Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

3D modeling to determine the geomechanical parameters of the Asmari reservoir and the principal stresses in one of the fields in southwestern Iran

Mohammad Reza Haddad Tehrani[1], Mehdi Talkhablou[2]✉ ,Mohammad Reza Asef [3], Mehdi Ostad Hasan [4]

1. PhD student, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Tehrani.freelancer@gmail.com
2. Assistant Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Talkhablou@khu.ac.ir
3. Associate Professor, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: Asef@khu.ac.ir
4. Professor, Faculty of Petroleum Engineering, Daqing University, China. E-mail: Mehdi.ostadhassan@ifg.uni-kiel.de

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 25 February 2025
Accepted 7 September 2025

Keywords:
Asmari reservoir, 3D geomechanical modeling, Sequential Gaussian Simulation, effective principal stress, sensitivity analysis, normal faulting regime.

ABSTRACT

Complex carbonate reservoirs, such as the Asmari Formation, present challenges to the accurate determination of geomechanical parameters and effective stresses due to high lithological and structural heterogeneity. The objective of this study is to develop a comprehensive three-dimensional model of geomechanical parameters and effective stresses in the Kupal oil field. Well log, core, and seismic data were used, and three-dimensional modeling was performed using the Sequential Gaussian Simulation (SGS) method based on variogram analysis. The prevailing stress regime was validated using FMI logs and wellbore breakout analysis. Additionally, a one-at-a-time sensitivity analysis was conducted on key parameters, including static Young's modulus, Poisson's ratio, cohesion, internal friction angle, and pore pressure. Results indicate that the maximum vertical effective stress (σ_v) is 87 MPa and the maximum horizontal effective stress (σH_{max}) is 127 MPa. Analysis of wellbore imaging data confirms a normal faulting stress regime ($\sigma_v > \sigma H_{max} > \sigma h_{min}$) in the field. Stress concentration around minor faults was also identified. The model was validated against one-dimensional models achieving 88% agreement. The findings of this study can be applied to well design, gas injection, and reservoir stability assessment in the Kupal field.

Introduction

The production of hydrocarbons from a reservoir or the injection of gasfor pressure maintenance can trigger numerous chemical and physical processes. During these activities, changes in pore pressure can cause the reservoir to expand or contract.. Consequently, the in-situ stress field around the reservoir may alter. A geomechanical model numerically represents the in-situ stress conditions and rock mechanics characteristics for a stratigraphic column in the field.

Geomechanical models typically link dynamic elasticity properties of the formation to equivalent static elasticity properties. These static elasticity properties are then used to determine formation strength and in-situ stresses. Geomechanics is important for wellbore stability, hydraulic fracturing, fault reactivation, early water production, surface subsidence, reservoir compaction, and flooding throughout the life of hydrocarbon fields. These events significantly impact reservoir performance and must be considered in monitoring, analysis, and production forecasting.

Applications of geomechanical models include:

- Predicting pore pressure and fracture gradient for casing design and optimal drilling mud weight selection.

Cite this article: Haddad Tehrani, M.R., Talkhablou, M., Asef, M. R., Ostad Hasan, M. (2025). 3D modeling to determine the geomechanical parameters of the Asmari reservoir and the principal stresses in one of the fields in southwestern Iran. Journal of Engineering Geology, 19 (2), 224-245. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1014282

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1014282

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

- Reducing the risk of pipe sticking due to wellbore instability.
- Choosing suitable completion types, maintaining perforation stability, and setting safe pressure drops to prevent sand production during production.
- Analyzing pore pressure decline during reservoir depletion, which can cause reservoir compaction, surface subsidence issues, casing collapse, and fault reactivation.

Geomechanical studies aim to construct and develop a mechanical earth model, providing a numerical representation of stress conditions and rock mechanics properties for specific stratigraphic sections in a field or basin. Simplified mechanical earth models include depth profiles of elastic or elastoplastic parameters, rock strength, and in-situ stresses for local stratigraphic sections.

Materials and Methods

Data and Information Used

To achieve the objective of the study, comprehensive field data wasrequired. Data from five production wells were used, along with the following:

-The initial dynamic reservoir model, indicating the number of layers and the reservoir overall shape .

-Underground contour maps (UGC) of all layers and sub-layers.

-Drilling reports for all wells.

-Completion reports for all wells.

-Field development plan reports.

-Formation evaluation reports for some wells.

-Routine core tests (porosity, permeability, fluid saturation, relative permeability, rock compressibility).

- Pore pressure distribution data throughout the reservoir.

Results and Discussion

Due to the lack of stress measurements in the study area, stress analysis was conducted based on theories and assumptions. Lithostatic pressure, also known as vertical stress, was calculated using a formula that considers the density of the overlying rocks. It was assumed that the stress regime in the Asmari reservoir area is normal. Stress state analysis followed Anderson's fault theory, considering the regional stress regime. Minimum and maximum horizontal stresses were calculated using established formulas.

First, 1D geomechanical models were created for five wells in the field in order to develop a 3D geomechanical model. These models were then developed using variogram-based methods, such as sequential Gaussian simulation, to create 3D models. Dynamic elastic parameters (Young's modulus, shear modulus, bulk modulus, and Poisson's ratio) for the Asmari reservoir formation were calculated using shear and compressional wave velocity data and rock mechanics test data. These dynamic parameters were converted to static parameters along the wellbore using rock mechanics test data. Other parameters such as cohesion, internal friction angle, and unconfined compressive strength (UCS) were also calculated.

Due to the lack of stress measurements in the study area, stress analysis was conducted based on theories and assumptions. Lithostatic pressure or vertical stress was calculated using a formula involving the density of overlying rocks. It was assumed that the stress regime in the Asmari reservoir area is normal. Stress state analysis followed Anderson's fault theory, considering the regional stress regime. Minimum and maximum horizontal stresses were calculated using established formulas.

3D Modeling of Elastic Parameters:

Since no stress measurements had been conducted in the study area, the stress state was determined based on theories and assumptions. For 3D modeling of lithostatic pressure or vertical stress, the stress was calculated using the density data of overburden rocks and surface topography data.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

Horizontal stresses were calculated using average strain ratios unser the assumption that the minimum horizontal stress is 0.6 times the vertical stress. After 3D modeling, the effective stresses were determined by subtracting the pore pressure from calculated stresses. The model showed that the minimum horizontal stress direction is northwest-southeast, aligning with the fracture direction in the wells. The stress values from the 3D model matched those from 1D models with over 86% accuracy.

Conclusions

The presented method demonstrates the complexity of creating a three-dimensional geomechanical model. Input parameters and identifying appropriate physical mechanisms are crucial in evaluating mechanical behavior. The analysis of the 3D geomechanical model assumed linear elasticity and lateral homogeneity of properties using available data.

In this study, a 3D geomechanical model of the stratigraphic column of a field in southwestern Iran was prepared. The size and direction of the field's governing stresses were calculated based on geological, geomechanical, geophysical, and reservoir engineering data. According to the model, the maximum vertical stress governing the field is 127 MPa, and the maximum horizontal stress is 87 MPa. Additionally, different geostatistical methods were used in the 3D modeling, with the sequential Gaussian simulation method based on variograms providing the best match.

This method showed more than 95% agreement between real data and modeled data for rock mechanics parameters such as Young's and shear moduli and more than 88% agreement for stress values modeled in three dimensions compared to stress values from 1D geomechanical models.

In general, this study illustrates how to create a geomechanical model that can later be used to predict the mechanical behavior of scenarios involving oil extraction or gas injection in a reservoir, as well as estimating reservoir compaction and surface subsidence. Finally, due to the high precision required for geomechanical parameters, a sensitivity analysis is necessary to obtain changes in deformation and stress.

دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

دانشگاه خوارزمی

مدل‌سازی سه‌بعدی به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی مخزن آسماری و تنش‌های اصلی (یکی از میادین جنوب غرب ایران)

محمدرضا حدادطهرانی [۱]، مهدی تلخابلو [۲] ✉، محمدرضا آصف [۳]، مهدی استاد حسن [۴]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران. رایانامه: Tehrani.freelancer@gmail.com
۲. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران. رایانامه: Talkhablou@khu.ac.ir
۳. دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی تهران، ایران. رایانامه: Asef@khu.ac.ir
۴. استاد، دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه داچینگ، چین. رایانامه: Mehdi.ostadhassan@ifg.uni-kiel.de

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

کلیدواژه‌ها: مخزن آسماری، مدل‌سازی سه‌بعدی ژئومکانیکی، شبیه‌سازی متوالی گوسی، تنش اصلی مؤثر، تحلیل حساسیت، رژیم تنش نرمال.

چکیده

در مخازن کربناته پیچیده مانند سازند آسماری، ناهمگنی بالای لیتولوژیکی و ساختاری، تعیین دقیق پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های مؤثر را به چالش می‌کشد. این پژوهش با هدف توسعه یک مدل سه‌بعدی جامع از پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های مؤثر در میدان نفتی کوپال انجام شد. برای این منظور، ضمن استفاده از داده‌های چاه‌نگاری، مغزه و لرزه‌ای، مدل‌سازی سه‌بعدی با به‌کارگیری روش شبیه‌سازی متوالی گوسی(SGS) و بر اساس تحلیل واریوگرام انجام گرفت. رژیم تنش حاکم با استفاده از تحلیل داده‌های چاه‌نگاری تصویری (FMI) و ریزش دیواره چاه (Wellbore Breakout) تأیید شد. همچنین، یک تحلیل حساسیت تک متغیره بر روی پارامترهای کلیدی شامل مدول یانگ استاتیک، نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و فشار منفذی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تنش قائم مؤثر ۸۷ مگاپاسکال و بیشترین تنش افقی مؤثر حداکثر ۱۲۷ مگاپاسکال است. تحلیل داده‌های چاه‌نگاری، رژیم تنش نرمال ($\sigma v>\sigma Hmax>\sigma hmin$) را در میدان تأیید می‌کند. همچنین، تمرکز تنش در اطراف گسل‌های فرعی شناسایی شد. مدل با تطابق ۸۸ درصدی با نتایج مدل‌های یک‌بعدی اعتبارسنجی شد. یافته‌های این تحقیق می‌توانند در طراحی چاه، تزریق گاز و ارزیابی پایداری مخزن میدان کوپال مورد استفاده قرار گیرند.

مقدمه

تولید از مخزن هیدروکربور و یا تزریق گاز به آن به‌منظور فشار افزایی، ممکن است فرآیندهای شیمیایی و نیز فیزیکی زیادی را برانگیخته نماید. در طول این اقدام‌ها، تغییر فشار منفذی می‌تواند باعث انبساط و یا انقباض مخزن شود. در نتیجه میدان تنش درجا در اطراف مخزن ممکن است تغییر کند. مدل ژئومکانیکی نمایشی عددی از وضعیت تنش‌های درجا و ویژگی‌های مکانیک سنگ برای یک ستون چینه‌شناسی در میدان می‌باشد (Orlic et al., 2001). مدل ژئومکانیکی در حالت کلی در ابتدا ویژگی‌های الاستیسیته دینامیک سازند را به ویژگی‌های الاستیسیته استاتیک معادل آن مرتبط می‌سازد که در مرحله بعد، این ویژگی‌های الاستیسیته استاتیک برای تعیین مقاومت سازند و تنش‌های در جای زمین به کار می‌روند. اهمیت ژئومکانیک در پایداری دیواره چاه، شکافت هیدرولیکی، فعالیت مجدد گسل، تولید آب زود هنگام، فرونشست بالای سطح، تراکم مخزن و سیلاب زنی در طول عمر میادین هیدروکربنی به‌خوبی آشکار است. این حوادث تأثیر مهمی روی عملکرد مخزن دارند و باید اثرشان را در نظارت، تحلیل و پیش‌بینی تولید لحاظ کرد

استناد: حدادطهرانی، م. ر.، تلخابلو، م.، آصف، م. ر.، استاد حسن، م. (۱۴۰۴). مدل‌سازی سه‌بعدی به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی مخزن آسماری و تنش های اصلی(یکی از میادین جنوب غرب ایران). مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۲)، ۲۲۴-۲۴۵. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1014282

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

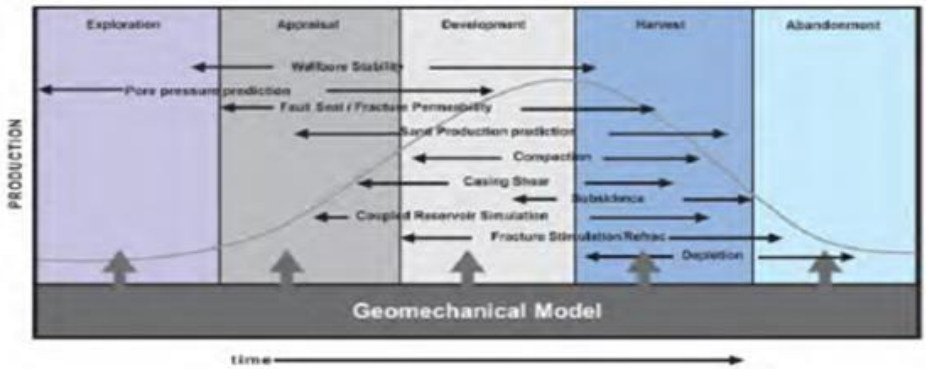
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

(Freeman et al., 2008). برخی از کاربردهای مدل ژئومکانیکی عبارت‌اند از:

پیش‌بینی فشار منفذی و گرادیان ایجاد شکاف برای طراحی لوله جداری و انتخاب وزن گل حفاری بهینه، کاهش ریسک گیر کردن لوله‌ها به دلیل ناپایداری دیواره چاه، انتخاب نوع تکمیل مناسب، حفظ پایداری مشبک‌ها و تنظیم افت فشار ایمن، جلوگیری از تولید شن در زمان تولید

بررسی افت فشار منفذی در هنگام تخلیه مخزن که باعث فشردگی مخزن و مشکلات نشست سطحی، مچاله شدن لوله‌های جداری و فعال شدن مجدد گسل‌ها می‌شود (Zoback, 2009).

شکل (۱) نمایی از کاربردهای مختلف مدل ژئومکانیکی را نشان می‌دهد. می‌توان گفت هدف اصلی مطالعات ژئومکانیکی ساخت و ایجاد مدل مکانیکی زمین می‌باشد. مدل مکانیکی زمین، بیانی عددی از حالت تنش و ویژگی‌های مکانیکی سنگ برای یک مقطع چینه‌ای خاص در یک میدان و یا حوزه است. در حالت ساده یک مدل مکانیکی زمین شامل پروفایل‌های عمقی از پارامترهای الاستیک و یا الاستوپلاستیک، مقاومت سنگ و تنش‌های زمین مربوط به مقطع چینه‌شناسی محلی است (Plumb et al., 2000).



شکل۱. نمایی از کاربردهای مختلف مدل ژئومکانیک در طول توسعه یک میدان هیدروکربور
Fig.1. Overview of the various applications of the geomechanical model during the development of a hydrocarbon field

مطالعاتی در خصوص ویژگی‌های ژئومکانیکی واحدهای سنگی صورت گرفته که از جمله می‌توان به مطالعه صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2022) و رضائیان و همکاران (Rezaeiyan et al., 2022) اشاره کرد. در زمینه ساخت مدل‌های ژئومکانیکی نیز مطالعات بسیاری صورت گرفته است. القحطانی و زیلور (Al-Qahtani and Zillur, 2001) یک مدل ریاضی را برای مدل‌سازی و تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی در یکی از میادین نفتی عربستان ارائه کردند. الرویلی و چاردک (Al- Ruwaili and Chardac 2003) مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی را برای میدان قوار عربستان طراحی کرده و برای تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی سازند، روابطی را ارائه نمودند. رمجان و همکاران (Ramjohn et al., 2018) یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی را برای تحلیل پایداری چاه در یکی از میادین نفتی ترینیداد و توباگو طراحی نمودند. باقری و همکاران (Bagheri et al., 2021) برای تحلیل پایداری چاه یک مدل ژئومکانیکی را در یک سازند کربناته ارائه کردند.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در مدل‌سازی ژئومکانیکی با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین (AI/ML) صورت گرفته است که دقت پیش‌بینی تنش و پایداری چاه را افزایش داده‌اند که می‌توان به تحقیقات گائو و همکاران (Gao et al., 2023) و اگانکونل

و همکاران (Ogunkunle et al., 2022) و ملائی و همکاران (Mollaei et al., 2024) اشاره کرد.

همچنین، توسعه مدل‌های کوپل شده ترموهیدرومکانیکی (THM) امکان شبیه‌سازی رفتار پیچیده مخزن در شرایط تزریق و برداشت را فراهم کرده است که از جمله می‌توان به تحقیقات ژائو و همکاران (Zhao et al., 2024) اشاره کرد. این پیشرفت‌ها، نیاز به به‌روزرسانی روش‌های سنتی مدل‌سازی را اجتناب‌ناپذیر کرده است.

با این حال، بررسی انتقادی این مطالعات نشان می‌دهد که مدل حاضر در این تحقیق در چند جنبه کلیدی بهبود یافته است. اولاً، در حالی که مطالعات قبلی القحطانی و زیلور (Al-Qahtani and Zillur, 2001) و الرویلی و چاردک (Al-Ruwaili and Chardac, 2003) از مدل‌های دوبعدی یا یک‌بعدی استفاده کرده‌اند، مدل حاضر یک مدل سه‌بعدی کامل است که با استفاده از روش‌های زمین‌آماری پیشرفته (شبیه‌سازی متوالی گوسی)، توزیع فضایی پارامترها را به‌طور دقیق‌تری بازتولید می‌کند. ثانیاً، در این تحقیق برای اولین بار در منطقه مورد مطالعه، از داده‌های چاه‌نگاری تصویری (FMI) برای تأیید رژیم تنش نرمال استفاده شده است، در حالی که مطالعات قبلی بر اساس فرض‌های منطقه‌ای بوده‌اند. علاوه بر این، انجام تحلیل حساسیت جامع و بررسی تأثیر گسل‌های فرعی بر توزیع تنش، از دیگر بهبودهای این مدل محسوب می‌شوند. همچنین، چالش‌های مشترکی بین این مطالعات وجود دارد، از جمله: عدم دسترسی به داده‌های مستقیم تنش، ناهمگنی بالای سازند آسماری، و تأثیر گسل‌های فرعی بر پایداری چاه. این چالش‌ها نشان می‌دهند که مدل‌سازی ژئومکانیکی در مخازن کربناته پیچیده، نیازمند تلفیق دقیق داده‌های چاه، لرزه و زمین‌شناسی است.

در تحقیق حاضر سعی شده است در ابتدا چگونگی ایجاد مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی برای هر چاه از میدان توصیف شود و در مرحله بعد به چگونگی ساخت مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی بر پایه مدل استاتیک سه‌بعدی به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی مخزن و تنش‌های اصلی در یکی از میادین جنوب‌غرب ایران (میدان کوپال) پرداخته شود.

میدان مورد مطالعه

میدان نفتی کوپال، یکی از میادین مهم نفتی در فروافتادگی دزفول، جنوب غرب ایران، واقع شده است. این میدان در یک ساختار تاقدیسی با روند شمال غربی- جنوب شرقی (روند کلی زاگرس) قرار دارد و سازند آسماری به‌عنوان اصلی‌ترین مخزن هیدروکربوری در آن شناخته می‌شود.

سازند آسماری (الیگو- میوسن) به‌صورت یک سری از مارن، شیل و سنگ‌آهک‌های کربناته با تخلخل و تراوایی متغیر است. عمق سازند آسماری در این میدان بین ۲۷۰۰ تا ۳۲۰۰ متر متغیر است. این سازند دارای ناهمگنی بالای لیتولوژیکی و ساختاری است که از چالش‌های اصلی مدل‌سازی ژئومکانیکی در این منطقه محسوب می‌شود(Mirzaee Mahmoodabadi and Zahiri, 2023).

از نظر ژئومکانیکی، منطقه تحت رژیم تنش غالب زاگرس قرار دارد که اغلب به‌صورت رژیم نرمال یا گسلی- نرمال است.

این میدان به دلیل پیچیدگی‌های ساختاری و لیتولوژیکی، به‌عنوان یک مطالعه موردی مناسب برای توسعه یک مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی انتخاب شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

با توجه به هدف تحقیق، مجموعه‌ای کامل از داده‌های میدان مورد مطالعه مورد نیاز بود. در این راستا داده‌های ۵ چاه تولیدی از میدان مدنظر (کوپال در شرق اهواز) مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر آن از داده‌های زیر نیز در این راستا استفاده گردید:

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

مدل دینامیکی اولیه مخزن که در آن تعداد لایه‌ها و شکل کلی مخزن مشخص گردید.

نقشه‌های هم‌تراز تحت‌الارضی (UGC) از کلیه لایه‌ها و زیرلایه‌های مخزن (شکل ۲)

گزارش حفاری تمامی چاه‌ها

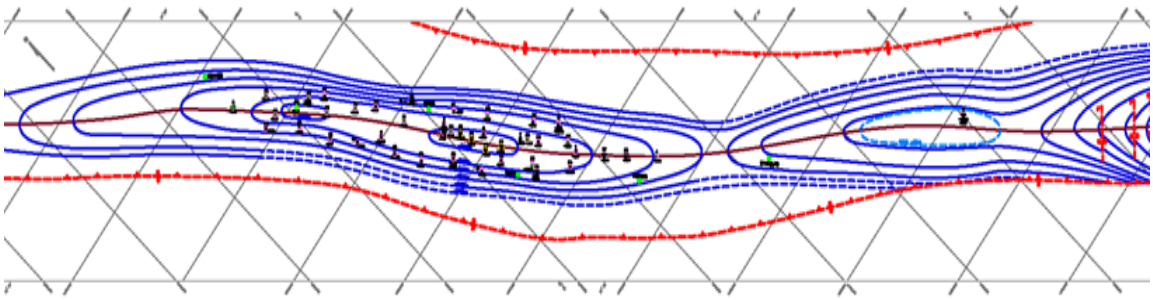
گزارش تکمیل چاه تمامی چاه‌ها

گزارش طرح توسعه میدان

گزارش‌های ارزیابی سازند برای برخی چاه‌ها

آزمایش‌های معمول مغزه (تخلخل، تراوایی / اشباع سیال / تراوایی‌های نسبی / تراکم‌پذیری سنگ)

داده‌های توزیع فشار منفذی در کل مخزن



شکل۲. نقشه هم‌تراز زیرسطحی سازند آسماری میدان نفتی کوپال

Fig.2. Subsurface isochron map of the Asmari Formation in the Kupal field

مدل‌سازی سه‌بعدی ویژگی‌های مخزن

برای مدل‌سازی، ویژگی‌های تخلخل مؤثر، تراوایی مطلق، اشباع آب از داده‌های چاه‌پیمایی مرتبط با آن ویژگی در تمامی چاه‌ها، که توسط داده‌های مغزه واسنجی شده بودند، استفاده شد. در این راستا از روش‌های زمین آماری واریوگرام مبنا استفاده گردید. لازم به ذکر است که داده‌های تخلخل مؤثر و همچنین تراوایی موجود در هر چاه، با توجه به داده های آزمایش‌های مغزه به‌دست‌آمده‌اند. در واقع در این تحقیق این داده‌ها به‌صورت تصحیح شده در دسترس قرار گرفته‌اند.

نتایج و بحث

مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی

به منظور ساخت مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی، در ابتدا مدل های یک‌بعدی مکانیکی زمین، برای ۵ چاه از میدان مورد مطالعه (میدان کوپال) ساخته شد و سپس با کمک روش های واریوگرام مبنا، نظیر روش شبیه‌سازی متوالی گوسی مدل‌های مذکور برای ایجاد مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی در سه بعد توسعه داده شدند. در اینجا با استفاده از داده‌های سرعت امواج برشی و فشاری و نیز داده‌های مربوط به آزمایش‌های مکانیک سنگی، در ابتدا پارامترهای الاستیک دینامیک نظیر مدول‌های یانگ، برشی و بالک و نسبت پواسون برای سازند مخزنی آسماری مورد محاسبه قرار گرفتند و نهایتاً با کمک داده‌های حاصل از آزمایش‌های مکانیک سنگی بر روی مغزه‌های موجود، مقادیر پارامترهای الاستیک دینامیک به مقادیر الاستیک استاتیک در طول چاه تبدیل شدند. همچنین به‌واسطه تطابق داده‌های مکانیک سنگی و سنگ‌شناسی، دیگر پارامترها نظیر چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت فشاری نامحصور (UCS) نیز برای کل طول چاه محاسبه شدند.

پس از آن برای تحلیل و آنالیز حالت تنش، با توجه به اینکه تا به حال در ناحیه مورد مطالعه هیچ‌گونه اندازه‌گیری تنشی انجام نشده است، حالت تنش بر اساس تئوری‌ها و فرضیات

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

مربوط به چاه تعیین شد. فشار لیتوستاتیکی یا تنش قائم، فشار یا تنشی است که از طرف لایه‌های بالایی و وزن آن‌ها اعمال می‌شود. فشار روباره در عمق z توسط معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$P(z) = Po + g\int_{o}^{z} \rho(z)\, dz \qquad (۱)$$

که در آن $\rho(z)$ چگالی سنگ‌های روباره در عمق z و g شتاب زمین است. Po فشار مبنا می‌باشد (مانند فشار در سطح). پروفایل تنش قائم بر اساس چگالی لایه‌ها تعیین می‌گردد. اطلاع از رژیم تنش حاکم بر منطقه‌ای که بر روی آن مطالعه می‌شود، بسیار مهم می‌باشد، بنابراین می‌توان رابطه‌های مناسب و دقیقی برای تعیین تنش‌ها را انتخاب کرده و تفاسیر دقیقی را ارائه داد. با همه این تفاسیر، اطلاعات دقیق موجود مبنی بر چگونگی رژیم تنش در منطقه مخزن آسماری حکایت از وجود رژیم نرمال در منطقه را دارد.

آنالیز حالت تنش برآورد تنش‌های برجا

با توجه به اینکه میدان کوپال دقیقاً بر روی فروافتادگی دزفول قرار دارد و محور تاقدیس آن روندی شمال غربی- جنوب شرقی (روند زاگرس) را دنبال می‌کند، می‌توان رژیم تنشی حاکم بر آن را با پیروی از رژیم تنش غالب بر حوزه زاگرس دارای رژیم نرمال دانست. همچنین نتایج تحلیل بر روی داده‌های چاه‌نگاری تصویری (FMI) و داده‌های تحلیل ریزش دیواره چاه (Wellbore Breakout) که برای چاه‌های ۳ و ۱۳ میدان کوپال انجام شد نشان می‌دهند که:

الگوی ریزش دیواره چاه (Breakout) در این چاه‌ها به‌صورت دو قطبی و در جهت شمال غربی- جنوب شرقی است، این جهت‌گیری عمود بر جهت تنش افقی حداقل (σh_{min}) است، بنابراین، جهت تنش افقی حداکثر (σH_{max}) به سمت شمال شرقی- جنوب غربی است. همچنین، شکستگی‌های افقی (Tensile Fractures) در این چاه‌ها در جهت شمال شرقی- جنوب غربی مشاهده شدند که با جهت σH_{max} هم‌راستا است. این یافته‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که: $\sigma_v > \sigma H_{max} > \sigma h_{min}$ که تعریف یک رژیم تنش نرمال است. همچنین، با مقایسه این داده‌ها با نقشه گسل‌های منطقه، تأیید شد که هیچ گسل فعالی در نزدیکی میدان وجود ندارد که بتواند این رژیم تنش را مختل کند. بنابراین، داده‌های چاه‌نگاری به‌طور مستقیم از یک رژیم تنش نرمال پشتیبانی می‌کنند.

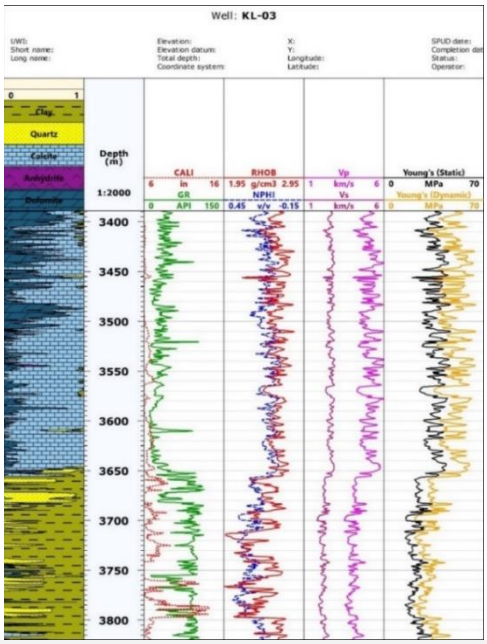
بنابراین همانند اکثر شرایط مرسوم، رژیم منطقه نرمال در نظر گرفته شده است و بر اساس تئوری گسلش اندرسون و نیز روش آزمون و خطا (مقایسه با نمودارهای تصویری و مشاهده شکستگی‌ها) مقدار تنش افقی حداقل را برابر ۰/۶ تنش قائم در نظر گرفته و پس از محاسبه نسبت کرنش‌ها در راستاهای x و y در معادله (۲)، تنش افقی حداکثر، بر اساس معادله (۳) محاسبه‌شده است که در آن‌ها، P_p فشار منفذی، θ نسبت پواسن، E مدول یانگ، α ضریب بایوت، E_X کرنش در راستای x و E_y کرنش در راستای y می‌باشد. شکل (۳ و ۴) نمونه مدل یک‌بعدی ژئومکانیکی برای دو نمونه از چاه‌ها را نشان می‌دهد.

$$\sigma_h = \frac{\theta}{1-\theta}\sigma_v + \frac{1-2\theta}{1-\theta}\alpha P_p + \frac{E}{1-\theta^2}\varepsilon_x + \frac{\theta E}{1-\theta^2}\varepsilon_y \qquad (۲)$$

$$\sigma_H = \frac{\theta}{1-\theta}\sigma_v + \frac{1-2\theta}{1-\theta}\alpha P_p + \frac{E}{1-\theta^2}\varepsilon_y + \frac{\theta E}{1-\theta^2}\varepsilon_x \qquad (۳)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

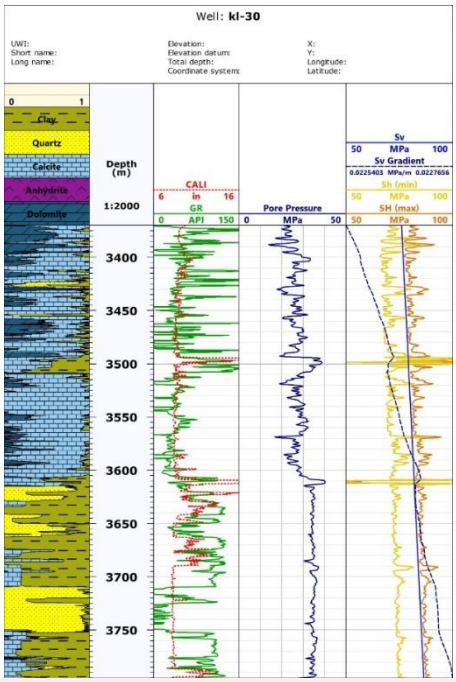
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]



شکل۳. مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی طراحی شده برای چاه ۳ میدان کوپال

Fig.3. One-dimensional geomechanical model designed for Well 3 of the Kupal field

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]



شکل۴. مدل ژئومکانیکی یک‌بعدی طراحی شده برای چاه ۳۰ میدان کوپال

Fig.4. One-dimensional geomechanical model designed for Well 30 of the Kupal field

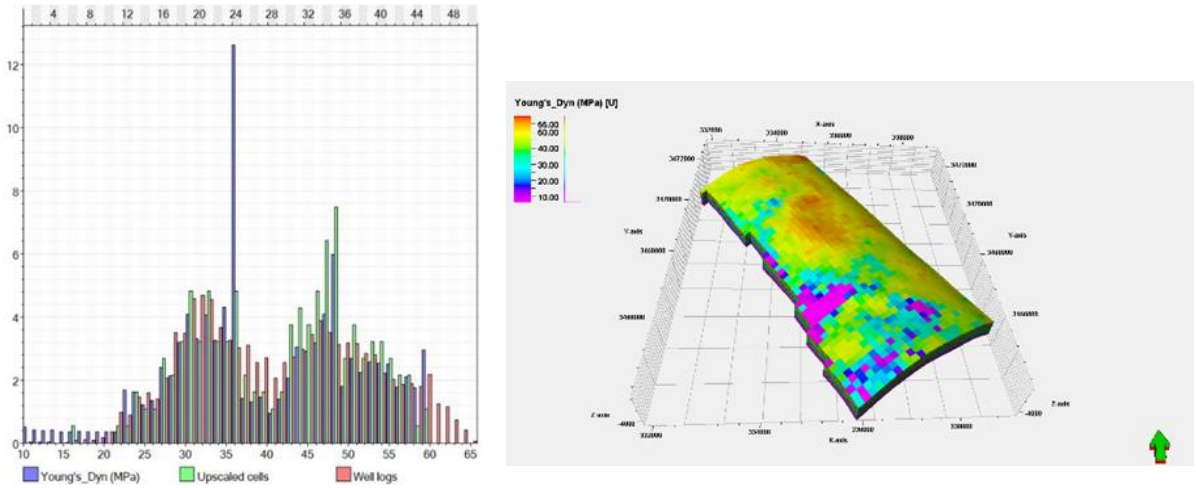
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

مدل‌سازی سه‌بعدی پارامترهای الاستیک

برای ایجاد یک مدل ژئومکانیکی سه‌بعدی، در مرحله اول می بایست به مدل‌سازی پارامترهای ژئومکانیکی نظیر نسبت

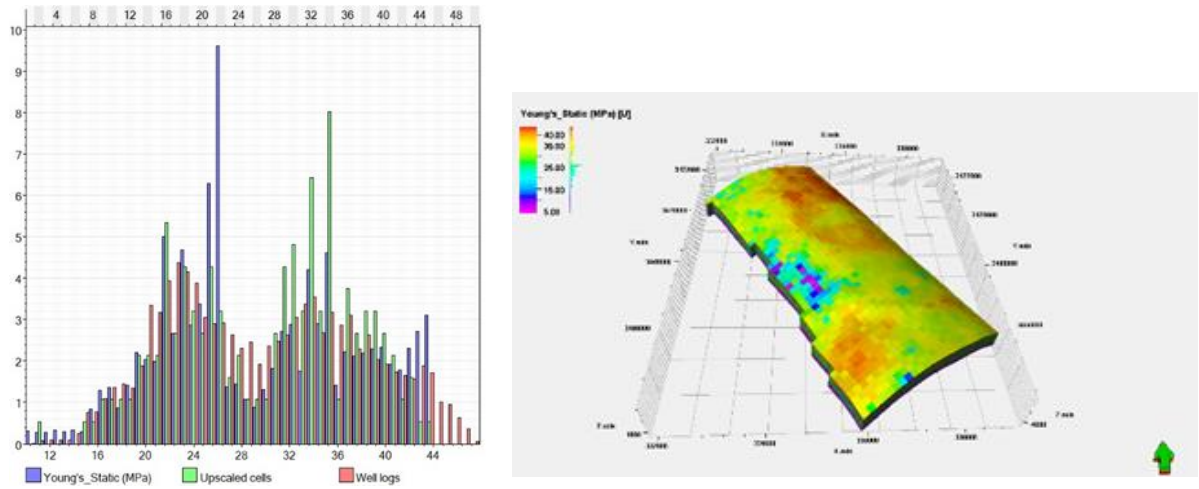
پواسون، مدول‌های یانگ، برشی و بالک و نیز مقاومت فشاری نامحصور پرداخت. به منظور مدل‌سازی این پارامترها همانند مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل و تراوایی، از روش شبیه‌سازی متوالی گوسی استفاده شده است. به همین دلیل برای هر یک از این پارامترها، به‌صورت مجزا، واریوگرافی صورت گرفت و نیز تابع توزیع مناسبی برای آن‌ها تعیین شد. در این تحقیق مدل سه‌بعدی ژئومکانیک، بر اساس داده‌های چاه‌های شماره ۳ ، ۵ ، ۶ ،۱۳ ، ۳۰ و ۴۰ ساخته شده و برای راستی آزمایی مدل ایجاد شده، از مقایسه داده‌های شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های واقعی چاه شماره ۴۱ کمک گرفته شده است. شکل‌های ۵ تا ۱۲ نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی و واریوگراف را نمایش می‌دهد.



شکل۵. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی مدول یانگ دینامیکی

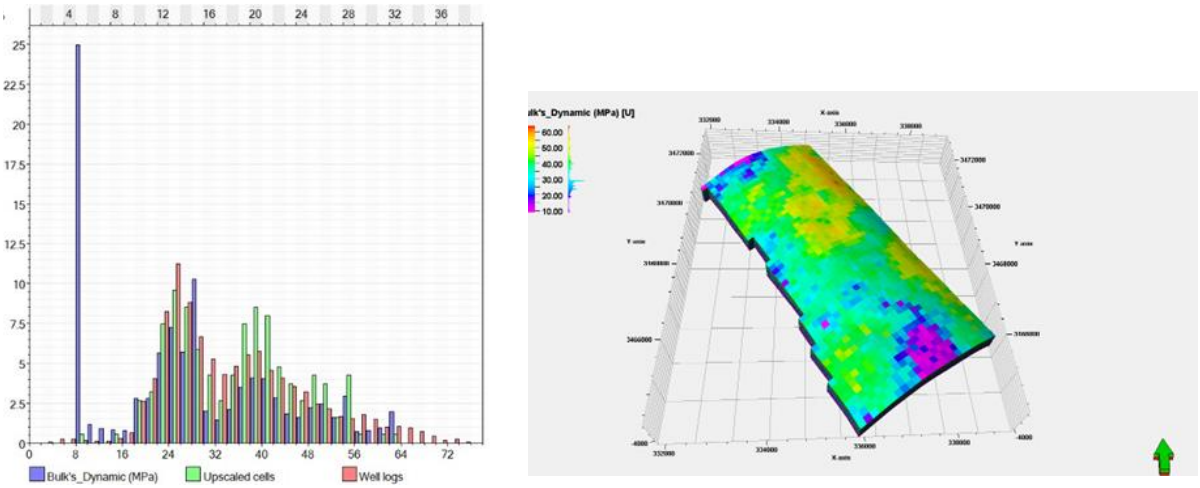
Fig.5. Three-dimensional model and variography of dynamic Young model

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۶. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی مدول یانگ استاتیکی

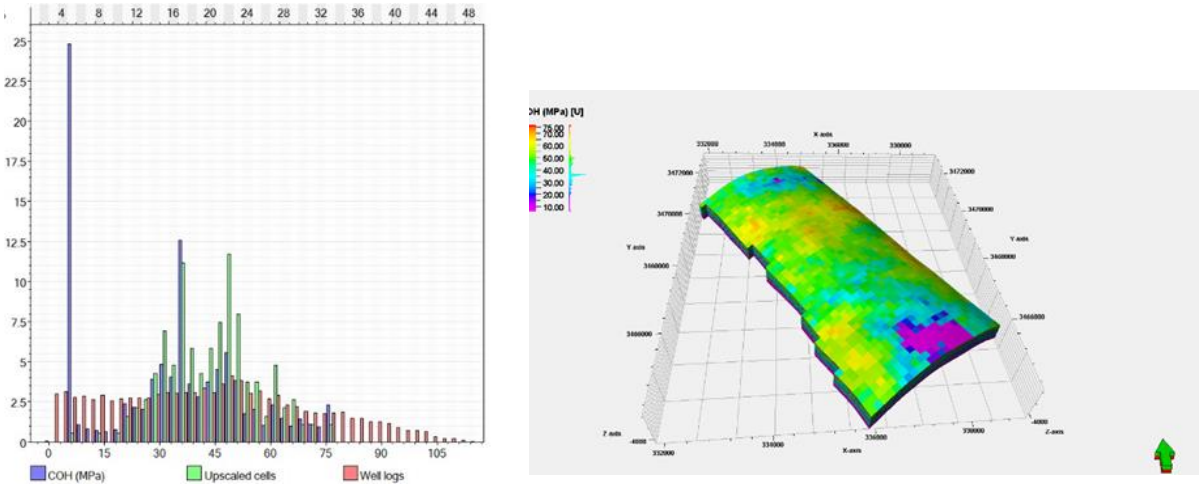
Fig.6. Three-dimensional model and variography of static Young's modulus



شکل۷. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی مدول بالک دینامیکی

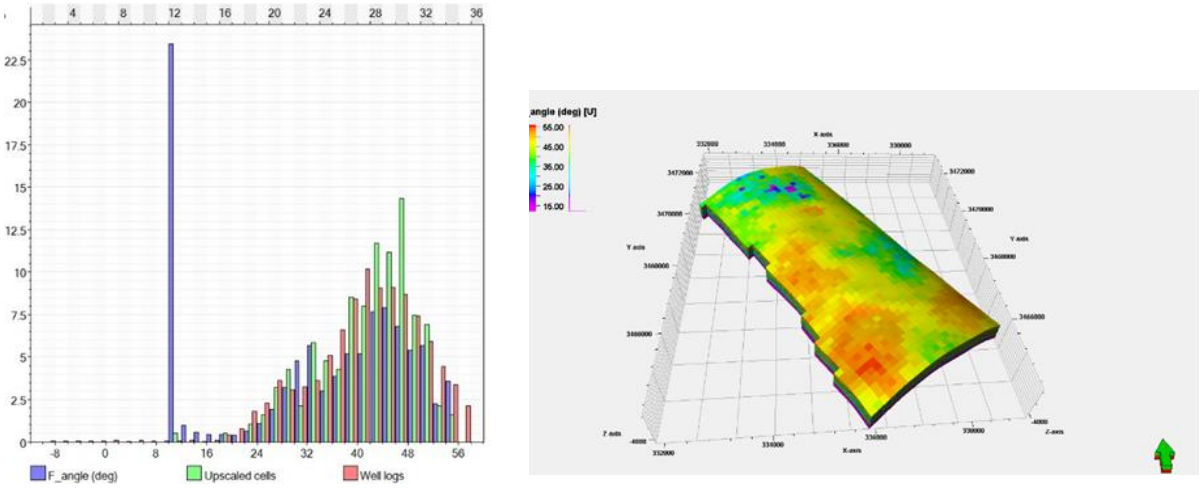
Fig.7. Three-dimensional model and variography of the dynamic bulk module

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۸. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی چسبندگی

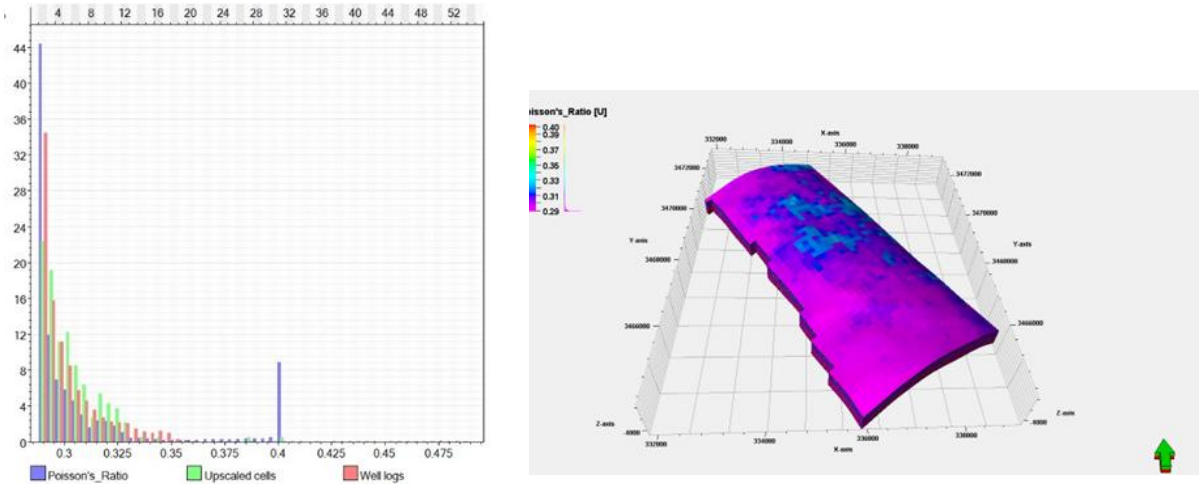
Fig.8. Three-dimensional model and variography of cohesion



شکل۹. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی زاویه اصطکاک داخلی

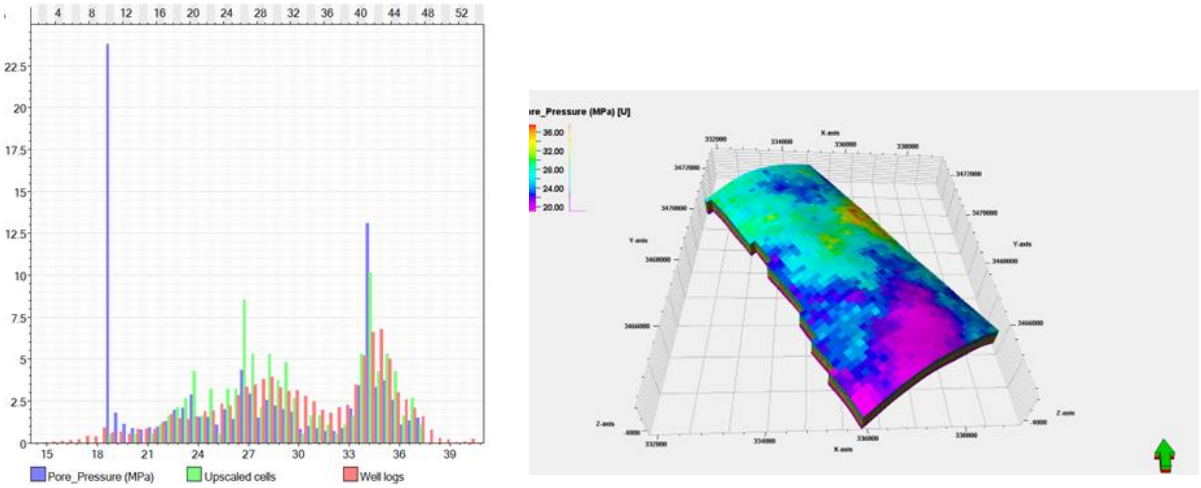
Fig.9. Three-dimensional model and variography of the internal friction angle

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۱۰. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی ضریب پواسون

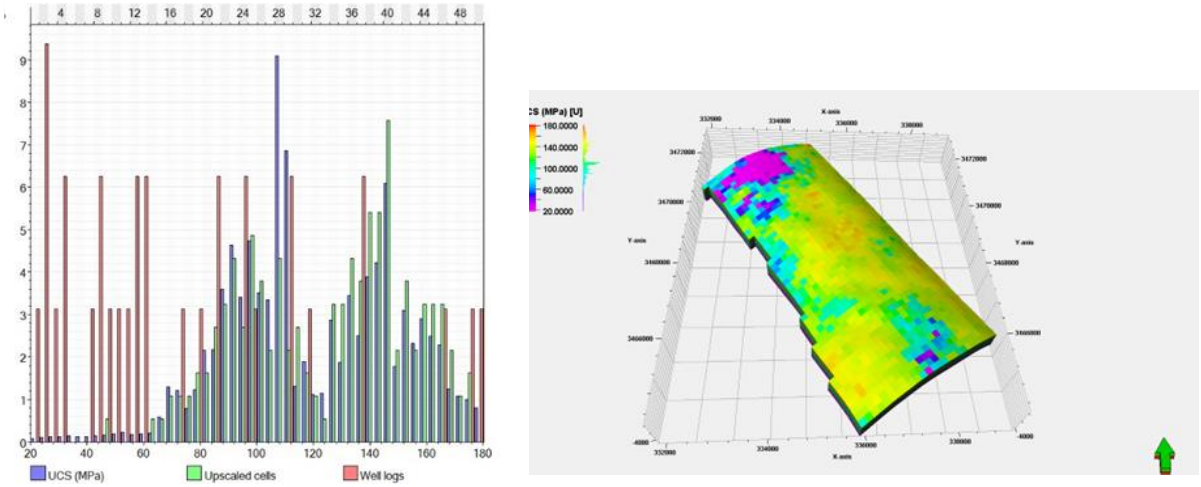
Fig.10. Three-dimensional model and variography of Poisson's ratio



شکل۱۱. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی فشار منفذی

Fig.11. Three-dimensional model and variography of Pore pressure

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۱۲. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی مقاومت تک محوره

Fig.12. Three-dimensional model and variography of uniaxial compressive strength

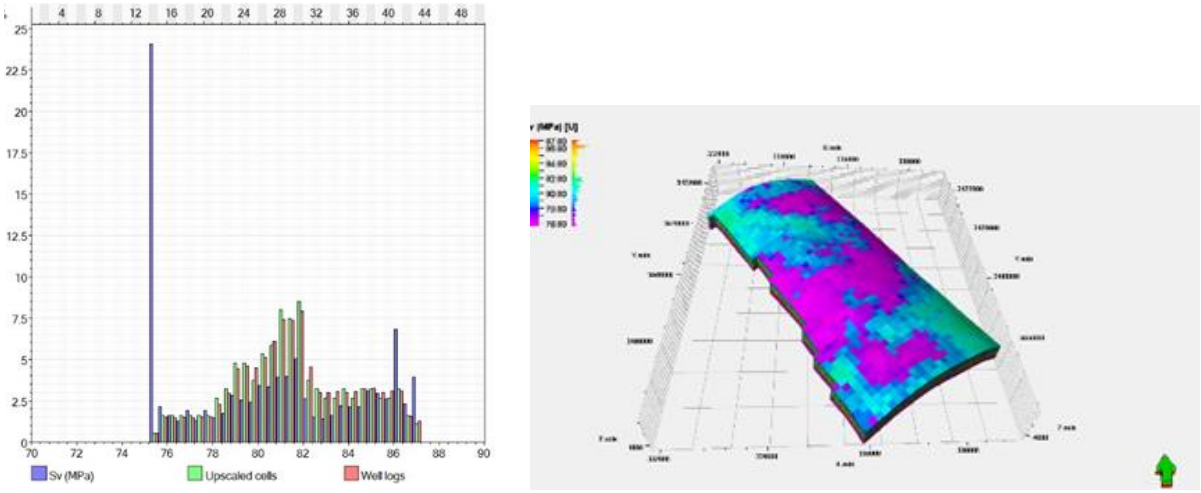
مدل‌سازی سه‌بعدی تنش‌های اصلی

با توجه به اینکه تا به حال در میدان مورد مطالعه هیچ‌گونه اندازه‌گیری تنشی انجام نشده است، در این تحقیق حالت تنش بر اساس تئوری‌ها و فرضیات مربوط به چاه تعیین شده است. برای مدل‌سازی سه‌بعدی فشار لیتوستاتیکی یا تنش قائم، این تنش با استفاده از داده‌های چگالی سنگ‌های روباره مخزن (از سطح زمین تا بالای سازند آسماری) و نیز استفاده از داده توپوگرافی سطح زمین، در سه بعد مورد محاسبه قرار گرفت و مدل‌سازی شد.

همچنین با توجه به مقادیر میانگین نسبت کرنش‌ها در راستاهای x و y که از مدل‌های یک‌بعدی ژئومکانیکی چاه‌ها در مرحله قبل به‌دست آمدند و نیز با این فرض که مقدار تنش افقی حداقل برابر ۰/۶ تنش قائم در نظر گرفته شد، با استفاده از معادلات (۲) و (۳)، تنش‌های افقی حداکثر و حداقل، محاسبه شدند. در این راستا بعد از مدل‌سازی سه بعدی این تنش‌ها، برای تبدیل آن‌ها به تنش‌های مؤثر، با توجه به مدل سه‌بعدی فشار منفذی که به‌عنوان داده ورودی در دسترس بود، برای هر نقطه از میدان، مقدار فشار منفذی از مقدار محاسبه‌شده تنش‌ها کم شد تا مدل سه‌بعدی کلیه تنش‌های مؤثر قائم و افقی برای کل میدان مدل‌سازی شود. در شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نتایج این مدل‌سازی آورده شده است. قابل‌ذکر است که با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته، جهت تنش افقی حداقل، شمال غربی- جنوب شرقی می‌باشد که این امر با جهت شکستگی‌ها در چاه‌های میدان کاملاً مطابقت دارد (شکل ۱۶).

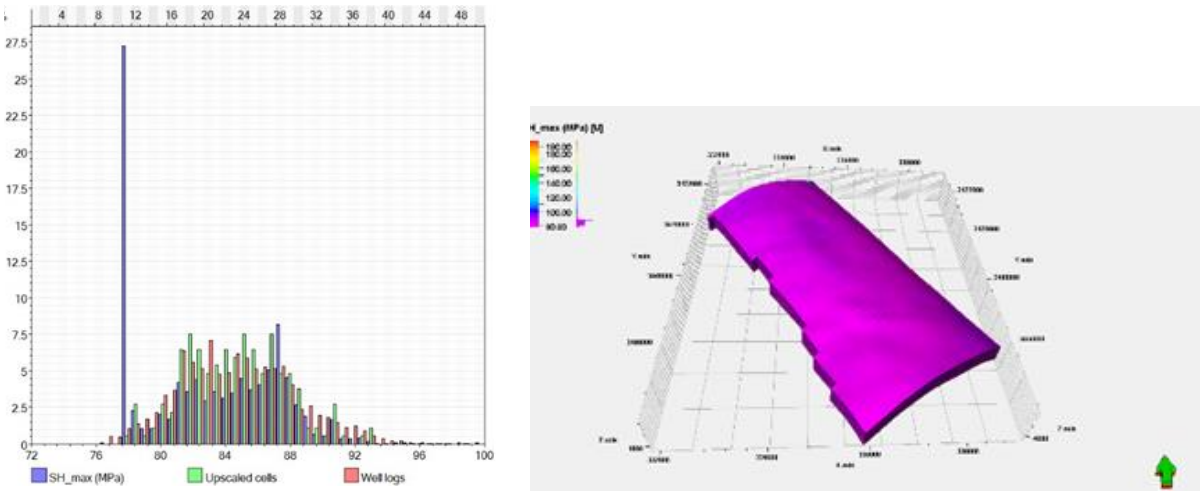
در نهایت برای اعتبارسنجی کار، مقادیر تنش‌هایی که در سه بعد توسط روش شبیه‌سازی گوسی مدل‌سازی شدند با مقادیر تنش‌های حاصل از مدل‌های یک‌بعدی ژئومکانیکی مورد مقایسه قرار گرفت. در همه موارد تطابق مناسبی (بالای ۸۶ درصد) مشاهده گردید.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۱۳. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی تنش مؤثر قائم

Fig.13. Three-dimensional model and variography of vertical effective stress

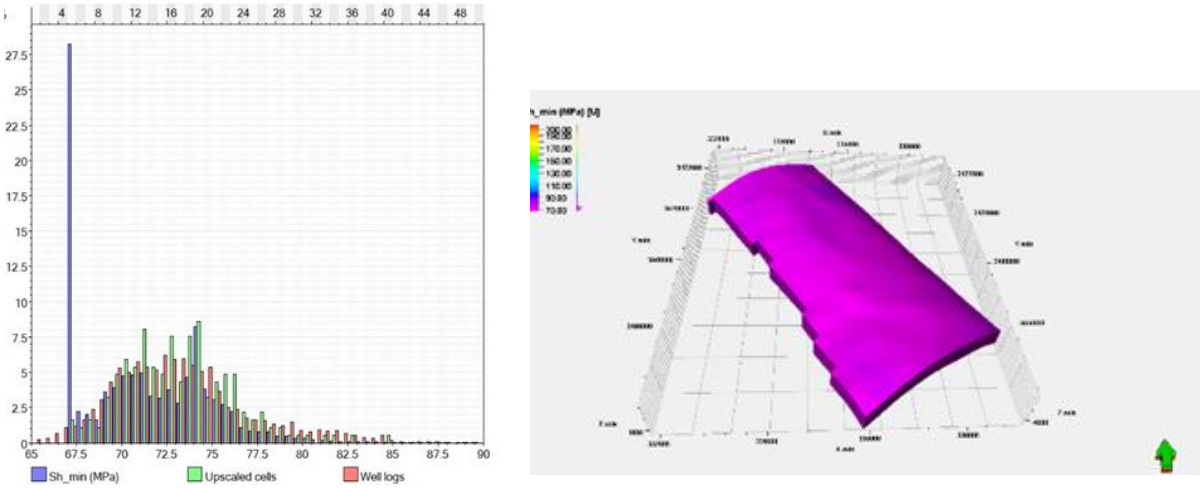


شکل۱۴. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی تنش مؤثر افقی حداکثر

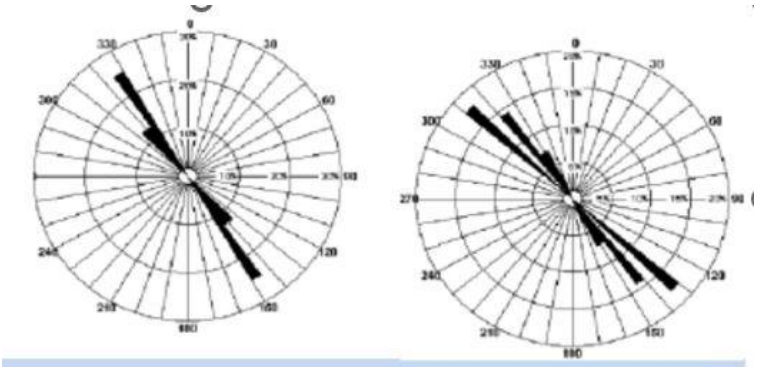
Fig.14. Three-dimensional model and variography of maximum horizontal effective stress

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۱۵. مدل سه‌بعدی و واریوگرافی تنش مؤثر افقی حداقل
Fig.15. Three-dimensional model and variography of minimum horizontal effective stress



شکل۱۶. محل جهت‌گیری شکستگی‌ها و ریزش‌های چاه و جهت تنش‌های افقی در چاه‌های ۳ و ۱۳ میدان کوپال
Fig.16. The orientation of fractures and wellbore collapses and the direction of horizontal stresses in Wells 3 and 13

تحلیل آماری خلاصه پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌ها

برای ارائه داده‌های کمی قابل استناد و ارزیابی صحت مدل، مقادیر آماری خلاصه (میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر) پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های مؤثر در میدان کوپال محاسبه شد. داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این مقادیر نشان می‌دهند که ناهمگنی قابل توجهی در پارامترهای مکانیکی (مانند مدول یانگ و چسبندگی) وجود دارد که ناشی از تغییرات لیتولوژی است. تنش افقی حداکثر مؤثر بیشترین مقدار را دارد (۱۲۷ مگاپاسکال)، که در اطراف گسل‌های فرعی مشاهده می‌شود. تنش قائم مؤثر تغییرات کمی دارد، که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت بار لیتوستاتیکی است. این داده‌ها می‌توانند در مدل‌های بعدی، طراحی چاه و ارزیابی پایداری مخزن مورد استفاده قرار گیرند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

جدول۱. مقادیر آماری خلاصه پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های مؤثر در میدان کوپال
Table 1. Summary statistical values of geomechanical parameters and effective stresses in the Kopal field

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	واحد
مدول یانگ استاتیک (E)	22.4	5.1	12.3	34.7	GPa
نسبت پواسون (ν)	0.28	0.03	0.22	0.35	-
چسبندگی (c)	18.5	4.2	10.1	28.6	MPa
زاویه اصطکاک داخلی (φ)	32.1	3.8	25	39.5	درجه
فشار منفذی (P_p)	58.3	6.7	45.2	68.9	MPa
تنش قائم مؤثر (σ_v)	81.2	3.8	78	87	MPa
تنش افقی حداکثر مؤثر (σH_{max})	118.5	8.4	105	127	MPa
تنش افقی حداقل مؤثر (σh_{min})	92.4	5.1	85	102	MPa

تحلیل تفسیری الگوهای توزیع پارامترهای ژئومکانیکی

بررسی شکل‌های ۵ تا ۱۵ نشان می‌دهد که توزیع فضایی پارامترهای ژئومکانیکی در میدان کوپال تحت تأثیر عوامل لیتولوژیکی، ساختاری و تنشی قرار دارد. تحلیل این الگوها نشان می‌دهد که:

الگوی توزیع مدول یانگ استاتیکی (شکل ۶) و مقاومت تک‌محوره (شکل ۱۲) بسیار شبیه به هم است، که نشان‌دهنده ارتباط قوی بین این دو پارامتر در سنگ‌های کربناته آسماری است. این شباهت در بخش‌های کربناته متراکم بالادست تاقدیس بیشتر است.

چسبندگی (شکل ۸) و زاویه اصطکاک داخلی (شکل ۹) در نواحی با مدول یانگ بالا نیز مقادیر بالاتری دارند، که نشان‌دهنده رفتار یک‌پارچه مکانیکی سنگ است.

فشار منفذی (شکل ۱۱) به‌صورت یکنواخت در کل میدان توزیع شده است، اما کمی در امتداد گسل‌های فرعی افزایش یافته است که نشان‌دهنده اثر گسل‌ها بر جریان سیال و توزیع فشار است.

تنش قائم مؤثر (شکل ۱۳) و تنش افقی حداکثر مؤثر (شکل ۱۴) الگوهای توزیع متفاوتی دارند: تنش قائم به‌صورت یکنواخت با عمق افزایش می‌یابد، در حالی که تنش افقی حداکثر در اطراف گسل‌ها و در امتداد آن‌ها افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تمرکز تنش در اطراف ناپیوستگی‌ها است. این تحلیل‌ها، نشان‌دهنده تأثیر لیتولوژی، ساختار و تنش بر رفتار مکانیکی سنگ هستند.

تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر توزیع تنش

برای بررسی تأثیر ساختارهای زمین‌شناسی بر توزیع تنش، داده‌های نقشه هم تراز زیرسطحی میدان کوپال (شکل ۲) با الگوی توزیع تنش افقی حداکثر مؤثر (شکل ۱۴) مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که نواحی با تمرکز بالای تنش (۱۲۰-۱۲۷ مگاپاسکال) به‌طور قابل توجهی در امتداد و در اطراف گسل‌های فرعی با روند شمال غربی- جنوب شرقی قرار دارند. این هم‌مکانی، تأییدی بر این است که گسل‌ها به عنوان ناپیوستگی‌های ساختاری، باعث تمرکز تنش (Stress Concentration) شده و توزیع تنش را به‌صورت محلی تغییر داده‌اند. این رفتار با تئوری تمرکز تنش در اطراف

گسل‌ها سازگار است. همچنین، این هم‌مکانی با الگوی شکستگی‌های چاه‌نگاری در چاه‌های ۳ و ۱۳(شکل ۱۶) نیز همخوانی دارد.

تفسیر کاربردی نتایج مدل‌سازی سه‌بعدی

مدل‌های سه‌بعدی ارائه‌شده نه تنها نمایشی از توزیع پارامترهای ژئومکانیکی هستند، بلکه ابزاری حیاتی برای تصمیم‌گیری در مراحل مختلف توسعه میدان محسوب می‌شوند. با ترکیب داده‌های مدول یانگ استاتیک و زاویه اصطکاک داخلی، می‌توان مناطقی با رفتار شکننده (Brittle) و نرم (Ductile) را شناسایی کرد:

مناطق شکننده: نواحی با مدول یانگ بالا (بیش از ۳۰ GPa) و زاویه اصطکاک کم (کمتر از ۳۰ درجه)، مانند بخش‌های کربناته متراکم سازند آسماری در بالادست تاقدیس، رفتار شکننده نشان می‌دهند. این مناطق مستعد ترک‌خوردگی طبیعی و القایی هستند و برای طراحی شکاف هیدرولیکی مناسب‌اند.

مناطق نرم: نواحی با مدول یانگ پایین (کمتر از ۱۵ GPa) و زاویه اصطکاک بالا (بیش از ۳۵ درجه)، مانند بخش‌های شیلی مرز سازندهای آسماری و بنگستان، رفتار پلاستیک نشان می‌دهند و احتمال ریزش دیواره چاه در آن‌ها بیشتر است.

همچنین، مناطق پر ریسک برای حفاری شامل نواحی با تنش افقی حداکثر بالا (بیش از ۱۲۰ MPa) و تمرکز تنش در اطراف گسل‌های فرعی هستند. در این مناطق، احتمال ناپایداری چاه و نیاز به وزن بالاتر گل حفاری افزایش می‌یابد. بر این اساس، مکان‌های بهینه برای حفاری چاه‌های آینده در نواحی با تنش‌های متعادل، عدم وجود گسل فعال، و پایداری مکانیکی بالا (مانند بخش‌های میانی بالادست تاقدیس) قرار دارند. این نتایج می‌توانند در طراحی مراحل تزریق گاز، بهینه‌سازی برنامه چاه، و پیش‌بینی فرونشست سطحی مورد استفاده قرار گیرند.

تحلیل مقایسه‌ای با مدل‌های یک‌بعدی

برای اعتبارسنجی مدل سه‌بعدی، نتایج آن با مدل‌های یک‌بعدی ژئومکانیکی چاه‌های ۳ و ۳۰ مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که میانگین تطابق کلی بین تنش افقی حداکثر (σH_{max}) مدل سه‌بعدی و یک‌بعدی، حدود ۸۸٪ است.

با این حال، تحلیل جزئی‌تر نشان می‌دهد که بیشترین اختلاف (تا ۱۵٪) در عمق ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متر و در بخش‌های مرزی سازند آسماری (به‌ویژه در انتقال از لیتولوژی کربناته به شیلی) رخ می‌دهد. این تفاوت‌ها عمدتاً ناشی از تغییرات جانبی لیتولوژی و اثرات محلی گسل‌های فرعی است که در مدل یک‌بعدی (که فقط تغییرات عمودی را در نظر می‌گیرد) قابل بازتولید نیستند، اما در مدل سه‌بعدی با استفاده از داده‌های زمین‌آماری و واریوگرام، به‌درستی بازتولید شده‌اند.

بنابراین، تفاوت‌های مشاهده‌شده نشان‌دهنده قدرت مدل سه بعدی در ملحوظ کردن ناهمگنی‌های فضایی است که مدل‌های یک‌بعدی قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نیستند. این یافته، اعتبار مدل سه‌بعدی را به‌عنوان ابزاری جامع‌تر برای تحلیل رفتار مخزن تقویت می‌کند.

تحلیل کمی اعتبارسنجی مدل

برای ارزیابی کمی دقت مدل سه‌بعدی، نتایج آن با مدل‌های یک‌بعدی ژئومکانیکی چاه‌های ۳ و ۳۰ مقایسه شد. این مقایسه نشان داد که میانگین تطابق کلی بین تنش افقی حداکثر (σH_{max}) مدل سه‌بعدی و یک‌بعدی، حدود ۸۸٪ است.

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر، از معیارهای آماری ضریب تبیین (R^2) و خطای میانگین مربعات (RMSE) استفاده شد. نتایج

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

نشان داد که $R^2 = 0.93$ و $RMSE = 4.2$ MPa است که نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب و قابل قبول مدل سه‌بعدی با داده‌های یک‌بعدی است. تفاوت‌های مشاهده‌شده عمدتاً در عمق ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متر و در بخش‌های مرزی سازند آسماری رخ می‌دهد که ناشی از تغییرات جانبی لیتولوژی (مانند تغییر از کربنات به شیل) و اثرات محلی گسل‌های فرعی است. این عوامل در مدل یک‌بعدی (که فقط تغییرات عمودی را در نظر می‌گیرد) قابل در نظر گرفتن نیستند، اما در مدل سه‌بعدی با استفاده از داده‌های زمین‌آماری و واریوگرام، به‌درستی بازتولید شده‌اند. علاوه بر این، اعتبار مدل با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری تصویری (FMI) و تحلیل ریزش دیواره چاه (Wellbore Breakout) در چاه‌های ۳ و ۱۳ تأیید شد. جهت‌گیری شکستگی‌ها و ریزش‌ها، نشان‌دهنده رژیم تنش نرمال ($\sigma v > \sigma H_{max} > \sigma h_{min}$) است که با نتایج مدل همخوانی دارد. بنابراین، تفاوت‌های مشاهده‌شده نشان‌دهنده قدرت آن در ملحوظ نمودن ناهمگنی‌های فضایی است که مدل‌های یک‌بعدی قادر به شبیه‌سازی آن‌ها نیستند. این یافته، اعتبار مدل سه‌بعدی را به‌عنوان ابزاری جامع‌تر برای تحلیل رفتار مخزن تقویت می‌کند.

آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی

آنالیز حساسیت جامعی بر روی پارامترهای کلیدی ورودی مدل انجام شده است. این تحلیل شامل بررسی تأثیر تغییرات ±۱۵٪ در پارامترهای زیر بر روی تنش‌های اصلی مؤثر (تنش قائم، تنش افقی حداکثر و حداقل) و تغییر شکل الاستیک مخزن بوده است:

مدول یانگ استاتیک (E)، نسبت پواسون (ν)، چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (φ)، فشار منفذی (P_p).

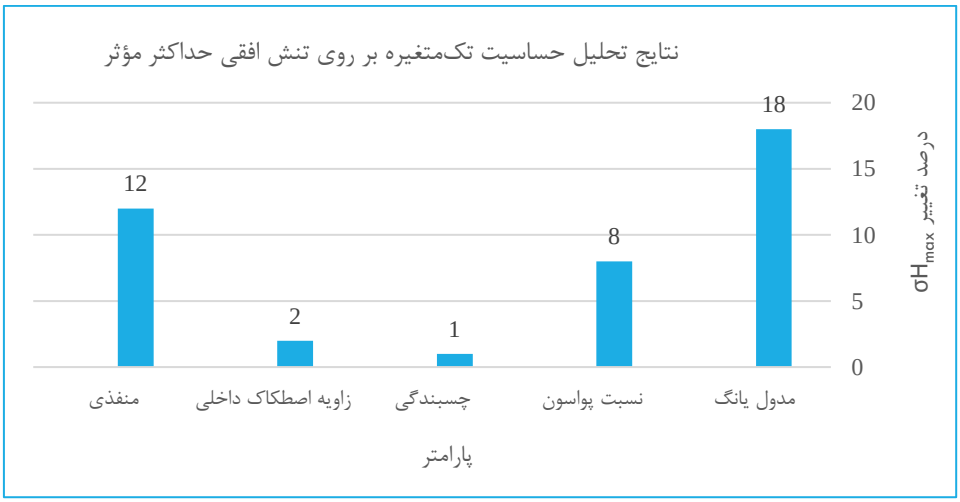
برای این منظور، یک تحلیل حساسیت تک متغیره (One-at-a-Time Sensitivity Analysis) بر روی یک برش نماینده از مدل(شامل چاه‌های ۳ و ۳۰) انجام شد. تحلیل حساسیت تک متغیره یکی از روش‌های استاندارد در ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های عددی است. نتایج نشان داد که: مدول یانگ (E) بیشترین تأثیر را بر روی تنش افقی حداکثر دارد (تغییر ±۱۵٪ در E، باعث تغییر تا ±۱۸٪ در σHmax می‌شود). فشار منفذی (P_p) بیشترین تأثیر را بر روی تنش‌های مؤثر دارد (به دلیل تعریف تنش مؤثر: $\sigma' = \sigma - \alpha P_p$). نسبت پواسون (ν) تأثیر قابل‌توجهی بر توزیع جانبی تنش دارد، اما تأثیر کمتری بر مقدار بیشینه تنش دارد. چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک (φ) تأثیر مستقیمی بر تنش‌های اولیه ندارند، اما در تحلیل پایداری چاه بسیار حساس هستند. این نتایج در شکل ۱۷ و جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی

Table 2. Results of sensitivity analysis of geomechanical parameters

پارامتر	تغییر ورودی	تغییر σH_{max}	تغییر σ_v	تغییر ε_v
مدول یانگ (E)	±15%	±18%	±2%	±15%
نسبت پواسون (ν)	±15%	±8%	±1%	±5%
چسبندگی (c)	±15%	±1%	0%	0%
زاویه اصطکاک (φ)	±15%	±2%	0%	0%
فشار منفذی (P_p)	±15%	±12%	±12%	±10%

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]



شکل۱۷. نتایج تحلیل حساسیت تک متغیره بر روی تنش افقی حداکثر مؤثر

Fig.17. Results of one-at-a-time sensitivity analysis on maximum horizontal effective stress (σH_{max})

عدم قطعیت‌های مترتب بر پژوهش

با وجود دقت بالا در مدل‌سازی و استفاده از بهترین داده‌های موجود، برخی عدم قطعیت‌ها در این پژوهش وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرند:

عدم قطعیت در پارامترهای ورودی: برخی پارامترهای ژئومکانیکی (مانند مدول یانگ و چسبندگی) بر اساس روابط تجربی و با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری تخمین زده شده‌اند. این روابط دارای خطای تخمین هستند و می‌توانند بر نتایج مدل تأثیر بگذارند. تحلیل حساسیت نشان داد که مدول یانگ و فشار منفذی بیشترین تأثیر را بر تنش افقی حداکثر دارند، بنابراین واسنجی دقیق این پارامترها حیاتی است.

عدم قطعیت در مدل‌سازی فضایی: روش شبیه‌سازی متوالی گوسی (SGS) اگرچه یکی از بهترین روش‌های زمین‌آماری است، اما به تعداد و توزیع نقاط داده وابسته است. در مناطق با فاصله زیاد بین چاه‌ها، عدم قطعیت در تخمین پارامترها افزایش می‌یابد.

عدم قطعیت در رژیم تنش: اگرچه رژیم تنش نرمال با داده‌های FMI و ریزش چاه تأیید شد، اما این داده‌ها محدود به تعداد کمی چاه هستند. تغییرات مکانی یا زمانی در رژیم تنش (به‌ویژه پس از برداشت نفت یا تزریق گاز) ممکن است در مدل اولیه در نظر گرفته نشده باشد.

عدم قطعیت در مدل‌سازی گسل‌ها: گسل‌های فرعی در مدل با دقت محدودی تعریف شده‌اند. عدم قطعیت در موقعیت، جهت‌گیری و فعال بودن این گسل‌ها می‌تواند بر توزیع تنش و پایداری چاه تأثیر بگذارد.

با توجه به این عدم قطعیت‌ها، اگرچه مدل سه‌بعدی حاضر بر اساس بهترین داده‌های موجود توسعه یافته است، اما برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر (مانند تحلیل پایداری چاه، طراحی شکاف هیدرولیکی یا پیش‌بینی فرونشست)، توصیه می‌شود از روش‌های مکمل مانند مدل‌سازی احتمالاتی یا تحلیل عدم قطعیت (Uncertainty Analysis) نیز استفاده شود.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل سه‌بعدی جامع از پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های مؤثر مخزن آسماری در میدان کوپال توسعه یافت. بر اساس این مدل، بیشترین تنش قائم مؤثر (σ_v) حاکم بر میدان برابر با ۸۷ مگاپاسکال و بیشترین مقدار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

تنش افقی مؤثر حداکثر (σH_{max}) برابر با ۱۲۷ مگاپاسکال محاسبه شد. تحلیل داده‌های چاه‌نگاری تصویری (FMI) و ریزش دیواره چاه (Wellbore Breakout) در چاه‌های ۳ و ۱۳، نشان داد که رژیم تنش حاکم بر میدان از نوع نرمال ($\sigma_v > \sigma H_{max} > \sigma h_{min}$) است.

همچنین، تحلیل ساختاری نشان داد که گسل‌های فرعی باعث تمرکز تنش در اطراف خود شده و توزیع تنش را به‌صورت محلی تغییر داده‌اند. این یافته‌ها برای پیش‌بینی پایداری چاه و ارزیابی ریسک فعال شدن مجدد گسل حیاتی هستند.

مدل با تطابق ۸۸٪ با نتایج مدل‌های یک‌بعدی اعتبارسنجی شد. تفاوت‌های مشاهده‌شده عمدتاً ناشی از تغییرات جانبی لیتولوژی و اثر گسل‌های فرعی است که در مدل سه‌بعدی به‌درستی بازتولید شده‌اند.

تحلیل حساسیت نشان داد که مدول یانگ و فشار منفذی بیشترین تأثیر را بر تنش افقی حداکثر دارند، که بر اهمیت واسنجی دقیق این پارامترها تأکید دارد.

یافته‌های این تحقیق می‌توانند در طراحی چاه، تزریق گاز و ارزیابی پایداری مخزن مورد استفاده قرار گیرند. هرچند مدل سه‌بعدی حاضر بر اساس بهترین داده‌های موجود تهیه شده است، اما برای پیش‌بینی‌های دقیق‌تر (مانند تحلیل پایداری چاه یا تخمین فرونشست)، توصیه می‌شود از روش‌های مکمل مانند مدل‌سازی احتمالاتی یا تحلیل عدم قطعیت (Uncertainty Analysis) نیز استفاده شود.

References

Al-Qahtani, M. Y., & Zillur, R. (2001). A mathematical algorithm for modeling geomechanical rock properties of the Khuff and Pre-Khuff reservoirs in Ghawar field. In SPE Middle East Oil Show. Manama, Bahrain.

Al-Ruwaili, S. B., & Chardac, O. (2003). 3D models for rock strength & in-situ stresses in the Khuff formation of Ghawar field, methodologies & applications. In Middle East Oil Show. Manama, Bahrain.

Bagheri, H., Ayatizadeh Tanha, A., Doulati Ardejani, F., Heydari-Tajareh, M., & Larki, E. (2021). Geomechanical model and wellbore stability analysis utilizing acoustic impedance and reflection coefficient in a carbonate reservoir. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 11, 3935- 3961.

Freeman, T. T., Chalaturnyk, R., & Bogdanov, I. I. (2008). Fully coupled thermo-hydro-mechanical modeling by COMSOL Multiphysics, with applications in reservoir geomechanical characterization. In COMSOL Conf.

Gao, Y., Liu, P., Sun, D., & Chen, M. (2025). Machine Learning Method Enables Fast and Accurate Pore Pressure Prediction with Well Logs, a Case Study in Offshore, China. In the SPWLA 66th Annual Logging Symposium, Dubai, UAE.

Mirzaee Mahmoodabadi, R., & Zahiri, S. (2023). Formation evaluation and rock type classification of Asmari Formation based on petrophysical- petrographic data: A case study in one of super fields in Iran southwest. Petroleum. 9(2), 143-165.

Mollaei, F., Mohebian, R., & Moradzadeh, A. (2024). Proposing a Deep Learning Algorithm for Estimating the Brittleness Index Using Conventional Log Data in the Asmari Formation of a Southwestern Iranian Oil Field. Journal of Engineering Geology. 18(3), 341-364.

Ogunkunle, T.F., Okoro, E., Rotimi, O.J., Igbinedion, P., Olatunji, D.I. (2022). Artificial intelligence model for predicting geomechanical characteristics using easy-to-acquire offset logs without deploying logging tools. Petroleum, 8(2), 192-203.

Orlic, B., Van Wees, J. D., & Van Eijs, R. (2001). Integrated geomechanical modelling for prediction of subsidence and induced seismicity due to hydrocarbon extraction. In Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology (IAMG), Session J. Cancun.

Plumb, R., Edwards, S., Pidcock, G., Lee, D., & Stacey, B. (2000). The mechanical earth model concept and its application to high-risk well

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]

construction projects. In IADC/SPE Drilling Conference. New Orleans, Louisiana.

Ramjohn, R., Gan, T., & Sarfare, M. (2018). 3D Geomechanical Modeling for Wellbore Stability Analysis: Starfish, ECMA, Trinidad and Tobago. In SPE Trinidad and Tobago Section Energy Resources Conference. Port of Spain, Trinidad and Tobago.

Rezaeiyan, M., Sarikhani, R., Jamshidi, A., Ghassemi Dehnavi, A., & Abdi, Y. (2022). Exprimental study of the effect of saline water of weathering of rocks in Robat Namaki region of Khorramabad. Journal of Engineering Geology. 16(1), 24-44.

Sadeghi, M., Hafezi Moghaddas, N., Ghafoori, M., Amiri, M., & Bashari, A. (2022). Investigation of geomechanical properties of rock units of the eastern tunnel of Pervadeh Tabas coal mine and presenting experimental relationship. Journal of Engineering Geology. 16(2), 29-51.

Zhao, X., Winterfeld, Ph., Wu, Y.Sh. (2024). Fully coupled THM modeling of CO2 sequestration in depleted gas reservoirs considering the mutual solubilities in CO2-Hydrocarbon gas-brine systems. Geoenergy Science and Engineering. 238, 212834.

Zoback, M. D. (2009). Reservoir Geomechanics. Cambridge University Press, 452 p.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.2.3.8]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.2.1014282]