

Research Article

Stress field analysis and its effect on wellbore stability and selection of optimal wellbore trajectory in the Asmari Formation of Ahvaz oil field

Mohammad Reza Arab Halvayi Bagheri¹, Siavash Ashoori^{1*}, Mohammad Abdideh²

1-Department of petroleum engineering, Ahvaz faculty of petroleum, Petroleum University of Technology, Ahvaz, Iran

2-Department of Petroleum Engineering, Omidiyeh Branch, Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran

Keywords: *Wellbore stability, Safe mud weight window, Optimum wellbore trajectory, Tensile failure criterion, Mohr-coulomb criterion*

1-Introduction

The instability of borehole wells is one of the problems that drilling engineers face when drilling oil and gas wells, which causes a heavy financial loss to this industry every year. In addition, such problems will increase the drilling time of a well beyond the planned amount. Therefore, in many companies in this industry, borehole stability analysis is considered an essential part of the planning stage of drilling new wells (Zare-Reisabadi et al., 2011; Zeynali, 2012; Al-Ajmi, 2006).

Many parameters play a role in the instability of the borehole wall. Some of these parameters are related to the properties of the drilling mud and its interaction with the formation. Others are related to the mechanical properties of the formation and the stress direction around the wellbore (Maleki et al., 2014). Among these factors, some are controllable, and others are uncontrollable. For example, the fluid formation pressure, the stress situation in the ground, and the type and strength of the formation rocks are among the uncontrollable factors, and the weight of the drilling mud and the direction of the well are among the controllable factors (Kidambi and Kumar, 2016; Amiri et al., 2019; Nguyen, 2010).

In order to determine the optimal value of the controllable parameters, it is necessary to build a geomechanical model, which includes a logical set of information related to geology, regional stresses, rock mechanical properties, and pore pressure. It is used as a tool to quickly update information for use in drilling operations and reservoir management (Moos, 2003).

After building these models, it will be necessary to use a suitable failure criterion to analyze wellbore stability under drilling conditions. The discontinuities related to wellbore walls can be studied using tensile and shear failure concepts to choose an appropriate failure criterion. The tensile failure criterion usually evaluates the tensile failure of the wellbore wall, which usually occurs during drilling with high mud weight. However, different criteria have been presented to investigate the shear failure. The most important are the Mohr-Coulomb, Mogi-Coulomb, Hook-Brown, Modified Lade, and Drucker-Prager criteria (Khaksar et al., 2015). Each failure criterion predicts different values for rock strength and minimum mud weight required for keeping the wellbore stable. Therefore, choosing failure criteria for wellbore stability analysis is complex and controversial (Amiri et al., 2019).

In this study, the stability of the borehole wall of the Asmari Formation in the Ahvaz oil field located in the southwest of Iran will be investigated using Mohr-Coulomb and tensile failure criteria as well as MATLAB software. For this purpose, the stress situation around the wellbore will first be investigated. Then, entering the

* Corresponding author: ashoori@put.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2023.42695.2340

Received : 2023-01-05

Accepted : 2023-03-06

magnitude of these stresses and the mechanical rock properties of some points (table 1) of the studied reservoir into Mohr-Coulomb and tensile failure criteria, the optimum mud weight range and drilling direction will reduce problems related to the instabilities will be calculated. Also, at the end of this article, the possible conditions for creating all possible borehole failures will be discussed. Finally, the results of this research can be used to drill future wells.

Table 1. Rock mechanic and geomechanic properties of the studied area.

Point number	1	2	3	4
Depth (m)	3660	3831	4068	4125
Minimum Horizontal Stress (MPa)	59/58	58/19	65/63	62/06
Maximum Horizontal Stress (MPa)	69/48	68/52	77/04	72/58
Maximum Horizontal Stress Direction (degree)	71	71	71	71
Vertical Stress (MPa)	86/34	91/58	99/14	100/97
Pore Pressure (Mpa)	42/55	40/47	44/78	47/57
Uniaxial compressive Strength (Mpa)	0.9	5/75	6/58	4/61
Poisson Ratio (unitless)	0/18	0/18	0/19	0/15
Friction Angle (degree)	25/34	26/62	23/43	26/15

2-Material and methods

A suitable behavioral model is necessary to calculate the stresses around the well and evaluate the instabilities of a borehole wall. Today, linear elastic models are widely used due to the need for fewer input parameters than other models, and they also provide a closed analytical solution. In this study, based on this model and Mohr-Coulomb and tensile failure criteria, the upper and lower limits of the Safe Mud Weight Window (SMWW) will be calculated for all possible wellbore trajectories. Furthermore, this analysis will determine some problematic points of a drilled well in the studied area for a more reasonable result. The results of this analysis will also be used to determine the required situation for different failures. It is good to note that MATLAB software was used to implement this step due to the difficulty of the calculations.

3-Results and discussions

In this step, the stability analysis was conducted for four different points using the existing data in Table 1. Based on the result, one can conclude that vertical drilling and low drilling mud weight used in the drilling operation are the two main factors that led to wellbore instability occurrences in this well. Therefore, it is recommended to try directional drilling and use a higher drilling mud weight to avoid these occurrences in future drilling operations. Furthermore, it was concluded that shear failure wide breaks out and shear failure shallow knockout are two types of borehole failures that occurred in this well due to low drilling mud weight.

4-Conclusion

This study investigated the stability of the borehole walls in the Asmari formation of the Ahwaz field located in the southwest of Iran using Mohr-Coulomb and tensile failure criteria. Four points of the studied well that had stability problems were selected for sensitivity analysis using MATLAB software. The analysis showed that the significant problems related to instability in this well occurred due to the selection of low mud weight. Based on the analysis, most failures in the study are shear failure-wide breakout types. However, a shallow knockout type for shear failure is predicted for the last point. Also, based on the results of this study, it can be

shown that drilling a well will always be risky, and for drilling future wells, drilling in the direction of minimum horizontal stress and with a slope of 27 up to 33 degrees is suggested in which case the weight of the selected mud should be between 13.24 and 14.16 pounds per gallon. In addition, based on the analysis, adopting such an approach reduces the problems related to the borehole wall's instability and reduces the drilling operation's time and cost.

5- References

- AlAjmi, A.M., Zimmerman, R.W., 2006. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion. *Environmental Earth Sciences* 43, 1200-1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.04.001>
- Amiri, M., Lashkaripour, G. R., Ghabezloo, S., Moghaddas, N.H., Tajareh, M. H., 2019. Mechanical earth modeling and fault reactivation analysis for CO₂-enhanced oil recovery in Gachsaran oil field, south-west of Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8062-1>
- Khaksar Manshad, A. K., Jalalifar, H., Aslannejad, M., 2014. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 4, 359-369. <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0100-7>
- Kidambi, T., Kumar, G.S., 2016. Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and engineering* 141, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2016.01.003>
- Maleki, S., 2014. Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weight window in drilling practice. *Earth-Science Reviews* 136, 36-58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.010>
- Moos, D., 2003. Comprehensive wellbore stability analysis utilizing quantitative risk assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 38(3-4), 97-109. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(03\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(03)00024-X)
- Nguyen, D., Miska, S., Yu, M., Saasen, A., 2010. Modeling thermal effects on wellbore stability, in *Proceedings Trinidad and Tobago Energy Resources Conference*. OnePetro. <https://doi.org/10.2523/133428-MS>
- Zare-Reisabadi, M., Kaffash, A., Shadizadeh, S., 2012. Determination of optimal well trajectory during drilling and production based on borehole stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 56, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.018>
- Zeynali, M.E., 2012. Mechanical and physicochemical aspects of wellbore stability during drilling operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 82, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2012.01.006>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Arab Halvahi Bagheri, M., Ashoori, S., Abdideh, M., 2024. Stress field analysis and its effect on wellbore stability and selection of optimal wellbore trajectory in the Asmari Formation of Ahvaz oil field. *Adv. Appl. Geol.* 14(1), 202-221.

DOI: 10.22055/AAG.2023.42695.2340

URL: https://aag.scu.ac.ir/article_18953.html

©2024 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

تحلیل میدان تنش و تاثیر آن بر پایداری دیواره چاه و انتخاب مسیر بهینه حفاری در سازند آسماری میدان نفتی اهواز

محمد رضا عرب حلویایی باقری

گروه مهندسی نفت، دانشکده نفت، اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

سیاوش عاشوری*

گروه مهندسی نفت، دانشکده نفت اهواز، دانشگاه صنعت نفت، اهواز، ایران

محمد آبدیده

گروه مهندسی نفت، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

* ashoori@put.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

چکیده

مشکل ناپایداری دیواره‌ی چاه یکی از مشکلات رایج و مخاطره آمیز حین عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز می‌باشد که هر ساله ضرر مالی سنگینی را به شرکت‌های شاغل در این حوزه وارد می‌کند. امروزه، شرکت‌های مرتبط با صنعت حفاری از علم مکانیک سنگ به عنوان ابزاری برای کاهش خسارت‌های مربوط به ناپایداری دیواره‌ی چاه استفاده می‌کنند. در این مطالعه با بهره‌گیری از علم مکانیک سنگ و داده‌های مرتبط یکی از چاه‌های حفر شده در مخزن آسماری میدان نفتی اهواز به بررسی شرایط پایداری دیواره‌ی چاه، دلیل وقوع ناپایداری‌ها در این چاه و همچنین ارائه راهکاری برای حفر چاه‌های آینده پرداخته شد. در جهت رسیدن به این اهداف، از داده‌های چهار عمق از این چاه که دارای مشکلات ناپایداری شدید بودند، برای انجام آنالیزهای حساسیت سنجی با استفاده از معیارهای موهر کلمب و کششی، استفاده شد. همچنین به علت پیچیده بودن محاسبات حساسیت سنجی، در این مقاله از نرم افزار متلب برای انجام محاسبات مربوطه استفاده شد. نتایج حاصله نشان داد که حفاری عمودی و همچنین وزن گل پایین، علت اصلی ناپایداری‌های رخ داده در این چاه می‌باشند. با توجه به این آنالیزها، مسیر بهینه‌ی حفاری در جهت حداقل تنش افقی و با شیب ۲۷ تا ۳۳ درجه و پنجره گل ایمن حفاری بین ۱۳/۲۴ تا ۱۴/۱۶ پوند بر گالن معین گشت. همچنین در انتهای این مطالعه تمام گسیختگی‌های ممکن در شیب و آزمون‌های مختلف ارزیابی شد و تعدادی از آنها گزارش گردید.

واژه‌های کلیدی: پایداری دیواره‌ی چاه، پنجره ایمن گل حفاری، مسیر بهینه حفاری، شکستگی کششی، معیار موهر کلمب

۱- مقدمه

با توجه به افت قیمت نفت و رقابتی شدن تولید از منابع هیدروکربنی، اهمیت برنامه‌ریزی حفاری و بهره‌برداری از مخازن هیدروکربنی بیش از پیش خودنمایی می‌کند. یکی از مشکلاتی که در حفاری چاه‌ها فراوان دیده می‌شود، عدم پایداری دیواره چاه در حین حفاری و رویارویی با مشکلاتی از قبیل چسبندگی لوله‌های حفاری به دیواره، کم شدن قطر چاه، هرز روی گل، افزایش قطر چاه و فوران است که در برخی موارد تا یک میلیارد دلار در سال نیز هزینه‌های وارده به صنعت نفت را افزایش می‌دهند (Zeynali, 2012; Al-Ajmi, 2006). پایداری دیواره چاه تنها فاز حفاری را تحت

مکانیک سنگ به عنوان زیر شاخه‌ای از علم ژئومکانیک از مفاهیم پیوستگی، مکانیک جامدات و زمین‌شناسی در تعیین رفتار محیط‌های سنگی در برابر تنش‌های محیطی استفاده می‌کند. در علم ژئومکانیک نفت پیش بینی رفتار سنگ، فشردگی، شکست و گسلش در مخازن نفت و گازی در اثر حفاری و بهره‌برداری بررسی می‌شود. با وجود گذشت بیش از یک قرن از آغاز صنعت حفاری و اکتشاف، علم ژئومکانیک به تازگی وارد این صنعت شده است.

دیواره چاه که معمولاً در هنگام حفاری با وزن گل بالا ایجاد می‌شود، معمولاً توسط معیار شکست کششی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد؛ هرچند برای بررسی شکست برشی معیارهای متفاوتی ارائه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به معیار موهر کلمب، موگی کلمب، هوک برون، لیدصلاح شده و دراکر پراگر اشاره کرد (Khaksar et al., 2015). هر یک از این معیارهای شکست مقادیر متفاوتی را برای مقاومت سنگ و حداقل وزن گلی که برای پایداری دیواره چاه لازم می‌باشد، پیش‌بینی می‌کنند و بنابراین انتخاب معیار شکست برای تحلیل پایداری دیواره چاه، مشکل و بحث برانگیز است (Amiri et al., 2019).

محققان زیادی بر روی کاربرد ژئومکانیک بر پایداری دیواره چاه تحقیق کرده‌اند که در ادامه به معرفی تعدادی از آنها پرداخته می‌شود.

Al-Ajmi and Zimmerman (۲۰۰۶) معیار شکست موگی کلمب را جهت بررسی و تحلیل شکست‌های برشی در سنگ‌ها ارائه کردند. با توجه به توانایی این معیار جهت مدل‌سازی شکست در سنگ‌ها، آن‌ها در سال ۲۰۰۹ مدل پایداری دیواره چاه‌های عمودی، جهت دار و افقی را ارائه نمودند.

Zhang و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی آزمایشگاهی پنج معیار شکست بر روی پنج نمونه‌ی مختلف سنگ پرداختند و با توجه به نمونه‌های مورد ارزیابی بهترین معیار شکست جهت بررسی تحلیل دیواره چاه را معیارهای سه بعدی هوک براون و موگی کلمب معرفی کردند.

Younessi و Rasouli (۲۰۱۰) به بررسی تاثیر لغزش در امتداد شکستگی‌ها بر پایداری دیواره چاه و ارائه اندیسی جهت بررسی پتانسیل لغزش پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که با استفاده از روش ارائه شده می‌توان به بررسی ناپایداری چاه بر اساس مکانیزم فعال سازی دوباره گسل‌ها و شکستگی‌ها پرداخت.

Mirzaghobanali و Afshar (۲۰۱۱) مطالعه‌ای را در جهت تعیین پنجره وزن گل بر اساس معیار شکست موگی کلمب و مدل الاستوپلاستیک انجام دادند. آن‌ها نشان دادند

تاثیر قرار نمی‌دهند بلکه در حین بهره‌برداری از میادین با کاهش فشار منفذی نیز این موضوع مورد توجه قرار می‌گیرد (Zare-Reisabadi et al., 2011).

ناپایداری دیواره چاه می‌تواند در مراحل گوناگون از عمر یک چاه شامل: حفاری، تکمیل چاه، تست‌های جریان و تولید اتفاق بیفتد (Fjar et al., 2008). این ناپایداری‌ها منشأ اصلی مشکلات حفاری هستند که منجر به هزینه‌های زیاد و اتلاف زمان شده و گاهی اوقات منجر به از دست دادن کل چاه می‌شود (Zoback, 2010). از این رو جهت کاهش هزینه‌های ناشی از ناپایداری دیواره چاه‌های نفتی، مطالعه بر روی این موضوع ضروری به نظر می‌رسد.

پارامترهای زیادی روی ناپایداری دیواره چاه موثرند. برخی از این پارامترها به خواص گل حفاری و برهم کنش آن با سازند مرتبط است و برخی نیز به خواص مکانیکی سازند و مقدار جهت تنش‌ها اطراف چاه مرتبط می‌باشند (Maleki et al., 2014). از میان این عوامل برخی قابل کنترل و برخی دیگر غیر قابل کنترل می‌باشند. به طور مثال فشار سیال سازندی، تنش‌های موجود در زمین، جنس و مقاومت سنگ-های سازند از جمله عوامل غیر قابل کنترل و وزن گل حفاری و جهت حفر چاه از جمله عوامل قابل کنترل می‌باشند (Kidambi and Kumar, 2016; Amiri et al., 2018; Nguyen, 2010).

برای تعیین بهینه‌ی پارامترهای قابل کنترل مذکور، ابتدا نیاز به ساخت یک مدل ژئومکانیکی می‌باشد که این مدل‌ها در حقیقت شامل یک مجموعه منطقی از اطلاعات مرتبط با زمین شناسی، تنش‌های منطقه، خواص مکانیک سنگ و فشار منفذی است که به عنوان ابزاری جهت به روز نمودن سریع اطلاعات برای استفاده در عملیات حفاری و مدیریت مخازن به کار گرفته می‌شود (Moos, 2003).

پس از ساخت این مدل‌ها، نیاز به استفاده از یک معیار شکست مناسب جهت آنالیز پایداری چاه تحت شرایط حفاری خواهد بود. برای انتخاب یک معیار شکست مناسب، ناپایداری-های مربوط به دیواره‌ی چاه را می‌توان در دو مفهوم شکست کششی و شکست برشی مورد مطالعه قرار داد. شکست کششی

Shi و همکاران (۲۰۱۵) به ارائه‌ی یک معیار جدید برای بررسی پایداری دیواره‌ی چاه در مسیرهای فرضی مختلف پرداختند. Ma و همکاران (۲۰۱۵) براساس معیار شکست مویی کلمب و مدل پهنای ریختگی چاه به تحلیل پایداری و بهینه‌سازی مسیر چاه اقدام نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که این مدل ترکیبی می‌تواند با دقت بالا یک پنجره ایمن گل حفاری را برای ما تعیین کند که با شرایط عملیاتی همخوانی خوبی داشته باشد.

Yousefi و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی پایداری دیواره‌ی چاه یکی از مخازن هیدروکربونی خلیج فارس، با استفاده از معیار موهر کلمب و نرم افزار متلب پرداختند. در مطالعه صورت گرفته از ۴ نقطه برای انجام آنالیز حساسیت سنجی استفاده شد. پنجره‌ی گل ایمن برای این چهار نقطه به ترتیب بین ۲۷ تا ۳۶/۵، ۲۹ تا ۳۹/۵، ۴۱ تا ۵۵ و ۴۷/۵ تا ۵۵ ارزیابی شد. همچنین مشخص گردید که در حفاری عمودی نسبت به حفاری جهت دار امکان وقوع مشکلات ناپایداری کمتری وجود دارد.

Hasanzadeh و Abdideh (۲۰۲۱) به بررسی شرایط پایداری دیواره‌ی چاه در یکی از مخازن تخلیه شده‌ی جنوب غرب ایران پرداختند. در مطالعه آن‌ها سه لایه‌ی تولیدی از مخزن مورد مطالعه برای انجام آنالیزهای حساسیت سنجی انتخاب شدند. برآوردهای حاصل شده که به واسطه‌ی نرم افزار Stabview صورت گرفته بود، نشان داد که پایدارترین مسیر برای حفر یک چاه، حفاری در جهت حداقل تنش افقی و با میزان انحراف ۶۰ درجه می‌باشد.

Almasi و Mohsenipour (۲۰۲۰) به بررسی پایداری دیواره‌ی چاه در سازند سروک در یکی از میادین جنوب غرب ایران، با استفاده از نرم افزار FLAC3D پرداختند. حد پایین وزن گل در حالت پایدار برای این سازند در حدود ۷۳ پوند بر اینچ مربع ارزیابی شد. همچنین نشان داده شد که تحت هر میزان فشار گل در حفاری فراطعادل در این سازند، امکان هرزروی گلدر برخی از نقاط وجود دارد.

که استفاده از چنین مدل‌هایی نتایج بهتری را در مقایسه با روش‌های معمولی ارائه می‌دهند.

Movahedinia و همکاران (۲۰۱۳) به برآورد فشار بهینه‌ی گل حفاری در چاه‌های انحرافی میدان نفتی سلمان پرداختند. در مطالعه آن‌ها، دو عمق ۱۶۰۰ و ۱۶۸۰ متری از مخزن مورد مطالعه برای انجام آنالیز حساسیت سنجی با استفاده از نرم افزار متلب و معیار موهر کلمب، انتخاب شدند. نتایج مطالعه نشان داد که برای این دو نقطه حفاری در جهت تنش افقی حداقل با زاویه انحراف به ترتیب ۴۰ و ۵۰ درجه‌ای به عنوان بهترین مسیر برای حفاری چاه‌های آبی می‌باشد.

Maleki و همکاران (۲۰۱۴) با در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به یک میدان نفتی موجود در حوالی جزیره خارک، به بررسی نتایج سه معیار شکست موهر کلمب، مویی کلمب و هوک براون در تحلیل پایداری دیواره پرداختند. با توجه به محیط مورد بررسی (مخزن ماسه سنگی سازند بورگان)، آن‌ها نشان دادند که معیار شکست مویی-کلمب نتایج دقیق تری ارائه می‌کند. در مطالعه‌ای مشابه، Gholami و همکاران (۲۰۱۴) با به کاربرد بردن معیارهای شکست موهر کلمب، هوک براون و مویی کلمب به تعیین پنجره ایمن و وزن گل بهینه برای عملیات حفاری در یکی از میدان نفتی استان خوزستان پرداختند. آن‌ها نشان دادند که تحلیل پایداری دیواره چاه به کمک معیار شکست مویی کلمب در تطابق بهتری با داده‌های نمودار قطرسنجی می‌باشد. علاوه بر دو مطالعه قبل، یک مطالعه عددی نیز در همین سال برای بررسی پایداری دیواره‌ی چاه در سازند فهلیان واقع در میدان نفتی دارخوین صورت گرفت. در مطالعه صورت گرفته از نرم افزار FLAC3D برای انجام آنالیزهای پایداری دیواره‌ی چاه استفاده شد. نتایج این مطالعه نشان داد که حداقل فشار مجاز گل برای جلوگیری از شکست برشی در این سازند بین ۳۳/۵۱ تا ۵۲/۸۹ مگاپاسکال و برای شکست کششی بین ۴۰/۴۷ تا ۵۵/۹۷ مگاپاسکال ارزیابی شد. همچنین معین گردید که حفر چاه‌های قائم در این مخزن نسبت به چاه‌های افقی پایداری بیشتری دارند (Habibnia et al., 2014).

و تراوایی اولیه‌ی این سازند (تخلخل در حدود ۵ تا ۱۵ درصدی و تراوایی‌های کمتر از ۳۰ میلی داری)، به دلیل وجود شبکه‌های شکستگی‌های فراوان، نرخ تولید مخزن آسماری بالا می‌باشد. بطوری که نتایج حاصل از چاه آزمایی-های صورت گرفته در این مخزن، نشان‌دهنده وجود تخلخل میانگین ۲۵ درصدی و تراوایی‌های بالاتر از ۱۰۰ میلی داری می‌باشد (Bordenave and Burwood, 1990; Bordenave and Hegre, 2010).

در این مطالعه، چهار نقطه از این سازند، برای بررسی آنالیزهای پایداری دیواره چاه انتخاب شدند که اطلاعات مکانیک سنگی و ژئومکانیکی مربوط به این نقاط در جدول ۱ آورده شده است. استفاده از هر عمقی از چاه برای تعیین پایداری ممکن است ولی در این مطالعه سعی شده است تا نقاط مورد مطالعه، حالت بحرانی داشته باشند تا بتوان تصمیم معقولانه‌تری را گرفت.

۳- روش پژوهش

۳-۱- وضعیت تنش‌های اطراف چاه

برای ارزیابی ناپایداری‌های دیواره‌ی چاه، نیاز به داشتن یک مدل رفتاری مناسب برای محاسبه‌ی تنش‌های اطراف چاه می‌باشد. امروزه، مدل‌های الاستیک خطی به دلیل نیاز به پارامترهای ورودی کمتر در مقایسه با سایر مدل‌ها و همچنین ارائه یک راه حل تحلیلی بسته، بسیار پرکاربرد می‌باشند. شکل ۱ وضعیت تنش‌های اطراف یک چاه فرضی را به همراه تنش‌های برجا نشان می‌دهد.

حال براساس رابطه‌ی الاستیک خطی، این تنش‌های را می‌توان صورت روابط ۱ تا ۵ محاسبه کرد. که این رابطه بیانگر وضعیت تنش‌ها در مختصات استوانه‌ای می‌باشد (Al-Ajami and Zimmerman, 2006).

$$\sigma_r = p_w \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\sigma_\theta = \sigma_x^\circ + \sigma_y^\circ - 2(\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^\circ \sin 2\theta - p_w \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$\sigma_z = \sigma_z^\circ - \nu \text{fr}[2(\sigma_x^\circ - \sigma_y^\circ) \cos 2\theta + 4\tau_{xy}^\circ \sin 2\theta] \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-4\tau_{xz}^\circ \sin \theta + 4\tau_{yz}^\circ \cos \theta) \quad (\text{رابطه ۴})$$

در این مطالعه با استفاده از معیارهای شکست موهر کلمب و کششی و همچنین نرم افزار متلب به بررسی پایداری دیواره-ی چاه سازند آسماری واقع در میدان نفتی اهواز پرداخته شده است. برای این کار پس از آشنایی با خصوصیات زمین شناسی میدان و مخزن مورد مطالعه، به بررسی وضعیت تنش‌های موجود در اطراف چاه پرداخته شد. سپس با وارد کردن اندازه-ی این تنش‌ها و خواص مکانیک سنگی برخی از نقاط مخزن مورد مطالعه به داخل معیارهای شکست موهر کلمب و کششی، محدوده وزن گل و جهت حفاری بهینه برای کاهش مشکلات مربوط به ناپایداری دیواره‌ی چاه با استفاده از نرم افزار متلب محاسبه گردید. همچنین در انتهای این مقاله نیز به بررسی شرایط ممکن برای ایجاد تمام گسیختگی‌های ممکن پرداخته شد. از نتایج این تحقیق می‌توان برای حفاری چاه‌های آتی استفاده کرد.

۲- زمین شناسی

۲-۱- زمین شناسی عمومی

منطقه جنوب غربی ایران یکی از مهمترین حوضه های هیدروکربوری دنیا به شمار می رود که در حاشیه شمال شرقی صفحه عربی (Arabic plate) واقع گردیده است. میدان مورد مطالعه، یکی از میدادین واقع در استان خوزستان می‌باشد که در سال ۱۳۳۲ توسط شرکت نفتی انگلو-پرشین (Angelo-Persian) کشف و یک سال بعد شروع به تولید کرد. این میدان از ساختارهای لایه‌ای که در امتداد چین خوردگی زاگرس به وجود آمده‌اند، تشکیل شده است. سه مخزن اصلی این میدان شامل مخزن آسماری، بنگستان و خامی می‌باشد که سهم عظیمی از تولید نفت و گاز کشور دارند (Haidari et al., 2020; Jafari et al., 2020).

۲-۲- زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

مخزن آسماری واقع در این میدان از سال ۱۳۳۷ وارد چرخه تولید شد. این سازند معادل سازندهای ترجیل (Tarjil)، ابراهیم (Ibrahim) و پالانی (Palani) در عراق، سازند دامان (Daman) در عربستان و سازند برگان (Burgan) در کویت می‌باشد. این سازند بطور کلی از آهک، ماسه سنگ، دولومیت و شیل تشکیل شده است. همچنین به‌رغم پایین بودن تخلخل

$$\sigma_{zo} = (\sigma_H \cos 2\alpha + \sigma_h \sin 2\alpha) \sin 2i + \sigma_v$$

(رابطه ۸)

$$\sigma_{xyo} = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha$$

(رابطه ۹)

$$\sigma_{zyo} = 0.5(\sigma_h - \sigma_H) \sin 2\alpha \sin i$$

(رابطه ۱۰)

$$\sigma_{xzo} = 0.5(\sigma_H \cos 2\alpha + \sigma_h \sin 2\alpha - \sigma_v) \sin 2i$$

(رابطه ۱۱)

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = 0$$

(رابطه ۵)

که برای محاسبه‌ی پارامترهای موجود در روابط فوق از روابط ۶ تا ۱۱ استفاده می‌شود.

$$\sigma_{xo} = (\sigma_H \cos 2\alpha + \sigma_h \sin 2\alpha) \cos 2i + \sigma_v \sin 2i$$

(رابطه ۶)

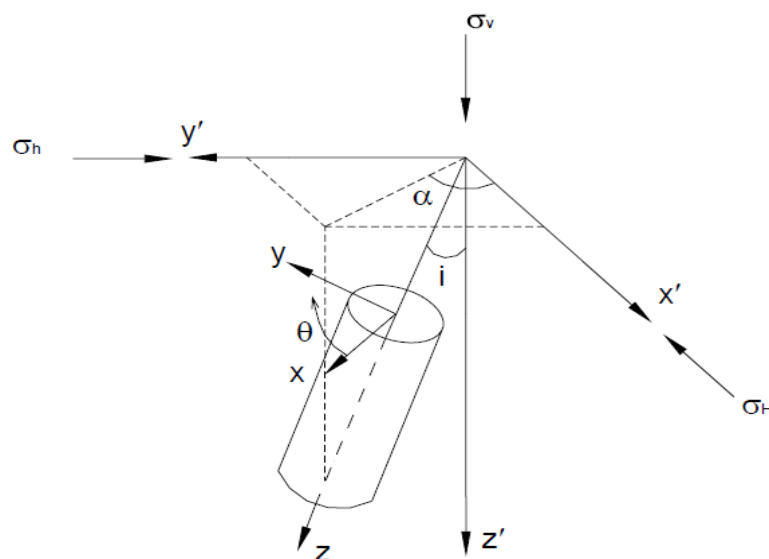
$$\sigma_{yo} = \sigma_H \sin 2\alpha + \sigma_h \cos 2\alpha$$

(رابطه ۷)

جدول ۱- خصوصیات مکانیک سنگی و ژئومکانیکی منطقه مورد مطالعه.

Table 1. Rock mechanic and geomechanic properties of the studied area.

Point number	1	2	3	4
Depth (m)	3660	3831	4068	4125
Minimum Horizontal Stress (MPa)	59/58	58/19	65/63	62/06
Maximum Horizontal Stress (MPa)	69/48	68/52	77/04	72/58
Maximum Horizontal Stress Direction (degree)	71	71	71	71
Vertical Stress (MPa)	86/34	91/58	99/14	100/97
Pore Pressure (Mpa)	42/55	40/47	44/78	47/57
Uniaxial compressive Strength (Mpa)	0.9	5/75	6/58	4/61
Poisson Ratio (uniteless)	0/18	0/18	0/19	0/15
Friction Angle (degree)	25/34	26/62	23/43	26/15



شکل ۱- نمایش شماتیک چاه و تنش‌های برج.

Fig. 1. Schematic of the wellbore and the in-situ stresses.

۳-۲- تنش‌های اصلی اطراف چاه

از آنجا که در مباحث مربوط به مکانیک سنگ معمولاً از تعریف تنش‌های اصلی استفاده می‌شود، در این بخش از مطالعه به آن‌ها می‌پردازیم. برای یک چاه عمودی، تنش‌های اصلی را می‌توان در مقیاس استوانه‌ای به صورت تنش‌های شعاعی، مماسی و محوری ($\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$) در نظر گرفت که روش محاسبه‌ی آن نیز در روابط ۱ تا ۳ آورده شده است. اما برای یک چاه جهت دار، تنش‌های اصلی شامل σ_{tmax} ، σ_{tmin} و σ_r می‌باشند که از طریق روابط ۱، ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شوند (Zoback, 2010).

$$\sigma_{tmax} = 0.5 (\sigma_z + \sigma_\theta + \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2}) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$\sigma_{tmin} = 0.5 (\sigma_z + \sigma_\theta - \sqrt{(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 4\tau_{\theta z}^2}) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

در قسمت بعدی از این تنش‌ها برای ارزیابی رفتار سنگ با استفاده از معیارهای شکست استفاده می‌کنیم که در نهایت با استفاده از آن‌ها قادر به تعیین محدوده‌ی ایمن وزن گل حفاری خواهیم بود.

۳-۳- معیارهای شکست

با توجه به رابطه‌ی ۲ می‌توان بیان داشت که با افزایش وزن گل، تنش مماسی وارده بر دیواره‌ی چاه کاهش پیدا می‌کند؛ تا جایی که منجر به القاء یک نیروی کششی در دیواره‌ی چاه خواهد شد. که این نیروی کششی می‌تواند منجر به شکستگی کششی و ایجاد شکاف در دیواره‌ی چاه گردد. معمولاً در مطالعات مکانیک سنگی، امکان ایجاد این نوع از شکست دیواره‌ی چاه با استفاده از معیار کششی صورت می‌گیرد.

برعکس حالت فوق، کاهش وزن گل می‌تواند منجر به افزایش تنش برشی در دیواره‌ی چاه گردد که توامان با آن امکان ایجاد شکستگی برشی افزایش می‌یابد. برای ارزیابی این نوع از شکست در علوم مکانیک سنگی، معیارهای شکست برشی متفاوتی ارائه شده است که در این مطالعه

از معیار شکست موهر کلمب استفاده گردیده است (Fjaer et al., 2008).

۳-۳-۱- معیار شکست کششی

فرم کلی این معیار به صورت رابطه‌ی ۱۴ می‌باشد.

$$\sigma_3 - P_p \leq -T_0 \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

در واقع این معیار به مقایسه اندازه کوچکترین تنش موثر اصلی با اندازه مقاومت کششی سنگ خواهد پرداخت.

۳-۳-۲- معیار موهر کلمب

معیار موهر کلمب پرکاربردترین معیار شکست برای ارزیابی‌های پایداری دیواره‌ی چاه می‌باشد. فرم کلی این معیار به صورت رابطه‌ی ۱۵ می‌باشد.

$$\sigma_1 = C_0 + q\sigma_3 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

پارامتر q موجود در فرمول بالا، پارامتری وابسته به ضریب اصطکاک سنگ است که می‌توان آن را از رابطه‌ی ۱۶ حساب کرد.

$$q = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

همانطور که از رابطه‌ی ۱۵ مشهود است، این معیار براساس اندازه‌ی دو تنش اصلی حداقل و حداکثر کار می‌کند.

۳-۴- تعیین پنجره ایمن گل حفاری

به محدوده‌ای از فشار گل که در آن امکان ایجاد شکستگی‌های برشی و ریزشی نباشد پنجره‌ی ایمن گل حفاری گفته می‌شود. در شکل ۲ شماتیک کلی این پنجره نمایش داده شده است. تعیین این محدوده، با وارد کردن تنش‌های اصلی به داخل معیارهای شکست معرفی شده و انجام محاسبات ریاضی مناسب ممکن می‌باشد. در واقع با این کار برای هر عمق از چاه، یک حداقل فشار گل برای جلوگیری از ریزش دیواره از طریق معیار شکست برشی (معیار موهر کلمب در این مطالعه) و یک حداکثر فشار گل از طریق معیار کششی محاسبه می‌شود؛ که از روی این دو و با توجه به رابطه‌ی ۱۷ محدوده‌ی وزن گل ایمن قابل محاسبه است.

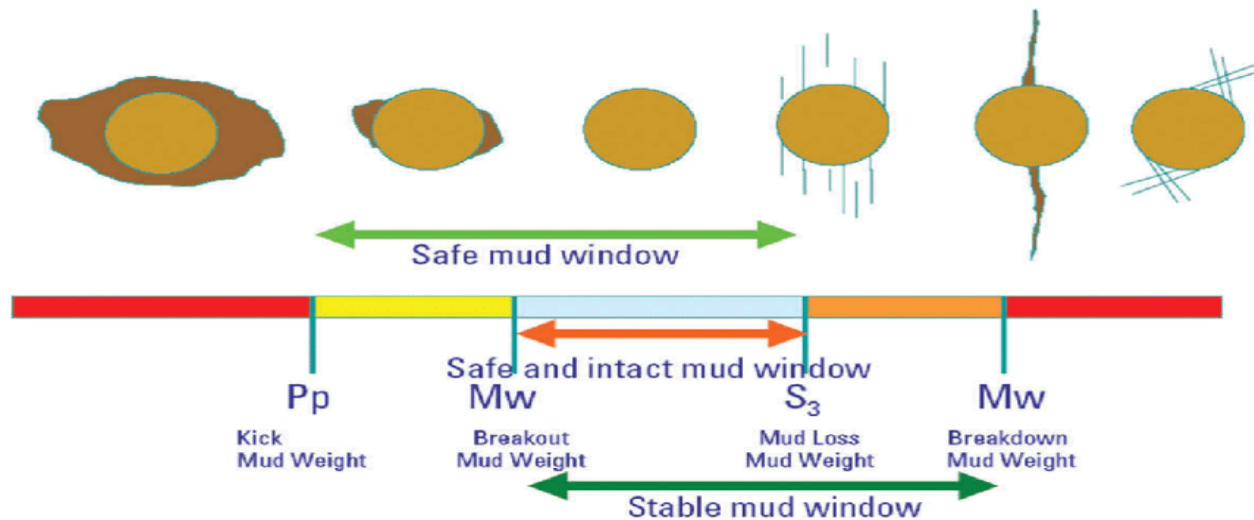
گسیختگی کششی استوانه‌ای می‌باشند (Kidambi, and Kumar, 2016; Tranggono, 2019).

۴- تحلیل پایداری حفره‌ی چاه

در این مرحله به آنالیزهای مربوط به پایداری دیواره‌ی چاه با استفاده از اطلاعات گرفته شده از یکی از چاه‌های از پیش حفر شده در این مخزن، پرداخته خواهد شد. این اطلاعات مربوط به یک چاه عمودی می‌باشد که در آن با وزن گل ۱۰/۸۵ پوند بر گالن عملیات حفاری انجام شده است. شکل ۳ میزان تغییرات حداکثر قطر چاه اندازه گیری شده به وسیله‌ی لاگ قطر سنج، در طول عمق حفاری شده این چاه را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار می‌توان بیان داشت که در برخی از نقاط افزایش قطر چاه غیر عادی بوده که این امر می‌تواند به دلیل مشکلات مربوط به ناپایداری دیواره‌ی چاه باشد. اطلاعات برخی از این نقاط، همان طور که قبلاً به آن اشاره شد در جدول ۱ به عنوان نمونه آورده شده‌اند.

$$P_w = 0.052 \times M_w \times TVD \quad \text{(رابطه ۱۷)}$$

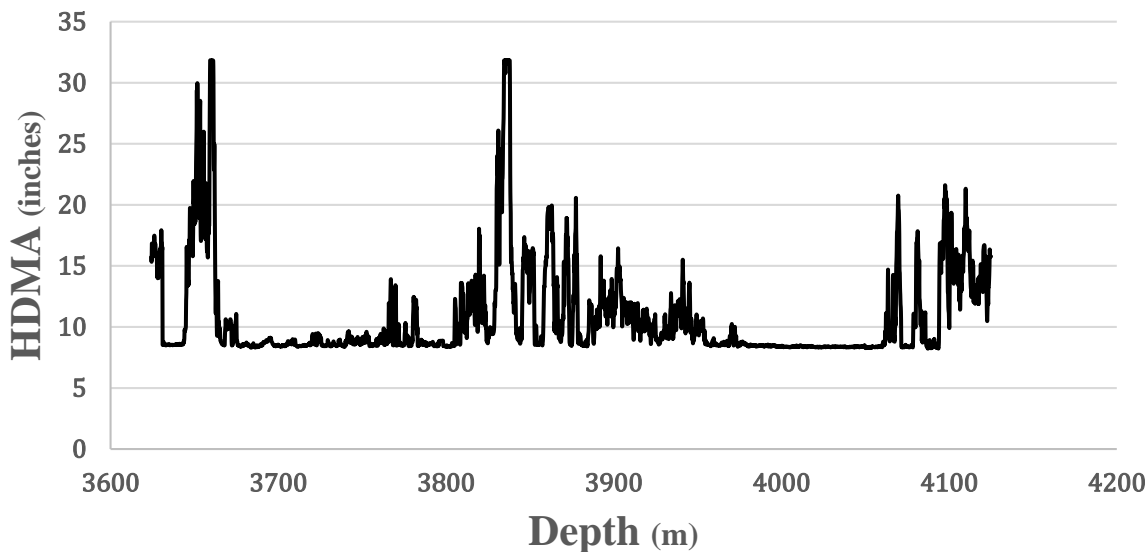
همانطور که از مجموعه روابط بالا مشهود است، میزان تنش‌های اصلی وابسته به اندازه‌ی جهت (Azimuth) و شیب (inclination) چاه می‌باشند. لذا از آنجا که اندازه گیری شرایط پایداری دیواره‌ی چاه در همه‌ی جهت‌ها و شیب‌های ممکن نیازمند انجام محاسبات پیچیده‌ی متعددی می‌باشد، در این مطالعه از نرم افزار متلب استفاده شده است. همچنین با استفاده از این محاسبات قادریم تا در صورت وجود ناپایداری در دیواره‌ی چاه مطابق با الگوهای موجود در جدول ۲ نوع شکستگی را نیز تعیین کنیم. همانطور که در این جدول به نمایش درآمده است، انواع شکست‌های ممکن شامل: گسیختگی برشی عرضی، گسیختگی برشی پله‌ای با زاویه‌ی زیاد، گسیختگی برشی ضربه‌ای کم عمق، گسیختگی برشی پله‌ای با زاویه‌ی کم، گسیختگی کششی قائم، گسیختگی کششی افقی و



شکل ۲- محدوده‌ی ایمن گل حفاری (Abdideh and Hasanzadeh, 2021).
Fig. 2. Safe mud weight window (Abdideh and Hasanzadeh, 2021).

جدول ۲- الگوهای انواع شکست در دیواره‌ی چاه (Tranggono, 2019).
Table 2. Different types of wellbore failure (Tranggono, 2019).

Row	Failure Types	The Required Situation	Details
1	Shear Failure Wide Breakout (SWBO)	$\sigma_{\theta} \geq \sigma_z \geq \sigma_r$	This mode of failure occurs in the radial / tangential plane. It also called as casual breakout.
2	Shear Failure High-Angle Echelon (SHAE)	$\sigma_z \geq \sigma_r \geq \sigma_{\theta}$	This failure occurs in axial / tangential arc. Shae form high-angle fractures that cover up to a quarter of the borehole circumference.
3	Shear Failure Shallow Knockout (SSKO)	$\sigma_z \geq \sigma_{\theta} \geq \sigma_r$	The failure will occur in the radial / axial plane. in image log, ssko can be seen as dark vertical feature with narrow width (around 20 degree)
4	Shear Failure Deep Knockout (SDKO)	$\sigma_r \geq \sigma_{\theta} \geq \sigma_z$	Sdko occur in the radial / axial plane. The orientation of sdko is in the direction of maximum horizontal stress (σ_H). In Image log, it appears as dark vertical feature with narrow width (around 20 degree).
5	Shear Failure Narrow Breakout (SNBO)	$\sigma_r \geq \sigma_z \geq \sigma_{\theta}$	This failure occurs in radial / tangential plane. Snbo also called as breakout and it is generally narrow because the failure covers an arc less than 30 degree
6	Shear Failure Low Angle Echelon (SLAE)	$\sigma_{\theta} \geq \sigma_r \geq \sigma_z$	Slae occur in the axial / tangential plane. This failure forms low-angle fractures. The orientation of this failure is in the direction of minimum horizontal stress (σ_h) and it extend away at low angle.
7	Tensile Failure Vertical (TVER)	$\sigma_{\theta} \leq -T_0$	In image log, this tensile failure appears as dark vertical feature with very width (more than 20 degree).
8	Tensile Failure Horizontal (THOR)	$\sigma_z \leq -T_0$	In image log, this failure can be seen as a thin black horizontal line throughout all azimuthal orientations.
9	Tensile Failure Cylindrical (TCYL)	$\sigma_r \leq -T_0$	Tcyl is concentric with borehole wall and it does not appear in image log.



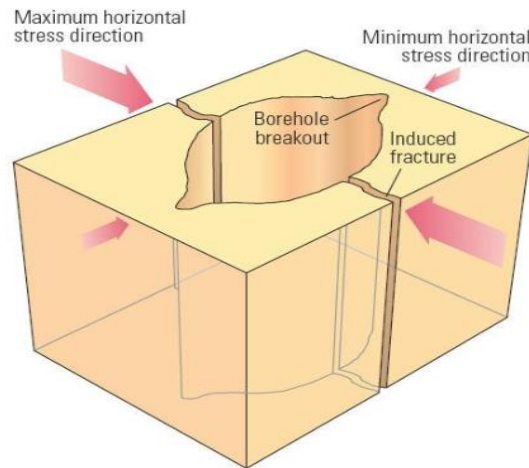
شکل ۳- نمودار تغییرات قطر چاه بر حسب عمق.

Fig. 3. Caliper log.

باشد. شناسایی جهت تنش های اصلی به طراحی مسیر صحیح جهت حفاری با پایداری بیشتر چاه منجر می شود. روش های مختلفی از جمله شناسایی جهت ریختگی های دیواره ی چاه، جهت شکست هیدرولیکی، آنیزوتروپی موج برشی و VSP سه وجهی به منظور تعیین جهت تنش های اصلی در یک منطقه وجود دارد. ریختگی ها عموماً در جهت تنش اصلی حداقل در اطراف دهانه چاه، جایی که تمرکز تنش بیشترین مقدار است تشکیل می شوند. بنابراین در یک چاه قائم، جهت ریختگی های ایجاد شده، جهت تنش اصلی حداقل را در اطراف چاه مشخص می نماید (شکل ۴).

نمودارهای تصویری از جمله ابزارهای توانمندی می باشند که امروزه در مطالعه شکستگی های مخزن هیدروکربنی مورد استفاده قرار می گیرند. سنگ مخزن مورد مطالعه بطور عمده از لیتولوژی کربناته (سنگ آهک و دولومیت) تشکیل شده است. با توجه به لیتولوژی مخزن مورد مطالعه (سازند آسماری) که عمدتاً کربناته است و شکننده بودن آن، انواع شکستگی ها بخوبی در این مخزن توسعه پیدا کرده اند.

باتوجه به جدول ۱، بزرگی تنش های برجا و همچنین در نظر گرفتن تئوری گسلش آندرسون، می توان بیان داشت که رژیم تنش نرمال ($\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$) در منطقه مورد مطالعه حاکم است. در رژیم گسلش نرمال اگر مقادیر ۳ تنش نزدیک به هم باشند پایداری چاه در هر امتدادی از تنش ها تقریباً مساوی است و فشار گل کمی برای جلوگیری از ریزش دیواره چاه نیاز می باشد اما اگر شرایط $\sigma_v > \sigma_H \approx \sigma_h$ برقرار باشد در این حالت بهترین امتداد حفاری به موازات σ_v است (یعنی بهتر است چاه را انحراف ندهیم). اما اگر تفاوت بین تنش های اصلی بسیار زیاد باشد ایمن ترین یا پایدارترین روش حفاری، حفاری انحرافی در جهت تنش افقی حداقل (σ_h) است. زیرا در این صورت، ایمن ترین و عریض ترین محدوده وزن گل حفاری و کمترین تمایل برای گسیختگی برشی در این جهت می باشد. لذا برای تعیین جهت حفاری بهینه در این مخزن، ابتدا نیازمند به تعیین جهت تنش های افقی خواهیم داشت. تعیین جهت تنش های اصلی به عنوان اولین گام در استفاده از تنش ها به منظور تحلیل مدل ژئومکانیکی می



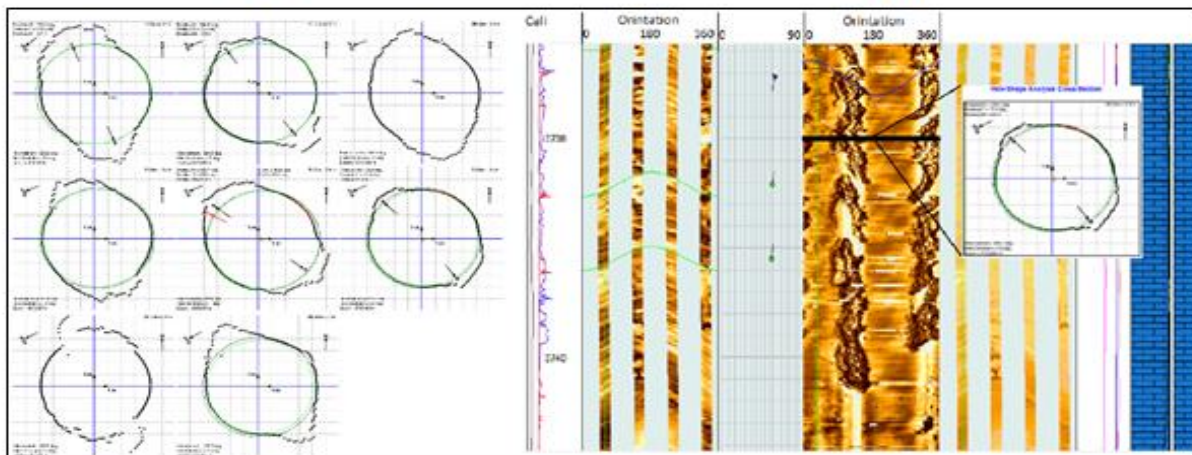
شکل ۴- رابطه تنش های اصلی با بریکوت و شکستگی های کششی.
 Fig. 4. Relation of principal stresses with tensile and break out failures.

ریزش های دیواره چاه، تنش افقی حداقل در جهت شمال غربی - جنوب شرقی (NW - SE) و به کمک شکستگی های قائمی، تنش افقی حداکثر در جهت شمال شرقی - جنوب غربی (NE - SW) تعیین گردید (شکل ۵). تنش افقی حداکثر به دست آمده منطبق بر رژیم تکتونیکی ناحیه ای حاصل از حرکت صفحه عربی به طرف ایران می باشد.

عمده شکستگی های موجود در چاه مورد مطالعه از نوع شکستگی های باز بوده و چند مورد اندک نیز شکستگی های بسته مشاهده گردید. شکستگی های باز در چاه بطور عمده دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی (NE - SW) و تعداد کمتر با روند شمال غربی - جنوب شرقی (NW - SE) و با شیب زیاد می باشند. ضمن اینکه در این مطالعه، به کمک

(a)

(b)



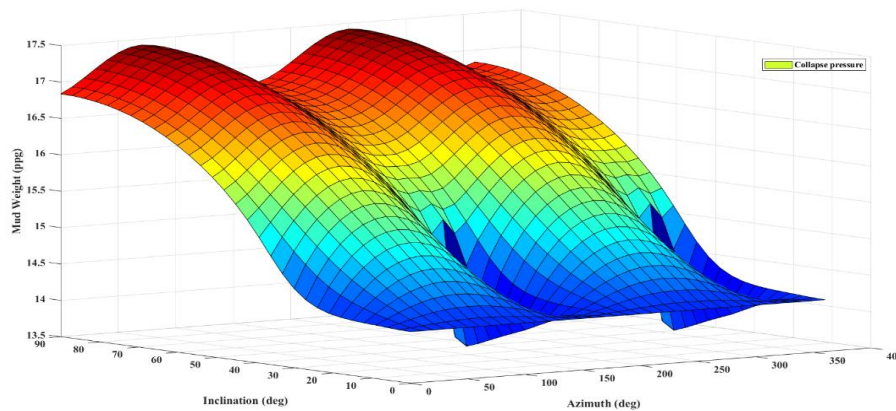
شکل ۵- (a) امتداد ریزش های دیواره چاه حاصل از σ_h ؛ امتداد این شکستگی ها با جهت امتداد چین خوردگی های زاگرس مطابقت دارد و (b) ریختگی دیواره چاه در عمق ۳۷۳۸ متر که نمودار hole shape analysis جهت و شدت آن را نشان می دهد.

Fig. 6. (a) The extension of borehole breakouts resulted from σ_h : The extension of these fractures corresponds to the extension direction of Zagros fold belt and (b) hole shape analysis graph which shows break out intensity and direction in depth of 3738 m (right).

(آزیموت) تنش افقی حداقل و با زاویه انحراف ۳۳ درجه تعیین شد، که پنجره ایمن گل حفاری برای این مسیر بین ۱۳/۵۸ تا ۱۷/۱۴ پوند بر گالن می باشد. بر اساس آنالیزهای صورت گرفته در این نقطه مشخص شد که علاوه بر مسیر بهینه، انجام فرایند حفاری بدون مشکل پایداری دیواره ی چاه، در زوایای انحراف (شیب) کم تر از ۲۰ درجه امکان پذیر است؛ هر چند در چنین شرایطی اندازه پنجره ایمن گل حفاری کوچکتر از میزان مسیر بهینه می باشد و وابسته به مسیر چاه، دارای اندازه ی بین ۰ تا ۱/۳ پوند بر گالن می باشد. برای جهات نزدیک به جهت تنش افقی حداکثر، حفاری بدون مشکلات مربوط به پایداری چاه، به دلیل بالاتر بودن نمودار حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از تنش برشی از حداکثر وزن لازم برای جلوگیری از تنش کششی، امکان پذیر نمی باشد.

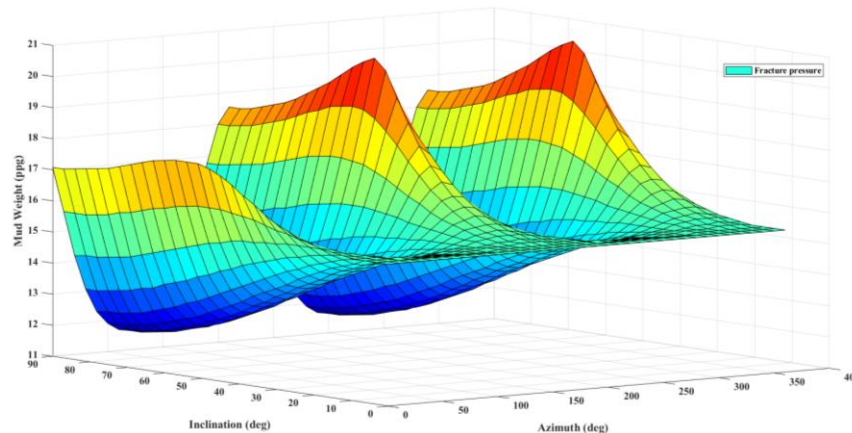
حال پس از تعیین جهت تنش افقی حداقل و محاسبه ی تنش های اصلی برای نقاط موجود در جدول (۱) و با بهره گیری از معیارهای شکست کششی و موهر کلمب پنجره ایمن گل حفاری برای این نقاط در تمامی شیب ها و زاویه ها محاسبه گشت؛ که نتایج حاصله به شرح زیر می باشد:

شکل های ۶ و ۷ به ترتیب مربوط به حداقل و حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از وقوع شکستگی های برشی و کششی برای حفر یک چاه می باشد. بر اساس این نمودارها میزان حداقل و حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست های برشی و کششی به ترتیب برابر با ۱۳/۵۸ و ۲۰/۷۹ پوند بر گالن می باشد (این دو وزن گل متعلق به یک مسیر واحد نیستند). همچنین بهترین مسیر برای حفر چاه نیز، حفاری در جهت



شکل ۶- حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست برشی در نقطه ۱.

Fig. 6. Maximum mud weight required to prevent shear failure at the point 1.

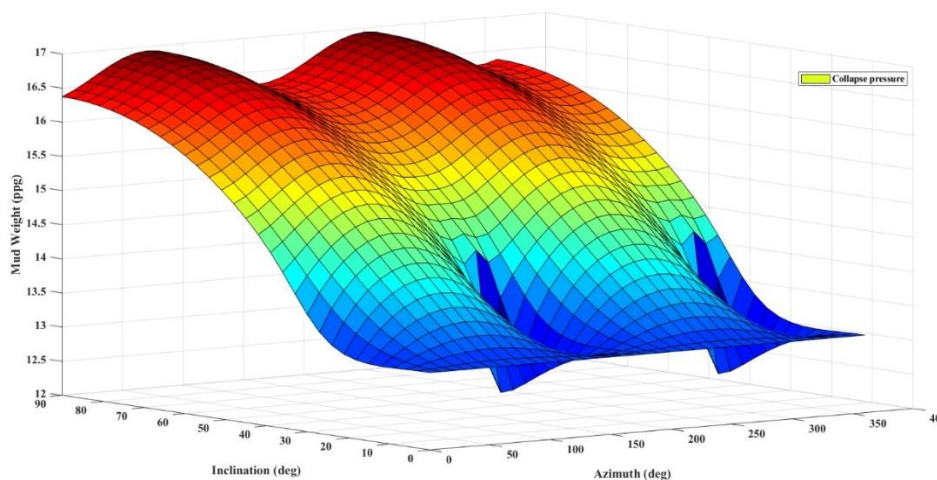


شکل ۷- حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست کششی در نقطه ۱.

Fig. 7. Maximum mud weight required to prevent tensile failure at the point 1.

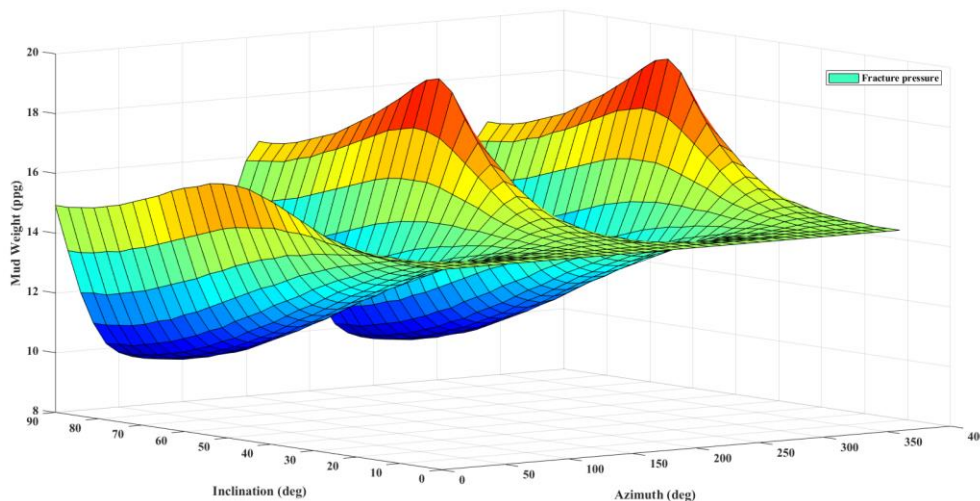
فرایند حفاری بدون مشکل پایداری دیواره‌ی چاه، در زوایای انحراف کم‌تر از ۲۰ درجه امکان پذیراست؛ هرچند بر اساس محاسبات صورت گرفته، در چنین شرایطی اندازه پنجره ایمن گل حفاری بازهم کوچکتر از میزان مسیر بهینه می‌باشد (دارای اندازه‌ی حداکثر تا ۲/۳ پوند بر گالن). براساس این آنالیزها، مانند نقطه‌ی قبل می‌توان بیان داشت که در جهت‌های نزدیک به جهت تنش افقی حداکثر، امکان حفاری بدون مشکلات مربوط به پایداری چاه، به دلیل بالاتر بودن نمودار حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از تنش برشی از حداکثر وزن لازم برای جلوگیری از تنش کششی، میسر نمی‌باشد.

آنالیز پایداری دیواره‌ی چاه برای نقطه دوم (عمق ۳۸۳۱) در شکل های ۸ و ۹ آورده شده است. مطابق با این دو شکل، میزان حداقل و حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست‌های برشی و کششی به ترتیب برابر با ۱۲/۳۳ و ۱۹/۴۸ پوند بر گالن تعیین گشت. مسیر بهینه حفاری برای این نقطه نیز مانند نقطه‌ی قبلی در جهت تنش افقی حداقل و با زاویه‌ی انحراف ۳۰ درجه تعیین شد، که پنجره‌ی ایمن گل حفاری برای این مسیر بین ۱۲/۳۳ تا ۱۵/۹۳ پوند بر گالن می‌باشد. بر اساس اطلاعات حاصل شده از این نقطه می‌توان بیان داشت که علاوه بر مسیرهای نزدیک به مسیر بهینه، انجام



شکل ۸- حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست برشی در نقطه ۲.

Fig. 8. Maximum mud weight required to prevent shear failure at the point 2.

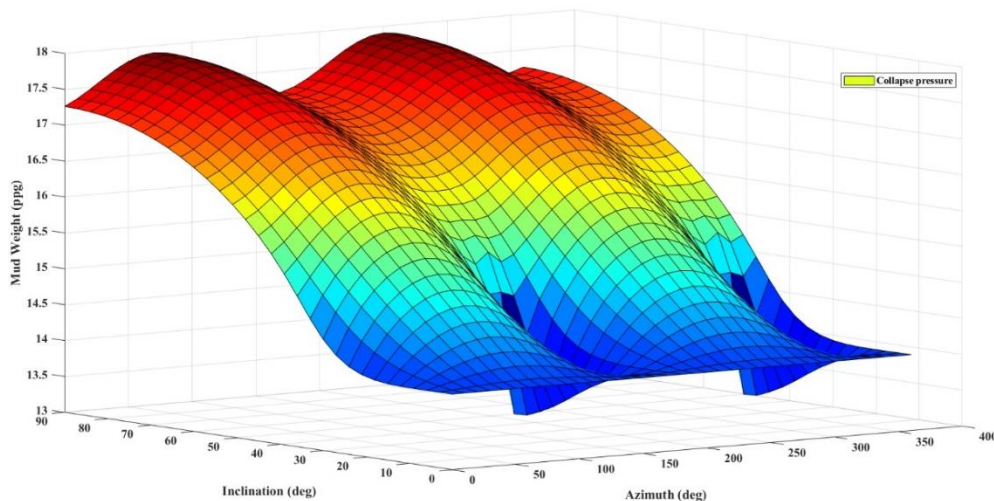


شکل ۹- حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست کششی در نقطه ۲.

Fig. 9. Maximum mud weight required to prevent tensile failure at the point 2.

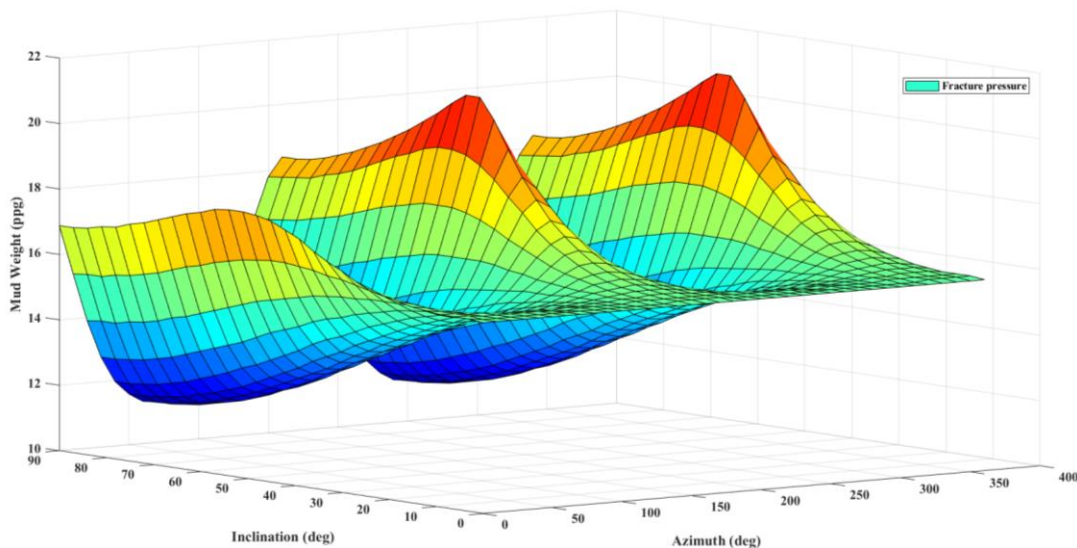
مسیر بهینه، پنجره ایمن گل حفاری مربوط به این مسیر بین ۱۳/۲۴ تا ۱۷/۶۶ معین گردید. برای این نقطه علاوه بر مسیر بهینه امکان حفاری بدون داشتن مشکلات مربوط به پایداری دیواره ی چاه برای زوایای انحراف کمتر از ۲۰ درجه میسر است هر چند در چنین شرایطی پنجره ایمن گل حفاری، کوچکتر از میزان مربوط به مسیر بهینه می باشد و در بهترین حالت به اندازه ۱/۷۷ پوند بر گالن می رسد.

برای نقطه ی سوم (عمق ۴۰۶۸ متری) میزان حداقل و حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از وقوع شکستگی های برشی و کششی در شکل های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است. مطابق با این شکل ها کمترین و بیشترین وزن گل مجاز برای این نقطه به ترتیب برابر با ۱۳/۲۴ و ۲۱/۱۱ پوند بر گالن می باشد. حفاری در جهت تنش افقی حداقل و با زاویه انحراف ۳۳ درجه نیز به عنوان بهترین مسیر برای حفر چاه پیشنهاد می گردد. به صورتی که مطابق با آنالیزهای صورت گرفته برای



شکل ۱۰- حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست برشی در نقطه ۳.

Fig. 10. Maximum mud weight required to prevent shear failure at the point 3.

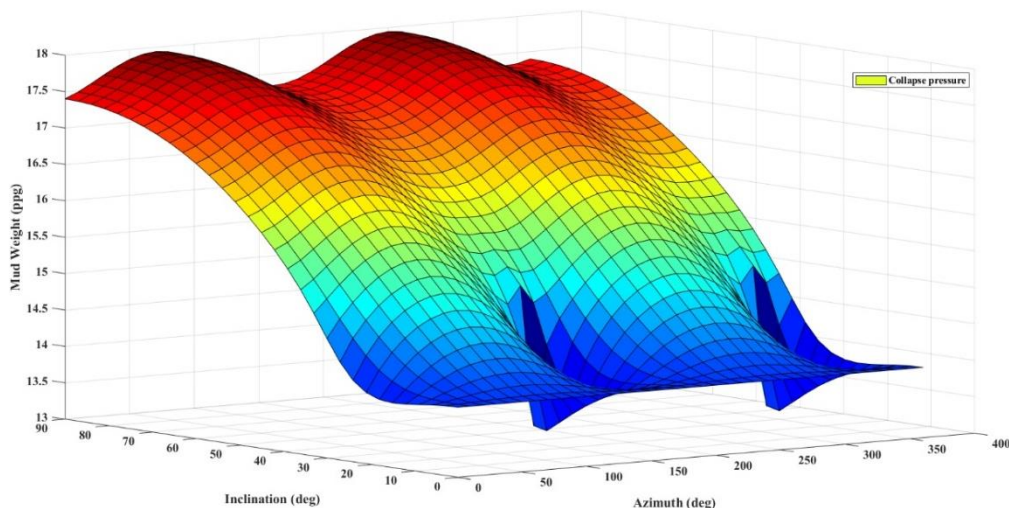


شکل ۱۱- حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست کششی در نقطه ۳.

Fig. 11. Maximum mud weight required to prevent tensile failure at the point 3.

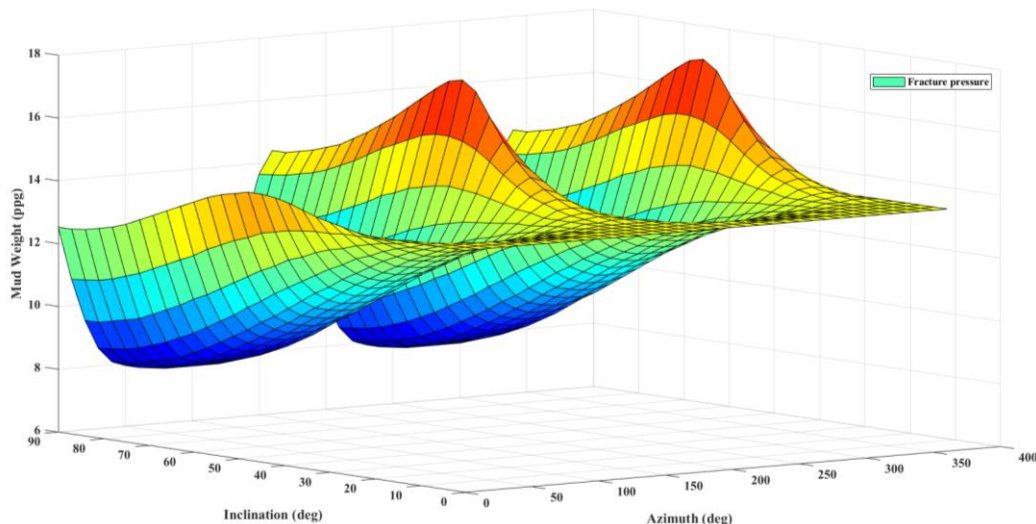
افقی با زوایای انحراف بین ۱۵ تا ۶۰ درجه امکان پذیر است. مسیر بهینه‌ی حفاری برای این نقطه نیز در جهت حداقل تنش افقی با زاویه‌ی ۲۷ تعیین گشت که در چنین شرایطی پنجره‌ی گل ایمن در حدود ۱ پوند بر گالن می‌باشد، که چنین شرایطی نیاز به برقراری یک کنترل فشار ته چاهی دقیق در هنگام حفاری می‌باشد. همچنین مطابق با این شکل‌ها، کمترین و بیشترین وزن گل مجاز برای این نقطه به ترتیب برابر با ۱۳/۱۶ و ۱۷/۵۲ پوند بر گالن تعیین گشت.

نقطه‌ی آخری که برای آنالیز پایداری دیواره‌ی چاه انتخاب گشت مربوط به عمق ۴۱۲۵ متری می‌باشد که میزان حداقل و حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از وقوع شکستگی‌های برشی و کششی برای آن در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده است. آنالیزهای پایداری صورت گرفته برای این نقطه نشان داد که این نقطه نسبت به سه نقطه دیگر دارای شرایط بحرانی‌تری می‌باشد. بطوری که فقط امکان حفاری بدون مشکل پایداری در جهات بسیار نزدیک به جهت حداقل تنش



شکل ۱۲- حداقل وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست برشی در نقطه ۴.

Fig. 12. Maximum mud weight required to prevent shear failure at the point 4.



شکل ۱۳- حداکثر وزن گل لازم برای جلوگیری از شکست کششی در نقطه ۴.

Fig. 13. Maximum mud weight required to prevent tensile failure at the point 4.

در محدوده ای از زوایا و شیب ها پایدار است، بنابراین حالت-هایی که ممکن است دیواره ی چاه در آن ها بشکند بسیار متعدد می باشند که در این قسمت به بیان نوع شکستگی در برخی از نقاط خاص بسنده شده است.

در انتها به بررسی انواع گسیختگی های ممکن برای ۴ نقطه ی مورد مطالعه پرداخته شده است که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است. به دلیل اینکه این بررسی برای تمام زوایا و شیب های ممکن و همچنین وزن گل های متفاوت آورده شده است و همچنین چاه مورد مطالعه، برای هر وزن گل فقط

جدول ۳- شرایط لازم برای انواع شکست های ممکن در نقاط مورد مطالعه.

Table 3. The required condition for different failure types to happen in the studied points.

Failure Types	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
SWBO	$0 \leq AZ \leq 180$ $0 \leq inc \leq 90$ $P_w = 10/85$	$0 \leq AZ \leq 180$ $0 \leq inc \leq 90$ $P_w = 10/85$	$0 \leq AZ \leq 180$ $0 \leq inc \leq 90$ $P_w = 10/85$	$0 \leq AZ \leq 180$ $10 \leq inc \leq 90$ $P_w = 10/85$
SHAE	-----	-----	-----	-----
SSKO	$0 \leq AZ \leq 180$ $Inc \leq 20$ $P_w = 14 \text{ ppg}$	$0 \leq AZ \leq 180$ $Inc \leq 10$ $P_w = 14 \text{ ppg}$	$0 \leq AZ \leq 180$ $Inc \leq 6$ $P_w = 13/1 \text{ ppg}$	$0 \leq AZ \leq 180$ $Inc \leq 10$ $P_w = 10/85 \text{ ppg}$
SDKO	-----	-----	-----	-----
SNBO	-----	-----	-----	-----
SLAE	$130 \leq AZ \leq 180$ $70 \leq Inc$ $P_w = 16 \text{ ppg}$	$130 \leq AZ \leq 180$ $60 \leq Inc$ $P_w = 17 \text{ ppg}$	$150 \leq AZ \leq 180$ $80 \leq Inc$ $P_w = 15 \text{ ppg}$	$140 \leq AZ \leq 180$ $75 \leq Inc$ $P_w = 15 \text{ ppg}$
TVER	$AZ \cong \sigma_H \text{ direction}$ $0 \leq inc \leq 90$ $P_w = 11/26 \text{ ppg}$	$50 \leq AZ \leq 90$ $70 \leq inc$ $P_w = 10/85 \text{ ppg}$	$30 \leq AZ \leq 110$ $40 \leq inc$ $P_w = 10/85 \text{ ppg}$	$AZ \cong \sigma_H \text{ direction}$ $45 \leq inc$ $P_w = 10/85 \text{ ppg}$
THOR	-----	-----	-----	-----
TCYL	-----	-----	-----	$AZ \cong 130 \text{ degree}$ $75 \leq Inc$ $P_w = 10/85 \text{ ppg}$

آنالیز حساسیت سنجی انتخاب شدند. آنالیزهای صورت گرفته بر روی این نقاط به دلیل در بر گرفتن اثر توامان جهت و شیب چاه بر روی مبحث پایداری دارای محاسبات فراوان و پیچیده-ای بودند که به همین دلیل در این مطالعه از نرم افزار متلب برای انجام چنین محاسباتی استفاده شد. نتایج آنالیزها نشان

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از معیارهای شکست کششی و موهر کلمب به بررسی پایداری دیواره ی چاه در سازند آسماری میدان نفتی اهواز پرداخته شد. چهار نقطه از چاه مورد مطالعه که دچار مشکلات پایداری دیواره ی چاه شده بودند برای انجام

همواره مخاطره آمیز خواهد بود و برای حفر چاه‌های آتی، حفاری در جهت تنش افقی حداقل و با شیب ۲۷ تا ۳۳ درجه به عنوان بهینه‌ترین مسیر ممکن پیشنهاد می‌شود که در این صورت وزن گل انتخابی می‌بایست بین ۱۳/۲۴ تا ۱۴/۱۶ پوند بر گالن انتخاب شود. بعلاوه بر اساس آنالیزهای صورت گرفته می‌توان بیان داشت که اتخاذ چنین رویکردی باعث کاهش مشکلات مربوط به ناپایداری دیواره‌ی چاه و توامان با آن کاهش زمان و هزینه‌ی عملیات حفاری می‌گردد.

داد که عمده مشکلات مربوط به ناپایداری در این چاه به دلیل انتخاب وزن گل پایین رخ داده اند. بر اساس آنالیزهای صورت گرفته می‌توان بیان کرد که عمده شکست‌های اتفاق افتاده در چاه مورد مطالعه از نوع گسیختگی برشی عرضی می‌باشد هرچند که برای نقطه‌ی آخر، گسیختگی ضربه‌ای کم عمق عامل افزایش قطر چاه تعیین گشت. همچنین بر اساس نتایج این مطالعه می‌توان نشان داد که حفاری چاه به صورت عمودی به دلیل کم عرض بودن پنجره‌ی ایمن گل حفاری

مراجع

- AlAjmi, A.M., Zimmerman, R.W., 2006. Stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion. *Environmental Earth Sciences* 43, 1200-1211. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.04.001>
- AlAjmi, A.M., Zimmerman, R.W., 2009. A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 69, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.05.018>
- Almasi, A., Mohsenipour, A., 2020. Determining the Mud Window, Geomechanical Model (MEM), and Well Wall Stability Analysis, Using Analytical and Numerical Methods in One of the Wells in Iran's Southwest Fields. *Advanced Applied Geology* 12(1), 1-11. <https://doi.org/10.22055/AAG.2020.34229.2135>
- Amiri, M., Lashkaripour, G.R., Ghabezloo, S., Moghaddas, N.H., Tajareh, M. H., 2019. Mechanical earth modeling and fault reactivation analysis for CO₂-enhanced oil recovery in Gachsaran oil field, southwest of Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 78, 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8062-1>
- Bordenave, M., Burwood, R., 1990. Source rock distribution and maturation in the Zagros orogenic belt: provenance of the Asmari and Bangestan reservoir oil accumulations. *Organic Geochemistry* 16, 369-387. [https://doi.org/10.1016/0146-6380\(90\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0146-6380(90)90055-5)
- Bordenave, M., Hegre, J., 2010. Current distribution of oil and gas fields in the Zagros Fold Belt of Iran and contiguous offshore as the result of the petroleum systems. *Geological Society, London, Special Publications* 330, 291-353.
- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., 2008. *Petroleum related rock mechanics*, second edition in Elsevier, University of Stavanger., Norway, PP. 59-74.
- Gholami, R., Moradzadeh, A., Rasouli, V., Hanachi, J., 2014. Practical application of failure criteria in determining safe mud weight windows in drilling operations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6(1), 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.11.002>
- Haidari, K., Amini, A., Aleali, M., Solgi, A., 2020. Distribution pattern of Ahwaz sandstone and Kalhur evaporite members of Asmari Formation in Dezful Embayment and Abadan plain, a basis for stratigraphic traps studies. *Geopersia* 10, 53-63. <https://doi.org/10.22059/GEOPE.2019.275999.648463>
- Hassanzadeh, M., Abdideh, M., 2021. Investigation of reactivation of fault and wellbore stability analysis by the depletion of hydrocarbon reservoirs. *Iranian Journal of Engineering Geology* 14, 1-22. DOI?
- Jafari, J., Mahboubi, A., Moussavi-Harami, R., Al-Aasm, I., 2020. The effects of diagenesis on the petrophysical and geochemical attributes of the Asmari Formation, Marun oil field, southwest Iran. *Petroleum Science* 17, 292-316. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00421-0>

- Khaksar Manshad, A.K., Jalalifar, H., Aslannejad, M., 2015. Analysis of vertical, horizontal and deviated wellbores stability by analytical and numerical methods. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 4, 359-369. <https://doi.org/10.1007/s13202-014-0100-7>
- Kidambi, T., Kumar, G.S., 2016. Mechanical Earth Modeling for a vertical well drilled in a naturally fractured tight carbonate gas reservoir in the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 141, 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2016.01.003>
- Ma, T., Chen, P., Yang, C., Zhao, J., 2015. Wellbore stability analysis and well path optimization based on the breakout width model and Mogi–Coulomb criterion. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 135, 678-701. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2015.10.029>
- Maleki, S., 2014. Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weigh window in drilling practice. *Earth-Science Reviews* 136, 36-58. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.010>
- Mirzaghobanali, A., Afshar, M., 2011. A mud weight window investigation based on the Mogi-Coulomb failure criterion and elasto-plastic constitutive model. *Petroleum Science and Technology* 29(2), 121-131. <https://doi.org/10.1080/10916460903330205>
- Moos, D., 2003. Comprehensive wellbore stability analysis utilizing quantitative risk assessment. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 38(3-4), 97-109. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(03\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(03)00024-X)
- Movahedinia, A.M., Asgari, M.K., Yarahmadi, M., 2013. Estimation of the optimal drilling mud pressure using different failure criteria in deviation wells, Case study: well 2sk 5 of Salman oil field. *Journal of Petroleum Research* 23, 104-112. <https://doi.org/10.22078/PR.2013.168>
- Nguyen, D., Miska, S., Yu, M., Saasen, A., 2010. Modeling thermal effects on wellbore stability, in *Proceedings Trinidad and Tobago Energy Resources Conference*. OnePetro. <https://doi.org/10.2523/133428-MS>
- Shi, X., Cai, W., Meng, Y., Li, G., Li, J., 2015. Wellbore stability analysis based on a new strength criterion. *Journal of Gas Science and Engineering* 27, 1005-1015. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.09.050>
- Taleghani, M.N., Habibnia, B., Motazedi, M.R., Khaledi, M.K., 2015. Geomechanical and well stability analysis in Darkhoil oil field with the purpose of hydraulic fracturing operation. *Iranian Journal of Mining Engineering* 10, 35-44. <https://doi.org/10.3390/en15217901>
- Tranggono, H., 2019. Wellbore Collapse Failure Criteria and Drilling Optimization. M.S thesis. University of Stavenger, Stavenger.
- Younessi, A., Rasouli, V., 2010. A fracture sliding potential index for wellbore stability analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47(6), 927-939. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.05.014>
- Yousefi, F., Molaii, F., Kadkhodaii, A., Talebi, M.H., 2018. Calculation of geomechanical parameters and wellbore stability using petrophysical in one of the oilfield, southern Persian Gulf. *Advanced Applied Geology* 9, 10-16. <https://doi.org/10.22055/AAG.2019.25731.1848>
- Zare-Reisabadi, M., Kaffash, A., Shadizadeh, S., 2012. Determination of optimal well trajectory during drilling and production based on borehole stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 56, 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.07.018>
- Zeynali, M.E., 2012. Mechanical and physico-chemical aspects of wellbore stability during drilling operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 82, 120-124. <https://doi.org/10.1016/j.petro.2012.01.006>
- Zhang, K., Zhang, L.L., Zhao, X.S., Wu, J., 2010. Graphene/polyaniline nanofiber composites as supercapacitor electrodes. *Chemistry of Materials* 22(4), 1392-1401. <https://doi.org/10.1021/cm902876u>
- Zoback, M.D., *Reservoir geomechanics*. 2010: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 206-331. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511586477>