



Application of Geostatistical and Velocity-Volume Fractal Models to Determine Interval Velocity and Formation Pressures in an Oilfield of SW Iran

Pooria Kianoush¹, Peyman Afzal¹, Ghodratollah Mohammadi^{*1}, Nasser Keshavarz Faraj Khah² and Seyed Aliakbar Hosseini³

1. Department of Petroleum and Mining Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran

2. Geophysics Group, Geoscience Faculty, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Tehran, Iran

3. Department of Petroleum, Materials and Mining Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

gh_mohammadi@azad.ac.ir

DOI:10.22078/PR.2022.4787.3146

Received: April/21/2022

Accepted: September/19/2022

Introduction

In seismic methods, pore pressure estimation is obtained by converting the seismic velocity to pore pressure and comparing it with the pressure obtained during the well test program. The results are determined from geostatistical or intelligent models such as artificial neural networks. The acoustic log can be a good indicator of the internal pressure of the earth. In Other words, increasing the passage time in the zones is a function of changing the porosity or increasing the pore pressure gradient, so it is possible to identify areas with abnormal pore pressure and decrease drilling risk [1-6]. Intelligent methods are one of the new, low-cost, and accurate methods that can be used. Using petrophysical graphs such as DSI, the shear wave velocity of the reservoir in the shortest possible time is estimated [7-8]. For estimating the pore pressure by the Bowers method with velocity data, the relationship between effective stress and velocity in sediments under normal pressure has been proposed by Bowers in 1992 (Equation 1):

$$V = V_0 + A\sigma^B \quad (1)$$

where V_0 is the velocity of unconsolidated fluid-saturated sediments, and A and B describe the variation in velocity by increasing effective stress (σ) and can be derived from offset well data [9-14].

The general purpose of conducting this study is to determine the final model of the drilling mud window for conducting new drilling in the entire area of the studied field with the highest possible compatibility. It has been carried out in three stages, including models of interval velocities, formation pressures, and finally, determining the range of drilling fluid weight. This manuscript is the result of the first part of the studies.

Material and Methods

South Azadegan field formations are modeled based on the interpretation of time-domain seismic horizons data and correlated with geological information obtained from exploratory drilling and depth-domain seismic horizons constructed as separate layers from the surface Aghajari formation to the Gotnia formation. Due to the lack of complex fault systems in the area, the geological model has been built with a simple network of Petrol 2016 software.

The reservoir formations of the south Azadegan field include seven formations, Pabdeh, Gurpi, Ilam, Sarvak, Kazhdumi, Gadvan, and Fahliyan.

The Interval velocity model was prepared using the relationship between checkshots and Vertical Seismic Profiling (VSP) velocity data and depth changes in wells with information according to Equation 2, and the coefficients V_0 and K were determined with a correlation coefficient of 0.95.

$$V = V_0 + K * Z \quad (2)$$

In this relation, K is the constant conversion factor of changing deep horizon layers to the average interval velocity, and V_0 is the surface layer velocity.

Based on the results, the average velocity of Aghajari surface formation is calculated at a constant rate of 1984.6 m/s in the southwest direction of the study area. Moreover, the whole cube is used to build the velocity cube model in the next step after developing the model.

Results and Discussion

Based on the Terzaghi relationship (Equation 3), each of the completed effective pressure cubes (P_{eff}) is deducted from the overburden pressure cube ($P_{O.B}$). Furthermore, after correlating the pore pressure cubes (P_{pore}) made with the initial effective pressure data for different formations (Table 1), the SGS model (co-kriged with V_p and AI cubes) has the highest correlation coefficient, which is confirmed. Therefore, data obtained from this method are considered to calculate the final pore pressure gradient.

$$P_{Pore} = P_{O.B} - P_{eff} \quad (3)$$

Table 1 Correlation coefficients of formation pore pressure cubes of studied field using neural network based on Bowers, SGS, and IDW models with primary MDT data.

Formation	Correlation coefficient of Pore pressure and Primary MDT data		
	Bowers method	SGS method	IDW method
Tarbur (member of Gurpi)	0.93	0.73	0.57
Ilam	0.12	0.47	0.34
Sarvak	0.24	0.48	0.48
Kazhdumi	0.07	0.14	0.09
Dariyan	0.19	0.27	-0.1
Gadvan	0.36	0.14	-0.4
Khalij (member of Gadvan)	0.27	0.19	-0.49
Upper Fahliyan	0.21	0.22	-0.06
Lower Fahliyan	-0.25	-0.57	0.1
Total MDT Data	0.58	0.57	0.44

Conclusions

1- According to the Interval velocity model, the highest average velocity in the range of 2760-2900 m/s in the northeast of the study area is related to Gotnia Formation, and the lowest is related to Gachsaran formation with 2150-2280 m/s in the southwest direction of the case study area.

2- Due to the lack of compressional velocity logs data in no one of the wells, using neural networks to construct velocity models in surface layers was not possible. Therefore, using VSP, gamma rays, and density logs are done in 5 steps with the highest possible correlation coefficient. Finally, a scaled-up model has been constructed for all wells from surface to bottom.

3- To study the fracture pressure of the formation, the shear velocity cube is modeled using exploratory well cores and shear velocity logs. The final Vs logs had a 0.95 correlation with the main DSI shear logs.

4 - Cube values of inverted acoustic impedance in the depths of the bottom of the field are often in the range of 8000-15000 [(m/s)*(gr/cm3)], which can be in the range of calcareous formations.

5- To model the effective pressure by the Bowers method, it is proposed to use a compressional velocity (V_p) cube obtained from a sequential Gaussian simulation (SGS) with co-kriging with Acoustic

impedance (AI) inversion. It has a higher correlation coefficient than the method similar to the seismic migration velocity cube.

6- Based on velocity-volume (V_p -V) fractal models, compressional velocity regimes are divided into 25 regimes at distances of 1000 to 5590 meters. The dominant geological model of each regime includes twenty intervals of pure limestone, three intervals of sandstone and limestone, one interval of anhydrite and sandstone, and one interval of marl and sandstone.

7- As the Logratio matrix in the dominant limestone intervals, the maximum overall accuracy (OA) of 0.74 in the V_p range of fewer than 6109.4 m/s at depths of 5000-5590 meters is related to Najmeh to Neyriz formations. Furthermore, the lowest OA of 0.32 in the V_p range between 6011.7 to 6095.4 m/s is related to the Khalij member of Gadvan to Sargelu formations at depths of 4000-5000 meters.

References

- Maddahi A, Ghazi Nezhad S, Ismailpour S, Heydari M (2014) Feasibility study of exploiting four-dimensional seismic studies of Sarvak reservoir in Azadegan field, Journal of Petroleum Research, 78: 126-117 (in Persian), doi: 10.22078/pr.2014.381.
- Maurya S P, Singh N P, Singh K H (2020) Post-

- stack seismic inversion, In: *Seismic Inversion Methods: A Practical Approach*, Springer Geophysics, Chapter 3, 39-70, ISBN: 978-3-030-45662-7.
3. Shahbazi A, Soleimani Monfared M, Thiruchelvam V, Ka Fei T, Babasafari A A (2020) Integration of knowledge-based seismic inversion and sedimentological investigations for heterogeneous reservoir. *Journal of Asian Earth Sciences*, 202, 104541, doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104541.
4. Poorsiami H (2013) Modeling the pore pressure of a hydrocarbon reservoir in southwestern Iran using well-logging data, *Journal of Petroleum Research*, 23, 74: 86-72 (in Persian), doi:10.22078 pr.2013.293
5. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) Determining the drilling mud window by integration of geostatistics, intelligent, and conditional programming models in an oilfield of SW Iran, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13, 5, Published: 15 March 2023.
6. Amirzadeh M, Kamali M R, Nabi Bidehandi M (2013) Investigation of reservoir characteristics by performing seismic data conversion and seismic markers in Sarvak Formation in one of the oil fields in southwestern Iran, *Journal of Petroleum Research*, 23, 75: 29-20 (in Persian).
7. Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L (1985) Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *Geophysics*, 50, 4: 571-581.
8. Fatahi H, Askari M, Majdi Far S (2016) Estimation of shear wave velocity in one of the hydrocarbon reservoirs of southwest Iran using different well logs and a new intelligent combined method, *Journal of Advanced Applied Geology*, 22: 35-43 (in Persian).
9. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) ANN-based estimation of pore pressure of hydrocarbon reservoirs—a case study, *Arabian Journal of Geosciences*, 16, 302.
10. Bowers G L (2002) Detecting high overpressure, *The Leading edge*, 21, 2: 174-177.
11. Kelkar M, Perez G (2002) *Applied Geostatistics for Reservoir Characterization*, Society of Petroleum Engineers. ISBN: 978-1-55563-095-9, 264.
12. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini SA, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2022) Compressional and Shear Interval Velocity Modeling to Determine Formation Pressures in an Oilfield of SW Iran, *Journal of Mining and Environment (JME)*, 13, 3: 851-873.
13. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2022) Application of Pressure-Volume (P-V) Fractal Models in Modeling Formation Pressure and Drilling Fluid Determination in an Oilfield of SW Iran, *Journal of Petroleum Science and Technology*, 12, 1: 2-20.
14. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) Inversion of seismic data to modeling the Interval Velocity in an Oilfield of SW Iran, *Results in Geophysical Sciences*, 13, 100051.

کاربرد مدل‌های زمین آماری و فرکتالی سرعت-حجم به منظور تعیین سرعت‌های لایه‌ای و فشارهای سازندی در یکی از میادین جنوب غرب ایران

پوریا کیانوش^۱، پیمان افضل^۱، قدرت اله محمدی^{۲*}، ناصر کشاورز فرج خواه^۲ و سید علی اکبر حسینی^۳

۱- گروه مهندسی نفت و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۲- گروه پژوهش ژئوفیزیک، پژوهشکده علوم زمین، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی نفت، مواد و معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکز، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۸

چکیده

در روش‌های لرزه‌ای، تخمین فشارهای سازندی با تبدیل سرعت لرزه‌ای به فشار منفذی و همسان‌سازی آن با نگار سرعت و کالیبراسیون نتایج با فشار مؤثر حاصل از آزمایش چاه به دست می‌آید. این مطالعه در زمینه مطالعات سرعت در یکی از میادین دشت آبادان واقع در جنوب غربی ایران است که سازندهای هدف عموماً کربناته بوده و به جز سازند کژدمی فاقد میان لایه‌های شیل هستند. این مقاله براساس داده‌های ۲۳ حلقه چاه و تعبیر و تفسیر داده‌های لرزه‌ای صورت پذیرفته و مدل‌های سرعت فشاری و برشی از مدل‌های زمین آماری ترکیبی، تعیین شده و با مدل‌های فرکتالی ناشی از روش مقدار-حجم به خصوص مدل سرعت-حجم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. براساس داده‌های VSP، حداکثر سرعت لایه‌ای در محدوده ۲۷۶۰-۲۹۰۰ m/s در سمت شمال شرق مربوط به سازند گوتنیا است. جهت مطالعات فشار شکست سازند نیز مدل‌سازی مکعب سرعت برشی با استفاده از مغزه‌های چاه اکتشافی و نگار سرعت برشی انجام شده که مکعب نهایی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ برای داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های تخلخل، لیتولوژی و داده‌های اصلی سرعت برشی DSI تعیین شد. مقادیر نهایی مقاومت صوتی وارون‌سازی شده در اعماق بیشتر میدان اکثراً در محدوده $(\text{g/cm}^3) * (\text{m/s})$ ۸-۱۵ هزار است که در محدوده سازندهای آهکی می‌تواند قرار گیرد. براساس محاسبه ماتریس لوگرشیو حاصل از مدل فرکتالی مقدار-حجم، بیشترین میزان تطبیق نهایی در بازه‌های سنگ آهک غالب به میزان ۰/۷۴ محاسبه شده است. این نشان از تطابق بالای مدل مکعب سرعت فشاری با استفاده از ترکیب شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریچینگ و مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی و نیز مدل‌سازی فرکتالی سرعت-حجم است. همچنین براساس واریوگرام‌های مدل نهایی مکعب سرعت فشاری، میزان سقف واریوگرام و ناهمسان‌گردی در جهت عمودی به ترتیب ۰/۳۴ و ۹۶ m و در جهت‌های افقی اصلی و فرعی به ترتیب ۰/۹۶ و ۱۱۸۵۰ m است.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی سرعت لرزه‌ای، مکعب سرعت فشاری، وارون‌سازی مقاومت صوتی، فشار سازندی، مدل فرکتالی سرعت-حجم

مقدمه

داشتن درک صحیح از فشار منفذی سازند نه تنها برای حفاری ایمن و اقتصادی چاه‌ها ضروری است، بلکه برای ارزیابی عوامل ریسک اکتشاف چون مهاجرت سیال سازندی و یکپارچگی پوش سنگ نیز حیاتی است. معمولاً قبل از حفاری، تخمین اولیه‌ای از فشار منفذی با استفاده از داده‌های لرزه‌ای سطحی انجام می‌شود. در این روش عمدتاً از سرعت لرزه‌ای استفاده می‌شود. بنابراین، دقت مدل‌های سرعت به کار رفته برای تعیین فشار منفذی بیشترین اهمیت را دارد. استفاده از داده‌های لرزه‌ای تنها روشی است که می‌تواند فشار منفذی را در مرحله قبل از حفاری پیش‌بینی کند. در واقع استفاده از روش‌های لرزه‌ای برای تخمین فشار منفذی بر مبنای تأثیرپذیری سرعت امواج از تغییرات فشار است [۴-۱]. روش‌های اصلی این مطالعات شامل مدل‌سازی سرعت جهت تخمین فشار منفذی با استفاده از تلفیق داده‌های لرزه‌نگاری و اطلاعات چاهی و مقایسه دقت و کارایی آن‌ها است [۵ و ۱]. در روش‌های لرزه‌ای تخمین فشار منفذی با تبدیل سرعت لرزه‌ای به فشار منفذی و نهایتاً مقایسه با فشار به دست آمده حین آزمایش چاه به دست می‌آید و نتایج از مدل‌های زمین آماری یا هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی تعیین می‌شود [۲ و ۴]. در روش باورز^۱ با استفاده از رابطه بین سرعت و تنش مؤثر، مکعب تنش مؤثر و رابطه بین چگالی و فشار روباره، مکعب فشار روباره تولید می‌شود. در نتیجه فشار منفذی سازند با توجه به رابطه ترزاقی^۲ تخمین زده می‌شود [۲]. نمودار زمان عبور صوت (DT) یکی از مهم‌ترین نمودارهای درون‌چاهی برای برآورد فشار منفذی است که آن را می‌توان با استفاده از دیگر نمودارها مانند سرعت لایه‌ای VSP، گامای سازند، چگالی، تخلخل و استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی با تقریب قابل قبول تخمین زد و نهایتاً طراحی سیالات حفاری به لحاظ وزن گل و سیمان پشت جداری به نحوی که در بازه

گرادیان فشار سازندی مدل‌سازی شده قرار داشته باشند انجام پذیرد [۸-۵]. برای تعیین گرادیان فشار منفذی در یک میدان نیاز به داده‌های لرزه‌ای، نمودارهای درون‌چاهی و اطلاعات حفاری است. در صورت عدم وجود اطلاعات لازم در بخشی از میدان، پس از سرند داده‌های موجود و تهیه بانک اطلاعاتی، با استفاده از مدل‌های تخمین گر، نمودارهای لازم تهیه می‌شود [۹ و ۱۰]. یکی از راه‌های کنترل مقادیر نمودار صوتی انطباق آن با مقادیر حاصل از تحلیل سرعت لرزه‌ای است. تئوری ارزیابی کمی فشار درونی زمین با استفاده از ابزار صوتی، مستقل از مقدار تخلخل است. از این رو نمودار صوتی می‌تواند شاخص خوبی از فشار درونی زمین باشد، یعنی افزایش زمان عبور در صوت در لایه‌ها تابعی از تغییر تخلخل یا افزایش گرادیان منفذی است. بنابراین می‌توان ضمن تشخیص مناطقی که فشار منفذی غیرعادی دارند، ریسک خطر حفاری اکتشافی و هزینه‌های مربوطه در این مناطق را کاهش داد. از آنجا که علاوه بر فشار، عوامل دیگری مانند لیتولوژی نیز بر سرعت امواج لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند؛ لذا استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و نگارهای چاه‌پیمایی موجود، می‌تواند تا حد زیادی از بروز خطا در تخمین فشارهای سازند خصوصاً در سازندهای کربناته جلوگیری کند [۱، ۵ و ۱۱-۱۵]. جهت تخمین فشار شکست سازند نیز نیاز به محاسبه سرعت برشی است. تعیین سرعت موج برشی توسط روش‌هایی مانند آنالیز مغزه مستلزم صرف زمان و هزینه گزافی است و همچنین به علت نبود مغزه‌های کافی و تغییرات سنگ‌شناسی و ناهمگنی سنگ مخزن، تعیین این پارامتر توسط روش‌های معمول از دقت چندانی برخوردار ناست. همچنین، روابط تجربی فراوانی نیز در مورد محاسبه سرعت امواج برشی ارائه شده است.

1. Bowers

2. Terzaghi

3. Castagna

به استاندارد نرمال تبدیل شوند [۲۲ و ۲۳]. همواره یکی از معضلات در اکتشاف کانسارهای معدنی و میادین نفتی و گاز عدم امکان ارزیابی یک یا چند پارامتر کیفی در جز به جز مخزن با روش‌های جاری مانند معکوس فاصله وزن دار^۴ (IDW) بوده است، لذا برای ارزیابی پارامترهای کیفی در یک مدل بلوکی با تعداد ریزبلوکهای زیاد می‌توان از روش تخمین گر خطی نارایب کریجینگ^۵ با کمترین واریانس و خطای ممکن در هر ریزبلوک استفاده کرد. در برخی موارد ممکن است که از یک متغیر به قدر کافی داده موجود نباشد و ارزیابی توزیع آن با مشکل مواجه شود، در این حالت می‌توان با در نظر گرفتن همبستگی و رابطه فضایی این متغیر نخستین با یک متغیر دوم که دارای تعداد داده‌های مناسبی است با روش زمین آماری کوکریجینگ^۶ که تعمیم یافته کریجینگ است، مدل سازی را اصلاح نمود. لذا در محل‌هایی که کمبود نمونه در آنها وجود دارد با استفاده از همبستگی میان متغیر ناحیه‌ای مورد نظر و نیز متغیر کمکی، ارزیابی صورت می‌گیرد. بولینگ و آرمسترانگ نشان دادند که اگر میزان همبستگی دو متغیر بیش از ۰/۵ باشد، خطای تخمین تا حد بسیاری با این روش کاهش می‌یابد. همچنین کرمی و همکاران نشان دادند که از میان مدل‌های زمین آماری مختلف برای داده‌های یکسان، روش کوکریجینگ دارای بالاترین ضریب همبستگی با حداقل میزان خطای مجاز ۰/۵ است [۲۴-۲۶].

روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتالی عمدتاً در تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی و جدایش گوناگون در تمام شاخه‌های علوم زمین و دانش‌های وابسته مانند اکتشاف نفت، معدن و ژئوفیزیک کاربرد دارند.

که پرکاربردترین آنها روش ارائه شده توسط کاستانیا^۱ براساس تغییرات لیتولوژی است [۱۶ و ۱۷]. روش‌های هوشمند یکی از روش‌های جدید، کم هزینه و دقیقی هستند که می‌توانند با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی مانند DSI، سرعت موج برشی مخزن را در کمترین زمان ممکن تخمین بزنند [۱۸]. جهت تخمین فشار منفذی به‌روش باورز با داده‌های سرعت، رابطه بین تنش مؤثر و سرعت در رسوبات تحت فشار نرمال توسط باورز پیشنهاد شده است [۱۹ و ۲۰]:

$$V = V_0 + A \sigma^B \quad (۱)$$

در اینجا، V_0 سرعت رسوبات ناپیوسته اشباع شده و A و B بیانگر تغییرات در سرعت با افزایش تنش مؤثر که از داده‌های چاه به‌دست می‌آیند. تنش مؤثر (σ) را نیز می‌توان از این رابطه تعیین کرد:

$$\sigma = \left[\frac{V - V_0}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (۲)$$

به‌منظور محاسبه فشار مؤثر در محدوده مخزن با استفاده از رابطه باورز، ابتدا باید ضرایب رابطه را به دست آورد. بدین ترتیب با توجه به اطلاعات فشار مؤثر نقاطی از چاه‌ها^۱ (MDT/DST) و همچنین مکعب فشار روباره ایجاد شده در بخش قبل می‌توان تنش مؤثر را در نقاطی از این چاه‌ها محاسبه نمود [۲۱-۱۹]. به‌علاوه، مقادیر سرعت صوتی در محل چاه‌ها را می‌توان با استفاده از نگار صوتی موجود به‌دست آورد. روش شبیه‌سازی گوسی متوالی^۳ (SGS) در شبیه‌سازی‌های زمین آماری معمول است و در بسیاری از شبیه‌سازها بر روی عیار، تخلخل، تراوایی و متغیرهای ناحیه‌ای دیگر جواب داده است. در این روش مقدار شبیه‌سازی شده در هر نقطه با استفاده از تابع توزیع احتمال محاسبه شده از داده‌های خام و داده‌های شبیه‌سازی قبلی در همسایگی نقطه مورد نظر به‌دست می‌آید. این روش با انتخاب تصادفی موقعیت و پیشرفت کار به‌صورت متوالی در طول شبکه به شبیه‌سازی می‌پردازد. اصل نخستین در تمام روش‌های گوسی، نرمال بودن داده خام است در غیر این صورت باید

1. Castagna
2. Modular Dynamic Tester (MDT)/Drill Stem Test (DST)
3. Sequential Gaussian Simulation (SGS)
4. Inverse Distance Weighted
5. Kriging Linear Unbiased Estimator
6. Co-Kriging

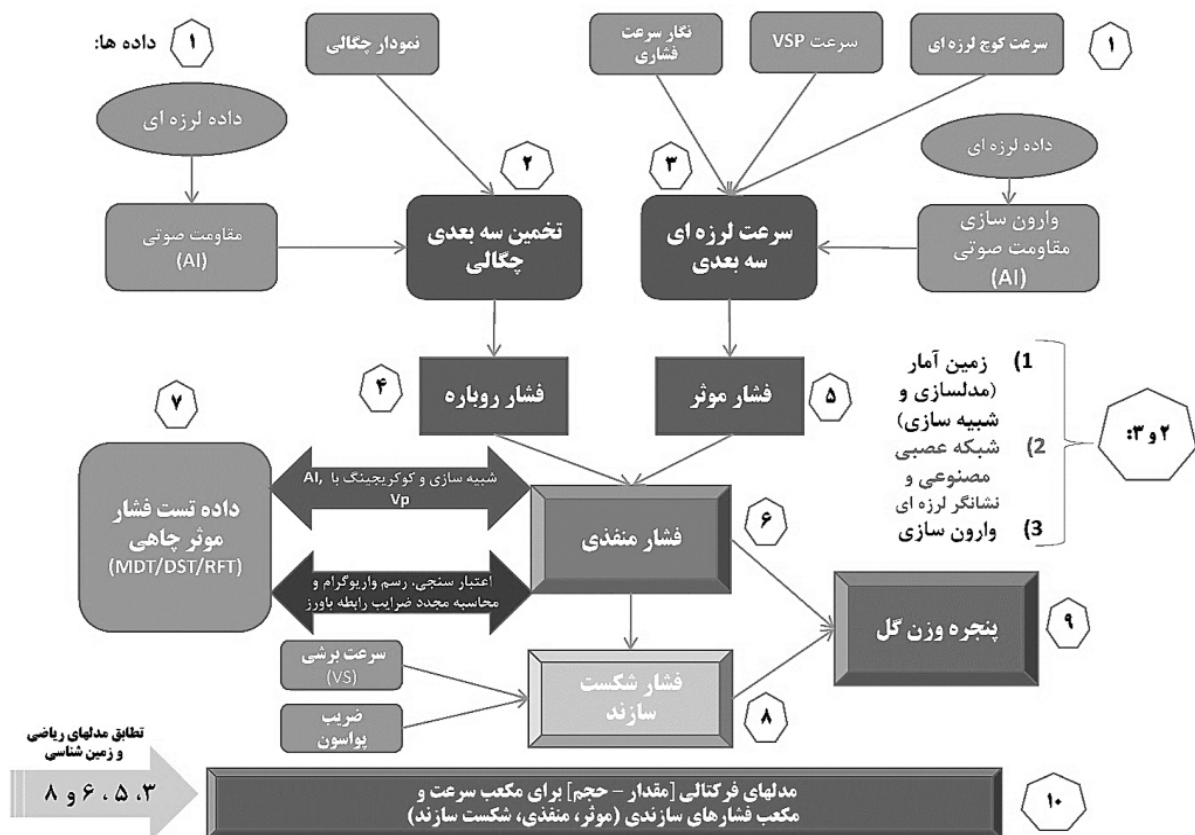
مجموع ۴۲ حلقه چاه‌های موجود، ۲۳ حلقه چاه دارای بیشترین اطلاعات انتخاب شده است که تعداد ۱۷ حلقه چاه واقع در بخش مرکزی، غربی و جنوبی آن دارای داده‌های آزمایش فشار مؤثر در سازندهای مخزنی ایلام تا فهلیان به‌صورت ناپیوسته است، اما در بخش‌های کناری میدان این داده‌ها وجود نداشته و برای محاسبه سرعت فشاری و نهایتاً گرادیان فشار منفذی در کل میدان باید این نمودار را برای چاه‌های واقع در بخش‌های کناری تخمین زد. به این منظور با تعیین روابط بین داده‌های موجود مخزن مانند نمودار سرعت فشاری و برشی، چگالی، گاما، تخلخل و اشباع سیال، سرعت کوچک لرزه‌ای لایه‌ای و مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی آماری مانند شبیه‌سازی گوسی متوالی همراه با کوکریجینگ هم مختصات و روش معکوس فاصله اقدام به مدل‌سازی اولیه شده است. هدف کلی از انجام این مطالعات تعیین مدل نهایی پنجره گل حفاری برای انجام حفاری‌های جدید در کل وسعت میدان مورد مطالعه به‌صورت ایمن با بالاترین تطابق ممکن است که طی سه مرحله مطالعات سرعت‌های لایه‌ای، فشارهای سازندی و نهایتاً تعیین محدوده وزن سیال حفاری انجام پذیرفته است که این مقاله حاصل از بخش اول مطالعات است (شکل ۱). در این مقاله جهت ساخت مدل نهایی مکعب سرعت فشاری در کل وسعت میدان آزادگان جنوبی، برای اولین بار از ترکیب روش‌های زمین آماری شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) و کوکریجینگ با مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای به‌صورت توأم استفاده شده که پس از انجام تطابق با مدل اولیه حاصل از روش معکوس فاصله وزن‌دار (IDW)، دارای همبستگی بالاتری نسبت به مدل مشابه با استفاده از مدل سرعت کوچک لرزه‌ای لایه‌ای بوده است.

در این میان روش‌های عیار-مساحت، عیار-محیط، عیار-تعداد و طیف توان-مساحت در علوم زمین کاربرد بیشتری دارند [۲۷ و ۲۸]. ماندلبروت و آگتبرگ روش مقدار-اندازه را به‌منظور تعیین مقادیر آستانه‌ای و زمینه ژئوشیمیایی ارایه کردند [۲۷ و ۲۸]. افضل و همکاران روش مقدار-حجم را نخستین بار برای جدایش زون‌های کانه‌زایی در کانسارهای مس پورفیری ارائه نمودند و در ادامه این روش برای جدایش جوامع در مطالعات ژئوفیزیکی، مکانیک سنگی و اقتصادی انجام شد [۳۲-۲۹]. در منحنی‌های لگاریتمی ناشی از روش‌های فرکتالی هر جا که شیب منحنی تغییر شدیدی نمود یعنی جامعه عوض شده است. این امر نشانگر تغییر شدید مقدار متغیر ناحیه‌ای (سرعت فشاری سازند در این مطالعه) است که تابع تغییر شرایط زمین‌شناسی است. فرمول روش عیار-حجم به شرح زیر است [۳۷-۳۳]:

$$V(\geq \rho) \propto \rho^{-D} \quad (3)$$

که در این حالت، V حجم دربرگیرنده عیارهای بزرگتر و مساوی ρ در کانسار مورد مطالعه و D بعد فرکتال است. در این تحقیق چالش جدیدی برای مطالعه سرعت فشاری به‌روش حجم-سرعت انجام شده است [۳۷]. جهت بررسی تطابق بین مدل‌های زمین‌شناسی و ریاضی از ماتریس لوگرشیو^۱ استفاده شده است. این ماتریس برای اولین بار توسط کارانزا ارایه و در تطبیق آنومالی‌های طلا ناشی از رسوبات آبراهه‌ای یافت شده با واحدهای سنگی در منطقه آروروی واقع در شمال غرب مجمع‌الجزایر فیلیپین، به کار گرفته شد. برای این کار از یک ماتریس ۲ در ۲ استفاده می‌گردد. هر داده‌ای که پس از محاسبات مربوط به ماتریس موردنظر بیشترین همپوشانی را با نتایج حاصل از مدل‌های زمین‌شناسی و ریاضی داشته باشد از دقت بالاتری (OA) برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان نتیجه‌ای قطعی و با کمترین میزان خطا مورد توجه واقع گردد [۳۸]. در محدوده مورد مطالعه واقع در میدان آزادگان جنوبی از

1. logratio



شکل ۱ روندنمای کلی مراحل اجرای تحقیق شامل مطالعات سرعت لایه‌ای، فشارهای سازندی و پنجره گل حفاری.

از نرم‌افزار EXCEL 2019 جهت رسم مدل‌های فرکتالی براساس داده‌های خروجی از نرم‌افزار پترل استفاده شده است.

روش کار

ساخت مدل زمین‌شناسی ساختمانی براساس داده‌های لرزه‌ای و زمین‌شناسی

سازند های میدان آزادگان جنوبی براساس تعبیر و تفسیر افق‌های لرزه‌ای (برحسب داده زمانی^۱) و تطابق با داده‌های زمین‌شناسی حاصل از حفاری های اکتشافی مدل‌سازی شده و افق‌های لرزه‌ای برحسب داده عمقی به‌صورت سطوح جداگانه از لایه سطحی آغا جاری تا سازند گوتینا ساخته شده و هر یک از سازندها براساس تعداد بخش‌های مختلف آن جداگانه مدل‌سازی شده است.

همچنین سایر موارد نوآوری تحقیق حاضر عبارت است از استفاده از قابلیت‌های جدید نرم‌افزار پترل جهت برنامه‌نویسی شرطی که شامل عبارات شرطی متوالی و تو در تو جهت تجمیع نگارها و مدل‌ها در یک مدل واحد و حذف مقادیر خارج از محدوده بوده، و نهایتاً استفاده از مدل‌های فرکتالی سرعت فشاری - حجم جهت جدایش رژیم‌های سرعت و انجام تطبیق مدل‌های ریاضی سرعت لایه ای و مدل زمین‌شناسی به‌صورت لیتولوژی غالب و صحت سنجی مطالعات در حد قابل قبول است. در این مقاله از نرم‌افزار پترل برای ساخت مکعب‌های سرعت و مقاومت صوتی، مدل‌سازی به روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی و کوکریجینگ و همچنین برنامه‌نویسی شرطی استفاده شده است. نرم‌افزار همپسون راسل ۸ (HRS-8) نیز جهت انجام وارون‌سازی و تولید مکعب مقاومت صوتی و نهایتاً

مدل ساختاری است. به دلیل وجود شباهت زیاد افق‌های لرزه‌ای سازند لافان و سروک، این سازند در جنوب ضخیم‌تر می‌شود که این امر موجب دشواری تعبیر و تفسیر و پیدا کردن سر سازند سروک شده است.

سازند سروک

مخزن آهکی سروک، مخزن اصلی میدان آزادگان است. ضخامت آن ۶۰۵ m در چاه A-001 با ستون ۲۰۰ m هیدروکربور است و سطح تماس آب و نفت در عمق ۲۸۷۴ m مشاهده می‌شود. متوسط ضخامت مدل ساختاری نیز ۶۵۶/۴ m است.

سازند کژدمی

سازند کژدمی عمدتاً از شیل و مارل تشکیل شده است اما دارای مخزن ماسه‌سنگی به ضخامت ۱۸/۵ m به سمت قاعده سازند است. ممکن است این واحد ماسه‌سنگی به سمت جنوب میدان ضخیم شود. سطح تماس آب و نفت در عمق ۳۵۰۲/۵ m برای مخزن ماسه‌سنگ کژدمی مشاهده شده است. متوسط ضخامت سازند فوق در مدل زمین‌شناسی ۲۲۵/۸ m است.

سازند گدوان

سازند گدوان عمدتاً از شیل و سنگ‌آهک تشکیل شده است، اما دارای ماسه‌سنگی به ارتفاع ۴۸/۵ m بوده که مانند ماسه‌سنگ کژدمی ممکن است در جنوب این میدان ضخیم شود. متوسط ضخامت کلی سازند گدوان ۱۸۶ m و در بخش پایینی خلیج ۱۲۳/۵ m است.

سازند فهلیان

سازند فهلیان شامل سنگ‌آهک‌های رسی ضخیم با کیفیت مخزنی ضعیف است که حاوی مقداری نفت سنگین بوده ولی کیفیت مخزن به سمت جنوب بهبود می‌یابد [۳۹]. متوسط ضخامت سازند فهلیان در بخش بالایی ۱۵۱/۷ m و در بخش پایینی تا ابتدای سازند گوتنیا به‌طور متوسط ۸۵۰/۴ m است [۳۹-۴۱].

با توجه به عدم وجود سیستم‌های گسلی پیچیده در منطقه از مدل زمین‌شناسی دارای شبکه ساده توسط نرم‌افزار پترل اقدام به ساخت مدل زمین‌شناسی شده است.

مشخصات سازندهای مخزنی میدان آزادگان جنوبی

سازندهای مخزنی میدان آزادگان جنوبی شامل ۷ سازند پابده، گورپی، ایلام، سروک، کژدمی، گدوان و فهلیان است که در ادامه به‌همراه سازندهای عمیق گرو و گوتنیا به‌صورت خلاصه ارائه شده‌اند.

سازند پابده

براساس تطابق تعبیر و تفسیر لرزه‌ای و داده‌های حفاری سازند پابده دارای ضخامت ۲۷۲ m در چاه A-001 و از سنگ‌آهک با نفوذپذیری کم تشکیل شده است، لیکن در سه منطقه که نفوذپذیری افزایش یافته، سازند نفتی است. با این حال برای محاسبات حجمی کل سازند پابده به‌عنوان یک واحد در نظر گرفته شد [۳۹]. به‌دلیل شباهت افق لرزه‌ای سازند فوق با افق آسماری، در هنگام ساخت لایه‌های زمین‌شناسی در نرم‌افزار پترل به‌صورت مشترک با سازند آسماری به‌عنوان لایه واحد آسماری-پابده در نظر گرفته شده است. ضخامت متوسط سازندهای آسماری و پابده در مدل زمین‌شناسی ساختاری ۷۲۷/۸ m است.

سازند گورپی

سازند گورپی ۲۵۵/۴ m ضخامت سنگ‌آهک در چاه A-001 دارد، نفت در سرتاسر آن وجود دارد اما فقط در چند فواصل گسسته مخزن خوبی وجود دارد [۳۹]. برای محاسبات حجمی سازند گورپی با ضخامت کلی به‌صورت متوسط ۳۶۸/۴ m و بخش تاربور در قسمت انتهایی آن با ضخامت متوسط ۲۲۳/۸ m در نظر گرفته شد.

سازند ایلام

ایلام از سنگ‌آهک تشکیل شده است. براساس تعبیر و تفسیر لرزه‌ای ضخامت آن در چاه A-001 به‌میزان ۸۳/۵ m و ضخامت متوسط ۱۲۲/۵ m در

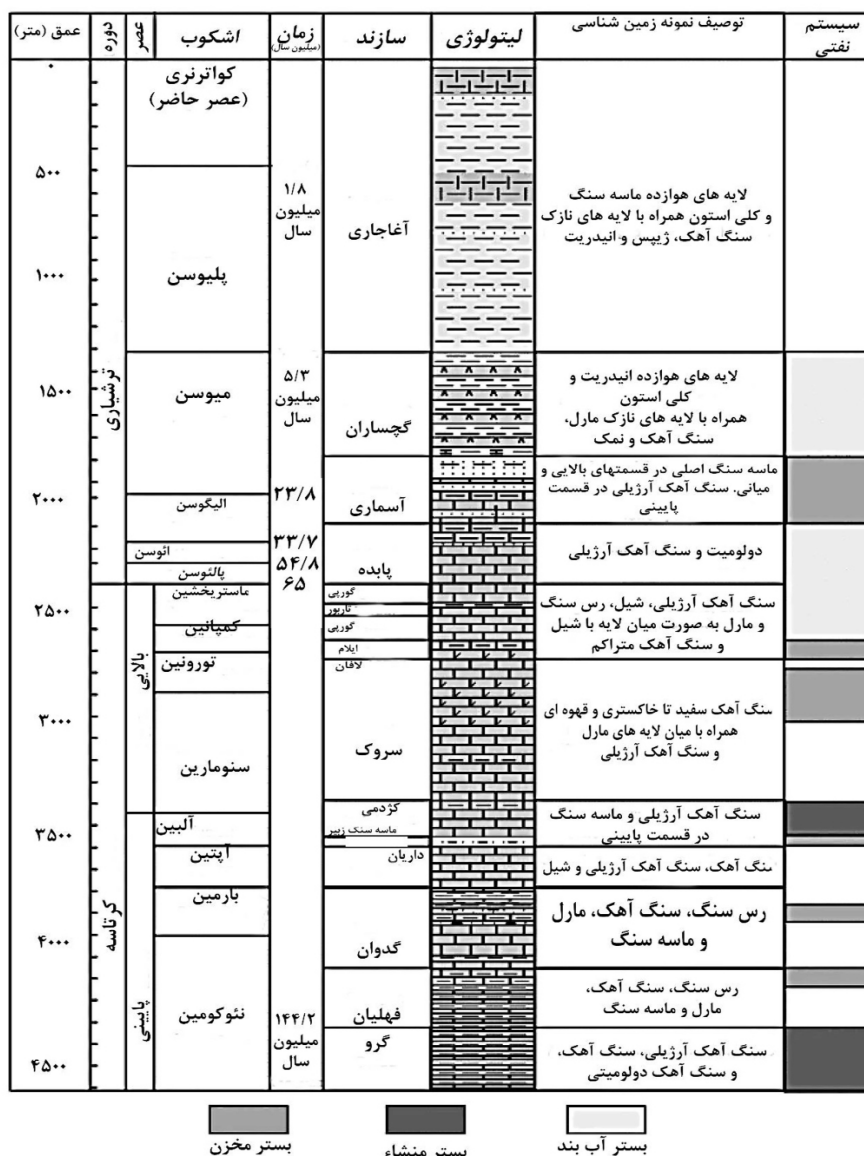
سازند گرو

سنگ‌شناسی قسمت انتهایی در چاه‌های موجود عمدتاً سنگ رس و انیدریت، نمک و شیل و سنگ آهک است. این سازند عمدتاً شامل سنگ آهک و مقادیر متغیری کانی‌های رسی شامل کلریت می‌باشد. مقادیر ناچیزی نیز به‌طور پراکنده فلزات سنگین مشاهده می‌شود [۳۹ و ۴۰].

سازند گوتنیا

سازند گوتنیا مربوط به بخش انتهایی دوران کرتاسه و سازندهای دوران ژوراسیک تنها در یک چاه مورد

حفاری قرار گرفته است که براساس نتایج تعبیر و تفسیر نمونه‌های زمین‌شناسی، سنگ‌شناسی این سازند عمدتاً از لایه‌های ضخیم انیدریت به‌همراه مقادیر متغیری سنگ آهک و درصد ناچیزی کانی‌های رسی از جمله کلریت تشکیل شده و همچنین یک لایه حاوی نمک مشاهده شده است. این سازند از لحاظ مخزنی فاقد پتانسیل هیدروکربوری بوده و متراکم می‌باشد [۴۰ و ۴۱]. ستون چینه‌شناسی سازندهای میدان آزادگان جنوبی در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲ ستون چینه‌شناسی میدان آزادگان جنوبی با استفاده از مقاطع لرزه‌ای و داده‌های حفاری [۴۱].

آگاجاری به‌میزان ثابت 1984.61 m/s محاسبه شده است. بیشترین سرعت متوسط در محدوده 2900 m/s - 2760 m/s در سمت شمال شرق مربوط به سازند گوتنیا و کمترین آن مربوط به سازند گچساران با 2280 m/s - 2150 m/s در جهت جنوب غرب محدوده مورد مطالعه است. به‌عنوان مثال بر طبق شکل ۴ تغییرات سرعت متوسط سازند فهلیان پایینی در محدوده 2760 m/s - 2330 m/s بوده و بیشترین مقادیر سرعت متوسط در شمال شرق و کمترین آن در جنوب غرب نمایان است.

مدل سرعت فشاری (V_p) براساس داده‌های نگار سرعت فشاری DT

برای تهیه مکعب سرعت فشاری با داده‌های نگار سرعت فشاری نیاز به تکمیل داده‌ها برای تمام چاه‌های مورد بررسی از سطح زمین تا انتهای چاه بوده است. با توجه به این که هیچ کدام از نگارهای سرعت فشاری از سطح زمین برداشت نشده است، لذا استفاده از شبکه‌های عصبی برای ساخت مدل سرعت در لایه‌های سطحی فاقد اطلاعات مقدور نبود. بنابراین با توجه به اینکه هشت حلقه چاه دارای سرعت لایه‌ای VSP و نیز چهار حلقه چاه دارای داده‌های اشعه گاما از سطح زمین تا انتهای چاه بوده‌اند لذا در مرحله اول با تعیین رابطه بین نگارهای $V(VSP)_{int}$ و Gr نگار جدیدی به‌نام $V_{p,temp}$ ساخته شد.

مدل سرعت VSP لایه‌ای

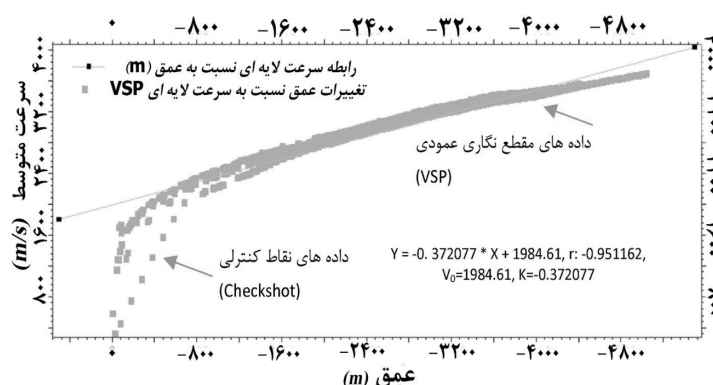
مدل سرعت لایه‌ای با استفاده از رابطه سرعت داده‌های نقاط کنترلی و مقطع نگاری عمودی با تغییرات عمق در چاه‌های دارای اطلاعات طبق رابطه ۴ تهیه شده و ضرایب V_0 و K با ضریب همبستگی 0.95 تعیین شده است (شکل ۳).

$$V = V_0 + K * Z \quad (4)$$

در این رابطه، K ضریب ثابت تبدیل لایه‌های افق‌های عمقی به سرعت متوسط لایه‌ای و V_0 سرعت لایه سطحی است. از داده‌های سر سازندهای ایلام، سروک، کژدمی، گدوان، فهلیان و گرو جهت تطابق با داده‌های افق‌های لرزه‌ای عمقی استفاده شده است. برای لایه سطحی آگاجاری نیز به دلیل در اختیار نداشتن افق لرزه‌ای سطحی از رابطه $V = V_0 = V_{int}$ و برای سایر لایه‌ها از رابطه ۴ با مقادیر $V_0 = 1984.61$ و $K = -0.37277$ برای تبدیل لایه‌های افق‌های عمقی به سرعت متوسط بر طبق جدول زیر استفاده شده است. نهایتاً، سرعت متوسط هرسازند با استفاده از رابطه ۵ محاسبه و نقشه سرعت متوسط هر لایه به‌صورت جداگانه تهیه و خلاصه نتایج آن در جدول ۱ ارائه شده است.

$$V_{avg} \left(\frac{m}{s} \right) = 2000 * Z \left(\frac{m}{s} \right) / TWT (ms) \quad (5)$$

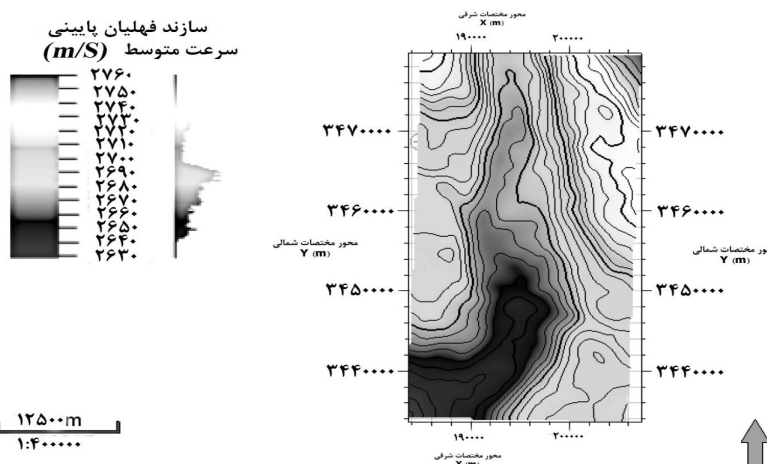
در این رابطه، TWT زمان رفت و برگشت موج برحسب میلی ثانیه (ms)، Z عمق برحسب متر (m) و V_{avg} سرعت لایه‌ای برحسب متر بر ثانیه (m/s) است. بر این اساس، سرعت متوسط سازند سطحی



شکل ۳ ضریب همبستگی داده‌های سرعت متوسط نقاط کنترلی، مقطع نگاری عمودی و عمق برای تعیین ضرایب مدل سرعت.

جدول ۱ مقادیر میانگین سرعت حداقل و حداکثر لایه‌ها براساس داده‌های VSP و افق‌های لرزه‌ای.

سازند	سرعت متوسط حداقل (m/s)	جهت سرعت حداقل	متوسط سرعت حداکثر (m/s)	جهت سرعت حداکثر
آغاجاری	۱۹۸۴/۶	ثابت	۱۹۸۴/۶	ثابت
گچساران	۲۱۵۰	جنوب غربی	۲۲۸۰	شمال غربی
آسماری و پابده	۲۲۰۰	جنوب غربی	۲۳۴۰	شمال شرق و شمال غربی
گورپی	۲۳۳۰	جنوب غربی	۲۴۶۰	شمال شرق و شمال غربی
بخش تارپور (سازند گورپی)	۲۳۷۰	جنوب غربی	۲۴۸۰	شمال شرق و شمال غربی
ایلام و لافان	۲۴۱۰	جنوب غربی	۲۵۱۰	شمال شرق و شمال غربی
سروک	۲۴۳۰	جنوب غربی	۲۵۳۰	شمال شرق و شمال غربی
کژدمی	۲۵۳۰	جنوب غربی	۲۶۳۰	شمال شرق و شمال غربی
داریان	۲۵۶۰	جنوب غربی	۲۶۷۰	شمال شرق و شمال غربی
گدوان	۲۵۹۰	جنوب غربی	۲۷۰۰	شمال شرق و شمال غربی
بخش خلیج (سازند گدوان)	۲۶۰۰	جنوب غربی	۲۷۱۰	شمال شرق و شمال غربی
فهلپان بالایی	۲۶۲۰	جنوب غربی	۲۷۳۰	شمال شرق و شمال غربی
فهلپان پایینی	۲۳۳۰	جنوب غربی	۲۷۶۰	شمال شرقی
گوتنیا	۲۷۶۰	جنوب غربی	۲۹۰۰	شمال شرقی



شکل ۴ سرعت متوسط سازند فهلپان پایینی براساس افق‌های لرزه‌ای و داده‌های VSP

ضرایب همبستگی سرعت نگار VSP و سرعت فشاری V_p برای هر کدام از ۸ حلقه چاه جداگانه محاسبه شده و رابطه میانگین به دست آمده برای همه چاه‌ها استفاده شده است (جدول ۲). داده‌های اولیه نگار سرعت فشاری برحسب میکروثانیه بر فوت (DT) بوده که با رابطه γ تبدیل به متر بر ثانیه شده است.

در مرحله دوم با استفاده از کد نویسی شرطی در نرم‌افزار پترل، نگار دیگری به نام V_2 طبق رابطه ۶ ساخته شد به گونه‌ای که در هر عمقی که داده $V_{int}(VSP)$ وجود داشته ولی داده سرعت فشاری V_p موجود نباشد، $V_{int}(VSP)$ معادل V_p در نظر گرفته شود.

$$V_{int}(VSP) = V_p \quad (6)$$

جدول ۲ ضرایب همبستگی سرعت لایه‌ای VSP و نگار سرعت فشاری Vp در چاه‌های دارای داده VSP

نام چاه	A-001	A-002	A-004	A-005	A-006	A-010	A-025	YD-006
ضریب همبستگی Vp و VSP	۰/۵۳۲۴	۰/۷۹۸۰	۰/۵۴۳۳	۰/۵۰۸۳	۰/۵۹۹۱	۰/۷۳۲۳	۰/۸۰۷۷	۰/۹۰۶۱
ضریب همبستگی کلی	$V_p = 0.33041 * V_{int} (VSP) + 3139.5$, Correlation coefficient: 0.416904							

تغییرات تخلخل و لیتولوژی و مرحله بعدی شامل برداشت نگار برشی DSI به‌صورت مقطعی در سه حلقه چاه است که در هر مرحله نسبت به تکمیل مکعب‌های نگار سرعت برشی و مقایسه با داده‌های اولیه جهت تعیین مکعب نهایی سرعت برشی اقدام شده است.

استفاده از نتایج آزمایشگاهی چاه‌های حفاری براساس تغییرات لیتولوژی

به‌صورت کلی در صورت عدم وجود نگار سرعت برشی به‌صورت کلی از طریق رابطه کاستانیا^۲ با استفاده از نگار سرعت فشاری و تغییر لیتولوژی اقدام به محاسبه سرعت برشی می‌شود [۴۲-۵۰ و ۱۶، ۱۷].

(۱۰) سازند آهکی

$$V_s = -0.05509V_p^2 + 1.0168V_p - 1.0305$$

$$V_s = 1.0168V_p - 1.0305 \quad (۱۱) \text{ سازند ماسه‌سنگی}$$

$$V_s = 0.583V_p - 0.07776 \quad (۱۲) \text{ سازند دولومیتی}$$

$$V_s = 0.77V_p - 0.8674 \quad (۱۳) \text{ سازند شیلی}$$

این مرحله از مطالعات براساس رابطه نگار سرعت فشاری چهار حلقه چاه اکتشافی و سرعت برشی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه شرکت TRC ژاپن در سال، تغییرات لیتولوژی با توجه به لیتولوژی غالب ماسه‌سنگ، ترکیب سنگ‌آهک، مارل و شیل و همچنین سنگ‌آهک غالب با بالاترین ضرایب همبستگی تعیین شده است، سپس با بررسی لیتولوژی کل چاه‌های مورد مطالعه به‌صورت جداگانه، نگار سرعت برشی هر چاه با استفاده از برنامه‌نویسی شرطی نرم‌افزار پترل محاسبه و تهیه شده است.

همچنین کلیه مقادیر خارج از ردیف داده‌های DT که به‌دلیل ایجاد نویز یا خطای برداشت به‌وجود آمده است حذف شده‌اند.

$$V_p \left(\frac{m}{s} \right) = \frac{304,785.13}{DT \left(\frac{\mu s}{ft} \right)} \quad (۷)$$

در مرحله سوم با ترکیب داده‌های نگار V_۲ و V_p.temp، نگار جدیدی به‌نام V_p.full طبق رابطه ۸ ساخته شد به‌گونه‌ای که قسمت‌های بدون داده نگار V_۲ با داده‌های نگار V_p.temp تکمیل شود:

$$V_{p_Full} = If (V_2 = U, V_{p_temp}, V_2) \quad (۸)$$

در مرحله چهارم پس از تکمیل داده‌های وزن مخصوص براساس تغییرات عمق، نگار دیگری به‌نام V_p.full2 براساس رابطه بین وزن مخصوص و داده‌های اولیه سرعت فشاری تهیه شد. نهایتاً در پنجمین مرحله نگار نهایی V_p.full_final طبق رابطه ۹ به‌گونه‌ای ساخته شده که هر کجا داده V_p.full موجود نباشد از داده‌های V_p.full.2 استفاده شود (شکل ۵).

(۹)

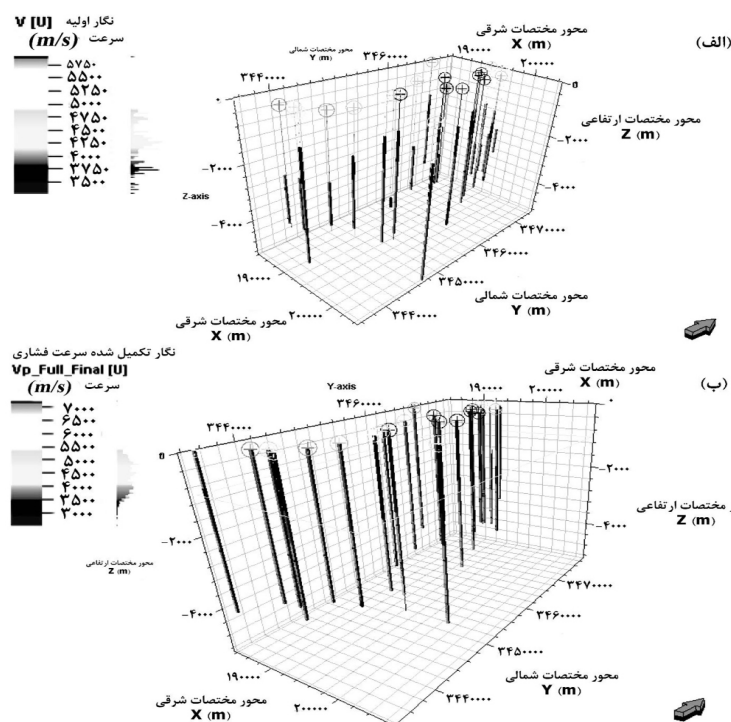
$$V_{p_Full_Final} = If (V_{p_Full} = U, V_{p_Full}, V_{p_Full})$$

براساس نگار V_p.full. final به‌دست آمده، کلیه ۲۳ حلقه چاه اکتشافی مورد بررسی در میدان آزادگان جنوبی دارای داده‌های کامل نگار سرعت فشاری از سطح زمین تا انتهای چاه شده و پس از توسعه مدل به کل مکعب^۱، محیای ساخت مدل مکعب سرعت در مرحله بعد شده‌اند (شکل ۶).

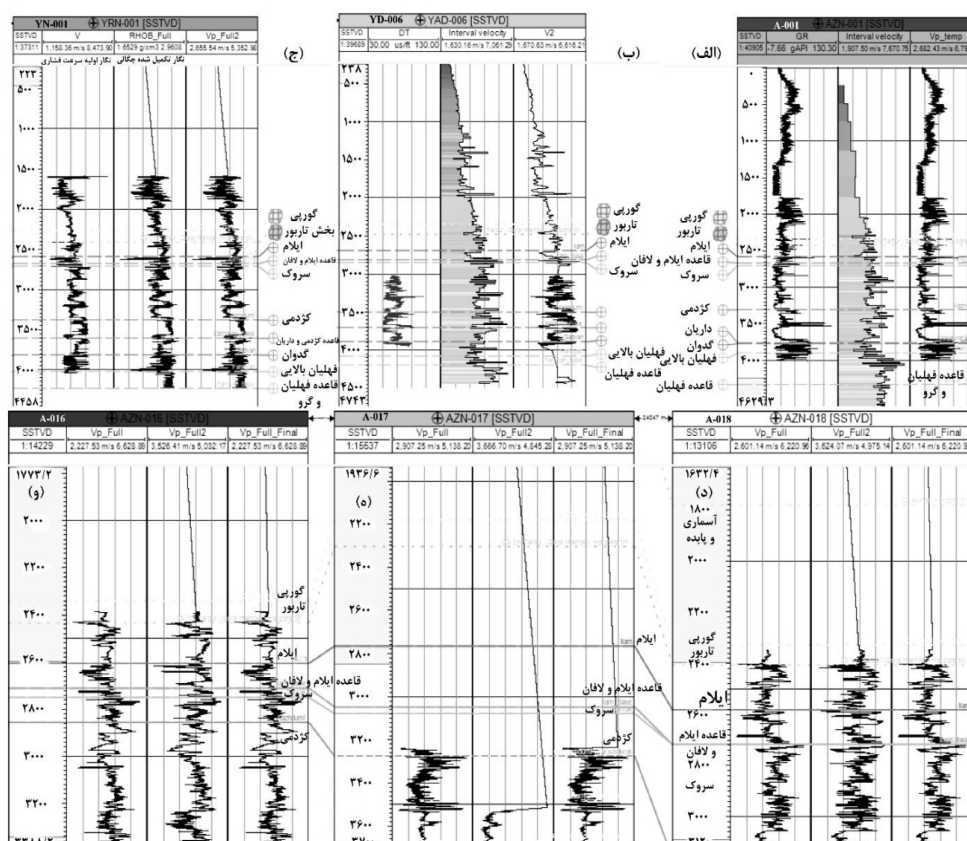
محاسبه و تکمیل مکعب سرعت برشی

مطالعات اولیه سرعت برشی شامل اندازه‌گیری سرعت برشی از روی مغزه‌های ۴ حلقه چاه اکتشافی و بررسی نسبت آن به نگار سرعت فشاری براساس

1. Scale Up
2. Castagna



شکل ۵ مدل تعمیم یافته الف) داده‌های نگار سرعت فشاری اولیه و ب) نهایی محدوده مطالعاتی



شکل ۶ الف) نمونه‌ای از ساخت نگار اولیه Vp.temp. براساس داده‌های نگار V.VSP.int و Gr، ب) نگار ثانویه V_2 براساس داده‌های نگار DT و V_{int} (VSP)، ج) ساخت نگار سرعت Vp.full2 براساس داده‌های نگار سرعت اولیه و وزن مخصوص تکمیل شده و د-و) نمونه‌هایی از نگار نهایی Vp.full_final در صورت عدم وجود داده Vp.full که از داده‌های Vp.full.2 استفاده می‌شود

همبستگی مکعب‌های فوق به‌میزان ۰/۹۴ به‌دست آمده که نشان‌دهنده تطابق بالای نتایج حاصل از دو روش است، لذا با توجه به اینکه نگارهای سرعت برشی حاصل از تغییرات لیتولوژی به‌صورت چاه به چاه محاسبه شده است، جهت انجام صحت‌سنجی از نگارهای ساخته شده فوق و داده‌های برداشت شده سرعت برشی استفاده شده است.

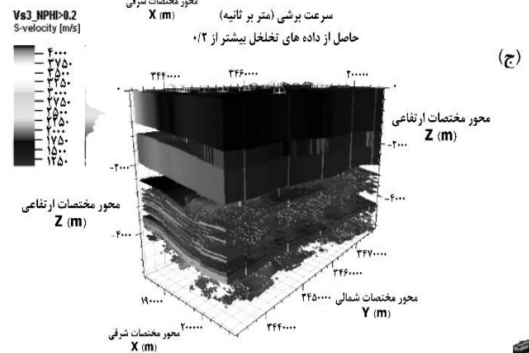
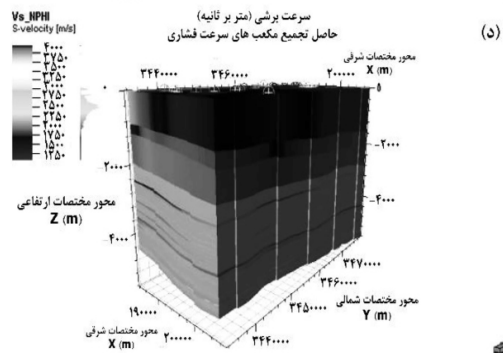
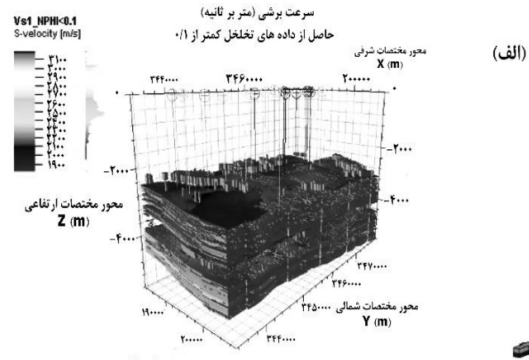
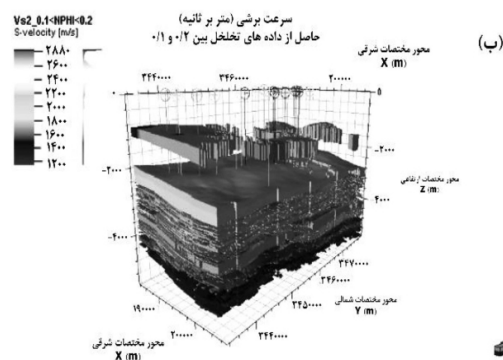
استفاده از نگارهای سرعت برشی DSI برداشت شده در چاه‌های اکتشافی

داده‌های اولیه نگارهای سرعت برشی^۱ (DSI) برداشت شده شامل توالی از چاه A-006 در دو مقطع از بخش تارپورسازند گورپی و سازند گدوان و چاه‌های A-010 و A-025 در بخش‌های انتهایی گدوان تا اوایل فلهیان پایینی بوده است که پس حذف داده‌های خارج از ردیف، ضریب همبستگی آنها با داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های لیتولوژی مورد محاسبه قرار گرفت.

برای مثال در یکی از چاه‌ها با مشخص کردن محدوده‌های ماسه‌سنگی، سنگ‌آهک مخلوط با شیل و سنگ‌آهک خالص براساس رابطه ۱۴، برنامه‌نویسی شرطی ساخت نگار سرعت برشی چاه فوق به شکل زیر است:

$$V_s = \text{If}(\text{DEPT} < 1290, (0.738 * V_{p_Full_Final} / 1000 - 0.5653) * 1000, \text{If}(\text{DEPT} \geq 1290 \text{ and } \text{DEPT} < 2330, (0.5243 * V_{p_Full_Final} / 1000 + 0.0451) * 1000, \text{If}(\text{DEPT} \geq 2330 \text{ And } \text{DEPT} < 3300, (-0.1068 * \text{Pow}(V_{p_Full_Final} / 1000, 2) + 1.5106 * V_{p_Full_Final} / 1000 - 2.2008) * 1000, \text{If}(\text{DEPT} \geq 3300 \text{ and } \text{DEPT} < 3890, (0.5243 * V_{p_Full_Final} / 1000 + 0.0451) * 1000, \text{If}(\text{DEPT} \geq 3890 \text{ and } \text{DEPT} < 4640, (-0.1068 * \text{Pow}(V_{p_Full_Final} / 1000, 2) + 1.5106 * V_{p_Full_Final} / 1000 - 2.2008) * 1000, U$$

پس از تکمیل مکعب‌های سرعت برشی حاصل از روش‌های تغییرات تخلخل شکل ۷ و لیتولوژی، ضرایب



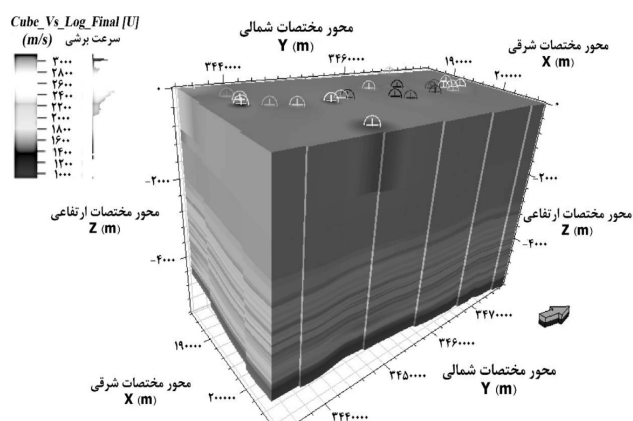
شکل ۷ مکعب سرعت برشی (m/s) براساس الف) تخلخل زیر ۰/۱ و رابطه سرعت فشاری با ضریب همبستگی خطی ۰/۹۲، ب) تخلخل بین ۰/۱ تا ۰/۲ و رابطه سرعت فشاری با ضریب همبستگی غیر خطی ۰/۹۳، ج) تخلخل بیشتر از ۰/۲ و رابطه سرعت فشاری با ضریب همبستگی خطی ۰/۹۷ و د) تلفیق مکعب‌های سرعت برشی.

داده‌های اولیه در محل چاه‌ها و داده‌های مصنوعی وارون لرزه‌ای به میزان ۹۹/۶۱٪ و متوسط خطای نسبی به میزان ۸/۷۶٪ در حد قابل قبول، مکعب اولیه مقاومت صوتی برحسب داده‌های عمقی ساخته شده است (شکل ۹). در مرحله بعد مکعب مقاومت صوتی حاصل ضرب مقادیر نگار سرعت در نگار وزن مخصوص تهیه شده و نمودار همبستگی دو مکعب با میزان ۷۰٪ به دست آمد. لذا قسمت‌های خالی مکعب مقاومت صوتی وارون‌سازی شده با استفاده از مکعب مقاومت صوتی حاصل از نگارهای سرعت فشاری و وزن مخصوص تکمیل گردیده است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). براساس نتایج به دست آمده مقادیر نهایی مقاومت صوتی وارون‌سازی شده در اعماق پایین اکثراً در محدوده $(\text{m/s}) \cdot (\text{g/cm}^3) \cdot 15000$ - 8000 است که در محدوده سازندهای آهکی می تواند قرار گیرد، سازند سطحی آجاجاری با مقدار کمتر از $(\text{m/s}) \cdot (\text{g/cm}^3) \cdot 8000$ در محدوده سازندهای مارلی و شیلی قرار می گیرد که نتایج به دست آمده دارای تطابق بالایی با نمونه‌های زمین‌شناسی حفری است. بیشترین مقادیر مقاومت صوتی نیز در بخش پایینی میدان در محدوده سازندهای فلهلیان پایینی تا گوتنیا است. پس از ورود داده‌های سرعت لرزه‌ای پس از برانبارش^۱ و ساخت مدل پتروفیزیکی مربوطه، اقدام به ساخت مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای جهت انتخاب مدل نهایی سرعت نهایی شده است.

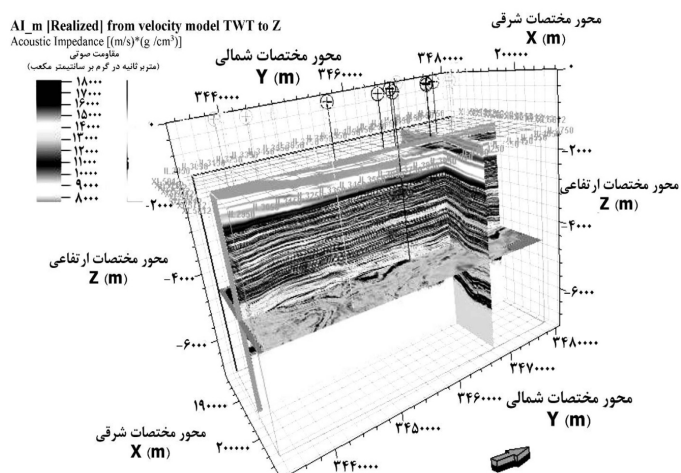
براساس نتایج به دست آمده، ضریب همبستگی ۰/۹۵ برای داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های لیتولوژی با داده‌های اصلی سرعت برشی DSI نشان از صحت بالای مطالعات انجام شده بوده، لذا نگار نهایی سرعت برشی با تلفیق داده‌های سرعت برشی DSI با داده‌های اولیه تهیه شده است. جهت تهیه نگار نهایی سرعت برشی، نگارهای سرعت برشی DSI جایگزین داده‌های حاصل از لیتولوژی شده و نگار نهایی به صورت توسعه مدل به کل مکعب در آمده است. مکعب نهایی سرعت برشی با استفاده از روش مجذور معکوس فاصله (IDW) به دست آمده است (شکل ۸). بیشترین نوسانات سرعت برشی در محدوده ۲۲۰۰ تا ۳۰۰۰ m/s و حداکثر سرعت برشی به میزان بیشتر از ۳۰۰۰ m/s در اعماق بیشتر از ۴۲۰۰ است. جهت حصول نهایی اطمینان از صحت مدل سرعت برشی، ضریب همبستگی مکعب‌های سرعت مدل نهایی با مدل بر پایه داده‌های تخلخل محاسبه شده که مقدار فوق ۰/۹۵ به دست آمد و نشانگر قابل قبول بودن مدل ارائه شده است.

تکمیل مکعب مقاومت صوتی حاصل وارون‌سازی لرزه‌ای و مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای

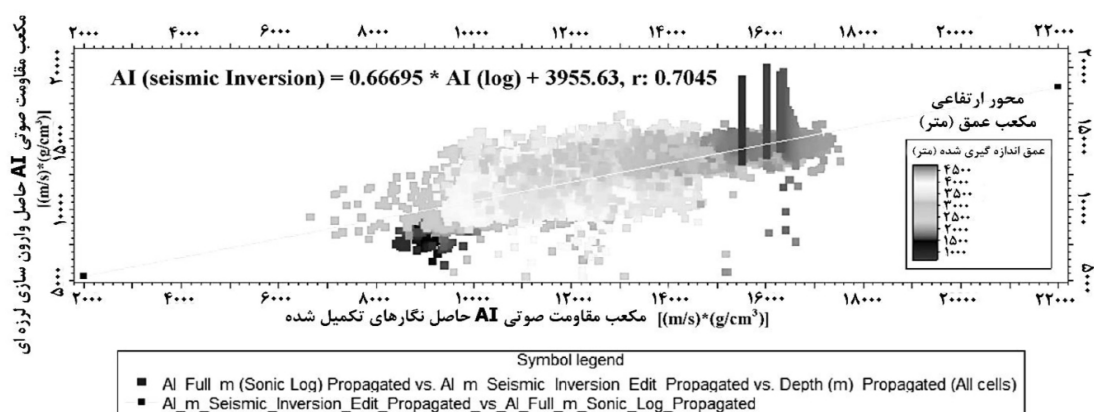
پس از ورود داده‌های مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه نگاشت مصنوعی با بالاترین تطابق



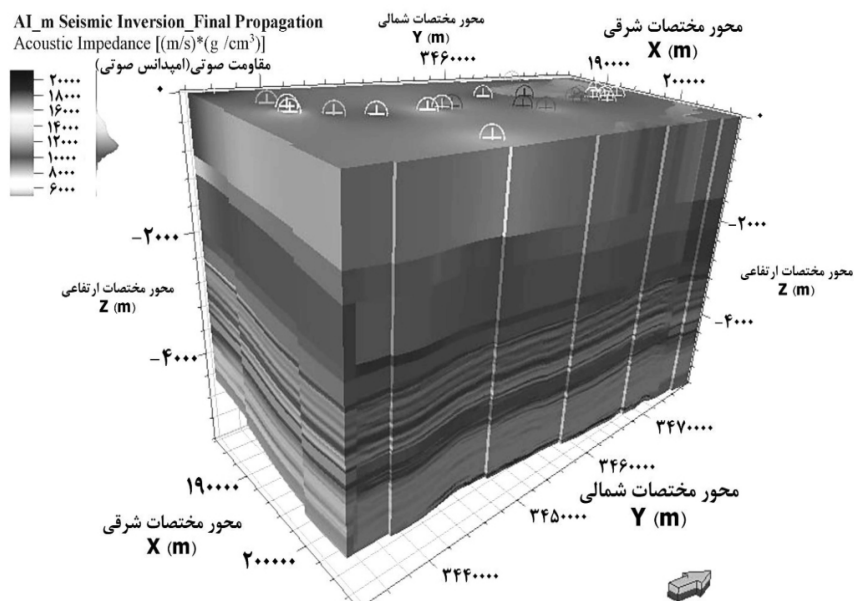
شکل ۸ مکعب نهایی سرعت برشی (m/s) میدان آزادگان جنوبی.



شکل ۹ تبدیل مقاومت صوتی خروجی از نرم‌افزار همپسون راسل به مکعب اولیه مقاومت صوتی (برحسب داده عمقی).



شکل ۱۰ تعیین ضریب همبستگی مقاومت صوتی AI حاصل از داده‌های نگار و وارون‌سازی لرزه‌ای اصلاح شده.



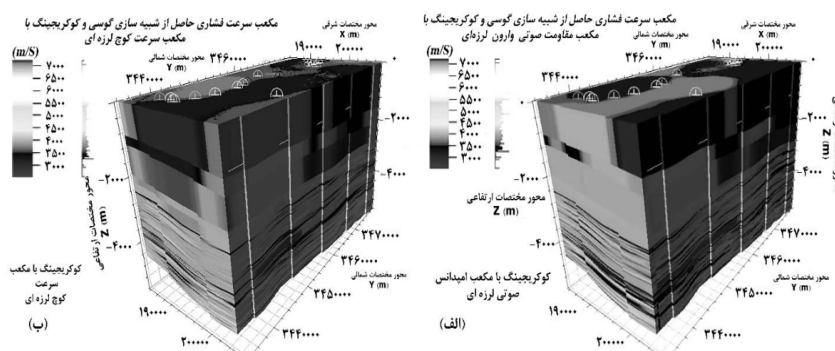
شکل ۱۱ مکعب نهایی مقاومت صوتی AI حاصل از داده‌های نگار و وارون‌سازی لرزه‌ای.

بحث

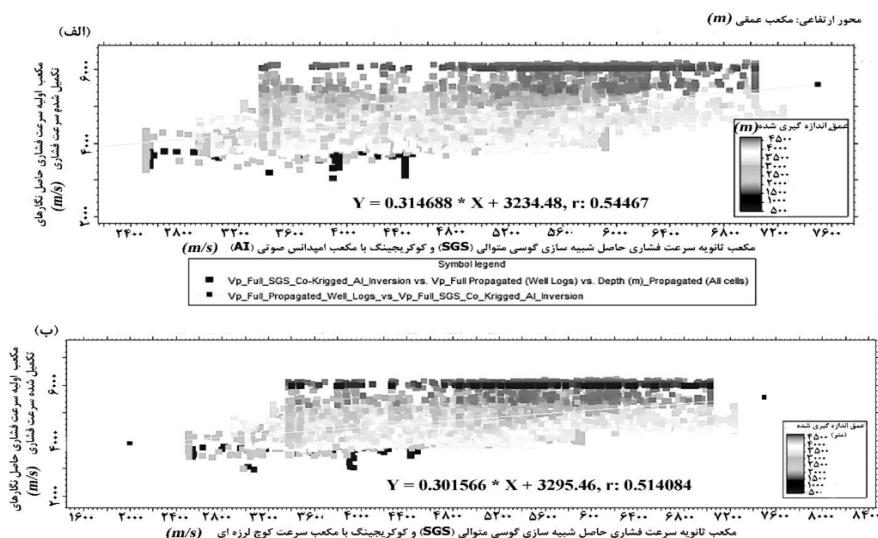
تعیین مدل ثانویه سرعت به روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) و کوکریجینگ

در این مرحله جهت تعیین مدل نهایی سرعت، داده‌های تکمیل شده نگار سرعت فشاری با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مکعب‌های مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و همچنین مکعب سرعت کوچ مجدداً قرار گرفته و پس از محاسبه ضرایب همبستگی مکعب‌های آنها، مدل دارای ضریب همبستگی بالاتر به‌عنوان مدل نهایی جهت تعیین فشارهای مؤثر و منفذی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۱۲).

بنابراین نتایج به‌دست آمده ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری حاصل شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی حاصل وارون لرزه‌ای و مکعب اولیه سرعت به روش معکوس فاصله به‌میزان ۰/۵۴ و همچنین ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری حاصل شبیه‌سازی گوسی و کوکریجینگ توأم با سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای و مکعب اولیه سرعت به‌میزان ۰/۵۱ است، لذا جهت مدل‌سازی فشار مؤثر به روش باورز استفاده از مکعب سرعت فشاری حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای پیشنهاد شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۲ مکعب نگار سرعت فشاری به روش SGS و کوکریجینگ شده با الف) مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای و ب) مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای.



شکل ۱۳ الف) ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری کوکریجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای و مکعب اولیه سرعت به روش معکوس فاصله و ب) ضریب همبستگی مکعب سرعت فشاری کوکریجینگ با سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای و مکعب اولیه سرعت به روش معکوس فاصله.

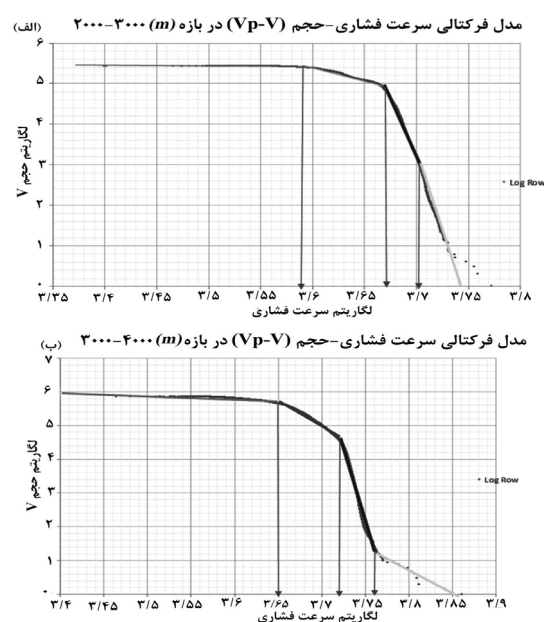
مدل فرکتالی مقدار حجم سرعت فشاری

۵۵۹۰ نیز ۴ رژیم سرعت فشاری با سه نقطه شکست بین ۵۹۵۶/۶ و ۶۱۰۹/۴ m/s مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز در دوره ژوراسیک می‌باشند. دو نمونه از نمودارهای مدل فرکتالی مقدار-حجم فواصل m ۴۰۰۰-۲۰۰۰ مکعب سرعت فشاری میدان آزادگان جنوبی در ادامه ارائه شده است (شکل ۱۴).

تطابق مدل‌های فرکتالی مقدار-حجم سرعت فشاری و مدل زمین‌شناسی با استفاده از ماتریس لوگرشیو

لیتولوژی بازه m ۱۰۰۰-۰ دارای تغییرات بسیار اندک به‌صورت غالب مارل و ماسه‌سنگ است، لذا از محاسبه ماتریس لوگرشیو برای بازه فوق صرف‌نظر شده است. براساس تقسیم‌بندی رژیم‌های سرعت فشاری در فواصل ۱۰۰۰ تا m ۵۵۹۰ به ۲۵ رژیم مختلف و تعیین مدل زمین‌شناسی غالب هر یک از رژیم‌ها (شامل ۲۰ بازه سنگ‌آهک خالص، ۳ بازه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک، ۱ بازه انیدریت و ماسه‌سنگ و ۱ بازه مارل و ماسه‌سنگ)، ماتریس‌های لوگرشیو به‌صورت جداگانه محاسبه شده است.

نمودارهای فرکتالی مقدار-حجم حاصل از مکعب سرعت فشاری (Vp) برای فواصل m ۱۰۰۰ تهیه شده است که در فاصله سطح تا m ۱۰۰۰، ۷ رژیم سرعت فشاری بین کمتر از ۳۳۵۷/۴ تا m/s ۴۴۰۵/۵ در سازند آجاجاری و در ادامه تا m ۲۰۰۰، ۲ رژیم سرعت فشاری بین ۳۱۶۲/۲۸ و m/s ۳۸۰۱/۹ در ادامه سازند آجاجاری و سازند گچساران و ۲ رژیم سرعت فشاری دیگر بین ۴۲۶۵/۸ تا بیشتر از m/s ۴۳۸۵/۳ مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده سازندهای آسماری و پایده باشد. در فاصله m ۲۰۰۰ تا m ۳۰۰۰، ۴ رژیم سرعت فشاری حاصل از سه نقطه شکست نمودار بین ۳۸۹۰/۴ و m/s ۵۰۱۱/۹ سازندهای آسماری تا سروک مشاهده می‌شود. در فاصله m ۳۰۰۰ تا m ۴۰۰۰ نیز ۴ رژیم سرعت فشاری حاصل از ۳ نقطه شکست بین ۴۴۶۶/۸ و m/s ۵۷۵۴/۴ در فاصله سازندهای کژدمی تا بخش خلیج سازند گدوان وجود دارد. در فاصله m ۴۰۰۰ تا m ۵۰۰۰، ۸ رژیم سرعت فشاری بین ۴۴۱۵/۷ تا m/s ۶۲۳۷/۴ بین بخش خلیج سازند گدوان تا قسمتی از سازند سرگلو مشاهده می‌شود. نهایتاً در فاصله m ۵۰۰۰ تا



شکل ۱۴ مدل فرکتالی مقدار-حجم سرعت فشاری (الف) فاصله m ۲۰۰۰-۳۰۰۰ (سازند پایده تا بخش بالایی سروک) و (ب) فاصله m ۳۰۰۰-۴۰۰۰ (سازندهای سروک تا بخش خلیج سازند گدوان).

تا ۲۰۰۰ m است. بنابراین با توجه به بازه‌های آهکی غالب، بیشترین میزان تطبیق نهایی (OA) به میزان ۰/۷۴ محاسبه شده که نشان از تطابق بالای مدل مکعب سرعت فشاری حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی حاصل از وارون‌سازی با بازه‌های سنگ‌آهک غالب است. جدول مقادیر خطا و تطبیق نهایی بازه‌های سرعت فشاری به‌همراه دو نمونه از ماتریس‌های لوگرشیو مربوطه در **جدول ۳-۵** ارائه شده است. همچنین، پس از تکمیل نمودارهای فرکتالی مقدار-حجم و تعیین نقاط شکست هر بازه به‌صورت مدل ریاضی، براساس تغییرات سازند و لیتولوژی غالب بازه‌های فوق (مدل زمین‌شناسی) نسبت به محاسبه ماتریس لوگرشیو^۱ براساس **جدول ۵** برای مدل سرعت فشاری جهت تعیین بالاترین تطابق و کمترین میزان خطا اقدام شد که نتایج در ادامه ارائه شده است.

- بر این اساس در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به‌میزان ۰/۷۴ در بازه سرعت فشاری کمتر از ۶۱۰۹/۴ m/s در اعماق ۵۰۰۰ تا ۵۵۹۰ m مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز و کمترین آن به‌میزان ۰/۳۲ در بازه سرعت فشاری بین ۶۰۱۱/۷ تا ۶۰۹۵/۴ m/s مربوط به سازندهای بخش خلیج سازند گدوان تا سرگلو در اعماق ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ m است.

- در بازه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی به‌میزان ۰/۶۴ در بازه سرعت فشاری بین ۳۸۰۱/۹ تا ۴۲۶۵/۸ m/s در اعماق ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ m مربوط به سازندهای آغاچاری تا پابده است.

- نهایتاً در بازه مارل و ماسه‌سنگ غالب، تطبیق نهایی به‌میزان ۰/۸۵ در بازه سرعت فشاری کمتر از ۳۱۶۲/۳ m/s و همچنین در بازه انیدریت و رس سنگ غالب، تطبیق نهایی به‌میزان ۰/۸۵ در بازه سرعت فشاری بیشتر از ۴۳۸۵/۳ m/s در اعماق مشابه ۱۰۰۰

جدول ۳ ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی سرعت فشاری در محدوده ۴۲۶۵/۸ m/s - ۳۸۰۱/۹ و مدل زمین‌شناسی ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب فاصله ۲۰۰۰-۱۰۰۰ m.

		مدل زمین‌شناسی ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب			
		داخل زون		خارج زون	
مدل ریاضی سرعت فشاری بین ۴۲۶۵/۸ m/s تا ۳۸۰۱/۹	داخل زون	(A) مثبت واقعی	۶۷۸۳	(B) مثبت کاذب	۵۷۳۹
	خارج زون	(C) منفی کاذب	۶۰۰	(D) منفی واقعی	۴۵۵۹
		C/(A+C): خطای مدل اول	۰/۰۸۱۳	B/(B+D): خطای مدل دوم	۰/۵۵۷۳
		تطبیق نهایی: (A+D)/(A+B+C+D)			
		۰/۶۴۱۵			

جدول ۴ ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی سرعت فشاری بین ۴۴۶۶/۸ تا ۵۲۴۸/۱ m/s و مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب فاصله ۴۰۰۰-۳۰۰۰ m.

		مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب			
		داخل زون		خارج زون	
مدل ریاضی سرعت فشاری بین ۴۴۶۶/۸ تا ۵۲۴۸/۱ m/s	داخل زون	(A) مثبت واقعی	۲۳۵۳۴۳	(B) مثبت کاذب	۱۸۶۷۸۹
	خارج زون	(C) منفی کاذب	۷۳۴۳۹	(D) منفی واقعی	۲۲۵۶۸۶
		C/(A+C): خطای مدل اول	۰/۲۳۷۸	B/(B+D): خطای مدل دوم	۰/۴۵۳۰
		تطبیق نهایی: (A+D)/(A+B+C+D)			
		۰/۶۳۹۱			

جدول ۵ مقادیر خطا و تطبیق نهایی (OA) ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی سرعت فشاری و مدل زمین‌شناسی غالب

بازه عمقی (m) و سازند	تعداد رژیم سرعت فشاری	مدل ریاضی سرعت فشاری (Vp) بر حسب متر بر ثانیه	مدل ریاضی زمین‌شناسی غالب	خطای آنالیز و تحلیل ریاضی (Type I Error)	خطای نمونه‌برداری زمین‌شناسی (Type II Error)	تطبیق نهایی (OA)
۱۰۰۰-۲۰۰۰	۵	کمتر از ۳۱۶۲/۳	مارل و ماسه‌سنگ	۰/۹۸۸	۰/۰۰۰	۰/۸۵
آغاجاری، گچساران، آسماری و پابده		۳۱۶۲/۳ تا ۳۸۰۱/۹	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۰/۹۲۱	۰/۴۳۶	۰/۳۶
		۳۸۰۱/۹ تا ۴۲۶۵/۸	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۰/۰۸۱	۰/۵۵۷	۰/۶۴
		۴۲۶۵/۸ تا ۴۳۸۵/۳	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۰/۹۹۸	۰/۰۰۲	۰/۵۸
		بیشتر از ۴۳۸۵/۳	انیدریت و رس سنگ	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰	۰/۵۷
۲۰۰۰-۳۰۰۰	۴	کمتر از ۳۸۹۰/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۳۵	۰/۰۷۰	۰/۶۱
		۳۸۹۰/۴ تا ۴۶۷۷/۴	سنگ‌آهک	۰/۴۰۵	۰/۷۱۱	۰/۴۰
		۴۶۷۷/۴ تا ۵۰۱۱/۹	سنگ‌آهک	۰/۶۷۲	۰/۲۱۶	۰/۶۱
آسماری، پابده، گورپی، ایلام و سروک		بیشتر از ۵۰۱۱/۹	سنگ‌آهک	۰/۹۸۸	۰/۰۰۳	۰/۶۳
۳۰۰۰-۴۰۰۰		کمتر از ۴۴۶۶/۸	سنگ‌آهک	۰/۸۰۶	۰/۴۸۸	۰/۳۸
کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج	۴	۴۴۶۶/۸ تا ۵۲۴۸/۱	سنگ‌آهک	۰/۲۳۸	۰/۴۵۳	۰/۶۴
		۵۲۴۸/۱ تا ۵۷۵۴/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۵۶	۰/۰۵۹	۰/۵۶
		بیشتر از ۵۷۵۴/۴	سنگ‌آهک	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۷
۴۰۰۰-۵۰۰۰		کمتر از ۴۴۱۵/۷	سنگ‌آهک	۰/۸۵۱	۰/۱۴۲	۰/۴۱
بخش خلیج گدوان، فهلپان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو		۴۴۱۵/۷ تا ۴۶۷۷/۴	سنگ‌آهک	۰/۶۳۰	۰/۱۸۲	۰/۵۴
	۸	۴۶۷۷/۴ تا ۵۰۱۱/۹	سنگ‌آهک	۰/۸۴۸	۰/۰۷۶	۰/۴۴
		۵۰۱۱/۹ تا ۵۴۳۲/۵	سنگ‌آهک	۰/۸۱۸	۰/۱۰۱	۰/۴۵
		۵۴۳۲/۵ تا ۶۰۱۱/۷	سنگ‌آهک	۰/۸۹۲	۰/۲۶۴	۰/۳۴
		۶۰۱۱/۷ تا ۶۰۹۵/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۸۴	۰/۱۶۴	۰/۳۲
		۶۰۹۵/۴ تا ۶۲۳۷/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۷۷	۰/۰۷۱	۰/۳۶
		بیشتر از ۶۲۳۷/۴	سنگ‌آهک	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۳۷
۵۰۰۰-۵۵۹۰		کمتر از ۵۹۵۶/۶	سنگ‌آهک	۰/۹۱۷	۰/۱۳۹	۰/۶۷
		۵۹۵۶/۶ تا ۶۰۸۱/۳۵	سنگ‌آهک	۰/۳۲۷	۰/۶۹۴	۰/۴۰
نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز	۴	۶۰۸۱/۳۵ تا ۶۱۰۹/۴	سنگ‌آهک	۰/۷۵۸	۰/۱۵۸	۰/۶۹
		بیشتر از ۶۱۰۹/۴	سنگ‌آهک	۰/۹۹۸	۰/۰۰۹	۰/۷۴

با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای و همچنین (IDW از مکعب فشار روباره ($P_{O.B}$) کسر شده (رابطه ۱۵) و پس از تطابق مکعب‌های فشار منفذی (P_{pore}) ساخته شده با داده‌های اولیه فشار مؤثر برای سازندهای مختلف، مدل نهایی فشار منفذی انتخاب شده است.

$$P_{Pore} = P_{O.B} - P_{eff} \quad (15)$$

ضریب همبستگی در هر سه روش برای سازندهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته که در روش باورز ضرایب همبستگی در سازند های تاربور با ۰/۹۳، گدوان با ۰/۳۶ و خلیج با ۰/۲۷ مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند. در روش SGS ضرایب همبستگی در بخش تاربور سازند گورپی ۰/۷۳، سازند ایلام ۰/۴۷، سازند سروک ۰/۴۸، سازند کژدمی ۰/۱۴، داریان ۰/۲۷، گدوان ۰/۱۴، بخش خلیج سازند گدوان ۰/۱۹، فهلیان بالایی ۰/۲۲ و فهلیان پایینی تا گوتنیا برابر ۰/۵۷- است که بیشترین هم‌گرایی در بخش تاربور و فهلیان پایینی است، لیکن در روش IDW در تمامی موارد ضرایب همبستگی پایین تر از روش SGS و باورز و در مواردی منفی می‌باشند.

تغییرات فضایی ناهمسان‌گردی مکعب نهایی سرعت فشاری با استفاده از رسم واریوگرام
برای ارزیابی تغییرات ناهمسان‌گردی (آنیزوتروپی) در مدل نهایی مکعب سرعت فشاری V_p (حاصل ترکیب روش SGS و کوکریجینگ با مکعب AI)، واریوگرام‌های تجربی با روش گاوسی در سه جهت عمودی، افقی با آزمون اصلی 0° و افقی با آزمون فرعی 270° ایجاد شده‌است. در واریوگرام عمودی، سقف واریوگرام ۰/۳۴ و در واریوگرام های افقی اصلی و فرعی ۰/۹۶ است، لذا صحت داده‌ها در جهت افقی دارای اعتبار بیشتری است. محدوده ناهمسان‌گردی براساس محاسبات نرم‌افزار پترل ۲۰۱۶ برای واریوگرام عمودی ۹۶ و برای جهت‌های اصلی و فرعی ۱۱۸۵۰ m است. محاسبات تجربی و محدوده ناهمسان‌گردی و همچنین واریوگرام‌ها در جداول ۶ و ۷ و شکل ۱۵ ارائه شده است.

اعتبارسنجی داده‌های فشار منفذی

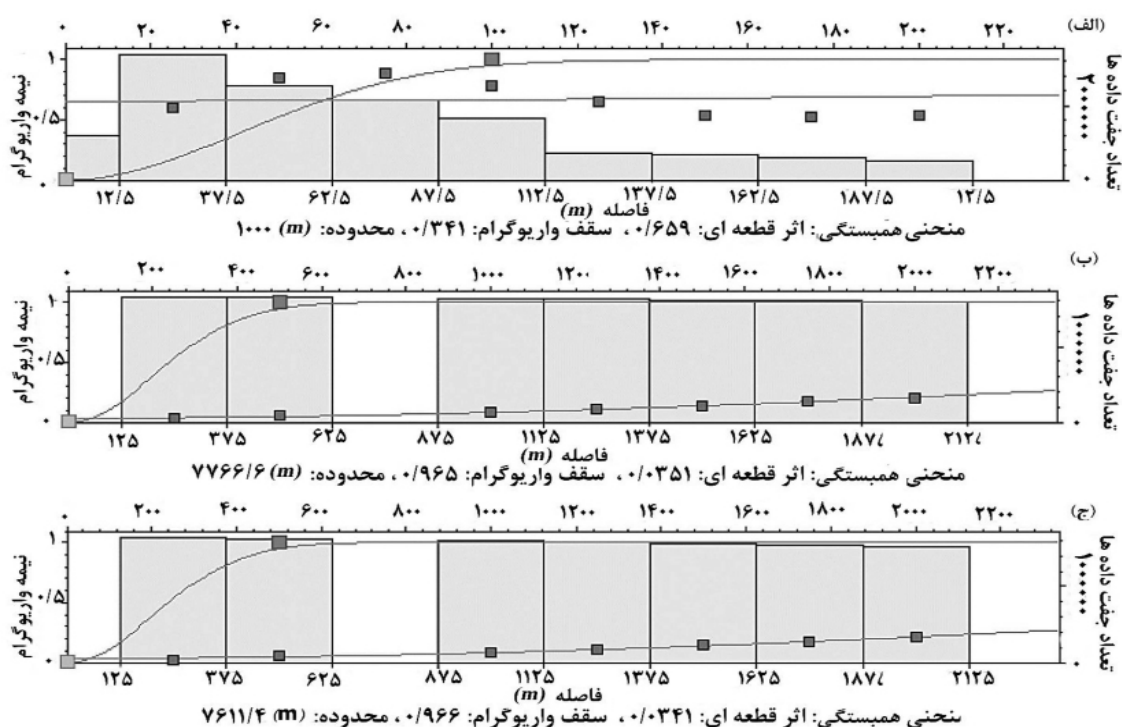
در این بخش از مطالعات براساس رابطه ترزاقی، هر یک از مکعب‌های فشار مؤثر (P_{eff}) تکمیل شده (براساس روش‌های باورز، SGS توأم با کوکریجینگ

جدول ۶ محاسبه واریوگرام تجربی برای مکعب‌های سرعت نهایی.

جهت	آزمون	شیب	تعداد گام‌ها (lags)	فاصله گام‌ها (m)	شعاع جستجو	پهنای باند	زاویه تلورانس	فاصله تلورانس (Lag tolerance)	ضخامت
عمودی	—	۹۰	۸	۲۵	۲۰۰	۵۰	۴۵	۵۰	۰/۰۰۱
افقی اصلی	۰	۰	۸	۲۵۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۴۵	۵۰	۰/۰۰۱
افقی فرعی	۲۷۰	۰	۸	۲۵۰	۲۰۰۰	۲۰۰	۴۵	۵۰	۰/۰۰۱

جدول ۷ نتایج واریوگرام گوسی مکعب نهایی سرعت فشاری به‌دست آمده با ترکیب روش‌های SGS و کوکریجینگ با امپدانس صوتی (AI) در محدوده مورد مطالعه.

جهت	اثر قطعه‌ای (Nugget)	سقف (Sill)	محدوده (m) (Range)	تعداد جفت‌ها (Pairs)	محدوده ناهمسان‌گردی (m) (Anisotropy Range)
عمودی	۰/۶۵۹	۰/۳۴۱	۱۰۰۰	۱۳۳۷۴۲۵۱	۶۸
افقی اصلی آزمون 0° درجه	۰/۰۳۵۱	۰/۹۶۵	۷۷۶۶/۶	۱۱۳۶۷۳۶۳	۱۱۸۵۰
افقی فرعی آزمون 270° درجه	۰/۰۳۴۱	۰/۹۶۶	۷۶۱۱/۴	۱۱۰۵۸۶۶۳	۱۱۸۵۰



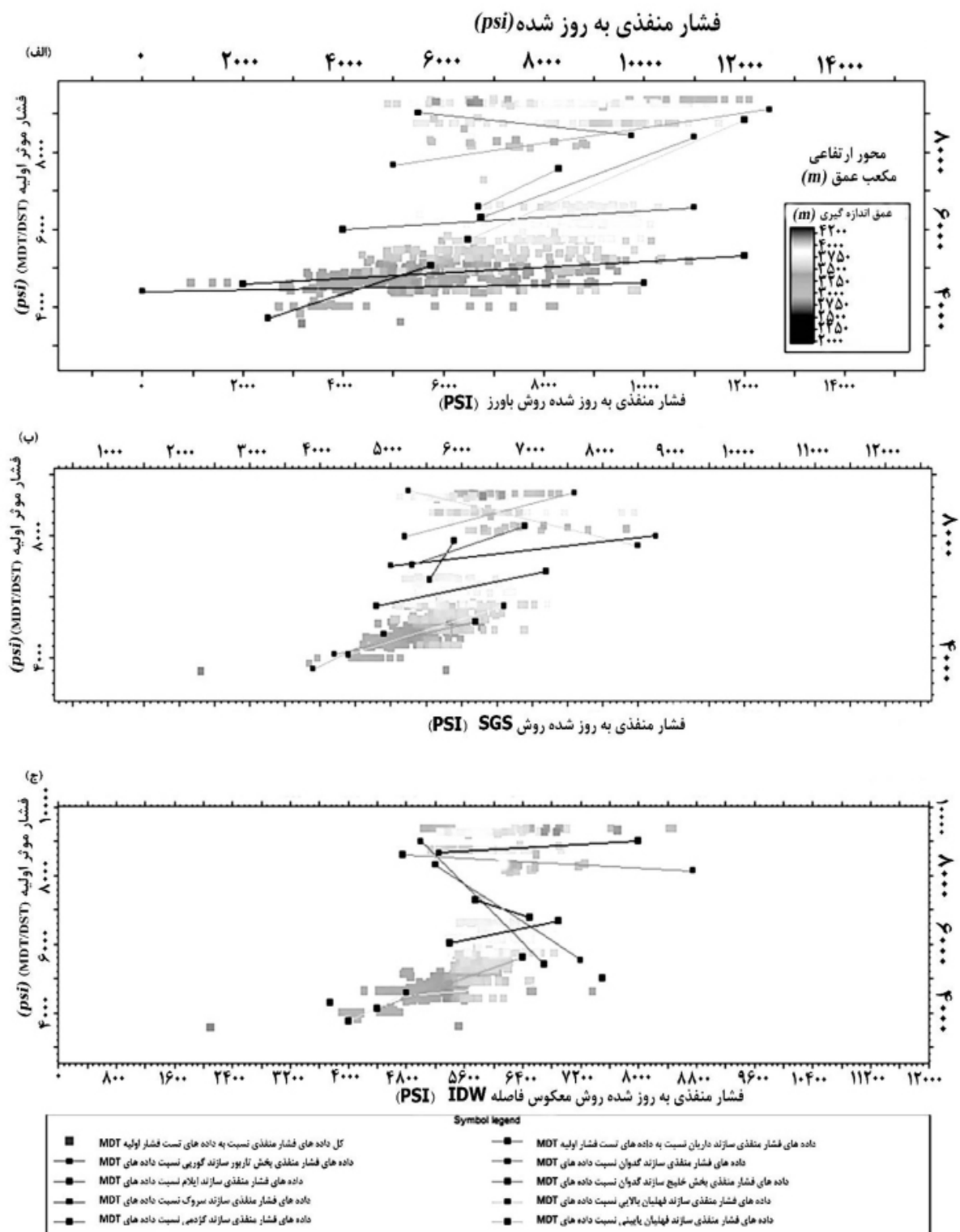
شکل ۱۵ نیمه واریوگرام مکعب نهایی سرعت فشاری در جهات: (الف) عمودی، (ب) افقی اصلی 0° و (ج) افقی فرعی 270° .

حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای) مورد تایید و داده‌های حاصل از این روش برای گرادیان نهایی فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۸ و شکل ۱۶).

لذا صحت مکعب فشار منفذی حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از کوکریجینگ با نگار سرعت فشاری (کوکریجینگ شده با امیدانس صوتی

جدول ۸ اعتبارسنجی حاصل از ضرایب همبستگی مکعب فشار منفذی سازندهای میدان مورد مطالعه بر روی مدل‌های باورز، SGS و IDW با داده‌های اولیه آزمایش فشار MDT.

ضریب همبستگی مدل فشار منفذی و داده‌های فشار در سازند	روش باورز	روش SGS	روش IDW
بخش تارپور سازند گورپی	۰/۹۳	۰/۷۳	۰/۵۷
سازند ایلام	۰/۱۲	۰/۴۷	۰/۳۴
سازند سروک	۰/۲۴	۰/۴۸	۰/۴۸
سازند کژدمی	۰/۰۷	۰/۱۴	۰/۰۹
سازند داریان	۰/۱۹	۰/۲۷	-۰/۱
سازند گدوان	۰/۳۶	۰/۱۴	-۰/۴
بخش خلیج سازند گدوان	۰/۲۷	۰/۱۹	-۰/۴۹
سازند فهلپیان بالایی	۰/۲۱	۰/۲۲	-۰/۰۶
سازند فهلپیان پایینی	-۰/۲۵	-۰/۵۷	۰/۱
کل سازند های برداشت شده	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۴۴



شکل ۱۶ ضرایب همبستگی داده های اولیه فشار مؤثر MDT و مدل های فشار منفذی حاصل از روش های الف) باورز، ب) SGS کوکریجینگ شده با امپدانس صوتی حاصل از وارون سازی لرزه ای و ج) IDW.

نتیجه‌گیری

۱- براساس مدل سرعت لایه‌ای بیشترین سرعت متوسط در محدوده ۲۷۶۰ تا ۲۹۰۰ m/s در سمت شمال شرق محدوده مورد مطالعه مربوط به سازند گوتنیا و کمترین آن مربوط به سازند گچساران با ۲۱۵۰ تا ۲۲۸۰ m/s در جهت جنوب غرب محدوده مورد مطالعه است.

۲- با توجه به عدم برداشت نگارهای سرعت فشاری از سطح زمین برداشت نشده است، لذا استفاده از شبکه‌های عصبی برای ساخت مدل سرعت در لایه‌های سطحی فاقد اطلاعات مقدور نبود، لذا تکمیل داده‌های نگار فوق با استفاده از داده‌های سرعت لایه‌ای VSP، اشعه گاما و وزن مخصوص طی ۵ مرحله با بالاترین ضریب همبستگی ممکن صورت پذیرفته است.

۳- جهت مطالعات فشار شکست سازند نیز مدل‌سازی مکعب سرعت برشی با استفاده از مغزه‌های چاه اکتشافی و نگار سرعت برشی است که مکعب نهایی با ضریب همبستگی ۰/۹۵ برای داده‌های نگار سرعت برشی حاصل از داده‌های تخلخل، لیتولوژی و داده‌های اصلی سرعت برشی DSI تعیین شده است.

۴- مقادیر مکعب مقاومت صوتی وارون‌سازی شده در اعماق پایین میدان اکثراً در محدوده ۸ تا $(g/cm^3) * (15 m/s)$ است که در محدوده سازندهای آهکی می‌تواند قرار گیرد.

۵- سازند سطحی آجاجاری با مقدار مقاومت صوتی کمتر از $(g/cm^3) * (8 m/s)$ در محدوده سازندهای مارلی و شیلی قرار می‌گیرد که نتایج به‌دست آمده دارای تطابق بالایی با نمونه‌های زمین‌شناسی حین حفاری است

۶- جهت مدل‌سازی فشار موثر به روش باورز استفاده از مکعب سرعت فشاری حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ با مقاومت صوتی وارون لرزه‌ای که دارای ضریب همبستگی بالاتری نسبت به روش مشابه با مکعب سرعت کوچ لرزه‌ای لایه‌ای

است پیشنهاد شده است.

۷- براساس مدل‌های فرکتالی سرعت-حجم، رژیم‌های سرعت فشاری در فواصل ۱۰۰۰ تا ۵۵۹۰ m به ۲۵ رژیم مختلف تقسیم شده و مدل زمین‌شناسی غالب هر یک از رژیم‌ها شامل ۲۰ بازه سنگ‌آهک خالص، ۳ بازه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک، ۱ بازه انیدریت و ماسه‌سنگ و ۱ بازه مارل و ماسه‌سنگ است.

۸- براساس نتایج ماتریس لوگرشیو در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به‌میزان ۰/۷۴ در بازه سرعت فشاری کمتر از ۶۱۰۹/۴ m/s در اعماق ۵۵۹۰-۵۰۰۰ m مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز و کمترین آن به‌میزان ۰/۳۲ در بازه سرعت فشاری بین ۶۰۱۱/۷ تا ۶۰۹۵/m/s^۴ مربوط به سازندهای بخش خلیج سازند گدوان تا سرگلو در اعماق ۵۰۰۰-۴۰۰۰ m است.

۹- براساس واریوگرام‌های مدل نهایی مکعب سرعت فشاری، میزان سقف واریوگرام و ناهمسان‌گردی در جهت عمودی به‌ترتیب ۰/۳۴ و ۹۶ متر و در جهت‌های افقی اصلی و فرعی به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۱۱۸۵۰ m است.

۱۰- با توجه به ضریب همبستگی بالاتر مکعب فشار منفذی حاصل از روش SGS و داده‌های اولیه آزمایش فشار مؤثر MDT نسبت به روش‌های باورز و IDW در سازندهای مشابه، صحت مکعب فشار منفذی حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از کوکریجینگ با نگار سرعت فشاری (کوکریجینگ شده با امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای) مورد تایید و داده‌های حاصل از این روش برای گردآیدان نهایی فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر برگرفته از رساله دکتری مهندسی معدن- اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب با طرح میزبانی پژوهشگاه صنعت نفت است.

<i>DST</i> : آزمایش فشار چاه	نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر
<i>MDT</i> : نگار آزمایش فشار چاه	صمیمانه خود را از کارشناسان محترم پژوهشگاه
<i>IDW</i> : معکوس فاصله وزن دار	صنعت نفت و مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت
<i>r</i> : ضریب همبستگی	ایران که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش
<i>SGS</i> : شبیه‌سازی گوسی متوالی	یاری دادند، ابراز کنند.
<i>TWT</i> : زمان رفت و برگشت موج (mLs)	
<i>U</i> : سلول فاقد داده	علائم و نشانه‌ها
<i>V_{int}</i> : سرعت لایه‌ای (m/s)	<i>AI</i> : مقاومت صوتی ($\frac{m \times g}{s \times cm^3}$)
<i>VSP</i> : مقطع نگاری عمودی لرزه‌ای	<i>DSI</i> : موج صوتی فشاری و برشی ($\frac{\mu s}{ft}$)

مراجع

- [۱]. مداحی ا، قاضی نژاد س، اسماعیل پور س، حیدری م (۱۳۹۳) امکان‌سنجی بهره‌برداری از مطالعات لرزه‌نگاری چهار بعدی مخزن سروک در میدان آزادگان، مجله پژوهش نفت، ۷۸: ۱۲۶-۱۱۷.
- [۲]. آدیم ع، ریاحی م ع، باقری م (۱۳۹۷) تخمین فشار منفذی به روش‌های ایتون و باورز با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری و چاه‌پیمایی، نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، ۴، ۲: ۲۶۷-۲۷۵، doi: 10.22044/jrag.2018.6360.1167.
- [3]. Maurya S P, Singh N P, Singh K H (2020) Post-stack seismic inversion, In: Seismic Inversion Methods: A Practical Approach, Springer Geophysics, Chapter 3, 39-70, ISBN: 978-3-030-45662-7.
- [4]. Shahbazi A, Soleimani Monfared M, Thiruchelvam V, Ka Fei T, Babasafari A A (2020) Integration of knowledge-based seismic inversion and sedimentological investigations for heterogeneous reservoir. Journal of Asian Earth Sciences, 202, 104541, doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104541.
- [۵]. پور صیامی ح (۱۳۹۲) مدل‌سازی فشار منفذی مخزن هیدروکربونی در جنوب غرب ایران با استفاده از داده‌های چاه پیمایی، مجله پژوهش نفت، ۲۳، ۷۴: ۸۶-۷۲، doi:10.22078 pr.2013.293.
- [6]. Haque A E, Qadri S T, Bhuiyan M A H, Navid M, Nabawy B S, Hakimi M H, Abd-El-Aal A K (2022) Integrated wireline log and seismic attribute analysis for the reservoir evaluation: A case study of the Mount Messenger Formation in Kaimiro Field, Taranaki Basin, New Zealand. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 99, 104452, doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104452.
- [7]. Radwan A A, Nabawy B S, Abdelmaksoud A, Lashin A (2021) Integrated sedimentological and petrophysical characterization for clastic reservoirs: A case study from New Zealand, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 88, 103797, doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103797.
- [۸]. عاقبتی ر (۱۳۸۷) معرفی یک میدان: طرح توسعه میدان آزادگان، ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید، ۵۱، ۸-۶.
- [9]. Jindal N, Kumar Biswal A, Hemant Singh K (2016) Time-depth modeling in high pore-pressure environment, offshore East Coast of India, AAPG 2016 Annual Convention and Exhibition, Calgary, Alberta, Canada, June 19-22.
- [10]. Haris A, Sitorus R J, Riyanto A (2017) Pore pressure prediction using probabilistic neural network: case study of South Sumatra Basin, Southeast Asian Conference on Geophysics, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1 26324 (526071879)0 012021.
- [11]. Bahmaei Z, Hosseini E (2020) Pore pressure prediction using seismic velocity modeling: case study, Seifid-Zakhor gas field in Southern Iran. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10: 1051-1062.
- [۱۲]. امیرزاده م، کمالی م ر، نبی بیدهندی م (۱۳۹۲) بررسی خصوصیات مخزنی با انجام برگردان داده‌های لرزه‌ای و تلفیق نشان‌گرهای لرزه‌ای در سازند سروک در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران، مجله پژوهش نفت، ۲۳، ۷۵: ۲۹-۲۰.

- [۱۳]. امیری بختیار م ص، زرگر ق، ریاحی م ع، انصاری ح ر (۱۳۹۶) وارون‌سازی لرزه‌ای زمین آماری به‌روش شبیه‌سازی طیفی در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران، سومین سمینار ژئوفیزیک اکتشافی نفت، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۷۴-۷۰.
- [14]. Abdolahi A, Chehrazhi A, Kadkhodaie A, Babasafari A B (2022) Seismic inversion as a reliable technique to anticipating of porosity and facies delineation, a case study on Asmari Formation in Hendijan field, southwest part of Iran, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*.
- [15]. Rointan A, Soleimani Monfared M, Aghajani H (2021) Improvement of seismic velocity model by selective removal of irrelevant velocity variations, *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56: 145–176, doi.org/10.1190/geo2017-0248.1.
- [16]. Castagna J P, Batzle M L, Eastwood R L (1985) Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks, *GEOPHYSICS*, 50, 4: 571-581, doi.org/10.1190/1.1441933.
- [17]. Castagna J P, Batzle M L, Kan (1993) Rock Physics: The link between rock properties and AVO response, In: *Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO analysis*, *Investigations in Geophysics*, 8, 135-171.
- [۱۸]. فتاحی ه، عسکری م، مجدی فر س (۱۳۹۵) تخمین سرعت موج برشی در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران با استفاده از چاه نمودارهای مختلف و یک روش جدید ترکیبی هوشمند مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته زمستان ۹۵، ۲۲: ۳۵-۴۳، AAG.2016.12705 /10.22055.
- [19]. Bowers G (1995) Pore pressure estimation from velocity data: accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction, *SPE Drilling and Completion*, 10, 2: 89-95, doi.org/10.2118/27488-PA.
- [20]. Bowers GL (2002) Detecting high overpressure, *The Leading Edge*, 21, 2: 113-224, doi.org/10.1190/1.1452608.
- [21]. Badri MA, Sayers CM, Awad R, Graziano A (2000) A feasibility study for pore-pressure prediction using seismic velocities in the offshore Nile Delta, Egypt, *The Leading Edge* October 2000, Schlumberger Oilfield Services, Cairo, Egypt, 1103-1108.
- [22]. Lantuejoul C h (2002) *Geostatistical simulation models and algorithms*, 1st edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1-173.
- [23]. Kelkar M, Perez G (2002) *Applied geostatistics for reservoir characterization*, 1st edition, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, 30-50.
- [24]. Bohling G (2007) *Introduction to geostatics, hydro-geophysics: theory, methods, and modeling*, 1st edition, Boise State University, Boise, Idaho, 259-269.
- [25]. Armstrong M, Galli A, Beucher H, LeLoc'h G, Renard D, Eschard R, Doligez B, Geffroy F (2011) *Pluri-gaussian simulations in geosciences*, 1st edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1-173.
- [26]. Karami O, Fallah A, Shataei S, Latifi H (2018) Assessment of geostatistical and interpolation methods for mapping forest dieback intensity in Zagros forests. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 16, 1: 73-86.
- [27]. Mandelbrot B B (1985) Self-affine fractals and fractal dimension, *Physica Scripta*, 32, 4: 257, doi:10.1088/0031-8949/32/4/001.
- [28]. Hassanpour S, Afzal P (2013) Application of concentration-number (C-N) multifractal modeling for geochemical anomaly separation in Haftcheshmeh porphyry system, NW Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 6: 957-970.
- [29]. Afzal P, Fadakar Alghalandis, Y, Khakzad A, Moarefvand P, Rashidnejad Omran N (2011) Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling, *Journal of Geochemical Exploration* 108, 220-232, doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005.
- [30]. Daneshvar Saein L, Rasa I, Rashidnejad Omran N, Moarefvand P, Afzal P (2012) Application of concentration-volume fractal method in induced polarization and resistivity data interpretation for Cu-Mo porphyry deposits exploration, case study: Nowchun Cu-Mo deposit, SE Iran, *Nonlinear Processes in Geophysics* 19: 431-438, doi.org/10.5194/npg-19-431-2012.
- [31]. Yasrebi A B, Hezarkhani A, Afzal P (2017) Application of Present Value-Volume (PV-V) and NPV-Cumulative Total Ore (NPV-CTO) fractal modelling for mining strategy selection, *Resources Policy*, 53, 384-393, doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.07.011.
- [32]. Mahdizadeh M, Afzal P, Eftekhari M, Ahangari K (2022) Geomechanical zonation using multivariate fractal modeling in Chadormalu iron mine, Central Iran, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 1: 1-11.
- [33]. Paravarzar, S., Maarefvand, P., Maghsoudi, A. Afzal, P. (2014). Correlation between geological units and mineralized zones using fractal modeling in Zarshuran gold deposit (NW Iran), *Arabian Journal of Geosciences*, 8: 3845-3854.
- [34]. Pourgholam M M, Afzal P, Adib A, Rahbar K, Gholinejad M (2022) Delineation of Iron alteration zones

- using spectrum-area fractal model and TOPSIS decision-making method in tarom metallogenic zone, NW Iran, *Journal of Mining and Environment (JME)* 13, 2: 503-525.
- [35]. Kianoush, P, Mohammadi G, Hosseini SA, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2022) Compressional and shear interval velocity modeling to determine formation pressures in an oilfield of SW Iran, *Journal of Mining and Environment (JME)*, 13, 3: 851-873.
- [36]. Farhadi S, Afzal P, Boveiri Konari M, Daneshvar Saein L, Sadeghi B (2022) Combination of machine learning algorithms with concentration-area fractal method for soil geochemical anomaly detection in sediment-hosted Irankuh Pb-Zn deposit, Central Iran, *Minerals* 12, 6: 689.
- [37]. Soltani F, Afzal P, Asghari O (2014) Delineation of alteration zones based on Sequential Gaussian Simulation and concentration-volume fractal modeling in the hypogene zone of Sungun copper deposit, NW Iran, *Journal of Geochemical Exploration*, 140: 64-76, doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.007.
- [38]. Carranza E J M (2011) Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *J Geochem Explor* 110, 2:167-185, doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.007.
- [39]. Morgan P (1999) Azadegan Field Geophysical Interpretation Part 1, ConocoPhillips UK LTD, August 1999, Technical Report.
- [40]. Mohammadi M, Farhani M (2011) Evaluation report of the Jurassic horizon of the well Azadegan-10, National Iranian Oil Company, Exploration Directorate, General Directorate of Petroleum Engineering, 71.
- [41]. Du Y, Chen J, Cui Y, Xin J, Wang J, Zhen Li Y, Fu X (2016) Genetic mechanism and development of the unsteady Sarvak play of the Azadegan oil field, southwest of Iran. *Petroleum Science*, 13: 34-51.
- [42]. Hendi S S (2002) Estimation of shear wave velocity from petrophysical logs and correlation with lab measurements in the Azadegan wells No (1 to 4), NIOC-RIPI, Geophysics Research Department, 4: 18-31.
- [43]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2022) Application of pressure-volume (P-V) fractal models in modeling formation pressure and drilling fluid determination in an oilfield of SW Iran, *Journal of Petroleum Science and Technology (JPST)*, 12, 1: 2-20, doi.org/10.22078/jpst.2022.4845.1809.
- [44]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) Inversion of seismic data to modeling the Interval Velocity in an Oilfield of SW Iran. *Results in Geophysical Sciences*, 13, 100051, doi.org/10.1016/j.ringsps.2023.100051.
- [45]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) Determining the drilling mud window by integration of geostatistics, intelligent, and conditional programming models in an oilfield of SW Iran, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 13: 5.
- [46]. Kianoush P, Mohammadi G, Hosseini S A, Keshavarz Faraj Khah N, Afzal P (2023) ANN-based estimation of pore pressure of hydrocarbon reservoirs—a case study, *Arabian Journal of Geosciences*, 16: 302.
- [47]. Talebi F, HajiZadeh F (2022) The effect of porosity on the seismic waves velocities and elastic coefficients in a South-Western Iran's oil field. *Journal of Petroleum Science and Technology (JPST)*, 12, 2: 34-41, doi: 10.22078/JPST.2023.1287.
- [48]. Shakiba S, Doulati ardejani F (2023) Introducing a MATLAB Code as a Statistical Approach for Fracture Networks Modeling. *Journal of Petroleum Science and Technology (JPST)*, Available Online from 14 February 2023, 10.22078/JPST.2023.4935.1838.
- [49]. Golmohamadi E, Moradzade A, Abdollahipour A, Mohebian R, Bahramali Asadi Kelishami S (2022) Identification of Fractures in Kangan and Dalan Formations Using the Integration of FMI Log and Seismic Attributes. *Journal of Petroleum Research*, 32, 126: 57-71, doi: 10.22078/pr.2022.4806.3154.
- [50]. Adabnezhad, P, Kadkhodaie A, Norouzi G, Rostami A (2018) Three-Dimensional Modeling of Geo mechanical Units Using Seismic Data in One of the Southern Iran Gas Fields. *Journal of Petroleum Research*, 28, 1: 85-96, doi: 10.22078/pr.2017.2364.2095.