با توجه به رابطه (۷) به دست آمده است، تنظیم می‌شود. در این حالت جابه‌جایی‌های دیواره بیشتر و بر اساس معیار بیشترین جابه‌جایی مجاز، چاه در یک وضعیت ناپایدار است. در شکل ۱۰ مقطع برشی افقی از مرکز چاه نمایش داده شده است. بیشترین جابه‌جایی نسبی مجاز در این حالت (۰.۱۴) به دست آمده است. زون شکست پلاستیک نیز در این حالت گسترش بیشتری داشته و در مجاورت نا-پیوستگی‌ها نیز رخ خواهد داد. همان‌طور که در شکل ۱۰ ارائه شده است، شکست‌های کششی در مجاورت دیواره چاه مشاهده می‌شود. شکست‌های کششی در حدفاصل نزدیک به دیواره (در مجاورت محل تزریق سیال و نفوذ آن به درون شکستگی‌ها) رخ خواهد داد. در این حالت سیال در بازشدگی بین ناپیوستگی‌ها حضور دارد و منجر به کاهش تنش فشاری

²⁷ Hydraulic conductivity

²⁸ Opening of the fractures



شکل ۱۰. (a) نمایش زون شکست پلاستیک در شرایطی که فشار گل حفاری بر اساس رابطه ۷ محاسبه شده است (در این حالت حضور شکستگی‌ها لحاظ نشده و فشار گل پایین در نظر گرفته شده است). (b) گسترش لغزش‌ها و شکست‌های کششی در امتداد شکستگی‌ها.

مدل موهر - کولمب لغزشی^{۳۱} (رابطه ۱۳) پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در رابطه (۱۳) بیان شده است، شکست-های برشی (تغییر شکل‌های لغزشی) در شکستگی‌ها بر اساس تنش نرمال مؤثر (σ'_n)، چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک (φ) کنترل می‌شود. در این فرآیند با تغییر تنش نرمال (σ_n) در اثر جریان سیال در سازند (که منجر به تغییر فشار سیال (p) می‌شود)، تنش نرمال مؤثر (σ'_n) تغییر کرده و منجر به شکست برشی در ناپیوستگی‌ها می‌شود (Itasca, 2016).

$$\tau_s \leq C + \sigma'_n \tan \varphi, \quad \sigma'_n = \sigma_n - p \quad (13)$$

که در آن (τ_s) تنش برشی است. بر اساس آنچه بیان شد، در تحلیل پایداری چاه و تعیین مشخصات گل حفاری (وزن گل)، بررسی اثر شکستگی‌ها در وقوع شکست و لغزش در سازند مجاور چاه ضروری است.

معادله حاکم بر جریان سیال در شکستگی‌ها بر اساس فرم ساده‌شده معادله ناوریر - استوک^{۲۹} در نظر گرفته شده است. در حالتی که معادله ناوریر - استوک برای جریان سیال بین دو صفحه تقریباً موازی، نفوذناپذیر و فرض سیال غیر تراکم پذیر در نظر گرفته شود، به‌صورت رابطه (۱۲) بیان می‌شود. در این حالت به فرم ساده‌شده معادله ناوریر - استوک، معادله رینولدز^{۳۰} گفته می‌شود (Itasca, 2016).

$$\left(\frac{u^3 \rho g}{12\mu} \right) \varphi, \quad i = 0 \quad (12)$$

که در آن ($u = x_i$) معرف فاصله بین مرزهای نفوذناپذیر شکستگی‌ها در نقطه ($x_i (i = 1, 2)$) از صفحه (صفحه) متناسب به مرزهای ناپیوستگی، ($\varphi = z + \frac{p}{\rho g}$) هد هیدرولیکی، (g) شتاب گرانش، (ρ) چگالی سیال حفاری، (μ) گراندروی سیال و (p) فشار سیال است. در این مطالعه به‌منظور بررسی فرآیندهای هیدرو مکانیکی توأمان در حضور شکستگی‌ها، تغییر شکل‌های مکانیکی بلوک بر اساس مدل رفتاری موهر - کولمب و رفتار برشی شکستگی‌ها بر اساس

²⁹ Navier-Stokes

³⁰ Reynolds

³¹ Mohr Coulomb slip model

۴. نتیجه

نخواهد داشت. این مسئله صحت نتایج حاصل از روابط تحلیلی را تأیید می‌کند.

۷. مدل‌سازی عددی نشان داد در حالتی که فشار گل بر اساس خصوصیات توده سنگی بدون حضور شکستگی به دست آید ($p_m = 17.64 \text{ MPa}$) شکست برشی و لغزش (فروشکست چاه) در دیواره چاه رخ می‌دهد. در واقع در حضور شکستگی‌ها ابتدا لغزش در امتداد ناپیوستگی رخ می‌دهد. بنابراین در مرحله اول می‌بایست فشار گل به گونه‌ای تعیین شود که از لغزش در امتداد شکستگی‌ها جلوگیری شود.

۸. تعیین پنجره‌ی ایمن وزن گل برای حفاری چاه در سازند دارای شکستگی، دشوار و نیازمند بررسی دقیق نحوه جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها با امتداد تنش افقی بیشینه است. معیار متداول در تعیین فشار گل در صورتی که اثر شکستگی‌ها لحاظ نشود، کارایی نداشته و حد پایین وزن گل به درستی تعیین نخواهد شد. عامل اصلی تفاوت در مکانیسم‌های رفتاری چاه در سازند دارای شکستگی، وقوع لغزش در امتداد صفحات است. در این حالت جابه‌جایی برشی در امتداد چاه تشدید خواهد شد؛ بنابراین کلیه عوامل مؤثر در تشدید این لغزش‌ها می‌تواند به‌عنوان پارامتر مخرب در وضعیت نهایی چاه لحاظ شود. برای مثال در شرایطی که نسبت تنش‌های برجا افقی بالا باشد، این لغزش‌ها در امتداد شکستگی‌ها تشدید خواهد شد. نتایج حاصل از بررسی مدل عددی ارائه‌شده در این پژوهش نیز گواه بر این مسئله است. در حالتی که نسبت تنش‌های برجا افقی ($\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 1.65$) فرض شود، گسترش لغزش‌ها و شکست‌های کششی در امتداد نا-پیوستگی بیشتر است.

نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱. حضور شکستگی‌ها در سازند حفاری شده منجر به کاهش مقاومت نهایی توده سنگ شده و تعیین پنجره ایمن گل حفاری در این شرایط نیازمند بررسی اثر حضور شکستگی‌ها در رفتار نهایی لغزشی و برشی سنگ است.
۲. نحوه اثرگذاری شکستگی‌ها بر رفتار نهایی توده سنگ مجاور چاه وابسته به جهت‌گیری شکستگی در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه است.
۳. نمودار حاصل از معیار موهر کولمب - جی‌گر در تعیین فشار بهینه گل، ناپیوسته است. این مسئله بدین علت است که در بازه‌های مشخصی از (β) که معرف جهت-گیری شکستگی در مقایسه با امتداد تنش افقی بیشینه است، ناپیوستگی‌ها اثر در مقاومت نهایی سازند نخواهند داشت.
۴. برای چاه موردنظر فشار عملیاتی گل حفاری (40.55 MPa) است. بر اساس نتایج حاصل از معیار ارائه‌شده این فشار پایین‌تر و برابر با (36.92 MPa) به‌دست‌آمده است.
۵. در بازه ($17.5 < \theta < 46.5$) در مجاورت چاه (المان های سنگی در محدوده دیواره چاه) فشار گل بدون لحاظ اثر حضور شکستگی‌ها به‌دست‌آمده است. در این بازه مقدار ($\beta < 14.5$) است که از مقدار (ϕ_w) کمتر است. در این بازه، حضور شکستگی اثری در مقاومت نهایی توده سنگ نخواهد داشت.
۶. مدل‌سازی عددی نشان داد که برای دو حالت فشار گل محاسبه‌شده تفاوت چندانی در وضعیت کلی چاه وجود

۵. مراجع

- Abdideh, M. a. (2013). Estimating the reservoir permeability and fracture density using petrophysical logs in Marun oil field (SW Iran). *Petroleum Science and Technology*, 1048-1056.
- Almagro, S. P. (2014). Sealing fractures: Advances in lost circulation control treatments. *Oilfield Review*, 4-13. Retrieved from Schlumberger.
- Amadei, B. (1996). Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 293-325.

- Ambrose, J. (2014). Failure of anisotropic shales under triaxial stress conditions. Imperial College London.
- Baecher, G. B. (1983). Statistical analysis of rock mass fracturing. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 329-348.
- Bour, O. a. (2002). A statistical scaling model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of a joint network (Hornelen Basin, Norway). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, ETG-4.
- Cao, N. a. (2019). Stress-Dependent Permeability of Fractures in Tight Reservoirs. *Energies*, 117.
- Cappa, F. a.F. (2006). Hydromechanical modelling of pulse tests that measure fluid pressure and fracture normal displacement at the Coaraze Laboratory site, France. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1062-1082.
- Deangeli, C. a. (2018). Prediction of Mud Pressures for the Stability of Wellbores Drilled in Transversely Isotropic Rocks. *Energies*, 1944.
- Fjar, E. a. (2008). *Petroleum related rock mechanics*. Elsevier.
- Haimson, B. a. (2003). ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1011-1020.
- Halliburton. (2018). Retrieved from Halliburton: <https://www.halliburton.com/en-US/default.html>
- Han, G. a. (2003). Description of fluid flow around a wellbore with stress-dependent porosity and permeability. *Journal of Petroleum science and engineering*, 1-16.
- Hart, R. (2003). Enhancing rock stress understanding through numerical analysis. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 1089-1097.
- Itasca. (2016). 3DEC User Manual Version 5.2. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Jaeger, J. a. (2007). Fundamentals of rock mechanics, 4th edn Blackwell. *Maiden, MA*.
- Karatela, E. a. (2016). Study on effect of in-situ stress ratio and discontinuities orientation on borehole stability in heavily fractured rocks using discrete element method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 139, 94-103.
- Labenski, F. a. (2003). Drilling Fluids Approaches for Control of Wellbore Instability in Fractured Formations. *SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition*. Abu Dhabi: Society of Petroleum Engineers.
- Lang, J. a. (2011). Wellbore stability modeling and real-time surveillance for deepwater drilling to weak bedding planes and depleted reservoirs. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Lei, Q. a.P.F. (2017). The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics*, 151-176.
- Li, S. a. (2012). Pore-pressure and wellbore-stability prediction to increase drilling efficiency. *Journal of Petroleum Technology*, 64, 98-101.

- Liu, G. a. (2011). Strength variation and deformational behavior in anisotropic granitic mylonites under high-temperature and-pressure conditions-An experimental study. *Journal of Structural Geology*, 21-34.
- Mansour, A. a. (2019). Smart lost circulation materials for productive zones. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 281-296.
- Meng, M. a. (2019). Wellbore stability in naturally fractured formations featuring dual-porosity/single-permeability and finite radial fluid discharge. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 790-803.
- Meng, Z. a. (2011). In-situ stress, pore pressure and stress-dependent permeability in the Southern Qinshui Basin. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122-131.
- Min, K.B. a.F. (2004). Stress-dependent permeability of fractured rock masses: a numerical study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1191-1210.
- Nagel, N. a.N. (2013). Coupled numerical evaluations of the geomechanical interactions between a hydraulic fracture stimulation and a natural fracture system in shale formations. *Rock mechanics and rock engineering*, 581-609.
- Naumann, M. a. (2008). Experimental investigations on anisotropy in dilatancy, failure and creep of Opalinus Clay}. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 889-895.
- Peng, S. a. (2007). *Engineering Geology for Underground Rocks*. New York: Springer Science & Business Media.
- Salehi, S. a. (2010). Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 229-235.
- Sapigni, M. a. (2003). Engineering geological characterization and comparison of predicted and measured performance of a cavern in the Italian Alps. *Engineering geology*, 47-62.
- Taheri, A. (2018). Three-dimensional hydro-mechanical model of borehole in fractured rock mass using discrete element method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 53, 263-275
- Tour, J. M. (2012). Graphene compositions and drilling fluids derived therefrom. United States Patent and Trademark Office.
- Valenti, N. P. (2002). A unified theory on residual oil saturation and irreducible water saturation. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- Yousefian, H. a. (2018). Numerical simulation of a wellbore stability in an Iranian oilfield utilizing core data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 577-592.
- Zhang. (2011). Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches. *Earth-Science Reviews*, 50-63.
- Zhang, J. (2013). Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 160-170.
- Zhang, J. a. (2008). Casing ultradeep, ultralong salt sections in deep water: A case study for failure diagnosis and risk mitigation in record-depth well. *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Zhang, J. a. (2010). Discussion on “Integrating borehole-breakout dimensions, strength criteria, and leak-off test results, to constrain the state of stress across the Chelungpu Fault, Taiwan”. *Tectonophysics*, 295-298.

Zhang, J. a.C. (2002). Borehole stability in naturally deformable fractured reservoirs-a fully coupled approach. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

Zhang, X. a. (1999). Numerical modelling of wellbore behaviour in fractured rock masses. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 95-115.

Zhang, Z. a. (2018). Effects of stress-dependent permeability on well performance of ultra-low permeability oil reservoir in China. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 565-575.