



تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

هاتف یوسفیان^۱؛ محمد فاتحی مرجی*؛ حمید سلطانیان^۲؛ ابوالفضل عبدالهی پور^۴؛ یاسر پورمظاهری^۵

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد و پژوهشگر؛ پژوهشگاه صنعت نفت

۲. دانشیار؛ دانشکده مهندسی معدن و متالورژی دانشگاه یزد

۳. استادیار؛ پژوهشگاه صنعت نفت

۴. دکتری مهندسی معدن-مکانیک سنگ؛ پژوهشگاه صنعت نفت

۵. کارشناس ارشد مهندسی نفت؛ پژوهشگاه صنعت نفت

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۸/۰۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۱۰/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/jpg.2018.99995.1042

چکیده

عملیات حفاری به دلیل حذف حجمی از سنگ‌های متحمل تنش و تحمل آن توسط مابقی سنگ‌های محیط، باعث توزیع مجدد و تمرکز تنش در دیواره چاه می‌شود. در صورتی که میدان تنش القایی ایجاد شده در دیواره چاه از مقاومت برشی سنگ‌های پیرامون آن تجاوز کند، به ترتیب وقوع گسیختگی‌های برشی و به دنبال آن تشکیل یک ناحیه پلاستیک را در اطراف دیواره چاه به دنبال خواهد داشت. از این رو درک صحیحی از وضعیت ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه می‌تواند منجر به شناخت دقیق از رفتار محیط پیرامون چاه گردد، تا بتوان بر اساس آن تدابیر لازم نظیر پیشنهاد پنجره ایمن گل و راستای بهینه حفاری را به منظور مقابله با مشکلات

ناشی از ناپایداری چاه در دستور کار قرار داد. علاوه بر این می‌بایست ادعان نمود که بررسی پایداری چاه بر پایه تعیین فشار بحرانی تنها نشان دهنده پتانسیل وقوع شکست در اطراف دیواره چاه است. از این رو پیش‌بینی‌های انجام شده از تطابق خوبی با واقعیت برخوردار نخواهد بود. در این تحقیق نیز با استفاده از یک تحلیل الاستوپلاستیک و تلفیق آن با سه معیار گسیختگی موهر-کولمب، موگی-کولمب و لید اصلاح شده، میزان گسترش ناحیه پلاستیک در پیرامون دیواره چاه قائمی با فشار گل معین در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران ارزیابی شد؛ و به دنبال آن وضعیت پایداری چاه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پس از تحلیل‌های انجام شده، مطابق معیارهای گسیختگی موگی-کولمب و لید اصلاح شده عدم وجود ناحیه پلاستیک در اطراف دیواره چاه پیش‌بینی شد که با داده‌های حاصل از لاگ *FMI* مطابقت خوبی داشت. از طرفی عدم تطابق نتایج حاصل از معیار موهر کولمب با دو معیار دیگر نیز می‌تواند ناشی از نادیده گرفتن اثر تنش اصلی حد واسط در آن باشد.

۱. پیشگفتار

چاه می‌تواند منجر به نفوذ گل حفاری در سازند نیز شده و وقوع شکستگی‌های کششی القایی در دیواره چاه را به دنبال داشته باشد (Zoback, 2010)، (Li et al., 2016). از این رو مهندسان حفاری نیز به منظور اجتناب از شکل‌گیری زون شکست در اطراف دیواره چاه و تعدیل تمرکز تنش، طراحی پنجره ایمن گل حفاری را در دستور کار خود قرار می‌دهند (Al-Ajmi Zimmerman, 2005). از طرفی لازم به ذکر است که وجود یک درصد مشخص از ناحیه شکست در اطراف دیواره

به طور کلی عملیات حفاری نشان می‌دهد که شکست برشی به هنگام کاهش فشار گل حفاری از یک مقدار مشخص که تحت عنوان فشار بحرانی یا فشار گسیختگی شناخته می‌شود، رخ می‌دهد. بنابراین اجتناب از وقوع هر گونه شکست برشی حتی به کمترین میزان نیز مستلزم فشار مناسب گل حفاری است که در برخی مواقع در صورت افزایش از یک مقدار مشخص و غلبه بر مقاومت کششی سنگ‌های پیرامون دیواره

چاه همواره گواه بر ناپایداری چاه نیست و بدین ترتیب این امکان وجود دارد که فشار گل در طول فرآیند حفاری کمتر از مقدار بحرانی پیش‌بینی شده نیز باشد (Zoback, 2010). همچنین مطالعات پایداری چاه نشان می‌دهد که استفاده صرف از فشار بحرانی به عنوان مبنای بهینه سازی فشار گل حفاری مناسب و اقتصادی نمی‌باشد، چرا که فشار بحرانی تنها می‌تواند بیانگر پتانسیل وقوع شکست در دیواره چاه باشد و توانایی بیان میزان گسترش شکست و ناحیه آسیب در دیواره چاه را ندارد (Zoback, 2010)، (Li et al., 2016). حیدریان و جلالی فر نیز از جمله افرادی بودند که گسترش ناحیه پلاستیک را به عنوان مبنایی برای تعیین پنجره ایمن گل در عملیات حفاری فرو تعادلی قرار دادند (Heidarian et al., 2014).

شکل‌گیری ناحیه پلاستیک در اطراف دیواره چاه حتی می‌تواند به عنوان یک فاکتور کلیدی در بررسی تغییرات تخلخل و نفوذپذیری سازند تشکیل دهنده محیط پیرامون چاه و تأثیر آن بر نرخ تولید محسوب شود (Smart et al., 1991). علاوه بر این می‌توان به مطالعات آدنوی و کارستا اشاره کرد. آن‌ها معتقد بودند در صورتیکه بتوان میزان گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه را به کمک اطلاعات مکانیک سنگی سازند مورد مطالعه و میدان تنش منطقه تخمین زد، می‌توان فشار گل و راستای بهینه را برای چاه مورد نظر پیش‌بینی کرد. در واقع آن‌ها مدلی را به منظور محاسبه حجم ناحیه پلاستیک اطراف یک چاه جهت‌دار ارائه کردند. این مدل با این فرض که ناحیه پلاستیک یا به عبارتی ناحیه شکست برشی پیرامون دیواره چاه هندسه‌ای شبیه به یک بیضوی با گسترش عرضی ثابت ۱۸۰ درجه را دارد، طراحی شده بود (Aadnoy et al., 2010). در حالی که موس و همکاران بر این باور بودند که حجم ناحیه پلاستیک متناسب با برخی پارامترها نظیر بزرگی تنش و خواص مکانیک سنگی تغییر می‌کند (Moos et al., 2007). با این حال، بر اساس تحقیقات زوباک گسترش عرضی ۱۸۰ درجه ناحیه پلاستیک به معنای احاطه کل دیواره چاه توسط ناحیه پلاستیک است که ممکن است منجر به وقوع گشاد شدگی چاه^۱ به خاطر عدم وجود چسبندگی کافی در مواد پیرامون دیواره چاه شود (Zoback, 2010). در همین راستا مطالعات کوانگ لی و تانگ نیز نمونه

بارز دیگر از تحقیقات است که بر پایه میزان گسترش زون پلاستیک راستای بهینه و پایداری را در چاه مورد مطالعه خود پیشنهاد دادند (Li et al., 2016). علاوه بر این وای دانگ ژان و همکاران نیز با ارائه یکسری معادلات تحلیلی جدید روشی را به منظور تخمین راستای بهینه حفاری بر اساس تعیین موقعیت شکستگی‌های پیرامون دیواره چاه در راستاهای مختلف حفاری و در شرایط رژیم تنشی متفاوت پیشنهاد دادند (Zhang et al., 2015). از سویی دیگر، معیارهای گسیختگی نیز به عنوان پارامتری بسیار تعیین کننده در مطالعات پایداری چاه محسوب می‌شوند. تحقیقات ال. اجمی و چابوک نمونه جالبی از این قبیل مطالعات است که به بررسی تأثیر معیارهای گسیختگی مختلف بر روی پایداری چاه و انتخاب راستای بهینه حفاری منجر شده است (Al-Ajmi, 2005).

در این تحقیق نیز سعی شده است تا با ارائه یک مدل تحلیلی مناسب، شعاع ناحیه پلاستیک را در پیرامون یک چاه قائم و برای یک فشار گل مشخص در عمق‌های مختلف تخمین زد. بر این اساس میزان گسترش عمقی و عرضی ناحیه پلاستیک در هر مقطع تعیین خواهد شد. بنابراین می‌توان پایداری چاه مذکور را در عمق‌های بررسی شده مورد ارزیابی قرار داد. از این رو برای صحت هر چه بیشتر نتایج و نزدیکی آن‌ها به واقعیت، در این تحقیق از سه معیار گسیختگی مرسوم در علم مکانیک سنگ تحت عنوان‌های معیار موهر کولمب، موگی کولمب و لید اصلاح شده استفاده شده است. علاوه بر این به منظور اطمینان از صحت عملکرد مدل تحلیلی مذکور نتایج آن با یک مدل عددی ساخته شده بر اساس روش عددی تفاضل محدود در یک عمق مشخص اعتبارسنجی شده است.

۲. تنش‌های پیرامون چاه

با آغاز عملیات حفاری و حفر قسمتی از سازند، حذف حجمی از سنگ‌های متحمل تنش و تحمل آن توسط مابقی سنگ‌های محیط، توزیع مجدد و تمرکز تنش در دیواره چاه را به دنبال دارد. این تمرکز تنش به شدت تحت تأثیر موقعیت پیرامون دیواره چاه و فاصله از دیواره چاه تغییر می‌کند. از طرفی سازند در معرض تنش نیز نسبت به این تمرکز تنش به

¹ Wash out

جایگذاری تنش‌های برجا در معادلات ۱ تا ۶ و اعمال شرایط پیرامون دیواره چاه آن‌ها را به صورت زیر کاهش داد (Fjaer, 2008):

$$\sigma_{rr} = \left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \right) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(\frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z - \rho \left[2(\sigma_H + \sigma_h) \frac{a^2}{r^2} \cos(2\theta) \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{r\theta} = \left[- \left(\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \right) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) \right] \quad (10)$$

$$\sigma_{rz} = \sigma_{\theta z} = 0 \quad (11)$$

۳. معیارهای گسیختگی

در علم مکانیک سنگ تعداد زیادی معیار گسیختگی برشی وجود دارد که به طور کلی می‌توان آن‌ها را بر مبنای تنش اصلی متوسط (σ_2) به دو گروه طبقه‌بندی کرد. گروه اول شامل معیار گسیختگی‌هایی نظیر موهر-کولمب است که مستقل از تأثیر تنش اصلی متوسط (σ_2) بر روی مقاومت هستند و گروه دوم معیارهایی را در بر می‌گیرد که تنش اصلی متوسط (σ_2) را در محاسبه میزان مقاومت سنگ در برابر گسیختگی برشی تأثیر می‌دهند. معیارهای گسیختگی موگی-کولمب و لید اصلاح شده نمونه‌ای از این قبیل معیارها هستند (Chabook et al., 2015).

البته می‌بایست خاطر نشان کرد که معیار موهر-کولمب به دلیل عدم تأثیر مقاومت تنش اصلی متوسط (σ_2) یک معیار محافظه کارانه است و بدین سان همواره یک تخمین اغراق آمیز از منحنی گسیختگی دیواره چاه ارائه خواهد داد (Ewy, 1998). با این حال به دلیل سهولت در استفاده همچنان از محبوبیت بالایی برخوردار است. اما در مقابل معیارهای لید اصلاح شده و موگی-کولمب همواره نتایج قابل قبول تری از پیش‌بینی وضعیت ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه ارائه کرده‌اند (Al-Ajmi Zimmerman, 2005). در این تحقیق نیز با توجه به استفاده‌های گسترده‌ای که معیارهای موهر-کولمب، موگی-کولمب و لید اصلاح شده در مطالعات ژئومکانیک نفت داشته‌اند. به عنوان مبنایی برای بررسی گسترش ناحیه پلاستیک در دیواره چاه مورد نظر قرار گرفته‌اند.

صورت تابعی از میدان تنش و مقاومت سنگ واکنش نشان می‌دهد (Zoback, 2010). حال اگر این تمرکز تنش از مقاومت‌های برشی و کششی سنگ تجاوز کند، به ترتیب شکست برشی و کششی در اطراف دیواره چاه رخ خواهد داد. از آنجا که شدت تمرکز تنش به بزرگی تنش‌های برجا و راستای چاه بستگی دارد؛ بنابراین در صورتی که بزرگی و راستای تنش‌های برجا (تنش بر جای قائم، تنش بر جای افقی حداکثر و حداقل) مشخص باشد، می‌توان تمرکز تنش پیرامون دیواره چاه را محاسبه کرد. با فرض اینکه سازند مورد بررسی یک ماده الاستیک خطی با خواص ایزوتروپیک باشد، تنش پیرامون چاه را می‌توان بر حسب یک تابع شعاعی تحت عنوان تابع کرش به صورت زیر تعریف کرد (Bradley, 1979) و (Fjaer, 2008)

$$\sigma_{rr} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) + \sigma_{xy} \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) + \sigma_{xy} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z - \rho \left[2(\sigma_x + \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} \cos(2\theta) + 4\sigma_{xy} \frac{a^2}{r^2} \sin(2\theta) \right] \quad (3)$$

$$\sigma_{r\theta} = \left[- \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin(2\theta) \right] + \sigma_{xy} \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos(2\theta) \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta z} = (-\sigma_{xz} \sin\theta + \sigma_{yz} \cos\theta) \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\sigma_{rz} = (\sigma_{xz} \sin\theta + \sigma_{yz} \cos\theta) \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \right] \quad (6)$$

در معادلات فوق $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$ و به ترتیب معادل با تنش‌های سیستم مختصات کارتزین است و θ نیز بیانگر موقعیت پیرامون دیواره چاه است، a شعاع چاه را بر حسب سانتی‌متر نشان می‌دهد و r فاصله بین نقطه هدف و محور چاه بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. به علاوه مابقی پارامترها نظیر P_w و v به ترتیب بیانگر فشار گل حفاری و نسبت پواسون می‌باشند که در نهایت منجر به محاسبه تنش‌های مماسی، شعاعی و عمودی می‌شوند. برای حالتیکه چاه به صورت قائم و در راستای تنش‌های برجا حفر شده باشد می‌توان با

میانی در نظر گرفته شده؛ می‌تواند پیش‌بینی نزدیک‌تری به واقعیت نسبت به ترکیب تنش ارائه نماید.

۳.۳ لید اصلاح شده

این معیار که در سال ۱۹۹۹ توسط اوی ارائه شد، نمونه اصلاح شده معیاری است که لاده و دانکن در سال ۱۹۷۵ ارائه نمودند. فرمولاسیون این معیار به شکل زیر است (Ewy, 1998):

$$\frac{I_1''}{I_3''} = 27 + \eta \quad (20)$$

$$I_1'' = (\sigma_1' + S) + (\sigma_2' + S) + (\sigma_3' + S) \quad (21)$$

$$I_3'' = (\sigma_1' + S)(\sigma_2' + S)(\sigma_3' + S) \quad (22)$$

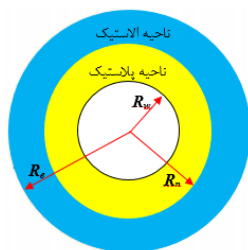
در این معیار دو پارامتر S و η از ثابت‌های مصالح بوده و با استفاده از فرمولاسیون زیر قابل استحصال می‌باشند:

$$S = \frac{C}{\tan \varphi} \quad (23)$$

$$\eta = \frac{4 \sin \varphi (9 + 7 \sin \varphi)}{1 - \sin \varphi} \quad (24)$$

۴. مدل تحلیلی محاسبه شعاع ناحیه لاستیک

اکثر روش‌های تحلیلی بر مبنای در نظر گرفتن محیط الاستیک و پوروالاستیک برای سازند مورد حفاری می‌باشند، حال سؤالی که در ذهن مطرح می‌گردد این است که در چه شرایطی دیگر فرض الاستیک بودن مصالح نامناسب است و رفتار مصالح به علت تغییر شکل‌های بزرگ وارد ناحیه پلاستیک می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱. ناحیه‌های ایجاد شده در پیرامون دیواره چاه تحت تأثیر فرآیند حفاری

یکی از مسائلی که در تحلیل پلاستیک مورد توجه قرار می‌گیرد، به دست آوردن محدوده ناحیه پلاستیک اطراف چاه

۱.۳ معیار موهر-کولمب

معیار موهر-کولمب به دلیل متداول بودن و سادگی ظاهری آن، بیشترین کاربرد را در این زمینه دارا است. در یک محیط سنگی شکل کلی معیار موهر-کولمب به صورت زیر است (Goodman, 1989):

$$\tau = S_0 + \sigma_n \tan \varphi \quad (12)$$

علاوه بر نحوه بالا، می‌توان رابطه موهر-کولمب را بر اساس دو تنش اصلی حداکثر و حداقل نوشت:

$$(\sigma_1 - \alpha_0 P_0) = \sigma_c + (\sigma_3 - \alpha_0 P_0) \tan^2 \beta \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\varphi}{2} + 45^\circ \quad (14)$$

در روابط بالا α_0 تأثیر ضریب بایوت، P_0 فشار منفذی و σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری است. همان‌گونه که می‌توان در روابط بالا مشاهده نمود، در معیار موهر-کولمب اثری از تنش اصلی متوسط دیده نمی‌شود و این به این معناست که از تأثیر مقاومت بخشی آن نیز چشم‌پوشی شده است، در نتیجه می‌توان معیار موهر-کولمب را یک معیار محافظه کارانه دانست که تخمین غیر اقتصادی از منحنی شکست دیواره چاه ارائه خواهد داد.

۲.۳ معیار موگی-کولمب

معیار موگی-کولمب که در سال ۲۰۰۵ توسط ال.اجمی . زیمرمن ارائه شد، همان معیار موگی ۱۹۷۱ است که با یک سری ساده‌سازی‌ها می‌توان پارامترهای ورودی آن را از معیار موهر-کولمب استخراج نمود. شکل ساده این معیار به صورت زیر است (Al-Ajmi Zimmerman, 2005):

$$\tau_{oct} = a + b \sigma_{m,2} \quad (15)$$

$$\tau_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (16)$$

$$\sigma_{m,2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (17)$$

پارامترهای a و b نیز ثابت مصالح هستند که به راحتی از روی C و φ قابل محاسبه می‌باشند:

$$a = \frac{2\sqrt{2}}{3} C \cos \varphi \quad (18)$$

$$b = \frac{2\sqrt{2}}{3} \sin \varphi \quad (19)$$

در این معیار بر خلاف معیار موهر-کولمب، تأثیر تنش اصلی

۵. بررسی گسترش ناحیه پلاستیک در

پیرامون دیواره چاه مورد مطالعه

میدان نفتی یاران یکی از میادین نفتی ایران است که در فاصله ۱۳۰ کیلومتری غرب اهواز در نقطه صفر مرزی با عراق قرار دارد و با میدان مجنون عراق، در مخزن نفتی مشترک است. طول این میدان نفتی ۴۸ کیلومتر و عرض آن ۲٫۵ کیلومتر است. میزان نفت در جای میدان یاران در حدود ۲ میلیارد بشکه برآورد می‌شود. سازندهای سروک از میدان نفتی یاران مخزن نفتی آن می‌باشد. تاقدیس یاران در ناحیه دزفول شمالی (دشت آبادان) در مجاورت و به موازات خط مرزی ایران و عراق و در فاصله ۳۰ کیلومتری غرب ساختمان میدان نفتی جفیر و شمال غرب میدان یادآوران و ۷۰ کیلومتری غرب میدان نفتی سوسنگرد قرار گرفته است.

امتداد این تاقدیس در جهت شمال-جنوب بوده و با تاقدیس میدان نفتی دارخوین دارای روند مشابه می‌باشد. بر اساس داده‌های لاگ برداشت شده در چاه مورد مطالعه در میدان نفتی یاران، شکل ۳۸ توالی قرارگیری سازندها در چاه مذکور را نشان می‌دهد. با توجه به آنچه که در بالا ذکر شد، محاسبه میزان گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون چاه مستلزم معلوم بودن خصوصیات الاستیک و مقاومتی سازند و وضعیت تنش‌های برجا منطقه می‌باشد. لذا در این تحقیق نیز با توجه به در دست داشتن نمونه‌های سنگی مختلف در قالب هفت تیپ سنگ متفاوت در هفت مقطع مختلف در طول عمق چاه، خصوصیات الاستیک و مقاومتی مقاطع مورد بررسی پس از انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت فشاری سه محوری، مقاومت کششی برزلی و آزمایش صوت تخمین زده شد. در شکل ۲ نیز می‌توان تصویری از یکی از نمونه‌ها را در قبل و بعد از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری مشاهده کرد. لازم به ذکر است که مقادیر تخمین زده شده توسط آزمایشات مذکور پس اعمال فرآیند کالیبراسیون با داده‌های لاگ برداشت شده (شکل ۳۸) از چاه هدف در قالب جدول ۱ مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به اینکه هفت تیپ سنگ مذکور در طول عمق چاه قرار گرفته‌اند، به عنوان مقاطع هدف به منظور بررسی گسترش ناحیه پلاستیک در پیرامون دیواره چاه کاندید نیز در نظر گرفته شده‌اند. مطابق با نتایجی که در جدول ۱ نشان داده شده است تیپ سنگ دوم به دلیل داشتن دو زاویه اصطکاک

می‌باشد که به به‌طور خلاصه تحت عنوان شعاع ناحیه پلاستیک مطرح می‌شود. مطابق شکل ۱ شعاع ناحیه پلاستیک به عنوان مرز این ناحیه با ناحیه الاستیک محسوب می‌شود. بنابراین کافی است مقادیر تنش القایی به دست آمده از معادلات ۷ تا ۱۱ را با مجهول در نظر گرفتن پارامتر r در معیار گسیختگی مورد نظر جایگذاری و سپس با مرتب کردن معادله بر حسب r ، شعاع ناحیه پلاستیک R_p به دست می‌آید. حال با توجه به اینکه شعاع ناحیه پلاستیک به عنوان یک کمیت فاصله محسوب می‌شود، در نتیجه شروع ورود به ناحیه پلاستیک زمانی است R_p مقداری مثبت را اتخاذ کند.

در واقع این فاصله موقعیتی از مرکز چاه است که دو طرف معیار گسیختگی با هم برابر است. برای مثال با جایگذاری معادلات ۷ تا ۱۱ در معیار شکست موهر کولمب، معادله ۲۵ به دست می‌آید (به پیوست الف مراجعه شود) (Detournay & Cheng, 1988). (al., 2014)

$$\left(\frac{1}{R^2}\right) \times \left[C_1 + C_2 \left(\frac{1}{R_p}\right)^2 \right] + C_3 \ln(R_p) = C_4 \quad (25)$$

$$(C_1, C_2, C_3, C_4) = f(P_w, P_f, \alpha, \phi, R_w, R_0, \theta, \sigma_H, \sigma_v, i, \alpha, \theta)$$

پارامترهای معادله ۲۵ در جداول ۳ و ۴ و در شرایط تنشی مختلف ارائه شده است. در واقع با توجه به اینکه هر یک از پارامترهای ثابت موجود در معادله ۲۵ به شدت به شرایط تنشی حاکم بر محیط پیرامون دیواره چاه وابسته است، باعث شده است تا تمامی حالات ممکن هر یک از سه رژیم تنشی نرمال، امتداد لغز و معکوس بررسی شود و هر کدام از این پارامترهای ثابت متناسب به یکی از حالات تنشی تعریف در قالب جداول ۳ و ۴ تعریف شود.

نکته جالب توجه این است که معادله ۲۵ وابسته به زاویه θ (زاویه نسبت به تنش افقی حداکثر) می‌باشد و بنابراین، در حالت عمومی ناحیه پلاستیک به شکل دایره نیست که البته با فرضیات برابری تنش‌های افقی و قائم بودن چاه، معادله ۲۵ مستقل از زاویه θ می‌گردد و در نتیجه شعاع ناحیه پلاستیک دورتادور چاه یکسان می‌شود (Detournay & Cheng, 1988).

طول عمق چاه محاسبه شده است. تنش‌های برجای افقی حداکثر و حداقل نیز از طریق انجام تست نشت (LOT) تخمین زده شده‌اند.

$$\sigma_v = \int \rho g dz \quad (26)$$

داخلی و چسبندگی متفاوت به دو زیر گروه a و b تقسیم شده است و در ادامه تمامی تحلیل‌ها به صورت جداگانه بر روی این دو زیر گروه انجام شده است. وضعیت تنش در هر یک از هفت مقطع با توجه به پروفیل تغییرات تنش برداشت شده از این چاه (شکل ۳۸) در قالب جدول ۲ قابل مشاهده است. مطابق شکل ۳۹ تنش برجای عمودی از طریق معادله ۲۶ در

جدول ۱. خصوصیات الاستیک و مقاومتی در مقاطع مورد بررسی

مقطع	عمق (m)	نسبت پواسون	E (GPa)	UCS (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت فشاری تک‌محوری C (MPa)	ϕ
۱	۲۴۸۸	۲,۴۸	۹	۱۶	۲,۷	۸	۴۸
۲	۲۶۰۰	۲,۵۳	۱۱	۲۰	۱,۳	۱,۵	۵۱
۳	۲۶۱۹	۲,۴۱	۸	۱۴	۲,۶	۲۷	۲۲
۴	۲۶۶۷	۲,۴۳	۸	۲۷	۲,۷	۳۰	۳۳
۵	۲۶۸۷	۲,۴۶	۲۳	۵۴	۴,۳	۸,۲	۴۶
۶	۳۹۷۳	۲,۴۲	۲۱	۶۳	۲,۲	۱۴,۳	۴۶
۷	۴۰۱۴	۲,۵۶	۲۰	۴۰	۵,۴	۱۴,۳	۴۶

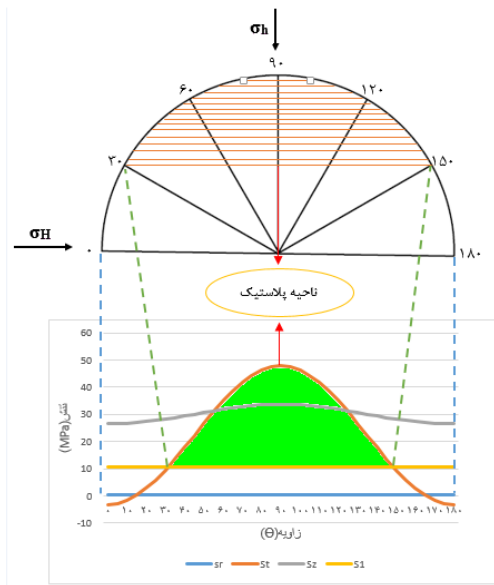
جدول ۲. وضعیت تنش، فشار منفذی و فشار گل در مقاطع هدف

مقطع	عمق (m)	σ_v (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	P_p (MPa)	P_w (MPa)
۱	۲۴۸۸	۶۱,۷۷	۴۹,۰۲	۳۶,۲۶	۳۱,۳۰	۳۱,۷۰
۲	۲۶۰۰	۶۲,۹۱	۵۴,۰۲	۴۲,۱۴	۳۲,۸۰	۳۳,۲۰
۳	۲۶۱۹	۶۳,۴۲	۴۹,۸۶	۳۶,۲۹	۳۲,۹۰	۳۳,۲۰
۴	۲۶۶۷	۶۴,۷۵	۵۴,۰۰	۴۳,۲۵	۳۴,۸۰	۳۵,۱۰
۵	۲۶۸۷	۶۶,۰۲	۵۳,۷۰	۴۱,۳۵	۳۵,۰۰	۳۵,۳۰
۶	۳۹۷۳	۹۶,۲۰	۸۶,۶۰	۷۷,۰۰	۷۴,۶۰	۷۵,۰۰
۷	۴۰۱۴	۱۰۲,۷۳	۹۲,۴۸	۸۲,۲۳	۷۵,۴۰	۷۵,۷۰

گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف دیواره چاه با توجه توضیحات ارائه شده در بالا ابتدا میدان تنش القایی در اطراف دیواره چاه با استفاده از معادلات ۷ تا ۱۱ تا شعاع یک متر از دیواره اندازه‌گیری شد و سپس با توجه به نرمال بودن رژیم تنشی چاه هدف و احتمال وقوع شکستگی برشی در لحظه‌ای که تنش مماسی به حداکثر مقداری خود می‌رسد، حداکثر مقدار تنش مماسی با مقدار تنش لازم برای وقوع گسیختگی که از معیار گسیختگی به دست می‌آید مورد مقایسه قرار

پس تخمین تنش‌های برجا و تعیین راستای آن‌ها به منظور تحلیل و بررسی چگونگی گسترش ناحیه پلاستیک در اطراف دیواره چاه ابتدا می‌بایست توزیع تنش در اطراف دیواره چاه را محاسبه کرد. بدین‌سان بر اساس روابط کرش (معادلات ۷ تا ۱۱) توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در هر هفت مقطع محاسبه گردید. لازم به ذکر است که در تمامی این محاسبات تنش مؤثر با فرض این که مقدار ضریب بایوت برابر با مقدار واحد ($\alpha=1$) است، به دست آمده است. حال برای محاسبه

تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب



شکل ۳. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۱

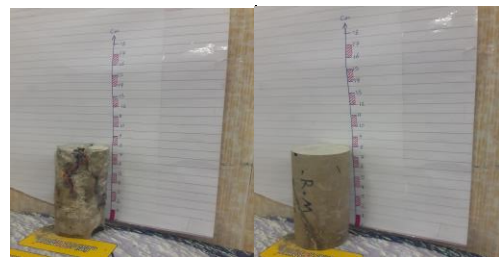
بر همین اساس برای مقاطع ۲، ۳، ۴ و ۷ نیز می‌توان این انتظار را داشت که مطابق با اشکال ۴، ۵، ۶، ۷ و ۱۰ پهنای گسترش ناحیه پلاستیک به ترتیب ۸۰، ۸۰، ۷۵ و ۱۰۰ درجه باشد. اما در مورد مقاطع ۵ و ۶ با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ به علت عدم تجاوز تنش مماسی از مقدار تنش بدست آمده از معیار گسیختگی شاهد وقوع زون پلاستیک نخواهیم بود و رفتار محیط سنگی اطراف چاه در هر دو زون کاملاً الاستیک است.

علاوه بر میزان گسترش ناحیه پلاستیک، عمق نفوذ آن نیز از دیگر پارامترهای بسیار مهمی است که در تحلیل‌های پایداری چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا نیز بر مبنای نتایج به دست آمده از اشکال ۳ تا ۱۰ و احتمال شکل‌گیری ناحیه پلاستیک در مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴ و ۷ عمق نفوذ ناحیه پلاستیک بر اساس روش توضیح داده شده برای هر یک مقطع فوق به ترتیب مطابق اشکال ۱۱ تا ۱۶ به شرح زیر است. علاوه بر این همان‌طور که پیش از این ذکر شد، در صورتی تمرکز تنش القایی پیرامون دیواره چاه از مقاومت کششی سنگ تجاوز کند شاهد وقوع شکست کششی القای در دیواره چاه خواهیم بود. علاوه بر این با توجه به اشکال ۳، ۶ و ۸ این امکان وجود دارد که در مقاطع ۱، ۳ و ۵ به دلیل منفی بودن مقادیر تنش مماسی در راستای تنش بر جای افقی حداکثر شاهد وقوع شکست القایی کششی در این راستاها باشیم. در واقع

گرفت. لحظه‌ای که مقدار تنش به دست آمده از معیار گسیختگی با تنش مماسی حداکثر برابر بود به عنوان مرز ناحیه پلاستیک با ناحیه الاستیک در نظر گرفته شد و فاصله آن از دیواره چاه تحت عنوان شعاع ناحیه پلاستیک قلمداد گردید. لازم به ذکر است که تمامی این مراحل با توالی یک درجه و با رعایت اصل تقارن تنها در یک ربع دایره انجام شده است. در ادامه به طور مفصل می‌توان نتایج تحلیل ناحیه پلاستیک را در هر هفت مقطع مورد بررسی به ترتیب در قالب معیارهای گسیختگی موهر-کولمب، موگی-کولمب و لید اصلاح شده مشاهده کرد.

۱.۵ نتایج حاصل از معیار موهر-کولمب

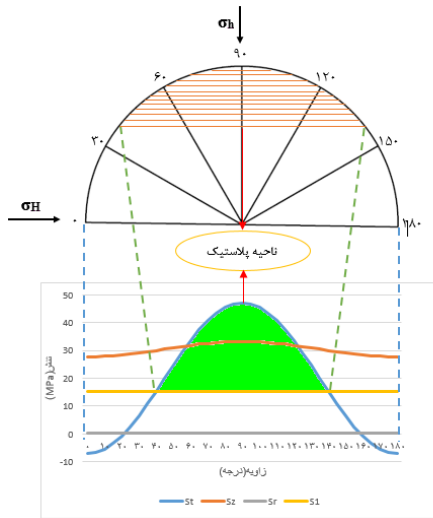
به منظور تخمین شعاع ناحیه پلاستیک در اطراف دیواره چاه بر اساس معیار گسیختگی موهر کولمب مطابق روش فوق ابتدا در قالب اشکال ۳ تا ۱۰ میدان تنش در دیواره چاه اندازه‌گیری شد و با فشار گسیختگی به دست آمده از معیار گسیختگی مقایسه گردید تا احتمال وقوع گسیختگی و شکل‌گیری ناحیه پلاستیک در هر هفت مقطع مورد بررسی قرار بگیرد. در رابطه با اشکال ۳ تا ۱۰ می‌بایست بیان کرد که در تمامی این اشکال پارامترهای k_t ، k_r و S_1 به ترتیب بیانگر تنش مماسی، تنش قائم، تنش شعاعی و تنش به دست آمده از معیار موهر-کولمب می‌باشد.



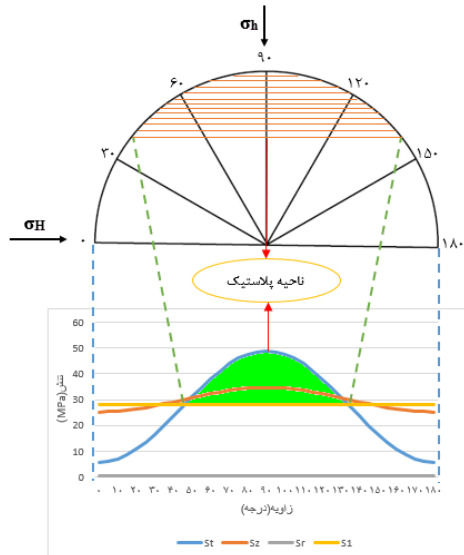
شکل ۲. تصویری از یک نمونه در قبل و بعد از آزمایش مقاومت فشاری سه محوری

بنابراین با توجه به شکل ۳ پیش بینی می‌شود که در زون اول با تجاوز تنش مماسی از مقدار تنش به دست آمده از معیار گسیختگی در بازه زاویه‌ای ۳۰ تا ۱۵۰ درجه نسبت به تنش بر جای افقی حداکثر ناحیه‌ای پلاستیک با گسترش ۸۰ درجه‌ای رخ خواهد داد.

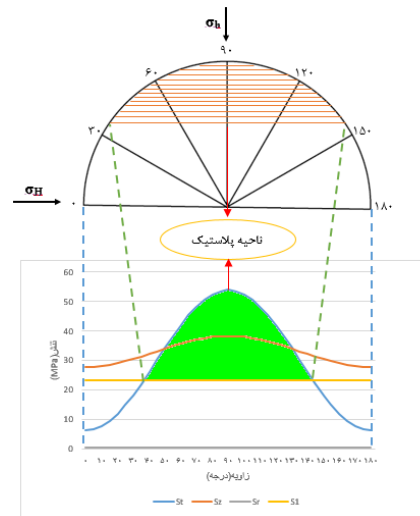
تنش مماسی در هر یک از این مقاطع در راستای تنش بر جای افقی حداکثر به ترتیب معادل با ۷,۰۸-، ۳,۲۳-، ۲,۰۸- و ۵,۲- است. از طرفی مطابق با جدول ۱ مقاومت کششی هر یک از مقاطع اول، سوم و پنجم به ترتیب برابر ۲,۶، ۴,۳ و ۲,۷ می‌باشد. بنابراین این انتظار می‌رود که در یک از این سه مقطع در راستای تنش بر جای افقی حداکثر ناحیه شکست القایی کششی وجود دارد. اما با توجه به اینکه بررسی شکستگی‌هایی کششی القایی خارج از اهداف این مقاله است، بیش از این به آن پرداخته نشده است.



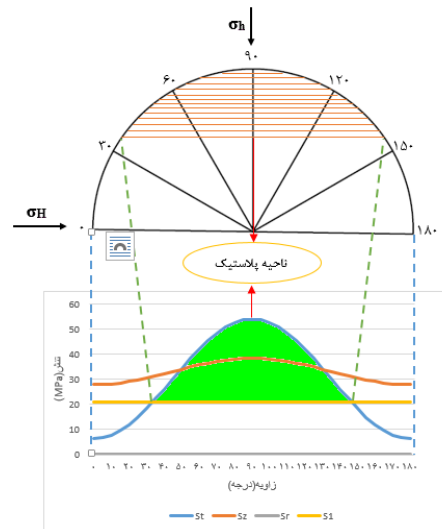
شکل ۶. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۳



شکل ۷. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۴

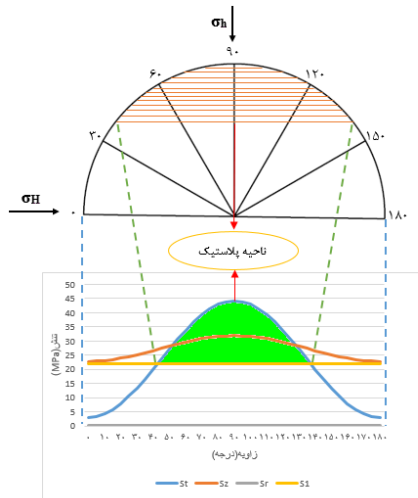


شکل ۴. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۲-a

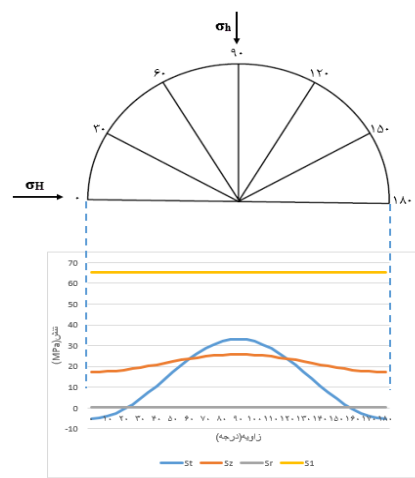


شکل ۵. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۲-b

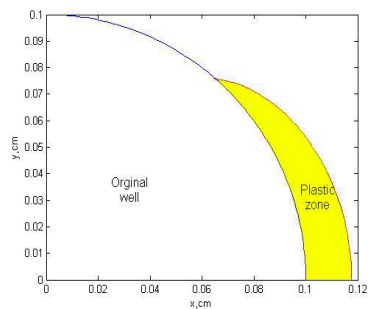
تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب



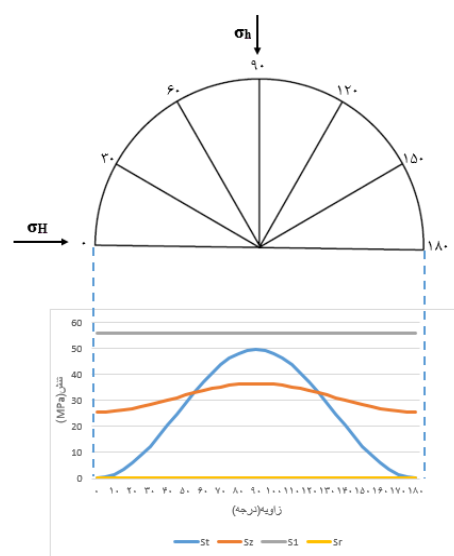
شکل ۱۰. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۷



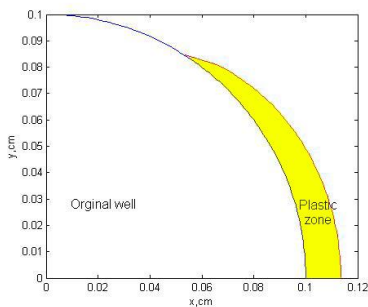
شکل ۸. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۵



شکل ۱۱. گسترش و توسعه زون پلاستیک در اطراف دیواره چاه در مقطع ۱ بر اساس معیار شکست موهر کولمب



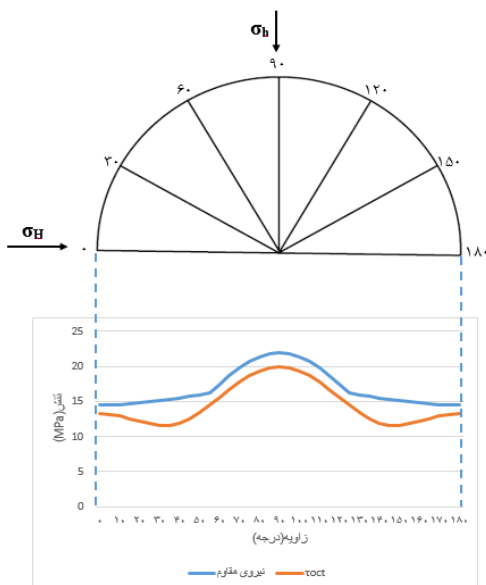
شکل ۹. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۶



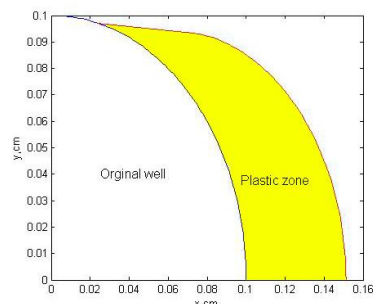
شکل ۱۲. گسترش و توسعه زون پلاستیک در اطراف دیواره چاه در مقطع ۲-a بر اساس معیار شکست موهر کولمب

۲.۵ نتایج حاصل از معیار موگی-کولمب

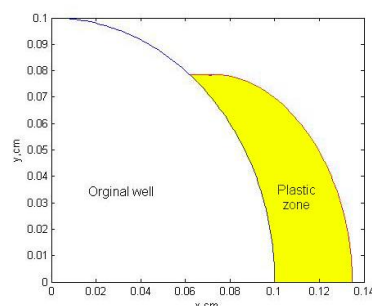
در معیار موگی کولمب نیز مشابه معیار موهر کولمب عمل شده است، با این تفاوت که در اینجا به علت اعمال اثر تنش اصلی متوسط (σ_2) احتمال وقوع ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه در هر یک از مقاطع مورد بررسی کمتر خواهد بود. اشکال ۱۷ تا ۲۴ نیز کاملاً پیش‌بینی مذکور را تصدیق می‌کنند. البته زیر مقطع $a-2$ به علت چسبندگی پایینی که دارد مستثنی از این قضیه بوده است و مطابق با این معیار گسیختگی رفتاری پلاستیک از خود نشان می‌دهد. در شکل ۱۸ میزان گسترش ناحیه پلاستیک در مقطع $a-2$ نشان داده شده است. در تمامی اشکال ۱۷ تا ۲۴ منظور از τ_{oct} همان تنش برشی اکتاهدرال است که در معادلات ۱۵ و ۱۶ شرح داده شده است.



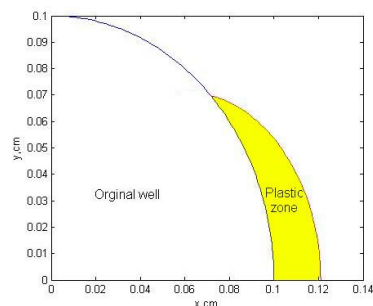
شکل ۱۷. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۱



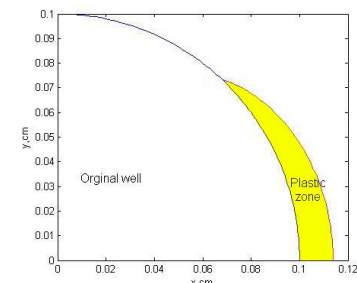
شکل ۱۳. گسترش و توسعه زون پلاستیک در اطراف دیواره چاه در مقطع $b-2$ بر اساس معیار شکست موهر کولمب



شکل ۱۴. گسترش و توسعه زون پلاستیک در اطراف دیواره چاه در مقطع ۳ بر اساس معیار شکست موهر کولمب

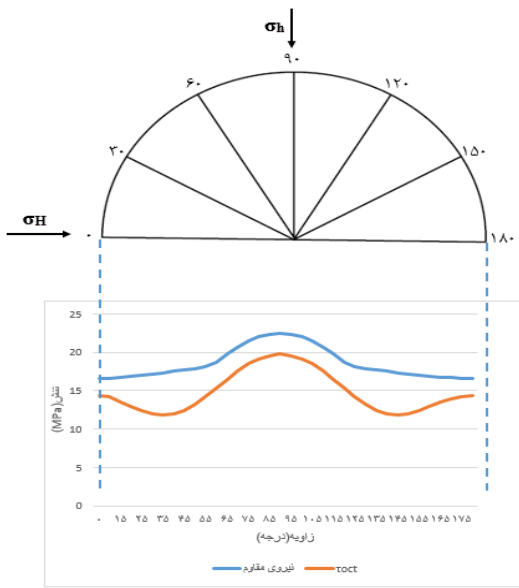


شکل ۱۵. گسترش و توسعه زون پلاستیک در اطراف دیواره چاه در مقطع ۴ بر اساس معیار شکست موهر کولمب

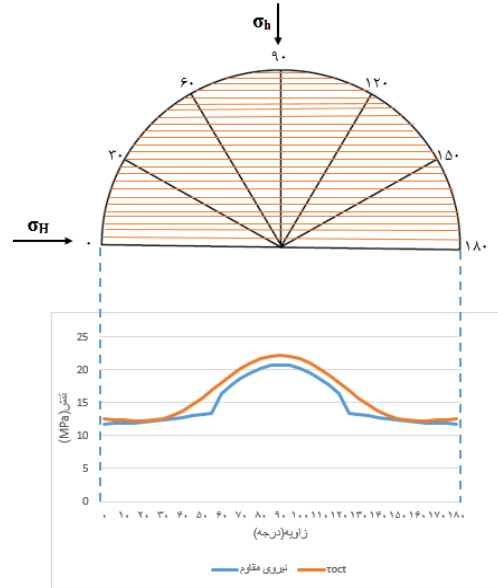


شکل ۱۶. گسترش و توسعه زون پلاستیک در اطراف دیواره چاه در مقطع ۷ بر اساس معیار شکست موهر کولمب

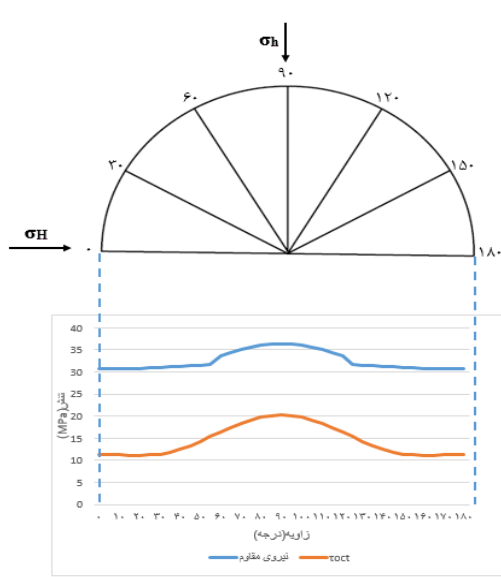
تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب



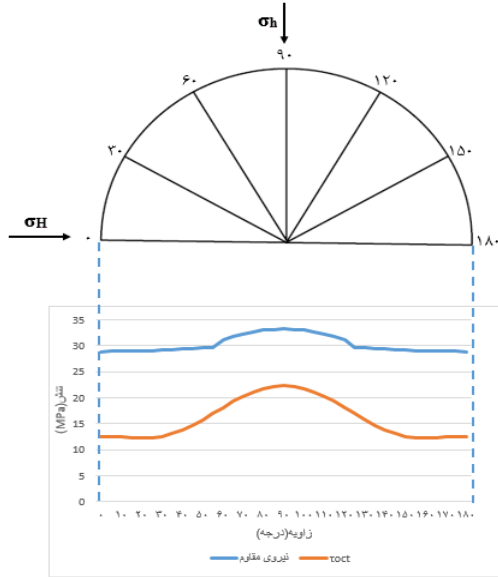
شکل ۲۰. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۳



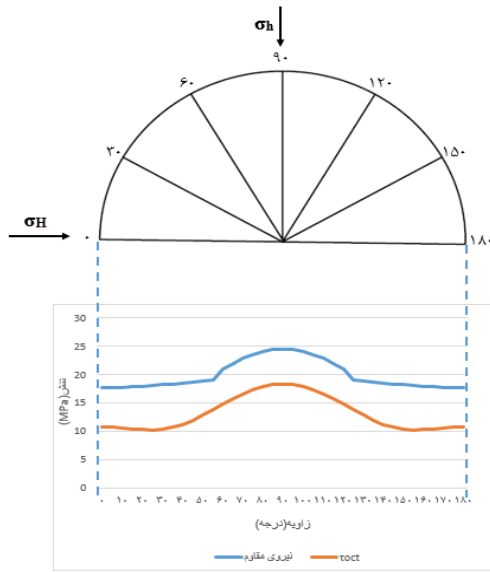
شکل ۱۸. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۲-a



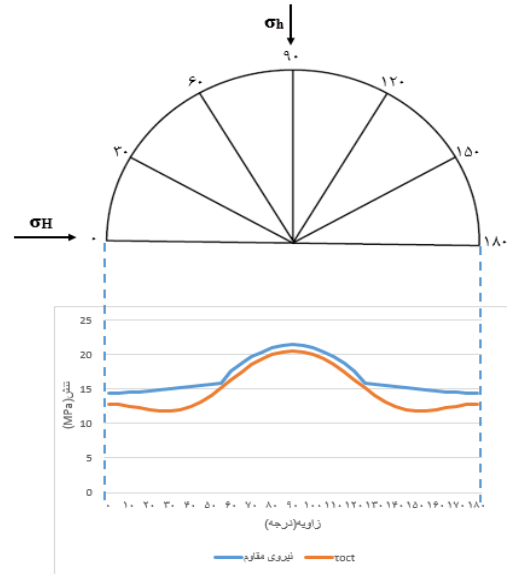
شکل ۲۱. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۴



شکل ۱۹. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۲-b



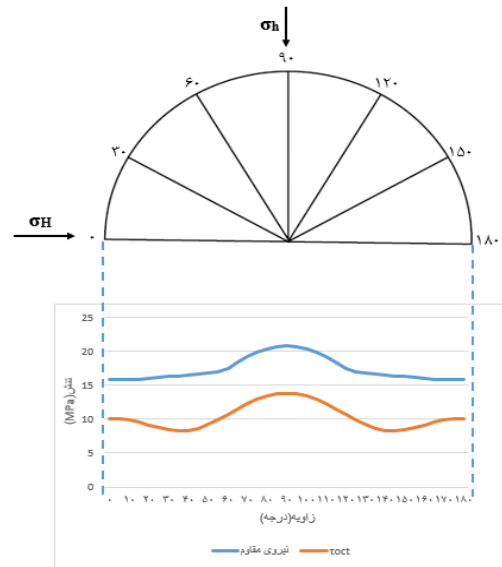
شکل ۲۴. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۷



شکل ۲۲. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۵

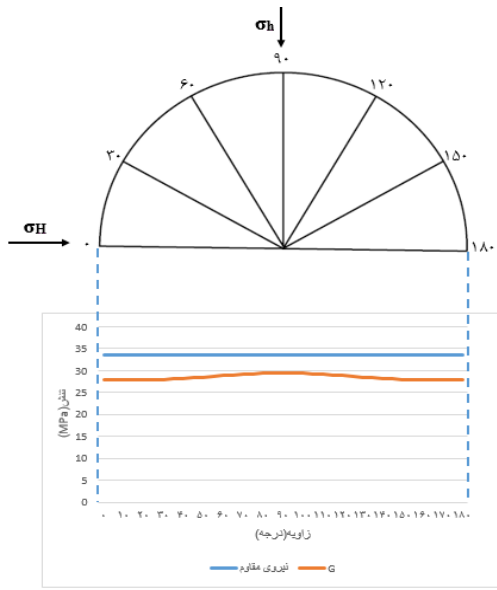
۳.۵ نتایج حاصل از معیار لید اصلاح شده

در معیار لید اصلاح شده نیز مطابق با روش در نظر گرفته شده رفتاری کاملاً مشابه با نتایج حاصل از معیار موگی کولمب برای هر هفت مقطع به دست آمد و باز هم تمامی مقاطع به جز مقطع ۲-a با توجه به شکل‌های ۲۵ تا ۳۲ رفتاری الاستیک از خود نشان می‌دهند. لازم به ذکر است در تمامی نمودارهای مربوط به معیار لید اصلاح شده، منظور از G همان نسبت I_1^2/I_3 می‌باشد که بیانگر تنش‌های اعمالی بر مقطع مورد نظر است.

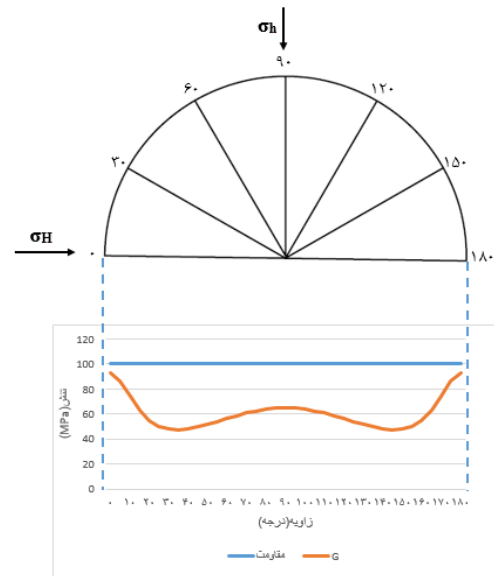


شکل ۲۳. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۶

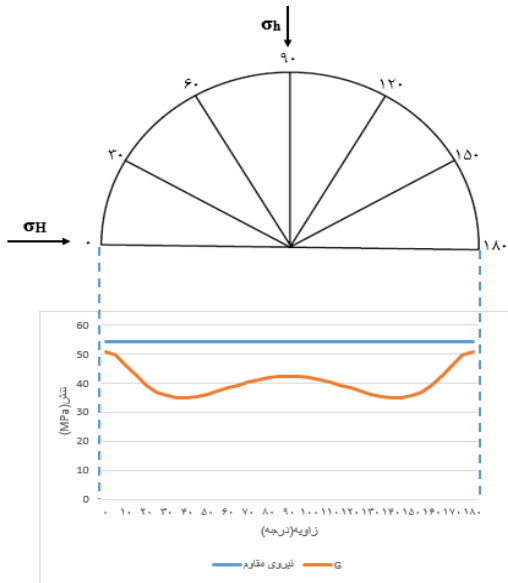
تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب



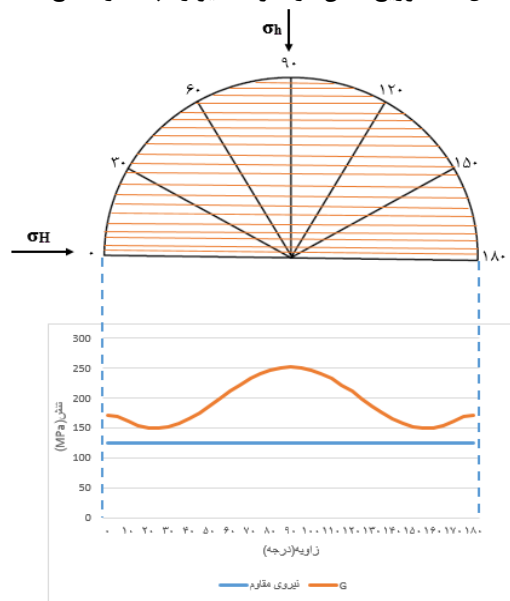
شکل ۲۷. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع $b-2$



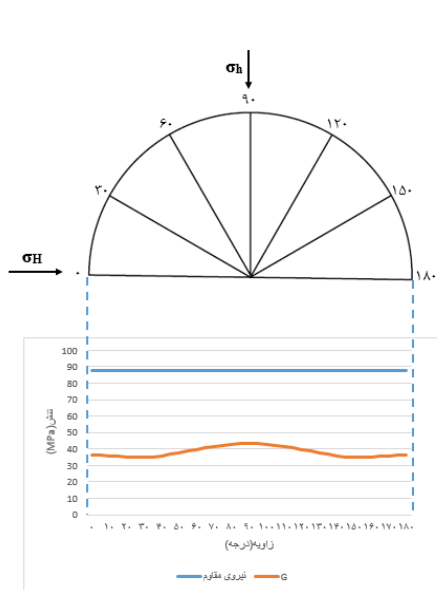
شکل ۲۵. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۱



شکل ۲۸. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۳

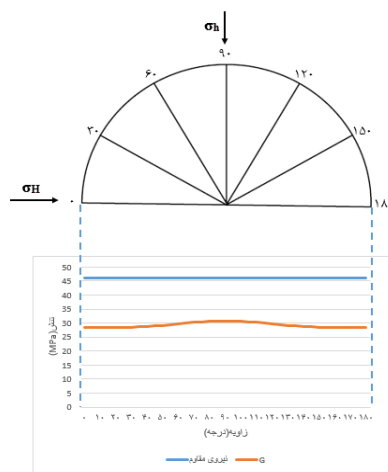


شکل ۲۶. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع $a-2$

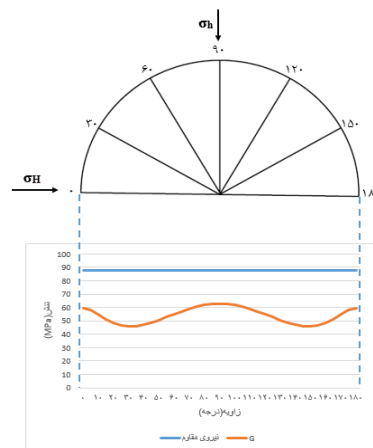


شکل ۲۲. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۷

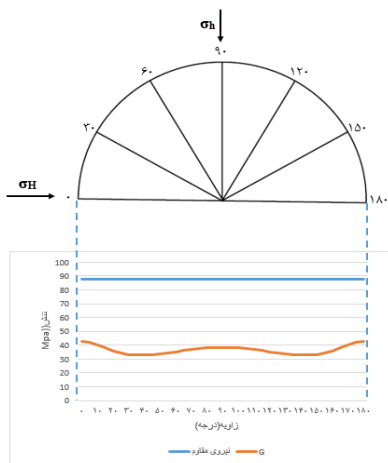
در پایان می‌توان این‌گونه تحلیل کرد که در معیار گسیختگی موهر کولمب به دلیل عدم در نظر گرفتن تنش اصلی میانی از تأثیر مقاومت بخشی آن نیز چشم پوشی شده است و در مقایسه با نتایج به دست آمده از معیارهای گسیختگی مویی کولمب و لید اصلاح شده تخمینی اغراق آمیز و محافظه کارانه از شعاع ناحیه پلاستیک در اطراف دیواره چاه زده است. از سویی دیگر، همان‌طور که در ابتدای قسمت پنجم مقاله شرح داده شد، بر اساس آزمایشات مکانیک سنگی که بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شد، به دلیل تفاوت در مقادیر چسبندگی و زاویه داخلی نمونه‌های تیپ سنگ دو این تیپ سنگ به دو زیر گروه a و b تقسیم شد و تصمیم گرفته شد که تمامی تحلیل‌های تخمین گسترش ناحیه پلاستیک به طور جداگانه بر روی این دو زیر گروه انجام شود تا میزان تفاوت و صحت نتایج حاصل از این دو زیر گروه در مورد تخمین گسترش ناحیه پلاستیک بررسی شود. از طرفی بر اساس نتایجی که از سه معیار گسیختگی مورد نظر به دست آمد نیز نمی‌توان به طور قطع احتمال درست بودن نتایج هر کدام از زیر گروه‌ها تشخیص داد. علاوه بر این به دلیل کمبود داده‌های آزمایشگاهی در این مقطع و همچنین پراکنده نتایج به دست آمده از تست سه محوری و تست صوت باز هم اظهار نظر قطعی کاری بسیار سخت و دشوار است. اما با استناد به



شکل ۲۹. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۴



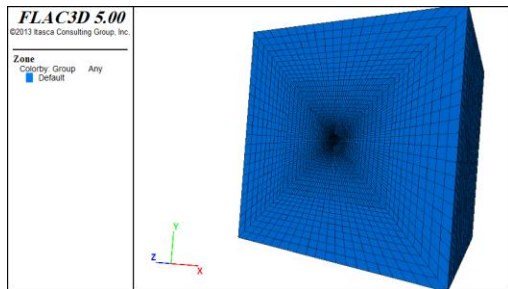
شکل ۳۰. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۵



شکل ۳۱. توزیع تنش در اطراف دیواره چاه در مقطع ۶

تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب

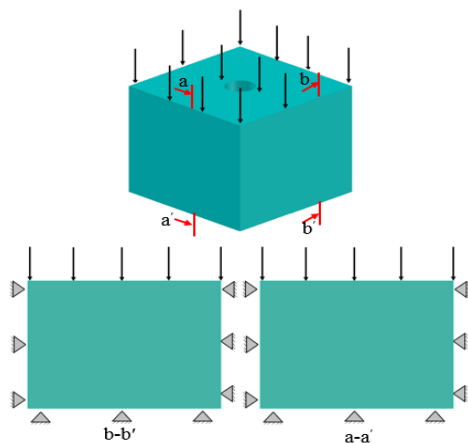
رفتار سنگ و تعیین تنش اطراف چاه استفاده شده است.



شکل ۳۳. هندسه مدل مورد نظر برای تحلیل پایداری چاه در نرم افزار $FLAC^{3D}$

شرایط مرزی اعمال شده بر روی مدل نیز در شکل ۳۴ قابل مشاهده است. همان طور که در شکل مشخص است یک بلوک مکعبی سه بعدی به منظور بررسی پایداری دیواره چاه در حین حفاری مورد بررسی قرار گرفته است. که در آن تمامی سطح جانبی به علاوه سطح انتهایی مدل ثابت و بدون حرکت در نظر گرفته شده است و تنها سطح بالایی آن به دلیل وجود جابه جایی های قائم آزاد در نظر گرفته شده است.

در نهایت پس از حل، نرم افزار بلوک های تسلیم شده و یا به عبارتی ناحیه پلاستیک اطراف دیواره چاه و همچنین وضعیت تغییرات تنش های اصلی حداقل و حداکثر و دیگر پارامترهای مورد نیاز را در هر مقطع اول مورد بررسی قرار داده است.



شکل ۳۴. شرایط مرزی در مدل ساخته شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$

همواره در تحلیل های عددی حاصل از نرم افزار $FLAC^{3D}$ می توان از نمودارهای توزیع تنش اصلی حداکثر و حداقل البته

داده های لاگ برداشت از چاه و مقایسه سازی هایی که مابین نتایج حاصل از آن با داده های آزمایشگاهی در عمق مورد نظر صورت گرفته است (شکل ۳۸)، می توان نتیجه گرفت که اطلاعات به دست آمده از زیر گروه $b-2$ با نتایج لاگ مطابقت بیشتری دارد. بدین سان با فرض صحیح بودن پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی این زیر گروه به عنوان خصوصیات مکانیک سنگی معرف مقطع دوم نتایج استنتاج شده از زیر گروه $b-2$ قابل اعتمادتر بوده است و می تواند مبنای تحلیل و بررسی قرار بگیرد.

تابه اینجاسعی شد تا با استفاده از سه معیار گسیختگی موهر-کولمب، موگی-کولمب و لید اصلاح شده وضعیت گسترش ناحیه پلاستیک را در پیرامون چاه مورد نظر تحت شرایط تنشی حاکم بر آن بررسی کرد. اما نکته مهمی که همواره در تمامی تحلیل های ژئومکانیکی مطرح است، صحت سنجی نتایج استخراج شده از آن ها است. از این رو در این تحقیق هم سعی شده است تا به منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از مدل تحلیلی ارائه شده برای بررسی گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه، یک مدل عددی مورد استفاده قرار بگیرد. مدل عددی مذکور بر پایه روش عددی تفاضل محدود و در محیط نرم افزار $FLAC^{3D}$ ساخته شده است. لازم به ذکر است که مدل عددی مورد نظر مطابق با خصوصیات مکانیک سنگی و شرایط تنشی حاکم بر مقطع اول ساخته شده است و شرایط هندسی و مدل رفتاری اعمال شده بر آن در ادامه شرح داده شده است. از طرفی می بایست این نکته را اضافه نمود که علت انتخاب مقطع اول به عنوان مقطعی برای اعتبار سنجی مدل تحلیلی تنها مجاورت آن با نزدیک ترین شکست برشی تشخیص داده شده توسط لاگ FMI است.

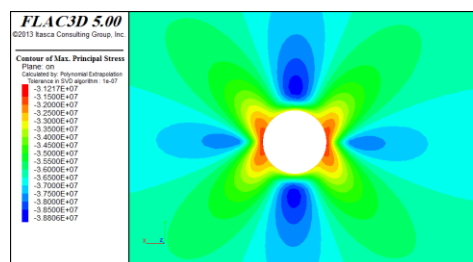
اولین گام برای مدل سازی تعیین ابعاد مدل است. هندسه مدل در شکل ۳۳ نشان داده شده است. با توجه به رفتار الاستوپلاستیک سنگ، به منظور کاهش اثر مرز مدل بر روی نتایج، مدلی ابعاد $4*3*3$ متر در نظر گرفته شد تا وضعیت رفتاری اطراف دیواره چاه هدف را مورد بررسی قرار دهد (شکل ۳۳). در مدل ساخته شده، چاه به صورت حفراهی با قطر ۲۰ سانتی متر ساخته شد و ابعاد المان ها نیز با نسبت ۰٫۱ از داخل مدل به سمت مرز افزایش یافت. مرحله دوم برای مدل سازی انتخاب یک مدل رفتاری و اعمال خصوصیات مواد است. در این مدل، از معیار موهر کولمب به منظور مطالعه

۶. نتیجه‌گیری

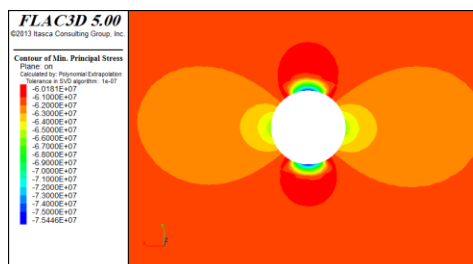
همان‌طور که تا به اینجا شرح داده شد. به منظور محاسبه گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه بر اساس اصول مدل‌سازی تحلیلی ابتدا تنش‌های القایی پیرامون دیواره چاه تخمین زده شد. پس از آن تنش‌های تخمین زده شده مطابق با معادله ۲۵ در هر یک از معیارهای گسیختگی مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت میزان گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه متناظر با هر یک از این معیارهای گسیختگی پیش‌بینی شد و به طور کلی بر اساس نتایجی که به دست آمد می‌توان این نتیجه را گرفت که پیش‌بینی‌های ارائه شده توسط دو معیار مویی-کولمب و لید اصلاح‌شده به دلیل در نظر گرفتن تأثیر تنش اصلی متوسط (σ_2) بر روی مقاومت برشی سنگ از تطابق بیشتری با واقعیت برخوردار هستند. علاوه بر این، این دو معیار در تک‌تک مقاطع مورد بررسی پیش‌بینی‌های تقریباً مشابهی را ارائه کردند. در مورد معیار موهر کولمب نیز با وجود ارائه پیش‌بینی‌های محافظه‌کارانه‌اما به دلیل سهولت و سادگی که در کاربرد وجود دارد، همچنان به عنوان معیاری پرکاربرد در مطالعات ژئومکانیک نفت استفاده می‌شود.

در پایان با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده و اشکال نمایش داده شده این انتظار می‌رود که احتمال وقوع ناحیه پلاستیک در هر یک از هفت مقطع مورد بررسی بسیار ضعیف باشد. لازم به ذکر است، نتیجه‌گیری مذکور در نوع خود یک پیش‌بینی تقریباً قابل قبول محسوب می‌شود. چرا که نتایج حاصل از لاگ FMI برداشت شده از چاه نیز تنها ۱۱ مورد شکست برشی با گسترش عرضی بسیار کوچک را گزارش کرده است و شرایط چاه را تقریباً پایدار تلقی کرده است (شکل ۴۰). این نتیجه همچنین بر اساس مدل عددی ساخته شده در مقطع اول نیز قابل قبول است.

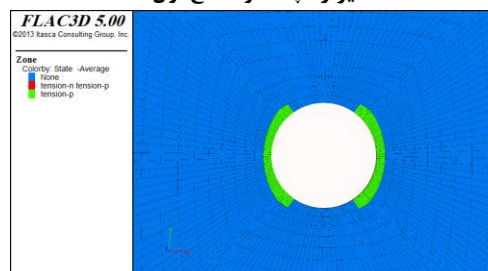
با توجه به خصوصیات مقاومتی مقاطع هدف جهت پیش‌بینی احتمال وقوع شکستگی‌های برشی و کششی در دیواره چاه استفاده کرد. در این تحقیق نیز با توجه به توزیع تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل در مقطع مورد بررسی که در قالب اشکال ۳۵ و ۳۶ ارائه شده است می‌توان دریافت چاه کاندید در راستای فعلی تقریباً در شرایط پایداری قرار دارد. به نحوی که مطابق شکل ۳۷ در مقطع هدف ناحیه پلاستیک واضحی مشاهده نمی‌شود و محیط پیرامون دیواره چاه کاملاً در شرایط الاستیک قرار دارد.



شکل ۳۵. وضعیت توزیع تنش‌های اصلی حداکثر پیرامون دیواره چاه در مقطع اول



شکل ۳۶. وضعیت توزیع تنش‌های اصلی حداقل پیرامون دیواره چاه در مقطع اول



شکل ۳۷. وضعیت گسترش ناحیه پلاستیک پیرامون دیواره چاه در مقطع اول

تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب

پیوست الف

تنش‌های القایی پیرامون دیواره چاه مطابق با معادلات زیر است:

$$\sigma_{rr} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) + \sigma_{xy}\left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (\text{الف } ۱)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) + \sigma_{xy}\left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (\text{الف } ۲)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_z - g \left[2(\sigma_x + \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} \cos(2\theta) + 4\sigma_{xy} \frac{a^2}{r^2} \sin(2\theta) \right] \quad (\text{الف } ۳)$$

$$\sigma_{r\theta} = \left[-\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin(2\theta) \right] + \sigma_{xy}\left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) \quad (\text{الف } ۴)$$

$$\sigma_{\theta z} = (-\sigma_{xz} \sin\theta + \sigma_{yz} \cos\theta) \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \right] \quad (\text{الف } ۵)$$

$$\sigma_{rz} = (\sigma_{xz} \sin\theta + \sigma_{yz} \cos\theta) \left[\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \right] \quad (\text{الف } ۶)$$

از طرفی معیار گسیختگی موهر-کولمب نیز به صورت معادله زیر می‌باشد:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 k \quad (\text{الف } ۷)$$

$$k = \tan^2 \beta$$

در محاسبه شعاع ناحیه پلاستیک قسمت سمت راست معادله تحت عنوان قسمت پایدار یا مقاوم و قسمت سمت چپ معادله تحت عنوان قسمت ناپایداری شناخته می‌شود. بنابراین قسمت پایدار آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\sigma_a = \sigma_c + \sigma_3 k \quad (\text{الف } ۸)$$

از این رو شعاع ناحیه پلاستیک برابر با لحظه‌ای است که دو طرف معادله با هم برابر باشند. بنابراین با جایگذاری معادلات الف ۱ و الف ۲ در معادله الف ۷ و مجهول در نظر گرفتن پارامترها ۳ در معادلات الف ۱ و الف ۲ می‌توان شعاع ناحیه پلاستیک را تحت شرایط مذکور محاسبه کرد. بدین ترتیب در صورتی رژیم تنش‌های القایی حاکم بر دیواره چاه به صورت $\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz} > \sigma_{rr}$ باشد. این انتظار می‌رود که:

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_1 \quad (\text{الف } ۹)$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_3 \quad (\text{الف } ۱۰)$$

بنابراین قسمت ناپایدار معیار را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_1 = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) + \sigma_{xy}\left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \quad (\text{الف } ۱۱)$$

قسمت پایدار یا مقاوم آن نیز بر اساس معادله الف ۱۰ از جایگذاری معادله الف ۱ در معادله الف حاصل می‌شود:

$$\sigma_a = \sigma_c + \left[\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)\left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) + \sigma_{xy}\left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin(2\theta) + P_w \frac{a^2}{r^2} \right] k \quad (\text{الف } ۱۲)$$

همان‌طور که پیش از این گفته شد شعاع ناحیه پلاستیک برابر با لحظه‌ای است که قسمت پایدار معیار موهر-کولمب با قسمت ناپایدار آن برابر باشد. در نتیجه شعاع ناحیه پلاستیک از ادغام دو معادله الف ۱۱ و الف ۱۲ با یکدیگر به دست می‌آید:

$$\left\{ a^2 [(k+1)(a_1 + P_w) + 4ka_3] - a_4 a_5 r^2 \right\} \times \left(\frac{1}{R_p} \right)^2 + [-3(k+1)a_3 a^4 \left(\frac{1}{R_p} \right)^4] \quad (\text{الف } ۱۳)$$

$$\left[\frac{a_4(1-k)}{\ln\left(\frac{r}{a}\right)} \right] \ln(R_p) = [\sigma_c + (k+1)a_3 + (k-1)(a_1 - a_4 a_5) - \frac{a_4(1+(k-1)\ln(r))}{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}]$$

ثابت‌های موجود در معادله فوق به شرح زیر است:

$$a_3 = a_2 \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta, a_4 = \eta(P_{f_0} - P_w)$$

$$a_5 = \frac{a^2}{r^2 - a^2}$$

فرم کلی معادله الف ۱۳ را برای محاسبه شعاع ناحیه پلاستیک در چاه‌های قائم و انحرافی در حالت‌های مختلف تنش‌ی نشان داده شده در جداول ۳ و ۴ می‌توان به صورت زیر نوشت. این معادله برای هر دو محیط الاستیک و پوروالاستیک قبل استفاده است:

$$\left(\frac{1}{R^2}\right) \times \left[C_1 + C_2 \left(\frac{1}{R_p}\right)^2 \right] + C_3 \ln(R_p) = C_4 \quad (\text{الف } ۱۴)$$

$$(C_1, C_2, C_3, C_4) = f(P_w, P_f, \alpha, \phi, R_w, R_0, \theta, \sigma_H, \sigma_v, \sigma_i, \alpha, \theta)$$

لازم به ذکر است که حل معادله فوق مستلزم استفاده از روش حل معادله نیوتن-رافسون می‌باشد و در این تحقیق هم تاملی روند حل در محیط برنامه‌نویسی متلب انجام شده است. در رابطه با دو معیار گسیختگی موگی-کولمب و لید اصلاح شده

نیز به علت پیچیدگی معادلات آن‌ها امکان ارائه یک رابطه نهایی برای محاسبه شعاع پلاستیک میسر نشد. اما کاملاً مطابق با روند شرح داده شده برای معیار موهر-کولمب شعاع ناحیه پلاستیک بر حسب این دو معیار در محیط برنامه‌نویسی متلب محاسبه شد.

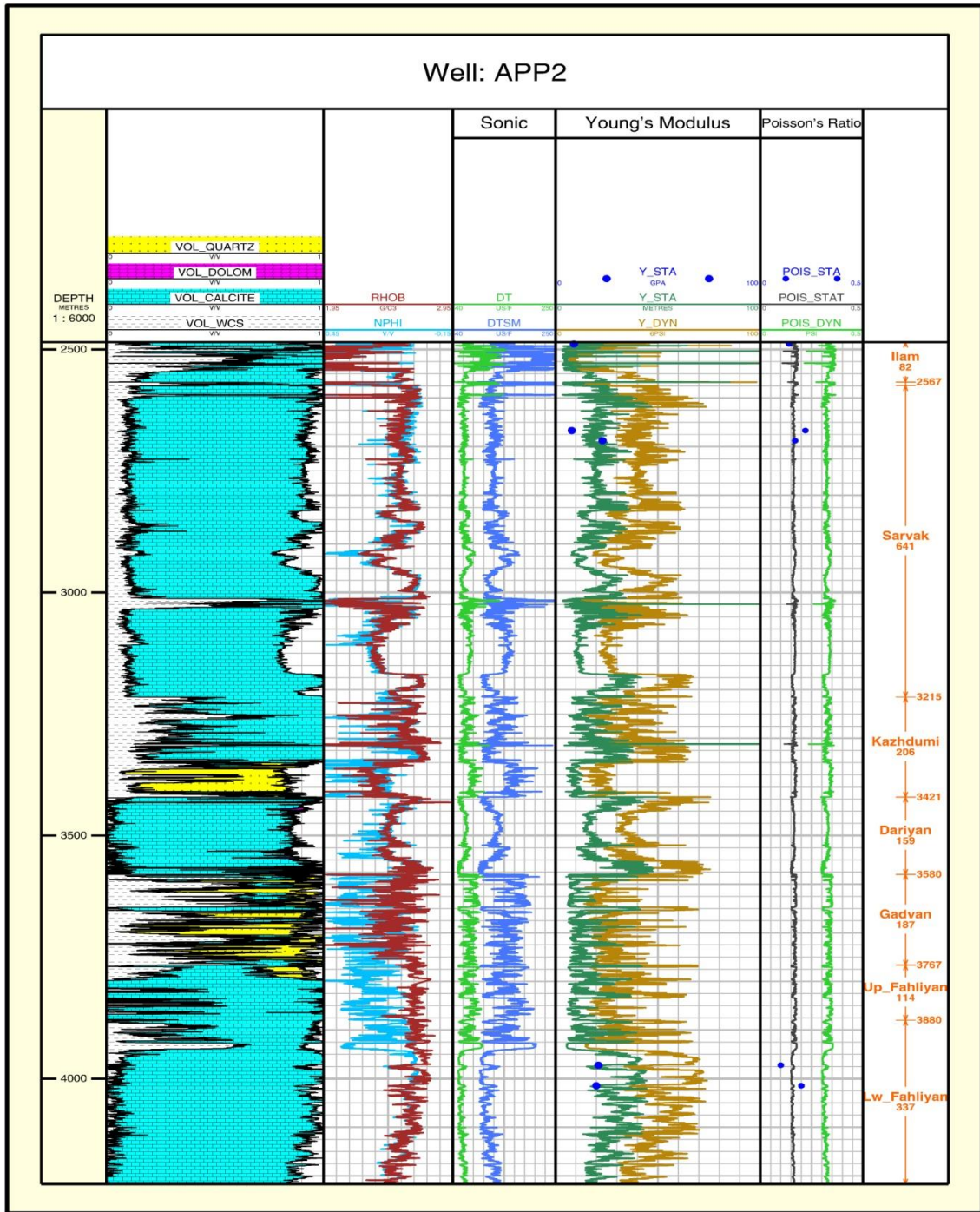
جدول ۳. ثابت‌های به کار رفته در معادله ۲۵

$\sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz}$	$\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$	$\sigma_{\theta\theta} > \sigma_{zz} > \sigma_{rr}$	پارامتر
$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$	a_1
$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$	a_2
$a_2 \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \sin 2\theta$	$a_2 \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \sin 2\theta$	$a_2 \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \sin 2\theta$	a_3
$\eta(P_{f_0} - P_w)$	$\eta(P_{f_0} - P_w)$	$\eta(P_{f_0} - P_w)$	a_4
$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	a_5
$4\nu k a_3 + P_w$ $- a_1 - 4a_3$	$(a_1 - P_w)$ $+ 4\nu k a_3$	$(a_1 - P_w)$ $+ 4\nu k a_3$	a_6
$a_4 a_5 R_0^2$	$- a_4 a_5 R_0^2$	$- a_4 a_5 R_0^2$	a_7
$\nu k + (1 - 2k)$ $\times \ln(R_0)$	$(\nu k - 1) + (1 - 2k)$ $\times \ln(R_0)$	$1 + (k - 1)$ $\times \ln(R_0)$	a_8
$a_6 R_w^2 + a_7$	$a_6 R_w^2 + a_7$	$a_6 R_w^2 + a_7$	C_1
$3a_3 R_w^4$	$3a_3 R_w^4$	$-3(k+1)$ $\times a_3 R_w^4$	C_2
$\frac{(1-2k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(1-2k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(1-k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	C_3
$C_0 - a_1 - a_3$ $+ kS_z + a_4 a_5$ $\times (1 - 2\nu k)$ $+ \frac{a_4 a_8}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$C_0 - a_1 + a_3$ $+ kS_z + a_4 a_5$ $\times (1 - 2\nu k)$ $+ \frac{a_4 a_8}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$C_0 + (k+1)a_3$ $+ (k-1)$ $\times (a_1 - a_4 a_5)$ $- \frac{a_4 a_8}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	C_4

تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب

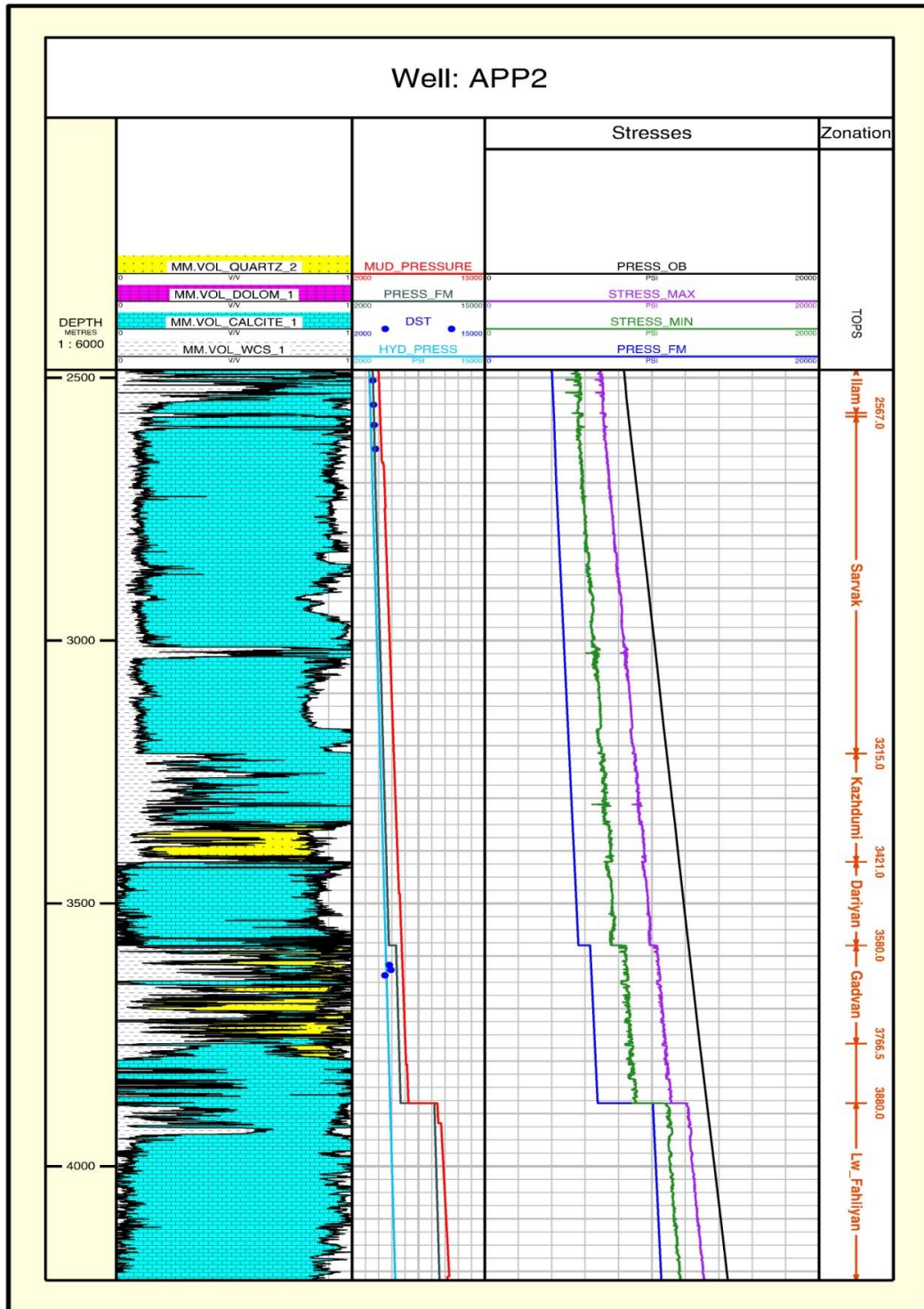
جدول ۴. ثابت‌های به کار رفته در معادله ۲۵

$\sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta} > \sigma_{rr}$	$\sigma_{zz} > \sigma_{rr} > \sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{rr} > \sigma_{zz} > \sigma_{\theta\theta}$	پارامتر
$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$	a_1
$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$	$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}$	a_2
$a_2 \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \sin 2\theta$	$a_2 \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \sin 2\theta$	$a_2 \cos 2\theta$ $+ \tau_{xy} \sin 2\theta$	a_3
$\eta(P_{f_0} - P_w)$	$\eta(P_{f_0} - P_w)$	$\eta(P_{f_0} - P_w)$	a_4
$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	a_5
$4a_3(k - \nu)$ $+ k(a_1 - P_w)$	$k(P_w - a_1)$ $- 4\nu k a_3$	$(k + 1)$ $\times (P_w - a_1)$ $- 4a_3$	a_6
$- a_4 a_5 k R_0^2$	$a_4 a_5 (k + 1) R_0^2$	$a_4 a_5 R_0^2$	a_7
$(2 - k) \times \ln(R_0) + \nu$	$(2 - k) \times \ln(R_0) + k$	$(1 - k) \ln(R_0) + k$	a_8
$a_6 R_w^2 + a_7$	$a_6 R_w^2 + a_7$	$a_6 R_w^2 + a_7$	C_1
$- 3k a_3 R_w^4$	$3k a_3 R_w^4$	$3(k + 1)$ $\times a_3 R_w^4$	C_2
$\frac{(2 - k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(2 - k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(1 - k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	C_3
$(C_0 - S_z)$ $+ k(a_1 - a_3)$ $+ a_4 a_5$ $\times (2\nu - k)$ $+ \frac{a_4 a_8}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$(C_0 - S_z)$ $+ k(a_1 - a_3)$ $+ a_4 a_5 \times (2\nu - k)$ $+ \frac{a_4 a_8}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$C_0 + (k + 1)a_3$ $+ (k - 1)$ $\times (a_1 - a_4 a_5)$ $- \frac{a_4 a_8}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	C_4

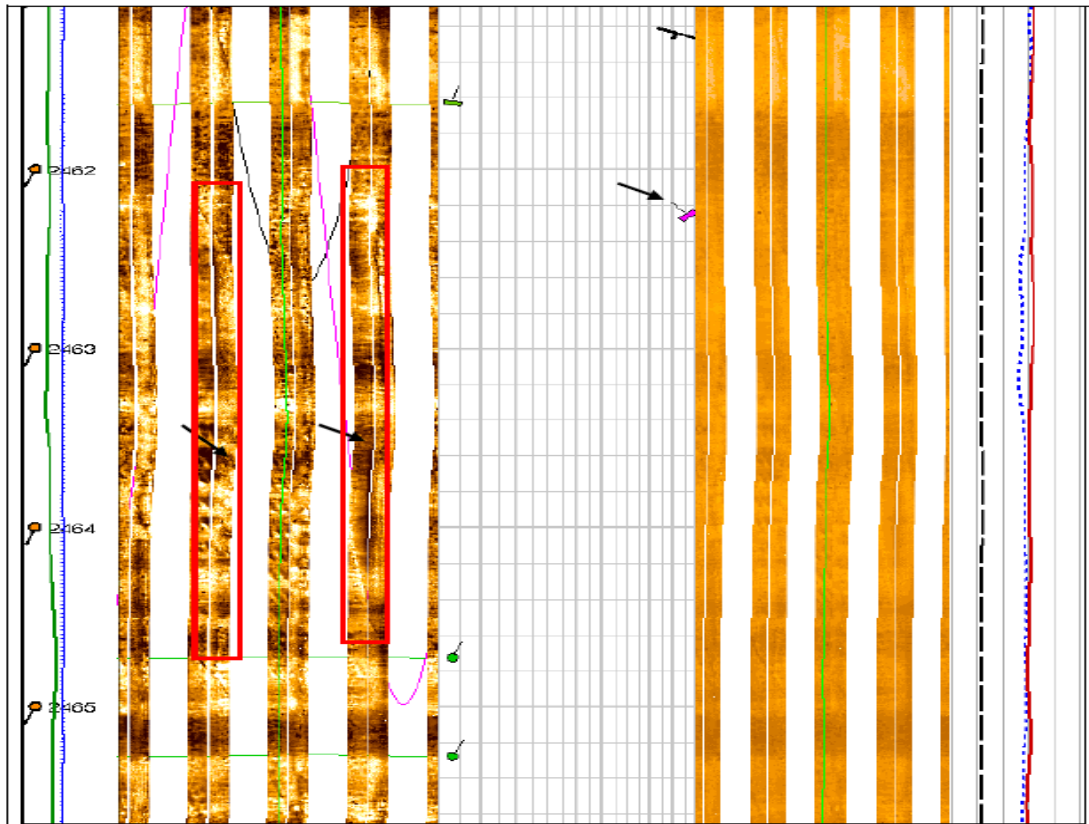


شکل ۳۸. کالیبراسیون داده‌های استاتیک با داده‌های دینامیک و توالی گیری سازند در چاه بر اساس لاگ‌های برداشت از چاه

تحلیل پایداری چاه قائم با استفاده از مفهوم ناحیه پلاستیک و معیارهای گسیختگی مختلف در یکی از میادین جنوب غرب



شکل ۳۹. گرادیان تغییرات تنش برجا، فشار منفذی و فشار گل در طول عمق چاه کاندید



شکل ۴۰. شکستگی‌های برشی تشخیص داده شده از لاگ FMI

۶. مراجع

- Erling Fjaer, R.M. Holt, A.M. Raaen, R. Risnes, P. Horsrud. 2008. *Petroleum Related Rock Mechanics*. Elsevier.
- Aadnoy, Bernt Sigve, and Eirik Kaarstad. 2010. "History Model For Sand Production During Depletion." In *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, Society of Petroleum Engineers.
- Al-Ajmi, AM, RW Zimmerman. 2005. "Relation between the Mogi and the Coulomb Failure Criteria." - *Journal of Rock Mechanics and Mining*.
- Al-Ajmi, Adel M., and Robert W. Zimmerman. 2009. "A New Well Path Optimization Model for Increased Mechanical Borehole Stability." *Journal of Petroleum Science and Engineering* 69(1-2): 53-62.
- Bradley, W. B. 1979. "Failure of Inclined Boreholes." *Journal of Energy Resources Technology* 101(4): 232.
- Chabook, Mohammad, Adel Al-Ajmi, and Valery Isaev. 2015. "The Role of Rock Strength Criteria in Wellbore Stability and Trajectory Optimization." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 80(80): 373-78.
- Detournay, E., and A.H-D. Cheng. 1988. "Poroelastic Response of a Borehole in a Non-Hydrostatic Stress Field." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 25(3): 171-82.
- Ewy, Russell T. 1998. "Wellbore Stability Predictions Using a Modified Lade Criterion." In *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*, Society of Petroleum Engineers.
- Goodman, RE. 1989. *Introduction to Rock Mechanics*. New York: Wiley.
- Heidarian, Mohamad, Hossein Jalalifar, Mahin Schaffie, and Saeed Jafari. 2014. "New Analytical Model for Predicting the Unstable Zone Around the Borehole." *SPE Journal* 19(06): 1177-83.
- Li, Qian, and Zhiqiang Tang. 2016. "Optimization of Wellbore Trajectory Using the Initial Collapse Volume." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 29: 80-88.
- Mark D. Zoback. 2010. *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press.
- Moos, D., C.A. Barton, and S. Willson. 2007. "Impact of Rock Properties On the Relationship Between Wellbore Breakout Width And Depth.
- Smart, E.G.D., J.M. Somerville, and K.J. MacGregor. 1991. "The Prediction of Yield Zone Development Around a Borehole And Its Effect On Drilling And Production.
- Zhang, Weidong et al. 2015. "Analysis of Borehole Collapse and Fracture Initiation Positions and Drilling Trajectory Optimization." *Journal of Petroleum Science and Engineering*.