

## مدل سازی سه بعدی تخلخل و تراوایی با استفاده از روش های زمین آماری در یکی از میادین گازی در خلیج فارس

کیومرث پیامنی

گروه زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

علی کدخدایی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

بهاءالدین حمدی

پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران

محمد حسنی گیو

کارشناس ارشد ناظر بر عملیات اکتشاف، مدیریت اکتشافات وزارت نفت، تهران

آوا رشیدی نژاد

گروه زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۱/۲۸

Kiomars2012@yahoo.com

### چکیده

تخلخل و تراوایی از مهمترین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی می باشند که ارزیابی دقیق آن ها در مخازن هیدروکربنی به منزله یک ابزار مؤثر، مهم و کارآمد برای کارشناسان صنعت نفت در امر مطالعه جامع مخازن و فرآیند تولید و مدیریت یک مخزن محسوب می شود. در این مطالعه با استفاده از اطلاعات حاصل از چهار چاه میدان گازی پارس جنوبی و با استفاده از روش شبیه سازی گوسی متوالی، روند تغییرات تخلخل و تراوایی را در میدان مذکور مورد ارزیابی تخصصی قرار داده ایم. نتایج حاصل از مدل سازی پارامترهای مورد بررسی نشان می دهد که میانگین تخلخل در مخزن گازی مورد مطالعه برابر با ۱۰/۲۸ درصد و میانگین تراوایی برابر با ۵۰ میلی داری می باشد. همچنین بر اساس مدل سازی صورت گرفته مشخص شد که در میدان مذکور ارتباط مستحکمی بین تخلخل و تراوایی برقرار نیست. در این راستا با ترسیم نقشه های هم شیب سازندهای مخزنی مورد مطالعه مشخص شد، در نقاطی که تراکم شکستگی ها بیشتر است تراوایی نیز افزایش پیدا کرده است.

**کلمات کلیدی:** تخلخل، تراوایی، زمین آمار، شبیه سازی، مدل سازی

### مقدمه

مانند نرم افزارهای PETREL و RMS در جهت حل مشکل یاد شده و همچنین مطالعه دقیق تر مخازن هیدروکربنی ارائه شده است. با استفاده از این روش ها، شکل های مختلفی از میادین هیدروکربنی ساخته می شود که از جمله این شکل ها می توان به نحوه توزیع خواص پتروفیزیکی در سه بعد اشاره کرد که به دنبال آن می توان عواملی را که باعث کاهش یا افزایش کیفیت مخزنی می شوند را مورد مطالعه دقیق تر قرار داد (پیامنی، ۱۳۹۱). روش های مدل سازی سه بعدی زمین آماری خواص پتروفیزیکی تاکنون توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است. ماترون بنیانگذار متغیرهای ناحیه ای و علم زمین آمار می باشد. تلفیق کارهای ماترون را می توان در کارهای (hiles and Dellinner, 1999) مشاهده کرد. تهیه نقشه های قطعیت گرا در کاربردهای نفتی را می توان در (Hass and Viallix, 1974) و (Hass and Jouseline, 1976) مشاهده کرد. پیشرفت مدل سازی احتمال گرای سه بعدی مخزن بر پایه شبیه سازی را می توان در سال های میانی دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ در (Journel, 1998) مشاهده کرد. به دنبال آن کارهای زیادی برای پیشرفت علم زمین آمار و مدل سازی صورت گرفته است که از آن جمله می توان به کارهای (Omre, 1997) و (Dubrule, 1998) و کارهای (Hohn, 1998) و (Deutsch, 2002) اشاره کرد (سفیداری، ۱۳۹۱).

علم زمین آمار اولین بار توسط ماترون (Matheron) در سال ۱۹۶۲ میلادی و در مرکز ریاضیات مونلوژی فرانسه مطرح شد (خواجه و آقایی، ۱۳۸۷). با پیشرفت این علم روش های زمین آماری به طور روز افزون و با سرعت بسیار زیادی در مطالعات و مدل سازی مخازن هیدروکربوری مورد استفاده قرار گرفت. یکی از علل این رشد سریع به ماهیت داده های مخازن برمی گردد، داده های پتروفیزیکی مخازن مانند تخلخل و تراوایی، داده هایی هستند که در فضای مخزن ارتباط و همبستگی فضایی و به زبان زمین آمار، از خود ساختار فضایی نشان می دهند (Deutch and Journal, 1992). این همان نوع متغیرهایی می باشد که زمین آمار در مورد آن ها عمل می کند، پس در زمین آمار به بررسی آن دسته از متغیرهایی پرداخته می شود که ساختارهای فضایی از خود بروز می دهند (حسینی پاک، ۱۳۸۹). در حال حاضر علم زمین آمار ترکیب عظیمی از روش های مختلف است که جهت حل اغلب مسائل و مشکلات علوم زمین به کار گرفته می شود. یکی از این مشکلات که همواره زمین شناسان و مهندسیین مخازن هیدروکربنی با توجه به داده های کم مخزن در مقایسه با حجم مخزن در پی یافتن راه حل آن هستند، عبارت است از روشی جهت تخمین توزیع فضایی پارامترهای پتروفیزیکی در فضای مخزن. امروزه روش های زمین آماری نوین مانند روش های مدل سازی سه بعدی خواص پتروفیزیکی از طریق زمین آمار و در قالب بسته های نرم افزاری متنوع

## زمین‌شناسی میدان گازی پارس جنوبی

میدان گازی پارس جنوبی، بزرگترین میدان گازی و دور از ساحل (Offshore) در جهان است (خان‌محمدی و شرکتی، ۱۳۸۹) که بر روی خط مرزی مشترک ایران و قطر در خلیج همیشگی فارس قرار دارد و به صورت طاق‌دیزی با ابعاد تقریبی  $۱۶۰ \times ۶۵$  کیلومتر (کاهکش و روشنایی‌زاده، ۱۳۸۲) و دارای مساحت ۹۷۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد که ۳۷۰۰ کیلومتر مربع آن در آب‌های سرزمینی ایران و ۶۰۰۰ کیلومتر مربع آن در آب‌های کشور قطر قرار دارد. ساختمان پارس جنوبی در واقع تداومی از پلانچ شمال خاوری ساختمان بسیار عظیم گنبدی شکل در شمال خاوری شبه جزیره قطر است که با عنوان گنبد شمالی قطر شناخته می‌شود (North Dome Qatar) (نجم‌آبادی، ۱۳۷۲). این ساختار عظیم که دارای امتداد شمال شرقی - جنوب غربی و یال‌های ملایم می‌باشد، خود یکی از برجستگی‌های موجود از بالاآمدگی ناحیه‌ای موسوم به کمان قطر - فارس را تشکیل می‌دهد. از نظر زمین‌شناسی ساختمانی، ساختار پارس جنوبی گنبدی و از نوع رویشی به شمار می‌آید و عامل اصلی رویش آن برخاستن پی‌سنگ در کمان قطر - فارس می‌باشد (Kelemme, 1984). واحدهای اصلی مخزنی این میدان را سکنس‌های کربناته دریایی کم عمق سازندهای کنگان و دالان با سن پرمین میانی تا تریاس زیرین تشکیل می‌دهند. حضور این سکنس‌های عظیم کربناته که از زمان پیشروی دریا در پرمین بر روی سنگ‌های پالئوزوئیک زیرین نهشته گردیده‌اند همراه با وضعیت مطلوب ساختمان منطقه و حضور گستره وسیعی از سنگ‌های منشأ غنی با سن سیلورین و همچنین نهشته شدن سازند دشتک به عنوان پوش‌سنگ، زمینه‌سازهای اصلی تشکیل این مخزن عظیم هیدروکربنی در منطقه می‌باشند. همچنین اتصال هیدرولیکی واحدهای مخزنی دو سازند کنگان و دالان سبب شده است که به طور پیوسته به عنوان یک مخزن گازی در نظر گرفته شوند و تنها بر مبنای ویژگی‌های مخزنی و سکنس استراتیگرافی به چهار واحد مخزنی K1, K2, K3, K4 تفکیک می‌گردند. مطالعات انجام گرفته حکایت از آن دارد که تغییرات ضخامت و لیتولوژی این واحدهای مخزنی در جهت افقی ناچیز بوده و پارامترهای مخزنی به شدت تحت کنترل دیاژنهای قبل از تدفین به ویژه آبشویی و دولومیتی شدن قرار دارند. از طرف دیگر سیمان‌شدگی منافذ و شکستگی‌ها با انیدریت نیز نقش مهمی در کاهش کیفیت مخزنی این واحدها ایفا می‌نمایند. به طور کلی در میان عوامل زمین‌ساختی مؤثر در شکل و موقعیت منطقه خاورمیانه به نظر می‌رسد که ساختمان اولیه و اصلی پی‌سنگ بیشترین اثر را در پیدایش ساختار پارس جنوبی داشته و سایر عوامل همچون جنبش‌های نمک و حرکات کوهزایی میوسن میانی (کوهزایی زاگرس) ضعیف‌تر عمل کرده‌اند (خان‌محمدی و شرکتی، ۱۳۸۹).

## روش کار

به دلیل پیچیده بودن سیستم‌های طبیعی، فهم و درک کامل آن‌ها بسیار مشکل می‌باشد. مدل‌سازی کوششی برای ساده نمودن این پیچیدگی‌هاست. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های مدل‌سازی به صورت یکی از ارکان اصلی در مطالعات جامع مخازن هیدروکربنی تبدیل شده است و در اکثر شرکت‌های نفتی دنیا به آن پرداخته می‌شود. در این پژوهش با استفاده از اطلاعات چاه‌نگاری و آنالیز مغزه‌ها و با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی پی در پی، مدل‌سازی همزمان خواص پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی) در میدان گازی پارس جنوبی صورت پذیرفت. روش شبیه‌سازی زمین‌آماري گوسی پی در پی (Sequential Gaussian Simulation) که به اختصار SGS نامیده می‌شود یکی از روش-

های شبیه‌سازی تصادفی می‌باشد که از قوانین زمین‌آمار برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی پارامترهای پتروفیزیکی مخزنی در سه بعد استفاده می‌کند، این روش ساده، انعطاف‌پذیر و کارآمدی قابل قبولی دارد. برای اعمال و استفاده از این روش باید مراحل طی شود، که این مراحل شامل (مراحل انجام شده در این پژوهش):

۱ - ارزیابی اولیه داده‌های مورد استفاده: در مرحله ارزیابی و آماده‌سازی داده‌ها، ابتدا می‌بایست داده‌های Null (مقادیر ۹۹۹/۲۵- در داده‌های رقومی نمودارهای چاه‌پیمایی) و Bad Hole flag (فواصلی که تفاوت مقادیر نمودار کالیپر و قطر سر مته در آن‌ها بیشتر از ۱/۵ اینچ است، که این فواصل نشان‌دهنده نواحی ریزشی در دیواره چاه‌اند) حذف شوند. سپس به منظور پردازش صحیح داده‌ها، قبل از هر عملی باید دقت شود که نگاره‌های موجود کاملاً واسنجی (کالیبره) و نسبت به محیط، تصحیح شده باشند و در ادامه ابتدا عمل تطابق عمق بین نمودارها (Depth Shifting) و همچنین تطابق عمق بین نمودارها و مغزه (Depth Matching) صورت گیرد. در این پژوهش تمامی تصحیحات محیطی و تطابق عمق بین نمودارهای چاه‌پیمایی با استفاده از نرم‌افزار ژئولاگ انجام پذیرفت.

۲ - محاسبه تخلخل و تراوایی با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیز مغزه‌ها و نگاره‌های پتروفیزیکی مختلف در محل هر کدام از چاه‌های مورد مطالعه.

۳ - ترسیم نمودار نیمه لگاریتمی تخلخل - تراوایی برای هر کدام از زون‌های مخزنی و تعیین ضریب همبستگی و نحوه ارتباط پارامترهای تخلخل و تراوایی در زون‌های مخزنی میدان گازی پارس جنوبی.

۴ - ساخت مدل چاه‌های میدان.

۵ - مدل‌سازی ساختمانی مخزن و شبکه‌بندی آن.

۶ - تعریف یک سری ویژگی یا به طور کلی آنالیز داده‌ها که شامل مراحل؛ درشت‌نمایی، نرمال‌سازی، حذف روند و تعریف ساختار فضایی (ترسیم واریوگرام) برای داده‌ها می‌باشد.

۷ - تهیه مدل سه بعدی تخلخل و تراوایی در میدان هیدروکربنی مورد مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی پی در پی.

۸ - تهیه نقشه‌های میانگین توزیع تخلخل و تراوایی در میدان گازی مورد مطالعه.

۹ - صحت‌سنجی مدل‌های سه بعدی ترسیم شده (تطابق بین نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های موجود در چاه‌ها).

در ادامه به تشریح مهم‌ترین مراحل انجام شده در این پژوهش پرداخته می‌شود، البته لازم به ذکر است که چون ورود تفصیلی حتی به یکی از موضوعات ارائه شده در ذیل، متضمن آنچنان وسعتی می‌باشد که به هیچ وجه در قالب چنین مقالاتی نمی‌گنجد، لذا در نهایت چاره‌ای نبود جز اینکه ارائه مطالب مورد نظر به صورت اختصار و کاربردی مطرح شود. بدیهی است ضرورت دارد که علاقه‌مندان به دانش زمین‌آمار و پتروفیزیک، در مراجعه به منابع مختلف معلومات مورد نیاز را بیشتر کسب نمایند.

## محاسبه تخلخل و تراوایی در محل چاه‌های مورد مطالعه

تخلخل و تراوایی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی می‌باشند که تعیین دقیق آن‌ها در میادین و مخازن هیدروکربنی از جایگاه ویژه‌ای در پروژه‌های اکتشاف، بهره‌برداری و توسعه این میادین برخوردار است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های حاصل از آنالیز مغزه‌ها، میزان دقیق تراوایی در محل چاه‌های مورد مطالعه در میدان گازی پارس جنوبی محاسبه شد. همچنین با استفاده از نگاره‌های چاه‌پیمایی و توسط نرم‌افزارهای ژئولاگ و پترل، میزان دقیق تخلخل در محل هر کدام از

جنوبی در محل چاه‌های مورد مطالعه برابر با ۱۰/۵۱ درصد می‌باشد (شکل ۲) (نتایج محاسبه تخلخل برای هر یک از زون‌ها در جدول شماره ۱ ارائه شده است).

همچنین بر اساس نتایج حاصل از آنالیز مغزه‌ها در میدان گازی پارس جنوبی میزان تراوایی در محل چاه‌های مورد مطالعه در سازند کنگان برابر با ۱۸ میلی-داریسی، میزان تراوایی در بخش بالایی سازند دالان برابر با ۶۰ میلی-داریسی و میانگین تراوایی سنگ مخزن میدان گازی پارس جنوبی در محل چاه‌های مورد مطالعه برابر با ۴۹ میلی-داریسی می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱. میانگین تخلخل و تراوایی محاسبه شده در محل چاه‌های مورد مطالعه.

میانگین تراوایی (میلی‌داریسی)	میانگین تخلخل (درصد)	میانگین ضخامت (متر)	زون
۱۱	۷/۱۵	۱۱۰	K1
۶۲	۸/۴۷	۴۰	K2
۵۰	۸/۴۱	۱۴۶	K3
۶۱	۱۶/۰۲	۱۲۰	K4
۴۹	۱۰/۵۱	۴۱۶	Total

### ارتباط تخلخل و تراوایی

هر چند که سازندها عموماً خیلی یکنواخت و همگن توصیف می‌شوند، ولی به طور خاص یک رابطه‌ی مشخص بین مقادیر تخلخل و تراوایی وجود ندارد. ارتباط بین تخلخل و تراوایی به صورت کیفی است و یک رابطه کمی مستقیم یا غیر مستقیم به هیچ وجه بین آن‌ها وجود ندارد. ممکن است که یک نمونه با تخلخل خیلی بالا فاقد هرگونه تراوایی باشد مانند توفهای آتشفشانی یا برخی از شیل‌ها و رس‌ها. رابطه تخلخل و تراوایی در سنگ‌های کربناته به اندازه دانه‌ها، ماتریس سنگ، اندازه فضای بین ذره‌ای منافذ، میزان شکستگی‌ها، حفره‌های انحلالی و وجود یا عدم وجود حفره‌های مرتبط بستگی دارد و اگر چه تخلخل ایجاد شده توسط شکاف‌های طبیعی ناچیز است (کمتر از ۳ درصد) ولی تخلخل مؤثر و به دنبال آن میزان تراوایی افزایش چشمگیری خواهد یافت (قاسم‌العسکری، ۱۳۹۰).

در این پژوهش به منظور یافتن رابطه‌ای بین تخلخل و تراوایی، نمودار نیمه لگاریتمی که تراوایی را بر حسب تخلخل نشان می‌دهد با استفاده از نرم‌افزار اکسل برای زون‌های مخزنی مورد مطالعه ترسیم شد. در واقع وقتی تابع مشخصی مانند  $Y = X^2 + 1$  را در اختیار داریم، به راحتی با قرار دادن مقادیر مختلف در  $X$  مقادیر مختلف برای  $Y$  را به دست می‌آوریم، اما مواردی پیش می‌آید که به فرآیندی برعکس نیاز داریم. یعنی مجموعه‌ای از  $X$  و  $Y$  را در اختیار داریم و می‌خواهیم بدانیم چه رابطه‌ای به صورت فرمولی می‌توان بین آن‌ها برقرار کرد (مروج، ۱۳۹۰). به این منظور ابتدا نمودار داده‌های تخلخل و تراوایی را توسط نرم‌افزار اکسل رسم کرده و سپس نوع برازشی که انجام می‌شود (نوع فیت کردن) مشخص می‌شود. در این پژوهش به منظور تعیین رابطه‌ی (ضریب همبستگی  $R^2$ ) بین

چاه‌ها محاسبه شد. تخلخل یکی از دو پارامتر ضروری برای یک سنگ مخزن هیدروکربنی است. که معمولاً با حرف لاتین  $\phi$  نشان داده می‌شود و عبارت است از نسبت حجم فضاهای خالی به حجم کل سنگ. در مخازن هیدروکربنی حجم فضاهای خالی توسط سیالاتی نظیر گاز، نفت و آب اشغال شده است. بیشتر مخازن تخلخلی در محدوده ۵ تا ۳۰ درصد دارند، تخلخل‌های کمتر از ۵ درصد به ندرت انباشته‌ی اقتصادی ایجاد می‌کنند و تخلخل بیشتر از ۳۵ درصد خیلی نادر است (رضایی، ۱۳۸۴). به طور معمول برای تعیین تخلخل دو راه وجود دارد، روش اول اندازه‌گیری مستقیم تخلخل با انجام آزمایشات بر روی مغزه‌هاست که روشی دشوار، پیچیده و پرهزینه می‌باشد. روش دوم که روشی غیر مستقیم است استفاده از نگاره‌های چاه‌پیمایی است. برای محاسبه تخلخل از نگاره‌های تخلخل یعنی نوترون، چگالی و سونیک استفاده می‌شود. تخلخل را می‌توان از یک نگار و یا ترکیبی از نگاره‌های مختلف به دست آورد. به طور کلی برای محاسبه تخلخل باید تصحیحات؛ ۱- محیطی، ۲- هیدروکربن و ۳- شیل صورت گیرد. به علت نامشخص بودن نوع ماتریکس عملاً نمی‌توان از یک نگار، تخلخل را به طور دقیق مشخص کرد. در عوض با به کارگیری دو نگار می‌توان تأثیر لیتولوژی را تا حدودی مرتفع کرد. برای این کار با رسم دو پارامتر در مقابل هم و ترسیم خطوط مربوط به لیتولوژی رایج (ماسه، آهک و دولومیت) کراس پلات‌هایی حاصل می‌شود که علاوه بر لیتولوژی می‌توان تخلخل را نیز محاسبه کرد. در این پژوهش اندازه‌گیری تخلخل با استفاده از کراس پلات نوترون - چگالی انجام شده است (شکل ۱). این کراس پلات مهمترین و دقیق‌ترین کراس پلاتی است که برای تعیین تخلخل به کار می‌رود. برای حل گرافیکی تخلخل با استفاده از این چارت کافی است چگالی را در مقابل نوترون ترسیم کنیم. محل قرارگیری نقطه با توجه به فاصله نقطه از خطوط ماتریکس، نشانگر درصد لیتولوژی است که با رسم خطوط هم تخلخل که از وصل شدن تخلخل‌های یکسان در روی خطوط ماتریکس به دست می‌آید، می‌توان سه گروه خطوط هم تخلخل را تشخیص داد؛

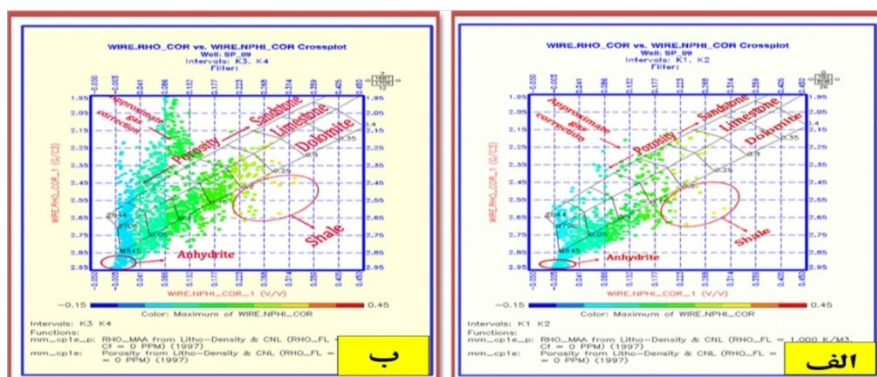
- ۱- خطوط هم تخلخل مربوط به ماتریکس آهک و ماسه.
- ۲- خطوط هم تخلخل مربوط به ماتریکس آهک و دولومیت.
- ۳- خطوط هم تخلخل مربوط به ماتریکس ماسه و دولومیت.

با ترسیم این خطوط مشاهده می‌شود که هر سه گروه تقریباً موازی هستند. موازی بودن خطوط نشانگر عدم وابستگی تخلخل به لیتولوژی است (رضایی و چهارزی، ۱۳۸۵). وجود هیدروکربن به ویژه گاز در سازند باعث می‌شود که نقاط به قسمت شمال غرب کراس پلات انتقال پیدا کنند. این انتقال در مسیری خطی به موازات خطوط هم تخلخل صورت می‌گیرد، بنابراین تأثیر آن بر تخلخل ناچیز است ولی در محاسبه لیتولوژی خطا ایجاد می‌کند. همچنین وجود شیل در سازند باعث انتقال نقاط به جنوب شرق کراس پلات می‌شود. بنابراین قبل از استفاده از کراس پلات لازم است هر دو نگار از نظر شیل و هیدروکربن تصحیح شوند. در نهایت نتایج حاصل از کراس پلات نوترون - چگالی در محل چاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که میانگین تخلخل در سازند کنگان برابر با ۷/۳۲ درصد، میانگین تخلخل در بخش بالایی سازند دالان (زون‌های مخزنی K3, K4) برابر با ۱۲/۷۸ درصد و با توجه به نتایج به دست آمده میانگین تخلخل در میدان گازی پارس

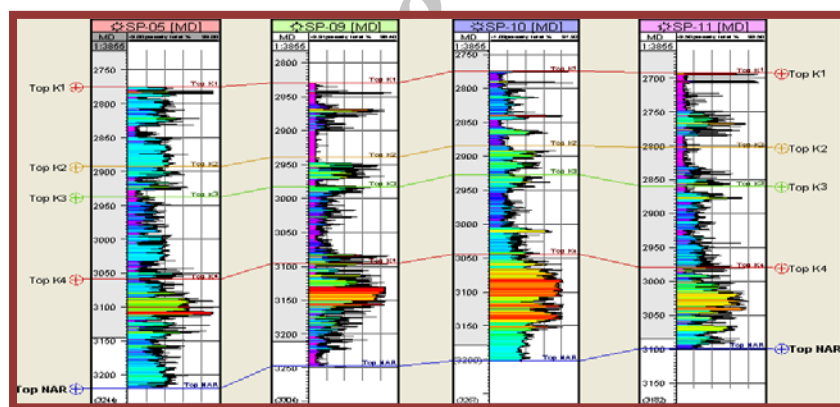
لگاریتمی می‌توان به نتایج زیر رسید:

- ۱ - تجمع نمونه‌هایی که دارای تخلخل نزدیک به صفر و تراوایی کم (کمتر از ۰/۱ میلی‌داری) هستند، نشان دهنده حضور انیدریت در میدان مورد مطالعه می‌باشد.
- ۲ - در نمونه‌هایی که با افزایش تخلخل، تراوایی نیز افزایش پیدا می‌کند، نشان دهنده تخلخل‌های مرتبط (Connected Porosity) می‌باشد.
- ۳ - نمونه‌هایی که دارای تخلخل ثابت و تراوایی افزایشنده هستند، وجود تخلخل‌های کانالی، ریز شکستگی‌ها و یا شکستگی‌ها را نشان می‌دهند.
- ۴ - در نمونه‌هایی که با افزایش تخلخل، تراوایی ثابت مانده است نشان دهنده تخلخل‌های جدا افتاده مانند تخلخل‌های قالبی می‌باشد (جهانی و همکاران، ۱۳۸۸).

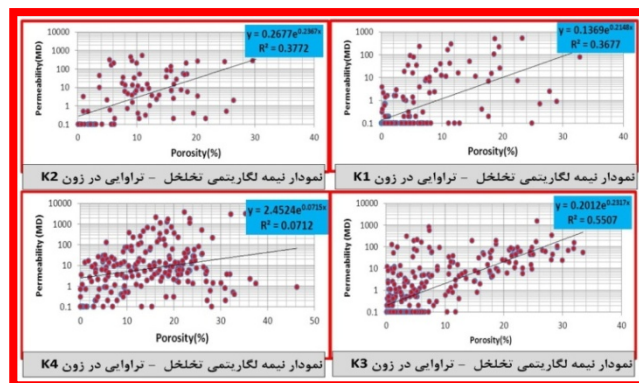
تخلخل و تراوایی از روش برازش نمایی (Exponential) استفاده شده است. ضریب همبستگی ( $R^2$ ) عددی است بین صفر و یک و هرچه این عدد به یک نزدیکتر باشد، درصد خطا کمتر و رابطه‌ی بین دو متغیر قوی‌تر می‌باشد. همانطور که در نمودارهای ترسیم شده ملاحظه می‌شود (شکل ۳)، خطی که کشیده شده است از تمام نقاط عبور نکرده است و داده‌ها نسبتاً پراکنده هستند و در تمام زون‌های مخزنی مورد مطالعه ارتباط مستحکمی بین داده‌های تخلخل و تراوایی دیده نمی‌شود به طوری که در تمام زون‌های مورد مطالعه، ضریب همبستگی به دست آمده بین تخلخل و تراوایی نسبتاً پایین می‌باشد. این ضرایب همبستگی نشان می‌دهد که ارتباط تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه، ارتباطی نسبتاً ضعیف می‌باشد (به استثنای زون K3) و به طور کلی از روی این نمودارهای نیمه



شکل ۱. الف - کراس پلات نوترون - چگالی سازند کنگان (K1, K2). ب - کراس پلات نوترون - چگالی سازند دالان (K3, K4).



شکل ۲. نمودار تخلخل و زون‌بندی انجام شده برای چاه‌های مورد مطالعه.



شکل ۳. نمودارهای نیمه لگاریتمی تخلخل در مقابل تراوایی در زون‌های مخزنی مورد مطالعه.

## مراحل مدل سازی

در این قسمت به اختصار مراحل اصلی و مهم مدل سازی مخزن مورد مطالعه به اختصار ارائه شده است.

**الف:** مدل سازی چاهها: اولین مرحله در کار مدل سازی، وارد کردن اطلاعات Well Head به محیط نرم افزار می باشد. در واقع این اطلاعات مربوط به مختصات چاهها، طرز قرارگیری آنها، فاصله میز دوار حفاری از سطح آب دریاها (KB)، نقطه ورودی چاه به مخزن، نقطه پایان حفاری هر چاه در مخزن و همچنین نشان (Symbol) می باشد. در ادامه اطلاعات مربوط به مسیر حفاری چاههای مورد مطالعه به محیط نرم افزار وارد گردید.

**ب:** ساخت نقشه های هم عمقی و هم ضخامت: در این مرحله اطلاعات نقشه های کنتوری افق های فوقانی Zون های K1, K2, K3, K4 و نار به صورت رقمی شده وارد محیط نرم افزار شده و نقشه های هم تراز عمقی (UGC) (شکل ۴) و نقشه های هم ضخامت که شامل نقشه های ایزوپک (Isopach Map) و ایزوکور (Isochore Map) می باشد، برای تمام زون های مورد مطالعه ترسیم شد.

**ج:** مدل سازی ساختمانی: مدل ساختاری (Structural Modeling) در واقع اسکلت زمین شناسی مخزن است که نقش حیاتی در توصیف مخزن ایفا می کند (Petro and Paulo, 2007). در حقیقت مدل سازی ساختمانی مخزن، ساخت چهارچوب مخزن و شبکه بندی آن است به طوری که کلیه اطلاعات و داده های ساختمانی به صورت یک مدل سه بعدی مشاهده می شود. مراحل اصلی مدل سازی ساختمانی انجام شده در این پژوهش شامل موارد ذیل می باشد؛ ۱ - تعیین محدوده پروژه، ۲ - شبکه بندی مخزن، ۳ - ساخت افق های زمین شناسی، ۴ - تعیین زون های مخزنی، ۵ - لایه بندی.

لازم به ذکر است که در اجرای مدل سازی ساختاری و پتروفیزیکی، تقسیم بندی مخزن به سلول های کوچکتر الزامی است، یک مدل شبکه بندی مخزن شامل سلول های سه بعدی است که هر یک از این سلول ها در برگزیده میانگینی از کلیه پارامترهای پتروفیزیکی می باشد (Soleimani, et, al., 2008). در این پژوهش ابعاد هر یک از سلول های ایجاد شده برابر با  $200 \times 200 \times 5$  متر بوده و در نهایت تعداد  $84999726$  میلیون سلول در محدوده پروژه مدل سازی در میدان مورد مطالعه ایجاد شد (شکل ۵).

**د:** درشت نمایی داده ها: داده های پتروفیزیکی به صورت داده های لاگ در مسیر چاه های حفاری شده می باشند. قبل از شبیه سازی، این پارامترها باید در ابعاد سلول های تعریف شده در مخزن میانگین گیری شوند، با این کار برای هر سلول یک عدد از پارامترهای مختلف تعلق می گیرد. روش های مختلفی برای محاسبه میانگین وجود دارد که بهترین آنها با توجه به ایستا بودن بیشتر پارامترهای پتروفیزیکی، روش میانگین گیری عددی می باشد (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۰).

**ه:** نرمال سازی و حذف روند داده ها: . بعد از درشت نمایی داده ها دو شرط اساسی در محاسبات زمین آماری پارامترهای پتروفیزیکی این است که، اولاً داده ها دارای توزیع نرمال بوده و ثانیاً روندی در آنها موجود نباشد. در توزیع نرمال داده ها دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک بوده و نمودار توزیع آنها به صورت زنگوله ای می باشد. شکل این نمودارها به گونه ای است که توزیع داده ها در دو طرف این منحنی ها به یک اندازه است و بیشتر داده ها در مرکز آن می باشند.

همچنین حذف روند داده ها طی سه مرحله صورت می گیرد: ابتدا حذف روند در جهت ضخامت قائم چاه به منظور حذف پیوستگی لیتولوژیکی داده ها، سپس حذف روند در جهت عمود بر لایه بندی به منظور حذف روند ناشی از محیط

رسوبی و نهایتاً حذف روند کلی میدان در جهت عمود بر محور طاقدیس به منظور حذف روند ناشی از تغییرات ناحیه ای (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۰).

**و:** تعیین ساختار فضایی برای داده ها: روش های تخمین زمین آماری پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی شامل دو مرحله می باشد؛ مرحله اول شامل شناخت و مدل سازی ساختار فضایی پارامتر پتروفیزیکی مورد تخمین است، در این مرحله مفهوم پیوستگی، همگنی، ناهمگنی و نهایتاً ساختار فضایی پارامتر پتروفیزیکی مورد تخمین به وسیله واریوگرام بررسی می شود. مرحله دوم، تخمین یا شبیه سازی زمین آماری پارامترهای پتروفیزیکی با استفاده از یکی از روش های زمین آماری مانند روش های کریجینگ، SGS و روش های دیگر است که به مشخصات مدل واریوگرام برازش شده در مرحله اول وابسته است و چنانچه در انتخاب مدل واریوگرام اشتباهی صورت گیرد در کلیه مراحل بعدی منعکس می گردد (حسنی پاک، ۱۳۸۹). واریوگرام، پایه بسیاری از محاسبات زمین آماری است و مهمترین ابزار بروز همبستگی فضایی بین داده ها است. در حقیقت واریوگرام، تغییر پذیری داده ها را با افزایش فاصله نشان می دهد که یک محور آن تغییر پذیری (واریانس) و محور دیگر فاصله می باشد (شعبانی، ۱۳۸۷). هرچه آرایش چاهها منظم تر، متقارن تر و مخزن همگن تر باشد واریانس تخمین کمیت های پتروفیزیکی سنگ مخزن کمتر خواهد بود و به طور کلی برای داده ها در سه جهت  $(X, Y, Z)$  در مخزن واریوگرام تعریف می شود که  $X$  و  $Y$  جهات افقی و  $Z$  جهت چاهها یا عمودی می باشد. انتخاب جهات افقی واریوگرام از روی نقشه واریانس مقاومت صوتی (Acoustic impedance) که خود نشانگر همگنی و ناهمگنی مخزن است صورت می گیرد به گونه ای که محور اصلی واریوگرام ( $X$ ) در جهت بیشترین همگنی (کمترین واریانس) و طول آن نیز برابر با نصف طول مخزن و محور فرعی ( $Y$ ) عمود بر این محور و طول آن نیز برابر با نصف عرض مخزن می باشد (شعبانی و همکاران، ۱۳۹۰). در این مطالعه به منظور تهیه نقشه واریانس امپدانس صوتی، ابتدا مقاومت صوتی را محاسبه کرده و سپس لاگ مقاومت صوتی برای همی زون های مخزنی تهیه شد و با استفاده از روش های درون یابی زمین آماری نقشه کنتوری امپدانس صوتی تهیه شده و در نهایت با استفاده از نقشه امپدانس صوتی، واریانس مپ امپدانس صوتی برای زون های مورد مطالعه ترسیم شد (شکل ۶). در حقیقت امپدانس صوتی وابسته به سرعت امواج صوتی و چگالی است، این دو پارامتر به سهولت و از طریق نمودارهای سونیک و چگالی قابل کسب هستند. برای محاسبه مقاومت صوتی، مقادیر سرعت امواج صوتی و چگالی در هم ضرب می شوند. پس از تعیین جهات افقی واریوگرام، به منظور تعیین ساختار فضایی پارامترهای پتروفیزیکی مورد بررسی در مخزن، برای هر یک از زون های مخزنی و هر کدام از پارامترهای مورد مطالعه در جهات اصلی، فرعی و عمقی واریوگرام ترسیم شده است (شکل ۷). البته لازم به یادآوری است که پس از محاسبه واریوگرام تجربی باید به واریوگرام حاصل از یک مدل تئوریک برازش شود. مدل های تئوریک مختلفی برای برازش به واریوگرام تجربی وجود دارد که رایج ترین این مدل ها، مدل کروی (spherical) است که در این پژوهش از این مدل استفاده شده است.

**ز:** مدل سازی همزمان خواص پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) با استفاده از روش شبیه سازی گوسی پی در پی (SGS): در این مرحله با استفاده از روش شبیه سازی SGS مدل سه بعدی تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه تهیه شده است. روش شبیه سازی گوسی پی در پی یا SGS یکی از روش های شبیه سازی تصادفی می باشد که از قوانین زمین آمار برای پیش بینی و شبیه سازی پارامترهای

این مهم توجه داشت که روش SGS دارای مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد که از جمله این مزیت‌ها می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱ - ارزیابی عدم قطعیت: روش SGS یک روش تخمین تصادفی است که از مدل‌ها و برنامه‌های پیش‌بینی در مخازن، تعداد زیادی از مدل‌ها با عدم قطعیت‌های مختلف که بین بهترین و بدترین مقادیر متغیرهای درگیر می‌باشد را بدست می‌دهد، که از این بین می‌توان بهترین حالت که میانگینی از مدل‌های مختلف است را به عنوان مدل نهایی انتخاب کرد.

۲ - اعمال ناهمگنی مخزن: روش SGS می‌تواند مدلی مبتنی بر واقعیت ناهمگنی در مخازن بسازد.

۳ - در نظر گرفتن داده‌های پیچیده: روش SGS می‌تواند دامنه وسیعی از داده‌های مختلف مثل داده‌های پتروفیزیکی را برای بدست آوردن مدل بهتر با هم ادغام نماید (Askari et al., 2010).

### نتایج و تفسیر مدل‌های سه بعدی تخلخل و تراوایی

با انجام مراحل ذکر شده مدل‌های سه بعدی تخلخل و تراوایی در میدان هیدروکربنی مورد مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی پی در پی تهیه شده است (شکل‌های ۸ و ۹). در نهایت به منظور ارزیابی میزان دقت مدل‌های ایجاد شده، نتایج مدل‌ها را با داده‌های موجود در چاه‌ها مقایسه نموده‌ایم (صحت-سنجی) که این نتایج حاکی از آن است که در اکثر مدل‌های ایجاد شده تطابق خوبی بین نتایج مدل‌ها و داده‌های واقعی برقرار می‌باشد (شکل ۱۰) (پیامنی، ۱۳۹۱). همچنین بر مبنای این مدل‌ها، نقشه‌های میانگین توزیع تخلخل و تراوایی برای میدان گازی پارس جنوبی ترسیم شد (شکل ۱۱). در کل نتایج حاصل از مدل‌سازی برای هر یک از زون‌ها و سازندهای مخزنی مورد مطالعه در جدول شماره ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد که در این مخزن، ارتباط مستحکمی بین تخلخل و تراوایی برقرار نیست. به نظر می‌رسد که کیفیت مخزنی در این میدان، گذشته از این که به دلیل وجود عوامل دیانزنی و رخساره‌هاست، همانند دیگر مخازن کربناته در منطقه خاورمیانه، مرهون وجود شکستگی‌های طبیعی می‌باشد. در این راستا با ترسیم نقشه‌های هم شیب سازندهای مخزنی مورد مطالعه مشخص شد، در نقاطی که تراکم شکستگی‌ها بیشتر است تراوایی نیز افزایش پیدا کرده است (شکل ۱۱). همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی زمین‌آماری پارامتر تخلخل نشان می‌دهد که در بخش‌های مرکزی، شمال، غرب و جنوب غربی میدان گازی پارس جنوبی میانگین تخلخل نسبت به سایر بخش‌های این میدان بیشتر می‌باشد (شکل ۱۱).

پتروفیزیکی مخزنی در سه بعد استفاده می‌کند. مراحل انجام الگوریتم SGS به صورت ذیل بیان می‌گردد (مهدوی، ۱۳۸۴):

۱ - انتقال داده‌های اولیه به یک توزیع استاندارد نرمال (یعنی تمام مراحل الگوریتم در یک فضای نرمال انجام می‌شود).

۲ - رسم واریوگرام با استفاده از داده‌های نرمال استاندارد.

۳ - در هر موقعیت  $u$ ، عملیات کریجینگ انجام شده و یک مقدار تخمین کریجینگ و واریانس کریجینگ مربوط به آن به دست می‌آید.

$$y^*(u) = \sum_{B=1}^n \lambda_B \cdot y(u)$$

۴ - بیرون کشیدن یک باقیمانده تصادفی  $R(u)$  که دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و واریانس  $\sigma_{SK}^2(u)$  باشد.

۵ - اضافه کردن باقیمانده به تخمین کریجینگ و دستیابی به یک مقدار شبیه‌سازی شده.

$$y_S(u) = y^*(u) + R(u)$$

مقدار شبیه‌سازی شده برابر است با  $y_S(u)$ .

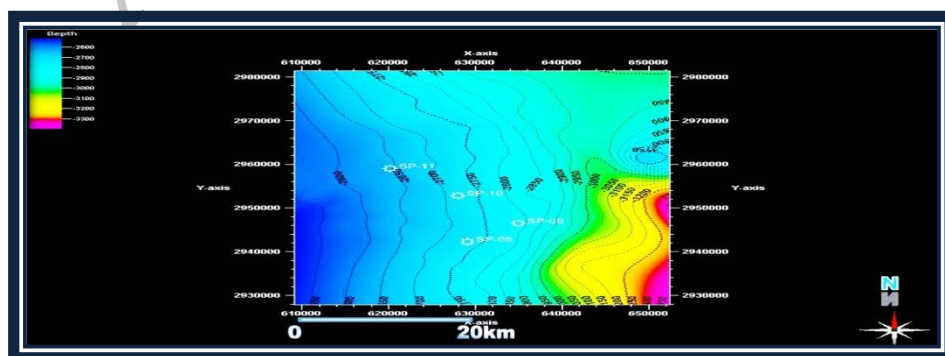
۶ - مقدار  $y_S(u)$  را به مجموعه داده‌ها اضافه کنید تا مطمئن شوید که کواریانس میان این مقادیر و تمام مقادیری که در ادامه پیش‌بینی (شبیه‌سازی) خواهند شد صحیح باشد. این ایده کلید شبیه‌سازی گوسی پی در پی است، یعنی با استفاده از مقادیر شبیه‌سازی شده قبلی به عنوان داده تا کواریانس در میان تمام مقادیر شبیه‌سازی شده قابل دوباره‌سازی شود.

۷ - پس از تولید مدل، تبدیل عکس نرمال تمام مقادیر داده‌ها و مقادیر شبیه‌سازی شده (یعنی برگشت از شکل توزیع نرمال به شکل توزیع اولیه).

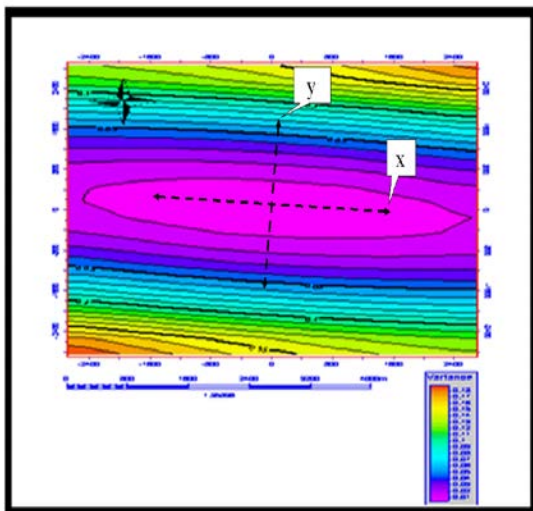
۸ - ایجاد هر تحقق با تکرار عملیات شبیه‌سازی شده و تغییر مقدار عدد تصادفی بسیار بزرگ، تفاوت در مقدار این عدد سبب ایجاد تفاوت میان مجموعه‌های هر بار شبیه‌سازی می‌شود زیرا در هر بار مسیر متفاوت گشتن، نقاط متفاوت باقیمانده‌ها و مقادیر شبیه‌سازی شده در عملیات شرکت می‌کنند (مهدوی، ۱۳۸۴).

به این ترتیب و با طی کردن مراحل ذکر شده شبیه‌سازی پارامتر پتروفیزیکی مورد نظر انجام می‌شود.

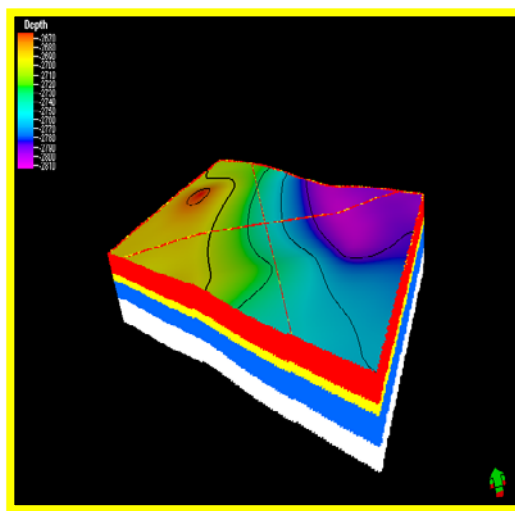
روش شبیه‌سازی SGS پرکاربردترین روش در شبیه‌سازی پارامترهای تخلخل و تراوایی می‌باشد و تا کنون نتایج قابل قبولی ارائه داده است. شاید بزرگترین مشکل برای استفاده از روش SGS، انتخاب شعاع جستجو باشد، انتخاب شعاع همسایگی کوچک منجر به شرطی‌سازی ضعیف داده‌ها می‌شود. اما باید به



شکل ۴. نقشه ساختاری هم تراز عمقی (UGC) از سر سازند کنگان و موقعیت چاه‌های مورد مطالعه بر روی آن.



شکل ۶. واریانس مپ امپدانس صوتی زون K1.



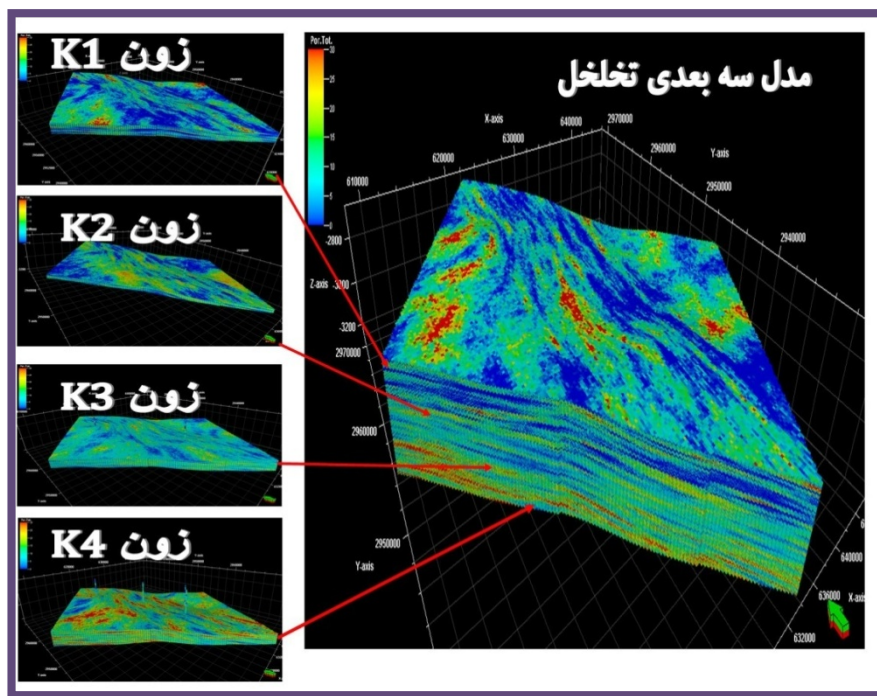
شکل ۵. مدل سه بعدی ساختمانی میدان گازی پارس جنوبی.



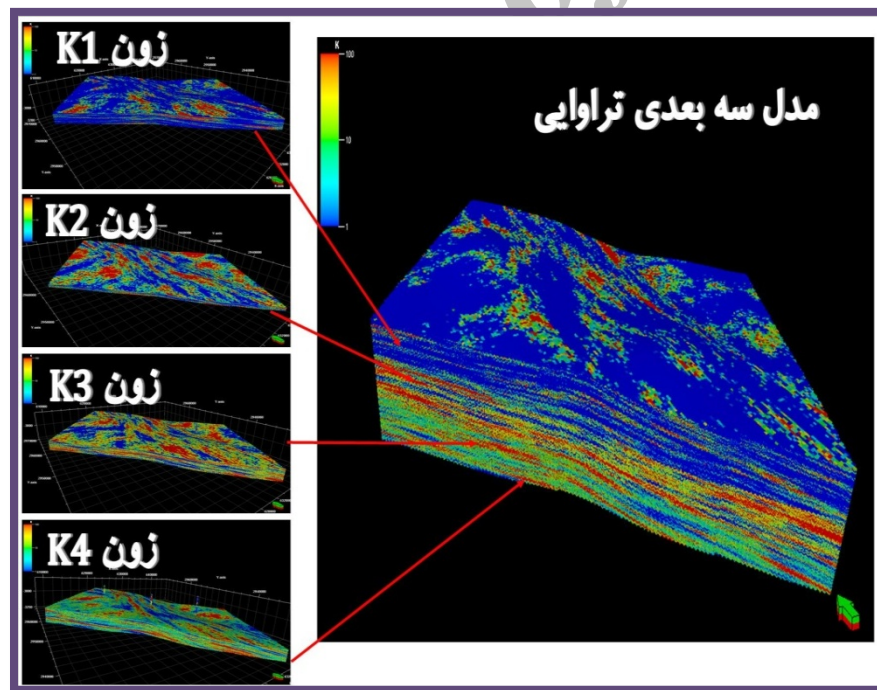
شکل ۷. الف - نمونه‌ای از واریوگرام‌های به کار رفته در این پژوهش ب - تصویری از اجزای نمودار یک واریوگرام.

جدول ۲. نتایج محاسبه و تخمین تخلخل و تراوایی در زون‌های مورد مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماري گوسی متوالی.

زون	میانگین ضخامت (متر)	میانگین تخلخل (درصد)	میانگین تراوایی (میلی داریسی)
K1	۱۱۰	۷	۱۶
K2	۴۰	۹/۱۴	۶۳
K3	۱۴۶	۸/۹۴	۶۰
K4	۱۲۰	۱۵/۵۳	۶۰
Total	۴۱۶	۱۰/۲۸	۵۰

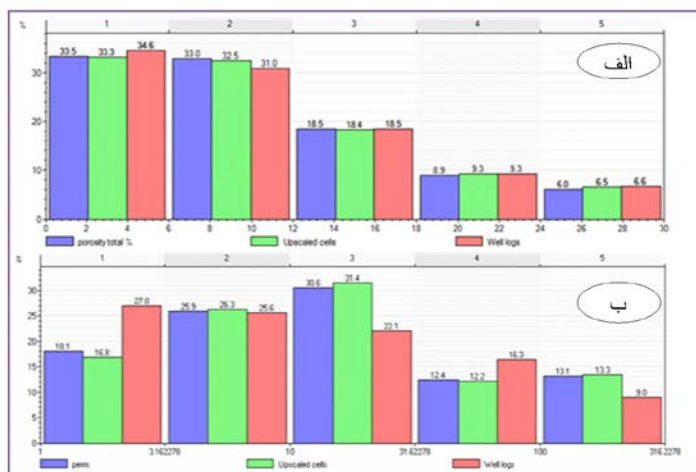


شکل ۸. مدل سه بعدی تخلخل در میدان گازی پارس جنوبی.

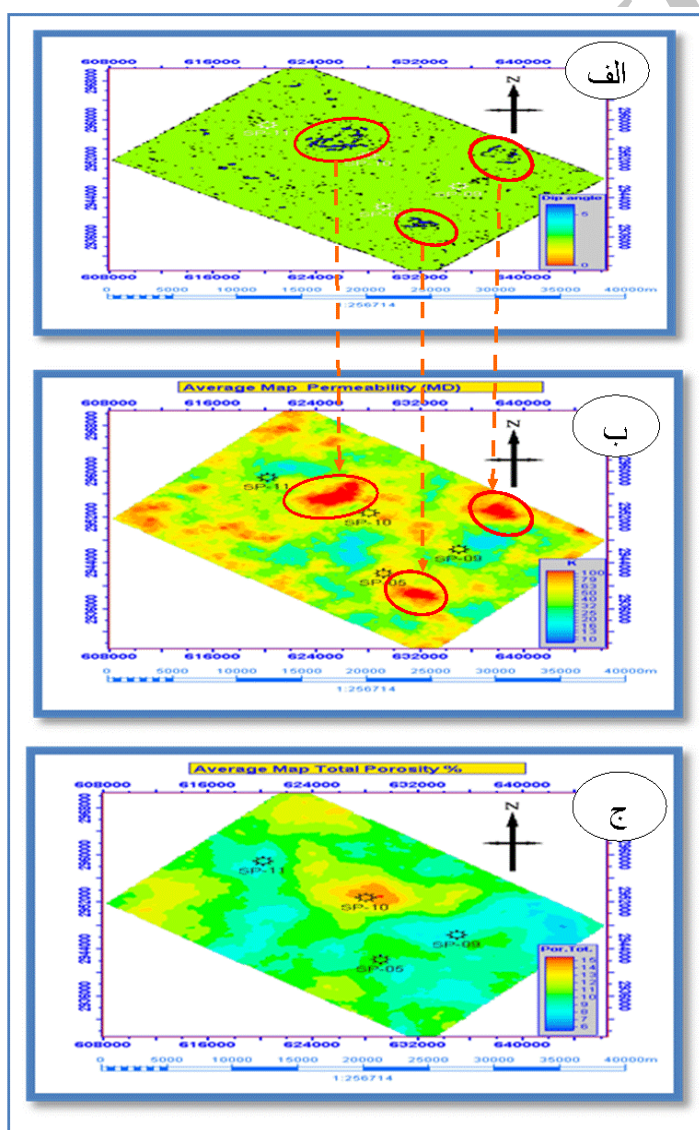


شکل ۹. مدل سه بعدی تراوایی در میدان گازی پارس جنوبی.





شکل ۱۰. الف- نتیجه صحت سنجی مدل تخلخل و ب- نتیجه صحت سنجی مدل تراوایی.



شکل ۱۱. الف- نقشه هم شیب سنگ مخزن میدان گازی پارس جنوبی (نقاط داخل کادر تراکم شکستگی‌ها را نشان می‌دهد) ب- نقشه میانگین توزیع تراوایی در میدان گازی پارس جنوبی و ج- نقشه میانگین توزیع تخلخل در میدان گازی پارس جنوبی.

## نتیجه گیری

۶ - نتایج حاصل از ارزیابی‌های پتروفیزیکی و مدل‌سازی زمین‌آماری پارامترهای تخلخل و تراوایی در میدان گازی پارس جنوبی نشان می‌دهد که ارتباط تخلخل و تراوایی در تمام زون‌های مخزنی این میدان ارتباطی نسبتاً ضعیف می‌باشد و افزایش تراوایی در سازندهای مورد مطالعه در ارتباط مستقیم با شکستگی‌ها می‌باشد به طوری که در مناطقی که شاهد افزایش تراکم شکستگی‌ها می‌باشیم، تراوایی نیز افزایش پیدا می‌کند که این امر نشان‌دهنده تأثیر مثبت شکستگی‌ها در افزایش میزان تراوایی و کیفیت مخزنی در میدان گازی پارس جنوبی می‌باشد.

۷ - در کل نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل‌ها نشان می‌دهد که تخمین و شبیه‌سازی تخلخل و تراوایی با استفاده از روش شبیه‌سازی زمین‌آماری گوسی پی در پی به خوبی انجام گرفته است، هر چند با مدل‌سازی صورت گرفته بر روی این خواص پتروفیزیکی ارتباط ضعیفی بین تخلخل و تراوایی در مخزن مورد مطالعه به دست آمده است که این امر می‌تواند بیانگر درجه ناهمگنی بالای سازندهای تشکیل دهنده میدان گازی پارس جنوبی باشد که در اثر تغییرپذیری گسترده خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی آن منطقه به وجود آمده است.

## تشکر و قدردانی

در پایان بر خود لازم می‌دانیم که از زحمات جناب آقای مهندس فرامرز شعبانی در پژوهشکده مطالعات مخازن و توسعه میادین، پژوهشکده صنعت نفت به دلیل راهنمایی‌های ارزنده‌شان در پردازش داده‌ها به کمک نرم‌افزار پترل صمیمانه تشکر و قدردانی نماییم.

۱ - با مدل‌سازی صورت گرفته در این پژوهش مشخص شد که میانگین ضخامت واحدهای مخزنی در کل گستره میدان گازی پارس جنوبی حدود ۴۱۶ متر می‌باشد و تغییرات ضخامت این واحدها در جهت افقی ناچیز می‌باشد.

۲ - نتایج حاصل از مدل‌سازی زمین‌آماری پارامتر تخلخل در میدان گازی پارس جنوبی نشان می‌دهد که میانگین تخلخل در سازند کنگان برابر با ۷/۲۸ درصد، میانگین تخلخل در سازند دالان برابر با ۱۲/۷۶ درصد و میانگین تخلخل در کل گستره مخزن برابر با ۱۰/۲۸ درصد می‌باشد.

۳ - نتایج حاصل از مدل‌سازی زمین‌آماری پارامتر تخلخل نشان می‌دهد که در بخش‌های مرکزی، شمال، غرب و جنوب غربی میدان گازی پارس جنوبی، میانگین تخلخل نسبت به سایر بخش‌های این میدان بیشتر می‌باشد.

۴ - تلفیق مدل‌های تخلخل در زون‌های مختلف نشان می‌دهد که تخلخل در سرتاسر میدان گازی پارس جنوبی از نظم خاصی پیروی نمی‌کند و از زونی به زون دیگر تغییر پیدا می‌کند.

۵ - در کل نتایج حاصل از مدل‌سازی زمین‌آماری پارامتر تراوایی در میدان گازی پارس جنوبی نشان می‌دهد که میانگین تراوایی در سازند کنگان برابر با ۱۹ میلی-داری و در سازند دالان برابر با ۶۰ میلی-داری و در نهایت در کل گستره مخزن میدان گازی پارس جنوبی میانگین تراوایی برابر با ۵۰ میلی-داری می‌باشد و بر مبنای میزان تراوایی این مخزن گازی در گروه سنگ‌های دارای کیفیت مخزنی متوسط تا خوب قرار می‌گیرد.

## منابع

- پایمانی، ک.، ۱۳۹۱، مدل‌سازی سه بعدی تخلخل، تراوایی و رخساره‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در میدان گازی پارس جنوبی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۴۴ صفحه.
- جهانی، د.، موحد، ب. و محمدی اکبری، ن.، ۱۳۸۸، ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای کنگان و دالان در میدان گازی پارس جنوبی، فصلنامه زمین، سال چهارم، شماره ۱، ص ۶۱ - ۷۹.
- حسینی‌پاک، ع.، ۱۳۸۹، زمین‌آمار، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ صفحه.
- خان‌محمدی، م. و شرکتی، ش.، ۱۳۸۹، تحلیل شکستگی‌ها در میدان گازی پارس جنوبی، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۷۷، ص ۴۳ - ۴۹.
- خواجه، م. م. و آقاییگی، م.، ۱۳۸۷، تخمین و شبیه‌سازی توزیع فضایی تراوایی یکی از مخازن جنوب ایران با استفاده از روش‌های زمین‌آماری، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۵۳، ص ۵۹ - ۶۲.
- رضایی، م. م.، ۱۳۸۴، زمین‌شناسی نفت، انتشارات علوی، ۴۲۷ صفحه.
- رضایی، م. ر. و چهارزی، ع.، ۱۳۸۵، اصول برداشت و تفسیر نگاره‌های چاه‌پیمایی، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۹۹ صفحه.
- سفیداری، ا.، ۱۳۹۱، مدل‌سازی هوشمند ژئوشیمیایی و پتروفیزیکی میدان گازی پارس جنوبی در قالب چینه نگاری سکاسی، دانشگاه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۷۴ صفحه.
- شعبانی، ف.، ۱۳۸۷، مدل‌سازی سه بعدی مخزن آسماری میدان نفتی شادگان با استفاده از نرم‌افزار IRAPRMS، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۱۶ صفحه.
- شعبانی، ف.، بشیری، غ.، کرامتی، م. و ایزدخواه، م.، ۱۳۹۰، شبیه‌سازی پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی با استفاده از روش SGS در یکی از میادین جنوب غربی ایران، پژوهش نفت، سال بیست و یکم، شماره ۶۶، ص ۵۳ - ۶۶.
- قاسم‌العسکری، م. ک.، ۱۳۹۰، اصول پتروفیزیک، انتشارات ستایش، ۴۹۹ صفحه.
- کاهکش، م. و روشنایین‌زاده، غ.، ۱۳۸۲، گزارشات حفاری در چاه شماره ۲ پارس جنوبی، مناطق نفت‌خیز جنوب.
- مهدوی، ر.، ۱۳۸۴، مدل‌سازی زمین‌آماری خواص پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی بخش میشریف میدان سیری D با استفاده از شبیه‌سازی به روش گوسی پی در پی و شاخص پی در پی، دانشگاه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۷۷ صفحه.
- مروج، م. ت.، ۱۳۹۰، کلید جدول، نمودار و ابزار گرافیکی در Excel، انتشارات کلید آموزش، ۱۴۳ صفحه.
- نجم‌آبادی، س.، ۱۳۷۲، گزارش نهایی زمین‌شناسی چاه شماره یک میدان گازی پارس جنوبی خلیج فارس، گزارش داخلی شرکت نفت و گاز پارس، ۴۳ صفحه.

- Askari, A.A., Karimi G.H., Shabani, F., Bashiri, G.R., Hashemi, S.M., Keramati, M., 2010, Integrated study of the fields in the Arvandan Area, RIPI,
- Chiles, J.P. and Deller, P., 1999, Geostatistics modeling spatial uncertainty: Wiley series in probability and statistics, Wiley and Sons.
- Deutsch, C.V., 2002, Geostatistical reservoir modeling, Oxford University Press.
- Deuth, C.V., and Journel, A.G., 1992, GSLIB: Geostatistical software Library and users guide, Oxford Univ., press, New York, 340 P.
- Dubrule, . 1998, Geostatistics in petroleum geology: Am. ASSN. Petr. Geol., AAPG continuing Education Course Notes Series, No . 38.
- Hass, A. and Ialix, J.r., 1974, Krigeage applied to geophysics, the answer to the problem of estimates and contouring; Geophysical Prospecting, 24, 49 – 69.
- Hass, A. and Jouselin, C., 1976, Geostatistics in the petroleum industry, in Advanced geostatistics in the mining industry, D. Reidel Pubi., 333 – 347.
- Hohn, M.E., 1998 , Geostatistics and petroleum geology, Computer methods in the Geo Sciences, Van nostrand riahold.
- Journel, A.G., and Gomez, H.J., 1989, Stochatics imaging of the Wilmington.
- Kelemme, H.D., 1984, Oil and gas Maps and sections of Arabian – Iranian basin, U.S. Geological Survvey open – file Report 84/0353.
- Petro, J.D., Paulo, J.R., 2007, Model – based Geostatistics, Springer Science, Library of Congress.
- Soleimani, B., Shabani, F., AmirBakhtiar, H., Haghparast, G., 2008, Fault effect at volumetric modeling in Shadegan Oil Field using RMS software, New York Science Journal, Vol, 1, No. 4, P.36.

Archive of SID