



مقاله پژوهشی

تعیین فشارهای سازندی با تلفیق روش‌های فرکتالی و زمین‌آماري در یکی از سازندهای هیدروکربوری جنوب غرب ایران

پوریا کیانوش^۱، ناصر کشاورز فرج‌خواه^{۲*}، پیمان افضل^۱، عماد جمشیدی^۳، امیرحسین بانگیان تبریزی^۱، علی کدخدایی^۴

- 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- شرکت ملی نفت ایران، مدیریت اکتشاف، اداره حفاری، تهران، ایران.
- ۴- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

(دریافت: اسفند ۱۴۰۱، پذیرش: اردیبهشت ۱۴۰۳)

چکیده

آگاهی دقیق از فشارهای منفذی و شکست سازند برای حفر چاه‌ها به صورت ایمن با وزن گل مطلوب ضروری است. این مطالعه چالشی در زمینه مطالعات فشار سازند در میدان آزادگان جنوبی است که عموماً کربناته بوده و به جز سازند کزدمی فاقد لایه شیلی هستند. جهت مطالعات فشار سازند در عمیق‌ترین سازند مخزنی فهلیان، نیاز به مدل‌سازی کلیه سازندهای بالایی جهت کسب نتایج دقیق‌تر است. با توجه تعداد کم جفت داده‌های فشارمؤثر-سرعت در کل داده‌های سازند فهلیان و ضریب همبستگی بسیار پایین رابطه باورز، نیاز به تفکیک این سازند به دو بخش بالایی و پایینی و انجام مدل‌سازی به تفکیک سازندها پس از تکمیل مکعب‌های سرعت فشاری و فشار مؤثر بوده است. این مطالعه بر اساس داده‌های ۲۳ حلقه چاه و تعبیر و تفسیر داده‌های لرزه‌ای صورت گرفته است و مدل‌های فشار مؤثر، منفذی و شکست سازند از مدل‌های زمین‌آماري ترکیبی تعیین شده و با مدل فرکتالی فشار-حجم مورد صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند. بیشترین میزان همبستگی بین مکعب نهایی فشار مؤثر و مکعب سرعت مربوط به سازندهای فهلیان پایینی با ۰/۸۶ و ایلام با ۰/۷۱ است. بر اساس مکعب‌های نهایی فشار سازند، حداکثر فشار منفذی به میزان ۱۰۰۰۰ پام در سازندهای گدوان تا فهلیان بالایی و حداکثر فشار شکست سازند نیز به میزان ۱۳۰۰۰ پام در سازندهای فهلیان پایینی تا گوتنیا به دست آمده است. در این تحقیق نوآوری جدیدی برای مطالعه فشارهای سازند به روش فرکتالی فشار-حجم انجام شده است. همچنین جهت ساخت مدل نهایی مکعب فشارهای سازندی در کل وسعت میدان آزادگان جنوبی، برای اولین بار از ترکیب روش‌های زمین‌آماري شبیه‌سازی گوسی متوالی و کوکریجینگ با مکعب مقاومت صوتی حاصل از وارون سازی لرزه‌ای به صورت توأم استفاده شده است. بر اساس محاسبه ماتریس لوگرشیو حاصل از مدل فرکتالی مقدار-حجم، بیشترین میزان تطبیق نهایی در بازه‌های سنگ‌آهک غالب به میزان ۰/۷۴ مربوط به سازندهای آسماری تا سروک محاسبه شده که نشان از تطابق بالای مدل مکعب فشار منفذی با استفاده از ترکیب شبیه‌سازی گوسی متوالی توأم با کوکریجینگ و امیدانس صوتی حاصل از وارون سازی است.

کلمات کلیدی

مدل سرعت لرزه‌ای، شبیه‌سازی گوسی متوالی، مکعب فشار سازندی، مدل فرکتالی فشار-حجم، ماتریس لوگرشیو

*عهده‌دار مکاتبات: keshavarznn@ripi.ir

DOI: 10.22034/ANM.2024.19796.1590

۱- مقدمه

نمی‌باشند. همچنین روابط تجربی فراوانی نیز در مورد محاسبه سرعت امواج برشی ارائه شده است که پرکاربردترین آن‌ها روش ارائه‌شده توسط کاستانیا^۱ (۱۹۹۳) بر اساس تغییرات لیتولوژی است [۲۲، ۲۳]. روش‌های هوشمند یکی از روش‌های جدید، کم‌هزینه و دقیقی هستند که می‌توانند با استفاده از نگاره‌های پتروفیزیکی مانند DSI، سرعت موج برشی مخزن را در کمترین زمان ممکن تخمین بزنند [۱۴، ۲۲، ۲۴-۲۶].

روش مرسوم در محاسبه فشار منفذی در محدوده مخزن روش باورز^۲ (۱۹۹۵ و ۲۰۰۲) است، در این روش با استفاده از رابطه بین سرعت و تنش مؤثر، مکعب تنش مؤثر تولید می‌شود. رابطه فوق در رسوبات تحت فشار نرمال به شکل رابطه (۱) پیشنهاد شده است [۱، ۲۷، ۲۸]:

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

در اینجا V_0 سرعت رسوبات ناپیوسته اشباع شده و A و B بیانگر تغییرات در سرعت با افزایش تنش مؤثر (σ) که از داده‌های چاه به دست می‌آیند. تنش مؤثر را نیز می‌توان از معادله (۲) تعیین کرد.

$$\sigma = \left[\frac{V - V_0}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (2)$$

به‌منظور محاسبه ضرایب رابطه باورز از اطلاعات فشار مؤثر نقاط برداشت‌شده در چاه‌ها (MDT/RFT/DST)^۳ و نگار صوتی موجود استفاده می‌شود [۲۴، ۲۹، ۳۰]. در نتیجه فشار منفذی سازند با توجه به رابطه ترزاقی^۴ (۱۹۴۳) بر اساس اختلاف مکعب تنش روباره ایجادشده و مکعب فشار مؤثر تولیدشده تخمین زده می‌شود [۳۱-۳۳]. روش‌های اصلی این مطالعات شامل تخمین فشار منفذی با تبدیل سرعت لرزه‌ای به فشار منفذی و نهایتاً مقایسه با فشار به‌دست‌آمده حین برنامه آزمایش چاه به دست می‌آید و نتایج از مدل‌های زمین‌آماری یا هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی تعیین می‌شود [۱۱، ۲۵، ۳۴-۳۶].

روش شبیه‌سازی گوسی متوالی^۵ (SGS) در شبیه‌سازی‌های زمین‌آماری در بسیاری از شبیه‌سازها بر روی عیار، تخلخل، تراوایی و متغیرهای ناحیه‌ای دیگر جواب داده است. در این روش مقدار شبیه‌سازی‌شده در هر نقطه با استفاده از تابع توزیع احتمال محاسبه‌شده از داده‌های خام و داده‌های شبیه‌سازی قبلی در همسایگی نقطه موردنظر به

اطلاع از فشارهای سازند نه‌تنها برای طراحی سیالات حفاری به لحاظ وزن گل و سیمان پشت جداری به‌نحوی که در بازه گرادیان فشار مدل‌سازی شده قرار داشته باشند ضروری است، بلکه برای ارزیابی عوامل ریسک اکتشاف منابع نفت و گاز 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 توسط سرعت‌های لرزه‌ای انجام می‌شود و سپس با تبدیل سرعت فشاری به تنش مؤثر برای ناحیه موردنظر به همراه تنش روباره، تخمینی مناسب از فشار منفذی به دست می‌آورد؛ بنابراین، دقت مدل‌های سرعت به‌کاررفته برای تعیین فشار منفذی بیشترین اهمیت را دارد [۱-۹].

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 تخمین‌گر، نمودارهای لازم تهیه می‌شود [۸، ۱۰-۱۵]. 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 زون‌ها 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 آنجاکه علاوه بر فشار، عوامل دیگری مانند لیتولوژی نیز بر سرعت امواج لرزه‌ای تأثیر می‌گذارند؛ لذا استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و نگاره‌های چاه پیمایی موجود، می‌تواند تا حد زیادی از بروز خطا در تخمین فشارهای سازند خصوصاً در سازندهای کربناته جلوگیری کند [۱۵-۲۱]. 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

(فشارهای مؤثر، منفذی و شکست سازند در این مطالعه) است که تابع تغییر شرایط زمین‌شناسی است. رابطه (۳) بیانگر روش عیار-حجم است [۲۴، ۳۹، ۴۳]:

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

که در این حالت V حجم دربرگیرنده مقادیر متغیر مورد مطالعه بزرگتر و مساوی ρ در کانسار مورد مطالعه و D بعد فرکتال است [۳۹، ۵۱]. رابطه (۳) به صورت رابطه کلی فرکتال برای تغییرات چگالی-حجم است به صورتی که افزایش تعداد داده‌هایی که دارای عیار بالاتر از پارامتر حجمی می‌باشند، دارای رابطه عکس با بعد (توان) فرکتال خواهد بود؛ بنابراین افزایش تعداد داده‌های حجم باعث کوچک‌تر شدن بعد فرکتال خواهد بود. بعد فرکتال نیز یک عدد ثابت نخواهد بود زیرا رابطه به صورت یک تناسب وابسته به تغییرات حجم و چگالی است.

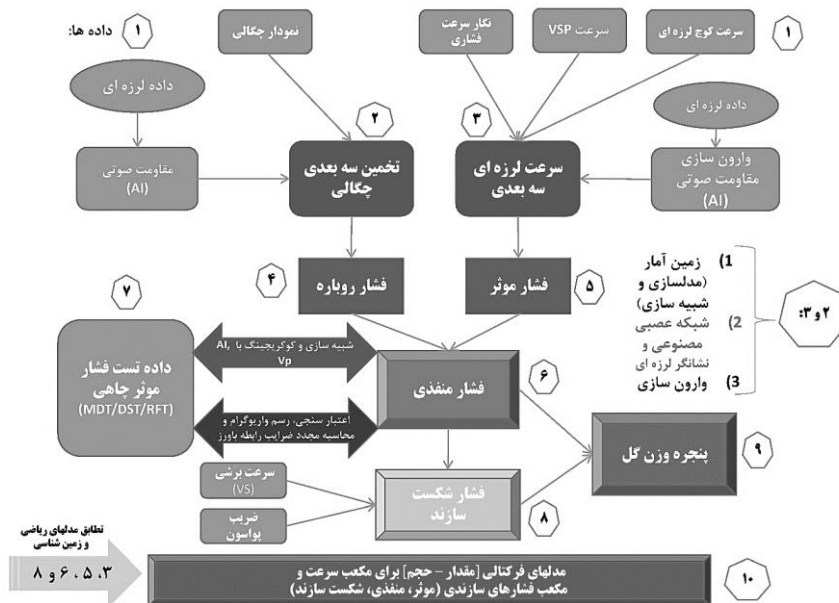
در این تحقیق چالش جدیدی برای مطالعه فشارهای مؤثر، منفذی و شکست سازند به روش فشار سازندی-حجم انجام شده است. جهت بررسی تطابق بین مدل‌های زمین‌شناسی و ریاضی با استفاده از ماتریس لوگرشیو^۹ استفاده شده است،

این ماتریس برای اولین بار توسط کارانزا (۲۰۱۱) ارائه 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 به عنوان نتیجه‌ای قطعی و با کمترین میزان خطا مورد توجه واقع گردد [۴۰، ۵۲، ۵۳].

هدف کلی از انجام این مطالعات تعیین مدل نهایی پنجره گل حفاری برای انجام حفاری‌های جدید در کل وسعت میدان مورد مطالعه به صورت 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 دوم مطالعات است. روند نمای کلی این تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است.

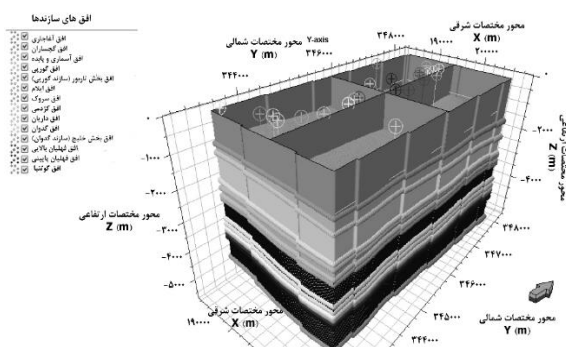
دست می‌آید. این روش با انتخاب تصادفی موقعیت و پیشرفت کار به صورت متوالی در طول شبکه به شبیه‌سازی می‌پردازد. اصل نخستین در تمام روش‌های گوسی، نرمال بودن داده خام است در غیر این صورت باید به استاندارد نرمال تبدیل شوند [۳۷-۴۰]. همواره یکی از معضلات در اکتشاف کانسارهای معدنی و میادین نفتی و گاز عدم امکان ارزیابی یک یا چند پارامتر کیفی در جز به جز مخزن با روش‌های جاری مانند معکوس فاصله وزن‌دار^۶ (IDW) بوده است، لذا برای ارزیابی پارامترهای کیفی در یک مدل بلوکی با تعداد ریز بلوک‌های زیاد می‌توان از روش تخمین‌گر خطی ناریب کریجینگ^۷ 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 زمین‌آماری کوکریجینگ^۸ که تعمیم‌یافته کریجینگ است، مدل‌سازی را اصلاح نمود، لذا در محل‌هایی که کمبود نمونه در آن‌ها وجود دارد با استفاده از همبستگی میان متغیر ناحیه ناحیه‌ای موردنظر و نیز متغیر کمکی، ارزیابی صورت می‌گیرد. اگر میزان همبستگی دو متغیر بیش از ۰/۵ باشد، خطای تخمین تا حد بسیاری با این روش کاهش می‌یابد [۱۴، ۲۵، ۴۱].

روش‌های مبتنی بر هندسه فرکتال عمدتاً در تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی و جدایش جوامع گوناگون در تمام شاخه‌های علوم زمین و دانش‌های وابسته کاربرد دارند. در این میان روش‌های عیار-مساحت، عیار-محیط، عیار-تعداد، مقدار-حجم و طیف توان-مساحت در علوم زمین بسیار کاربرد دارند [۴۲-۴۵]. ماندلیروت (۱۹۸۳) و آگتربرگ (۱۹۹۵) روش مقدار-اندازه را به منظور تعیین مقادیر آستانه‌ای و زمینه ژئوشیمیایی ارائه کردند [۴۶-۴۸]. افضل و همکاران (۲۰۱۱) 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 [۴۹-۵۱]. 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



شکل ۱: روندنمای کلی مراحل اجرای تحقیق شامل مطالعات سرعت لایه‌ای، فشارهای سازندی و پنجره گل حفاری (موارد ۴ تا ۸ و ۱۰) مربوطه به تحقیق حاضر می‌باشند.

تعبیر و تفسیر افق‌های لرزه‌ای (برحسب داده زمانی^{۱۰}) و تطابق با داده‌های زمین‌شناسی حاصل از حفاری‌های اکتشافی صورت پذیرفته و افق‌های لرزه‌ای برحسب داده عمقی ساخته شده و هر یک از سازندها بر اساس تعداد بخش‌های مختلف آن جداگانه مدل‌سازی شده است. با توجه به عدم وجود سیستم‌های گسلی پیچیده در منطقه از مدل زمین‌شناسی با شبکه‌بندی ساده توسط نرم‌افزار پترل ۲۰۱۶ اقدام به ساخت مدل زمین‌شناسی شده است (شکل ۲).



شکل ۲: مدل زمین‌شناسی سه‌بعدی میدان آزادگان جنوبی با استفاده از مقاطع لرزه‌ای و داده‌های حفاری به همراه جانمایی چاه‌های مورد استفاده.

مدل‌سازی سرعت لرزه‌ای بر اساس داده‌های پس از برانبارش^{۱۱} سه‌بعدی انجام و از سرعت لایه‌ای VSP حاصل داده‌های کامل هفت حلقه چاه نیز برای تکمیل مکعب سرعت فشاری و هم به صورت یکی از لایه‌های شبکه عصبی در مدل‌سازی فشار مؤثر استفاده شده است.

بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی و تغییرات فشار منفذی، چاه‌های حفاری شده در میدان مورد مطالعه را می‌توان به سه نوع سازند گچساران، پایده و سازندهای سطحی حاوی مارن طبقه‌بندی کرد. این پارامترها روی انتخاب محل پاشنه جداری و شماتیک چاه تأثیر مستقیم می‌گذارند. همچنین سازندهای مخزنی و پروفایل چاه پارامترهای دیگری هستند که می‌توانند چاه‌ها را از نظر حفاری دسته‌بندی کنند. در محدوده مورد مطالعه واقع در میدان آزادگان جنوبی از 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 به صورت ناپیوسته است؛ اما در بخش‌های کناری میدان این داده‌ها وجود نداشته و برای محاسبه گرادیان فشار منفذی در کل میدان باید این داده‌ها را در آن بخش‌ها 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 امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای، مکعب اولیه داده‌ها با روش‌های زمین‌آماري مانند شبیه‌سازی گوسی متوالی همراه با کوکریجینگ هم مختصات با مکعب سرعت فشاری و روش معکوس فاصله اقدام به مدل‌سازی اولیه شده است. سازندهای زمین‌شناسی میدان آزادگان جنوبی نیز بر اساس

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل اولیه فشار منفذی بر اساس میانگین داده‌های نگار فشار و سرعت

جهت کسب نتایج دقیق‌تر است. بر اساس نتایج تخمین فشار منفذی با داده‌های نگار فشار مؤثر، می‌توان نتیجه گرفت، فشار منفذی با عمق برای همه چاه‌ها افزایش می‌یابد و می‌توان مشاهده کرد فشار منفذی به‌صورت عمودی تغییر می‌کند که نشان می‌دهد تغییرات سنگ‌شناسی نقشی مهم در ایجاد فشار بیش‌ازحد در یک‌لایه دارد. مقادیر میانگین داده‌های نگارهای گاما، VSP، تخلخل، چگالی، سرعت فشاری، امپدانس صوتی و فشار مؤثر سازند ایلام در جدول ۱ و همچنین سازند فهلیان در جدول ۲ ارائه شده است.

در مرحله ابتدایی، داده‌های نگارهای موجود بر اساس سازندهای نهایی تقسیم‌بندی شده و مدل اولیه فشار مؤثر با میانگین‌گیری داده‌های برداشت‌شده در هر یک از سازندها به دست آمده است. با توجه به اینکه عمیق‌ترین سازند بهره‌ده در این میدان، فهلیان است، جهت مطالعات فشار این سازند نیاز به مطالعه و مدل‌سازی کلیه سازندهای بالای

جدول ۱: میانگین داده‌های فشار مؤثر نگارهای سازند ایلام در چاه‌های دارای اطلاعات میدان آزادگان جنوبی

شماره چاه	سر سازند (m)	قاعده سازند (m)	Gr (gAPI)	VSP V _{int} (m/s)	اشباع سیال S.W	چگالی (Gr/cm ³)	سرعت فشاری Vp (m/s)	مقاومت صوتی A.I (m/s)*(Gr/cm ³)	فشار مؤثر (psi)
A-001	۲۵۹۲٫۸۹	۲۶۷۶٫۳۰	۲۳٫۸۸	۴۴۹۷٫۵۷	۰٫۴۸۹۰	۲٫۲۸۹۰	۴۰۸۲٫۶۰	۹۴۶۳٫۲۰	—
A-002	۲۶۰۳٫۱۷	۲۷۰۴٫۶۷	—	۴۵۵۰٫۱۱	۰٫۹۱۹۰	۲٫۳۳۳۰	۴۲۵۰٫۵۷	۱۰۰۸۶٫۰۳	—
A-004	۲۵۱۰٫۴۸	۲۶۰۶٫۴۸	۳۲٫۲۲	۴۴۳۲٫۳۱	۰٫۷۵۵۶	۲٫۲۳۰۸	۴۲۲۵٫۸۲	۹۹۴۳٫۳۹	—
A-005	۲۷۱۲٫۸۱	۲۸۱۲٫۳۳	۲۸٫۰۰	۴۲۰۸٫۸۳	۰٫۵۵۱۱	۲٫۳۲۸۷	۴۲۳۸٫۰۰	۱۰۰۱۸٫۶۰	۵۰۲۵٫۵۰
A-006	۲۵۳۸٫۱۹	۲۶۱۱٫۰۰	—	۳۹۹۵٫۸۶	۰٫۸۵۸۰	۲٫۳۴۶۸	۳۹۴۰٫۳۱	۹۳۹۷٫۰۳	—
A-010	۲۵۲۰٫۰۱	۲۶۲۶٫۵۶	۳۹٫۰۱	۴۱۳۷٫۲۲	۰٫۸۱۶۱	۲٫۴۵۸۷	۴۱۱۵٫۶۷	۱۰۱۷۸٫۳۸	—
A-016	۲۶۱۶٫۲۸	۲۷۲۱٫۹۶	۳۵٫۸۶	—	۰٫۷۰۱۷	۲٫۵۳۳۷	۴۱۶۷٫۲۸	۱۰۵۶۹٫۱۵	۵۰۶۰٫۴۹
A-017	۲۷۷۸٫۰۰	۳۰۵۹٫۰۰	—	—	—	—	—	—	۵۱۰۵٫۵۷
A-025	۲۴۲۹٫۰۰	۲۵۱۸٫۶۹	۳۴٫۶۵	۳۷۱۰٫۷۷	۰٫۷۴۳۹	۲٫۲۹۶۴	۳۷۷۷٫۲۱	۸۸۳۷٫۳۹	۴۰۰۰٫۰۰
YN-001	۲۶۰۰٫۳۵	۲۶۸۵٫۵۵	۴۱٫۸۱	—	۰٫۷۰۳۴	۰٫۵۱۶۲	۴۰۷۶٫۸۳	۱۰۳۰۹٫۵۱	۴۳۴۵٫۳۰

جدول ۲: میانگین فشار مؤثر و داده‌های نگار چاه‌ها برای سازند فهلیان بر اساس داده‌های موجود میدان آزادگان جنوبی

شماره چاه	سر سازند (m)	قاعده سازند (m)	Gr (gAPI)	VSP V _{int} (m/s)	اشباع سیال S.W	چگالی (Gr/cm ³)	سرعت فشاری Vp (m/s)	مقاومت صوتی A.I (m/s)*(Gr/cm ³)	فشار مؤثر (psi)
A-001	۳۹۹۰٫۳۰	۴۳۴۴٫۳۰	۴۰٫۶۷	۵۳۹۸٫۳۱	۰٫۱۸۵۳	۲٫۲۸۷۱	۴۴۴۳٫۴۶	۱۱۹۶۵٫۶۰	۹۲۵۶٫۰۰
A-002	۳۹۹۳٫۱۷	۴۳۹۸٫۶۷	۳۲٫۳۳	۵۵۶۸٫۸۷	۰٫۱۳۰۴	۲٫۶۷۵۹	۴۷۲۷٫۳۰	۱۲۶۵۷٫۸۴	-
A-004	۳۸۱۵٫۴۸	۴۲۶۵٫۰۰	۲۳٫۷۶	۴۷۰۷٫۰۳	۰٫۱۱۵۴	۲٫۵۵۰۶	۴۹۳۱٫۲۵	۱۲۶۲۰٫۶۴	۸۶۷۶٫۰۳
A-005	۳۹۹۱٫۰۰	۴۱۲۱٫۰۰	۳۹٫۵۶	۳۸۲۸٫۹۰	۰٫۱۹۹۷	۲٫۵۸۸۲	۴۲۳۰٫۱۴	۱۰۹۳۱٫۳۴	-
A-006	۳۸۱۱٫۰۰	۴۱۸۵٫۹۰	۳۸٫۰۸	۴۳۷۷٫۷۴	۰٫۱۲۶۱	۲٫۶۵۷۶	۴۷۹۹٫۶۴	۱۲۷۹۵٫۸۰	۸۴۷۸٫۵۱
A-008	۳۸۲۵٫۹۹	۴۰۹۶٫۲۸	۶۹٫۰۰	-	۰٫۱۸۸۹	۲٫۶۱۹۹	۴۱۳۰٫۶۳	۱۰۸۳۰٫۳۹	-
A-009	۳۸۸۰٫۹۸	۳۹۷۶٫۳۸	-	-	۰٫۱۴۲۵	۲٫۵۲۱۷	۴۵۵۵٫۱۰	۱۱۵۲۸٫۰۸	-
A-010	۳۸۶۷٫۲۳	۴۲۱۴٫۵۰	۳۱٫۵۸	۵۱۶۹٫۰۰	۰٫۰۷۵۰	۲٫۵۷۴۹	۵۱۴۲٫۰۷	۱۳۲۳۵٫۹۱	۸۹۸۳٫۸۴
A-011	۳۸۳۰٫۹۸	۳۹۴۲٫۰۷	-	-	۰٫۱۱۳۳	۲٫۶۶۷۹	۴۲۳۴٫۲۳	۱۱۳۲۶٫۰۱	-
A-020	۳۹۲۲٫۱۹	۴۰۴۰٫۰۰	۱۹٫۱۱۰	-	۰٫۱۰۲۳	۲٫۳۷۹۹	۴۱۵۲٫۸۵	۹۹۲۴٫۳۸	-
A-024	۳۹۲۲٫۹۸	۴۰۴۰٫۰۰	۵۵٫۳۱	-	۰٫۱۹۱۰	۲٫۶۹۵۹	۴۱۰۱٫۸۸	۱۱۰۶۹٫۸۳	-
A-025	۳۷۰۰٫۰۰	۴۱۳۶٫۲۶	۳۹٫۹۵	۴۰۰۸٫۴۴	۰٫۱۳۰۶	۲٫۶۶۶۲	۵۰۱۹٫۳۴	۱۳۴۳۱٫۷۹	۶۸۹۱٫۳۳
YD-006	۴۰۹۱٫۵۰	۴۲۰۷٫۵۰	-	۴۴۹۱٫۸۴	-	-	-	-	۹۳۱۵٫۵۰
YN-001	۴۰۳۴٫۰۰	۴۲۴۴٫۰۰	۴۷٫۱۹	-	۰٫۱۷۵۳	۲٫۶۴۳۰	۳۷۳۷٫۲۶	۹۶۳۷٫۸۲	-

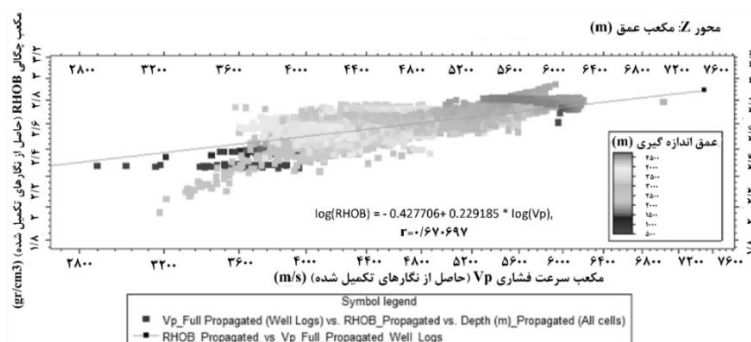
انتگرال‌گیری از مقدار چگالی متوسط (از سطح تا عمق موردنظر) به‌دست می‌آید، برای محاسبه مکعب تنش روباره ابتدا باید مکعب چگالی ایجاد گردد. از معروف‌ترین روابطی که در لرزه‌نگاری برای ایجاد ارتباط بین سرعت و چگالی کاربرد فراوان دارد رابطه گاردنر^{۱۳} و رابطه تجربی آموکو^{۱۴} است [۴، ۵۴-۵۷]. در روش گاردنر ابتدا نمودار لگاریتمی مکعب‌های تکمیل‌شده نگار وزن مخصوص نسبت به نگار سرعت فشاری (حاصل مطالعات سرعت لایه‌ای) رسم و رابطه لگاریتمی به‌دست‌آمده تبدیل به رابطه نمایی (۴) شده است.

$$\rho = aV_p^b \quad (4)$$

با تبدیل رابطه فوق به‌صورت نمایی، معادله به‌صورت $\rho = 0.229185 V_p^{0.427706}$ در آمده، لذا ضرایب رابطه گاردنر به‌صورت $a=0.38$ و $b=0.23$ محاسبه شده است؛ بنابراین برای محاسبه وزن مخصوص متوسط با استفاده از تولید مکعب سرعت متوسط حاصل از داده‌های چک شات و مقطع‌نگاری عمودی^{۱۵} (VSP) به‌صورت $\rho_{avg} = 0.38V_{avg}^{0.23}$ تولید شده است.

در روش دیگر وزن مخصوص میانگین از طریق رابطه تجربی آموکو بر اساس عمق بر حسب متر به‌دست‌آمده است (رابطه (۵) و شکل ۴).

$$\rho_{avg} = \frac{\left(16.3 + \frac{3.281 * \text{Depth}}{3125}\right)^{0.6}}{8.354} \quad (5)$$

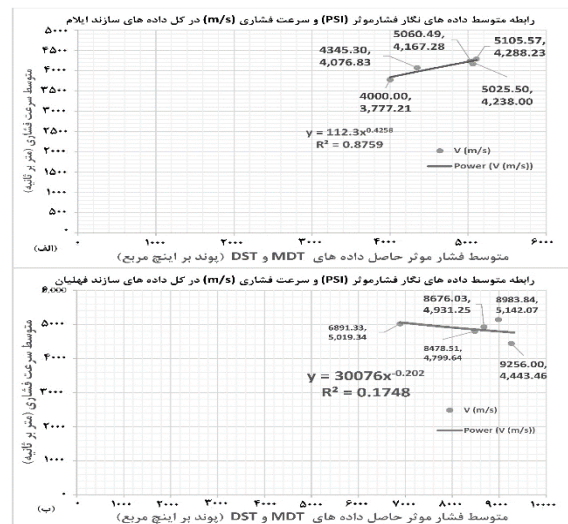


شکل ۴: رابطه لگاریتمی مکعب نگارهای وزن مخصوص نسبت به سرعت فشاری میدان آزادگان جنوبی.

مکعب‌ها با استفاده از ماشین حساب نرم‌افزار پترل ۲۰۱۶ مورد محاسبه قرار گرفته است.

$$P_{O.B} = \int \rho gh (dh) \quad (6)$$

با توجه تعداد کم جفت داده‌های فشارمؤثر-سرعت در کل داده‌های سازند فهلیان چاه‌های آزادگان به میزان ۵ داده و ضریب همبستگی بسیار پایین رابطه باورز برای چاه‌های فوق به میزان ۰/۴۱-، نیاز به تفکیک این سازند به دو بخش بالایی و پایینی و انجام مدل‌سازی به تفکیک سازندها پس از تکمیل مکعب‌های سرعت فشاری و فشار مؤثر است (شکل ۳).



شکل ۳: رابطه متوسط نگارهای فشار مؤثر و سرعت فشاری در سازندهای الف) ایلام و ب) فهلیان میدان آزادگان جنوبی.

۲-۲- ساخت مدل مکعب تنش روباره

برای محاسبه فشار منفذی، نیاز به محاسبه تنش روباره^{۱۲} و فشار مؤثر است. از آنجاکه محاسبه تنش روباره با انتگرال

با توجه به ضریب همبستگی بالا بین رابطه گاردنر و رابطه آموکو به میزان ۹۲/۴ درصد، استفاده از مکعب وزن مخصوص حاصل از ضرایب رابطه گاردنر به دلیل صحت بالاتر مورد تأیید است. روابط مورد استفاده برای ساخت هر یک از

فشار حاصل از حفاری ۲۳ حلقه چاه، استفاده از روش‌های پیشنهادی دیگر مانند شبیه‌سازی گوسی متوالی و معکوس فاصله با استفاده از داده‌های فشار امکان‌پذیر است. لذا مدل‌سازی اولیه فشار مؤثر به سه روش (۱) باورز (با استفاده از مکعب سرعت کوکریجینگ شده با امیدانس صوتی)، (۲) شبیه‌سازی گوسی متوالی همراه با کوکریجینگ با مکعب نگار سرعت و (۳) روش میانگین مجذور فاصله^{۱۶} صورت پذیرفت. در مرحله بعدی هر یک از سه مکعب‌های فشار اولیه به صورت جداگانه با استفاده از روش مؤلفه‌های اصلی^{۱۷} (PCA) و شبکه عصبی به روش پیش رو-پس انتشار^{۱۸} مورد مدل‌سازی کامل قرار گرفته است. در ادامه بهترین روش با بالاترین ضریب همبستگی با داده‌های اولیه MDT به‌عنوان روش مینا برای محاسبه نهایی فشارهای سازند انتخاب شده است. جهت اصلاح مدل از پنج لایه اطلاعاتی شامل گامای سازند، سرعت فشاری، امیدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی، چگالی و تنش روباره که دارای بیشترین همگرایی خطی با مدل‌های اولیه فشار مؤثر بوده‌اند استفاده شده است (جدول).

الگوریتم آموزش شبکه عصبی استفاده شده از نوع لونیبرگ-مارکارد^{۱۹} به جهت همگرایی سریع آن است بوده است. ساختار FFBPANN بهینه‌سازی شده برای پیش‌بینی فشار منافذ دارای سه لایه است: دولایه پنهان و لایه خروجی. اولین مجموعه ورودی که شامل اشعه گاما و سرعت فشاری است، ورودی‌های لایه اول است. دسته دوم ورودی‌ها شامل امیدانس صوتی، چگالی سازند و تنش روباره است که نتیجه لایه اول، ورودی‌های لایه دوم است. همچنین بهترین ترکیب نوروں‌ها ۱-۵-۲ است به این معنی که لایه اول دارای دو نوروں، لایه دوم دارای پنج نوروں و لایه خروجی دارای یک نوروں است.

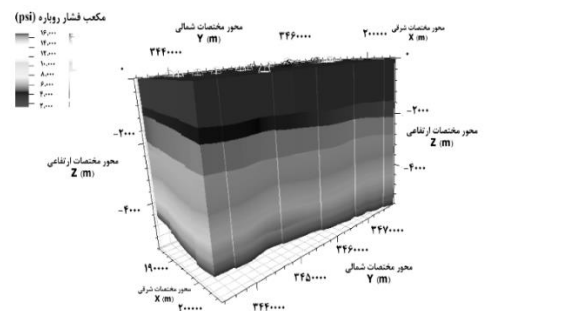
جدول ۳: ضریب همبستگی مؤلفه‌های اصلی مدل شبکه عصبی نهایی فشار مؤثر حاصل از مدل‌های اولیه به روش‌های باورز، SGS و IDW

PC4	PC3	PC2	PC1	PC0	ضرایب همبستگی روش‌های Bowers, SGS, IDW
۰٫۱۲۱۴	۰٫۱۴۷۵	۰٫۲۲۸۲	۰٫۹۵۲۳	۰٫۰۶۷۷	مکعب گامای سازند (GR) با استفاده از روش IDW
-۰٫۰۹۵۵	-۰٫۰۴۱۱	۰٫۵۱۳۷	-۰٫۲۳۹۳	-۰٫۸۱۷۳	مکعب امیدانس صوتی (حاصل وارون‌سازی لرزه‌ای)
۰٫۲۶۳۰	۰٫۲۱۰۵	-۰٫۰۸۹۱	-۰٫۳۵۳۴	-۰٫۸۶۸۱	مکعب سرعت فشاری (Vp)
-۰٫۲۳۲۰	۰٫۲۱۳۵	-۰٫۲۳۷۶	۰٫۳۰۶۹	-۰٫۸۶۶۰	مکعب چگالی (RHOB)
۰٫۰۷۰۹	-۰٫۳۹۰۱	-۰٫۱۴۶۰	۰٫۳۶۲۵	-۰٫۸۳۰۷	مکعب تنش روباره (Psi) O.B
۰٫۱۵۱۹	۰٫۲۶۵۶	۰٫۴۰۱۷	۱٫۳۱۴۶	۲٫۸۶۶۲	مقدار ویژه (Eigenvalue)
۳٫۰۴	۵٫۳۱	۸٫۰۳	۲۶٫۲۹	۵۷٫۳۲	سهم (درصد) Contribution
۱۰۰٫۰۰	۹۶٫۹۶	۹۱٫۶۵	۸۳٫۶۲	۵۷٫۳۲	سهم تجمعی (درصد) Cumulative Contribution

برای محاسبه تنش روباره با توجه به اینکه حاصل ضرب وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب) در شتاب گرانش (۹٫۸۱ متر بر مجذور ثانیه) در عمق (متر) به صورت کیلو پاسکال به دست می‌آید، برای محاسبه فشار بر حسب پوند بر اینچ مربع (Psi) نیاز به ضریب تبدیل $\frac{145.038}{1000}$ است، لذا رابطه (۶) به شکل رابطه (۷) در می‌آید:

$$P_{O.B} = \frac{9.81 \times \rho_{avg} \times \text{Depth} \times 145.038}{1000} \quad (7)$$

بنا بر نتایج به دست آمده بیشترین تغییرات تنش روباره در محدوده ۱۶-۱۰ هزار پام قرار گرفته است (شکل ۵).



شکل ۵: مکعب نهایی تنش روباره (برحسب psi) بر اساس متوسط وزن مخصوص و عمق.

۲-۳- ساخت مدل فشار مؤثر

داده‌های تست فشار MDT و DST میدان مورد مطالعه عموماً از سازند سروک شروع شده و تا سازند گوتنیا ادامه یافته است [۶، ۲۰، ۵۸]، لیکن داده‌های فشاری در سازندهای بالایی بسیار محدود است به طوری که در سازند سروک و گورپی در یک حلقه چاه، در بخش تارپور سازند گورپی و سازند ایلام در پنج حلقه چاه و سازندهای سطحی و گچساران فاقد داده تست فشار می‌باشند. توجه به داده‌های

جدول ۴: اعتبار سنجی حاصل از ضرایب همبستگی مکعب فشار منفذی سازندهای میدان مورد مطالعه بر روی مدل‌های باورز، SGS و IDW با داده‌های اولیه آزمایش فشار MDT

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

بنابراین داده‌های هر یک از سازندها در مکعب نهایی با داده‌های نهایی مکعب سرعت فشاری مقایسه شده و ضرایب رابطه باورز مورد محاسبه مجدد قرار گرفته است. بر این اساس بیشترین میزان همبستگی بین مکعب نهایی فشار مؤثر و مکعب سرعت مربوط به سازندهای فهلیان پایینی با ۰٫۸۶ و ایلام با ۰٫۷۱ است که نشان‌دهنده صحت داده‌های مدل‌سازی شده با داده‌های اصلی است (شکل ۶ و جدول ۵).

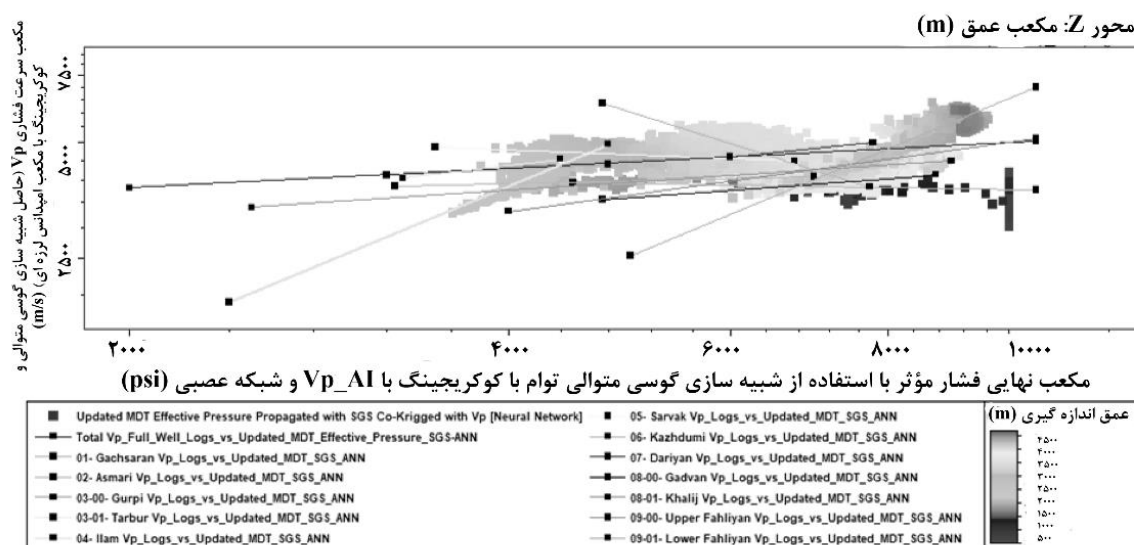
بر اساس مقایسه سه روش، در مکعب فشار مؤثر ساخته‌شده با شبکه عصبی بر اساس مدل اولیه SGS با استفاده از ۳۰ مرحله تکرار مقادیر خطای آموزش ۱۰۸۳/۵، خطای آزمایش ۱۰۸۳/۶۴ و خطای نسبی به میزان ۰٫۵۳۶ محاسبه شده است که دارای کمترین مقادیر خطا نسبت به دو روش دیگر است.

۲-۴- ساخت مدل مکعب فشار منفذی

در این بخش از مطالعات بر اساس رابطه ترزاقی (رابطه (۸))، هریک از مکعب‌های فشار مؤثر تکمیل‌شده از مکعب تنش روباره کسر شده و پس از تطابق مکعب‌های فشار منفذی ساخته‌شده (بر اساس روش‌های باورز، SGS و IDW) با همدیگر و با داده‌های اولیه فشار مؤثر برای سازندهای مختلف، مدل نهایی فشار منفذی دارای بالاترین ضریب همبستگی با داده‌های اولیه برای تعیین فشار شکست سازند در مرحله بعد استفاده شده است [۵۷، ۵۹].

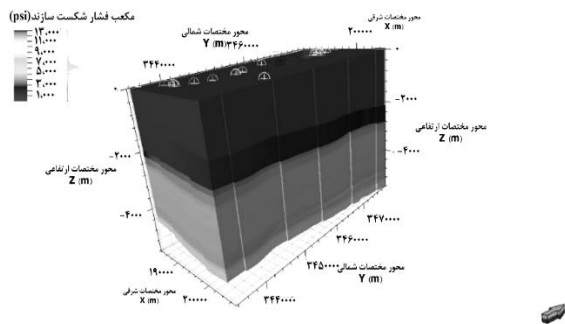
$$P_{\text{Pore}} = P_{\text{O.B}} - P_{\text{eff}} \quad (8)$$

ضریب همبستگی در هر سه روش برای سازندهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته که صحت مکعب فشار منفذی حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از کوکریجینگ با نگار سرعت فشاری (کوکریجینگ شده با امیدانس صوتی حاصل از وارون سازی لرزه‌ای) مورد تأیید و داده‌های حاصل از این روش برای گرادیان نهایی فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۴).



شکل ۶: ضرایب همبستگی مدل نهایی فشار مؤثر با مدل مکعب سرعت (به‌روزرسانی ضرایب رابطه باورز) در کل میدان.

$$P_{Fraction} = (P_{Overburden} - P_{Pore}) * \left(\frac{g}{1-g} \right) + P_{pore} \quad (10)$$



شکل ۷: مکعب نهایی فشار شکست سازند بر اساس مکعب‌های فشار منفذی نهایی، تنش روباره و ضریب پواسون.

۲-۶- تغییرات فشار منفذی و فشار شکست سازند در میدان آزادگان جنوبی

جهت مطالعه تغییرات فشار میدان آزادگان جنوبی، هیستوگرام فشارهای منفذی و شکست سازند به صورت جداگانه در هر سازند و کل میدان مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج در جدول ۶ ارائه شده است، بر این اساس با توجه به تغییرات اندک بین حداقل و حداکثر مقادیر فشار منفذی و شکست سازند در سازندهایی مانند کزدمی و گدوان به میزان کمتر از ۲۰۰ پام، جهت طراحی پنجره گل حفاری مقادیر بازه اطمینان^{۲۱} جهت جلوگیری از جریان چاه و هرزروی سازند حدود ۵۰ پام پیشنهاد شده است. به عنوان نمونه هیستوگرام تغییرات فشار سازند فهلیان جنوبی ارائه شده است (شکل ۸).

تغییرات تنش روباره، فشار منفذی و تنش روباره کل مکعب میدان آزادگان جنوبی نیز در شکل ۹ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده افزایش فشارهای منفذی و شکست سازند با افزایش عمق کاملاً محسوس است به جز سازند فهلیان پایینی که با افزایش عمق شاهد کاهش فشار در این سازند هستیم. بر اساس مکعب‌های فشاری مدل سازی شده حداکثر فشار منفذی به میزان ۱۰۰۰۰ پام در سازندهای گدوان تا فهلیان بالایی و حداکثر فشار شکست سازند نیز به میزان ۱۳۰۰۰ پام در سازندهای فهلیان پایینی تا گوتنیا به دست آمده است (جدول ۶).

جدول ۵: پارامترها و ضرایب همبستگی نهایی رابطه باورز برای سازندهای مختلف میدان مورد مطالعه

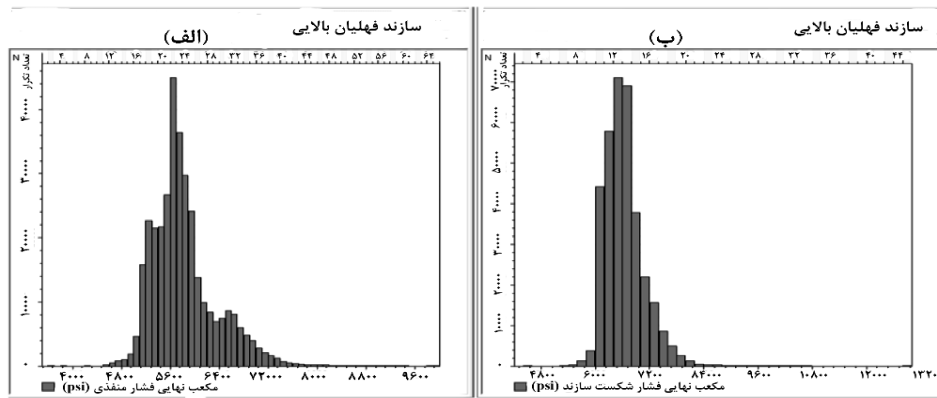
ضریب همبستگی	رابطه باورز $V=aP_{eff}^b$	سازند
۰٫۱۷	A=6112.23, B=-0.052	سازند گچساران
۰٫۳۲	A=2006.3, B=0.077	سازند آسماری
۰٫۴۵	A=1055.9, B=0.1682	سازند گورپی
۰٫۲۶	A=151.68, B=0.405	بخش تارنور سازند گورپی
۰٫۷۱	A=0.043, B=1.374	سازند ایلام
۰٫۲۷	A=13720, B=-0.127	سازند سروک
۰٫۶۵	A=33078.3, B=-1.025	سازند کزدمی
۰٫۴۴	A=290.35, B=0.318	سازند داریان
۰٫۲۵	A=439.7, B=0.247	سازند گدوان
۰٫۱۹	A=613.49, B=0.218	بخش خلیج سازند گدوان
۰٫۵۵	A=77.5, B=0.453	سازند فهلیان بالایی
۰٫۸۶	A=0.023, B=1.363	سازند فهلیان پایینی
۰٫۳۸	A=1042.46, B=0.1705	کل میدان

۲-۵- مکعب فشار شکست سازند

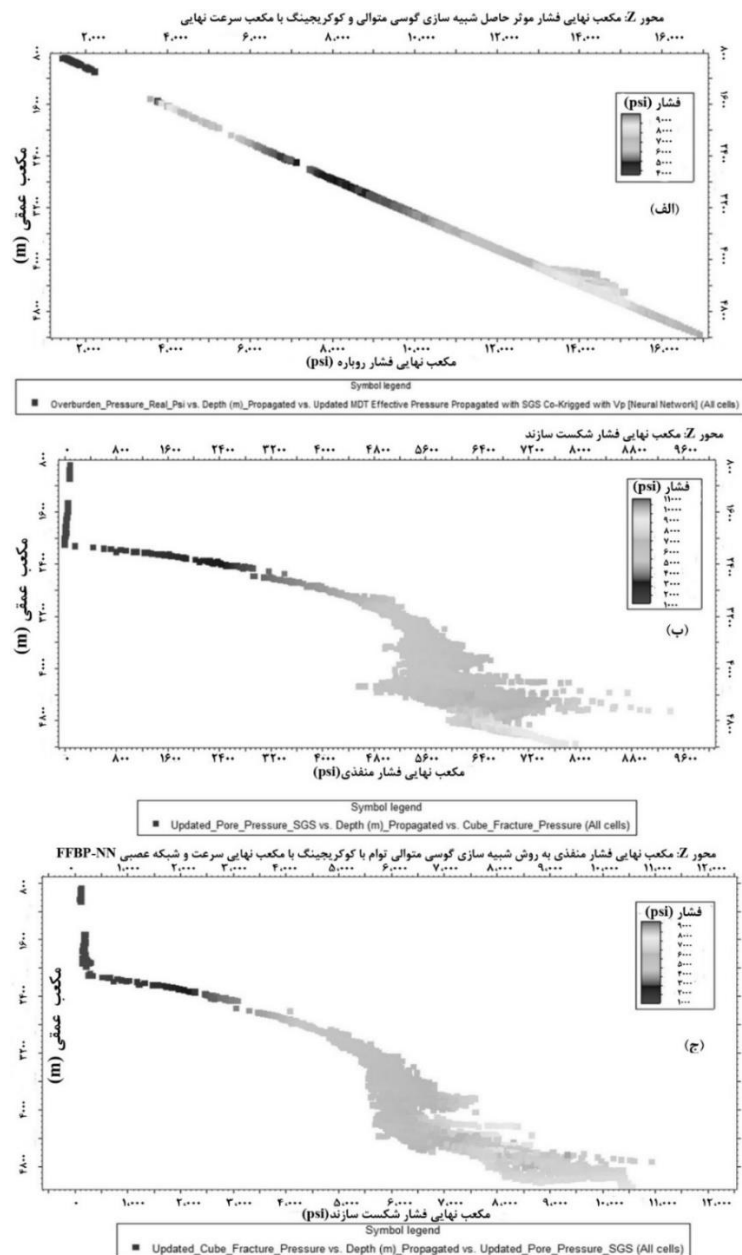
با در دست داشتن داده‌های سرعت برشی نهایی و همچنین سرعت فشاری تکمیل شده، ضریب پواسون^{۲۰} (v) بر اساس نسبت سرعت فشاری به برشی و رابطه (۹) به صورت نگار و نهایتاً به صورت مکعب محاسبه و تولید شده است. مقادیر ضریب پواسون عموماً بین ۰٫۲ تا ۰٫۱ بوده که در محدوده قابل قبول است [۸، ۲۴، ۵۵، ۶۰، ۶۱].

$$g = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (9)$$

نهایتاً با در دست داشتن فشارهای روباره، منفذی و ضریب پواسون با استفاده از رابطه ایتون فشار شکست سازند پس از حذف مقادیر اندک خارج از ردیف طبق رابطه (۱۰) محاسبه شده است [۶۲-۶۵، ۵۶] (شکل ۷).



شکل ۸: هیستوگرام تغییرات فشار الف) منفذی و ب) شکست سازند در سازند فهلیان بالایی.



شکل ۹: الف) مدل تغییرات تنش روبراه (بالا، ب) منفذی (وسط) و ج) فشار شکست سازند (پایین) نسبت به افزایش عمق در میدان آزادگان جنوبی.

جدول ۶: تغییرات فشار منفذی و فشار شکست سازند بر اساس مدل سازی فشارهای سازندی میدان آزادگان جنوبی

نام سازند	تغییرات فشار منفذی (پام)	تغییرات فشار شکست سازند (پام)
آجاجاری (سطحی)	۷۶,۲-۸۷,۲	۹۴-۱۴۲
گچساران	۱۰-۴۴۰	۸۰-۶۴۰
آسماری و پابده	۱۰۰-۳۹۰۰	۱۰۰-۴۹۰۰
گورپی	۲۲۵۰-۴۷۰۰	۲۵۰۰-۴۹۰۰
بخش تاربور (سازند گورپی)	۳۵۵۰-۴۹۰۰	۳۸۲۵-۵۱۲۵
ایلام و لافان	۴۲۴۰-۶۱۶۰	۴۵۰۰-۷۰۰۰
سروک	۴۳۰۰-۶۵۵۰	۴۷۵۰-۷۵۵۰
کزدمی	۴۸۰۰-۷۱۰۰	۵۰۰۰-۸۲۰۰
داریان	۵۰۲۵-۶۴۲۵	۵۷۸۰-۶۶۸۰
گدوان	۴۹۰۰-۹۹۰۰	۵۲۰۰-۱۲۶۰۰
بخش خلیج (سازند گدوان)	۴۸۰۰-۱۰۰۰۰	۵۰۰۰-۱۲۶۰۰
فهلپیان بالایی	۳۵۰۰-۱۰۰۰۰	۴۲۰۰-۱۰۰۰۰
فهلپیان پایینی تا گوتنیا	۵۰۰۰-۹۷۰۰	۵۴۰۰-۱۳۰۰۰

ساخته شده توسط نرم افزار پترل ۲۰۱۶ در جهات افقی و عمودی به روش‌های مختلف در ادامه ارائه شده است. با توجه به مقایسه نتایج حاصل از واریوگرام‌ها، سقف واریوگرام روش SGS به میزان ۰/۹۳۷ و بیشتر از دو روش دیگر و اثر قطعه‌ای آن نیز متعاقباً کمتر از دو روش دیگر است، لذا اعتبار این روش مورد تأیید قرار گرفته است. همچنین کمترین میزان اعتبار مربوط به روش باورز با سقف ۰/۸۲۶ و اثر قطعه‌ای ۰/۱۷۴ است (شکل ۱۰ و جدول ۷).

بر اساس مطالعه ناهمسانگردی واریوگرام شبکه عصبی حاصل از روش SGS، میزان ناهمسانگردی به روش گاوسی با شیب و آزیموت صفر در جهت عمودی دارای حداقل میزان ۹/۱ متر برای سازند فهلپیان بالایی، حداکثر میزان ۲۴۱۹/۹ متر برای سازند سطحی آجاجاری، برای کل میدان ۶۸ متر و همچنین در جهت افقی با زوایای صفر و ۲۷۰ درجه به میزان ۱۱۸۵۰ متر با میزان سقف ۰/۹۳۷ است (جدول ۸).

جدول ۷: مقایسه نتایج حاصل از واریوگرام مکعب فشار منفذی در جهت قائم حاصل از مدل‌های اولیه باورز، SGS و IDW با

ساختار گوسی

داده‌های واریوگرام مکعب فشار منفذی	شبکه عصبی حاصل از روش باورز	شبکه عصبی حاصل از روش SGS	شبکه عصبی حاصل از روش IDW
سقف واریوگرام (Sill)	۰/۸۲۶	۰/۹۳۷	۰/۹۳۳
اثر قطعه‌ای (Nugget Effect)	۰/۱۷۴	۰/۰۶۳	۰/۰۶۷۵
محدوده (متر) (Range (m))	۷۱۷,۲۱	۹۳۷,۵۶	۱۰۰۰

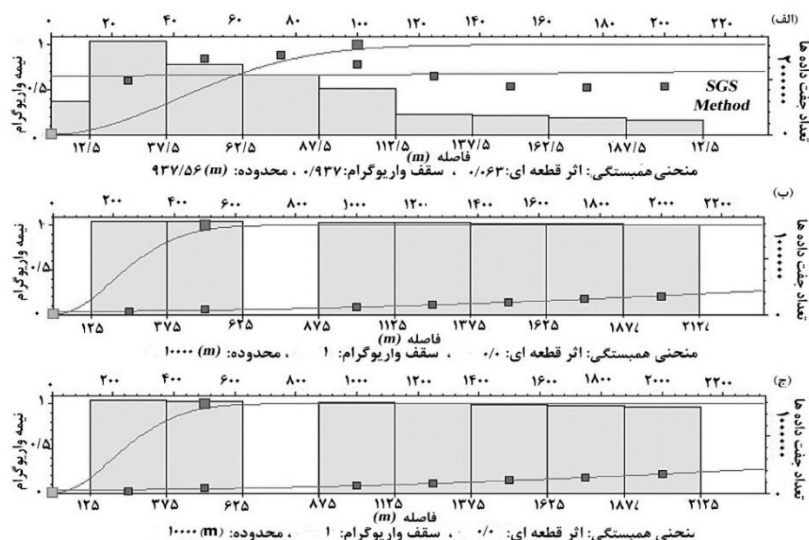
۷-۲- اعتبار سنجی مدل‌های فشار منفذی با رسم واریوگرام

در این مرحله با رسم واریوگرام مکعب‌های فشار منفذی در دو جهت عمودی و افقی و بررسی تغییرات آن، نسبت به انتخاب بهترین مدل اقدام شده است. واریوگرام‌های

جدول ۸: نتایج واریوگرام گوسی مکعب نهایی فشار منفذی به دست آمده با ترکیب روش‌های SGS و کوکریجینگ با امیدانس صوتی (AI) و

شبکه عصبی FFBP-NN در محدوده مورد مطالعه

جهت	اثر قطعه‌ای (Nugget)	سقف (Sill)	محدوده (m) (Range)	تعداد جفت‌ها (Pairs)	محدوده ناهمسانگردی (m) (Anisotropy Range)
عمودی	۰/۰۶۳۳	۰/۹۳۷	۹۳۷,۵۶	۱۳۳۷۴۴۵۱	۶۸
افقی اصلی آزیموت ۰ درجه	.	۱	۱۰۰۰۰	۱۱۳۶۷۳۶۳	۱۱۸۵۰
افقی فرعی آزیموت ۲۷۰ درجه	.	۱	۱۰۰۰۰	۱۱۰۵۸۶۶۳	۱۱۸۵۰



شکل ۱۰: نیمه واریوگرام مکعب نهایی فشار منفذی در جهات: (الف) عمودی، (ب) افقی اصلی 0° و (ج) افقی فرعی 270°

بر اساس نتایج اولیه داده‌های فشار مؤثر دارای سه نقطه شکست در فشارهای ۴۶۷۷، ۴۷۸۶ و ۸۵۱۱ پام است که می‌تواند نشان‌دهنده چهار رژیم فشاری اصلی یا چهار سازند با فشارهای متفاوت در فاصله اعماق برداشتی بین سازندهای ایلام تا فهلیان باشد (جدول ۹).

جدول ۹: مدل فرکتالی اولیه فشار مؤثر بر اساس میانگین داده‌های MDT و DST سازندهای مخزنی ایلام تا فهلیان

میانگین فشار مؤثر (PSI)	لگاریتم فشار مؤثر
۴۶۷۷٫۳۵	۳٫۶۷
۴۷۸۶٫۳۰	۳٫۶۸
۸۵۱۱٫۳۸	۳٫۹۳

۳-۲- مدل فرکتالی مقدار-حجم برای مکعب داده‌های نهایی میدان آزادگان جنوبی

پس از تکمیل مدل سازی داده‌های فشاری، سرعت و سایر داده‌های مکعب نهایی میدان آزادگان جنوبی، با توجه به حجم بالای تعداد سطرهای داده‌ها به میزان حدود ۱٫۵ میلیون سطر داده (هر ۱۵ سانتی‌متر تغییر عمق، یک سلول مکعب داده)، داده‌ها بر اساس عمق مرتب‌شده و به ازای هر ۱۰۰۰ متر در سازندهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند که نتایج به صورت مدل‌های مقدار-حجم بر اساس رابطه (۴) در ادامه ارائه خواهد شد.

$$V(\geq P) \propto P^{-\beta} \quad (4)$$

در این رابطه V ها دربرگیرنده حجم نمونه فشارهای سازندی بزرگ‌تر و مساوی P و β بعد فرکتالی است.

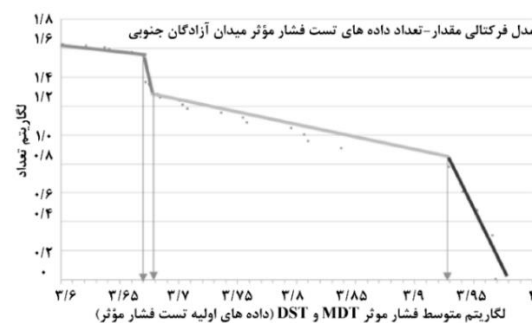
۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل فرکتالی مقدار-تعداد برای فشار مؤثر داده‌های اولیه نگار MDT و داده‌های DST

مطالعات اولیه مدل فرکتالی بر اساس داده‌های موجود شامل ارائه مدل فرکتالی مقدار-تعداد فشار مؤثر بر اساس تغییر رابطه (۳) به شکل زیر است.

$$N(\geq P_{eff}) \propto P_{eff}^{-\beta} \quad (3)$$

در این رابطه N دربرگیرنده تعداد نمونه فشارهای مؤثر بزرگ‌تر و مساوی P_{eff} و β بعد فرکتالی است. بر این اساس میانگین داده‌های موجود نگار فشار مؤثر MDT و داده‌های تست فشار DST برای سازندهای ایلام تا فهلیان هر چه محاسبه‌شده و پس از مرتب‌سازی از بزرگ به کوچک، لگاریتم داده‌های فشار مؤثر و تعداد داده محاسبه و نمودار آن مطابق شکل ۱۱ رسم شده است.



شکل ۱۱: مدل فرکتالی اولیه فشار مؤثر بر اساس میانگین داده‌های MDT و DST سازندهای مخزنی ایلام تا فهلیان.

بر اساس متوسط ضخامت مکعب لایه‌های زمین‌شناسی ساخته‌شده توسط نرم‌افزار پترل ۲۰۱۶ در جدول ۱۰ ارائه شده است. با توجه به اینکه در بازه سطح تا ۱۰۰۰ متری مقادیر فشار مؤثر و تنش روباره تغییر محسوسی نداشته، مدل فرکتالی مقدار-حجم آن‌ها قابل تهیه نبوده است.

با توجه به اینکه هرکدام از سازندهای آجاجاری، آسماری و پاینده، سروک، بخش خلیج و سرگلو در بخش‌های مشترک دو بازه عمقی مدل‌های فرکتالی قرار گرفته‌اند، تعداد سلول داده‌های آن‌ها به صورت جداگانه برای هر یک از مدل‌ها محاسبه شده است. جدول تقسیم‌بندی میدان آزادگان جنوبی

جدول ۱۰: تقسیم‌بندی میدان آزادگان جنوبی بر اساس متوسط ضخامت مکعب لایه‌های زمین‌شناسی با استفاده از نرم‌افزار پترل ۲۰۱۶

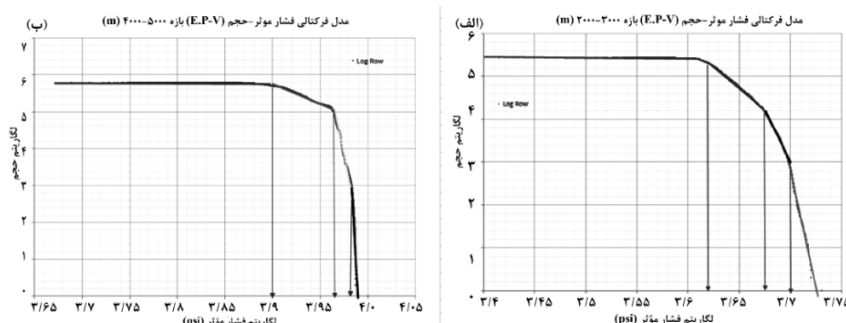
ردیف	سازند	سر سازند (متر)	قاعده سازند (متر)	متوسط ضخامت (متر)	لیتولوژی غالب	تعداد مکعب داده
۱	آجاجاری	سطح	۱۲۷۲٫۳	۱۲۷۲٫۳	مارل و ماسه‌سنگ	۱۱۳۶۳+۲۷۲۷
۲	گچساران	۱۲۷۲٫۳	۱۶۳۰٫۶۵	۳۵۸٫۳۵	انیدریت و رس سنگ	۷۵۷۱
۳	آسماری و پاینده	۱۶۳۰٫۶۵	۲۳۶۸٫۲۵	۷۳۷٫۶	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۷۳۸۳+۱۰۱۱۹۳
۴	گورپی	۲۳۶۸٫۲۵	۲۵۹۰٫۰۵	۲۲۱٫۸	سنگ‌آهک	۲۶۶۵۰
۵	بخش تارپور (سازند گورپی)	۲۵۹۰٫۰۵	۲۷۵۷٫۸۵	۱۶۷٫۸	سنگ‌آهک و مارل	۹۳۱۷۹
۶	ایلام و لافان	۲۷۵۷٫۸۵	۲۸۶۶٫۰۵	۱۰۸٫۲	سنگ‌آهک و رس سنگ	۶۴۶۷۸
۷	سروک	۲۸۶۶٫۰۵	۳۵۰۶٫۹	۶۴۰٫۸۵	سنگ‌آهک	۷۳۶۳۸+۳۰۸۷۸۲
۸	کژدمی	۳۵۰۶٫۹	۳۷۳۳٫۹۵	۲۲۷٫۰۵	شیل، سنگ‌آهک و ماسه‌سنگ	۱۵۰۶۰۷
۹	داریان	۳۷۳۳٫۹۵	۳۸۹۶	۱۶۲٫۰۵	سنگ‌آهک و مارل	۱۳۴۷۸۸
۱۰	گدوان	۳۸۹۶	۳۹۶۶٫۵۵	۷۰٫۵۵	مارل، شیل و سنگ‌آهک	۸۵۳۲۰
۱۱	بخش خلیج (سازند گدوان)	۳۹۶۶٫۵۵	۴۰۷۱	۱۰۴٫۴۵	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۱۳۹۱۳۱
۱۲	فهلپان بالایی	۴۰۷۱	۴۲۲۸٫۰۵	۱۵۷٫۰۵	سنگ‌آهک	۱۹۰۸۱۸
۱۳	فهلپان پایینی	۴۲۲۸٫۰۵	۴۵۸۹٫۱	۳۶۱٫۰۵	سنگ‌آهک	۱۹۹۲۹۹
۱۴	گرو	۴۵۸۹٫۱	۴۷۸۳	۱۹۳٫۹	سنگ‌آهک و رس سنگ	۷۵۶۱۲
۱۵	گوتنیا	۴۷۸۳	۴۹۳۱	۱۴۸	انیدریت و سنگ‌آهک	۴۵۲۲۱
۱۶	نجمه	۴۹۳۱	۴۹۵۹	۲۸	انیدریت و سنگ‌آهک	۶۶۷۸
۱۷	سرگلو	۴۹۵۹	۵۰۶۸	۱۰۹	سنگ‌آهک و شیل	۸۳۸۸+۹۴۷۰
۱۸	علن	۵۰۶۸	۵۱۰۷	۳۹	انیدریت و سنگ‌آهک	۳۹۰۰
۱۹	موس	۵۱۰۷	۵۱۹۹	۹۲	سنگ‌آهک	۷۰۸۹
۲۰	نیریز	۵۱۹۹	۵۵۹۰	۳۹۱	سنگ‌آهک و انیدریت	۷۸۷۳

۴۰۰۰ متری، ۵ رژیم فشار مؤثر بین ۵۴۹۵/۴ تا ۸۹۱۲/۵ پام مشاهده می‌شود که متعلق به سازندهای سروک تا بخش خلیج سازند گدوان است. در فاصله ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری، ۴ رژیم فشار مؤثر بین ۷۹۴۳/۳ تا ۹۵۴۹/۹ پام مشاهده می‌شود که شامل بخش خلیج، سازند فهلپان، سازندهای گرو و گوتنیا، نجمه و بخشی از سازند سرگلو است. در فاصله ۵۰۰۰ تا ۵۵۹۰ متری، فشار مؤثر عمدتاً مربوط به فشار کمتر از ۹۲۰۴/۵ پام بوده و سایر بازه‌های فشاری نیز بین ۹۲۰۴/۵ تا ۹۲۸۹/۷ پام و بیشتر از ۹۴۴۰/۶ پام مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز در دوره ژوراسیک می‌باشند (شکل ۱۲ و جدول ۱۱)

۳-۲-۱- مدل فرکتالی مقدار-حجم فشار مؤثر

پس از رسم نمودارهای فرکتالی مقدار-حجم حاصل از مکعب فشار مؤثر برای فواصل ۱۰۰۰ متری در ۵ نمودار جداگانه، نتایج تعبیر و تفسیر تغییرات فشاری به همراه جدول و نمودارهای مربوطه به شرح ذیل ارائه شده است:

در فاصله ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ متری، ۴ رژیم فشار مؤثر بین ۶۹۱۸/۳ تا ۸۸۱۰/۵ پام مشاهده می‌شود که می‌تواند بیانگر چهارسازند آجاجاری، گچساران، آسماری و پاینده باشد. در فاصله ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری، ۴ رژیم فشار مؤثر بین ۴۱۶۸/۷ تا ۵۰۱۱/۹ پام مشاهده می‌شود. در فاصله ۳۰۰۰ تا



شکل ۱۲: نمونه‌ای از مدل فرکتالی فشار مؤثر (الف) فاصله ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری میدان آزادگان جنوبی (سازندهای آسماری، پایده، گورپی، ایلام و سروک)، (ب) فاصله ۴۰۰۰-۵۰۰۰ متری (سازندهای بخش خلیج گدوان، فهلیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو).

جدول ۱۱: رژیم‌های فشار مؤثر حاصل از نقاط شکست مدل‌های فرکتالی مقدار-حجم برای فواصل ۱۰۰۰ متری

بازه عمقی (متر) و سازند	لگاریتم فشار مؤثر	فشار مؤثر (PSI)	تعداد رژیم فشاری
۱۰۰۰-۲۰۰۰ آجاجاری، گچساران، آسماری و پایده	۳،۸۴	۶۹۱۸،۳	۴
	۳،۸۹	۷۷۶۲،۵	
	۳،۹۴۵	۸۸۱۰،۵	
۲۰۰۰-۳۰۰۰ آسماری، پایده، گورپی، ایلام و سروک	۳،۶۲	۴۱۶۸،۶۹۴	۴
	۳،۶۷۵	۴۷۳۱،۵۱۳	
	۳،۷	۵۰۱۱،۸۷۲	
۳۰۰۰-۴۰۰۰ کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج	۳،۸۴	۶۹۱۸،۳۱	۵
	۳،۹۱	۸۱۲۸،۳۰۵	
	۳،۹۵	۸۹۱۲،۵۰۹	
۴۰۰۰-۵۰۰۰ بخش خلیج گدوان، فهلیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو	۳،۹	۷۹۴۳،۲۸	۴
	۳،۹۶۵	۹۲۲۵،۷۱	
	۳،۹۸	۹۵۴۹،۹۳	
۵۰۰۰-۵۵۹۰ نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز	۳،۹۶۴	۹۲۰۴،۴۶۹	۴
	۳،۹۶۸	۹۲۸۹،۶۶۴	
	۳،۹۷۵	۹۴۴۰،۶۰۹	

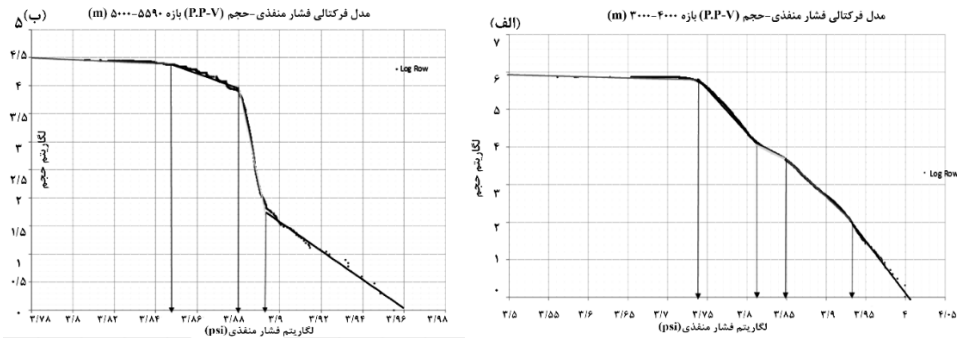
پام بین سازندهای آسماری تا سروک مشاهده می‌شود. در فاصله ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متری، ۵ رژیم فشار منفذی حاصل از ۴ نقطه شکست ۵۴۹۵،۴۱ تا ۸۵۱۱،۳۸ پام مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده سازندهای کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج سازند گدوان است. در فاصله ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری، ۷ رژیم فشار منفذی بین ۵۷۵۴،۴ تا ۹۵۴۹،۹۳ پام مشاهده می‌شود که شامل بخش خلیج، سازندهای فهلیان بالایی و پایینی، گرو و گوتنیا، نجمه و بخشی از سازند سرگلو است. در فاصله ۵۰۰۰ تا ۵۵۹۰ متری، ۴ رژیم فشار منفذی با نقاط شکست بین ۷۰۴۶،۹۳، ۷۵۸۵،۷۸ و ۷۸۳۴،۳ پام مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز در دوره ژوراسیک می‌باشند (شکل ۱۳ و جدول ۱۲).

۳-۲-۲- مدل فرکتالی مقدار-حجم فشار منفذی

پس از رسم نمودارهای فرکتالی مقدار-حجم حاصل از مکعب فشار منفذی برای فواصل ۱۰۰۰ متری در ۶ نمودار جداگانه، نتایج تعبیر و تفسیر تغییرات فشاری به همراه جدول و نمودارهای مربوطه به شرح ذیل ارائه شده است:

در فاصله سطح تا ۱۰۰۰ متری، ۷ رژیم فشاری بسیار پایین بین کمتر از ۷۸،۹ تا ۸۶،۷ پام در سازند آجاجاری و در ادامه تا ۲۰۰۰ متری، ۲ رژیم فشاری بین ۱۶،۶ و ۶۳،۱ پام در ادامه سازند آجاجاری و سازند گچساران و ۲ رژیم فشاری دیگر بین ۱۱۲۲ تا بیشتر از ۲۲۹۰،۹ پام مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده سازندهای آسماری و پایده باشد.

در فاصله ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری، ۳ رژیم فشار منفذی حاصل از دو نقطه شکست نمودار بین ۴۶۷۷،۳۵ و ۵۲۴۸،۰۸



شکل ۱۳: نمونه‌ای از مدل فرکتالی مقدار حجم فشار منفذی الف) فاصله ۳۰۰۰-۴۰۰۰ متری (سازندهای کژدمی، داریان، گدوان)، ب) فاصله ۵۵۹۰-۵۰۰۰ متری (سازندهای نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز).

جدول ۱۲: رژیم‌های فشار منفذی حاصل از نقاط شکست مدل‌های فرکتالی مقدار-حجم برای فواصل ۱۰۰۰ متری

تعداد رژیم فشاری	فشار مؤثر (PSI)	لگاریتم فشار مؤثر	بازه عمقی (متر) و سازند
۷	۷۸٫۹	۱٫۸۹۷	۰-۱۰۰۰ آجاجاری
	۸۰	۱٫۹۰۳	
	۸۱٫۱	۱٫۹۰۹	
	۸۳	۱٫۹۱۹	
	۸۳٫۹	۱٫۹۲۴	
۵	۸۶٫۷	۱٫۹۳۸	۱۰۰۰-۲۰۰۰ آجاجاری، گچساران، آسماری و پابده
	۱۶٫۶	۱٫۲	
	۶۳٫۱	۱٫۸	
۳	۱۱۲۲	۳٫۱	۲۰۰۰-۳۰۰۰ آسماری، پابده، گورپی، ایلام و سروک
	۲۲۹۰٫۹	۳٫۴	
	۴۶۷۷٫۳۵	۳٫۶۷	
۵	۵۲۴۸٫۰۸	۳٫۷۲	۳۰۰۰-۴۰۰۰ کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج
	۵۴۹۵٫۴۱	۳٫۷۴	
	۶۴۵۶٫۵۴	۳٫۸۱	
	۷۰۷۹٫۴۶	۳٫۸۵	
۷	۸۵۱۱٫۳۸	۳٫۹۳	۴۰۰۰-۵۰۰۰ بخش خلیج گدوان، فهلیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو
	۵۷۵۴٫۴۰	۳٫۷۶	
	۶۹۱۸٫۳۱	۳٫۸۴	
	۷۴۹۸٫۹۴	۳٫۸۷۵	
	۷۷۶۲٫۴۷	۳٫۸۹	
۴	۸۹۱۲٫۵۱	۳٫۹۵	۵۰۰۰-۵۵۹۰ نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز
	۹۵۴۹٫۹۳	۳٫۹۸	
	۷۰۴۶٫۹۳	۳٫۸۴۸	
	۷۵۸۵٫۷۸	۳٫۸۸	
	۷۸۳۴٫۳	۳٫۸۹۴	

نمودار جداگانه، نتایج تعبیر و تفسیر تغییرات فشاری به همراه جدول و دو نمونه از نمودارهای مربوطه به شرح ذیل ارائه شده است. در فاصله سطح تا ۱۰۰۰ متری، ۸ رژیم فشاری پایین بین کمتر از ۱۱۲٫۷ تا ۱۳۸٫۷ پام در سازند آجاجاری و در ادامه تا ۲۰۰۰ متری، ۲ رژیم فشاری بین ۱۸۲

۳-۲-۳- مدل فرکتالی مقدار-حجم فشار شکست سازند

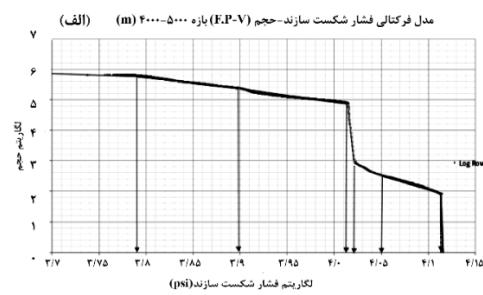
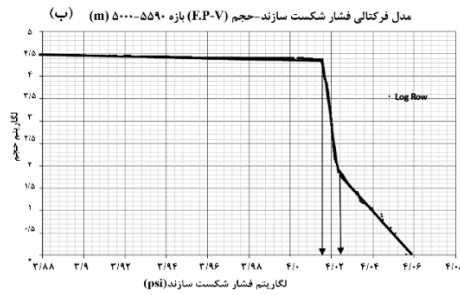
پس از رسم نمودارهای فرکتالی مقدار-حجم حاصل از مکعب فشار شکست سازند برای فواصل ۱۰۰۰ متری در ۶

پایینی، گرو و گوتنیا، نجمه و بخشی از سازند سرگلو است. در فاصله ۵۰۰۰ تا ۵۵۹۰ متری، ۳ رژیم فشار شکست با دو نقطه شکست بین ۱۰۳۷۵٫۳ و ۱۰۵۶۸٫۲ پام مربوط به سازندهای نجمه تا نیریز در دوره ژوراسیک می‌باشند. بر طبق مقایسه نقاط شکست رژیم‌های فشار منفذی و شکست سازند، در فواصل سطح تا ۳۰۰۰ متری، فشار شکست دارای یک رژیم بیشتر از فشار منفذی، در فاصله ۴۰۰۰-۵۰۰۰ متری تعداد رژیم‌ها برابر، در فاصله ۴۰۰۰-۳۰۰۰ دارای ۲ رژیم فشار شکست کمتر و نهایتاً در فاصله ۵۵۹۰-۵۰۰۰ متری دارای یک رژیم فشار شکست کمتر از فشار منفذی است (جدول ۱۳ و شکل ۱۴).

و ۲۵۱/۱ پام در ادامه سازند آجاجاری و سازند گچساران و ۳ رژیم فشاری دیگر بین ۱۳۴۹ تا بیشتر از ۲۴۵۷/۷ پام مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده سازندهای آسماری و پایده باشد. در فاصله ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متری، ۴ رژیم فشار شکست حاصل از سه نقطه شکست نمودار بین ۴۸۹۷/۸ و ۵۸۸۸/۴ پام بین سازندهای آسماری تا سروک مشاهده می‌شود. در فاصله ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متری، ۳ رژیم فشار شکست حاصل از ۲ نقطه شکست ۵۷۵۴/۴ و ۶۳۳۸۲/۶ پام در فاصله سازندهای کژدمی تا بخش خلیج سازند گدوان وجود دارد. در فاصله ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متری، ۷ رژیم فشار شکست سازند بین ۶۱۶۵/۹۵ تا ۱۲۸۸۲/۵ پام مشاهده می‌شود که شامل بخش خلیج، سازندهای فهلیان بالایی و

جدول ۱۳: رژیم‌های فشار شکست سازند حاصل از نقاط شکست مدل‌های فرکتالی مقدار-حجم برای فواصل ۱۰۰۰ متری

تعداد رژیم فشاری	فشار مؤثر (PSI)	لگاریتم فشار مؤثر	بازه عمقی (متر) و سازند
۸	۱۱۲٫۷	۲٫۰۵۲	۰-۱۰۰۰ آجاجاری
	۱۱۸٫۰	۲٫۰۷۲	
	۱۲۰٫۲	۲٫۰۸۰	
	۱۲۴٫۷	۲٫۰۹۶	
	۱۲۶٫۵	۲٫۱۰۲	
	۱۳۵٫۵	۲٫۱۳۲	
	۱۳۸٫۷	۲٫۱۴۲	
۶	۱۸۲	۲٫۲۶	۱۰۰۰-۲۰۰۰ آجاجاری، گچساران، آسماری و پایده
	۲۵۱٫۲	۲٫۴	
	۱۳۴۹	۳٫۱۳	
	۲۱۸۷٫۸	۳٫۳۴	
	۲۴۵۷٫۷	۳٫۳۹	
۴	۴۸۹۷٫۸	۳٫۶۹	۲۰۰۰-۳۰۰۰ آسماری، پایده، گورپی، ایلام و سروک
	۵۴۷۰٫۲	۳٫۷۳۸	
	۵۸۸۸٫۴	۳٫۷۷	
۳	۵۷۵۴٫۴	۳٫۷۶	۳۰۰۰-۴۰۰۰ کژدمی، داربان، گدوان و بخش خلیج
	۶۳۸۲٫۶۴	۳٫۸۰۵	
۷	۶۱۶۵٫۹۵	۳٫۷۹	۴۰۰۰-۵۰۰۰ بخش خلیج گدوان، فهلیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو
	۷۹۴۳٫۳	۳٫۹	
	۱۰۳۵۱٫۴	۴٫۰۱۵	
	۱۰۴۷۱٫۳	۴٫۰۲	
	۱۱۲۲۰٫۲	۴٫۰۵	
	۱۲۸۸۲٫۵	۴٫۱۱	
۳	۱۰۳۷۵٫۳	۴٫۰۱۶	۵۰۰۰-۵۵۹۰ نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز
	۱۰۵۶۸٫۲	۴٫۰۲۴	



شکل ۱۴: نمونه‌ای از مدل فرکتالی مقدار-حجم فشار شکست سازند (الف) فاصله ۴۰۰۰-۵۰۰۰ متری، (ب) فاصله ۵۵۹۰-۵۰۰۰ متر.

کمتر از ۵۴۹۵/۴ پام در اعماق ۳۰۰۰-۴۰۰۰ متری مربوط به سازندهای کژدمی تا بخش خلیج و کمترین آن به میزان ۰/۲۷ در بازه فشاری بین ۹۲۲۵/۷ تا ۹۵۴۹/۹ پام مربوط به سازندهای بخش خلیج تا سرگلو در اعماق ۴۰۰۰-۵۰۰۰ متری است.

- در بازه‌های سنگ‌آهک و مارل غالب، بیشترین تطبیق نهایی به میزان ۰/۵۷ در بازه فشاری بیشتر از ۸۹۱۲/۵ پام در اعماق مشابه ۴۰۰۰-۵۰۰۰ متری است.

- در بازه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی به میزان ۰/۸۴ در بازه فشاری کمتر از ۶۹۱۸/۳ پام در اعماق ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متری مربوط به سازندهای آجاجاری تا پابده است.

- نهایتاً در بازه‌های مارل و ماسه‌سنگ غالب بیشترین تطبیق نهایی به میزان ۰/۹۴ در بازه فشاری بیشتر از ۸۸۱۰/۵ پام در اعماق مشابه ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متری است.

بنابراین بیشترین میزان تطبیق نهایی کل بازه‌های زمین‌شناسی مربوط به مارل و ماسه‌سنگ در اعماق ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متری به میزان ۰/۹۴ است. جدول مقادیر خطا و تطبیق نهایی بازه‌های فشار مؤثر در جدول ۱۵ به همراه نمونه‌ای از ماتریس‌های لوگرشیو مربوطه در جدول ۱۴ ارائه شده است.

۳-۳- تطابق مدل‌های فرکتالی مقدار-حجم و مدل زمین‌شناسی با استفاده از ماتریس لوگرشیو

در این مرحله پس از تکمیل نمودارهای فرکتالی مقدار-حجم و تعیین نقاط شکست و تعداد داده‌های هر بازه به‌صورت مدل ریاضی، بر اساس تغییرات سازند و لیتولوژی غالب بازه‌های فوق (مدل زمین‌شناسی) نسبت به محاسبه ماتریس لوگرشیو^{۲۲} برای هر یک از مدل‌های فشار مؤثر و همچنین فشار منفذی جهت تعیین بالاترین تطابق و کمترین میزان خطا اقدام شد که نتایج در ادامه ارائه شده است. با توجه به تغییرات بسیار اندک لیتولوژی بازه ۱۰۰۰-۰ متری به‌صورت غالب مارل و ماسه‌سنگ از محاسبه ماتریس لوگرشیو برای بازه فوق صرف‌نظر شده است.

۳-۳-۱- تطابق مدل فرکتالی فشار مؤثر و مدل زمین‌شناسی با استفاده از ماتریس لوگرشیو

بر اساس تقسیم‌بندی رژیم‌های فشار مؤثر در فواصل ۱۰۰۰ تا ۵۵۹۰ متری به ۲۴ رژیم فشاری مختلف و تعیین مدل زمین‌شناسی غالب هر یک از رژیم‌ها (شامل ۱۵ بازه سنگ‌آهک خالص، ۲ بازه سنگ‌آهک و مارل، ۲ بازه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک و ۲ بازه مارل و ماسه‌سنگ)، ماتریس‌های لوگرشیو به‌صورت جداگانه محاسبه شده است.

- بر این اساس در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به میزان ۰/۷۸ در بازه فشاری

جدول ۱۴: ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی فشار مؤثر کمتر از ۵۴۹۵ پام و مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب فاصله ۳۰۰۰-۴۰۰۰ متری

		مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب			
		زون داخل		زون خارج	
مدل ریاضی فشار مؤثر کمتر از ۵۴۹۵/۴ پام	داخل زون	True Positive (A)	۱۴۹۱۷۳	False Positive (B)	۱۲۲۳
	زون خارج	False Negative (C)	۱۵۹۶۰۹	True Negative (D)	۴۱۱۳۴۲
		Type I Error: C/(A+C)	۰/۵۱۶۹	Type II Error: B/(B+D)	۰/۰۰۳۰
		Overall Accuracy: (A+D)/(A+B+C+D)		۰/۷۷۷۰	

جدول ۱۵: مقادیر خطا و تطبیق نهایی (OA) ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی فشار مؤثر و مدل زمین‌شناسی غالب

تطبیق نهایی (OA)	خطای نمونه‌برداری زمین‌شناسی (Error Type II)	خطای آنالیز و تحلیل ریاضی (Error Type I)	مدل ریاضی زمین‌شناسی غالب	مدل ریاضی فشار مؤثر (PSI)	تعداد رژیم فشاری	بازه عمقی (متر) و سازند
۰٫۸۴	۰٫۲۳	۰٫۰۰۷	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	کمتر از ۶۹۱۸٫۳	۴	۱۰۰۰-۲۰۰۰
۰٫۳۶	۰٫۴۴	۰٫۹۳	ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک	۶۹۱۸٫۳ تا ۷۷۶۲٫۵		آغاچاری، گچساران، آسماری و پایده
۰٫۸۵	۰٫۰۵	۰٫۶۸	مارل و ماسه‌سنگ	۷۷۶۲٫۵ تا ۸۸۱۰٫۵		
۰٫۹۴	۰٫۰۰۱	۰٫۳۷	مارل و ماسه‌سنگ	بیشتر از ۸۸۱۰٫۵		
۰٫۵۷	۰٫۲۴	۰٫۷۵	سنگ‌آهک	کمتر از ۴۱۶۸٫۷	۴	۲۰۰۰-۳۰۰۰
۰٫۳۸	۰٫۷۵	۰٫۴۱	سنگ‌آهک	۴۱۶۸٫۷ تا ۴۷۳۱٫۵		آسماری، پایده، گورپی، ایلام و سروک
۰٫۶۸	۰٫۰۰۱	۰٫۸۶	سنگ‌آهک	۴۷۳۱٫۵ تا ۵۰۱۱٫۹		
۰٫۶۳	۰٫۰۰	۰٫۹۹	سنگ‌آهک	بیشتر از ۵۰۱۱٫۹		
۰٫۷۸	۰٫۰۰۳	۰٫۵۲	سنگ‌آهک	کمتر از ۵۴۹۵٫۴	۵	۳۰۰۰-۴۰۰۰
۰٫۵۹	۰٫۳۵	۰٫۴۸	سنگ‌آهک	۵۴۹۵٫۴ تا ۶۹۱۸٫۳		کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج
۰٫۳۰	۰٫۴۸	۰٫۹۹۹۶	سنگ‌آهک	۶۹۱۸٫۳ تا ۸۱۲۸٫۳		
۰٫۵۰	۰٫۱۳	۰٫۹۴	سنگ‌آهک و مارل	۸۱۲۸٫۳ تا ۸۹۱۲٫۵		
۰٫۵۷	۰٫۰۰۲	۰٫۹۹۸	سنگ‌آهک و مارل	بیشتر از ۸۹۱۲٫۵	۴	۴۰۰۰-۵۰۰۰
۰٫۴۵	۰٫۱۵	۰٫۷۸	سنگ‌آهک	کمتر از ۷۹۴۳٫۳		بخش خلیج گدوان، فلهیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو
۰٫۶۴	۰٫۵۴	۰٫۲۵	سنگ‌آهک	۷۹۴۳٫۳ تا ۹۲۲۵٫۷		
۰٫۲۸	۰٫۳۰	۰٫۹۷	سنگ‌آهک	۹۲۲۵٫۷ تا ۹۵۴۹٫۹		
۰٫۳۸	۰٫۰۰۳	۰٫۹۹۶	سنگ‌آهک	بیشتر از ۹۵۴۹٫۹	۴	۵۰۰۰-۵۵۹۰
۰٫۶۶	۰٫۲۱	۰٫۷۳	سنگ‌آهک	کمتر از ۹۲۰۴٫۵		نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز
۰٫۴۸	۰٫۵۶	۰٫۴۰	سنگ‌آهک	۹۲۰۴٫۵ تا ۹۲۸۹٫۷		
۰٫۶۱	۰٫۲۳	۰٫۸۹	سنگ‌آهک	۹۲۸۹٫۷ تا ۹۴۴۰٫۶		
۰٫۷۵	۰٫۰۰۱	۰٫۹۸	سنگ‌آهک	بیشتر از ۹۴۴۰٫۶		

۳-۳-۲- تطابق مدل فرکتالی فشار منفذی و مدل زمین‌شناسی با استفاده از ماتریس لوگرشیو

بر اساس تقسیم‌بندی رژیم‌های فشار منفذی در فواصل ۱۰۰۰ تا ۵۵۹۰ متری به ۲۴ رژیم فشاری مختلف و تعیین مدل زمین‌شناسی غالب هر یک از رژیم‌ها (شامل ۱۷ بازه سنگ‌آهک خالص، ۲ بازه سنگ‌آهک و مارل و ۵ بازه ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک)، ماتریس‌های لوگرشیو به صورت جداگانه محاسبه شده است.

بر این اساس در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به میزان ۰٫۷۴ در بازه فشاری کمتر از ۵۲۴۸٫۱ پام در اعماق ۲۰۰۰-۳۰۰۰ متری مربوط به سازندهای آسماری تا سروک و کمترین آن به میزان ۰٫۳۱ در بازه فشاری بین ۶۹۱۸٫۳ تا ۷۴۹۸٫۸ پام مربوط به سازندهای بخش خلیج تا سرگلو در اعماق ۵۰۰۰-۴۰۰۰ متری است.

در بازه‌های سنگ‌آهک و مارل غالب، بیشترین تطبیق نهایی به میزان ۰٫۵۷ در بازه فشاری ۷۰۷۹٫۵ تا بیشتر از ۸۵۱۱٫۴ پام مربوط به سازندهای کژدمی تا بخش خلیج در اعماق ۳۰۰۰-۴۰۰۰ متری است.

در بازه‌های ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی به میزان ۰٫۷۹ در بازه فشاری ۱۱۲۲ تا ۲۲۹۰٫۹ پام در اعماق ۱۰۰۰-۲۰۰۰ متری مربوط به سازندهای آغاچاری تا پایده است.

بنابراین بیشترین میزان تطبیق نهایی کل بازه‌های زمین‌شناسی مربوط به ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک در اعماق ۲۰۰۰-۳۰۰۰ متری به میزان ۰٫۷۹ است. جدول مقادیر خطا و تطبیق نهایی بازه‌های فشار منفذی حاصل از ماتریس‌های لوگرشیو در جدول ۱۷ به همراه نمونه‌ای از محاسبات مربوطه در جدول ۱۶ ارائه شده است.

جدول ۱۶: ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی فشار منفذی بیشتر از ۷۸۳۴ پام و مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب فاصله ۵۵۹۰-۵۰۰۰ متری

		مدل زمین‌شناسی سنگ‌آهک غالب			
		داخل زون		خارج زون	
مدل ریاضی فشار منفذی بیشتر از ۷۸۳۴ پام	داخل زون	True Positive (A)	۶	False Positive (B)	۵۶
	خارج زون	False Negative (C)	۷۰۸۳	True Negative (D)	۲۱۱۸۷
		Type I Error: C/(A+C)	۰٫۹۹۹۲	Type II Error: B/(B+D)	۰٫۰۰۲۶
		Overall Accuracy: (A+D)/(A+B+C+D)			۰٫۷۴۸

جدول ۱۷: مقادیر خطا و تطبیق نهایی (OA) ماتریس لوگرشیو مدل ریاضی فشار منفذی و مدل زمین‌شناسی غالب

تطبیق نهایی (OA)	خطای نمونه‌برداری زمین‌شناسی (Error Type II)	خطای آنالیز و تحلیل ریاضی (Error Type I)	مدل ریاضی زمین‌شناسی غالب	مدل ریاضی فشار منفذی (PSI)	تعداد رژیم فشاری	بازه عمقی (متر) و سازند
۰٫۵۸	۰٫۰۹	۰٫۸۷	ماسه سنگ و سنگ‌آهک	کمتر از ۱۶٫۶	۵	آغاجاری، گچساران، آسماری و پابده
۰٫۱۰	۰٫۸۹	۰٫۹۲	ماسه سنگ و سنگ‌آهک	۱۶٫۶ تا ۶۳٫۱		
۰٫۶۹	۰٫۰۲	۰٫۷۲	ماسه سنگ و سنگ‌آهک	۶۳٫۱ تا ۱۱۲۲		
۰٫۷۹	۰٫۰۰	۰٫۴۹	ماسه سنگ و سنگ‌آهک	۱۱۲۲ تا ۲۲۹۰٫۹		
۰٫۵۸	۰٫۰۰	۰٫۹۹۷	ماسه سنگ و سنگ‌آهک	بیشتر از ۲۲۹۰٫۹		
۰٫۶۳	۰٫۰۹	۰٫۸۴	سنگ‌آهک	کمتر از ۴۶۷۷٫۳	۳	آسماری، پابده، گورپی، ایلام و سروک
۰٫۳۲	۰٫۸۷	۰٫۱۰	سنگ‌آهک	۴۶۷۷٫۳ تا ۵۲۴۸٫۱		
۰٫۷۴	۰٫۰۳	۰٫۶۵	سنگ‌آهک	بیشتر از ۵۲۴۸٫۱		
۰٫۶۱	۰٫۲۰	۰٫۶۵	سنگ‌آهک	کمتر از ۵۴۹۵٫۴	۵	کژدمی، داریان، گدوان و بخش خلیج
۰٫۴۱	۰٫۷۷	۰٫۳۵	سنگ‌آهک	۵۴۹۵٫۴ تا ۶۴۵۶٫۵		
۰٫۵۶	۰٫۰۲	۰٫۹۹۷	سنگ‌آهک	۶۴۵۶٫۵ تا ۷۰۷۹٫۵		
۰٫۵۷	۰٫۰۱	۰٫۹۹۵	سنگ‌آهک و مارل	۷۰۷۹٫۵ تا ۸۵۱۱٫۴		
۰٫۵۷	۰٫۰۰۰۲	۰٫۹۹۹۹	سنگ‌آهک و مارل	بیشتر از ۸۵۱۱٫۴		
۰٫۴۴	۰٫۱۷	۰٫۸۰	سنگ‌آهک	کمتر از ۵۷۵۴٫۴	۷	بخش خلیج، گدوان، فهلیان، گرو، گوتنیا، نجمه و سرگلو
۰٫۶۵	۰٫۴۷	۰٫۲۸	سنگ‌آهک	۵۷۵۴٫۴ تا ۶۹۱۸٫۳		
۰٫۳۱	۰٫۲۸	۰٫۹۳	سنگ‌آهک	۶۹۱۸٫۳ تا ۷۴۹۸٫۹		
۰٫۳۵	۰٫۰۸	۰٫۹۹	سنگ‌آهک	۷۴۹۸٫۹ تا ۷۷۶۲٫۵		
۰٫۳۸	۰٫۰۰۲	۰٫۹۹۲	سنگ‌آهک	۷۷۶۲٫۵ تا ۸۹۱۲٫۵		
۰٫۳۷	۰٫۰۰۰۰۸	۰٫۹۹۹۵۸	سنگ‌آهک	۸۹۱۲٫۵ تا ۹۵۴۹٫۳		
۰٫۳۷	۰٫۰۰	۰٫۹۹۹۹۹	سنگ‌آهک	بیشتر از ۹۵۴۹٫۳		
۰٫۶۳	۰٫۲۰	۰٫۸۹	سنگ‌آهک	کمتر از ۷۰۴۶٫۹	۴	نجمه، سرگلو، علن، موس، نیریز
۰٫۵۶	۰٫۴۹	۰٫۳۰	سنگ‌آهک	۷۰۴۶٫۹ تا ۷۵۸۵٫۸		
۰٫۵۷	۰٫۳۱	۰٫۸۱	سنگ‌آهک	۷۵۸۵٫۸ تا ۷۸۳۴٫۳		
۰٫۷۵	۰٫۰۰۳	۰٫۹۹۹	سنگ‌آهک	بیشتر از ۷۸۳۴٫۳		

۴- نتیجه‌گیری

میلیون سطر داده (هر ۱۵ سانتی‌متر تغییر عمق، یک سلول مکعب داده)، داده‌ها بر اساس عمق مرتب‌شده و به ازای هر ۱۰۰۰ متر در سازندهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.

۸- بر اساس ماتریس لوگرشیو در مدل ریاضی مکعب فشار مؤثر و مدل زمین‌شناسی در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به میزان ۰/۷۸ در بازه فشاری کمتر از ۵۴۹۵/۴ پام در اعماق ۴۰۰۰-۳۰۰۰ متری مربوط به سازندهای کژدمی تا بخش خلیج است همچنین بیشترین میزان تطبیق نهایی کل بازه‌های زمین‌شناسی مربوط به مارل و ماسه‌سنگ در اعماق ۲۰۰۰-۱۰۰۰ متری به میزان ۰/۹۴ است.

۹- بر اساس ماتریس لوگرشیو در مدل ریاضی مکعب فشار منفذی و مدل زمین‌شناسی در بازه‌های سنگ‌آهک غالب، بیشترین تطبیق نهایی (OA) به میزان ۰/۷۴ در بازه فشاری کمتر از ۵۲۴۸/۱ پام در اعماق ۳۰۰۰-۲۰۰۰ متری مربوط به سازندهای آسماری تا سروک، همچنین بیشترین میزان تطبیق نهایی کل بازه‌های زمین‌شناسی مربوط به ماسه‌سنگ و سنگ‌آهک در اعماق ۳۰۰۰-۲۰۰۰ متری به میزان ۰/۷۹ است.

۵- پیشنهاد مطالعات پایداری چاه

به دلیل در اختیار نداشتن اطلاعات مغزه‌های حفاری برای انجام مطالعات ژئومکانیکی در میدان آزادگان جنوبی، مطالعات پایداری دیواره چاه^{۲۳} برای چاه‌های جدید پیشنهاد می‌شود؛ بنابراین تجزیه و تحلیل پایداری چاه‌های قائم با استفاده از مغزه‌های لایه‌های مخزن سازندهای نفتی باید مورد بررسی قرار گیرد. محدوده ایمن وزن سیال حفاری برای حفظ پایداری چاه را می‌توان با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D و مدل حجم محدود^{۲۴} ایجاد شده با استفاده از پارامترهای ژئومکانیکی لایه‌های حفاری شده تعیین و شبیه‌سازی کرد. تعیین شرایط پلاستیک نیز می‌تواند برای تعیین پنجره ایمن وزن گل^{۲۵} (SMWW) در لایه‌های خاص استفاده شود. همچنین اثرات پارامترهای مقاومت سنگ، تنش‌های عمده اطراف چاه و فشار منفذی روی پنجره ایمن وزن گل را می‌توان برای چاه‌های جدید بررسی کرد.

۱- مکعب فشار مؤثر ساخته‌شده با شبکه عصبی بر اساس مدل اولیه شبیه‌سازی گوسی با استفاده از ۳۰ مرحله تکرار دارای کمترین مقادیر خطای نسبی نسبت به دو روش‌های باورز و ریشه میانگین مربعات است، لذا صحت مکعب فشار منفذی حاصل از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از کوکریجینگ با نگار سرعت فشاری (کوکریجینگ شده با امیدانس صوتی حاصل از وارون سازی لرزه‌ای) مورد تأیید و داده‌های حاصل از این روش برای گرادیان نهایی فشار منفذی در نظر گرفته شده‌اند.

۲- بیشترین میزان همبستگی بین مکعب نهایی فشار مؤثر و مکعب سرعت مربوط به سازندهای فلهلیان پایینی با ۰/۸۶ و ایلام با ۰/۷۱ است که نشان‌دهنده صحت داده‌های مدل‌سازی شده با داده‌های اصلی است.

۳- بر اساس مکعب‌های فشاری مدل‌سازی شده بیشترین تغییرات تنش روباره در محدوده ۱۶-۱۰ هزار پام، حداکثر فشار منفذی به میزان ۱۰۰۰۰ پام در سازندهای گدوان تا فلهلیان بالایی و حداکثر فشار شکست سازند نیز به میزان ۱۳۰۰۰ پام در سازندهای فلهلیان پایینی تا گوتنیا به دست آمده است.

۴- بر اساس مدل‌های نهایی فشاری، افزایش فشارهای منفذی و شکست سازند با افزایش عمق کاملاً محسوس است به جز سازند فلهلیان پایینی که با افزایش عمق شاهد کاهش فشار در این سازند هستیم.

۵- با توجه به تغییرات اندک بین حداقل و حداکثر مقادیر فشار منفذی و شکست سازند در سازندهایی مانند کژدمی و گدوان به میزان کمتر از ۲۰۰ پام، جهت طراحی پنجره گل حفاری مقادیر بازه اطمینان جهت جلوگیری از جریان چاه و هرزروی سازند حدود ۵۰ پام پیشنهاد شده است.

۶- بر اساس نتایج اولیه مدل فرکتالی مقدار-تعداد، داده‌های فشار مؤثر دارای سه نقطه شکست در فشارهای ۴۶۷۷، ۴۷۸۶ و ۸۵۱۱ پام است که می‌تواند نشان‌دهنده چهار رژیم فشاری اصلی یا چهار سازند با فشارهای متفاوت در فاصله اعماق برداشتی بین سازندهای ایلام تا فلهلیان باشد.

۷- پس از تکمیل مدل‌سازی داده‌های فشاری، سرعت و سایر داده‌های مکعب نهایی میدان آزادگان جنوبی، با توجه به حجم بالای تعداد سطرهای داده‌ها به میزان حدود ۱/۵

تقدیر و تشکر

پژوهش حاضر برگرفته از رساله دکتری مهندسی معدن - اکتشاف مواد معدنی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب با طرح میزبانی پژوهشگاه صنعت نفت است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از کارشناسان محترم پژوهشگاه صنعت نفت و مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران که ما را در انجام و ارتقای کیفی این پژوهش یاری دادند، ابراز کنند.

مراجع

- (2023b). 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(6): 1391-1418. <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01613-6>.
- [9] Kianoush, P., Afzal, P., Mohammadi, G., Keshavarz Faraj Khah, N., and Hosseini, S.A. (2023d). Application of Geostatistical and Velocity-Volume Fractal Models to Determine Interval Velocity and Formation Pressures in an Oilfield of SW Iran. *Journal of Petroleum Research*. 33(1402-1): 146-170.
- [10] Amiri Bakhtiar, M.S., Zargar, G., Riahi, M.A., and Ansari, H.R. (2017). Seismic inversion by spectral simulation in one of the oil fields in southwestern Iran, the third oil exploration geophysics seminar. presented at the Exploration Directorate of the National Iranian Oil Company ,
- [11] Haris, A., Sitorus, R., and Riyanto, A. (2017). Pore pressure prediction using probabilistic neural network: case study of South Sumatra Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 62: 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/62/1/012021>.
- [12] Moraseli, S., Hashemizadeh, A., and Navaie, F. (2022). Assessing the challenges of production from unconventional gas reservoirs from a geomechanical point of view. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. <https://doi.org/10.22034/ann.2022.2857>.
- [13] Hosseini, A., Saberi, M.H., and Zarenejad, B. (2020). Investigation of the Possibility of Hydrocarbon Resources in the Khouriyān Region of Southern Semnan by Using Geochemical Methods. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. 10(23): 17-29.
- [14] Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., and Afzal, P. (2023a). Inversion of seismic data to modeling the Interval Velocity in an Oilfield of SW Iran. *Results in Geophysical Sciences*: 100051. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2023.100051>.
- [15] Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., Kianoush, P., Arjmand, Y., Ebrahimabadi, A., and Jamshidi, E. (2023b). Tilt angle filter effect on noise cancelation and structural edges detection in hydrocarbon sources in a gravitational potential field. *Results in Geophysical Sciences*. 14: 100061. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2023.100061>.
- [16] Aghebati, R. (2008). Introduction of a field: Azadegan field development plan. *Scientific*
- [1] Adim, A., Riahi, M., and Bagheri, M. (2018). Estimation of pore pressure by Eaton and Bowers methods using seismic and well survey data. *Journal of Applied Geophysical Research*. 4(2): 275-267 (in Persian).
- [2] Maddahi, A., Ghazi Nezhad, S., Ismailpour, S., and 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) .
- [3] Lee, M.W., Hutchinson, D.R., Dillon, W.P., Miller, J.J., Agena, W.F., and Swift, B.A. (1993). Method of estimating the amount of in situ gas hydrates in deep marine sediments. *Marine and Petroleum Geology*. 10(5): 493-506. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(93\)90050-3](https://doi.org/10.1016/0264-8172(93)90050-3).
- [4] Gardner, G.H.F., Gardner, L.W., and Gregory, A.R. (1974). FORMATION VELOCITY AND DENSITY—THE DIAGNOSTIC BASICS FOR STRATIGRAPHIC TRAPS. *GEOPHYSICS*. 39(6): 770-780. <https://doi.org/10.1190/1.1440465>.
- [5] Morgan, P. (1999). Azadegan Field Geophysical Interpretation, ConocoPhillips UK LTD: England.
- [6] Abdollahie Fard, I., Braathen, A., Mokhtari, M., and Alavi, A. (2006). Structural models for the South Khuzestan area based on reflection seismic data, Shahid Beheshti University Tehran.
- [7] Zoback, M.D., Barton, C.A., Brudy, M., Castillo, D.A., Finkbeiner, T., Grollmund, B.R., Moos, D.B. Peska, P., Ward, C.D., and Wiprut, D.J. (2003). Determination of stress orientation and magnitude in deep wells. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 40(7): 1049-1076 <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2003.07.001>.
- [8] Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., and Afzal, P.

- 12(1): 2-20. <https://doi.org/10.22078/jpst.2022.4845.1809>.
- [25] Shakiba, S., Asghari, O., and Keshavarz Faraj Khah, N. (2018). A combined approach based on MAF analysis and AHP method to fault detection mapping: A case study from a gas field, southwest of Iran. *Journal of Applied Geophysics*. 148: 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.11.003>.
- [26] Fatahi, H., Askari, M., and 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) .
- [27] Bowers, G.L. (1995). Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction. *SPE Drilling & Completion*. 10(02): 89-95. <https://doi.org/10.2118/27488-PA>.
- [28] Bowers, G.L. (2002). Detecting high overpressure. *The leading edge*. 21(2): 174-1 .
- [29] Liu, J., Chen, P., Xu, K., Yang, H., Liu, H., and Liu, Y. (2022). Fracture stratigraphy and mechanical stratigraphy in sandstone: A multiscale quantitative analysis. *Marine and Petroleum Geology*. 145: 105891. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2022.105891>.
- [30] Radwan, A.E. (2020). Wellbore stability analysis and pore pressure study in Badri field using limited data, Gulf of Suez, Egypt. *AAPG/datapages search and discovery Article*. 20476 .
- [31] Zhang, Z., Sun, B., Wang, Z., Pan, S., Lou, W., and Sun, D. (2022). Formation Pressure Inversion Method Based on Multisource Information. *SPE Journal*. 27(02): 1287-1303. <https://doi.org/10.2118/209206-pa>.
- [32] Aryafar, A., Doulati Ardejani, F., Mahvi, M.R., and Kianoush, P. (2007). Hydrochemical studies of Sangan Iron mine aquifer to determine water quality using water samples taken during pumping tests, 26th Earth Science Conference, Tehran, (In Persian) <https://civilica.com/doc/40310>.
- [33] Liguó, Z., Zhu, T., Hao, T., Zhang, X., Wang, X., and Zhang, L. (2020). Prediction method of formation pressure for the adjustment well in the reservoir with fault. *Journal of Physics: Conference Series*. 1707: 012012. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1707/1/012012>.
- [34] Mahvi, M.R., and Kianoush, P. (2007). Presenting the drainage model of attacking water into Propagative Journal of Oil & Gas EXPLORATION & PRODUCTOIN. 52: 6-8 (in Persian) .
- [17] Poorsiami, H. (2013). Modeling the pore pressure of a hydrocarbon reservoir in southwestern Iran using well-logging data. *Journal of Petroleum Research*. 23: 86-72 (in Persian) .
- [18] Amirzadeh, M., Kamali, M.R., and 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): 20-29 (in Persian) .
- [19] Kianoush, P., Raveyeh, H., Keshavarz Faraj Khah, N., and Sokooti, M.R. (2021). Modeling, interpreting and analyzing formation pressures by Geostatistical and intelligence methods using seismic and well logging data to optimize exploration drilling operations. *Scientific Journal of Oil & Gas Exploration & Production*. 1399(185): 78-92 (In Persian). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.25381652.1399.1399.185.10.6>.
- [20] Kiani, A., Saberi, M.H., Zare Nejad, B., Asadi Mehmandosti, E. and Rahmani, N. (2021). Reservoir Zonation Based on Petrographic and Petrophysical Data (Case Study: Upper Part of Sarvak Formation in an Oilfield in Abadan Plain, SW Iran). *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*. 11(28): 51-69. <https://doi.org/10.22034/anm.2021.2130>.
- [21] Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., Kianoush, P., Afzal, P., Shakiba, S., and Jamshidi, E. (2023a). Boundaries Determination in Potential Field Anomaly Utilizing Analytical Signal Filtering and its Vertical Derivative in Qeshm Island SE Iran. *Results in Geophysical Sciences*. 14: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2023.100053>.
- [22] Castagna J. P., B.M.L.E.R.L. (1985). Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *GEOPHYSICS*. 50(4): 571-581 .
- [23] Castagna, J.P., Batzle, M.L., and 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*: 135-171 .
- [24] Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., and Afzal, P. (2022b). 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*.

- [43] Mahdizadeh, M., Afzal, P., Eftekhari, M., and Ahangari, K. (2022). Geomechanical zonation using multivariate fractal modeling in Chadormalu iron mine, Central Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 81(1): 59. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02558-y>.
- [44] Mirzaei, M., Adib, A., Afzal, P., Rahemi, E., and Mohammadi, G. (2022). Separation of geological ore and gangues zones based on multivariate fractal modeling in Jalal Abad iron ore deposit, Central Iran. *Advanced Applied Geology*. 12(3): 573-588. <https://doi.org/10.22055/aag.2022.39754.2272>.
- [45] Yasrebi, A.B., Hezarkhani, A., and 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.
- [46] Mandelbrot, B.B. (1983). *The Fractal Geometry of Nature*. Henry Holt and Company. 468, <https://books.google.com/books?id=0R2LkE3N7-oC>
- [47] Mandelbrot, B.B. (1985). *Self-Affine Fractals and Fractal Dimension*. *Physica Scripta*. 32(4): 257. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/32/4/001>
- [48] Agterberg, F. (1993). Fractal modeling of mineral deposits. in *Proceedings 24th APCOM Symposium, 1993*. Canadian Inst. Mining, Metallurgy, and Petroleum Engineers ,
- [49] Afzal, P., Fadakar Alghalandis, Y., Khakzad, A., Moarefvand, P., and Omran, R. N. (2011). Delineation of mineralization zones in porphyry Cu deposits by fractal concentration-volume modeling. *Journal of Geochemical Exploration*. 108(3): 220-232. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.03.005>.
- [50] Afzal, P., Yusefi, M., Mirzaie, M., Ghadiri-Sufi, E., Ghasemzadeh, S., and Daneshvar Saein, L. (2019). Delineation of podiform-type chromite mineralization using geochemical mineralization prospectivity index and staged factor analysis in Balvard area (SE Iran). *Journal of Mining and Environment*. 10(3): 705-715.
- [51] Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., Kianoush, P., Afzal, P., Ebrahimabadi, A. and Shirinabadi, R. (2023c). Integration of fractal modeling and correspondence analysis reconnaissance for geochemically high-potential promising areas, NE Iran. *Results in Geochemistry*. 11: 100026.
- [52] Carranza, E.J.M. (2011). Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-
Chadormalu open pit mine in order to prevent of water attack and increase the safety factor of mine, 7th congress on safety, health and environment in mines and related industries. Sarcheshmeh Copper Complex, Sarcheshmeh, Iran, pp. 15-31 (In Persian). <https://civilica.com/doc/26254> .
- [35] Darvishpour, A., Cheraghi Seifabad, M., Wood, D.A. and Ghorbani, H. (2019). Wellbore stability analysis to determine the safe mud weight window for sandstone layers. *Petroleum Exploration and Development*. 46(5): 1031-1038. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(19\)60260-0](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(19)60260-0).
- [36] Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., and Afzal, P. (2023c). ANN-based estimation of pore pressure of hydrocarbon reservoirs—a case study. *Arabian Journal of Geosciences*. 16(5): 302.
- [37] Kelkar, M. and Perez, G. (2002). Applied geostatistics for reservoir characterization. *Society of Petroleum Engineers*. 264 <https://doi.org/10.2118/9781555630959>.
- [38] Lantuéjoul, C. (2001). *Geostatistical simulation: models and algorithms*. Springer Science & Business Media. 1139 <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04808-5>
- [39] Soltani, F., Afzal, P., and 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. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.007>.
- [40] Kianoush, P., Mohammadi, G., Hosseini, S.A., Keshavarz Faraj Khah, N., and Afzal, P. (2022a). Compressional and Shear Interval Velocity Modeling to Determine Formation Pressures in an Oilfield of SW Iran. *Journal of Mining and Environment*. 13(3): 851-873. <https://doi.org/10.22044/jme.2022.12048.2201> .
- [41] Armstrong, M., Galli, A., Beucher, H., Loc'h, G., Renard, D., Doligez, B., Eschard, R. and Geffroy, F. (2011). *Plurigaussian simulations in geosciences*. Springer Berlin, Heidelberg. Springer Science & Business Media <https://doi.org/10.1007/978-3-662-12718-6>.
- [42] Kianersi, A., Adib, A. and Afzal, P. (2021). Detection of Effective Porosity and Permeability Zoning in an Iranian Oil Field Using Fractal Modeling. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 55(1): 49-58. <https://doi.org/10.22059/ijmge.2019.278652.594795>.

- [59] Terzaghi, K., Peck, R.B. and Mesri, G. (1996). Soil mechanics in engineering practice. 3rd Edition ed. New York: John Wiley & Sons.
- [60] Mehrkhani, F., Ebrahimabadi, A., and Alaei, M.R. (2019). Wellbore Strengthening Analysis in Single and Multi-Fracture Models Using Finite Element and Analytical Methods, Case Study: South Pars Gas Field. in 53rd U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium .
- [61] Wang, Q., Ji, S., Sun, S., and Marcotte, D. (2009). Correlations between compressional and shear wave velocities and corresponding Poisson's ratios for some common rocks and sulfide ores. *Tectonophysics*. 469(1): 61-72.
- [62] Aslannezhad, M., Khaksar manshad, A., and Jalalifar, H. (2016). Determination of a safe mud window and analysis of wellbore stability to minimize drilling challenges and non-productive time. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 6(3): 493-503. <https://doi.org/10.1007/s13202-015-0198-2>.
- [63] Le, K., and Rasouli, V. (2012). Determination of safe mud weight windows for drilling deviated wellbores: a case study in the North Perth Basin. presented at the PETROLEUM 2012 <https://doi.org/10.2495/PMR120081>.
- [64] Li, Q., Wang, F., Forson, K., Zhang, C., Zhang, J., Chen, J., Xu, N., and Wang, Y. (2022). Affecting analysis of the rheological characteristic and reservoir damage of CO₂ fracturing fluid in low permeability shale reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*. 29(25): 37815-37826. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18169-9>.
- [65] Lee, H., Jang, Y., Kwon, S. Park, M. H., and Mitra, G. (2018). The role of mechanical stratigraphy in the lateral variations of thrust development along the central Alberta Foothills, Canada. *Geoscience Frontiers*. 9(5): 1451-1464. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.03.006>.
- transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*. 110(2): 167-185. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.007>.
- [53] Nazarpour, A., Paydar, G.R., and Carranza, E.J.M. (2016). Stepwise regression for recognition of geochemical anomalies: Case study in Takab area, NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration*. 168: 150-162. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.07.003>.
- [54] Anari, R. and Ebrahimabadi, A. (2018). An Approach to Select the Optimum Rock Failure Criterion for Determining a Safe Mud Window through Wellbore Stability Analysis. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 15: 127-140. <https://doi.org/10.3233/AJW-180025>.
- [55] Nazarisaram, M. and Ebrahimabadi, A. (2022). Geomechanical design of Shadegan oilfield in order to modeling and designing ERD wells in Bangestan formations. *Journal of Petroleum Geomechanics*. 5(1): 29-45.
- [56] Eaton, B.A. (1969). Fracture Gradient Prediction and Its Application in Oilfield Operations. *Journal of Petroleum Technology*. 21(10): 1353-1360. <https://doi.org/10.2118/2163-pa>.
- [57] Kianoush, P. (2023). Formation Pressure Modeling by Integration of Seismic Data and Well Information to Design Drilling Fluid. Case Study: Southern Azadegan Field. Ph.D. Dissertation, Islamic Azad University, South Tehran Branch. 325. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11042.20169>
- [58] Du, Y., Chen, J. Cui, Y., Xin, J., Wang, J., Li, Y. Z. and Fu, X. (2016). Genetic mechanism and development of the unsteady Sarvak play of the Azadegan oil field, southwest of Iran. *Petroleum Science*. 13(1): 34-51. <https://doi.org/10.1007/s12182-016-0077-6>.

¹⁴ Amoco¹⁵ Vertical Seismic Profiling (VSP)¹⁶ Inverse Distance Weighted (IDW)¹⁷ Principal Components Analysis (PCA)¹⁸ Feed Forward-Back Propagation Neural Network (FFBPNN)¹⁹ Levenberg-Marquard (L.M)²⁰ Poisson's Ratio (ν)²¹ safety margin²² Logratio²³ Wellbore stability²⁴ Finite Volume²⁵ Safe mud weight window (SMWW)¹ Castagna² Bowers³ Modular Dynamic Tester (MDT)/ Repeat Formation Test (RFT)/Drill Stem Test (DST)⁴ Terzaghi⁵ Sequential Gaussian Simulation (SGS)⁶ Inverse Distance Weighted⁷ Kriging Linear Unbiased Estimator⁸ Co-Kriging⁹ logratio¹⁰ Time Domain¹¹ Post-Stack¹² Over Burden (O.B)¹³ Gardner