

شبیه‌سازی زمین‌آماری ریسک ناپایداری چاه با مدل‌سازی ژئومکانیکی مقید به توزیع رخساره‌های سنگی در میدان نوروز

سجاد کاظم شیرودی، محمد غفوری*، غلامرضا لشکری‌پور و ناصر حافظی مقدس
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۰/۲۷

چکیده

ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی سنگ‌ها اغلب به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، از نظر درجه ناهمگنی سنگ ناشی از تغییرات رخساره‌های سنگی و خواص ساختاری سازندها در گستره مخزن، تغییر می‌کنند. تحلیل آماری راه حلی مناسب است تا با در نظر گرفتن بازه عدم قطعیت خواص مکانیکی سنگ، تحلیل ریسک انجام شود. اما این روش موقعیت مکانی و فضایی داده‌ها را نسبت به هم در گستره مخزن در نظر نمی‌گیرد. برای حل این چالش، شبیه‌سازی زمین‌آماری احتمال‌گرا مقید به توزیع فضایی رخساره‌های سنگی و هندسه ساختمان راه حلی مناسب را ارائه می‌دهد. نظر به پراکنش رابطه سرعت موج فشارشی و موج برشی ناشی از تنوع رخساره‌های سنگی، مدل‌سازی سرعت موج برشی با روش آمار دو متغیره مشروط به مدل سه‌بعدی رخساره‌ها به کمک نشانگرهای لرزه‌ای امیدانص صوتی و تخلخل لرزه‌ای انجام شد. بر این اساس دیگر ویژگی‌های مکانیکی سنگ در غالب تحقق‌های چندگانه به دست آمدند و برای تحلیل ریسک، فشار شکست سنگ و شاخص ریسک، پس از محاسبه تنش‌های اصلی، به کمک معیار شکست مور-کلمب محاسبه شدند. این خواص به صورت سه‌بعدی برای هر رخساره و جداگانه برای تمام شبکه‌های ساختمان میدان مدل شدند. برای بررسی اثر توزیع رخساره‌های آواری و رخساره‌های کربناته بر ریسک ناپایداری، مدل‌سازی به ترتیب در سازندهای کزدمی و داریان-گدوان با متوسط عمق ۲۵۰۰ m انجام شد. نتایج به دست آمده نشانگر ریسک بالای ناپایداری در رخساره‌های سنگی شیلی و آرژیلی و ریسک کم‌تر در رخساره‌های کربناته و ماسه‌ای اند که به آن معنی است که رخساره‌های سنگی تا حدودی ریسک ناپایداری را کنترل می‌کنند.

کلمات کلیدی: مدل‌سازی زمین‌آماری، ریسک ناپایداری چاه، رخساره‌های سنگی، سرعت موج برشی

مقدمه

و ویژگی‌های ساختاری میدان موردنظر انجام می‌شود [۱۴ و ۱۸]. روشی مبتنی بر آمار با تکنیک شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای دستیابی به مقادیر عدم قطعیت متغیرها نیز بنا شد تا مقدار فشار سیال حفاری به صورت تابع توزیع استخراج شود که با انجام تحلیل حساسیت‌سنجی روی ورودی‌ها مشخص شد که تنش افقی حداکثر، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بیش‌ترین تاثیر را بر پایداری سنگ دارند [۱]. تکنیک وارون‌سازی لرزه‌ای الاستیک^۲ برای استخراج ویژگی‌های فیزیکی مکانیکی سنگ نیز قابل اجراست [۲۱]. برپایه این روش خواص فیزیکی سنگ شامل سرعت برشی و فشارشی موج و چگالی سنگ به صورت مکعب لرزه‌ای به دست می‌آیند و بر آن اساس نیز خواص مکانیکی سنگ محاسبه می‌شوند. در تمام این روش‌های پایه‌آمار، ویژگی‌های مکانی داده‌ها در فضای مخزن مدنظر نیستند. در این مطالعه سعی شده با به‌کارگیری الگوریتم‌های زمین‌آماري [۷]، ساختار فضایی داده‌ها، محدود به ویژگی‌های زمین‌شناختی، استفاده شود تا بتوان توزیعی مناسب از خواص مکانیک سنگ را استخراج و تحلیل کرد.

روش مطالعه و خاستگاه زمین‌شناسی

در این پژوهش اطلاعات و داده‌های زمین‌شناسی در چاه‌ها و گستره میدان تحلیل شدند و رابطه آنها با تغییرات خواص مکانیکی سنگ ارزیابی شد. در مرحله بعد این ویژگی‌ها در گستره میدان مدل‌سازی و تحقق‌های متنوع برای تحلیل زمین‌آماري بازتولید شدند. شبیه‌سازی احتمال‌گرا با استفاده از این تحقق‌ها در کل میدان انجام و مقدار ریسک براساس فشار شکست و حد پایین فشار سیال حفاری به صورت کلی بررسی شد. منطقه بررسی شده در این تحقیق میدان نفتی نوروز در بخش شمال‌غرب خلیج فارس در منطقه عملیاتی بهرگان از مناطق شرکت نفت قلات قاره است.

از دیدگاه عملی مکانیک سنگ حالت و ویژگی‌های مکانیکی حال حاضر سنگ را در نظر می‌گیرد. فرآیندهای دیاژنزی در زمان طولانی و اغلب به صورت پیچیده، رسوبات اولیه را به سنگ تغییر می‌دهند که آن نیز ویژگی‌های مکانیکی سنگ را کنترل می‌کند [۸]. یک حوضه رسوبی در معرض فرآیندهایی مانند فرونشست، نیروهای تکتونیکی (به‌عنوان مسبب چرخه‌های بالآمدگی و فرورفتگی منجر به فرسایش یا تغییرات نرخ رسوب‌گذاری)، انحلال، سیمان‌شدگی و ... قرار می‌گیرد. اثرات تمام این مراحل باعث ایجاد چهره‌ای پیچیده از خاستگاه زمین‌شناختی سازندها می‌شوند. این وقایع زمین‌شناختی هم بر توزیع شناسه‌های مکانیکی سنگ و هم بر شرایط مرزی تحت تنش‌های کنونی و فشار منفذی تاثیر گذاراند. از این رو دانش فرآیندهای زمین‌شناسی در حوزه مهندسی مکانیک سنگ بسیار بارز است و جایگاهی ویژه دارد. رخدادهای زمین‌شناسی حتی در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت قابل‌مقایسه با نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ هستند؛ یعنی این آزمایش‌ها به درک بهتر وقایع زمین‌شناسی بسیار کمک می‌کنند [۸]. چون مقادیر هر متغیر معین نیستند و با عدم قطعیت همراه‌اند، تحلیل پایداری چاه باید به صورت احتمال‌گرا انجام شود. در خصوص تحلیل‌های ریسک و حساسیت‌سنجی مطالعاتی انجام شده‌اند، ولی در زمینه کاهش عدم قطعیت‌های مدل‌های ژئومکانیکی سابقه‌ای طولانی در دسترس نیست یکی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعات ژئومکانیکی، برای مثال در بحث پایداری دیواره چاه‌های نفتی، ارزیابی کمی ریسک و تحلیل عدم قطعیت است. تاکنون تکنیک‌هایی متعدد مبتنی بر سعی و خطا در این زمینه توسعه یافته‌اند، اما کمی‌سازی ریسک (QRA) ^۱ روشی مبتنی بر تغییرات است که به دلیل عدم قطعیت ورودی‌هایی از جمله خواص مکانیکی سنگ، تنش‌ها

1. Quantitative Risk Assessment

2. Elastic Inversion

سیلیسی از ورقه عربی شده است. رسوب کربناته عموماً محدود شده و حوضه به دلیل نوسانات سطح آب تحت کنترل رسوبات تخریبی قرار گرفته است [۴، ۱۰ و ۱۱]. چرخه رسوبی کژدمی روی سازند فرسایش یافته داریان به صورت رسوبات آبرفتی در دره‌های کنده شده در بخش‌های جنوبی تر (کویت) شروع و به کانال‌های بریده بریده در بخش‌های بالایی خلیج دهانه‌ای در منطقه مطالعه شده (حوضه بهرگان) تبدیل شده است. با بالا آمدن سطح آب محیط رسوبی به سمت بخش‌های پایینی، خلیج دهانه‌ای شده و بیش تر تحت تاثیر محیط جزرومدی قرار گرفته است و رسوبات ماسه‌ای لنزی و موجی به همراه گل سنگ رسوب کرده‌اند. رسوبات ماسه‌ای سیمانی شده‌اند و آشفستگی زیستی، به دلیل نبود شرایط نهشته شدن در محیط‌های بار دهانه‌ای تا ساحلی، رخ داده است. با افزایش سطح آب، رسوبات رس سنگی و سیلتی **پیش‌دلتا**^۱ روی رسوبات ماسه‌ای نهشته شده‌اند. به عبارت دیگر رسوبات تخریبی به سمت خشکی عقب‌نشینی کرده‌اند و حوضه متاثر از رسوبات دریایی و لاگونی شده است. در این شرایط رسوبات رسی به همراه رسوبات آهکی نهشته شده‌اند [۱۲ و ۲۰]. در شرایط پیش‌روی کامل دریا روی حوضه، واحدهای شیلی کژدمی در بخش بالایی رسوب کرده‌اند میدان مطالعه شده به لحاظ ساختمانی روی گسل پی‌سنگی هنديجان-نوروز-خفجی در بخش پیشانی^۲ زاگرس قرار گرفته است. تحلیل جنبشی این گسل نشانگر ساختارهای رشدی هم‌زمان با رسوب‌گذاری است و شش فاز مختلف فعالیت گسل را نشان می‌دهد [۱۹]. بر پایه این مطالعه در آخرین فاز بازشدگی دریای سرخ و راندن ورقه عربی به سمت ایران، رژیم فشارشی در حال حاضر بر منطقه مطالعه شده حکم فرماست؛ هر چند تنش‌ها در اعماق مطالعه شده، با توجه به وزن روباره و هندسه ساختمان، تغییر می‌کنند.

این میدان یک تله ساختمانی از نوع طاق‌دیس کشیده با روند تقریباً شمالی جنوبی است. طی اکتشاف و توسعه این میدان، داده‌های لرزه‌ای دوبعدی (۱۹۶۶ و ۲۰۰۰) و سه‌بعدی (۲۰۰۳) برداشت و تفسیر شده‌اند. در این دو فاز ۳۵ حلقه چاه حفر شدند. نفت عمدتاً از مخزن بورگان سازند کژدمی و مخزن خلیج سازند گدوان تولید می‌شود. نمودارهای پتروفیزیکی خام و تفسیر شده در اکثر چاه‌ها موجود و مغزه‌ها نیز از سه حلقه چاه در دسترس‌اند. سازندهای کژدمی، داریان و گدوان جزو گروه خامی با سن کرتاسه برای این پژوهش در نظر گرفته شده‌اند. ستون چینه‌شناسی استفاده شده بر پایه نمودار کلاسیک [۱۳] است که با چارت شرکت ملی نفت ایران برای مطالعات و اکتشافات داخلی مطابقت دارد. سازند گدون با سن کرتاسه زیرین (بارمین و آپتین زیرین) شامل آهک، مارن و آهک رسی است [۹]. عضو خلیج فارس در بخش‌های میانی این سازند در قسمت‌های شمال غرب خلیج فارس شامل توالی ماسه‌ای هم هست [۱۵]. سازند داریان با سن کرتاسه زیرین (آپتین) اغلب از آهک‌های توده‌ای و کمی چرتی تشکیل شده است. رأس این سازند با کژدمی در این ناحیه ناپیوسته است گذر آلبین یکی از مراحل مهم چینه‌شناسی در گستره خلیج فارس است و با تغییرات تکتونیکی فراوان همراه بوده است. بخش ماسه‌سنگی بورگان یا آزادگان از سازند کژدمی شامل نهشته‌های چرخه رسوبی سیلابی بعد از سطح فرسایش داریان محسوب می‌شود. واحدهای ماسه‌ای بورگان در بخش‌های بالایی کژدمی دانه‌ریزتر و با بخش‌های شیلی همراه‌اند. واحد رسوبی آهکی در بخش‌های بالایی نشانگر شرایط متعادل برای نهشته شدن آهک است. واحدهای شیلی با ضخامت فراوان در بخش بالایی کژدمی توسعه می‌یابد و در انتها به سازند کربناته سروک تبدیل می‌شود. ترکیب افت سطح آب‌های آزاد و بالا آمدگی ورقه عربی (مسبب ایجاد تنش‌های دور) باعث ایجاد رسوبات تخریبی

1. ForeLand

2. Litho-Facies

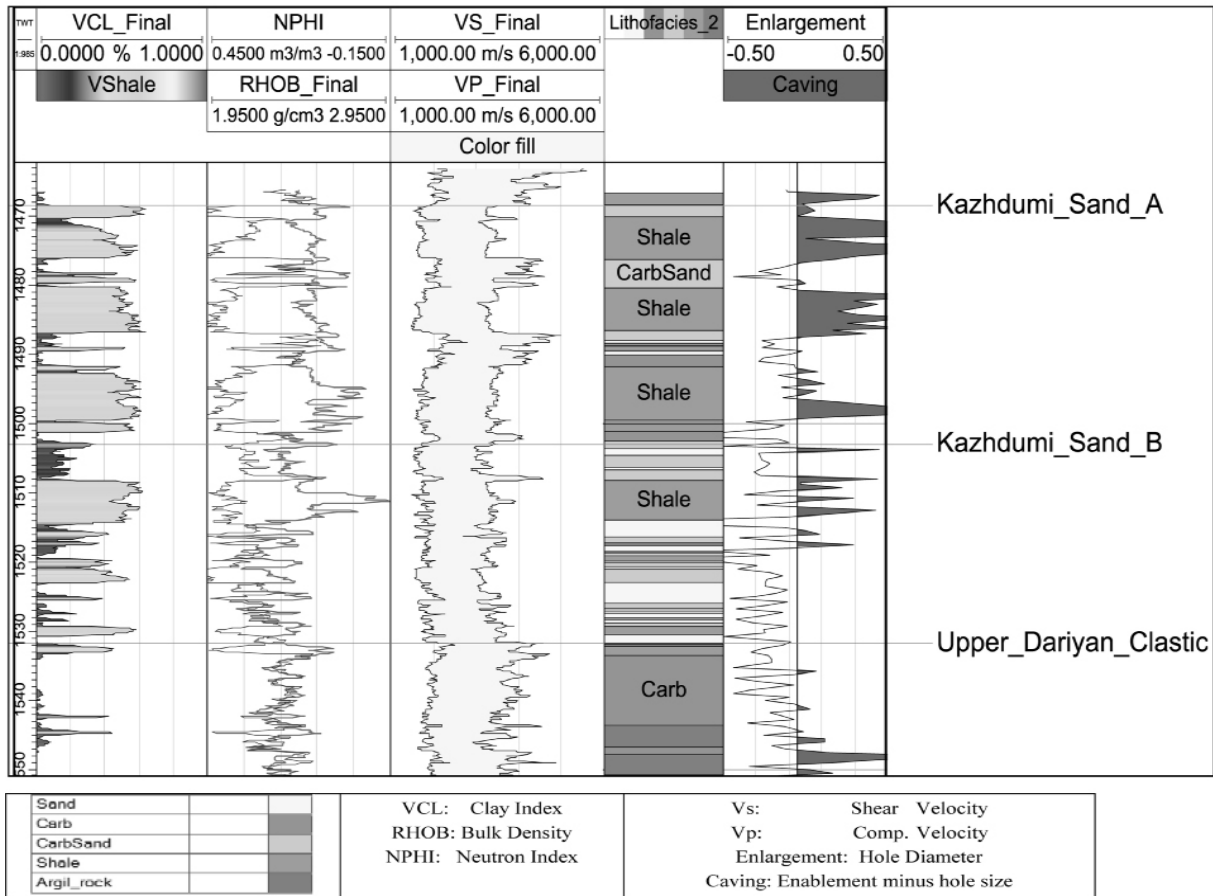
مدل‌سازی رخساره‌های سنگی

رخساره‌های سنگی^۱، بر مبنای نتایج مطالعات زمین‌شناسی شرکت نفت فلات قاره [۱۲]، نتایج تفسیر پتروفیزیکی و نمودارهای سرعت موج برشی (V_s) و فشارشی (V_p)، از نوع ماسه‌ای، ماسه‌سنگی با سیمان کربناته، کربناته، شیلی و آرژیلی تعیین شدند (شکل ۱). برای به دست آوردن توزیع زمین‌آماري V_s در گستره کل سازندهای مطالعه‌شده، ابتدا مدل‌سازی رخساره‌های سنگی انجام شد. روش شبیه‌سازی شاخص متوالی (SIS)^۲ در مدل‌سازی رخساره‌های سنگی بسیار استفاده می‌شود. در این روش تغییرپذیری و ناهمسان‌گردی رخساره‌ها حفظ می‌شود، چنان‌چه k به‌عنوان کلاس رخساره s_k و $k=1, \dots, K$ در نظر گرفته می‌شود. تبدیل شاخص در یک موقعیت ویژه u_j

برای یک رخساره خاص s_k شامل احتمال غالب رخساره s_k در آن موقعیت است: مقدار "یک" اگر موجود باشد و "صفر" اگر نباشد. در این روش هر بلوکی به‌صورت اتفاقی مقدار شبیه‌سازی را با ایجاد توزیع شرطی به کمک کریجینگ شاخص و به‌دست آوردن احتمال هر رخساره در موقعیت جاری به‌دست می‌دهد. داده‌های لرزه‌ای از جمله نشانگرهای امیدانس صوتی و تخلخل لرزه‌ای به‌عنوان داده نرم ثانویه استفاده شدند. دامنه تغییرپذیری نشانگر لرزه‌ای به دسته‌هایی تقسیم‌بندی شد. کالیبراسیون داده‌ها با احتمال هر رخساره برای هر کلاس لرزه‌ای به‌صورت زیر است:

$$p(k | ai_j), k=1, \dots, K, j=1, \dots, Na \quad (1)$$

$p(k | ai_j)$ احتمال نوع رخساره k برای j امین کلاس لرزه ai_j است.



شکل ۱ ستون تطابق شامل نمودارهای پتروفیزیکی به‌همراه رخساره‌های سنگی.

1. Litho-Facies
2. Sequential Indicator Simulation

پایه شرطی برای تخمین سرعت موج برشی به کار رفت (شکل ۳).

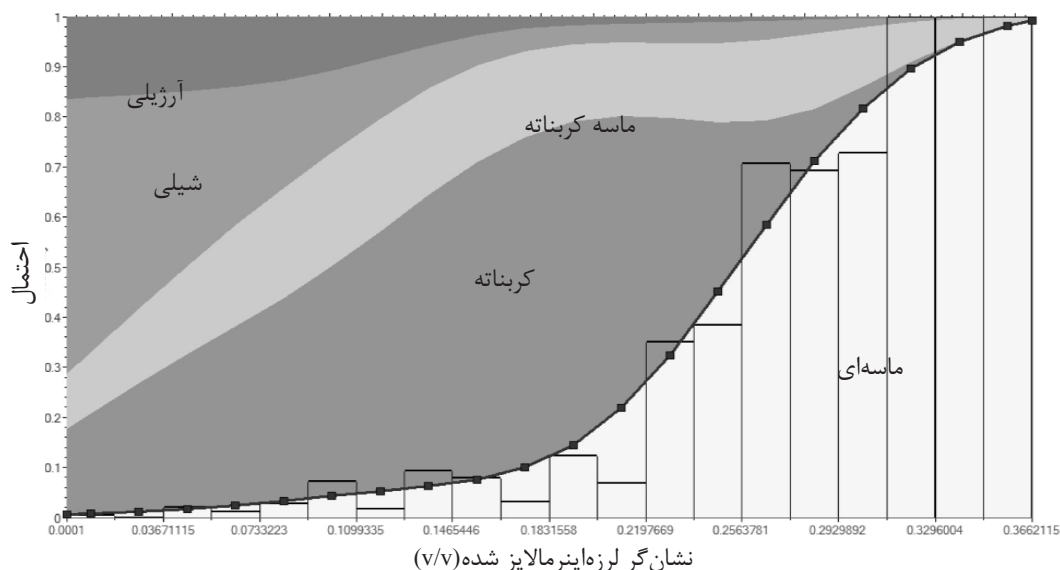
تخمین و مدل سازی سرعت موج برشی

چون انعکاس لرزه‌ای ناشی از ویژگی‌های الاستیکی سنگ است، مدل فیزیک سنگ برقراری ارتباط بین خواص لرزه‌ای و رخساره‌های سنگی را ممکن می‌کند. رابطه سرعت موج فشارشی (V_p) و سرعت موج برشی (V_s) اهمیتی ویژه در سنگ‌شناسی دارد [۲]. سرعت‌های موج P و S در سنگ‌های با تخلخل کم متاثر از سرعت کانی‌ها و مقدار ارتباط دانه‌های سنگ و در سنگ‌های با تخلخل بالا محدود به رابطه کانی و سیال محتوی فضای خالی است [۱۶]. این ایده، برپایه مشاهدات، حد بحرانی تخلخل را که کدام بخش از سنگ متحمل بار است کنترل می‌کند. در سنگ‌های ماسه‌ای با تخلخل بحرانی کم‌تر از ۴۰٪ و آهکی کم‌تر از ۶۰٪، تخلخل تقریباً به صورت خطی با امپدانس صوتی تغییر می‌کند [۱۷]. محققان زیادی سعی کرده‌اند روابط V_p و V_s را برای سنگ‌های مختلف ارائه دهند. در تمام این روش‌ها، رابطه‌های ارائه شده به صورت معادله یک خطی‌اند و مقدار خطا و عدم قطعیت در نظر گرفته نمی‌شوند.

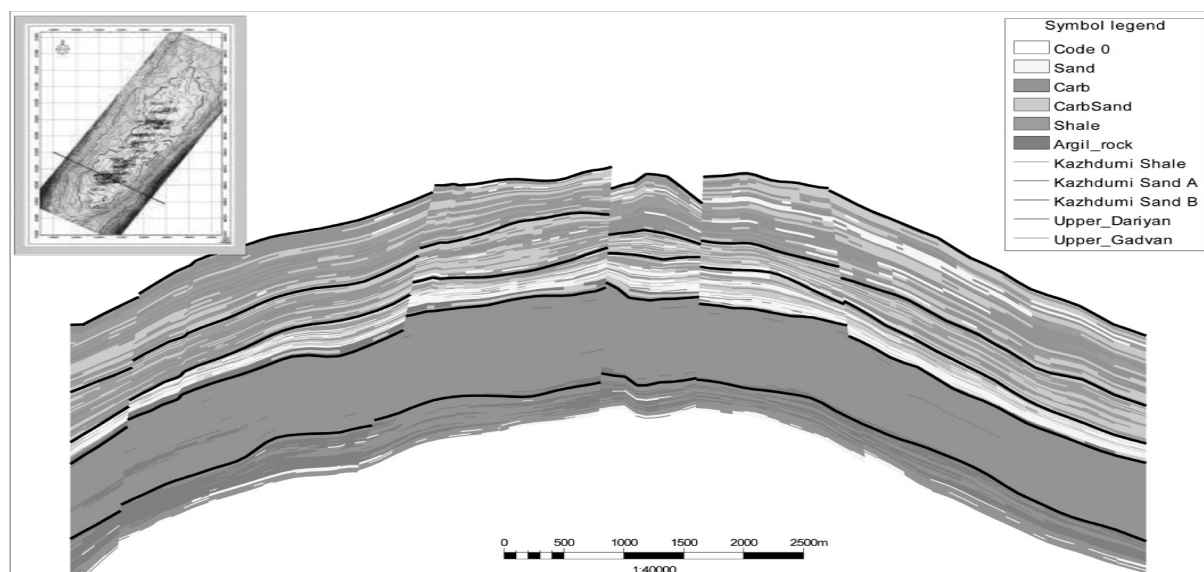
این احتمال در محل چاه‌ها محاسبه شد؛ بنابراین داده‌های لرزه‌ای اطلاعاتی ویژه از توزیع رخساره‌ها را در بر دارند به شرطی که احتمالات کالیبره شده $p(k|ai)$ از احتمال جامع هر رخساره $p(k)$ اقتباس شوند [۵]. احتمال کالیبره شده داده‌های لرزه‌ای را می‌توان به عنوان میانگین‌های تغییرپذیر محلی برای کریجینگ به کار گرفت، که در این حالت احتمال رخساره k از راه کریجینگ به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{i}(u:k) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \cdot i(u\alpha:k) + \left[1 - \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha} \right] \cdot p(k|ai(u)) \quad (2)$$

احتمال تخمینی محلی برای $K=1, \dots, k$ استفاده در شبیه‌سازی‌اند. n تعداد داده‌های محلی و λ_{α} وزن‌ها، $\alpha=1, \dots, n$ داده‌های شاخص محلی و $p(k|ai(u))$ احتمال برگرفته از نشانگر لرزه‌ای برای رخساره k در موقعیت u است. شکل ۲ رابطه مناسب نشانگر لرزه‌ای با رخساره‌های سنگی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، بر این اساس مدل سازی گوسی شاخص متوالی به کمک داده‌های ثانویه لرزه‌ای انجام و مدل سه‌بعدی رخساره‌های سنگی برای گستره مخزن ساخته شد. مدل رخساره در مراحل بعد به عنوان مدل



شکل ۲ احتمال کالیبره شده در توزیع احتمالی کلاس هر رخساره سنگی در چاه به ازای نشانگر لرزه‌ای (Secondary attribute).



شکل ۳ مدل رخساره‌های سنگی (راست) و امپدانس صوتی (چپ) سازندهای مطالعه‌شده کژدمی، داریان و گدوان.

مثال یک دامنه از مقادیر یک متغیر معادل توزیع شرطی متغیر دیگر است. هر قدر دامنه کوچک‌تر در نظر گرفته شود، توزیع شرطی به توزیع مقادیر نقطه‌ای نزدیک‌تر می‌شود. نرمال‌سازی V_S و واریوگرافی برای رخساره‌های سنگی مختلف برای استخراج ساختار فضایی داده‌های باقی‌مانده در گستره میدان و شبیه‌سازی V_S برای حفظ پراکنش در برابر V_P به‌صورت شبیه‌سازی متوالی (SGS) ^۱ با توزیع دومتغیره انجام شد. شکل ۴ مدل سه‌بعدی V_S با تداوم توزیع و پراکنش V_S و V_P را در گونه‌های سنگی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد.

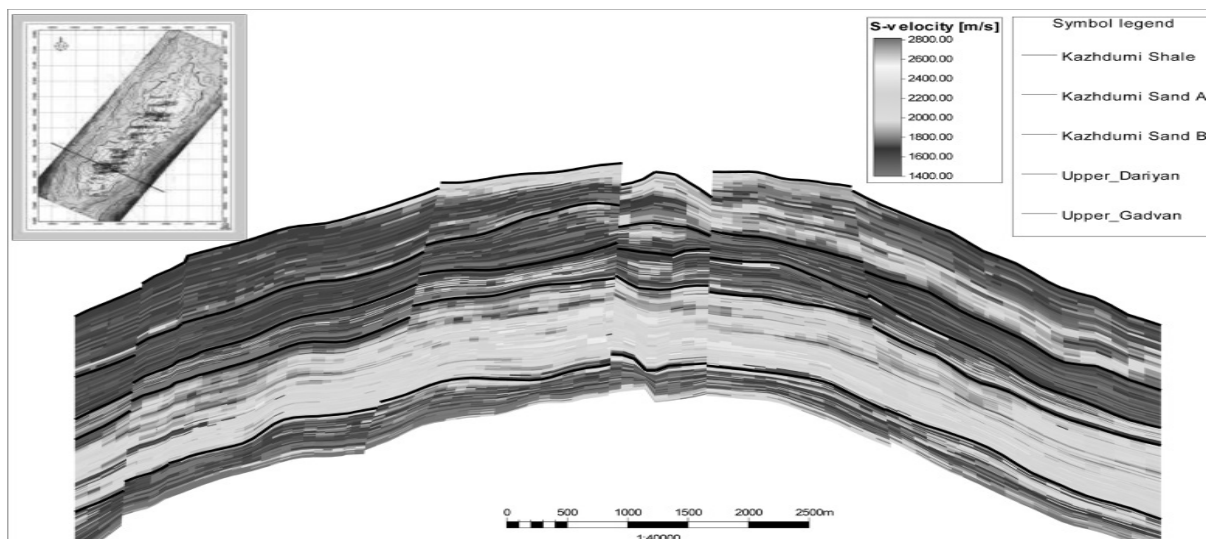
مدل‌سازی ژئومکانیکی و تحلیل ریسک ناپایداری

تحلیل ریسک تکنیکی برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت است. ریسک در واقع پتانسیل شکست یا موفقیت مرتبط با هر یک از دست‌آوردها و عدم قطعیت دامنه نتایج محتمل است [۳]. عدم قطعیت ناشی از عدم‌درک کامل آن چیزی است که کمی‌سازی می‌شود. چون دانایی ما از آن چه کمی‌سازی می‌کنیم محدود است، مقدار حقیقی عدم قطعیت هرگز مشخص نیست و تنها مدل عدم قطعیت وجود دارد [۳].

عمده‌ترین دلیل پراکنش V_P -۸ وجود کانی‌های متنوع در سنگ و بخشی کوچک هم به دلیل خطای ابزار و سیستماتیک درگیر در برداشت و آزمایش است؛ بنابراین در ایجاد تطابق بین V_P و V_S و استخراج معادله، این پراکنش لحاظ نشده و نتیجه ارائه‌شده تنها متوسطی از مقادیر V_S است. در این پژوهش برای کاهش عدم قطعیت تخمین V_S ، از توزیع شرطی مقید به رخساره‌ها استفاده و کلاسه‌بندی مقادیر V_P و V_S برای تعیین توزیع فراوانی در هر رخساره سنگی ماسه‌ای، ماسه‌های با سیمان کربناته، کربناته و آرژیلی انجام شد. سعی شد ابتدا تطابق V_P و V_P برای هر رخساره سنگی انجام و سپس برای حفظ پراکنش این دو ویژگی از شبیه‌سازی گوسی متوالی با استفاده از توزیع دو متغیره استفاده شود. معادله کواریانس در آمار دومتغیره به‌صورت زیر است:

$$C(x,y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

x_i و y_i متغیرها و n تعداد زوج‌هاست. در حقیقت کواریانس دومتغیره رابطه بین آن دو را مشخص می‌کند. مسئله اصلی در آمار دومتغیره توزیع فراوانی شرطی است [۶]. توزیع شرطی یک توزیع متغیری است که با توزیع متغیر دیگر کنترل می‌شود. برای



شکل ۴ مقطع عرضی و طولی از مدل سه بعدی V_s به روش شبیه سازی متوالی (SGS) با توزیع دو متغیره با V_p

فارس در میدین شرکت نفت استفاده شده و نتایج مناسب داشته‌اند [۱۲].

تخمین فشار سیال حفاری و تحلیل ریسک ناپایداری

برای بررسی اثر ویژگی‌های زمین‌شناسی در بحث ناپایداری چاه، فشار فراتعادلی^۱ در هر سلول از شبکه مدل با استفاده از روش زیر محاسبه شد. فشار فراتعادلی از کم کردن حد پایین فشار سیال حفاری از فشار منفذی محاسبه می‌شود [۱]. نحوه محاسبه مدل سه‌بعدی فشار سیال حفاری نیز در ادامه خواهد آمد. توابع توزیع از هیستوگرام فشار فراتعادلی مدل شده در هر یک از رخساره‌ها به دست آمدند و با هم مقایسه شدند. تاکنون معیارهای شکست متعددی در مخازن با عمق بیش از ۲۰۰۰ m متر توسعه یافته‌اند که معیار مور-کلمب و موگی-کلمب پر کاربردترین آنها هستند. چون معیار مور-کلمب نتایجی محافظه‌کارانه‌تر از معیار موگی-کلمب ارائه می‌دهد [۱] و استفاده از آن آسان‌تر است، در این پژوهش به کار رفته است. طبق معیار مور-کلمب شکست سنگ زمانی رخ می‌دهد که تنش برشی (τ) بر چسبندگی ذاتی و نیروی اصطکاک غلبه کند. این معیار به شکل زیر است [۸]:

$$\tau = c + \sigma_n \mu \quad (4)$$

1. Overbalance Pressure

تحلیل ریسک بر مبنای روش احتمالی مونت کارلو یک روش کاربردی است که به ازای عدم قطعیت‌های ویژگی‌های مکانیکی سنگ، تنش‌های اصلی و زاویه انحراف چاه انجام می‌شود [۱]. اما در روش مونت کارلو ورود موقعیت مکانی متغیرها نسبت به هم در فضای سه‌بعدی مخزن ممکن نیست. برای حل این مسئله، در این پژوهش به کمک تکنیک زمین‌آماری ابتدا رخساره‌های سنگی به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی و سپس ویژگی‌های فیزیکی سنگ شامل چگالی / تخلخل، سرعت‌های موج برشی و فشارشی مقید به مدل رخساره‌ها به کمک نشانگرهای لرزه‌ای به عنوان هم شبیه‌ساز به صورت زمین‌آماری مدل‌سازی شدند.

مدل‌سازی خواص مکانیکی سنگ و تنش‌های برجا

پس از مدل‌سازی خواص فیزیکی سنگ، مدل سه‌بعدی مشخصه‌های الاستیک و خواص مکانیکی سنگ به ترتیب شامل مدول‌ها، نسبت پواسون، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مقاومت فشاری و کششی سنگ با اعمال روابط تجربی ارائه شده در منابع معتبر روی مدل‌های سه‌بعدی فیزیکی به دست آمد [۱۸، ۸]. مقادیر تنش‌های برجا نیز با اجرای معادلات پورو-الاستیک روی مدل سه‌بعدی خواص مکانیکی و الاستیکی سنگ محاسبه شدند. این روابط در تحلیل‌های پایداری در حوضه خلیج

که در این حالت مقدار σ_θ بزرگ‌تر از σ_r است. مشابه حالت قبل در این حالت نیز سه جای گشت از تنش‌های اصلی برای تعیین حد پایین فشار مجاز سیال حفاری وجود دارند: $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$ ، $\sigma_\theta \geq \sigma_r \geq \sigma_z$ و $\sigma_\theta \geq \sigma_z \geq \sigma_r$. در این حالت به کمک مقادیر σ_θ یا σ_r بر مقاومت فشاری سنگ غلبه شده ($\theta = \pm \pi/2$) و متناسب با آن، تنش‌های اصلی در دیواره چاه برابری باشد:

$$\sigma_r = P_w, \quad \sigma_\theta = A - P_w, \quad \sigma_z = B \quad (7)$$

که A و B برابری باشد:

$$A = 3\sigma_H - \sigma_h, \quad B = \sigma_v + 2(\sigma_H - \sigma_h) \quad (8)$$

با گذاردن معادلات (7) و (8) در معیار حد پایین فشار سیال حفاری در سه حالت:

$$P_{wmin} = (A - C) / (I + N) \quad (9)$$

که در آن:

$$C = C_0 - Pp(N - I) \quad (10)$$

اگر فشار سیال حفاری (P_w) به کم‌تر از P_{wmin} به دست آمده برسد ($P_w < P_{wmin}$)، خردشدگی و فروریزش درون چاه رخ می‌دهد؛ بنابراین خردشدگی در چاه زمانی اتفاق می‌افتد که یکی از سه حالت بالا معیار مور-کلمب را برآورده کند. برای شکست کششی نیز با گذاردن معادلات (5) و (6) در معیار مور-کلمب رابطه زیر به دست می‌آید [8]:

$$P_{wmax} = (C + ND) / (I + N) \quad (11)$$

مطابق این رابطه اگر مقدار $P_w > P_{wmax}$ باشد، شکست کششی در چاه رخ می‌دهد. مقداری از سه حالت فشاری قابل قبول است که بتواند معیار مور-کولمب را برآورده کند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فشار سیال حفاری بهینه باید در بازه $P_{wmin} < P_w < P_{wmax}$ قرار گیرد. مقادیر حد پایین و حد بالای فشار سیال حفاری با اعمال معیار شکست پیش‌گفته روی مدل سه‌بعدی ژئومکانیکی به دست آمدند.

σ_n ، تنش نرمال اعمالی روی صفحه شکست؛ ϕ ، چسبندگی مواد و φ ، زاویه اصطکاک داخلی است. چون این معیار در راستای صفحه σ_2 برآورده می‌شود و مقدار σ_2 در تنش نرمال و تنش برشی تاثیر ندارد، فرض می‌شود که تنش متوسط تاثیری در شکست ندارد. شکل خطی معیار مور معادل معیار کلمب است و به همین دلیل معادله (4) به معیار مور-کلمب معروف است. در تحلیل پایداری چاه، تنش‌های اصلی اطراف چاه عبارت‌اند از: تنش مماسی (σ_θ)، تنش شعاعی (σ_r) و تنش محوری (σ_z). تنش شعاعی و مماسی تابعی از فشار سیال حفاری (P_w) هستند، اما تنش محوری به فشار سیال حفاری وابسته نیست؛ بنابراین هر تغییر فشار سیال حفاری فقط بر تنش مماسی و شعاعی تاثیر می‌گذارد. معمولاً دو نوع ناپایداری در دیواره چاه به وجود می‌آیند. اگر $\sigma_\theta \leq \sigma_r$ باشد، ناپایداری مرتبط با خردشدگی و اگر $\sigma_r \geq \sigma_\theta$ باشد، ناپایداری مرتبط با شکست کششی است. با افزایش P_w مقدار σ_r افزایش و مقدار σ_θ به سمت کمتر شدن از مقاومت کششی سنگ کاهش می‌یابد؛ بنابراین حد بالای فشار سیال حفاری (P_{wmax}) با شکستگی مرتبط است. با بررسی این قید و بزرگی نسبی تنش محوری سه جای گشت برای تنش‌های اصلی ($\sigma_2, \sigma_\theta, \sigma_r$) و تعیین حد بالای فشار مجاز سیال حفاری وجود دارند:

$$\sigma_z \leq \sigma_\theta \leq \sigma_r \quad \text{و} \quad \sigma_\theta \leq \sigma_z \leq \sigma_r, \quad \sigma_\theta \leq \sigma_r \leq \sigma_z$$

وقتی تنش مماسی به کم‌تر از مقاومت کششی سنگ کاهش یابد ($\theta = 0$ یا $\theta = \pi$)، شکست در امتداد تنش افقی حداکثر گسترش می‌یابد و متناسب با آن سه تنش در دیواره چاه به صورت زیراند [8]:

$$\sigma_r = P_w, \quad \sigma_\theta = D - P_w, \quad \sigma_z = E \quad (5)$$

که مقادیر D و E برابری باشد:

$$D = 3\sigma_h - \sigma_H, \quad E = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \quad (6)$$

در طرف مقابل وقتی که مقدار P_w کاهش می‌یابد، مقدار σ_θ به سمت مقاومت فشاری دیواره افزایش می‌یابد؛ بنابراین حد پایین فشار مجاز سیال حفاری (P_{wmin}) با خردشدگی چاه مرتبط است طوری

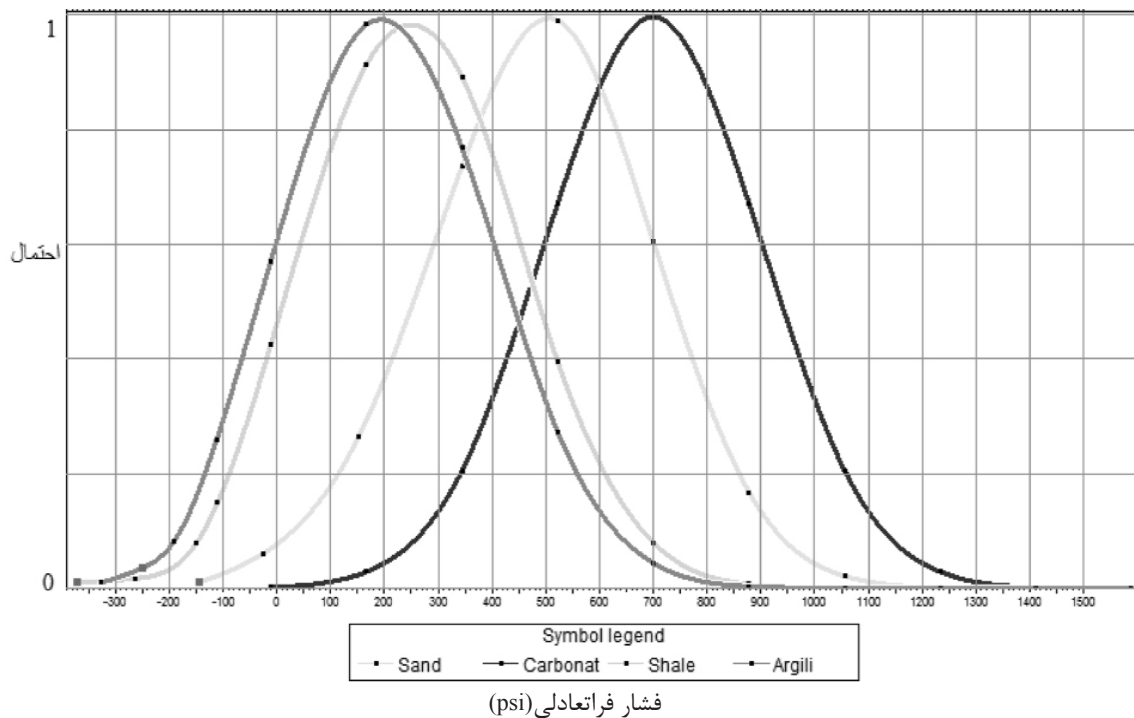
و در ریسک نزدیک به صفر این شاخص صفر است (تابع توزیع فشار فراتعادلی کاملاً در بخش مثبت قرار می‌گیرد). بر این اساس شاخص ریسک ناپایداری در رخساره کربناته تقریباً ۱؛ در رخساره ماسه‌ای، ۰/۰۵؛ در رخساره شیلی، ۰/۳ و در رخساره آرژیلی حدود ۰/۳۵ برآورد شده است (شکل ۵). اختلاف حد پایین و بالای سیال حفاری به‌عنوان بازه امن گل حفاری برای یک برآورد کلی دیگر از ریسک ناپایداری در یک چاه به‌کار می‌رود [۲۲]. هر چه بازه باریک‌تر باشد، چاه بیش‌تر در مخاطره است. در این پژوهش تابع توزیع این بازه از اختلاف حد پایین و بالای فشار سیال حفاری به‌دست آمد (شکل ۶). همان‌گونه که مشخص است، رخساره کربناته از این لحاظ شرایطی امن‌تر از رخساره‌های دیگر را نشان می‌دهد. رخساره‌های ماسه‌ای، شیلی و آرژیلی کم‌وبیش در بازه‌ای نزدیک به هم هستند، هر چند رخساره ماسه‌ای شرایطی امن‌تر را نشان می‌دهد. برای ارزیابی و کنترل نتایج، شاخص ریسک ناپایداری در چاه‌های میدان بررسی شد. شکل ۱ نمونه‌ای از یکی از چاه‌های میدان مطالعه‌شده را نشان می‌دهد. یکی از نمودارهایی که اغلب به‌عنوان شاخص ناپایداری مطرح می‌شود و مقدار کندی^۳ دیواره چاه را نشان می‌دهد شناسه عمقی گشادشدگی^۴ است. این شناسه از اختلاف شناسه قطر چاه از اندازه متعادل حفاری به دست می‌آید و مقدار مثبت آن نشانگر کندی دیواره و مقدار منفی نشانگر تشکیل اندود گل است. در این تحقیق، مقدار این شاخص در عمق‌هایی که رخساره‌های شیلی و آرژیلی توسعه یافته‌اند افزایش یافته است (هاشور خاکستری روی شناسه شکل ۱) که تاییدی بر مقدار شاخص ریسک ناپایداری مدل‌شده است (شکل ۱).

توابع توزیع مقادیر مدل‌شده برای هر یک از رخساره‌های سنگی از مدل سه‌بعدی استخراج شدند. برای تحلیل ناپایداری، تابع توزیع حد پایین فشار سیال حفاری، فشار منفی و تنش افقی حداقل هم‌زمان بررسی شدند. مطابق توضیح بند قبل، اگر مقدار حد پایین فشار سیال حفاری کاهش یابد و از فشار منفی کم‌تر شود، چاه در ریسک ناپایداری از نوع فوران و تا حدی خردشدگی^۱ قرار می‌گیرد. ولی اگر مقدار حد پایین فشار سیال حفاری افزایش یابد و از مرز تنش افقی حداقل عبور کند، چاه در ریسک ناپایداری از نوع شکست کششی^۲ قرار خواهد گرفت [۱۴]. بنابراین در چاه پایدار در برابر شکست کششی تابع توزیع حد پایین فشار سیال حفاری نباید تابع توزیع تنش افقی حداقل (در برش ۹۵٪ سطح اطمینان) را قطع کند. همان‌گونه که مشخص است، پایداری در رخساره‌های کربناته عمدتاً در بازه اطمینان قرار می‌گیرد. در رخساره ماسه‌ای بخشی از توابع توزیع هم‌پوشانی کرده و ریسک ناپایداری بالاتری دارد؛ در حالی که در رخساره‌های شیلی و آرژیلی هم‌پوشانی بیش‌تر شده و بخش زیادی از گستره میدان ریسک بالای ناپایداری دارد. به‌عنوان یک ایده کلی می‌توان شاخصی برای ریسک ناپایداری چاه به فوران و تا حدی خردشدگی (نه ریسک واقعی ناپایداری) را به کمک تابع توزیع فراتعادلی از مدل سه‌بعدی تعریف کرد. این شاخص به صورت نسبت احتمال بخش منفی (مساحت زیر تابع توزیع فشار فراتعادلی "کم‌تر" از صفر) به احتمال بخش مثبت (مساحت زیر تابع توزیع فشار فراتعادلی "بیش" از صفر) در نظر گرفته شد:

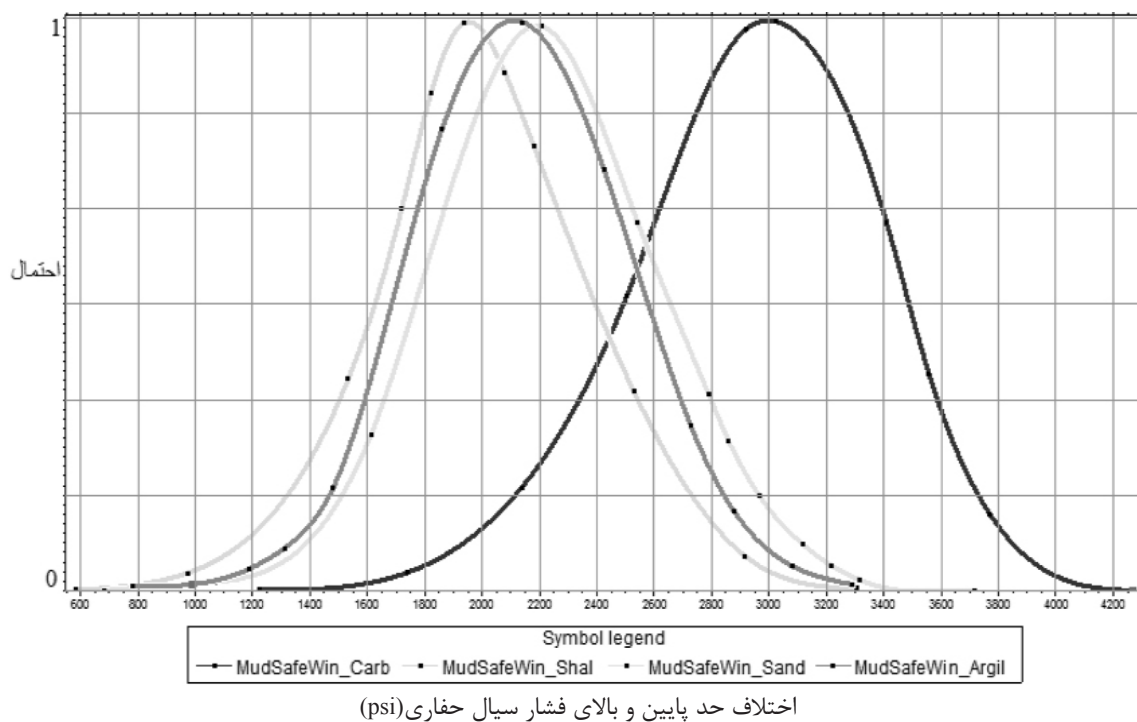
$$Risk_{Index} = \int_0^{-\infty} p(x) / \int_0^{+\infty} p(x) \quad (12)$$

$p(x)$ تابع توزیع فشار فراتعادلی برگرفته از مدل است. در ریسک ناپایداری چاه به فوران و تا حدی خردشدگی بالا این شاخص معادل ۱ (تابع توزیع فشار فراتعادلی کاملاً در بخش منفی قرار می‌گیرد)

1. Break Out
2. Induced Fracture
3. Caving
4. Enalgement



شکل ۵ تابع توزیع فشار فراتعادلی (psi) در رخساره سنگی کربناته، ماسه‌ای، آرژیلی و شیلی.



شکل ۶ تابع توزیع اختلاف حد پایین و بالای فشار سیال حفاری (psi) در رخساره سنگی کربناته، ماسه‌ای، آرژیلی و شیلی.

گستره میدان انجام شد. در تغییرات قائم از پایین به بالای سکانس رسوبی کژدمی مشخص است که غالب رخساره‌های سنگی در بخش‌های زیرین و تا حدودی میانی این سازند گسترش یافته‌اند و

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی مجزای رخساره‌ها در سازندهای کژدمی، داریان و گدوان با مشخصه‌های زمین‌آماري متناسب با الگوی ساختار فضایی رخساره‌ها در

بالا دارند. محدودیت‌های این روش بر دو محوراند: محور اول به تخمین رخساره‌های سنگی در گستره میدان مربوط می‌شود. این موضوع عدم قطعیتی ناشی از نحوه پراکنش رخساره‌ها را ایجاد می‌کند که کمی‌سازی آن پیچیده است. الگوریتم‌هایی مانند شبیه‌سازی چندنقطه‌ای رخساره توسعه یافته‌اند که به کارگیری موثر دانش زمین‌شناختی را ممکن می‌کنند، ولی به داده‌هایی از جمله مغزه و ... نیز نیاز است. از طرف دیگر ایجاد ارتباط مناسب بین داده‌های لرزه‌ای و رخساره‌ها اغلب به دلیل درجه تفکیک کم لرزه مشکل و با عدم قطعیت همراه است. محور دوم محدودیت‌ها شامل ایجاد ارتباط بین ویژگی‌های زمین‌شناختی با خواص فیزیکی و به دنبال آن خواص مکانیکی است. برداشت داده‌های لرزه‌ای با قدرت تفکیک بالا، نمودارهای صوتی دوقطبی، مغزه‌گیری و آنالیز ژئومکانیکی مغزه به دقت نتایج بسیار کمک می‌کنند.

تقدیر و تشکر

از امور پژوهش و اداره زمین‌شناسی شرکت نفت فلات قاره ایران بابت تمام حمایت‌ها بسیار متشکریم.

شامل رخساره‌های ماسه‌ای و تا حدودی شیلی هستند. توزیع رخساره‌های سنگی در سازندهای داریان و گدوان بیش‌تر شامل آهک‌ها و آهک‌های آرژیلی هستند. عملکرد دیاژنز در بخش‌هایی باعث افزایش تخلخل و در بخش‌هایی کاهش تخلخل شده است. زبانه‌هایی از رخساره‌های ماسه‌ای در بخش‌های میانی گدوان (عضو خلیج فارس) گسترده شده‌اند که نشانگر شرایط محیطی آواری در آن زمان است. رابطه سرعت موج برشی در برابر موج فشاری تاثیر توزیع رخساره‌های سنگی بر توزیع خواص فیزیکی سنگ را نشان می‌دهد و به دنبال آن توزیع خواص مکانیکی نیز، به دلیل تاثیر گرفتن از خواص فیزیکی، از توزیع رخساره‌ها تبعیت می‌کند. تکنیک زمین‌آماری توزیع دو متغیره V_s در برابر V_p مقید به توزیع رخساره‌های سنگی به کنترل مدل‌سازی سرعت موج برشی و پیرو آن خواص الاستیکی و مکانیکی سنگ کمکی موثر می‌کند و با آن تحلیل ریسک در هر رخساره سنگی در گستره میدان فراهم می‌شود. شاخص ریسک به دست آمده از تحلیل‌های پایداری از شاخص ریسک محاسبه شده از توزیع رخساره‌ها تبعیت می‌کند، به طوری که رخساره‌های کربناته، ماسه‌ای، شیلی و آرژیلی به ترتیب ریسک کم به

مراجع

- [1] Al-Ajmi A. M. and Zimmerman R. W., "Probabilistic wellbore collapse analysis", Int. Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 74, pp. 171-177, 2010.
- [2]. Avseth P., Mukerji T. and Mavko G., "Quantitative seismic interpretation: applying rock physics tools to reduce interpretation risk", Cambridge, 2005.
- [3]. Caers J., "Modeling uncertainty in the earth sciences", Hoboken, NJ, USA, Wiley, 2011.
- [4]. Davies R. B., Casey D. M., Horbury A. D., Sharland P. R. and Simmons M. D., "Early to mid-cretaceous mixed carbonate-clastic shelf", GeoArabia: Middle East Petroleum Geosciences, Vol. 7, No.3, pp. 541-598, 2002.
- [5]. Deutsch C. V., "Geostatistical reservoir modeling", New York, Oxford University Press, 2002.
- [6]. Deutsch C.V., Journal, "GSLIB: geostatistical software library and user's guide", New York, Oxford University Press, 1992.

- [7]. Dubrule O., Damsieth E., "Achievement and challenges in petroleum geostatistic," Petroleum, Vol. 23 , No. 1 February 2017.
- [8]. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M. and Risnes R., "Petroleum related rock mechanics," Amsterdam, Elsevier, 2008.
- [9]. Ghazban F., "Petroleum geology of the persian gulf," 1st ed., Tehran University Press, 2008.
- [10]. Immenhauser A., Schlager W., S. J. Burns, Scott R. W., Geel T., Lehmann J., Van Der Gaast S., Bolder-Schrijver L.J.A. "Late aptian to late albian sea-level fluctuations," Journal of Sedimentary Research, Vol. 69, No. 2, pp. 434-446, March 1999.
- [11]. A. Immenhauser, , W. Schlager, S. J. Burns, Scott R. W., Geel T., Lehmann J., Van Der Gaast S. and BOLDER-SCHRIJVERL. J. A., "Origin and correlation of disconformity surfaces and marker beds, Nahr Umr Formation, Northern Oman," SEPM Special Publication, Vol. 69, pp. 209-228, 2000.
- [12]. Iranian Offshore Oil Co. "Sedimentology and sequence stratigraphy of kazdumi and dariyan formations", Report, 2013.
- [13]. James G. A. and Wynd J. G., "Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area," AAPG Bulletin, No. 49, pp. 2162-2245, 1965.
- [14]. Moos D., Peska P., Finkbeinera Th. and Zoback M., "Comprehensive wellbore stability analysis using quantitative risk assessment," Journal of Petroleum. Science and Engineering, Vol. 38. Issue 3-4, B. S. Aadnoy and S. Ong, pp. 97-109, June 2003.
- [15]. Motiei H., "Petroleum geology of Zagros, treatise on the geology of Iran," Geological Survey of Iran, 1995.
- [16]. Shiroodi S. K., Ghafoori M., Faghih A., Ghanadian M., Lashkaripour Gh.R. and Hafezi Moghadas N., "Multi-phase inversion tectonics related to the hendijane Nowrooze Khafji fault activity Zagros mountains SW Iran," Elsevier; Journal of African Earth Sciences, Vol.111, pp. 399-408, 2015.
- [17]. Whitcombe D. N., Connolly P. A., Reagan R. L. and Redshaw T. C., "Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction," Geophysics, Vol. 67, pp. 63-67, 2002.
- [18]. Zoback M. D., "Reservoir geomechanics," New York, Cambridge University Press, 2007.