

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت - اکتشاف

تعیین مدل تخلخل - تراوایی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران

نگارنده

محسن ملائی

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر سید رضا قوامی ریابی

استاد مشاور

دکتر ابراهیم سفیداری

آذر ۱۳۹۶

شماره: ۳۴۹۶۲۰۵۷  
تاریخ: ۹۶۹/۲۶

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای محسن ملاتی با شماره دانشجویی ۹۴۱۶۹۰۴ رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف تحت عنوان تعیین مدل تخلخل - تراوایی در یکی از میدین نفتی جنوب ایران که در تاریخ ۱۳۹۶/۹/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

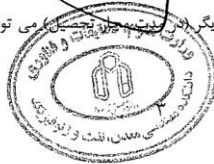
قبول (با درجه: بسیار خوب)  مردود   
نوع تحقیق: نظری  عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	۱- استاد راهنمای اول
	دانشیار	دکتر سید رضا قوامی ربایی	۲- استاد راهنمای دوم
	مربی	مهندس ابراهیم سفیداری	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر علی نجاتی کلاته	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر مهرداد سلیمانی منفرد	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر بهزاد تخم چی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶۹/۲۶

تجربه: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در صورت قبول در تصحیح) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم با بوسه بردستان پدرم:

به او که نمی دانم از بزرگی اش بگویم یا مردانگی، سخاوت، سکوت، مهربانی و ...

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

و برادرانم، که همواره در طول تحصیل مشکل زحمتم بودند و تکیه گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودشان مایه دلگرمی من می باشد. قلم لیسری از عشق به شماست

و خوشبختی مان تهنای آرزویم.

چیدم گللی زباغ ادب تا بروز عید

درباره گاه میر ادب پرور آورم

حیف است با خسان گل دانش کنی نثار

من گل نثار مردم دانشور آورم      شهریار

مَشْکُورِ قَدْر دَانِی

با ذکر حمد و سپاس خداوند، از زحمات کراتقدر عزیزانی که بنده را در قسمت‌های مختلف این پایان‌نامه یاری رسانده‌اند کمال تشکر را دارم.

مخاطبه این پایان‌نامه بر خود واجب می‌دانم که از زحمات استادان راهنما جناب آقای دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی و دکتر سیدرضا قوامی ریایی و مشاوره

جناب آقای دکتر ابراهیم سفیداری که در تمام مراحل انجام این کار، دلسوزانه مریاری رسانده‌اند تشکر و سپاس‌گذاری نماید.

## تعهد نامه

اینجانب محسن ملائی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین مدل تخلخل – تراوایی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر سید رضا قوامی ریابی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده

به طور کلی یک رابطه مشخص و دقیق بین مقادیر تخلخل و تراوایی وجود ندارد. ارتباط بین تخلخل و تراوایی به صورت کیفی است و یک رابطه کمی کلی و عمومی، به هیچ وجه بین آنها وجود ندارد. یکی از روش‌های مفید در طبقه‌بندی سنگ‌های مخزن و تفکیک زون‌های تولیدی و غیر تولیدی، تعریف زون‌های مخزنی بر اساس واحدهای جریان هیدرولیکی<sup>۱</sup> به کمک مفهوم آنالیز خوشه‌ای است که دیدگاهی نوین به تعریف نوع سنگ و زون‌بندی مخزن داشته و معایب زون‌بندی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی رایج را برطرف می‌کند. واحدهای جریان بخش پیوسته‌ای از یک حجم خاص مخزن است که در آن خواص زمین‌شناسی و پتروفیزیکی، یکسان هستند. در نتیجه پیش‌بینی دقیق واحدهای جریان برای دستیابی به خصوصیات پتروفیزیکی قابل اعتماد از یک مخزن امری لازم است. تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی روشی مناسب جهت بررسی و ارزیابی رابطه تخلخل-تراوایی در مخازن هیدروکربنی است. در این مطالعه به منظور ارائه رابطه تخلخل-تراوایی، ابتدا واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش‌های شاخص زون جریان<sup>۲</sup>، روش رخساره الکتریکی<sup>۳</sup>، روش هیستوگرام، روش گونه‌های سنگی ناپیوسته<sup>۴</sup>، روش خوشه‌بندی K-means، روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی<sup>۵</sup> و روش شاخص کیفیت مخزن<sup>۶</sup> در یک چاه میدان مورد مطالعه، تعیین گردید. برای تعیین واحدهای جریان و بررسی رابطه تخلخل-تراوایی از نرم‌افزار Excel و کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. علاوه بر این از نرم‌افزار Geolog به منظور تعیین واحدهای جریان با استفاده از رخساره‌های الکتریکی به کار برده شده است. نتایج به‌دست آمده تعداد متفاوت واحدهای جریان هیدرولیکی را نشان می‌دهد ولی در کل برای سادگی تفسیر نتایج حداقل ۷ واحد جریانی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از بررسی رابطه تخلخل-تراوایی در چاه مورد مطالعه با استفاده از روش‌های فوق حاکی از ضرایب همبستگی (یا ضرایب تعیین) بالاتر بین تخلخل و تراوایی در روش‌های شاخص زون جریان، روش DRT، روش خوشه‌بندی

<sup>۱</sup> Hydraulic flow units

<sup>۲</sup> Electrofacies

<sup>۵</sup> Hierarchical clustering

<sup>۲</sup> Flow zone index

<sup>۴</sup> Discontinuous rock types

<sup>۶</sup> Reservoir quality index

K-means، روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی و روش شاخص کیفیت مخزن است. با این حال تعیین واحدهای جریان در روش رخساره‌های الکتریکی حتی در حالتی که داده‌های تخلخل و تراوایی در دسترس نیستند به کمک نگارهای پتروفیزیکی امکان‌پذیر بوده است.

در بخش پایانی این تحقیق، تخلخل و تراوایی در مخزن میدان مورد مطالعه با استفاده از روش‌های زمین‌آماری به کمک نرم‌افزار Petrel مدل‌سازی شد که نتایج حاکی از آن است که تخلخل و تراوایی در سرتاسر میدان مورد مطالعه از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند و ارتباط بین تخلخل و تراوایی در تمام زون‌های مخزنی ارتباط نسبتاً ضعیفی می‌باشد. همچنین میانگین تخلخل و تراوایی در کل گستره مخزن به ترتیب ۷ درصد و ۲۴/۵ میلی‌داری می‌باشد.

کلمات کلیدی: رابطه تخلخل- تراوایی، رابطه کوزنی-کارمن، واحدهای جریان هیدرولیکی،

مدل‌سازی تخلخل و تراوایی، زمین‌آمار



## فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱- تعریف مسأله.....	۲
۲-۱- پارامترهای پتروفیزیکی.....	۲
۳-۱- سابقه تحقیق.....	۳
۴-۱- هدف و ضرورت انجام تحقیق.....	۹
۵-۱- روش انجام تحقیق.....	۱۱
۶-۱- ساختار پایان نامه.....	۱۲
۲- فصل دوم: بررسی نظری رابطه تخلخل - تراوایی.....	۱۳
۱-۲- مقدمه.....	۱۴
۲-۲- معادله کوزنی - کارمن و مشتقات آن.....	۱۴
۳-۲- مدل های تکامل تراوایی براساس تخلخل.....	۲۰
۴-۲- مدل تخلخل- تراوایی بر اساس قانون توان.....	۲۱
۵-۲- مدل های تخلخل-تراوایی براساس قانون نمایی.....	۲۳
۶-۲- تابع تراوایی براساس تنش و مفهوم آسیب به سازند.....	۲۳
۷-۲- مدل های کانال هم‌ارز.....	۲۴
۸-۲- مدل های شبکه خلل و فرج.....	۲۶
۹-۲- معادله آدین.....	۲۷
۱۰-۲- مفهوم کارایی جریان.....	۲۸

- ۲۸ ..... ۱۱-۲ مدل پیچاپیچی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی
- ۲۹ ..... ۱۲-۲ توسعه مدل پیچاپیچی به دست آمده
- ۳۰ ..... ۱۳-۲ انواع مدل‌ها براساس اندازه دانه‌ها یا ذرات رسوبی و کانی‌شناسی
- ۳۰ ..... ۱-۱۳-۲ معادله کرومبین و مونک
- ۳۱ ..... ۲-۱۳-۲ مدل برگ
- ۳۳ ..... ۳-۱۳-۲ مدل ون بارن
- ۳۵ ..... ۱۴-۲ مدل مربوط به کانی‌شناسی
- ۳۵ ..... ۱۵-۲ رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از تئوری هندسه فرکتالی
- ۳۵ ..... ۱-۱۵-۲ خصوصیت فرکتال محیط متخلخل
- ۳۷ ..... ۲-۱۵-۲ تشریح ارتباط تخلخل - تراوایی به وسیله مفهوم فراکتال
- ۳۸ ..... ۱۶-۲ بحث
- ۴۱ ..... ۱۷-۲ جمع‌بندی
- ۴۳ ..... ۳- فصل سوم: زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه
- ۴۴ ..... ۱-۳ مقدمه
- ۴۵ ..... ۲-۳ خلیج فارس و نواحی هیدروکربنی
- ۴۷ ..... ۳-۳ موقعیت و وضعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه
- ۴۸ ..... ۴-۳ تاریخچه حفاری میدان
- ۵۰ ..... ۵-۳ زمین‌شناسی ساختمانی
- ۵۱ ..... ۶-۳ چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه

۵۲	۳-۶-۱- سازند سرچاهان
۵۳	۳-۶-۲- سازند زاکین
۵۴	۳-۶-۳- سازند فراقون
۵۴	۳-۶-۴- سازند دالان
۵۵	۳-۷-۷- سازند کنگان
۵۶	۳-۷-۱- سازند دشتک
۵۷	۴- فصل چهارم: تجزیه و تحلیل داده‌های میدان مورد مطالعه
۵۸	۴-۱- مقدمه
۵۸	۴-۲- داده‌های میدان مورد مطالعه
۵۹	۴-۳- ارتباط تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه
۶۱	۴-۳-۱- تعیین رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی
۶۲	۴-۳-۱-۱- شاخص زون جریان (FZI)
۶۶	۴-۳-۱-۲- تعیین واحدهای جریان با استفاده از رخساره‌های الکتریکی
۶۸	۴-۳-۱-۲-۱- تعیین رخساره‌های الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار Geolog
۷۲	۴-۳-۱-۲-۲- تلفیق رخساره‌های الکتریکی
۷۴	۴-۳-۱-۳- بررسی رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از رخساره‌های الکتریکی
۷۸	۴-۳-۱-۳- تعیین واحدهای جریان با استفاده از روش نمودار هیستوگرام
۷۸	۴-۳-۱-۴- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با روش آنالیز احتمال نرمال
۸۲	۴-۳-۱-۵- تعیین واحدهای جریان با استفاده از روش گونه‌های سنگی ناپیوسته (DRT)

- ۸۳ ..... ۴-۳-۱-۶- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای
- ۸۴ .. ۴-۳-۱-۶-۱- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای K-means
- ۸۵ ..... ۴-۳-۱-۶-۱-۱- مجموع مربعات خطا
- ۸۷ ..... ۴-۳-۱-۶-۲- تعیین واحدهای جریان با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی
- ۹۲ ..... ۴-۳-۱-۷- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از شاخص کیفیت مخزن (RQI)
- ۹۴ ..... ۴-۴- مدل‌سازی تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه
- ۹۶..... ۴-۴-۱- مؤلفه‌ها و الگوریتم‌های اساسی در زمین‌آمار
- ۹۷ ..... ۴-۴-۲- واریوگرام
- ۱۰۰ ..... ۴-۵-۱- مراحل مدل‌سازی تخلخل و تراوایی
- ۱۰۰ ..... ۴-۵-۱- آماده‌سازی داده‌ها
- ۱۰۱ ..... ۴-۵-۲- بارگذاری داده‌ها
- ۱۰۱ ..... ۴-۵-۳- مدل‌سازی ساختاری
- ۱۰۲ ..... ۴-۵-۴- درشت‌نمایی
- ۱۰۳ ..... ۴-۵-۵- نرمال‌سازی و حذف روند داده‌ها
- ۱۰۴ ..... ۴-۵-۶- تعیین ساختار فضایی برای داده‌ها
- ۱۰۷ ..... ۴-۵-۷- مدل‌سازی هم‌زمان خواص پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی گوسی متوالی (پی در پی) (SGS)
- ۱۰۸ ..... ۴-۶- نتایج و تفسیر مدل‌های سه‌بعدی تخلخل و تراوایی
- ۱۱۱ ..... ۴-۷- جمع‌بندی

- ۵- فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات ..... ۱۱۳
- ۵-۱- نتیجه گیری ..... ۱۱۴
- ۵-۲- پیشنهادات ..... ۱۱۶
- ۶- منابع و مأخذ ..... ۱۱۷

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲) دیاگرام شماتیک از مدل پترسون (۱۹۸۳) ..... ۲۵
- شکل ۲-۲) مدل مفهومی از فضای خلل و فرج ..... ۲۶
- شکل ۳-۲) مدل شبکه ساده شده ..... ۲۷
- شکل ۴-۲) مدل تئوری برگ (۱۹۷۰) به همراه تخلخل، اندازه دانه و جورشدگی ..... ۳۳
- شکل ۱-۳) نواحی پنج گانه هیدروکربنی خلیج فارس به همراه میدان مورد مطالعه که در ناحیه سوم قرار گرفته است. .... ۴۷
- شکل ۲-۳) موقعیت، زون بندی و لیتولوژی میدان مورد مطالعه در خلیج فارس ..... ۴۹
- شکل ۳-۳) تعداد و محدوده فازهای توسعه‌ای میدان مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های حفر شده در میدان ..... ۵۰
- شکل ۴-۳) ستون چینه‌شناسی عمومی ناحیه مورد مطالعه ..... ۵۲
- شکل ۵-۳) برش چینه‌شناسی از رسوبات کامبرین تا ترشیاری در ناحیه بالا آمدگی قطر و ناحیه مرکزی صفحه عربی ..... ۵۴
- شکل ۱-۴) نمودار نیمه لگاریتمی تخلخل در مقابل تراوایی ..... ۶۱
- شکل ۲-۴) نمودار متقاطع چگالی در مقابل وزن مخصوص در چاه میدان مورد مطالعه ..... ۶۸
- شکل ۳-۴) هیستوگرام نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله آموزش برای ۲۵ و ۱۳ خوشه رخساره ..... ۷۰
- شکل ۴-۴) نمودار همبستگی نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله آموزش برای ۲۵ خوشه رخساره تلفیق شده و ۱۳ خوشه رخساره تلفیق نشده ..... ۷۰
- شکل ۵-۴) نمودار همبستگی نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله مدل‌سازی برای ۲۵ خوشه رخساره تلفیق شده ..... ۷۱
- شکل ۶-۴) نمودار همبستگی نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله مدل‌سازی برای

- ۱۳ خوشه رخساره ..... ۷۱
- شکل ۷-۴) نمودار توزیع تخلخل- تراوایی بر اساس خوشه رخساره ۱۳ برای هر یک از واحدهای جریان مربوط به مخزن مورد مطالعه در چاه SP\_15 (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۷۵
- شکل ۸-۴) نمودار توزیع تخلخل- تراوایی بر اساس خوشه رخساره ۲۵ تلفیق شده برای هر یک از واحدهای جریان مربوط به مخزن مورد مطالعه در چاه SP\_15 (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۷۶
- شکل ۹-۴) نمایش رخساره‌های الکتریکی حاصل از روش MRGC در چاه SP\_15 به همراه لاگ‌های مورد استفاده ..... ۷۷
- شکل ۱۰-۴) آنالیز هیستوگرام روی داده‌های لگاریتمی شاخص زون جریان ..... ۷۸
- شکل ۱۱-۴) نمودار احتمال نرمال با استفاده از روش شاخص زون جریان و تعیین ۷ واحد جریان هیدرولیکی در داده‌های مورد مطالعه برای چاه SP\_15 ..... ۷۹
- شکل ۱۲-۴) نمودار احتمال نرمال با استفاده از روش شاخص زون جریان و تعیین ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی در داده‌های مورد مطالعه برای چاه SP\_15 ..... ۸۰
- شکل ۱۳-۴) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی در چاه SP\_15 با استفاده از روش آنالیز احتمال نرمال (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۸۱
- شکل ۱۴-۴) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی در چاه SP\_15 با استفاده از روش آنالیز احتمال نرمال (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۸۲
- شکل ۱۵-۴) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۸ واحد هیدرولیکی با استفاده از روش DRT ... ۸۳
- شکل ۱۶-۴) نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی ..... ۸۷

- شکل ۴-۱۷) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی با روش K-means (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۸) دندروگرام استخراج شده از داده‌های FZI در حالت تفکیک ۶ خوشه مربوط به چاه SP\_15 ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۹) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۰) نمودار شاخص کیفیت مخزنی در مقابل تخلخل نرمالیزه شده در چاه SP\_15 ... ۹۳
- شکل ۴-۲۱) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای هر یک از واحدهای جریان در چاه SP\_15 با استفاده از روش شاخص کیفیت مخزن (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است). ..... ۹۴
- شکل ۴-۲۲) مثالی از یک واریوگرام مورد استفاده در این پژوهش ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۳) نقشه هم‌تراز عمقی (UGC) از الف) سازندهای کل میدان و ب) سرسازند کنگان به همراه موقعیت چاه‌های مورد مطالعه بر روی آنها ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۴) نمایی از شبکه سلولی ایجاد شده به همراه افق‌های ساخته شده ..... ۱۰۲
- شکل ۴-۲۵) چگونگی حذف روند داده‌ها در الف) در جهت ضخامت چاه ب) در جهت عمود بر لایه‌بندی ج) در جهت کلی میدان عمود بر محور تاقدیس، برای مدل‌سازی داده‌های تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه ..... ۱۰۴
- شکل ۴-۲۶) نمونه‌ای از واریوگرام‌های به کار رفته در این پژوهش برای پارامتر تراوایی ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۷) نمونه‌ای از واریوگرام‌های به کار رفته در این پژوهش برای پارامتر تخلخل ..... ۱۰۶
- شکل ۴-۲۸) مدل سه‌بعدی تخلخل در میدان مورد مطالعه برای زون‌های: الف)  $K_1$ ، ب)  $K_2$ ، ج)  $K_3$  و د)  $K_4$  ..... ۱۰۹
- شکل ۴-۲۹) مدل سه‌بعدی تراوایی در میدان مورد مطالعه برای زون‌های: الف)  $K_1$ ، ب)  $K_2$ ، ج)



۱۱۰ ..... K<sub>3</sub> و K<sub>4</sub>

۱۱۰ ..... (الف) نتیجه صحت‌سنجی مدل تراوایی و (ب) نتیجه صحت‌سنجی مدل تخلخل

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲) معادله کوزنی- کارمن و اصلاح آن برای محیط‌های متخلخل مختلف ..... ۳۹
- جدول ۱-۴) عمق مغزه‌ها و معادل لاگ‌ها در مغزه به همراه داده‌های مغزه و لاگ‌ها ..... ۵۹
- جدول ۲-۴) نمونه‌ای از داده‌های استفاده شده در تعیین واحدهای جریان به روش FZI ..... ۶۵
- جدول ۳-۴) رخساره‌های الکتریکی تفکیک شده با روش MRGC برای ۱۳ خوشه رخساره ..... ۷۳
- جدول ۴-۴) رخساره‌های الکتریکی تفکیک شده با روش MRGC برای ۲۵ خوشه رخساره تلفیق شده ..... ۷۳
- جدول ۵-۴) نحوه تلفیق رخساره‌های الکتریکی برای ۲۵ خوشه به همراه مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط تخلخل ..... ۷۳
- جدول ۶-۴) تفکیک رخساره‌های مخزن بر اساس تغییرات مقادیر تخلخل ..... ۷۴
- جدول ۷-۴) مقادیر FZI برای ۷ و ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی ..... ۸۰
- جدول ۸-۴) مقادیر میانگین هر واحد جریان به روش DRT ..... ۸۳
- جدول ۹-۴) مقادیر خطای محاسبه شده به ازای تعداد واحد جریان هیدرولیکی ..... ۸۶

فصل اول

کلیات

## ۱-۱- تعریف مسأله

شناخت هرچه بیشتر مخازن نفت و گاز و پیش‌بینی امکان ارزیابی عملکرد مخزن به جهت برنامه‌ریزی‌های دقیق، برای توسعه و بهره‌برداری از میدان امری اجتناب‌ناپذیر است. تخلخل و تراوایی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی هستند که ارزیابی دقیق آنها در مخازن هیدروکربنی به منزله یک ابزار مهم و مؤثر برای کارشناسان صنعت نفت در امر مطالعه جامع، مخصوصاً مخازن و فرآیند تولید و مدیریت مخزن محسوب می‌شود [۱].

از طرف دیگر مدل‌های سه‌بعدی مخزن تصویری رقومی از پراکندگی خواص مخزنی (رخساره‌ها، تخلخل، اشباع آب، حجم شیل، چگالی و نوع سنگ) را در اختیار ما قرار می‌دهد که با استفاده از آنها می‌توان به بسیاری از مسائل از جمله ارزیابی حجم هیدروکربن برجای مخازن، طراحی چاه‌های جدید، ایجاد تطابق چینه‌شناسی در بین چاه‌های حفر شده، آنالیز عدم قطعیت از نتایج حاصل شده، برآورد میزان هزینه‌ها، شبیه‌سازی دینامیک مخزن، شناسایی درز و شکاف مخزن پاسخ داد. همچنین در مقیاس بزرگتر می‌توان تولید از مخازن پیچیده و طرح‌های توسعه میادین و تکنیک‌های جدید تولید از مخزن را پوشش داد [۲]. تاکنون مطالعات بسیاری در خصوص تعیین رابطه تخلخل و تراوایی صورت گرفته است که به لحاظ پیچیدگی، ارتباط میان این دو پارامتر مهم اغلب در شرایط خاص بوده است. روابط کوزنی-کارمن<sup>۱</sup>، وایلی - رز<sup>۲</sup> و کوتس-دومانویر<sup>۳</sup>، از جمله روابط متداول در تعیین رابطه تخلخل و تراوایی می‌باشند [۳].

## ۱-۲- پارامترهای پتروفیزیکی

پارامترهای پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی و نحوه توزیع منافذ در سنگ مخزن کربناته به هر دو عامل رسوب‌گذاری و دیاژنز رسوب بستگی دارد. این پارامترها بیشتر از نوع ثانویه یا دیاژنزی بوده، اگرچه منافذ اولیه باقیمانده نیز وجود دارد. کربنات‌ها به علت اجزاء پیچیده کربناته و همچنین ترکیبات

<sup>۱</sup> Kozeny-Carman

<sup>۲</sup> Wyllie- Rose

<sup>۳</sup> Coates-Dumanoir

دیاژنز دارای انواع متعددی از ساختار منافذ هستند. در کربنات‌ها، تخلخل و تراوایی به‌خوبی با اندازه دانه‌ها و جورشدگی مرتبط نیستند. تخلخل و تراوایی به‌طور وسیع توسط محیط رسوبی اولیه و همچنین فرآیندهای دیاژنزی ثانویه کنترل می‌شوند. بنابراین ارتباط خواص پتروفیزیکی با نوع سنگ بسیار مشکل و پیچیده است. به‌طور کلی رابطه منحصر به فردی میان تخلخل سنگ و تراوایی وجود ندارد. با این حال تلاش‌های زیادی به منظور ایجاد رابطه میان این دو پارامتر توسط محققین انجام شده است. در ادامه مختصری در زمینه کارهای مرتبط انجام شده توسط محققین مختلف آورده شده است [۴].

### ۱-۳- سابقه تحقیق

سابقه این تحقیق را می‌توان در پنج بخش به شرح زیر خلاصه کرد:

الف) تخمین و پیش‌بینی پارامترهای پتروفیزیکی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به داده‌های کم موجود از مخزن در مقایسه با حجم مخزن، همواره مهندسان در پی یافتن روشی برای تخمین فضایی پارامترهای مهم در فضای مخزن بوده‌اند [۵]. لویز<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) به مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی میداین نفتی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی برای پیش‌بینی خواص زمین‌شناسی پرداختند و نشان دادند که عملکرد روش شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی خواص مخزنی امیدوارکننده است [۶]. برقی (۱۳۸۶) در یک تحقیق تراوایی را با به کارگیری روش رگرسیون چندمتغیره از روی داده‌های لاگ در یکی از میداین نفتی جنوب غرب ایران محاسبه کرده و نتایج برآزش آن به داده‌های واقعی نشان‌دهنده روش مناسب و تخمین مطلوب آن می‌باشد [۷]. موسوی (۱۳۹۱) با استفاده از رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی به تخمین تخلخل به‌دست آمده از نگار<sup>۲</sup> NMR از نشانگرهای لرزه‌ای پرداخته است و نشان داد که استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در مقابل رگرسیون خطی چندگانه، دارای ضریب همبستگی بالاتر و خطای کمتر در تخمین تخلخل است [۸].

<sup>۱</sup> Lopez

<sup>۲</sup> Nuclear magnetic resonance

## ب) مدل‌سازی زمین‌آماری تخلخل و تراوایی

روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌آماری به منظور ارزیابی خواص پتروفیزیکی تاکنون توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است. ماترون<sup>۱</sup> بنیانگذار متغیرهای ناحیه‌ای و علم زمین‌آمار می‌باشد پیشرفت مدل‌سازی احتمال‌گرای سه‌بعدی مخزن بر پایه شبیه‌سازی را می‌توان در سال‌های میانی دهه ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ در کارهای جورنل و گومز<sup>۲</sup> (۱۹۸۹) مشاهده کرد [۹]. به دنبال آن کارهای زیادی برای پیشرفت علم زمین‌آمار و مدل‌سازی تخلخل و تراوایی با استفاده از علم زمین‌آمار صورت گرفته که از آن جمله می‌توان به کارهای دویان<sup>۳</sup> (۱۹۸۸)، وانگ<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۹۸)، دبرول<sup>۵</sup> (۱۹۹۸)، هان<sup>۶</sup> (۱۹۹۸)، دواچ<sup>۷</sup> (۲۰۰۲) و سریسوریان و پونجان<sup>۸</sup> (۲۰۰۷) اشاره کرد [۱۰-۱۵]. ژائو<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل‌سازی زمین‌آمار، خواص مخزنی شامل ضخامت، تخلخل و تراوایی را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که در مدل‌سازی ضخامت، تخلخل و تراوایی روش کوکریجینگ<sup>۱۰</sup> نسبت به روش کربجینگ<sup>۱۱</sup> نتایج بهتری را ارائه می‌کند [۱۶]. ژانگ<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۱۵) در یک مطالعه موردی در یک مخزن ماسه‌سنگی با تخلخل و تراوایی پایین با استفاده از روش‌های زمین‌آمار، به توصیف مخزن پرداختند و نشان دادند که افزایش تعداد چاه‌های مورد مطالعه باعث بهبود نتایج پارامترهای پتروفیزیکی می‌شود [۱۷].

مهدوی (۱۳۸۵) ضمن مدل‌سازی آماری خواص پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی یکی از میادین خلیج فارس با استفاده از شبیه‌سازی به روش گوسی از روش‌های آماری برای مدل‌سازی و تفسیر داده‌های چاه‌پیمایی کمک گرفته است [۱۸]. پیامنی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش‌های زمین‌آمار به مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل و تراوایی پرداختند و نشان دادند که ارتباط بین تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه ارتباط نسبتاً ضعیفی است [۱۹]. رحیمی دلخانی و کشاورز فرج‌خواه (۱۳۹۲) روش‌های

<sup>۱</sup> Matheron

<sup>۲</sup> Journel and Gomez

<sup>۳</sup> Doyan

<sup>۴</sup> Wang

<sup>۵</sup> Dubrule

<sup>۶</sup> Hohn

<sup>۷</sup> Deutsch

<sup>۸</sup> Srisuriyon and Pumjan

<sup>۹</sup> Zhao

<sup>۱۰</sup> Cokriging

<sup>۱۱</sup> Kriging

<sup>۱۲</sup> Zhang

تخمین تخلخل با تلفیق داده‌های چاه‌پیمایی و لرزه‌نگاری را مورد ارزیابی قرار داده‌اند و نشان دادند که روش‌های زمین‌آماری نسبت به روش شبکه عصبی به دلیل ساختار فضایی داده‌ها و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی معتبرترین روش است [۲]. مؤمن‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از نرم‌افزار Petrel به مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل مؤثر سازند سروک در یکی از میادین جنوب غربی ایران پرداخته‌اند و نشان دادند که تخلخل در قسمت میانی میدان مورد مطالعه (مرکز) بیشتر از قسمت‌های دیگر است [۲۰]. همچنین محققان ایرانی دیگری [۲۱-۲۵] نیز کارهایی را در زمینه مدل‌سازی تخلخل و تراوایی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری ارائه داده‌اند.

#### پ) تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی و روش‌های خوشه‌بندی

روش استفاده از شاخص زون جریان روش متداولی جهت تعیین واحدهای جریان است که مبنای مطالعات بسیاری قرار گرفته است. آمیفول<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۳) به تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از داده‌های نگار و مغزه و پیش‌بینی تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه پرداختند [۲۶]. عباس‌زاده و همکاران (۱۹۹۶) به پیش‌بینی تراوایی با استفاده از روش واحدهای جریان در دو مخزن ناهمگن کربناته و ماسه سنگی پرداختند که مقایسه تراوایی محاسبه شده با روش واحدهای جریان و سایر روش‌ها، نشان‌دهنده موفقیت روش واحدهای جریان بوده است [۲۷]. العجمی و هولدیج<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) در یک مخزن ماسه سنگی در عربستان سعودی با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی و مفهوم واحدهای جریان، تراوایی را ارزیابی و یک روش خوشه‌بندی جدید و با کاربرد آسان را ارائه دادند که در آن از روش مجموع مربعات خطا به عنوان معیاری برای تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی برای توصیف مخزن استفاده شد و بیان کردند که تراوایی تخمین زده شده با روش واحدهای جریان، با استفاده از الگوریتم انتظار شرطی متناوب (ACE)<sup>۳</sup>، قابل تعمیم به چاه‌های فاقد مغزه است [۲۸]. عابد<sup>۴</sup> (۲۰۱۴) شاخص زون جریان<sup>۵</sup> را با استفاده از داده‌های نگار و مغزه در واحدهای مختلف جریان با استفاده از

<sup>۱</sup> Amaefule

<sup>۲</sup> Al-Ajmi and Holditch

<sup>۳</sup> Alternating conditional expectation (ACE)

<sup>۴</sup> Abed

<sup>۵</sup> Flow zone index (FZI)

الگوریتم K-means محاسبه کرده و سپس رابطه بین واحدهای جریان هیدرولیکی تخمین زده شده با داده‌های نگار و مغزه با استفاده از الگوریتم ACE توسعه داده و بیان کرده است که این رابطه، می‌تواند تراوایی مخزن را در مقیاس واحد جریان، برآورد کند [۲۹].

نوریان و همکاران (۱۳۹۳) به تفکیک گروه‌های سنگی با استفاده از واحدهای جریان و روش خوشه‌بندی در مخزن بنگستان میدان منصوری پرداختند که در نتیجه روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی در بین روش‌های خوشه‌بندی به عنوان روش بهینه انتخاب شد و همچنین با مقایسه گونه‌های سنگی تعیین شده به روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی با واحدهای جریان و نیز رخساره‌های میکروسکوپی مخزن، هر دو روش، نتایج قابل قبولی برای تعیین گونه‌های سنگی نشان دادند [۳۰].

#### ت) تعیین رخساره‌های الکتریکی

نگارهای چاه‌پیمایی اطلاعات مفیدی از خواص فیزیکی سنگ‌های مخزن مانند سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، بافت و خصوصیات پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی، در اعماق مختلف زمین به دست می‌دهند. اطلاعاتی که از این نگارها استخراج می‌شوند، می‌تواند به صورت رخساره‌های الکتریکی یا الکتروفاسیس‌ها طبقه‌بندی گردد. اصطلاح رخساره‌های الکتریکی اولین بار توسط سرا و ابوت<sup>۱</sup> (۱۹۸۲) معرفی شد [۳۱]. رخساره‌های الکتریکی مفهوم جدیدی از گونه‌های سنگی بر اساس پاسخ‌های نگارهای چاه‌پیمایی در مخزن کربناته را بیان می‌نمایند. یه و رابیلر<sup>۲</sup> (۲۰۰۰) روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC)<sup>۳</sup> را به عنوان یک روش خوشه‌بندی جدید برای آنالیز رخساره‌های الکتریکی ارائه دادند [۳۲]. خوشبخت و محمدنیا (۲۰۱۲) روش‌های خوشه‌بندی مختلف را به منظور پیش‌بینی تراوایی در یکی از میادین جنوب غرب ایران به کار بردند و بیان داشتند که مقایسه نتایج حاصل با نتایج حاصل از روش‌های تجربی، آنالیز رگرسیون و شبکه‌های عصبی حاکی از عملکرد بهتر روش خود سازمان‌ده است [۳۳]. باستانی کهریزک و نبی بیدهدنی (۲۰۱۵) با استفاده از روش MRGC و واحدهای جریان،

<sup>۱</sup> Serra and Abbott

<sup>۲</sup> Ye and Rabiller

<sup>۳</sup> Multi resolution graph-based clustering (MRGC)



گونه‌های سنگی را در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران تعیین کردند و نشان دادند که نتایج حاصل از دو روش با نتایج حاصل از نگارهای پتروفیزیکی و آنالیز مغزه انطباق خوبی داشته است [۳۴]. رستگاریا و همکاران (۲۰۱۶) به مدل‌سازی سه‌بعدی شاخص زون جریان و رخساره‌های الکتریکی با استفاده از آنالیز نشانگرهای لرزه‌ای و روش شبکه‌های عصبی پرداختند و نشان دادند که توزیع رخساره‌های مخزنی به درک ناهمگنی زیر سطحی در مخزن مورد مطالعه کمک می‌کند [۳۵].

سفیداری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از مطالعات مغزه و مقاطع نازک و داده‌های پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی و روش شاخص منطقه‌ای جریان و روش MRGC به مطالعه مخزن کربناته پرمو-تریاس میدان گازی پارس جنوبی پرداخته و نشان دادند که کمربندهای رخساره‌ای، خصوصیات جریان و رخساره‌های لاگ در قالب چینه‌نگاری سکansı<sup>۱</sup> در میدان مورد مطالعه انطباق خوبی با مرزهای سکansı دارند [۳۶]. کخدایی ایلخچی و همکاران (۱۳۹۳) نشان دادند که تلفیق روش تفکیک گونه‌های سنگی، روش رخساره‌های الکتریکی و روش واحدهای جریان، هر دو جنبه زمین‌شناسی و پتروفیزیکی در ماسه‌های گازی در میدان ویچرنج<sup>۲</sup> در استرالیا غربی، را به طور مؤثری ترکیب می‌نماید و به درک و تفسیر صحیح از رفتار تولید مخزن کمک می‌کند [۳۷]. سلیمانی و همکاران (۱۳۹۲) با تعیین رخساره‌های الکتریکی در میدان نفتی لالی نشان دادند که رخساره‌های الکتریکی مشابه، به دلیل ترکیب سنگ‌شناسی متفاوت، تأثیر زیادی بر تعداد شکستگی‌ها در محدوده خود دارند [۳۸]. فرازانی و همکاران (۱۳۹۳) به تعیین رخساره‌های الکتریکی در سازند آسماری در میدان نفتی گچساران با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای گرافیکی پرداخته و نشان دادند که به کارگیری نگارهای تصویرگر موجب بهبود تفکیک رخساره‌های الکتریکی می‌گردد [۳۹]. صالحی و همکاران (۱۳۹۴) به آنالیز گونه‌های سنگی با استفاده از روش‌های مختلف و با هدف ارزیابی کیفیت مخزنی بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میدان‌های بخش مرکزی خلیج فارس پرداختند و نشان دادند که تعیین

---

<sup>۱</sup> Sequence stratigraphy

<sup>۲</sup> Witcher rang

گونه‌های سنگی و واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش‌های شاخص زون جریان و نمودار لورنز اصلاح‌شده بر مبنای چینه‌نگاری<sup>۱</sup> (SMLP) حاکی از هم‌خوانی نسبی نتایج با یکدیگر است [۴۰]. زحمت کش و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از روش شبکه عصبی خود سازمان‌ده و رخساره‌های الکتریکی سازند آسماری در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران را تعیین کردند و اظهار داشتند که با توجه به انطباق خوب نتایج مدل بهینه شده آنها با واقعیت رخساره‌های الکتریکی در حکم جانشین برای رخساره‌های رسوبی ساخته و به تمام چاه‌های میدان تعمیم داده شد [۴۱].

#### ث) تعیین رابطه تخلخل - تراوایی

ارتباط بین تخلخل و تراوایی در مخازن هیدروکربنی توسط محققین مختلفی در دنیا و ایران مورد مطالعه قرار گرفته است. از سال ۱۸۶۵ که داری رابطه‌ای را در ارتباط با جریان سیال در داخل فضاهای خالی مواد عنوان نمود، تراوایی از جمله پارامترهایی بوده که بر روی آن تحقیقات مختلفی صورت گرفته است. در سال ۱۹۲۷ توسط کوزنی رابطه‌ای به منظور محاسبه تراوایی به صورت پیوسته در سرتاسر چاه پیشنهاد شد. پس از آن در سال ۱۹۳۹ رابطه وی توسط کارمن اصلاح گردید و تحت عنوان رابطه کوزنی - کارمن معروف شد [۴۲]. آنها برای یافتن رابطه‌ای مناسب بین تخلخل و تراوایی، محیط متخلخل را به صورت مجموعه‌ای از لوله‌های موئینه در نظر گرفتند. از آن جایی که در یک مدل واقعی لوله‌های موئینه مستقیم نبوده و دارای خمیدگی‌های متفاوتی هستند، در رابطه ارائه شده توسط آنها، عواملی به نام‌های عامل پیچ‌پیچی و عامل مساحت حجم دانه‌ها، لحاظ شد.

تیکسیر<sup>۲</sup> (۱۹۴۹) با به کارگیری مقاومت ویژه، اشباع آب و فشار موئینگی، رابطه‌ای را برای محاسبه تراوایی به دست آورد. وایلی و رز (۱۹۵۰) با ساده‌سازی رابطه تیکسیر رابطه‌ای را بین تخلخل، اشباع آب کاهش‌نیافتنی<sup>۳</sup> و تراوایی پیشنهاد نمودند. پیرسون<sup>۴</sup> (۱۹۶۳) مدلی را با توجه به گرانیوی نفت خام برای محاسبه تراوایی پیشنهاد نمود [۴۳]. در سال ۱۹۶۸ تیمور<sup>۵</sup> بر اساس نتایج آزمایشگاهی که بر روی ۱۵۵

<sup>۱</sup> Stratigraphic modified

Lorenz plot

<sup>۲</sup> Tixier

<sup>۳</sup> Irreducible water

saturation

<sup>۴</sup> Pirson

<sup>۵</sup> Timur

نمونه مغزه ماسه سنگی انجام داده بود، رابطه‌ای را بین تخلخل و درصد اشباع کاهش‌ناپذیر ارائه نمود [۴۲]. در سال ۱۹۷۳ کوتز و دومانیور برای مخازن ماسه سنگی دارای شیل با استفاده از رابطه آرچی به منظور محاسبه اشباع آب کاهش‌نیافتنی ( $S_{wi}$ )، مدلی را با نام ماسه سنگ شیلی ارائه نمودند و رابطه‌ای را بین  $S_{wi}$  و  $k$  پیشنهاد کردند. این رابطه تنها در مخازن ماسه سنگ شیلی کاربرد داشته و در سایر مخازن شیلی پاسخ مناسبی از تخمین تراوایی نمی‌دهد [۴۴]. در سال ۱۹۸۷ هرون<sup>۱</sup> با استفاده از نگارهای پرتو گاما و نوترون کانی‌های تشکیل دهنده در سازند و نوع آن‌ها را شناسایی نمود و از اطلاعات حاصل از آن مقادیر نسبی اندازه سطح دانه‌ها را تعیین و با استفاده از رابطه کوزنی-کارمن مقدار تراوایی را بدون استفاده از داده مغزه محاسبه نمود. اما با این حال روش وی در تمام مخازن کربناته پاسخ‌گو نمی‌باشد [۴۵].

رابطه تخلخل-تراوایی برحسب عمق با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی توسط جامی الاحمدی و جوادیور (۱۹۹۹) مورد بررسی قرار گرفته است و اظهار داشتند که استفاده از شبکه عصبی پایه‌ای شعاعی<sup>۲</sup> (RBF) قادر به پیش‌بینی تراوایی سازند با استفاده از اندازه‌گیری مغزه‌ها در آزمایشگاه و همچنین داده‌های چاه‌آزمایی به‌دست آمده از میدان است [۴۶]. در سال ۲۰۱۲ قلی نژاد و مسیحی در مطالعاتی که بر روی چند مخزن کربناته در جنوب ایران داشتند رابطه تجربی را جهت محاسبه تراوایی ارائه نمودند که در آن از مفهوم واحدهای جریان به منظور تعیین تراوایی استفاده کردند [۴۷].

#### ۱-۴-هدف و ضرورت انجام تحقیق

تخلخل یکی از مهم‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی مخزن بوده و آگاهی دقیق از این پارامتر به مهندسين نفت این امکان را می‌دهد که برای بررسی دقیق مراحل تولید، در یک میدان ابزار کافی در اختیار داشته باشند. علاوه بر این، تخلخل از مهم‌ترین اطلاعات در زمینه طراحی و کنترل عملیات اکتشاف است که مهندسين با آگاهی از آن توانایی بیش‌تری در توسعه اقتصادی میداین نفت و گاز

<sup>۱</sup> Herron

<sup>۲</sup> Radial basis function

خواهد داشت. از سویی تعیین ویژگی‌های مخازن کار بسیار مشکلی است، زیرا یک مخزن در تمام نقاط، ویژگی‌های مشابه ندارد و به صورت ناهمگون<sup>۱</sup> می‌باشد، این امر باعث می‌شود ارتباط بین پارامترهای مختلف پیچیده شود و ارزیابی مخزن مشکل گردد.

تخلخل را می‌توان با استفاده از آنالیز مغزه در آزمایشگاه به دست آورد. ولی مغزه‌گیری از بخش‌های محدودی از کل مغزه‌ها با توجه به صرف هزینه و وقت زیادی میسر است، همچنین به دلیل غیرممکن بودن عمل مغزه‌گیری از چاه‌های افقی، فقط تعداد کمی از چاه‌های یک میدان دارای مغزه می‌باشند. با توجه به اینکه نمودارهای چاه‌پیمایی مانند نوترون، چگالی، صوتی، اشعه گاما و مقاومت برای اکثر چاه‌ها در دسترس هستند، لذا دستیابی به روش‌هایی برای ارزیابی سریع و دقیق تخلخل از روی داده‌های چاه‌پیمایی بسیار مفید است.

تراوایی یکی از پیچیده‌ترین پارامترهای پتروفیزیکی مورد اندازه‌گیری در مخازن نفت و گاز می‌باشد. ضرورت تعیین تراوایی در مراحل مختلف ارزیابی، تکمیل، بهینه‌سازی عملیات ازدیاد برداشت، مدل‌سازی مخزن و مدیریت آن نمود می‌یابد. به همین جهت روش‌های گوناگون با کارایی متمایز برای ارزیابی تراوایی توسط مهندسان و زمین‌شناسان ارائه شده است. اگرچه روش‌هایی چون آزمایشات مغزه و آزمایش فشار سازند از جمله روش‌های دقیق محاسبه تراوایی می‌باشند، اما به دلیل هزینه‌های بسیار بالا، به کل چاه قابل تعمیم نمی‌باشد. این کار در شرایطی که مخزن کربناته ناهمگن باشد، ویژگی‌های مخزن که اساساً بر مبنای تراوایی تعیین شده است نمی‌تواند شرایط حقیقی مخزن را بیان کند و از این رو تعیین مقدار تولید مخزن نیز اشتباه خواهد بود [۴۸]. همان‌طور که قبلاً ذکر شد سازندها عموماً یکنواخت و همگن توصیف می‌شوند ولی به طور خاص یک رابطه مشخص بین مقادیر تخلخل و تراوایی وجود ندارد. ارتباط بین تخلخل و تراوایی به صورت کیفی است و یک رابطه کمی شناخته شده که در همه‌ی حالات جواب بدهد، به هیچ وجه بین آنها وجود ندارد [۴۹].

تا به امروز محققان بسیاری تلاش کرده‌اند تا روابط پارامتری بین تراوایی و ویژگی‌هایی از مخزن

---

<sup>۱</sup> Hetrogeneouse

هیدروکربنی که مستقیماً قابل اندازه‌گیری هستند مانند تخلخل بیابند. مهندسين نفت اغلب از تحليل رگرسيونی به عنوان ابزار اصلی برای به‌دست آوردن رابطه آماری بین این مقادير استفاده می‌کنند، چرا که روش آناليز رگرسيونی یک روش متداول و قابل قبول در تخمین میزان پارامترهای مورد نظر که امکان اندازه‌گیری آنها و جود ندارد می‌باشد [۵۰].

هدف از انجام این تحقیق، مدل‌سازی تخلخل و تراوایی و همچنین تعیین ارتباط بین تخلخل و تراوایی در مخزن میدان مورد مطالعه با استفاده از انواع روش‌های واحدهای جریان هیدرولیکی است.

### ۱-۵- روش انجام تحقیق

عملاً تمام روابط تخلخل-تراوایی فقط برای اهداف کیفی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای به‌دست آوردن رابطه دقیقی بین تخلخل و تراوایی باید تعداد زیادی از ضرایب فیزیکی‌ای مانند اشباع سیال کاهش ناپذیر، سطح ویژه، توزیع اندازه دانه، شکل دانه، لایه‌بندی، سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی، درجه و نوع سیمانی کردن که یک محیط متخلخل را مشخص نموده معین شوند. اگرچه بعضی از سازندها ممکن است رابطه‌ای بین تخلخل و تراوایی نشان دهند، ولی تعداد زیادی از ضرایب فیزیکی که بر روی این دو پارامتر تأثیر می‌گذارند به طور وسیعی در سازندهای مختلف متفاوت می‌باشند.

در این تحقیق فرض شده است که یک ارتباط خطی یا غیرخطی بین تراوایی و تخلخل وجود دارد. به عبارت دیگر در این تحقیق تصور شده است که رابطه خطی یا غیرخطی به‌دست آمده برای مدل‌سازی ارتباط بین تراوایی و تخلخل مناسب و کافی است. بدین منظور داده‌های چاه‌پیمایی، آنالیز مغزه‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد نظر به‌دست آورده شده است. در این تحقیق ابتداً تخلخل و تراوایی با استفاده از نرم افزارهای Geolog و Petrel تعیین و مدل‌سازی شده‌اند. به این منظور از نمودارهای چاه‌پیمایی (چگالی (RHOB)، نوترون (NPHI)، اشعه گاما (GR)، صوتی (DT)، نگار مقاومت (RT) و نگار فتوالکتریک (PEF)) به عنوان مهم‌ترین نمودارهایی که می‌توان تراوایی و تخلخل را بر اساس آنان مدل‌سازی نمود، استفاده شده است. سپس ارتباط بین این دو مدل اگر از مدل‌های تخلخل-تراوایی

موجود مانند مدل کوزنی-کارمن تبعیت نکرده باشد، از طریق رگرسیون خطی یا غیرخطی، هر کدام مناسب‌تر بوده، رابطه‌ای بین این دو پارامتر به دست آورده شده است.

## ۱-۶- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در پنج فصل تنظیم و ارائه شده است. فصل اول به تعریف مسأله تحقیق، شرح مختصری در مورد پارامترهای پتروفیزیکی مورد مطالعه، بیان سابقه مطالعات مرتبط با موضوع تحقیق، هدف، ضرورت و روش انجام تحقیق پرداخته شده است. در فصل دوم به بررسی نظری رابطه تخلخل-تراوایی پرداخته شده و مدل‌های ارائه شده تا به امروز بین تخلخل و تراوایی شرح داده شده است. در فصل سوم اطلاعات زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه آورده شده است. در فصل چهارم جزئیات روند مدل‌سازی تخلخل و تراوایی و تعیین و تفکیک واحدهای جریان هیدرولیکی توسط نرم‌افزارهای MATLAB، Excel، Geolog و Petrel و ارائه رابطه تخلخل-تراوایی به همراه خلاصه‌ای از تئوری روش‌های ذکر شده، ارائه شده است. در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات لازم جهت تحقیق بیشتر آورده شده است.

## فصل دوم

بررسی نظری رابطه تخم‌گل - تراوایی

## ۲-۱- مقدمه

تراوایی عموماً به عنوان توانایی محیط متخلخل به عبور سیال گفته می‌شود [۵۱]. این تعریف به وسیله فعالیت‌های مهندسی ژئوتکنیک و زمین‌شناسی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. بنابراین، امکان ارزیابی تراوایی تحت شرایط مختلف (مکانیکی، شیمیایی و گرمایی) در مخازن، ژئوتکنیک، معدن و مهندسی نفت مهم و اساسی است [۵۲]. چندین تئوری و بررسی آزمایشگاهی به منظور توسعه قانون تراوایی در تخلخل، تنش، دما، فرآیند شیمیایی، و حذف ماده و مدل‌های دیگر انجام شده است [۵۳، ۵۴]. عموماً، چهار خانواده اصلی از مدل‌های توسعه یافته روابط تراوایی وجود دارد که به طور مثال براساس: (الف) تخلخل، (ب) تنش و تخریب، (ج) مفهوم معادله کانال و (د) مدل شبکه است. با این وجود به سبب ارتباط پیچیده بین جریان و تغییر شکل در فعالیت‌های مهندسی زمین‌شناسی و ژئوتکنیک، مدل‌های ذکر شده در بالا محدودیت‌های خودشان را دارند و فقط می‌توانند برای شرایط خاص کاربردی باشند [۵۵]. علاوه بر مدل‌های فوق، مدل‌های دیگری نیز برای رابطه تخلخل - تراوایی وجود دارد که به آنها اشاره شده است. لذا مطالعه روی مدل‌های توسعه یافته تراوایی محیط متخلخل شکافدار، برای مقابله با مشکلات جریان سیال به شدت مورد نیاز است. بدون شک فهم روابط تراوایی می‌تواند به محققین و مهندسیین برای تغییر و به کار بردن مدل تراوایی از طریق رویکردهای مناسب کمک نماید. موضوع اصلی این فصل از پایان‌نامه، بازبینی پیشرفت‌های اخیر در زمینه توسعه مدل‌های تراوایی برای محیط‌های متخلخل است. مدل‌های بهبود یافته تراوایی به وسیله محققین قدیم و جدید ارائه و بحث شده است و ویژگی‌های اصلی و محدودیت‌های آنها ذکر شده است.

## ۲-۲- معادله کوزنی - کارمن و مشتقات آن

مدل‌های تراوایی بیشتر بر ارتباط بین تراوایی، تخلخل و اشباع آب کاهش‌ناپذیر استوار هستند. اولین معادله‌ای که خواص پتروفیزیکی قابل اندازه‌گیری سنگ را با تراوایی شرح داد توسط کوزنی (۱۹۲۷) پیشنهاد شده است (۲-۱).



$$k = \left( \frac{1}{2\tau s_{vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (1-2)$$

که در آن  $k$  تراوایی،  $s_{vgr}$  مساحت سطح ویژه محیط متخلخل،  $\tau$  ضریب پیچاپیچی و  $\phi$  تخلخل می‌باشد [۵۶].

وایلی و اسپنگلر<sup>۱</sup> (۱۹۵۲)، پیشنهاد کردند که ضریب ۲ در مخرج معادله فوق بهتر است توسط

پارامتر عمومی تری، تحت عنوان عامل شکل خلل و فرج ( $K_{ps}$ ) جایگزین شود (۲-۲) [۵۷]:

$$k = \left( \frac{1}{K_{ps} \tau s_{vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (2-2)$$

کارمن (۱۹۳۷) پیشنهاد کرد که حاصل ضرب  $K_{ps} \tau$  برای اکثر سنگ‌های متخلخل می‌تواند برابر

۵ در نظر گرفته شود. بنابراین معادله کوزنی- کارمن طبق رابطه (۳-۲) بیان می‌شود [۵۸]:

$$k = \left( \frac{1}{5s_{vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (3-2)$$

با این حال در برخی سنگ‌های متخلخل، حاصل ضرب  $K_{ps} \tau$  می‌تواند متغیر بوده و حتی بسیار

بزرگتر از ۵ باشد. بنابراین معادله یا مدل کوزنی- کارمن را می‌توان طبق رابطه (۴-۲) نوشت:

$$k = \left( \frac{1}{K_T s_{vgr}^2} \right) \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (4-2)$$

که در معادله فوق  $k$  تراوایی،  $s_{vgr}$  مساحت سطح ویژه محیط متخلخل،  $K_T = K_{ps} \tau$  ضریب

زون‌بندی مؤثر<sup>۲</sup> و  $\phi$  تخلخل می‌باشد [۵۶، ۵۸].

عبارت تخلخل  $\frac{\phi^3}{(1-\phi)^2}$  میزان بافت سنگی است که تراوایی را با قطر متوسط ذره شرح می‌دهد.

این فرمول برای ذرات کروی بدون مقاومت معتبر می‌باشد. اشکال اصلی دیگر این روابط مساحت سطح

حفره‌ها است که می‌تواند تنها به وسیله‌ی تجزیه مغزه آن هم با تجهیزات خاصی تعیین شود.

<sup>۱</sup> Wyllie and Spangler

<sup>۲</sup> Effective zoning factor

در نهایت معادله اصلاح شده کوزنی-کارمن بر اساس معادله (۵-۲) به دست می آید:

$$k = \left( \frac{1}{K_T s_{vgr}^2} \right) \frac{\phi_e^3}{(1 - \phi_e)^2} \quad (۵-۲)$$

که  $\phi_e$  تخلخل مؤثر می باشد [۵۶، ۵۸].

تیکسیر (۱۹۴۹) با به کار بردن نسبت های تجربی بین مقاومت ویژه و اشباع آب و فشار موئینگی و

تراوایی، روشی را برای محاسبه ی تراوایی از گرادیان مقاومت ویژه به دست آورد (۶-۲) [۴۳، ۵۹].

$$k = c \left[ a \frac{2.3}{\rho_w - \rho_o} \right]^2 \quad (۶-۲)$$

a ضریبی است که از فرمول (۷-۲) به دست می آید:

$$a = \frac{\Delta R}{\Delta D} \frac{1}{R_0} \quad (۷-۲)$$

و c یک ضریب ثابت می باشد که مقدار آن به طور متوسط در حدود ۲۰ است.  $\Delta R$  تغییرات

مقاومت ویژه (بر حسب اهم متر) و  $\Delta D$  تغییرات عمق (بر حسب فوت)،  $\rho_w$  چگالی آب سازند  $\left( \frac{gr}{cm^3} \right)$

،  $\rho_o$  چگالی هیدروکربن  $\left( \frac{gr}{cm^3} \right)$  و  $R_0$  مقاومت سازند در ۱۰۰٪ اشباع آب می باشد. معادلات (۶-۲) و

(۷-۲) را می توان به صورت معادله (۸-۲) نوشت:

$$\left[ \frac{k}{20} \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{2.3}{R_0 (\rho_w - \rho_o)} \frac{\Delta R}{\Delta D} \quad (۸-۲)$$

گرادیان مقاومت ویژه از طریق ابزار تحقیق عمق و نگارهای جانبی محاسبه و برای اثرات درون چاه

تصحیح می شود. این مدل محدود است زیرا به لاگ هایی که سطح تماس نفت-آب را نمایش می دهند

نیاز دارد و همچنین به تخمین چگالی هیدروکربن موجود در مخزن نیاز دارد. همچنین محاسبه تراوایی

برای زون مربوطه با گرادیان مقاومت ویژه به طور متوسط است.

بر طبق کارهای وایلی و رز (۱۹۵۰) مدلی ساده تر پیشنهاد شده که بیشتر از معادله (۸-۲) کاربرد

دارد (معادلات (۹-۲) و (۱۰-۲)):

$$k^{\frac{1}{2}} = 250 \frac{\phi^3}{S_{wi}} \quad \text{برای نفت با گرانی متوسط} \quad (۹-۲)$$

$$k^{\frac{1}{2}} = 79 \frac{\phi^3}{S_{wi}} \quad \text{برای گاز خشک} \quad (۱۰-۲)$$

که در آن  $S_{wi}$  اشباع آب کاهش ناپذیر می باشد [۶۰].

شفیلد<sup>۱</sup> (۱۹۵۶) بر اساس رابطه کوزنی و برقراری یک ضریب همبستگی بین برخی از ماسه‌های

آب دوست شناخته شده، معادله‌ی (۱۱-۲) را برای محاسبه تراوایی پیشنهاد داد [۴۳]:

$$k = \frac{1}{2F} \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^2 \frac{1}{S_{wi}^2} \quad (۱۱-۲)$$

این معادله تنها برای تخلخل ( $\phi$ ) و فاکتور مقاومت ویژه سازند ( $F$ ) ماسه‌های تمیز معتبر است.

پیرسون (۱۹۶۳) فرمول (۱۲-۲) را پیشنهاد نمود:

$$k = \left( \frac{850000}{API Gravity} - 3.5 depth, ft \right) \frac{R_w^2}{FR_0 R_{ii}} \quad (۱۲-۲)$$

در فرمول فوق  $R_w$  مقاومت ویژه آب سازندی،  $F$  فاکتور مقاومت ویژه سازند،  $R_0$ ، مقاومت سازند در

۱۰٪ اشباع آب و  $R_{ii}$  مقاومت ویژه سازند در شرایط اشباع آب باقی مانده است. در معادله (۱۲-۲)  $k$

مستقیماً در واحد داری به دست می آید. این فرمول نبایستی برای نفت‌های خام با گرانی بسیار پایین

( $API > 40$ ) و برای عمق‌های بیشتر از ۶۵۰۰ ft به کار برده شود [۶۱].

تیمور (۱۹۶۸) با تکیه بر کارهای کوزنی و وایلی و رز یک معادله عمومی به شکل معادله (۱۳-۲)

پیشنهاد کرد:

<sup>۱</sup> Sheffield

$$k = A \frac{\phi^B}{S_{wi}^C} \quad (13-2)$$

که می‌تواند در محدوده پارامترهای محاسبه شده آماری A، B و C تعیین شود. او به وسیله‌ی اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی رفتار ۱۵۵ نمونه ماسه‌سنگی از سه میدان نفتی مختلف از آمریکای شمالی که به‌دست آمده بود و به بالاترین ضرایب ارتباط و به پایین‌ترین انحراف استاندارد مبتنی بودند، فرمول (۱۴-۲) که در آن پارامترهای A، B و C معادله (۱۳-۲) بر اساس محاسبات آماری به‌دست آمده است را برای تراوایی پیشنهاد نمود:

$$k = 0.136 \frac{\phi^{4.4}}{S_{wi}^2} \quad (14-2)$$

و برای اشباع آب باقی‌مانده با خطای استاندارد حدود ۱۳ درصد حجم خلل و فرج، فرمول (۱۵-۲) را به‌دست آورد:

$$S_{wi} = 3.5 \frac{\phi^{1.26}}{k^{0.35}} - 1 \quad (15-2)$$

این مدل قابل کاربرد در قسمت‌هایی است که اشباع آب باقی‌مانده وجود دارد. همچنین تیمور (۱۹۶۸) مقدار ۱/۵ را برای ضریب سیمان‌شدگی (m) در همه‌ی موارد در نظر گرفت [۶۲]. کوتز و دومانور (۱۹۷۴) یک روش تجربی پیشرفته برای محاسبه تراوایی پیشنهاد کردند (۱۶-۲) [۴۴]:

$$k^{\frac{1}{2}} = \frac{c}{w^4} \frac{\phi^{2w}}{\frac{R_w}{R_i}} \quad (16-2)$$

که

$$c = 23 + 465\rho_h - 188\rho_h^2 \quad (17-2)$$

و

$$w^2 = (3.75 - \phi) + \frac{1}{2} \left[ \log_{10} \left( \frac{R_w}{R_{ti}} \right) + 2.2 \right]^2 \quad (18-2)$$

که در آن  $c$  و  $w$  ضرایب ثابت،  $R_w$  مقاومت ویژه آب سازندی،  $R_{ti}$  مقاومت ویژه سازند در شرایط اشباع آب باقی مانده،  $\rho_h$  چگالی هیدروکربن،  $\phi$  تخلخل و  $k$  تراوایی می باشد. آنها با استفاده از مطالعات چاه و مغزه، ضرایب عمومی  $w$  را برای ضریب اشباع شستگی  $n$  و ضریب سیمان شستگی  $m$  به کار بردند.

$$m=n=w \quad (19-2)$$

معادلات (۱۶-۲) تا (۱۸-۲) برای سازندهای نفتی و تمیز با چگالی نفت برابر با  $0.8$  معتبر است. زمانی که چگالی هیدروکربن با مقدار  $0.8$  اختلاف زیادی دارد، قرائت نگار  $R_{ti}$  دوتایی می شود. از وارد شدن معادله (۱۹-۲) توسط ضریب تصحیح می توان معادله (۲۰-۲) را نوشت:

$$\frac{R_{icorr}}{R_{ilog}} = 0.077 + 1.55\rho_h - 0.627\rho_h^2 \quad (20-2)$$

که در آن  $R_{icorr}$  مقاومت ویژه تصحیح شده و  $R_{ilog}$  مقاومت ویژه سازند از نگار مقاومت ویژه می باشد. همچنین کوتز و دومانور (۱۹۷۴) روشی را برای آزمایش بر روی سازندی که در اشباع آب کاهش ناپذیر باشد، پیشنهاد نمودند. اگرچه آنها متمرکز شدند که اگر مخزن نامتجانس باشد، این آزمایش امکان پذیر نمی باشد، حتی اگر در اشباع آب کاهش ناپذیر باشد. اگر سازندی در اشباع آب کاهش ناپذیر نباشد، مقدار مفروض  $R_t$  از چاه کمتر از  $R_{ti}$  می باشد و مقدار  $w$  به دست آمده از معادله (۱۸-۲) دارای خطا می باشد. برای غلبه یافتن بر این مسأله، آنها سنگ های سازندی را در سه دسته طبقه بندی نمودند. سپس یک نسبت تجربی بین چگالی ماتریس ( $\rho_{gcn}$ )، تمیز دسته بندی های سنگ شناسی و  $R_t$  به دست آوردند (۲۱-۲):

$$\left[ \frac{R_w}{R_t} \right]_{cn} = (\phi S_{wir})_{cn}^w \frac{10^{-6}}{G(\rho_{gcn} - 2.6)^3} \quad (21-2)$$

که  $G$  ثابتی است که طبقه بندی سنگ را شامل می شود.

مقدار تصحیح شده  $\left[ \frac{R_w}{R_t} \right]_{cn}$  که از معادله (۲۱-۲) به دست آمده، برای یک سازند تمیز، به جای

در معادله (۱۸-۲) برای محاسبه  $W$  زمانی که سازند در اشباع آب کاهش ناپذیر باشد، استفاده

شده است.

تصحیح دیگری که کوتز و دومانور (۱۹۷۴) برای یک سازند شیلی انجام دادند عبارت است از معادله

(۲۲-۲):

$$\frac{R_w}{R_{ti}} = \frac{R_w V_{sh}}{\phi R_{sh}} (\phi S_{wirr})_{cn} + \frac{(\phi S_{wirr})_{cn}^w}{(1 - V_{sh})^{w-1}} \quad (22-2)$$

مقدار  $\frac{R_w}{R_{ti}}$  در معادله (۲۰-۲)، وارد شده است تا  $W$  به دست آید. در معادله (۲۲-۲)،  $R_{sh}$  و  $V_{sh}$

به ترتیب حجم و مقاومت ویژه شیل هستند. در این روش کوتز و دومانور ابتداً حالت تراوایی صفر در تخلخل صفر و اشباع آب ۱۰۰٪ را فرض کردند. به دلیل تصحیحات انجام شده، این روش را می توان برای سازندهایی که در اشباع آب کاهش ناپذیر هستند، به کار برد.

کوتز و دنوا<sup>۱</sup> (۱۹۸۱) معادله (۲۳-۲) را برای محاسبه تراوایی پیشنهاد نمودند:

$$\frac{1}{k^2} = 100 \frac{\phi^2 (1 - S_{wirr})}{S_{wirr}} \quad (23-2)$$

که در آن  $k$  دارای واحد میلی داری می باشد. در این فرمول به شرط تراوایی صفر، در تخلخل صفر و زمانی که اشباع آب کاهش ناپذیر ۱۰۰٪ باشد استفاده می شود. این فرمول باید در اشباع آب غیرقابل کاهش استفاده شود [۶۳].

## ۲-۳- مدل های تکامل تراوایی براساس تخلخل

تغییر در تراوایی و تخلخل به وسیله آزمایشات آزمایشگاهی، تئوری های کاملی برای بررسی ارتباط

<sup>۱</sup> Denoo

بین این دو پارامتر ارائه شده است، براساس آزمایشات انجام شده [۵۳، ۶۴-۶۷]، سولم و آفروخ<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) بیان کردند که تراوایی محیط متخلخل به وسیله تخلخل اولیه، سطح تنش، فرآیند تغییر شکل (فشار سخت شدن - متراکم شدن و فشار نرم شدن - سخت شدن)، هندسه و ساختار منافذ به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۶۸]. عموماً می‌توان دو روش اصلی را در میان مدل‌های موجود برای شناسایی رابطه تخلخل - تراوایی به کار برد، مدل تابع نمایی و مدل تابع توان دو مدل از این نوع است. در میان آنها، رویکردهای پذیرفته شده زیادی به وسیله قانون توان سازمان‌دهی شده است که در فضای تخلخل و نفوذ، فضای تمام لگاریتمی و فضای نیمه لگاریتمی فرموله شده است [۵۴، ۶۷، ۶۹، ۷۰]. رویکردی دیگر یعنی قانون نمایی به وسیله داوید<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۴) ارائه شده است و به منظور کاهش تراوایی القا شده به وسیله تراکم به کار برده شده است [۷۰]. این رویکرد همچنین توسط ژو و والش<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) و ژو و همکاران (۲۰۰۷) برای تشریح رابطه بین تراوایی و تنش قبل از شروع تراکم برشی افزایش یافته یا سخت شونده ارائه شده است [۶۷، ۷۱].

## ۲-۴- مدل تخلخل - تراوایی بر اساس قانون توان

مدل اولی که برای تخلخل - تراوایی بر اساس قانون توان ذکر می‌شود مدل کوزنی - کارمن است. مدل دیگر، مدل بیلز<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۸۹) است که اصلاح شده‌ی مدل کوزنی - کارمن است. آنها یک رابطه تخلخل - تراوایی براساس سطح مقطع منافذ فراکتال<sup>۵</sup> ارائه دادند که فرمول آن مطابق معادله (۲-۲۴) است [۷۲]:

$$k = C \frac{\phi^{z+2}}{(1-\phi)^2} \quad (2-24)$$

که  $C$  یک ثابت برای تعیین تراوایی است، و  $z$  یک پارامتر برای تخلخل است. یک فرمول تراوایی مشابه براساس سطح منافذ فراکتال توسط کوستا<sup>۶</sup> (۲۰۰۶) ارائه شده که به صورت معادله (۲-۲۵) است

<sup>۱</sup> Sulem and Ouffroukh

<sup>۲</sup> Zhu and Walsh

<sup>۵</sup> Fractal

<sup>۳</sup> David

<sup>۴</sup> Bayles

<sup>۶</sup> Costa

[۷۳]:

$$k = C \frac{\phi^z}{1-\phi} \quad (25-2)$$

مدل تخلخل- تراوایی تجربی دیگری شبیه مدل کوزنی- کارمن توسط رودریگز<sup>۱</sup> و همکاران

(۲۰۰۴) به شکل معادله (۲۶-۲) بیان شد [۷۴]:

$$k = C \frac{\phi^{z+1}}{(1-\phi)^z} \quad (26-2)$$

توابع ساده اضافی و تجربی را می‌توان در بین این خانواده شناسایی کرد. برای مثال، با استفاده از

آزمون انتقال، قابزلو<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۹) یک قانون توان برای بررسی تراوایی کم، اتخاذ کردند (۲۷-۲)

[۷۵]:

$$\frac{k}{k_0} = \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^\alpha \quad (27-2)$$

که  $\alpha$  توان حساس تخلخل است که بستگی به ویژگی مواد و فرایندهای ارزیابی دارد، و  $k_0$  و  $\phi_0$

به ترتیب تراوایی و تخلخل اولیه هستند. براساس مشاهدات آزمایشگاهی، داوید و همکاران (۱۹۹۴)

پیشنهاد کردند که تغییرات  $\alpha$  از ۱ تا ۲۵ برای واحدهای زمین‌شناسی معمول است [۷۰].  $\alpha$  وابسته به

سطح تنش و تخلخل اولیه است [۶۹]. رویکرد دیگر براساس مفهوم نفوذ<sup>۳</sup> است، تئوری‌ای که برای این

منظور ارائه شده است این است که ارتباط منافذ ناپدید خواهد شد، اگر تخلخل در سطح پایین باشد که

به عنوان یک آستانه نفوذ نامیده می‌شود،  $(\phi_{cr})$ . بنابراین، برخی محققان پیشنهاد کردند که رابطه

تخلخل- تراوایی با در نظر گرفتن تئوری نفوذ بسیار مناسب است [۶۶, ۷۶-۷۸]. به منظور کاربرد این

مفهوم، سهیمی (۱۹۹۴) یک قانون توان تخلخل- تراوایی ارائه داده است، که به صورت معادله (۲۸-۲)

است [۷۹]:

<sup>۱</sup> Rodriguez

<sup>۲</sup> Ghabezloo

<sup>۳</sup> Percolation



$$k = C(\phi - \phi_{cr})^z \quad (28-2)$$

## ۲-۵- مدل های تخلخل-تراوایی براساس قانون نمایی

شکل دیگر رابطه تخلخل و تراوایی به وسیله تابع نمایی<sup>۱</sup> بیان شده است. موریس<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۳) اطلاعات آزمایشگاهی سنگ‌ها را ثبت کردند که تخلخل بیشتر از ۱۶/۷ درصد دارند، و رابطه تخلخل-تراوایی را از فرمول (۲۹-۲) به دست آوردند [۵۴]:

$$k = k_0 \exp(C\phi) \quad (29-2)$$

که C توان تخلخل - تراوایی است. مشاهده شده که بالاترین کاهش در تخلخل (کمتر از ۱۶/۷ درصد) است، که کاهش ناگهانی در تراوایی به سبب آسیب غیرقابل برگشت پذیر است [۵۳]. در این بخش مدل‌های دیگری توسط یانگ و آپلین<sup>۳</sup> (۲۰۱۰)، [۸۰] و دیگر محققان [۸۱، ۸۲] بیان شده است که به علت رعایت اختصار از بیان آنها خودداری می‌شود.

## ۲-۶- تابع تراوایی براساس تنش و مفهوم آسیب به سازند<sup>۴</sup>

رایس<sup>۵</sup> (۱۹۹۲) یک رابطه نمایی تنش- تراوایی ارائه داده است. این رابطه زمانی استفاده می‌شود که فشار تولید شده و فشار کاهش یافته در دسترس باشند که از فرمول (۳۰-۲) به دست می‌آید [۸۳]:

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{p}{p_0}\right) \quad (30-2)$$

که p فشار نرمال و  $p_0$  فشار نرمال مرجع است که ۵ میلی پاسگال در نظر گرفته می‌شود. داوید و همکاران (۱۹۹۴) یک رابطه مشابه معرفی کردند که ضریب حساسیت فشار<sup>۶</sup>،  $\tau$  اتخاذ شده و  $p_0$  به صورت عددی برابر هیدرواستاتیک تحت بارگذاری است. با این حال مفهوم فیزیکی و اندازه‌گیری  $p_0$  هنوز مشخص نیست [۷۰]. لایخووسکی و هامیل<sup>۷</sup> (۲۰۰۷) یک قانون توان ارائه داده‌اند که برای آسیب به

<sup>۱</sup> Exponential function

<sup>۲</sup> Morris

<sup>۳</sup> Yang and Aplin

<sup>۴</sup> Stress and damage concept

<sup>۵</sup> Rice

<sup>۶</sup> Pressure sensitivity coefficient

<sup>۷</sup> Lyakhovskiy and Hamiel

سازند متغیر است (۳۱-۲) [۸۴]:

$$k = k_0 \exp\left(\frac{\phi}{\phi_0}\right)^z \left(\frac{D}{D_0}\right)^{z'} \quad (31-2)$$

که  $D$  و  $D_0$  به ترتیب آسیب به سازند جاری قابل تغییر و مقدار آسیب به سازند مرجع است، و  $z'$  پارامتر توان برای آسیب به سازند است. تنتوری<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۸) با تناسب داده‌های تجربی،  $z = 2$  را از حل عددی به دست آوردند و  $z' = 3$  برای رابطه تخلخل - تراوایی حاصل شده است [۸۵]. در این بخش نیز مدل‌های دیگری توسط داوید و همکاران (۱۹۹۴) [۷۰]، تانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۲) [۸۶]، ژو و همکاران (۲۰۰۷) [۶۷]، لی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۰) [۸۷]، ارائه شده است که به علت رعایت اختصار از بیان آنها خودداری می‌شود.

## ۲-۷- مدل‌های کانال هم‌ارز<sup>۴</sup>

پترسون<sup>۵</sup> (۱۹۸۳) یک مدل کانال هم‌ارز برای ارزیابی تراوایی ارائه داد که مطابق معادله (۳۲-۲) است:

$$k = \frac{BR^2}{F} \quad (32-2)$$

$$F = \frac{(l_c/l)^2}{\phi} \quad (33-2)$$

که  $R$  شعاع هیدرولیک است، ضریب شکل  $B$  از یک منفذ برای بخش دایره‌ای متقاطع،  $1/2$  و  $2/3$  برای بخش مثلثی و  $1/3$  برای شکاف است.  $(l_c/l)^2$  عامل پیچ‌پیچی نسبی است که  $l_c$  مسیر جریان واقعی و  $l$  مسیر مستقیم از نقطه شروع جریان تا نقطه خروج جریان است.  $\phi$  تخلخل،  $F$  منافذ متخلخل کامل در کانال و  $BR^2$  نشان‌دهنده‌ی سطح مقطع معادل کانال و همچنین مقاومت آن در برابر جریان سیال است [۸۸].

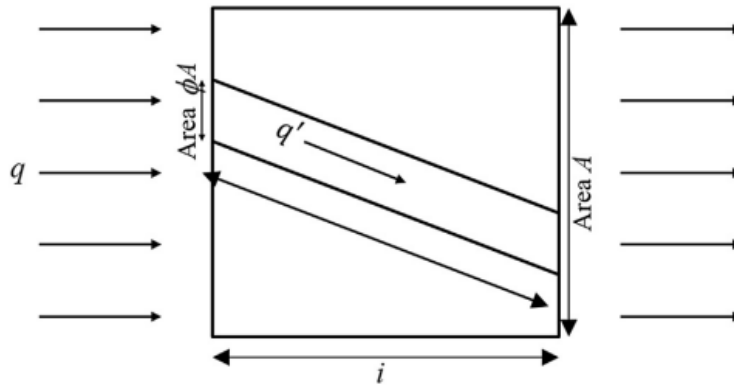
<sup>۱</sup> Tenthorey

<sup>۲</sup> Li

<sup>۵</sup> Paterson

<sup>۲</sup> Tang

<sup>۴</sup> Equivalent channel models



شکل ۱-۲) دیاگرام شماتیک از مدل پترسون (۱۹۸۳) [۸۸].

در شکل فوق  $i$  واحد طول است،  $A$  مساحت سطح مقطع،  $q$  سرعت جریان و  $q'$  سرعت جریان در کانال معادل آن است.

والش و بریس<sup>۱</sup> (۱۹۸۴) یک مدل کانال هم‌ارز را ارائه کردند که به صورت معادله (۲-۳۴) است

[۸۹]:

$$k = \frac{(\phi/S)^2}{FB} \quad (۲-۳۴)$$

در معادله (۲-۳۴)  $S$  مساحت سطح ویژه (مساحت سطح در واحد حجم) است و فاکتور سازند از

رابطه (۲-۳۵) به دست می‌آید:

$$F = \frac{\tau^2}{\phi} \quad (۲-۳۵)$$

در معادله فوق  $\tau$  ضریب پیچ‌پیچی است. این دو مدل کانال هم‌ارز، کاملاً مشابه هستند، بنابراین

اکثر نویسندگان به هر دو مدل پترسون (۱۹۸۳) و والش و براس (۱۹۸۴) اعتبار می‌دهند. این مدل‌ها

می‌توانند دیدگاه مفیدی در بین هندسه حفره‌ها و ویژگی‌های حمل و نقل ایجاد نمایند [۸۸، ۸۹]. با

این حال فرض می‌شود که یک مسیر ترجیحی وجود ندارد و یک مسیر جریان هیدرولیک یکسان در

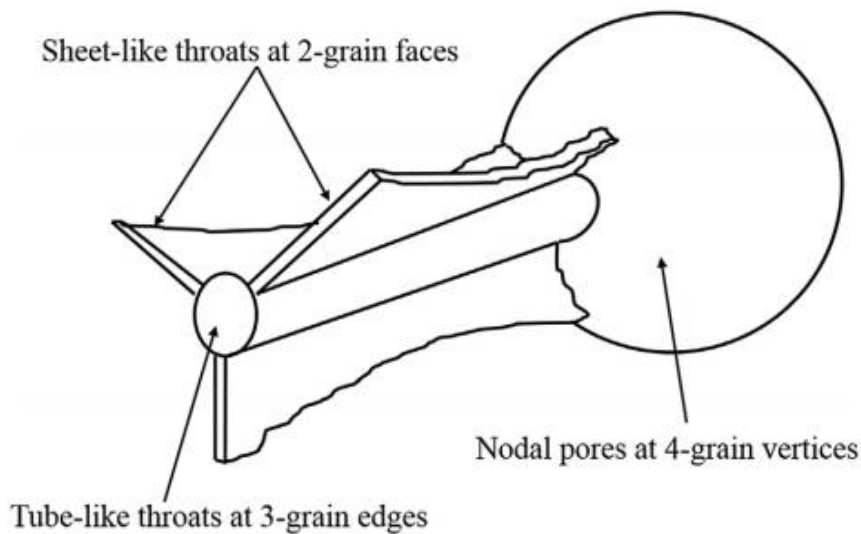
مسیرهای جریان الکتریکی وجود دارد که این مفروضات واقعی نیست.

<sup>۱</sup> Brace

## ۲-۸- مدل‌های شبکه خلل و فرج<sup>۱</sup>

شبکه خلل و فرج، همان‌طور که در شکل ۲-۲ (مدل مفهومی) و شکل ۳-۲ (مدل ساده شده)، نشان داده شده است، متشکل از یک سری گره‌هایی است که نشان‌دهنده خلل و فرج منحصربه‌فرد از ساختار منافذ و اشکال‌بندی است که گره‌ها را به فضاهای نزدیک پیوند می‌زند [۹۰]. ژو و همکاران (۱۹۹۵) یک مدل شبکه ساده‌شده به وسیله انتخاب یک لوله با سطح متقاطع به عنوان عامل هدایت سیال پیشنهاد کردند [۹۱]. تراوایی محیط متخلخل به وسیله هندسه خلل و فرج، مانند توزیع اندازه منافذ و اتصال منافذ مشخص شده است [۹۲].

در این بخش مدل‌های دیگری نیز توسط فات<sup>۲</sup> (۱۹۵۶) [۹۳]، ژو و همکاران (۱۹۹۵) [۹۱]، قرباسجی و بنتز<sup>۳</sup> (۱۹۹۶) [۹۴]، ارائه شده است که به علت رعایت اختصار از بیان آنها خودداری می‌شود.

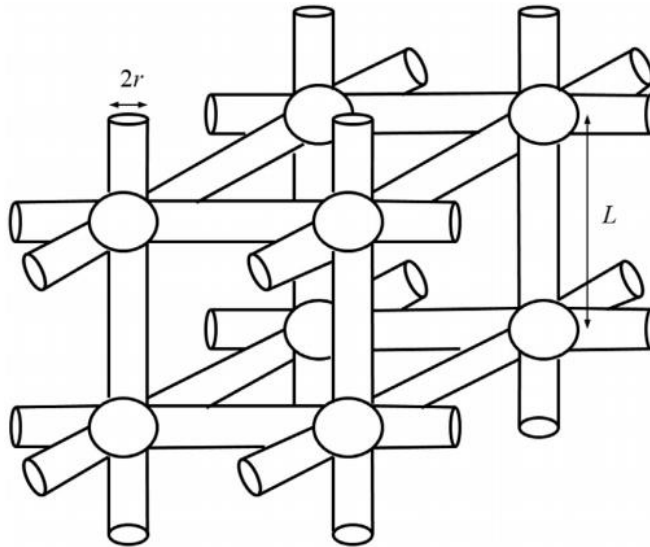


شکل ۲-۲ مدل مفهومی از فضای خلل و فرج [۹۲].

<sup>۱</sup> Pore network models

<sup>۲</sup> Fatt

<sup>۳</sup> Garboczi and Bentz



شکل ۳-۲ مدل شبکه ساده شده [۹۱].

## ۲-۹- معادله آدین<sup>۱</sup>

معادله آدین (۱۹۷۸) از اطلاعات تجربی، منجر به مدل تخلخل - تراوایی می‌شود که مطابق معادله

(۳۶-۲) است [۹۵]:

$$\frac{k}{k_0} = \left[ 1 - \left( \frac{\varepsilon}{\phi_0} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^3 \quad (36-2)$$

$\varepsilon$ ، کسر حجمی از محیط متخلخل توسط حالت ایده‌آل ته‌نشست است که از فرمول (۳۷-۲) به دست

می‌آید:

$$\varepsilon = \phi_0 - \phi \quad (37-2)$$

معادله تسهیل شده برای کاهش تخلخل به وسیله فرمول (۳۸-۲) قابل انجام است:

$$\frac{\phi}{\phi_0} = 1 - \left( \frac{\varepsilon}{\phi_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{or} \quad \phi = \phi_0 - \sqrt{\phi_0 \varepsilon} \quad (38-2)$$

<sup>۱</sup> Adin's equation

## ۲-۱۰- مفهوم کارایی جریان<sup>۱</sup>

رجانی<sup>۲</sup> (۱۹۸۸) محاسبه کرد که تابع تراوایی می‌تواند مجزا شود و به عنوان یک محصول تابع منافذ هندسی C و تابع تخلخل  $f(\phi)$  به صورت معادله (۳۹-۲) در نظر گرفته شود [۹۶]:

$$k = Cf(\phi) \quad (39-2)$$

این مدل به خصوص برای محیط‌های متخلخلی مفید است که تحت تأثیر دگرسانی در حین آسیب سازند قرار گرفته‌اند. عموماً، معادله کوزنی - کارمن نتوانست به خوبی دهانه منافذ پلاگ شده بدون کاهش تخلخل را ارائه دهد. این مشکل می‌تواند به وسیله معرفی عامل راندمان جریان ( $\gamma$ )، در دیدگاه معادله (۳۹-۲) کاهش یابد [۹۷-۱۰۰]. بنابراین، تغییر تراوایی می‌تواند طبق معادله (۴۰-۲) بیان شود [۹۹]:

$$\frac{k}{k_0} = a\gamma^b \left( \frac{\phi}{\phi_0} \right)^c \quad (40-2)$$

که  $a$ ،  $b$  و  $c$  پارامترهای تعیین کننده تجربی هستند و  $k_0$  و  $\phi_0$  به ترتیب نشان دهنده تراوایی و تخلخل در حالت اولیه هستند. عامل راندمان جریان ( $\gamma$ )، می‌تواند به عنوان مقیاس منافذ باز به منظور اجازه جریان مایع نیز تفسیر شود. بنابراین وقتی منافذ بسته شدند،  $\gamma = 0$  است، از این رو  $k = 0$  است، حتی اگر  $\phi$  برابر صفر نباشد [۹۹، ۱۰۱].

## ۲-۱۱- مدل پیچاپیچی با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی

هاگی وارا<sup>۳</sup> (۱۹۸۶) ضریب پیچاپیچی را با استفاده از معادله (۴۱-۲) محاسبه نمود.

$$\tau = \left( \frac{a}{\phi^{m-1}} \right)^2 \quad (41-2)$$

که در فرمول فوق،  $a$  عامل لیتولوژی و  $m$  ضریب سیمان‌شدگی است.

<sup>۱</sup> Flow efficiency concept

<sup>۲</sup> Rajani

<sup>۳</sup> Hagiwara

هاگی وارا (۱۹۸۶) یک مدل برای تخمین تراوایی با استفاده از رویکرد تئوری ارائه داد که به وسیله

فرمول (۴۲-۲) قابل دستیابی است [۱۰۲]:

$$k = C\phi^m < R^2 > \quad (۴۲-۲)$$

که  $< R^2 >$  میانگین مربع شعاع گلوگاه خلل و فرج به میکرومتر مربع و  $C$  ثابت است. معادله

(۴۲-۲) را به صورت معادله (۴۳-۲) می توان نوشت:

$$k = C \frac{\phi}{(1/\phi^{m-1})} < R^2 > = C \frac{\phi}{\tau_H} < R^2 > \quad (۴۳-۲)$$

باید توجه داشت که معادله (۴۳-۲) مشابه ضریب کوزنی است اما تعریف پیچیدگی در آن فرق

می کند ( $C$  برابر با  $1/8$  و  $\tau$  برابر با  $(\tau_H)^2$ ) است.

برای به دست آوردن معادله (۴۳-۲) از فرمول زیر استفاده می شود:

$$k = C\phi^{2m-1} < R^2 > \quad (۴۴-۲)$$

## ۲-۱۲- توسعه مدل پیچاپیچی به دست آمده

از زمانی که مدل پیچاپیچی براساس رویکرد تئوری به طور آزمایشگاهی تأیید شد معادله (۴۱-۲)،

اکنون می تواند در مدل اصلی کوزنی - کارمن شرکت کند (۲-۲). مدل پیشنهاد شده می تواند به صورت

معادله (۴۵-۲) نوشته شود:

$$k = \left( \frac{1}{f_g a^2 S_{v_{gr}}^2} \right) \frac{\phi^{2m+1}}{(1-\phi)^2} \quad (۴۵-۲)$$

در معادله فوق  $f_g$ ، عامل شکل خلل و فرج است که در معادله (۲-۲)، به شکل  $K_{ps}$  بیان شده است.

معادله (۴۵-۲) مدلی را برای تخمین تراوایی و تأثیر پیچاپیچی روی رابطه کوزنی - کارمن ارائه

می دهد. برای لوله های موئینگی، که  $m$ ،  $a$  و  $\tau$  با هم برابر یک هستند، مدل ارائه شده برابر مدل کوزنی-

کارمن است، و این سؤال که چرا مدل کوزنی - کارمن برای سنگ های همگن و محیط متخلخل ترکیبی

بسیار موفق بود را توضیح می‌دهد. ماهیت غیرخطی نتایج پیچاپیچی باعث مدل قانون - توان می‌شود که قویاً تحت تأثیر ضریب سیمان‌شدگی ( $m$ ) است. رنج معمول  $m$  تغییراتی از ۱ تا بیشتر از ۳ را دارد [۱۰۳]. ضریب سیمان‌شدگی یک پارامتر خیلی مهم است که منعکس‌کننده بسیاری از ویژگی‌های پتروفیزیکی و هندسی از محیط متخلخل است که شامل درجه سیمانی‌شدن، شکل و اندازه ذرات، تراکم و جورشدگی، نوع خلل و فرج و نوع دانه‌بندی است [۱۰۳-۱۰۵]. در نتیجه، تلفیق  $m$  در مدل ارائه شده مطمئناً نیازمند تخمین بهتر تراوایی است.

پترسون (۱۹۸۳) و والش و براس (۱۹۸۴) رابطه‌ای بین ویژگی‌های الکتریکی و پیچاپیچی را انتشار

دادند، که با فاکتور مقاومت سازند  $F = \frac{(l_c/l)^2}{\phi} = \frac{\tau^2}{\phi}$  تعیین می‌شود و رابطه (۲-۴۶) را برای محاسبه تراوایی، پیشنهاد دادند [۸۸, ۸۹]:

$$k = \frac{R_h^2}{f_g F} = \frac{1}{f_g F \sum_p^2} \quad (۲-۴۶)$$

در معادله فوق  $R_h$  شعاع هیدرولیک است و به عنوان نسبت مساحت سطح خلل و فرج به حجم خلل و فرج تعریف شده است. مساحت سطح خلل و فرج اغلب توسط حجم خلل و فرج نرمال‌سازی شده است، که اغلب سطح ویژه نامیده می‌شود، و  $f_g$ ، عامل شکل خلل و فرج است.  $\sum_p$  مساحت سطح ویژه به عنوان نسبت سطح خلل و فرج به حجم دانه‌های رسوبی تعریف شده است.

## ۲-۱۳- انواع مدل‌ها براساس اندازه دانه‌ها یا ذرات رسوبی و کانی‌شناسی

### ۲-۱۳-۱- معادله کرومبین و مونک<sup>۱</sup>

کرومبین و مونک (۱۹۴۳)، تراوایی در لایه‌های ماسه‌سنگی با تخلخل ثابت ۴۰ درصد و قطر

دانه‌بندی ذرات را اندازه‌گیری کردند. تحلیل آنها منجر به ارائه مدل (۲-۴۷) شد [۱۰۶, ۱۰۷]:

<sup>۱</sup> Krumbin and Monk



$$k(darcy) = 760D_g^2 \exp(-1.31\sigma_D) \quad (47-2)$$

که  $D_g$  میانگین هندسی قطر به میلی‌متر است،  $\sigma_D$  انحراف معیار قطر دانه‌بندی بر حسب واحد phi است که از رابطه  $phi = -\log_2 [D(mm)]$  به دست می‌آید. اگرچه معادله کرومبین و مونک براساس ماسه‌سنگ با تخلخل ۴۰ درصد است و پارامتر تخلخل را شامل نمی‌شود، اما بیرد و وایلی<sup>۱</sup> نشان دادند که معادله (۴۷-۲) به طور نسبتاً خوبی با اطلاعات آنها هم‌خوانی دارد، به طوری که محدوده تخلخل آنها بین ۲۳ درصد تا ۴۳ درصد بود. در حقیقت، به خاطر مشکلات در تهیه ماسه همگن، بیرد و ویل تصمیم به استفاده از مقادیر  $k$  محاسبه شده از معادله (۴۶-۲) به جای داده‌های اندازه‌گیری خود با جورشدگی ضعیف و خیلی ضعیف کردند. اگر معادله (۴۷-۲) بتواند  $k$  را برای مقادیر مختلف  $\phi$  در ماسه‌سنگ غیر متراکم<sup>۲</sup> پیش‌بینی کند، پس در این معادله بر اساس جورشدگی دانه‌ها باید تمام اثرات مرتبط با کاهش تخلخل را اصلاح کرد. مطالعات آزمایشگاهی کرومبین و مونک (۱۹۴۳) و بیرد و ویل (۱۹۷۳) ماسه‌ها را از منابع معمول موجود الک کردند، بنابراین مشخصات دانه‌بندی از قبیل بی‌شکلی، کرویت و بافت تغییر زیادی نداشت. بنابراین، جورشدگی یک هدف کنترل شده برای لگاریتم نرمال بود. در این وضعیت که شرایط ایده‌آل وجود نداشت، باید تکنیک‌های دیگری برای پیش‌بینی تراوایی در ماسه‌های غیر متراکم استفاده شود [۱۰۶، ۱۰۷]. مارو<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۶۹) از تکنیک آماری روی داده‌های ماسه‌های سواحل خلیج<sup>۴</sup> استفاده کردند و متوجه شدند که اگر ذرات صاف باشند، بهترین ضریب تراوایی با لگاریتم قطر ذرات جورشده (که اندازه‌ای کمتر از ۴۴ میکرومتر داشتند) وجود دارد [۱۰۸].

## ۲-۱۳-۲- مدل برگ<sup>۵</sup>

یک مدل ارتباط ویژگی‌های فیزیکی ذرات (اندازه ذرات، شکل و جورشدگی) با تراوایی در مدل برگ (۱۹۷۰) ارائه شده است. برگ (۱۹۷۰) یک منفذ مستقیم را به عنوان منفذی که به مواد جامد

<sup>۱</sup> Beard and Weyl

<sup>۲</sup> Morrow

<sup>۵</sup> Berg's model

<sup>۳</sup> Unconsolidated sand packs

<sup>۴</sup> Gulf coast sands

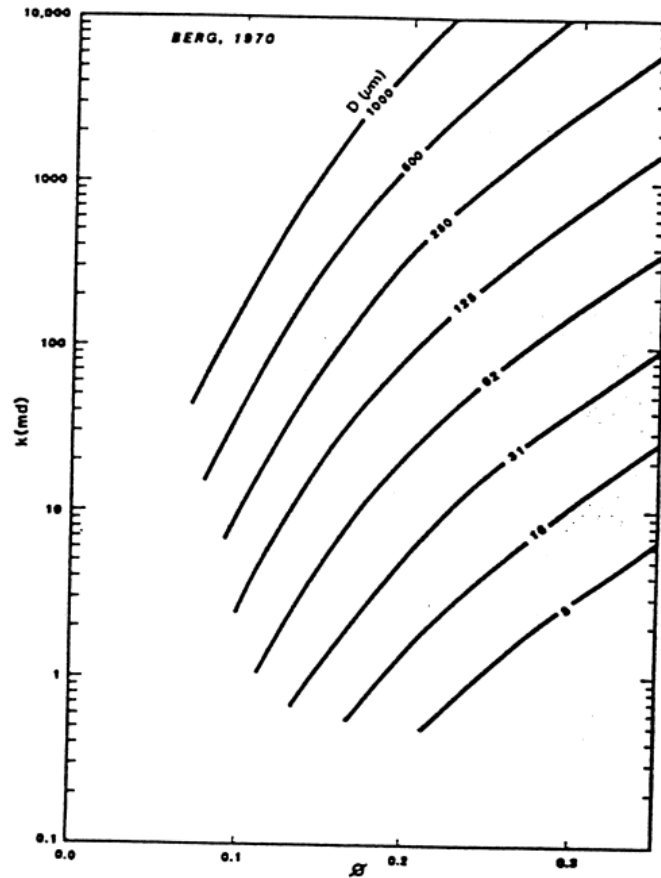
بدون تغییر در شکل یا مسیر، اجازه عبور می‌دهد را در فضاهاى مختلف معرفی کرد و رابطه (۲-۴۸) را بین  $k$  و  $\phi$  ایجاد کردند [۱۰۹]:

$$k(\text{darcy}) = 5.1 \times 10^{-6} \phi^{5.1} D^2 e^{-1.385 p} \quad (۲-۴۸)$$

که  $D$  (میلی‌متر) قطر میانگین ذرات است،  $\phi$  تخلخل بر حسب درصد و  $p$  جورشدگی است. اگر تراوایی به میلی‌متر بیان شود  $D$  به میکرومتر است و  $\phi$  تخلخل ذرات به صورت کسری است که فرمول فوق به صورت فرمول (۲-۴۹) در می‌آید:

$$k(\text{md}) = 80.8 \phi^{5.1} D^2 e^{-1.385 p} \quad (۲-۴۹)$$

به منظور محاسبه تغییرات اندازه ذرات، برگ دو مخلوط از ذرات کروی را در نظر گرفت و فرض کرد که  $k$  ابتدا به وسیله ذرات کوچک‌تر کنترل می‌شود. این دسته‌بندی  $p = p_{90} - p_{10}$  را ارائه می‌دهد که معیار درصدی است و برای توزیع اندازه ذرات می‌باشد. اصطلاح  $P$  بر حسب  $\phi$  بیان می‌شود که از رابطه  $\phi = -\log_2 [D(\text{mm})]$  به دست می‌آید. برای یک نمونه با قطر متوسط ۰/۱۷ میلی‌متر، مقدار  $p$  برای  $p$  دلالت می‌کند که ۱۰ درصد از ذرات بزرگ‌تر از ۰/۲۵ میلی‌متر و ۱۰ درصد کوچک‌تر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر است. معادله برگ در شکل ۲-۴ برای  $p=1$  و  $D$  متغیر، شرح داده شده است. تراوایی به سرعت با افزایش تخلخل افزایش می‌یابد، که وابسته به  $\phi$  از توان ۵ است و بر روی منحنی از بالا به پایین اندازه ذرات در حال کاهش است. مدل برگ برای اندازه‌گیری میانگین تراوایی در ماسه و همچنین برای سنگ‌های کوارتز قابل انجام است، اگرچه برگ خود این انتظار را نداشت که مدل او کمتر از ۳۰ درصد را پوشش دهد.



شکل ۲-۴) مدل تئوری برگ (۱۹۷۰) به همراه تخلخل، اندازه دانه و جورشدگی [۱۰۹].

### ۲-۱۳-۳- مدل ون بارن<sup>۱</sup>

ون بارن (۱۹۷۹) نتیجه‌ای مشابه با برگ به دست آورد. ون بارن با استفاده از مدل کوزنی-کارمن و

جانشین  $F\phi = \tau^2$ ،  $\sum_r = 4\phi/d$  و  $F = \phi^{-m}$  برای به دست آوردن تراوایی از فرمول (۲-۵۰) استفاده

کرد ( $\sum_r$  مساحت سطح ویژه) معادل  $s_{vgr}$  در مدل کوزنی - کارمن است) [۱۱۰]:

$$k = C_2 d^2 \phi^m \quad (۲-۵۰)$$

$C_2$  یک ثابت،  $d$  قطر خلل و فرج و  $m$  ضریب سیمان‌شدگی است. وان بارن به صورت تجربی اول

با استفاده از مجموعه‌ای از اندازه‌گیری آزمایشگاهی  $k$ ،  $\phi$  و سپس با تزریق جیوه برای به دست آوردن

<sup>۱</sup> Van Baaren's model

فرمول (۵۱-۲) استفاده کرد:

$$k = 10d_{70}^2\phi^m \quad (۵۱-۲)$$

که  $d_{70}$  یک قطر مؤثر خلل و فرج در ۷۰ درصد رطوبت اشباع است. ون بارن از معادله (۵۱-۲) برای گام‌های میانی در پیش‌بینی تراوایی بر اساس متغیرهای سنگ‌شناسی استفاده کرد و با استفاده از اطلاعات ماسه‌سنگ‌ها و کربنات‌ها یک ارتباط تجربی بین  $\phi$  و  $d_{70}/D$  را ایجاد کرد (۵۲-۲):

$$\phi = C \left( \frac{d_{70}}{D_d} \right)^{0.55} \quad (۵۲-۲)$$

که  $D_d$  (میکرومتر) اندازه غالب ذرات از مشاهدات سنگ‌شناسی است و  $C$  شاخص جورشدگی است.

جایگزینی معادله (۵۲-۲) در معادله (۵۱-۲) رابطه (۵۳-۲) را ایجاد کرد:

$$k = 10D_d^2\phi^{3.64+m}C^{-3.64} \quad (۵۳-۲)$$

ون بارن همچنین جدولی مرتبط با ضریب سازند  $m$  در شرایطی که ماسه‌ها و ماسه‌سنگ‌ها متراکم شده‌اند، ارائه داد. در نتیجه، معادله (۵۳-۲) برای تخمین  $k$  از مشاهدات سنگ‌شناسی (حالت ادغام، قطر غالب دانه‌ها ( $D_d$ ))، و شاخص جورشدگی ( $C$ ) می‌تواند استفاده شود و تخمین تخلخل از مغزه و نگارها است. این طور فرض می‌شود که اندازه غالب دانه‌ها ( $D_d$ ) با قطر متوسط دانه‌ها ( $D$ ) در معادله برگ برابر است، بنابراین معادله (۵۳-۲) بسیار نزدیک به معادله (۴۹-۲) است. برای مثال با فرض جورشدگی  $p=1$  در معادله (۴۹-۲)، معادله (۵۴-۲) حاصل می‌شود:

$$k(md) = 20.2\phi^{5.1}D^2 \quad (۵۴-۲)$$

در حالی که برای ماسه‌های خوب جور شده،  $C = 0/84$  معادله (۵۳-۲) به صورت معادله (۵۵-۲)

ارائه می‌شود:

$$k = 18.8D_d^2\phi^{3.64+m} \quad (۵۵-۲)$$

معادله ون بارن برای استفاده به عنوان پارامتری که وابسته به متغیرهای اطلاعات سنگ‌شناسی

است، آسان‌تر از معادله برگ است. توجه داشته باشید که هر دو معادله با اطلاعات ویل و بیرد روی ماسه‌های غیر متراکم سازگار است که  $k$  با مربع اندازه ذرات افزایش می‌یابد.

## ۲-۱۴- مدل مربوط به کانی‌شناسی

هرون<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) از مدل کوزنی-کارمن به عنوان نقطه شروع برای یک مدل استفاده کرد که با

استفاده از فراوانی کانی‌شناسی در سطح، معادله (۲-۵۶) را به دست آورد [۴۵]:

$$k = A_f \left[ \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \right] \exp\left(\sum B_i M_i\right) \quad (۲-۵۶)$$

در رابطه فوق  $M_i$  اندازه ذرات هر کدام از کانی‌های سنگ و  $B_i$  ثابت هر کانی است. ضریب

که  $A_f = 4.9 + 2F_{\max}$  حداکثر مقدار فلدسپات در کل بازه مورد نظر است.  $A_f$  بیان‌کننده بلوغ بافتی

ته‌نشست در حضور فلدسپات است. بالاترین درصد تراوایی سنگ جایی خواهد بود که فلدسپات به کانی

رس تبدیل می‌شود. هرون اشاره کرد که معیارهای دیگری از محتوای فلدسپات می‌تواند برای ارزیابی

$A_f$  استفاده کرد.

## ۲-۱۵- رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از تئوری هندسه فرکتالی

### ۲-۱۵-۱- خصوصیت فرکتال محیط متخلخل

در دو دهه گذشته، تئوری هندسه فرکتال به عنوان ابزاری در بسیاری از رشته‌ها برای توصیف اشیاء؛

نامنظم و بی‌قاعده از قبیل خطوط جزیره‌ها و سواحل روی زمین، سطوح خشن، منافذ ماسه سنگ‌ها،

سنگ‌ها و سطوح منفذدار، خاک‌ها، فراکتال تراکمی و مواد دانه‌ای و مواد منفذدار استفاده شده است.

ماهیت نامنظم خلل و فرج میکرو ساختار، وجود ویژگی فرکتال ایجاد شده توسط منافذ و پیچ و خم

موئینه را پیشنهاد می‌کند [۱۱۱]. کاتز و تامپسون<sup>۲</sup> (۱۹۸۵) اولین بار شواهد تجربی ارائه دادند که

بیان‌کننده ماهیت فرکتالی فضای خلل و فرج نمونه‌ی ماسه‌سنگی است که خاصیت خود-تشابهی دارند

<sup>۱</sup> Herron

<sup>۲</sup> Kats and Thompson

[۱۱۲]. تئوری هندسه فراکتال به عنوان ابزاری قدرتمند برای آنالیز محیط متخلخل با ریزساختارهای پیچیده و تصادفی ثابت شده است، و چندین مدل هندسه فراکتال برای جریان هیدرولیکی (k) محیط متخلخل ارائه شده است [۱۱۱].

یو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۱ و ۲۰۰۲) ضمن استفاده از نظریه هندسه فراکتال، پیشنهاد کردند که تجمع توزیع اندازه منافذ در محیط تخلخل از رابطه (۵۷-۲) قابل انجام است [۱۱۳-۱۱۵]:

$$N(\varepsilon \geq \lambda) = \left( \frac{\lambda_{\max}}{\lambda} \right)^{D_f} \quad (57-2)$$

که N تعداد منافذ یا موئینگی است،  $\varepsilon$  مقیاس طول و  $\lambda$  اندازه خلل و فرج است. بعد فراکتال  $D_f$  برای فضای خلل و فرج در محدوده بین ۱ و ۲ ( $1 < D_f < 2$ ) است و محدوده بین ۲ و ۳ ( $2 < D_f < 3$ ) به ترتیب در بعد دوم و سوم است. تعداد کل خلل و فرج از کمترین قطر  $\lambda_{\min}$  تا بیشترین قطر  $\lambda_{\max}$  را می توان با استفاده از معادله (۵۷-۲) بر اساس معادله (۵۸-۲) به دست آورد:

$$N(\varepsilon \geq \lambda_{\min}) = \left( \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \right)^{D_f} \quad (58-2)$$

ارتباط بین مقیاس دهی فراکتال بین قطر و طول موئینگی مطابق معادله (۵۹-۲) است [۱۱۳]:

$$L_t(\lambda) = \lambda^{1-D_f} L_0^{D_f} \quad (59-2)$$

که  $L_t(\lambda)$  طول پیچاپیچی،  $L_0$  طول مستقیم (بدون پیچاپیچی) و  $D_T$  بین ۱ و ۲ ( $1 < D_T < 2$ ) است و بعد فراکتال برای پیچاپیچی در این دو بعد است. یو و لی برای تخلخل و بعد فراکتال به وسیله هندسه فراکتال خود - تشابهی فرمول (۶۰-۲) را ارائه دادند [۱۱۵]:

$$\phi = \left( \frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{d_E - D_f} \quad (60-2)$$

<sup>۱</sup> Yu

که  $d_E$  بعد اقلیدوسی، و  $d_E=2,3$  به ترتیب در فضای دو بعدی و سه بعدی است. معادلات (۲-۵۷) تا (۲-۶۰) فرم پایه‌ای را برای آنالیز فراکتالی تراوایی تشکیل می‌دهند که برای به دست آوردن ثابت‌های کوزنی-کارمن استفاده می‌شود.

## ۲-۱۵-۲- تشریح ارتباط تخلخل - تراوایی به وسیله مفهوم فراکتال

با ترکیب معادله هاگان - پوازیه<sup>۱</sup> و قانون دارسی<sup>۲</sup>، یو و چانگ (۲۰۰۲) یک فرمول تحلیلی برای تراوایی مؤثر با این فرض که محیط‌های متخلخل دارای لوله‌های موئینه پرپیچ و خم هستند، ارائه دادند که از قانون فراکتالی پیروی می‌کند. تراوایی فراکتالی  $k$  می‌تواند مطابق معادله (۲-۶۱) باشد [۱۱۳]:

$$k = G \frac{L_0^{1-D_f}}{A} \frac{D_f}{3+D_f-D_f} \lambda_{\max}^{3+D_f} \quad (۲-۶۱)$$

این معادله بیان می‌کند که تراوایی تابعی از بعد فراکتال  $D_f$ ، بعد فراکتال پیچیده  $D_T$  و پارامترهای ساختاری از سلول واحد (سطح متقاطع  $A$ ، طول  $L_0$  و ماکزیمم اندازه خلل و فرج  $\lambda_{\max}$ ) است.  $G = \pi/128$  یک ثابت هندسی است. برای لوله‌های موئینه مستقیم (به عنوان مثال دارای عدم پیچاپیچی  $D_T=1$ )، تراوایی مطابق معادله (۲-۶۲) تغییر می‌کند:

$$k = GD_f \lambda_{\max}^4 / [A(4 - D_f)] \quad (۲-۶۲)$$

در معادله (۲-۶۱) پارامترهای  $A$  و  $L_0$  نیاز به حل شدن دارند. پنگ ژو و بومینگ یو<sup>۳</sup> (۲۰۰۷) بیان کردند که خلل و فرج با قطر متفاوت  $\lambda$  در نظر گرفته شود، در نتیجه کل سطح خلل و فرج ( $A_p$ ) را می‌توان به کمک معادله (۲-۶۳) نشان داد [۱۱۱]:

$$A_p = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \frac{\pi}{4} \lambda^2 (-dN) = \frac{\pi D_f \lambda_{\max}^2}{4(2 - D_f)} (1 - \phi) \quad (۲-۶۳)$$

در یک سطح مقطع مشخص مانند  $A$ :

<sup>۱</sup> Hagen-Poiseuille

<sup>۲</sup> Darcy

<sup>۳</sup> Peng Xu and Boming Yu

$$A = \frac{A_p}{\phi} = \frac{1-\phi}{\phi} \frac{\pi D_f \lambda_{\max}^2}{4(2-D_f)} \quad (64-2)$$

آنها با قرار دادن معادله (64-2) در معادله (61-2) و با در نظر داشتن تقریب  $L_0 = \sqrt{A}$  تراوایی را توسعه دادند (65-2):

$$k = \frac{(\pi D_f)^{(1-D_f)/2} [4(2-D_f)]^{(1+D_f)/2}}{128(3+D_f-D_f)} \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{(1+D_f)/2} \lambda_{\max}^2 \quad (65-2)$$

که می‌تواند به صورت معادله (66-2) بیان شود:

$$k = C_f \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{(1+D_f)/2} \lambda_{\max}^2 \quad (66-2)$$

که ضریب  $C_f = \frac{(\pi D_f)^{(1-D_f)/2} [4(2-D_f)]^{(1+D_f)/2}}{128(3+D_f-D_f)}$  نیز وابسته به تخلخل است. معادله (66-2)

مرتبط با تراوایی محیط همگن متخلخل با میکروساختارها است که بیان‌کننده وابستگی تراوایی به تخلخل، ماکزیمم اندازه خلل و فرج و بعد فرکتال  $D_f$  و  $D_T$  است. تراوایی مؤثر بدون بعد  $(k^+)$  می‌تواند به صورت معادله (67-2) بیان شود:

$$k^+ = \frac{k}{\lambda_{\max}^2} = C_f \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right)^{(1+D_f)/2} \quad (67-2)$$

اگر مدل موئینگی مستقیم فرض شود، تراوایی به صورت معادله (68-2) تغییر می‌یابد:

$$k = \frac{2-D_f}{32(4-D_f)} \frac{\phi}{1-\phi} \lambda_{\max}^2 \quad (68-2)$$

## ۲-۱۶- بحث

اگرچه معادله کوزنی و کارمن به طور گسترده‌ای پذیرفته شده و گسترش یافته است، ولی محدودیت‌هایی هم دارد. علاوه براین، این معادله یک رابطه نیمه تجربی است و ثابت کوزنی- کارمن



یک ثابت تجربی است [۱۱۶]. مدل کوزنی- کارمن اغلب اصلاح شده است و نسخه‌های متفاوت تغییر یافته برای بهتر شدن تخمین تراوایی دارد. جدول ۱-۲ خلاصه برخی از تغییرات از معادله کوزنی- کارمن را نشان می‌دهد [۱۱۱]. مک گرگور<sup>۱</sup> (۱۹۶۵) مدل کوزنی و کارمن را برای محیط فیبری<sup>۲</sup> به منظور ساختن مدل جریان از میان رشته‌های فیبری گسترش داد [۱۱۷]. بوربی<sup>۳</sup> و همکاران (۱۹۸۷) پیشنهاد اصلاح روابط با استفاده از متغیر توان برای تخلخل که مناسب برای تخلخل پایین است در محدوده‌ی n از مقدار ۳ (برای تخلخل بزرگ) تا مقدار ۷-۸ (برای تخلخل خیلی پایین) را ارائه دادند [۱۱۸]. پاندا و لیک (۱۹۹۴) تراوایی تک-فازی محیط‌های غیر متراکم از دیدگاه توزیع محلی اندازه ذرات (PSD)<sup>۴</sup> و ویژگی‌های فیزیکی کل را پیشنهاد کردند [۱۱۹]. شی و لی<sup>۵</sup> (۱۹۹۸) و رودریگز<sup>۶</sup> و همکاران، (۲۰۰۴) معادله کوزنی - کارمن را اصلاح کردند، که معادله کوزنی- کارمن نمی‌تواند همه‌ی داده‌های چاه را برازش کند مگر اینکه هر دو پارامتر C (عامل تراوایی) و n (توان تجربی) تغییر پیدا کند [۱۲۰، ۷۴]. علاوه بر این، تخلخل مؤثر [۱۲۱] و نفوذ [۱۲۲] برای ایجاد تغییر در معادله کوزنی- کارمن در نظر گرفته شده بود، هندسه فراکتال [۷۲، ۷۳، ۱۲۳، ۱۲۴] و قانون آرچی [۷۳، ۱۲۳] در استخراج تراوایی نیز استفاده شدند.

جدول ۱-۲) معادله کوزنی- کارمن و اصلاح آن برای محیط‌های متخلخل مختلف

منبع	معادله تراوایی	محیط
McGregor [۱۱۷]	$k = \frac{d^2 \phi^3}{16c(1-\phi)^2}$	محیط فیبری
Bourbie et al. [۱۱۸]	$k = C\phi^n d^2$	محیط متخلخل
Panda and Lake [۱۱۹]	$k = \frac{\phi^3 d^2}{72\tau^2(1-\phi)^2} \left[ \frac{(\gamma C_d^3 + 3C_d^2 + 1)^2}{(1+C_d^2)^2} \right]$	غیر متراکم

<sup>۱</sup> McGregor

<sup>۲</sup> Bourbie

<sup>۵</sup> Shih and Lee

<sup>۲</sup> Textile assembly

<sup>۴</sup> Particle size distribution

<sup>۶</sup> Rodriguez

ادامه جدول ۱-۲) معادله کوزنی - کارمن و اصلاح آن برای محیط‌های متخلخل مختلف

Koponen et al. [۱۲۱]	$k = \frac{\phi_{eff}^3}{C\Gamma^2 S^2}$	ذرات مربعی شکل <sup>۱</sup>
Mavko and Nur [۱۲۲]	$K(md) = Cd^2 (\phi - \phi_c)^3 / (1 + \phi_c - \phi)^2$	ماسه سنگ، کربناته
Bayles et al. [۷۲]	$K(md) = C \frac{\phi^{2+n}}{(1-\phi)^2}, C = c / (8s_g^2 b)$	بخش ذرات نرم <sup>۲</sup>
Pape et al. [۱۲۴]	$k = \frac{\phi r^2}{8\Gamma^2} \left( \frac{2\phi}{3\Gamma^2(1-\phi)} \right)^{\frac{2}{D-1}}$	ماسه سنگ
Civan [۱۲۳]	$\sqrt{\frac{k}{\phi}} = \Gamma \left( \frac{\phi}{\alpha - \phi} \right)^n$	محیط متخلخل
Costa [۷۳]	$k = C \frac{\phi^n}{1-\phi}$	سنگ‌های ریز دانه با زمینه فیبری
Shih and Lee [۱۲۰]	$k = \frac{\phi^{n+1}}{C(1-\phi)^n}$	محیط شیشه‌ای و فیبری
Rodriguez et al. [۷۴]		

C: عامل تراوایی، n: توان تجربی،  $\gamma$ : چولگی PSD،  $C_d$ : ضریب تغییر PSD،  $\phi_{eff}$ : تخلخل مؤثر،  $\phi_c$ : آستانه

نفوذ، r: شعاع ذرات، D: بعد فراکتالی،  $\Gamma$ : پارامتر اتصال هستند.

علاوه بر مدل‌هایی که برای رابطه تخلخل - تراوایی شرح داده شدند، مدل‌های دیگری مانند مدل

اصلاح شده فیر- هج<sup>۳</sup> توسط سیوان<sup>۴</sup> (۲۰۱۶) [۱۲۵]، مدل پاندا<sup>۵</sup> و لیک<sup>۶</sup> برای سنگ‌های متراکم<sup>۷</sup>

توسط پاندا - لیک (۱۹۹۴-۱۹۹۵) [۱۱۹، ۱۲۶]، مدل قانون- توان<sup>۸</sup> سیوان برای سنگ‌های متراکم

(۲۰۰۵، ۲۰۰۳، ۲۰۰۱a,b,c، ۲۰۰۰، ۱۹۹۶a) [۱۲۳، ۱۲۷-۱۳۲]، مدل‌های رگرسیون چندپارامتری

<sup>۱</sup> Square particles

<sup>۲</sup> Fine particale filter cakes

<sup>۳</sup> Fair-hatch

<sup>۴</sup> Civan

<sup>۵</sup> Panda

<sup>۶</sup> Lake

<sup>۷</sup> Consolidated rocks

<sup>۸</sup> Power- Law

توسط نولن<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۲) و سیوان (۱۹۹۶a,b) [۱۲۷, ۱۳۳, ۱۳۴]، معادله ارشد<sup>۲</sup> (۱۹۹۱) [۱۳۵]، معادله فاگلر<sup>۳</sup> توسط خیلار<sup>۴</sup> و فاگلر (۱۹۸۷) [۱۳۶]، معادله شارما<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۰) [۱۳۷]، مدل‌های براساس مساحت سطح و اشباع آب که شامل نمودار گرنبری و کیلان<sup>۶</sup> که توسط گرنبری و کیلان (۱۹۷۷) [۱۳۸] و مدل دوگانه آب<sup>۷</sup> توسط احمد و همکاران (۱۹۸۹) [۱۳۹] و همچنین رابطه بین تخلخل و تراوایی وابسته به تنش که توسط برور و ماروو<sup>۸</sup> (۱۹۸۵) [۱۴۰]، کیلمر<sup>۹</sup> و همکاران (۱۹۸۷) [۱۴۱]، داوید و همکاران (۱۹۹۴) [۷۰]، و لیو و همکاران (۲۰۰۹) [۱۴۲] اشاره کرد که به دلیل رعایت اختصار از شرح آنها خودداری می‌شود.

## ۲-۱۷- جمع‌بندی

در این فصل مرور جامعی از روابط نظری بین تخلخل و تراوایی که در منابع مختلف صورت گرفته، انجام شد و تقریباً تمام روابط حاکم بر تخلخل و تراوایی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. هر کدام از معادلات ارائه شده تابع حالات خاصی هستند و در حالت کلی همه معادلات و روابط معرفی شده را نمی‌توان به کل میدان مورد مطالعه عمومیت داد و با توجه به داده‌های در دسترس و شرایط پیش رو باید معادله صحیح را انتخاب کرد.

<sup>۱</sup> Nolen

<sup>۲</sup> Arshad

<sup>۳</sup> Fogler's Equation

<sup>۴</sup> Khilar

<sup>۵</sup> Sharma's Equation

<sup>۶</sup> Granberry and Keelan's Chart

<sup>۷</sup> Dual Water Model

<sup>۸</sup> Brower and Morrow

<sup>۹</sup> Kilmer



# فصل سوم

زمین شناسی میدان مورد مطالعه

### ۳-۱- مقدمه

به منظور مطالعه ژئوشیمی، پتروفیزیک و مدل سازی میدان مورد مطالعه، شناخت کامل زمین شناسی ناحیه و همچنین ساختارهای تکتونیکی مرتبط با آن ضروری است. لذا در این فصل به اختصار مطالبی در مورد تاریخچه زمین شناسی ناحیه ای، تاریخچه حفاری، زمین شناسی ساختمانی و چینه شناسی میدان مورد مطالعه بحث خواهد شد.

منطقه خاورمیانه از لحاظ صنعت نفت و منابع زیرزمینی جزو استراتژیک ترین و یکی از بزرگترین ایالت هیدروکربنی دنیا به حساب آمده که در محدوده جغرافیایی  $13^{\circ}$  تا  $38^{\circ}$  عرض شمالی و  $35^{\circ}$  تا  $60^{\circ}$  طول شرقی قرار دارد. این منطقه بیش از دو سوم نفت و یک سوم ذخایر گازی کشف شده جهان را در خود جای داده است که نشان از شرایط مناسب تجمع این ذخایر می باشد. یکی از مهم ترین این شرایط تداوم رسوب گذاری از زمان پرکامبرین تاکنون بوده است. رسوب گذاری سنگ های مستعد منشاء، سنگ های مخزن با کیفیت بالا به همراه پوش سنگ های مناسب، همراه با وجود ساختمان های مناسب عوامل اصلی تجمعات هیدروکربوری در این ناحیه هستند [۱۴۳].

کمان قطر- فارس<sup>۱</sup> بخشی از ساختمان صفحه عربی<sup>۲</sup> بوده که در حوضه رسوبی خاورمیانه قرار گرفته است. این حوضه عظیم رسوبی خلیج فارس، غرب و جنوب رشته کوه های زاگرس، شبه جزیره عربستان، عراق، اردن، سوریه و بخش جنوبی ترکیه را شامل می گردد. بطور تقریبی صفحه عربی طولی برابر ۳۰۰۰ km و عرضی برابر ۲۰۰۰ km دارد و بالآآمدگی قطر- فارس در بخش شمال تا شمال شرقی آن واقع شده است. عناصر ساختمانی اصلی در صفحه عربی محصول دو فاز تکتونیکی اصلی می باشند:

- فاز تکتونیکی امر<sup>۳</sup> با سن ۶۲۰ تا ۶۴۰ میلیون سال قبل با روند شمالی- جنوبی در امتداد زون امر در صفحه عربی نخستین فاز را تشکیل می دهد.
- ریفت سیستم نجد<sup>۴</sup> با سن ۵۳۰ تا ۵۷۰ میلیون با پهنای ۳۰۰ km و امتدادی موازی با روند

<sup>۱</sup> Qatar-Fars arch

<sup>۳</sup> Amar collision

<sup>۲</sup> Arabian plate

<sup>۴</sup> Najd rift system

حوضه زاگرس بصورت شمال غربی - جنوب شرقی دومین فاز اصلی را تشکیل می‌دهد [۱۴۴].

### ۳-۲- خلیج فارس و نواحی هیدروکربنی

خلیج فارس در محدوده جغرافیایی  $24^{\circ}$  تا  $30^{\circ}$  عرض شمالی و  $48^{\circ}$  تا  $57^{\circ}$  طول شرقی واقع شده است. بیشترین عمق آب در خلیج فارس در قسمت شمال شرقی آن و نزدیک تنگه هرمز در حدود ۹۰ تا ۱۳۰ متر برآورد شده و عمق میانگین این خلیج ۳۵ متر در نظر گرفته می‌شود [۱۴۵].

جستجو برای یافتن هیدروکربن و فعالیت‌های اکتشافی در خلیج فارس به دهه ۱۹۵۰ باز می‌گردد. در سال ۱۹۵۷ شرکت ملی نفت ایران<sup>۱</sup>، توافق نامه‌ای به منظور اکتشافات نفتی در بخش ایرانی فلات قاره خلیج فارس با شرکت‌هایی از قبیل: شرکت ایتالیایی آجیپ<sup>۲</sup>، شرکت آمریکایی پان<sup>۳</sup>، شرکت سیرپ<sup>۴</sup> و ایپک<sup>۵</sup> منعقد کرد. اولین چاه نفتی در فلات قاره خلیج فارس در سال ۱۹۶۱ توسط شرکت سیرپ در میدان بهرگانسر حفاری شد. در سال‌های بعدی میادینی از قبیل نوروز، درود (۱۳۴۲) و هندیجان (۱۳۴۹) کشف شدند. از دید زمین‌شناسی خلیج فارس یک رمپ کربناته تیپیک در سطح جهانی می‌باشد [۱۴۵]. با توجه به ویژگی‌های چینه‌شناسی، ساختمانی، مخزنی، سنگ منشاء و پوش سنگ، بخش فلات قاره ایران در خلیج فارس به پنج زون مختلف تقسیم می‌شود (شکل ۳-۱) که عبارتند از:

**زون اول:** این زون قسمت شمال غرب خلیج فارس را تحت پوشش قرار داده و غنی‌ترین زون به شمار می‌رود. اغلب مخازن این زون، تخریبی هستند (مانند عضو ماسه‌سنگی اهواز در سازند آسماری). در اغلب میادین نفتی این زون (مانند میادین نوروز و دورود)، طاق‌دیس‌ها روندی شمالی- جنوبی (مشابه روند ساختمانی در بخش عربی) را نشان می‌دهند. البته بعضی ساختارها مانند ابودر و سروش روندهای متفاوتی دارند. دیگر میادین موجود در این زون شامل ابودر، اسفندیار، بهرگانسر، خارک، سروش، فروزان، نوروز و هندیجان می‌باشد.

<sup>۱</sup> NIOC

<sup>۲</sup> PAN

<sup>۵</sup> IPAC

<sup>۳</sup> AGIP

<sup>۴</sup> SIRIP

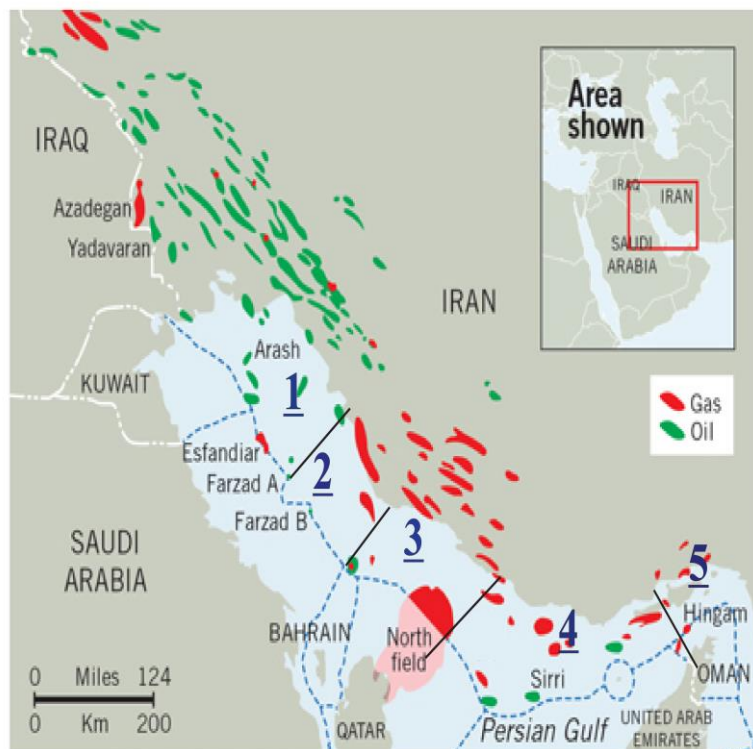
**زون دوم:** در این زون ساختارها با روند غربی و همچنین روند مشاهده شده در زاگرس متفاوت هستند. اغلب مخازن در این زون، کربناته هستند. طاق‌دیس‌ها در اثر حرکت گنبد‌های نمکی سازند هرمز ایجاد شده، و رشد دائمی آنها باعث کاهش ضخامت رسوبات در قسمت فوقانی و تضعیف پوش سنگ و مهاجرت مواد هیدروکربنی از بخش‌های ترک‌دار به سطح دریا شده است.

**زون سوم:** این زون در قسمت شمال و شمال‌غرب کمان قطر واقع شده است و شامل میدان مورد مطالعه می‌باشد.

**زون چهارم:** این زون در بین کمان قطر-گاوبندی و تنگه‌ی هرمز در مرز شرقی خلیج فارس واقع شده است. این زون با نواحی غربی تفاوت بسیاری دارد و لایه‌های رسوبی آن دارای ضخامت بیشتری هستند. به دلیل عمق بیشتر خلیج فارس در این زون، رسوبات این قسمت بیشترین ضخامت را دارا هستند. یکی از ویژگی‌های بارز این زون، توزیع گسترده سنگ‌های تبخیری تشکیل شده از الیگوسن تا اوایل میوسن می‌باشد. سنگ‌های کربناته مانند سازندهای سروک، داریان، فهلیان و قسمت فوقانی سازند سورمه، مهم‌ترین مخازن نفتی را در این زون تشکیل می‌دهند.

**زون پنجم:** این زون تنگه‌ی هرمز را در بر می‌گیرد. در این زون نیز مخازن اصلی، اغلب کربناته هستند (مانند سازندهای سروک و داریان). این زون به شدت تحت تأثیر ساختار زاگرس در شمال و کوه‌های عمان در جنوب قرار گرفته است. جزیره‌های هرمز و لارک دو نمونه از بیرون زدگی‌های نمک در این زون می‌باشند [۱۴۵].





شکل ۱-۳) نواحی پنج گانه هیدروکربنی خلیج فارس به همراه میدان مورد مطالعه که در ناحیه سوم قرار گرفته است.

### ۳-۳- موقعیت و وضعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه، در آبهای خلیج فارس مشترک بین دو کشور ایران و قطر، واقع شده است (شکل ۱-۳). وسعت این میدان ۹۷۰۰ کیلومتر مربع است که در حدود ۳۷۰۰ کیلومترمربع آن در مرز آبی ایران می باشد. ساختمان زمین شناسی میدان مورد مطالعه دارای یالهای ملایم بوده و در واقع تداومی از پلانج شمال شرقی ساختمان فوق عظیم گازی گنبدی شکل در شمال شرقی شبه جزیره قطر می باشد که تحت عنوان گنبد شمالی قطر<sup>۱</sup> شناخته شده است.

ساختمان عظیم مذکور که دارای امتداد شمال شرقی - جنوب غربی می باشد، خود یکی از چند قله ساختمانی ناحیه ای برآمده موسوم به کمان قطر - پارس جنوبی<sup>۲</sup> بر روی پلاتفرم کربناته منطقه خاورمیانه می باشد. دامنه جنوب شرقی این برآمدگی دارای شیب کمتری نسبت به دامنه شمال غربی آن است.

<sup>۱</sup> Qatar North dome

<sup>۲</sup> Qatar-South Pars arc

سازند کنگان (به سن تریاس پسین) و بخش بالایی دالان (به سن پرمین پسین) در واقع مخازن میدان مورد مطالعه محسوب می‌گردند. سازندهای کنگان و دالان معادل سازند خوف<sup>۱</sup> در نام گذاری عربی هستند. مطالعات قبلی شرکت توتال بر روی این میدان منجر به تقسیم سازندهای کنگان - دالان به پنج بخش مخزنی (K1، K2، K3، K4 و K5) گردید. در واقع دو لایه مخزنی K1 و K2 معادل سازند کنگان، لایه های K3 و K4 معادل بخش بالایی دالان و K5 معادل بخش غیر مخزنی دالان پایینی می باشند. بخش انیدریتی نار<sup>۲</sup> مابین لایه‌های K4 و K5 قرار گرفته و بخش‌های دالان پایینی و بالایی را از هم مجزا می‌کند (شکل ۳-۲). چهار لایه مخزنی مذکور یعنی لایه‌های K1 تا K4 در میدان مورد مطالعه دارای تغییرات لیتولوژی بارز می‌باشند.

### ۳-۴- تاریخچه حفاری میدان

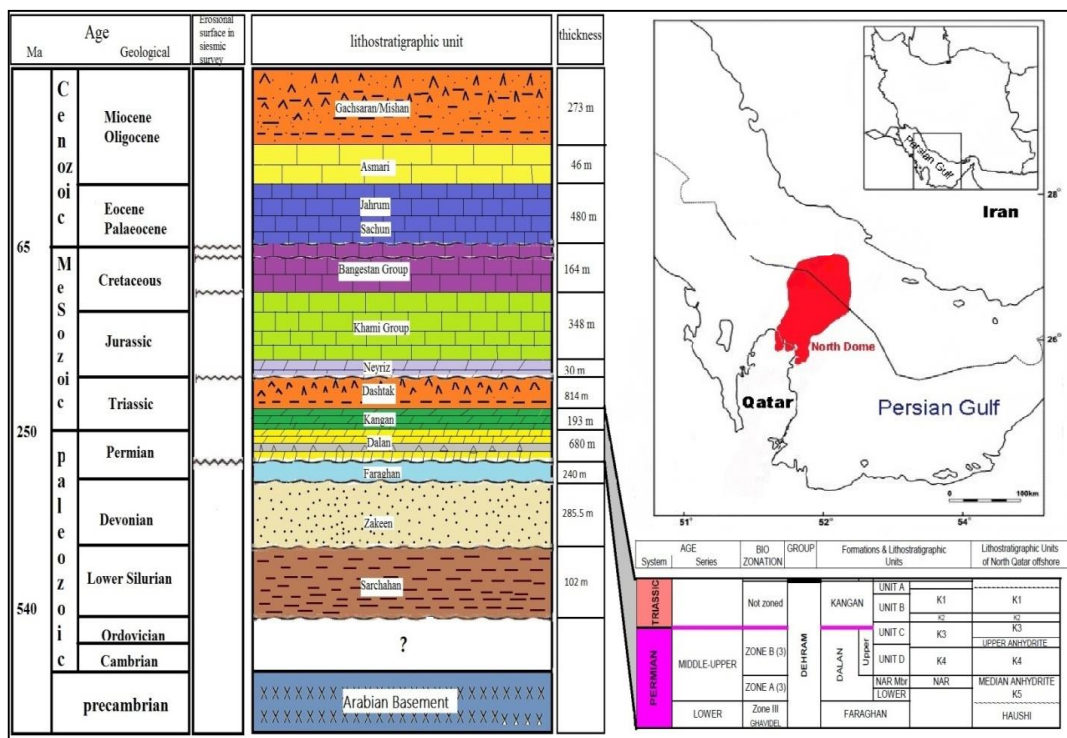
میدان مورد مطالعه با حفاری چاه شماره ۱ (SP-1) کشف گردید. این چاه بر روی ساختمان زمین‌شناسی میدان در تاریخ ۹ اسفند ۱۳۶۹ در فاصله ۹۲ کیلومتری از بندر عسلویه و ۷۵۰ متری از خط میانی در آب‌های خلیج فارس حفاری گردید. حفاری این چاه تا عمق ۳۵۲۲ متری یعنی تا ۱۹ متر داخل سازند فراقون ادامه یافت. عملیات حفاری این چاه در تاریخ ۱۱ دیماه ۱۳۷۰ خاتمه یافت. این چاه اکتشافی در محدوده توسعه فاز ۱ حفاری گردید و به دنبال آن چاه‌های شماره ۲، ۳ و ۴ (SP-2)، SP-3 و SP-4) نیز توسط شرکت ملی حفاری ایران حفاری گردیدند که چاه‌های ذکر شده در قسمت‌های غربی میدان حفر گردیده‌اند و به عنوان چاه‌های اکتشافی<sup>۳</sup> و یا توصیفی<sup>۴</sup> حفاری شده‌اند (شکل ۳-۳).

<sup>۱</sup> Khuff formation

<sup>۲</sup> Appraisal

<sup>۳</sup> Nar member

<sup>۴</sup> delineation wells



شکل ۳-۲) موقعیت، زون بندی و لیتولوژی میدان مورد مطالعه در خلیج فارس [۱۴۶].

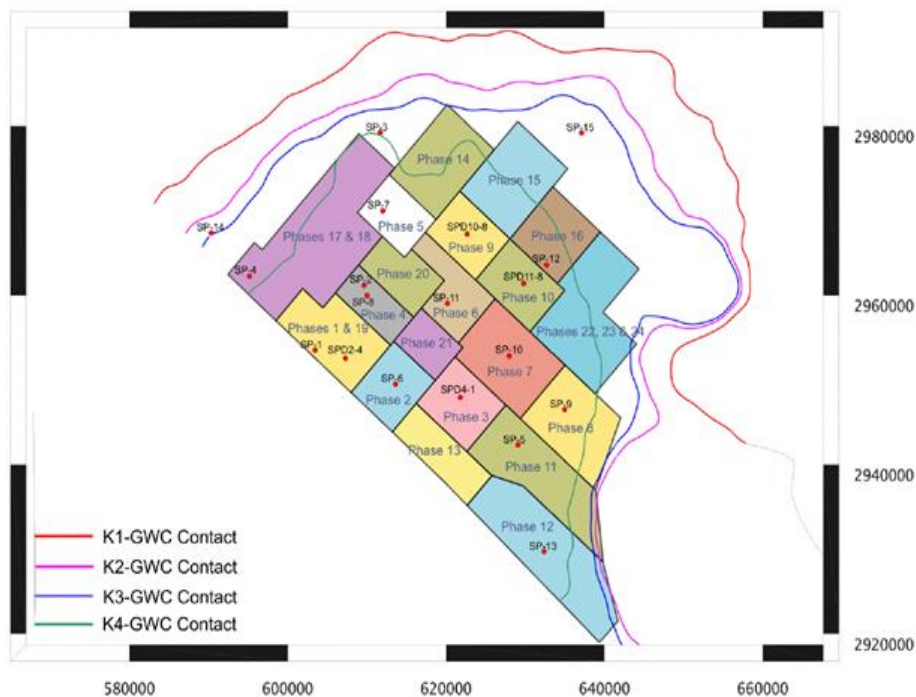
چاه شماره ۲ (SP-2) در فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتری شرق، شمال شرق چاه شماره ۱ (SP-1) و نزدیک به امتداد محور عمودی ساختمان میدان حفاری گردید. هدف از حفر این چاه ارزیابی و توصیف گاز گروم دهرم در طاقدیس میدان بوده است.

چاه شماره ۳ (SP-3) به فاصله ۱۵ کیلومتری از چاه شماره ۲ (SP-2) و ۲۵ کیلومتری چاه شماره ۱ (SP-1) در داخل آب‌های ایران به سمت ساحل و بر روی منحنی هم تراز عمقی ۲۹۵۰ متری حفاری گردید. این چاه به منظور تعیین گسترش مخزن گازی دهرم بر روی طاقدیس میدان حفاری گردید.

چاه شماره ۴ (SP-4) در نزدیکی خط مرز آبی ایران و قطر و در فاصله ۱۰ کیلومتری شمال غربی چاه شماره ۱ (SP-1) و ۱۲ کیلومتری غرب چاه شماره ۲ (SP-2) بر روی ساختمان میدان حفاری گردید. حفاری این چاه در عمق ۲۹۷۵ متری در داخل سازند دالان به اتمام رسید. هدف از حفر این چاه ارزیابی گسترش مخزن گازی کنگان و دالان در محدوده غربی میدان بوده است (شکل ۳-۳).

بعد از حفر چاه‌های مذکور بدلیل وسعت میدان مورد مطالعه جهت توسعه هرچه سریع‌تر، میدان

فازبندی شده و توسعه فازهای مختلف آن به شرکت‌های مختلف واگذار گردید.



شکل ۳-۳ تعداد و محدوده فازهای توسعه‌ای میدان مورد مطالعه و موقعیت چاه‌های حفر شده در میدان [۱۴۷].

### ۳-۵- زمین‌شناسی ساختمانی

میدان مورد مطالعه در نتیجه حرکات بالآمدگی ناحیه‌ای موسوم به کمان قطر- پارس تشکیل شده است. این بالآمدگی، خلیج فارس را به دو حوضه مجزا در شمال و جنوب با محیط‌های رسوبگذاری و ماهیت هیدروکربنی متفاوتی تقسیم نموده و اطراف آن بخشی از صفحه بزرگتر صفحه عربی می‌باشد که خود در حوضه خاورمیانه قرار دارد. از لحاظ زمین‌شناسی ساختمانی میدان مورد مطالعه همانند میدان قوار در عربستان دارای روند زمین ساختمانی شمال- جنوب است که نتیجه بالآمدگی و گسلش بر روی پی‌سنگ منطقه می‌باشد. این ساخت زمین‌شناسی ترکیب مناسبی از محیط رسوبگذاری (سنگ منشاء، رسوبات مخزن و سنگ‌پوش) را فراهم کرده است که موجب تشکیل یکی از ذخایر عظیم هیدروکربنی شده است.

### ۳-۶- چینه‌شناسی میدان مورد مطالعه

سازندهای زیر به ترتیب از کربونیفر تا ترشیری فوقانی در چاه‌های منطقه مشاهده شده است :

سازند فراقان از کربونیفر تا پرمین پایینی، سازند دالان در پرمین میانی- بالایی که شامل سه بخش تحتانی، نار و بالایی می‌باشد. سازند کنگان در تریاس زیرین که مجموعه این سه سازند (فراقون، دالان و کنگان)، یک واحد سنگ‌چینه‌ای در مرتبه گروه به نام گروه دهرم نامیده می‌شود [۱۴۸]. گروه کازرون که شامل سازندهای دشتک و نیریز در تریاس بالایی و ژوراسیک زیرین می‌باشد. سازند سورمه در ژوراسیک میانی و بالایی، سازند هیث ژوراسیک بالایی، سازند فهلیان و سازند گدوان مربوط به کرتاسه زیرین، سازند داریان کرتاسه میانی، سازند کژدمی کرتاسه میانی، سازند سروک کرتاسه میانی، سازندهای ساچون، جهرم و آسماری ترشیری زیرین- میانی و گروه فارس شامل سازندهای گچساران، میشان و آغاجاری مربوط به ترشیری بالایی از دیگر سازندهای موجود در منطقه‌اند [۱۴۳]. در این مطالعه سازندهای موجود در میدان مورد مطالعه و از قدیم به جدید در شکل ۳-۴ نشان داده شده‌اند. علاوه بر این سازند سرچاهان به عنوان سنگ منشاء و سازندهای گروه دهرم<sup>۱</sup> (سازندهای فراقون، دالان و کنگان) به عنوان سنگ مخزن و سنگ پوش مورد نظر در مطالعه حاضر، با جزئیات بیشتر شرح داده شده‌اند.

---

<sup>۱</sup> Dehram group

Geological Time Units		South Pars			North Qatar			
Period	Epoch/Age	Group	Formations and Lithostratigraphic Units		Group	Formations and Lithostratigraphic Units		
Tertiary	Oligocene-Miocene	Fars	Mishan (Guri Mbr.)		Hasa	Fars		
	Paleocene-Eocene		Gachsaran			Lower Fars		
		Asmari		Dammam				
		Jahrom		Rus				
		Sachun Equiv.	Anh. Facies		Umm er Radhuma			
Cretaceous	Campa-Santonian	Bangestan	Ilam	Ilam (halul)	Aruma	Aruma (Halul)		
	Ceno-Turonian			Laffan		Aruma (Laffan)		
	Alb.-Cenomanian		Sarvak	Mishrif Equiv.	Wasia	Mishrif		
				Ahmadi Mbr.		Khatiyah		
	Albian		Maddud Mbr.	Mauddud				
	Aptian		Kazhdomi	Nahr Umar				
Barremian-Aptian	Dariyan	Hawar-Shuaiba						
Jurassic	Malm	Khami	Gadvan	Upper	Thamama	Kharaib		
				Khalij Mbr.		Lekhwaib		
	Dogger		Fahliyan	Lower		Sulaiy-Yamama		
				Hith		Hith		
	Liassic		Kazerun	Dashtak	Arab Equiv.	El Sirr	Sudair	Arab A-D
					Upper Dolomite			Diyab
					Upper Limestone			Hanifa
					Cherty Zone			Upper Araej
					Mid. Limestone			Uwainat
					Mand Mbr.			Lower Araej
Triassic	Dehram	Dalan	Lower Limestone	Khuff	Haushi	Izhara		
			Lower Surmeh Shale			Hamiah		
Permian	Lower	Faraghan	Lithiotis Bed	Gulailah				
			Neyriz	Khal Anhydrite				
		Dashtak (B-C Intervals)		Sudair				
		Evaporite B		K1				
		Lower Evaporite		K2				
		Upper Sudair		K3				
		Massive Anhydrite		Upper Anhydrite				
		Lower Sudair		K4				
		Aghar Shales		Median Anhydrite				
		Kangan		K5				
		Kangan						
		KG 1						
		KG 2						
		Upper						
		Nar Mbr.						
		Lower Dalan						

شکل ۳-۴) ستون چین‌شناسی عمومی ناحیه مورد مطالعه [۱۴۷].

### ۳-۶-۱- سازند سرچاهان<sup>۱</sup>

با پسروی یخچال‌ها و گرم شدن جهانی آب و هوا در انتهای اردووسین، آب دریاها در مقیاس جهانی به‌طور سریع بالا آمده و پیشروی گسترده دریا بر روی صفحه عربی صورت گرفته است [۱۴۹]. در طی سیلورین پیشین<sup>۲</sup> محیط‌های دریایی کم‌عمق تا دریای باز در نواحی حاشیه‌ای صفحه و محیط رسوبگذاری دریایی عمیق در داخل صفحه عربی ایجاد می‌گردد. در بخش‌های عمیق حوضه به‌دلیل عمق زیاد و تشکیل محیط بدون اکسیژن شرایط برای حفظ مواد آلی در شیل‌های درحال رسوبگذاری

<sup>۱</sup> Sarchahan formation

<sup>۲</sup> Early silurian

در بخش‌های عمیق حوضه ایجاد می‌گردد.

بخش‌های زیرین این شیل‌ها غنی از مواد آلی بوده و به‌عنوان مهم‌ترین سنگ منشاء دوران پالئوزوئیک در ناحیه خلیج فارس شناخته شده‌اند. مقدار کل کربن آلی<sup>۱</sup> (TOC) این شیل‌ها از ۴ تا ۱۲ درصد وزنی ذکر شده است [۱۵۰].

درمیدان مورد مطالعه دسترسی به شیل‌های سرچاهان وجود ندارد چرا که عمیق‌ترین چاه حفر شده در این میدان تنها ۱۹ متر از سازند فراقون (رسوبات تخریبی پرمین زیرین) را حفاری کرده است. با این وجود مطالعات ناحیه‌ای از وجود شیل‌های مذکور در ناحیه بالا آمدگی قطر و میدان مورد مطالعه خبر می‌دهند. برش عرضی چینه‌شناسی رسوبات از کامبرین تا ترشیاری در ناحیه مورد مطالعه (شکل ۳-۵) شیل‌های سیلورین پیشین در ناحیه بالا آمدگی قطر و بخش غربی آن را شامل می‌شود در صورتی که در بخش شرقی آن این شیل‌ها دیده نمی‌شوند.

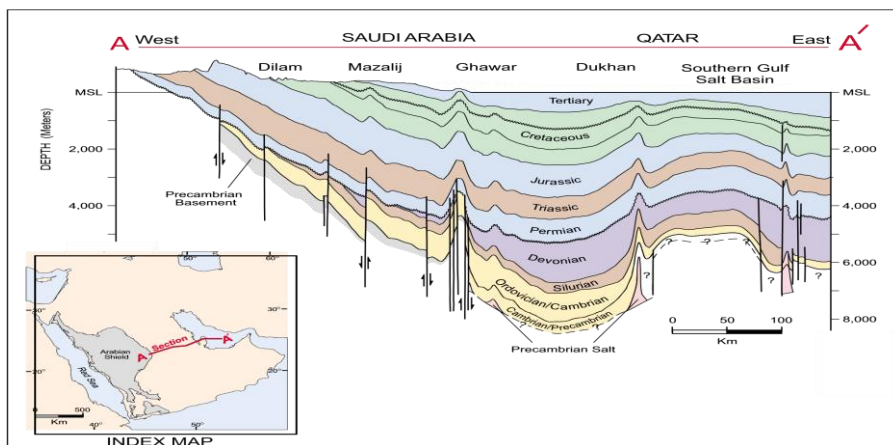
### ۳-۶-۲- سازند زاکین<sup>۲</sup>

سازند زاکین برای اولین توسط قویدل سیوکی (۱۳۷۷) معرفی و به رسوبات تخریبی دونین اطلاق گردید. مطالعات اخیر بر روی این رسوبات نشان داد که سازند فراقون شامل رسوبات تخریبی به سن پرمین زیرین می‌باشند [۱۵۱]. سازند زاکین در مقطع تیپ شامل ۲۸۵ متر ضخامت بوده که لایه‌های مختلف کنگلومرا در قاعده، ماسه سنگ، شیل‌های تیره زغالی، دولومیت دانه‌ریزمی‌باشد (بخش اصلی آن ماسه‌سنگی است). این سازند بین دو ناپیوستگی فرسایشی<sup>۳</sup> در بالا و پایین محدود شده است. در قاعده آن یک متر کنگلومرا وجود دارد که بطور هم‌شیب روی سازند سرچاهان قرار می‌گیرد. سازند زاکین بطور هم‌شیب با یک فرسایشی در زیر کنگلومرای قاعده‌ای سازند فراقون قرار دارد.

<sup>۱</sup> Total organic carbon

<sup>۲</sup> Zakeen formation

<sup>۳</sup> Disconformity



شکل ۳-۵) برش چین‌شناسی از رسوبات کامبرین تا ترشیری در ناحیه بالا آمدگی قطر و ناحیه مرکزی صفحه

عربی [۱۴۹].

### ۳-۶-۳- سازند فراقون<sup>۱</sup>

سازند فراقون در کوه فراقون (تنگ زکین) واقع در ۸۰ کیلومتری شمال بندر عباس قبلاً توسط چین‌شناسان حوضه رسوبی زاگرس، انتخاب و توالی سنگ‌شناسی آن مطالعه شده بود. لیتولوژی آن از رسوبات آواری شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ، سیلتستون و شیل همراه با لایه‌های کوچکی از آهک تشکیل شده است. سن این واحد سنگی پرمین زیرین حدس زده‌اند (شکل ۳-۴) [۱۵۲]. چنانچه گفته شد در میدان مورد مطالعه تنها چاه شماره ۱ (SP-1)، ۱۹ متر در سازند فراقون حفاری شده است.

### ۳-۶-۴- سازند دالان<sup>۲</sup>

نام این سازند از تاقدیسی به همین نام واقع در ۱۱۰ کیلومتری جنوب غربی شیراز انتخاب شده است. سازند دالان به همراه سازند بالایی آن (کنگان) در ناحیه صفحه عربی به سن پرمین و تریاس قبلاً تحت عنوان سازند خوف<sup>۳</sup> نامیده می‌شد. سازند دالان در ناحیه خلیج فارس گسترده‌ترین مخزن گازی را تشکیل می‌دهد [۱۴۹].

در میدان مورد مطالعه در چاه شماره ۱ (SP-1) سازند دالان ۷۹۵ متر ضخامت داشته و از سه بخش دالان پایینی، نار و دالان بالایی تشکیل شده است. دالان پایینی از تناوب طبقات دولومیتی و

<sup>۱</sup> Faragan formation

<sup>۲</sup> Dalan formation

<sup>۳</sup> Khuff formation



آهک میکریتی پلت‌دار و میان لایه‌های نازک شیلی تشکیل شده است و حدود ۳۲۳ متر ضخامت دارد. بخش انیدریتی نار به ضخامت ۱۷۴ متر از لایه‌های انیدریتی و دولومیتی متراکم همراه با لایه‌های سنگ آهک میکریتی تشکیل شده است. در تقسیم بندی مخزنی، دالان پایینی تحت عنوان واحد K5 نامگذاری شده و فاقد تجمعات هیدروکربوری می‌باشد.

دالان بالایی سنگ مخزن بوده و از پایین به بالا به ترتیب به افق‌های مخزنی K4 و K3 تقسیم‌بندی شده و متشکل از طبقات آهکی اوولیتی<sup>۱</sup>، دولومیت‌های خاکستری اوولیتی و پلت‌دار با تخلخل بالا می‌باشد (شکل ۳-۴). این بخش نزدیک به ۲۶۰ متر ضخامت دارد. تخلخل و تراوایی مناسب واحد K4 سبب شده است که این بخش بیشترین حجم هیدروکربوری را در خود جای داده و بالاترین میزان تولید را دارا باشد.

### ۳-۷- سازند کنگان<sup>۲</sup>

این سازند با یک سطح فرسایشی و به صورت هم‌شیب بروی سازند دالان قرار گرفته است. این سازند در تریاس زیرین با ترکیب کربناته (بخش زیرین) و شیلی (بخش بالایی) بر روی سازند دالان ته‌نشین شده است. ضخامت متوسط این سازند در میدان مورد مطالعه حدود ۲۱۰ متر می‌باشد. رسوبات این سازند بیانگر ته‌نشینی در محیط‌های رسوبی کم‌عمق ساحلی شامل سابخا، پهنه جزرومدی و لاگون می‌باشند. از نظر مخزنی سازند کنگان به دو واحد K1 و K2 تقسیم گردیده است. در حال حاضر از بخش K1 به دلیل همراه بودن حجم بالایی از گاز H<sub>2</sub>S با گازهای هیدروکربوری، هیچ گونه برداشتی صورت نمی‌گیرد. بخش K2 بیشتر آهکی بوده که در بخش زیرین شامل آهک‌های اوولیتی و ترومبولیتی است، و بخش بالایی آن دولومیت آهکی می‌باشد. کیفیت مخزنی این بخش بالا بوده (تخلخل و تراوایی بالا) و شامل گاز خشک و میعانات گازی می‌باشد و از نظر کیفیت مخزنی بعد از لایه K4 در درجه دوم اهمیت قرار دارد. بین سازندهای کنگان و دالان انفصال هیدرولیکی وجود ندارد و این دو سازند اغلب

<sup>1</sup> Oolitic limestone

<sup>2</sup> Kangan formation

یک مخزن واحد را تشکیل می‌دهند [۱۵۳].

### ۳-۷-۱- سازند دشتک<sup>۱</sup>

در فرهنگ چینه‌شناسی زاگرس، سازند دشتک (تریاس) به همراه سازند نیریز تحت عنوان گروه کازرون نامگذاری شده‌اند (شکل ۳-۴). ضخامت کلی سازند دشتک در میدان مورد مطالعه در چاه شماره ۱ (SP-1)، ۳۷۶ متر حفاری گزارش شده است.

سازند دشتک دارای نقش پوش‌سنگ<sup>۲</sup> است و عملکرد پوش‌سنگی آن در میدان‌های عظیم گازی ناحیه فارس و خلیج فارس به اثبات رسیده است. با این وجود در لایه‌های متخلخل قاعده این سازند مقداری گاز به‌دست آمده است. ویژگی‌های پوش‌سنگی این سازند در ناحیه فروافتادگی دزفول<sup>۳</sup> هنوز به اثبات نرسیده است، ولی در لرستان این سازند کم و بیش خصوصیات چینه‌شناسی شبیه فارس دارد و در میدان گازی سمند نقش پوش‌سنگی دارد [۱۵۳]. در ارتفاعات زاگرس سازند خانه‌کت به رخساره کربناتی معادل سازند دشتک در فارس و خلیج فارس می‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Dashtak formation

<sup>۲</sup> Cap rock

<sup>۳</sup> Dezful embayment

## فصل چهارم

تجزیه و تحلیل داده‌های میدان مورد مطالعه

#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا با استفاده از اطلاعات پتروفیزیکی و داده‌های مغزه یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه (SP\_15)، به بررسی رابطه تخلخل - تراوایی در بخش مخزنی میدان مورد مطالعه با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در نرم‌افزار MATLAB و همچنین با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و رخساره‌های الکتریکی پرداخته شده است. در ادامه مدل‌سازی تخلخل و تراوایی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری در نرم‌افزار Petrel انجام شده است.

#### ۴-۲- داده‌های میدان مورد مطالعه

نگارهای مورد استفاده برای این تحقیق شامل، نگار مدت زمان عبور صوت در سازند (DT)، نگار چگالی (RHOB)، نگار پرتوزایی گاما (GR)، نگار تخلخل نوترون (NPHI)، نگار مقاومت (RT) و نگار فتوالکتریک (PEF) از چاه SP\_15 می‌باشند. داده‌های آنالیز مغزه (تخلخل و تراوایی) از چاه (SP\_15) نیز در دسترس می‌باشد. برای مرحله دوم این تحقیق یعنی مدل‌سازی تخلخل و تراوایی از داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به چاه‌های SP\_05، SP\_06 و SP\_13 استفاده گردید. مغزه‌گیری در چاه مذکور به‌طور پیوسته نبوده و نمونه‌برداری از مغزه‌های موجود در فواصل مختلفی انجام شده است. کل داده‌های مغزه (شامل تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه) ۶۹۶ داده است. مغزه‌گیری عملیاتی است که در جریان حفاری چاه، انجام می‌شود و عمق‌های مغزه‌گیری شده که گزارش می‌شود، از اعماق ثبت شده توسط لاگ متفاوت است. در عملیات مغزه‌گیری مبنای عمق گزارش شده برای مغزه‌های استخراج شده، سطح میز دوار دکل حفاری می‌باشد و اندازه‌گیری عمق بر اساس طول رشته حفاری و تعداد رشته‌های رانده شده به درون چاه می‌باشد. درحالی‌که مبنای عمق گزارش شده برای داده‌های لاگ سطح آب دریا می‌باشد و اندازه‌گیری عمق هم بر اساس طول سیم رانده شده به درون چاه می‌باشد. همین امر سبب می‌شود به دلیل تفاوت در روش اندازه‌گیری، انبساط و انقباض سیم در اعماق مختلف در عملیات چاه‌نگاری و نیز پیوسته نبودن عملیات مغزه‌گیری، عمق گزارش شده در

عملیات چاه‌نگاری با عمق گزارش شده در عملیات مغزه‌گیری تا حدی با یکدیگر تفاوت پیدا کنند. بنابراین هنگام استفاده از داده‌های چاه‌نگاری و مقایسه آنها با داده‌های مغزه، تطبیق عمق، فرآیندی ضروری و غیرقابل اجتناب است. لذا تطبیق عمق، با مقایسه تخلخل اندازه‌گیری شده از مغزه در آزمایشگاه و تخلخل محاسبه شده از داده‌های چاه‌نگاری انجام می‌پذیرد. برای تطبیق عمق، داده‌های تخلخل مغزه ثابت نگه داشته می‌شوند و عمق داده‌های تخلخل لاگ تغییر می‌کند. در جدول ۴-۱ تعدادی از عمق‌های مربوط به مغزه و عمق معادل آن در لاگ‌ها، در یکی از چاه‌های مورد مطالعه (SP\_15) آورده شده است.

جدول ۴-۱) عمق مغزه‌ها و معادل لاگ‌ها در مغزه به همراه داده‌های مغزه و لاگ‌ها

Core_Depht(M)	Depth equivalent log in the core(M)	K_core(MD)	$\phi_{\text{core}}(V/V)$	DT(US/M)	GR(GAPI)	NPHI(V/V)	RHO(K/M3)
2949.08	2950.98	1.658	0.03001	170.3589	26.72921	0.0697679	2720.305
2949.57	2951.47	0.007	0.03857	164.5088	26.20624	0.0550337	2739.124
2949.96	2951.86	0.004	0.02694	162.2965	22.60079	0.0420024	2734.933
2950.22	2952.12	0.888	0.0522	161.0748	21.20326	0.0415596	2742.826
2950.48	2952.38	0.004	0.01041	159.8747	19.9331	0.0471263	2759.659
2951.37	2953.27	105.005	0.27691	193.4267	30.51786	0.120572	2635.069
2951.96	2953.86	21.849	0.26948	177.6355	19.67624	0.0835578	2690.067
2952.08	2953.98	3.888	0.226	169.4089	17.31731	0.0566849	2707.19
2952.3	2954.2	26.065	0.26723	161.325	16.71871	0.0257068	2861.613
2953.82	2955.77	0.198	0.03553	204.0052	12.33413	0.1469882	2600.733
2954.08	2955.98	0.027	0.03387	203.3008	11.12872	0.1452962	2603.125
2954.44	2956.64	1.215	0.11508	196.3805	11.92647	0.1289353	2627.303
2954.74	2957.35	0.256	0.14119	189.6488	22.65265	0.1006105	2697.086
2955.2	2957.82	233.535	0.06405	167.4455	15.70053	0.0460285	2812.291
2955.45	2958.18	0.757	0.07779	168.3538	13.83721	0.0433695	2821.237
2955.92	2961.73	0.022	0.06629	178.5908	13.70896	0.0690488	2786.204
2956.28	2962.45	1.094	0.18079	195.6437	16.57656	0.1234547	2664.096
2959.83	2964.1	0.003	0.02624	187.7279	21.53288	0.095731	2705.722
2960.55	2965.07	0.982	0.04805	177.2978	23.73997	0.0648484	2786.031
2963.17	2965.28	0.439	0.07434	206.9959	21.68514	0.1539893	2590.326

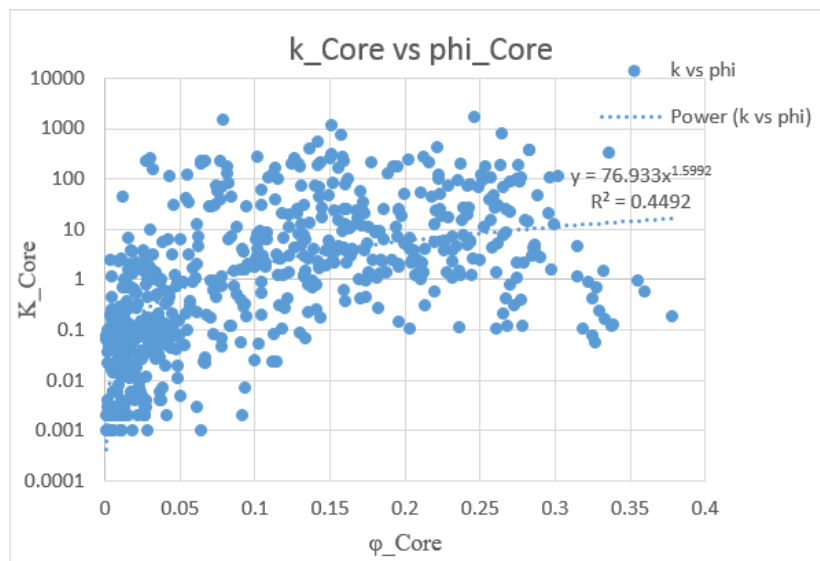
#### ۴-۳- ارتباط تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه

در این پایان‌نامه به منظور یافتن رابطه‌ای بین تخلخل و تراوایی، نمودار نیمه لگاریتمی که تراوایی

را بر حسب تخلخل نشان می‌دهد در محیط Excel برای چاه مورد مطالعه (SP\_15) ترسیم شد. در واقع وقتی تابع مشخصی مانند  $y = x^2 + 1$  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. به این منظور ابتدا نمودار داده‌های تخلخل و تراوایی را در محیط Excel رسم و سپس نوع برازش لازم انجام شده است. در این مطالعه به منظور تعیین رابطه (ضریب تعیین  $R^2$ ) بین تخلخل و تراوایی از روش برازش توانی<sup>۱</sup> استفاده شده است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) عددی است بین صفر و یک و هر چه این عدد به یک نزدیک‌تر باشد، برازش داده‌ها به آن خط بهتر و رابطه بین دو متغیر مورد نظر قوی‌تر می‌باشد. همان‌طور که در نمودار ترسیم شده ملاحظه می‌شود (شکل ۴-۱)، خطی که کشیده شده است از تمام نقاط عبور نکرده و داده‌ها نسبتاً پراکنده هستند. لذا در چاه مورد مطالعه ارتباط مستحکمی بین داده‌های تخلخل و تراوایی دیده نمی‌شود به طوری که ضریب تعیین به دست آمده بین تخلخل و تراوایی نسبتاً پایین و ارتباط تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه، ارتباط نسبتاً ضعیفی می‌باشد. البته قابل پیش‌بینی است که با تفکیک واحدهای جریان هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه و بررسی ارتباط بین تخلخل و تراوایی، ضریب تعیین بالاتری برای هر واحد به دست خواهد آمد.

---

<sup>۱</sup> Power



شکل ۴-۱) نمودار نیمه لگاریتمی تخلخل در مقابل تراوایی

در این مطالعه از آنجایی که رگرسیون خطی بین داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه در چاه مورد نظر مناسب نبود (شکل ۴-۱)، از واحدهای جریان هیدرولیکی برای تعیین رابطه تخلخل - تراوایی استفاده شد.

#### ۴-۳-۱- تعیین رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی

به طور گسترده زمین‌شناسان و مهندسیین مخزن از مفهوم واحدهای جریان به منظور زون‌بندی مخزن و کاهش ناهمگنی‌ها استفاده می‌کنند. اگرچه یک واحد جریان به صورت‌های مختلفی تعریف شده، [۲۶، ۱۵۴-۱۵۶]، ولی به طور کلی می‌توان واحد جریان را مجموعه‌ای رسوبی با مشخصات لیتولوژی و پتروفیزیکی (تخلخل - تراوایی) مشابهی دانست که بر این اساس از واحدهای مجاور قابل تفکیک باشند.

به منظور تعیین واحدهای جریان روش‌های مختلفی وجود دارد که می‌توان به روش‌های توزیع تجمعی شاخص زون جریان (FZI)، نمودار لورنز اصلاح‌شده بر مبنای چین‌نگاری (SMLP)، روش هیستوگرام، روش احتمال نرمال، مجموع مربعات خطا، آنالیز خوشه‌ای، شاخص کیفیت مخزنی<sup>۱</sup> (RQI)، روش DRT و همچنین معادله وینلند با استفاده از شعاع گلوگاه تخلخل (R35) در اشباع ۳۵ درجه

<sup>۱</sup> Reservoir quality index

جیوه که می‌توانند واحدهایی با ویژگی‌های پتروفیزیکی مشخص را شناسایی کنند، اشاره کرد. در بین روش‌های فوق روش هیستوگرام خطای بالایی دارد، همچنین معادله وینلند به دلیل اینکه نیاز به این فرض دارد که شعاع گلوگاه باید در اشباع ۳۵ درصد جیوه باشد با محدودیت‌هایی همراه است [۳۶]. روش لورنز اصلاح شده بر مبنای چینه‌نگاری هر چند که قالب زمین‌شناسی را برای تعیین واحدهای جریان در نظر می‌گیرد ولی به این دلیل که توالی مورد مطالعه باید دارای تخلخل و تراوایی پیوسته باشند با محدودیت‌هایی همراه است. در صورتی که بتوان بین داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه که عموماً پیوسته نیستند و داده‌های لاگ‌ها ارتباطی پیدا کرد و از آنها برای تعیین تخلخل و تراوایی استفاده کرد، روش لورنز روش کارآمدی خواهد بود. یکی از بهترین روش‌ها استفاده از شاخص زون جریان (FZI) است که رایج‌ترین روش تعیین واحدهای جریان است و به طور گسترده توسط صنعت استفاده می‌شود [۳۶].

برای تعیین واحدهای جریان بهینه می‌توان از نمودار تجمعی احتمالی لاگ FZI و یا از روش دندروگرام حاصل از خوشه‌بندی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و همچنین از روش مجموع مربعات خطا استفاده کرد.

#### ۴-۳-۱-۱- شاخص زون جریان (FZI)

یک واحد جریان حجم خاصی از مخزن است که از یک یا تعداد بیشتری از خواص سنگ‌شناسی مخزن ترکیب شده که ممکن است با واحدهای جریان دیگری در ارتباط باشد [۳]. هر واحد جریان با استفاده از روش شاخص زون جریان (FZI) مشخص شده و شاخص زون جریان خود تابعی از پارامترهای شاخص کیفیت مخزنی است. مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی برای تقسیم مخزن به واحدهای پتروفیزیکی مجزا استفاده می‌شود. هر واحد جریان دارای یک مقدار شاخص زون جریان منحصر به فرد است [۲۹]. هر واحد جریان با شاخص زون جریان (FZI) شناخته شده است. زون‌بندی مخزن با استفاده از شاخص زون جریان و شناسایی واحدهای جریان، می‌تواند برای ارزیابی کیفیت مخزن بر اساس روابط



تخلخل - تراوایی استفاده شود [۱۵۷].

اساس این روش رابطه کوزنی - کارمن اصلاح شده و مفهوم شعاع هیدرولیکی میانگین است [۵۸, ۲۶]. تئوری طبقه‌بندی روش واحدهای جریان سیال بر این فرض استوار است که ارتباط حفرات را می‌توان توسط مجموعه‌ای از لوله‌های موئینه نشان داد. ترکیب قوانین داری و پوازیه برای لوله‌های استوانه مستقیم به رابطه (۱-۴) منتج شد.

$$\phi_e k = \frac{r^2}{8} \quad (1-4)$$

در این رابطه  $k$  تراوایی (میکرومتر مربع)،  $\phi_e$  تخلخل مؤثر به صورت کسری و  $r$  شعاع گلوگاه خلل و فرج (میکرومتر) است. از آنجا که در یک مدل واقعی، لوله‌های موئینه مستقیم نبوده و دارای خمیدگی‌های متفاوتی هستند، کوزنی و کارمن برای یک محیط متخلخل واقعی، پارامترهای پیچاپچی ( $\tau$ ) و مساحت سطح فضای خلل و فرج در واحد حجم ذرات یا دانه‌ها (سطح ویژه محیط متخلخل) را در رابطه (۱-۴) اعمال کرده و رابطه جدیدی بین تخلخل و تراوایی ارائه نمودند [۲۶].

$$k = \frac{\phi_e^3}{(1-\phi_e)^2} \times \frac{1}{F_s \tau^2 S_{vg}^2} \quad (2-4)$$

که در آن  $F_s$  فاکتور شکل خلل و فرج،  $k$  تراوایی برحسب میکرومترمربع و  $\phi_e$  تخلخل مؤثر است که به صورت کسری بیان می‌گردد.

عبارت  $F_s \tau^2$ ، به عنوان ثابت کوزنی شناخته شده و در رابطه (۲-۴) کاربرد محدودی دارد، زیرا مقادیر واقعی از ثابت کوزنی معمولاً برای یک سنگ خاص ناشناخته بوده و عبارت  $S_{vg}^2$  در محاسبات منظور نمی‌گردد. روش واحدهای جریان هیدرولیکی، با در نظر گرفتن مشخصات اصلی زمین‌شناسی و هندسه فضای متخلخل و تقسیم‌بندی شاخص زون جریان، تغییرات ثابت کوزنی و عبارت  $S_{vg}^2$  را در آن اعمال می‌کند. شاخص زون جریان به ویژگی‌های زمین‌شناسی مواد و هندسه منافذ مختلف توده سنگ بستگی دارد، از این رو، پارامتر مناسبی برای تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی است. شاخص

زون جریان تابعی از شاخص کیفیت مخزن و تخلخل است. آمیغول و همکاران (۱۹۹۳) با تقسیم رابطه (۲-۴) بر  $\phi_e$  و جذر گرفتن از آن، تغییرات ثابت کوزنی را مورد مطالعه قرار داده و رابطه (۳-۴) را ارائه نمودند.

$$0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} = \frac{\phi_e}{(1-\phi_e)} \times \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{vg}^2}} \quad (۳-۴)$$

ثابت 0.0314 به منظور تبدیل واحد جریان از میکرومتر مربع به میلی داری است. بر اساس رابطه (۳-۴) عبارت شاخص کیفیت مخزن (RQI)، تخلخل نرمال شده ( $\phi_z$ ) و شاخص زون جریان (FZI) را به صورت روابط (۴-۴) تا (۶-۴)، تعریف نمود.

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi_e}} \quad (۴-۴)$$

$$\phi_z = \frac{\phi_e}{(1-\phi_e)} \quad (۵-۴)$$

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{vg}^2}} \quad (۶-۴)$$

طبق روابط (۴-۴) تا (۶-۴)، رابطه (۳-۴) را می توان به صورت رابطه (۷-۴) بازنویسی کرد:

$$RQI = \phi_z \times FZI \quad (۷-۴)$$

سپس با لگاریتم گیری از طرفین رابطه (۸-۴) را می توان نوشت.

$$\text{Log}(RQI) = \text{Log}(\phi_z) \times \text{Log}(FZI) \quad (۸-۴)$$

RQI که به عنوان شاخص کیفیت مخزنی شناخته می شود و تقریبی از میانگین شعاع هیدرولیکی در سنگ مخزن است که به عنوان کلیدی برای واحدهای جریان هیدرولیکی بوده و تخلخل، تراوایی و فشارموتینگ را به هم مرتبط می سازد [۱۵۸].

مشکلی که بر روش FZI وارد است که در بازه‌هایی از مخزن که اندازه تخلخل و تراوایی با هم کاهش می‌یابند در کسر زیر رادیکال معادله (۴-۴) تغییری حاصل نشده، بنابراین محدوده‌هایی با تخلخل و تراوایی بالا و محدوده‌هایی با تخلخل و تراوایی پایین در یک کلاس از نظر خواص جریان قرار می‌گیرند مخصوصاً زمانی که میزان تخلخل و تراوایی خیلی پایین باشد گستره تغییرات این کلاس‌ها خیلی به هم‌دیگر نزدیک می‌شوند [۳۶].

در این مطالعه، به منظور تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از داده‌های مغزه تخلخل مؤثر و تراوایی در محدوده مخزن مورد مطالعه در چاه SP\_15 و به کمک روابط (۴-۴) تا (۶-۴)، شاخص زون جریان در چاه مورد استفاده در این مرحله در محیط Excel محاسبه شده است. در جدول ۲-۴ نمونه‌ای از داده‌های محاسبه شده و مورد استفاده در این مطالعه مشاهده می‌شود.

جدول ۲-۴) نمونه‌ای از داده‌های استفاده شده در تعیین واحدهای جریان به روش FZI

Depth(M)	K_core(MD)	$\phi_{core}(V/V)$	$\phi_z$	RQI	FZI	log_FZI
3255.9	0.058	0.32673	0.485288	0.01323	0.027261	-1.56445
3256.08	0.08	0.32458	0.48056	0.015589	0.032439	-1.48893
3261.94	0.193	0.37777	0.607123	0.022444	0.036967	-1.43218
3256.83	0.122	0.33746	0.509343	0.01888	0.037067	-1.43101
3255.48	0.131	0.33849	0.511693	0.019534	0.038175	-1.41822
3252.1	0.109	0.31822	0.466749	0.018377	0.039373	-1.4048
3257.08	0.165	0.33275	0.498689	0.022111	0.044339	-1.35322
3104.19	0.002	0.09185	0.10114	0.004633	0.045812	-1.33902
3223.6	0.117	0.27826	0.38554	0.020361	0.052811	-1.27727
3253.76	0.237	0.32955	0.491536	0.026628	0.054174	-1.26621
3226.83	0.104	0.26094	0.35307	0.019823	0.056146	-1.25069
3120.89	0.001	0.06382	0.068171	0.003931	0.057657	-1.23915
3228.86	0.124	0.26788	0.365896	0.021363	0.058386	-1.23369
3229.18	0.11	0.23567	0.308335	0.021452	0.069575	-1.15755

ادامه جدول ۴-۲) نمونه‌ای از داده‌های استفاده شده در تعیین واحدهای جریان به روش FZI

3262.9	0.582	0.35978	0.561963	0.039937	0.071066	-1.14834
3263.82	0.428	0.32504	0.481569	0.036032	0.074821	-1.12598
3224.41	0.209	0.26495	0.360452	0.027888	0.07737	-1.11143
3009.05	0.007	0.09292	0.102439	0.008618	0.084132	-1.07504
3227.33	0.303	0.27295	0.375421	0.033083	0.088123	-1.05491
3259.43	0.108	0.20335	0.255256	0.022883	0.089648	-1.04746
3261.51	0.942	0.35543	0.551422	0.051118	0.092703	-1.03291
3259.08	0.702	0.32768	0.487387	0.045959	0.094297	-1.0255
3223.3	0.407	0.27695	0.38303	0.038065	0.099379	-1.00271
3111.22	0.003	0.06097	0.064929	0.006965	0.107274	-0.96951

#### ۴-۳-۱-۲- تعیین واحدهای جریان با استفاده از رخساره‌های الکتریکی

با توجه به ناهمگنی بالای مخزن در ابعاد ماکروسکوپی و میکروسکوپی، ارائه توصیف دقیق از ویژگی‌های پتروفیزیکی مخزن که از مهم‌ترین پارامترها در اکتشاف، تولید و مدیریت مخازن هیدروکربنی است، نیازمند اطلاعات کافی در مورد میزان غیر یکنواختی مخزن است. جهت از بین بردن خطا و کاستی‌ها، به مطالعات دقیق زمین‌شناسی مخزن و تعیین ویژگی‌های آن با روش‌های نوین و کم هزینه با دقت بالا مانند تعیین رخساره‌های الکتریکی با روش خوشه‌بندی نیاز است. روش‌های دسته‌بندی به طور گسترده‌ای برای تجزیه و تحلیل رخساره‌های الکتریکی و پیش‌بینی خواص پتروفیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تعیین رخساره‌های الکتریکی یک سازند روش‌های مختلفی از جمله روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف، خوشه‌بندی سلسله مراتبی<sup>۱</sup>، خوشه‌بندی دینامیک<sup>۲</sup> و خوشه‌بندی به روش خود سازمان‌ده<sup>۳</sup> وجود دارد، که در این میان روش MRGC به دلیل نحوه عملکرد

<sup>۱</sup> Ascendant hierarchical clustering (AHC)

<sup>۲</sup> Dynamic clustering (DC)

<sup>۳</sup> Self organizing map (SOM)

آن یکی از مفیدترین روش‌ها می‌باشد. این الگوریتم بر اساس روش‌های هوشمند، تعداد رخساره‌های الکتریکی را با توجه به داده‌های محدود اولیه در هر چاه، بدون دخالت ناظر ارائه می‌دهد. در صورتی که در سایر الگوریتم‌ها ناظر با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند مطالعات پتروفیزیکی و رخساره‌های رسوبی تعداد رخساره‌های الکتریکی که حدس می‌زند به تعداد واقعی نزدیک باشد را به نرم‌افزار ارائه داده و نرم‌افزار با اطلاعات وارد شده توسط ناظر، الگوی پیشنهادی خود را معرفی می‌نماید.

تعیین رخساره‌های الکتریکی بر مبنای شناسایی گروه داده‌هایی با خصوصیات یکسان در داده‌های حاصل از نگارهای پتروفیزیکی انجام می‌گیرد. هدف از آنالیز خوشه‌ای تقسیم‌بندی مجموعه داده‌ها به گروه‌هایی مشخص بر اساس شباهت یا تفاوت بین گروه‌ها می‌باشد. بدین صورت که داده‌های موجود در هر گروه دارای بیشترین شباهت با یکدیگر و بیش‌ترین تفاوت با داده‌های موجود در گروه‌های دیگر هستند.

روش خوشه‌بندی MRGC الگوهای نقطه‌ای را به دلیل تغییرات در پاسخ رفتاری نگارهای پتروفیزیکی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری و شبکه عصبی، خوشه‌بندی می‌کند. این خوشه‌های نقطه‌ای تحت عنوان رخساره‌های الکتریکی نیز نامگذاری می‌شوند و به تغییرات کیفیت سنگ مرتبط هستند و با رخساره‌های رسوبی کالیبره می‌شوند. مدل‌های رخساره‌های الکتریکی متعددی وجود دارد که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به سه مورد زیر اشاره کرد [۱۵۹]:

۱- مدل‌های رخساره‌های الکتریکی ساخته شده با نگارهای چاه‌پیمایی متداول و کالیبره شده با رخساره‌های رسوبی.

۲- مدل‌های رخساره‌های الکتریکی بافتی ساخته شده با نگارهای تصویری FMI و کالیبره شده با رخساره‌های رسوبی، رخساره‌های سنگی یا پتروفاسیس و داده‌های تخلخل و مغزه.

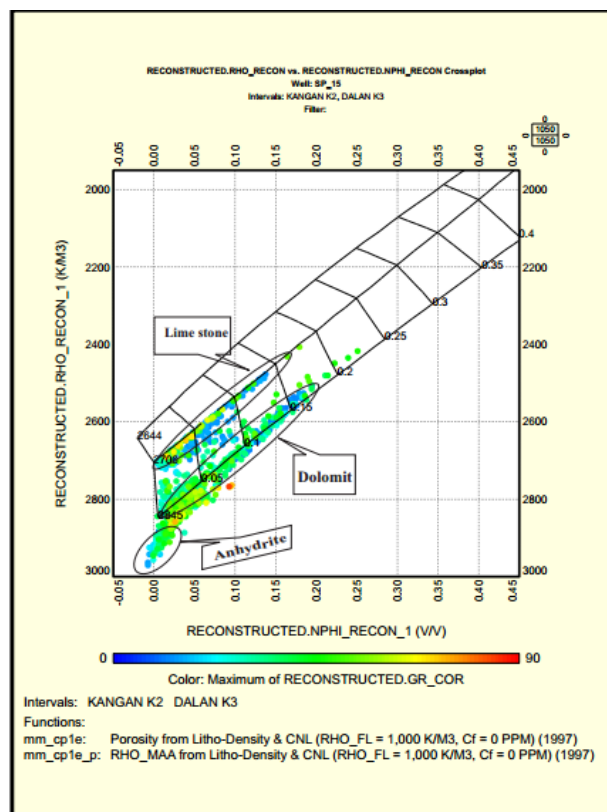
۳- پیش‌بینی تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه، بر اساس مدل رخساره‌های رسوبی در چاه‌های دارای

مغزه.

### ۴-۳-۱-۲-۱- تعیین رخساره‌های الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار Geolog

به منظور تعیین رخساره‌های سازند مورد بررسی در این مطالعه، از روش خوشه‌بندی MRGC، استفاده شده است.

برای به‌دست آوردن تعداد رخساره‌های الکتریکی با استفاده از روش MRGC در نرم‌افزار Geolog برای چاه SP\_15، از نگارهای صوتی، پرتوی گاما، نوترون و چگالی که بهترین نتایج را جهت تفکیک رخساره‌ای مختلف در سازند کنگان و دالان ارائه می‌دهند، برای ساختن مدل و همچنین از تخلخل و تراوایی مغزه برای همبستگی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا نمودار متقاطع چگالی در مقابل تخلخل نوترون در چاه میدان ترسیم شده و ترکیب سنگ‌شناسی به طور کلی بر روی آن نشان داده شده است (شکل ۴-۲).



شکل ۴-۲) نمودار متقاطع چگالی در مقابل وزن مخصوص در چاه میدان مورد مطالعه

این نمودار متقاطع مهم‌ترین و دقیق‌ترین نمودار مقطعی 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

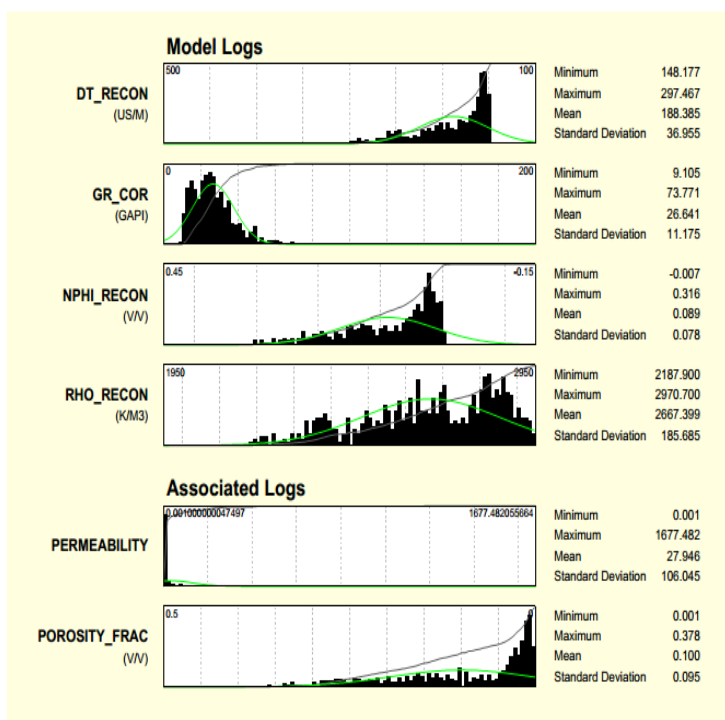
کرد. محل قرارگیری نقطه با توجه به فاصله نقطه از خطوط ماتریکس، نشان‌گر درصد لیتولوژی است که با رسم خطوط هم‌تخلخل که از وصل شدن تخلخل‌های یکسان در روی خطوط ماتریکس به دست می‌آید، می‌توان سه گروه خطوط هم‌تخلخل را تشخیص داد [۱۶۰]:

۱- خطوط هم‌تخلخل مربوط به ماتریکس آهک و ماسه

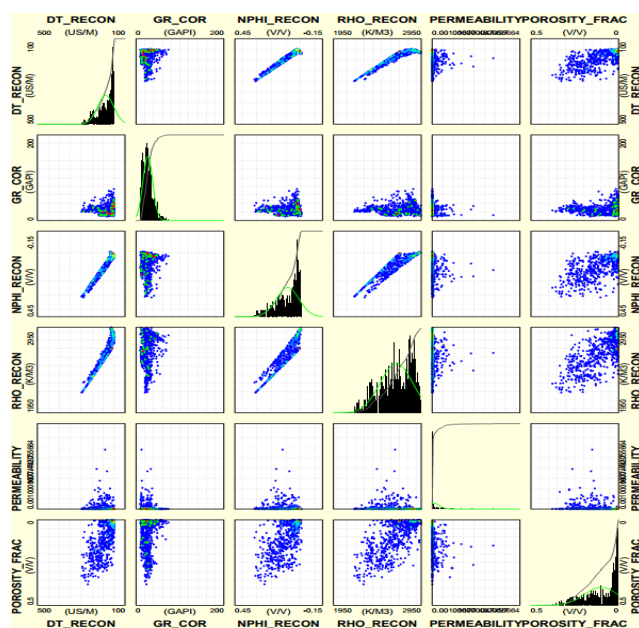
۲- خطوط هم‌تخلخل مربوط به ماتریکس آهک و دولومیت

۳- خطوط هم‌تخلخل مربوط به ماتریکس انیدریدی

در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار Geolog و نگارهای بیان شده خوشه‌سازی رخساره‌ای به روش تفکیک‌پذیری چندتایی انجام گرفت. بر این اساس نرم‌افزار پنج رده رخساره‌ای را پیشنهاد داد. پنج رده رخساره‌ای به ترتیب شامل ۸، ۱۰، ۱۳، ۱۸ و ۲۵ خوشه رخساره‌ای بوده که ماسه رده رخساره‌ای یعنی رده اول، سوم، و پنجم را برای نهایی کردن مدل رخساره‌ای انتخاب کردیم که در این بین رده اول و سوم را بدون تلفیق و رده پنجم یعنی ۲۵ خوشه رخساره‌ای را جهت تلفیق رخساره‌ها انتخاب گردید، که در این بین رده اول یعنی ۸ خوشه رخساره‌ای به دلیل ضرایب تعیین پایین بین تخلخل و تراوایی از محاسبات کنار گذاشته شد. لازم به ذکر است که تعداد خوشه‌های رخساره‌ای تا حدودی تعریف می‌گردند که بتوان جدایش مورد نیاز برای بخش‌های مختلف با سنگ‌شناسی متفاوت را به دست آورد. شکل ۳-۴ و شکل ۴-۴ به ترتیب هیستوگرام و نمودار همبستگی نگارهای انتخابی به منظور آنالیز خوشه‌ای در مرحله آموزش برای ۱۳ و ۲۵ رخساره و شکل ۴-۵ و شکل ۴-۶ نمودار همبستگی نگارهای انتخابی به منظور آنالیز خوشه‌ای در مرحله مدل‌سازی را به ترتیب برای ۲۵ رخساره تلفیق شده و ۱۳ رخساره تلفیق نشده نشان می‌دهند. این نمودارها میزان همبستگی بین لاگ‌های مختلف را نشان می‌دهند.



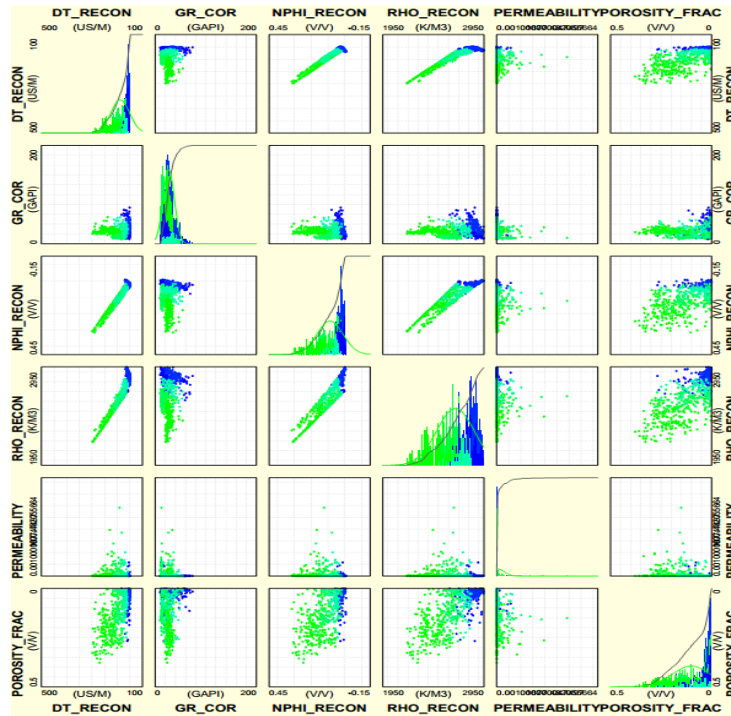
شکل ۳-۴) هیستوگرام نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله آموزش برای ۲۵ و ۱۳ خوشه رخساره



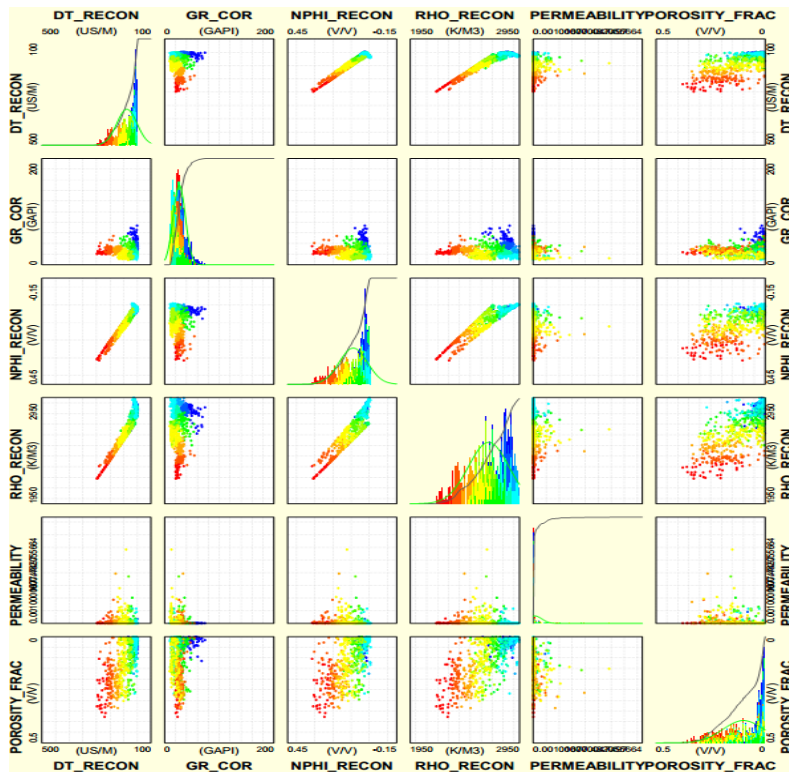
شکل ۴-۴) نمودار همبستگی نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله آموزش برای ۲۵ خوشه رخساره

تلفیق شده و ۱۳ خوشه رخساره تلفیق نشده





شکل ۴-۵) نمودار همبستگی نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله مدل‌سازی برای ۲۵ خوشه  
رخساره تلفیق شده



شکل ۴-۶) نمودار همبستگی نگارهای مورد استفاده در آنالیز خوشه‌ای در مرحله مدل‌سازی برای ۱۳ خوشه

رخساره

## ۴-۳-۱-۲- تلفیق رخساره‌های الکتریکی<sup>۱</sup>

همان‌گونه که ذکر گردید، مدل رخساره‌ای شامل ۲۵ خوشه<sup>۲</sup> جهت تلفیق رخساره‌ای<sup>۳</sup> انتخاب گردید. با استفاده از روش گسترش رخساره نزدیکترین همسایه<sup>۴</sup>، زون‌های مختلف چاه مورد مطالعه به صورت جدول ۳-۴ و جدول ۴-۴ تعیین گردید. طبقه‌بندی K نزدیک‌ترین همسایه<sup>۵</sup> یکی از بهترین و شناخته‌ترین روش‌های طبقه‌بندی است. با توجه به تمایل یا بایاس کم<sup>۶</sup>، قابل فهم بودن آن و این واقعیت که هیچ فرضی بر روی داده‌ها تحمیل نمی‌کند، روش KNN به طور گسترده در بسیاری از کاربردها استفاده می‌شود [۱۶۱]. روش K نزدیک‌ترین همسایه، نمونه تست را متعلق به کلاسی می‌داند که بیش‌ترین آرا را در بین K نزدیک‌ترین همسایگان آن داشته باشد. برای به‌دست آوردن نزدیک‌ترین همسایگی یک نمونه، معمولاً از تابع فاصله‌سنجی اقلیدوسی استفاده می‌شود [۱۶۲]. تابع فاصله‌سنجی اقلیدوسی بر مبنای فاصله متریک دو نمونه در فضای اقلیدوسی تعریف می‌شود. سپس بر اساس نمودارهای تفسیر شده، میزان تغییرات تخلخل هر یک از ۲۵ رخساره بررسی و تعیین گردید. در جدول ۴-۵ مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط تخلخل برای ۲۵ رخساره اولیه آورده شده است. جهت تلفیق رخساره‌ها ابتدا مخزن به لحاظ کیفی به پنج کیفیت خیلی ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و بسیار خوب تفکیک شد (جدول ۴-۶). سپس با توجه به جدول ۴-۵ و جدول ۴-۶ رخساره‌های اولیه‌ای که میانگین تخلخل آنها با رخساره‌های کیفی تعیین شده در جدول ۴-۶ هماهنگ هستند با هم تلفیق کرده و به عنوان یک رخساره در نظر گرفته شد. واضح‌تر اینکه تمام ۲۵ رخساره اولیه‌ای که مقدار میانگین تخلخل آنها کمتر از ۳ درصد است مانند رخساره‌های اولیه ۲، ۳ و ۵ با هم تلفیق شده و تحت عنوان رخساره شماره یک قرار گرفت. با مقایسه رخساره شماره یک با نتایج مطالعات مغزه در اعماق متناظر، مشاهده شد که بسیاری از نقاط دارای تراوایی خیلی پایین می‌باشند (جدول ۴-۵). لذا رخساره شماره یک به لحاظ مخزنی، کیفیت مناسب نداشته و امکان تولید از این رخساره بسیار بعید به نظر

<sup>۱</sup> Facies merge

<sup>۲</sup> Cluster

<sup>۳</sup> Facies merging

<sup>۴</sup> KNN Facies

propagation

<sup>۵</sup> K Nearest Neighbor

<sup>۶</sup> Low Bias

می‌رسد. تلفیق رخساره‌ها به همین صورت برای سایر رخساره‌های اولیه انجام گردید. در جدول ۴-۵

رخساره‌های اولیه که با هم می‌توانند تلفیق شوند را به صورت هم‌رنگ نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳) رخساره‌های الکتریکی تفکیک شده با روش MRGC برای ۱۳ خوشه رخساره

FACIES	WEIGHT	DT_RECON	GR_COR	NPHI_RECON	RHO_RECON	PERMEABILITY	POROSITY_FRAC
1	50	158.30	52.31	0.03	2814.85	0.60	0.02
2	77	152.70	35.24	0.02	2838.91	3.53	0.02
3	33	159.56	25.71	0.01	2910.42	0.43	0.02
4	55	159.28	15.12	0.01	2877.17	10.27	0.04
5	48	160.01	19.88	0.04	2814.95	17.54	0.06
6	24	160.51	23.79	0.01	2703.64	4.16	0.04
7	65	174.44	34.16	0.07	2717.28	30.68	0.08
8	39	182.00	21.99	0.08	2666.70	50.08	0.13
9	51	184.63	15.68	0.07	2617.81	13.37	0.09
10	90	201.70	18.28	0.13	2597.47	73.43	0.13
11	58	222.77	27.34	0.16	2487.15	44.29	0.20
12	64	250.97	29.29	0.22	2378.26	52.56	0.19
13	34	276.13	23.85	0.26	2269.72	6.89	0.25

جدول ۴-۴) رخساره‌های الکتریکی تفکیک شده با روش MRGC برای ۲۵ خوشه رخساره تلفیق شده

	FACIES	WEIGHT	DT_RECON	GR_COR	NPHI_RECON	RHO_RECON	PERMEABILITY	POROSITY_FRAC
1	1	21	162.92	60.14	0.04	2770.18	0.80	0.03
2	2	29	154.96	46.63	0.02	2847.19	0.46	0.02
3	2	77	152.70	35.24	0.02	2838.91	3.53	0.02
4	1	16	154.33	24.12	0.03	2838.62	4.62	0.04
5	2	33	159.56	25.71	0.01	2910.42	0.43	0.02
6	1	55	159.28	15.12	0.01	2877.17	10.27	0.04
7	1	18	156.29	18.77	0.03	2811.48	13.16	0.06
8	1	24	160.51	23.79	0.01	2703.64	4.16	0.04
9	3	65	174.44	34.16	0.07	2717.28	30.68	0.08
10	3	14	171.28	16.47	0.05	2792.37	37.93	0.08
11	4	29	180.98	17.55	0.09	2685.54	50.13	0.09
12	4	37	177.58	16.11	0.05	2646.42	12.29	0.09
13	5	10	184.95	34.86	0.07	2612.06	49.95	0.24
14	5	30	196.18	23.41	0.11	2615.61	22.58	0.13
15	4	14	203.26	14.55	0.10	2542.20	16.23	0.10
16	4	19	192.67	13.15	0.12	2647.41	155.15	0.12
17	4	20	209.70	12.84	0.16	2576.17	115.67	0.11
18	5	21	210.14	20.79	0.14	2546.64	31.89	0.16
19	5	40	218.51	27.99	0.15	2503.59	35.95	0.20
20	5	18	232.23	25.89	0.18	2450.61	62.80	0.21
21	5	39	247.66	26.56	0.20	2376.16	24.28	0.21
22	5	25	256.13	33.54	0.24	2381.53	96.68	0.15
23	5	9	260.27	24.43	0.23	2326.19	9.41	0.20
24	5	8	269.77	23.84	0.25	2290.66	11.03	0.26
25	5	17	287.53	23.56	0.29	2229.98	3.60	0.27

جدول ۴-۵) نحوه تلفیق رخساره‌های الکتریکی برای ۲۵ خوشه به همراه مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط تخلخل

شماره رخساره بعد از تلفیق	تخلخل (%)			تعداد نمونه‌ها	رخساره
	متوسط	بیشینه	کمینه		
۲	۳/۸۹	۱۱/۴۴۲	۰/۰۵۲	۲۱	۱
۱	۱/۹۶	۹/۹۶۱	۰/۱۲۵	۲۹	۲
۱	۲/۳۵	۸/۱۲	۰/۳۹۶	۷۷	۳
۲	۳/۵۲	۱۳/۷۶۶	۰/۳۸۹	۱۶	۴
۱	۲/۴۵	۱۷/۴۲۴	۰/۰۹۵	۳۳	۵
۲	۴/۰۴	۲۶/۷۲۳	۰/۰۷۶	۵۵	۶
۲	۵/۵۶	۱۸/۵۹۸	۱/۰۳	۱۸	۷
۲	۴/۰۵	۲۶/۱۳۵	۰/۱۵۳	۲۴	۸

ادامه جدول (۴-۵) نحوه تلفیق رخساره‌های الکتریکی برای ۲۵ خوشه به همراه مقادیر کمینه، بیشینه و متوسط تخلخل

۳	۷/۷۳	۲۷/۴۸۷	۰/۱۶	۶۵	۹
۳	۸/۳۱	۱۶/۹۷۹	۱/۷۱۱	۱۴	۱۰
۴	۸/۷	۲۶/۹۴۸	۰/۸۱۲	۲۹	۱۱
۴	۸/۷۱	۲۶/۱۵۹	۰/۳۶۲	۳۷	۲
۵	۲۳/۹۳	۲۹/۵۷۹	۹/۱۸۷	۱۰	۱۳
۵	۱۳/۱۵	۳۰/۲۲۵	۱/۰۴۳	۳۰	۱۴
۴	۱۰/۱۸	۲۰/۵۶۲	۰/۷۰۵	۱۴	۱۵
۴	۱۱/۵	۱۸/۰۷۹	۰/۴۹	۱۹	۱۶
۴	۱۱/۴۵	۲۳/۷۳۷	۰/۵۵۱	۲۰	۱۷
۵	۱۵/۹۳	۲۸/۳۰۷	۱/۱۴۴	۲۱	۱۸
۵	۱۹/۶۶	۳۳/۵۸۷	۱۲/۴۰	۴۰	۱۹
۵	۲۰/۹۸	۳۲/۹۵۵	۱۱/۱۴۹	۱۸	۲۰
۵	۲۱/۴	۳۳/۲۱۱	۱۰/۷۷۵	۳۹	۲۱
۵	۱۵/۴۸	۳۱/۴۴۲	۰/۴۳۵	۲۵	۲۲
۵	۲۰/۱۹	۲۹/۹۵۵	۱۰/۷۷۵	۹	۲۳
۵	۲۶/۲۷	۳۷/۷۷۷	۱۳/۰۷۳	۸	۲۴
۵	۲۷/۳۶	۳۵/۵۴۳	۱۰/۳۶۳	۱۷	۲۵

جدول (۴-۶) تفکیک رخساره‌های مخزن بر اساس تغییرات مقادیر تخلخل

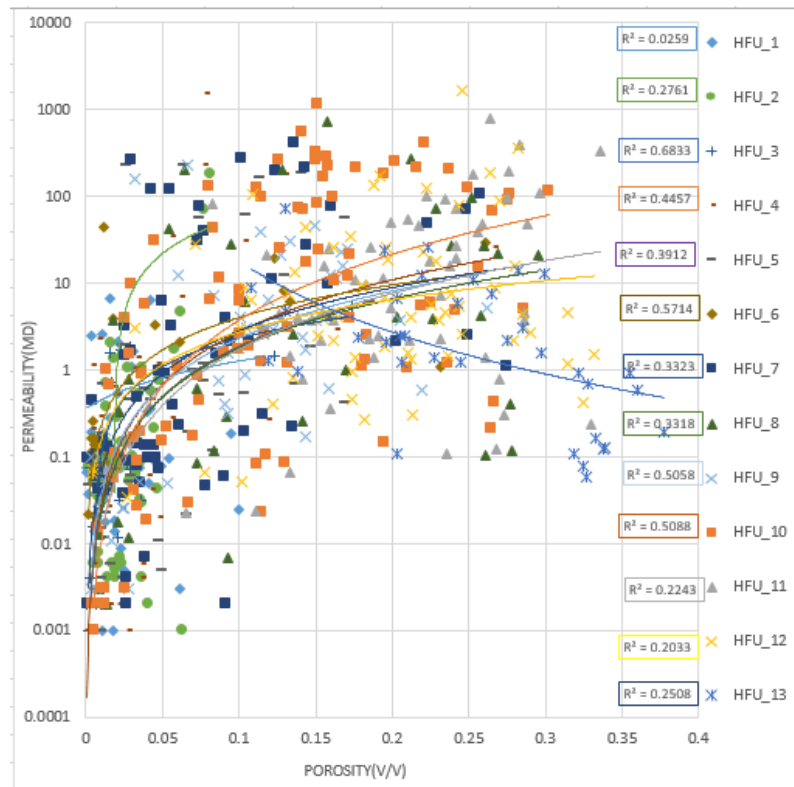
مشخصه مخزن	تخلخل	رخساره
خیلی ضعیف	$\phi < 3$	۱
ضعیف	$3 \leq \phi < 6$	۲
متوسط	$6 \leq \phi < 9$	۳
خوب	$9 \leq \phi < 12$	۴
خیلی خوب	$\phi \geq 12$	۵

رخساره‌های دارای بالاترین میزان DT، PHIE و NPHI و کم‌ترین میزان RHOB و GR دارای بهترین کیفیت مخزنی می‌باشند. بنابراین با توجه به جدول ۴-۳ و جدول ۴-۴ رخساره‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ دارای کیفیت مخزنی بهتری برای خوشه رخساره ۱۳ و رخساره‌های ۳، ۴ و ۵ برای خوشه رخساره ۲۵ نسبت به سایر رخساره‌ها می‌باشند.

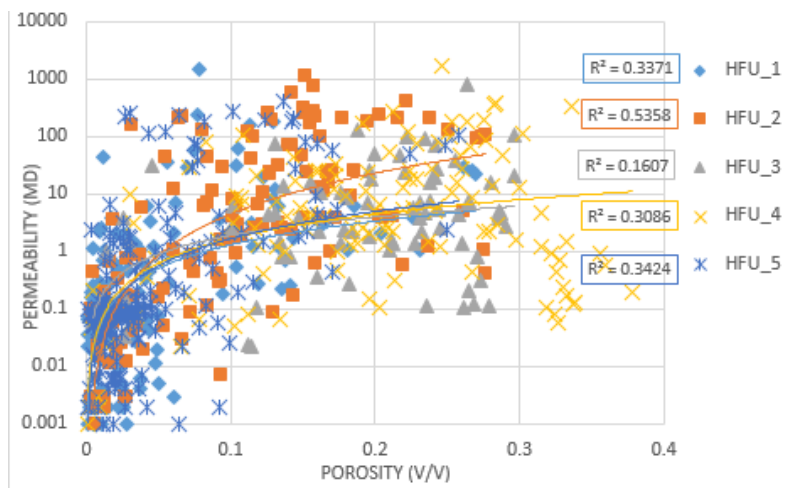
### ۳-۳-۱-۳-۴- بررسی رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از رخساره‌های الکتریکی

به منظور تعیین رابطه میان تخلخل و تراوایی در هر یک از واحدهای جریان، نمودار نیمه لگاریتمی

تخلخل- تراوایی در هر یک از واحدها برای چاه مورد بررسی رسم گردید که نتایج آن در شکل ۷-۴ و شکل ۸-۴ نشان داده شده است. به دلیل ناهمگنی مخزن و تغییرپذیری زیاد مقادیر کمینه و بیشینه تخلخل در جدول ۵-۴ میزان همبستگی بین تراوایی و تخلخل در اکثر واحدهای جریان چاه مورد نظر به جز در موارد معدودی پایین می‌باشد.

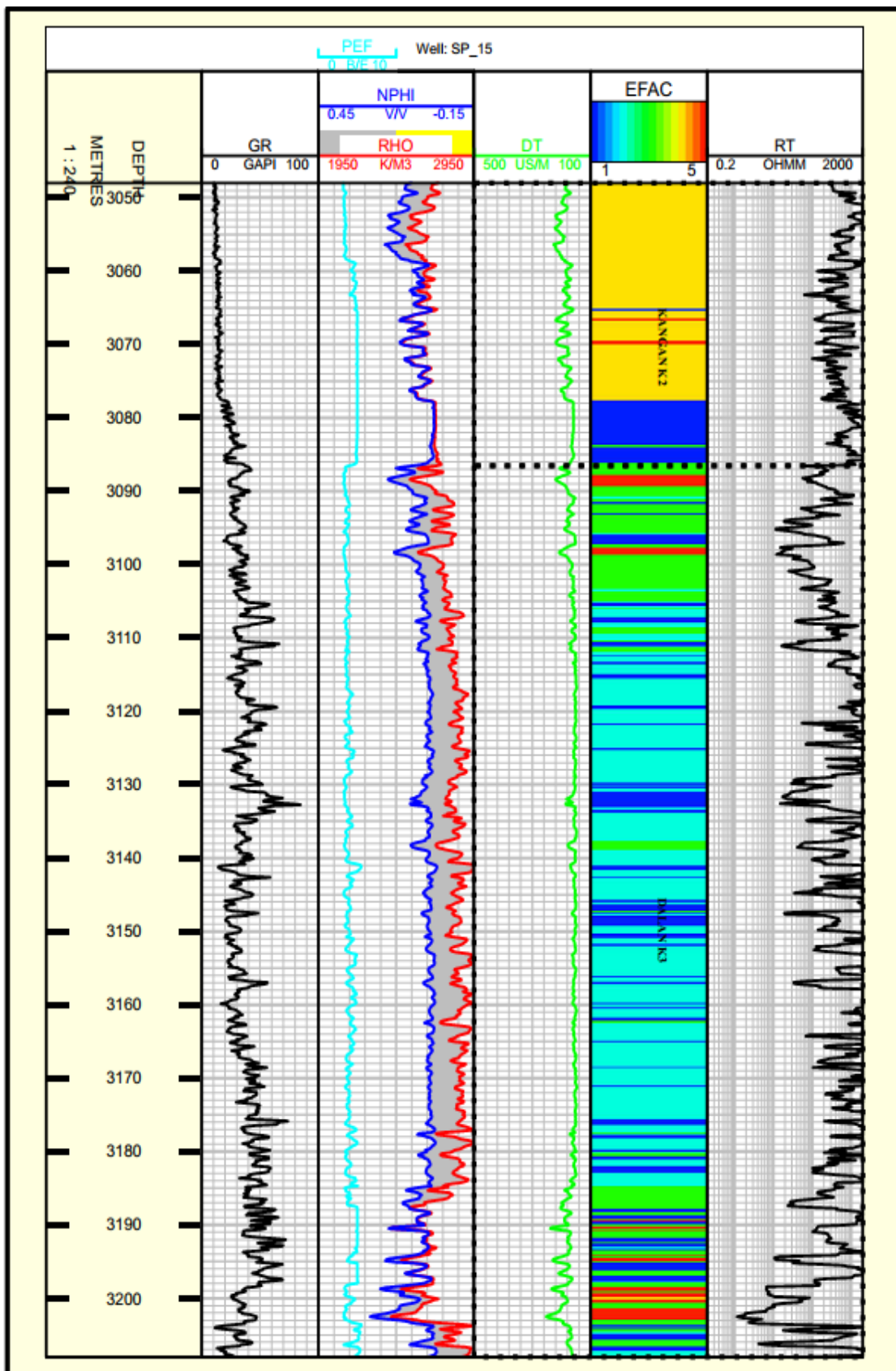


شکل ۷-۴) نمودار توزیع تخلخل- تراوایی بر اساس خوشه رخساره ۱۳ برای هر یک از واحدهای جریان مربوط به مخزن مورد مطالعه در چاه SP\_15 (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).



شکل ۴-۸) نمودار توزیع تخلخل- تراوایی بر اساس خوشه رخساره ۲۵ تلفیق شده برای هر یک از واحدهای جریان مربوط به مخزن مورد مطالعه در چاه SP\_15 (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).

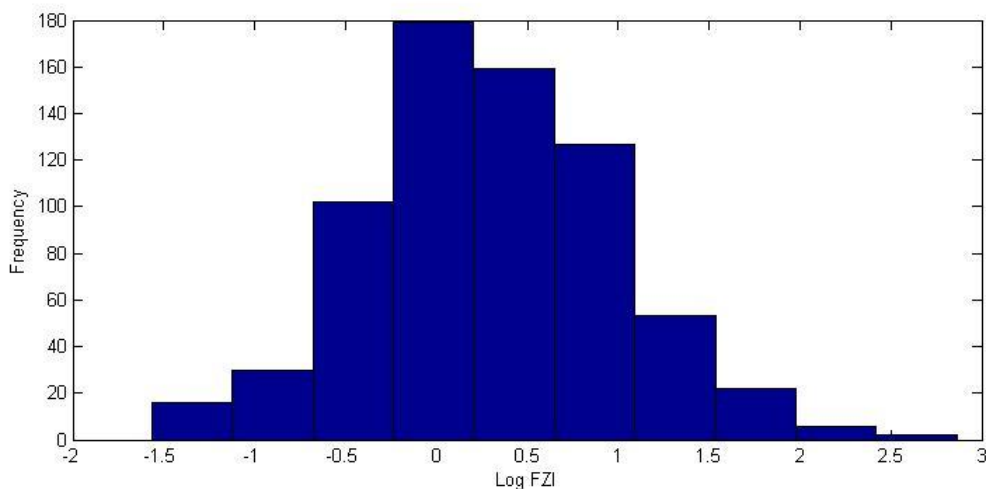
در ادامه رخساره‌های الکتریکی به دست آمده از روش MRGC به همراه برخی از نگاره‌های چاه برای مخزن کنگان ودالان، در شکل ۴-۹ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود عمق ۳۰۵۰ تا ۳۰۸۵ تغییرات لاگ‌های پرتو گاما و همچنین لاگ‌های نوترون، چگالی و صوتی ناچیز است که تغییرات رخساره‌های الکتریکی نیز تأییدکننده این موضوع است. در این بازه عمقی لاگ‌های پرتو گاما، نوترون، چگالی و صوتی پایین است که احتمالاً نشان‌دهنده شکستگی‌ها هستند. بازه عمقی ۳۰۸۵ تا ۳۱۹۶ نشان‌دهنده میان‌لایه‌های شیلی و رسی است که با پرتو گاما، نوترون، چگالی، صوتی و مقاومت بالا مشخص می‌شوند. عمق ۳۱۹۶ تا عمق ۳۲۱۰ تغییرات لاگ‌های پرتو گاما و همچنین لاگ‌های نوترون، چگالی و مقاومت زیاد است که تغییرات رخساره‌های الکتریکی نیز تأییدکننده این موضوع است که با پرتو گاما پایین و چگالی، نوترون و مقاومت بالا احتمالاً نشان‌دهنده شکستگی‌های ریز و متعدد است.



شکل ۴-۹) نمایش رخساره‌های الکتریکی حاصل از روش MRGC در چاه SP\_15 به همراه لاگ‌های مورد استفاده

### ۳-۱-۳-۴- تعیین واحدهای جریان با استفاده از روش نمودار هیستوگرام

بعد از به دست آوردن FZI هر نمونه نوبت به تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی می‌رسد که برای این کار از آنالیز هیستوگرام استفاده می‌کنیم. طبق اصول واحدهای جریان هیدرولیکی، توزیع هیستوگرام لگاریتم شاخص منطقه جریان در هر واحد جریان هیدرولیکی به صورت توزیع نرمال است. این روش با استفاده از این اصل تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را تعیین می‌کند. روش کار بدین صورت است که در این بخش با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، آنالیز هیستوگرام روی داده‌های لگاریتم شاخص منطقه جریان انجام می‌شود (شکل ۴-۱۰). حاصل این آنالیز، ۱۰ بازه مختلف FZI که نشان‌دهنده ۱۰ واحد جریان هیدرولیکی است.



شکل ۴-۱۰) آنالیز هیستوگرام روی داده‌های لگاریتمی شاخص زون جریان

لازم به ذکر است که روش آنالیز هیستوگرام دارای خطای زیادی است و استفاده از آن برای تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی پیشنهاد نمی‌شود [۱۶۳].

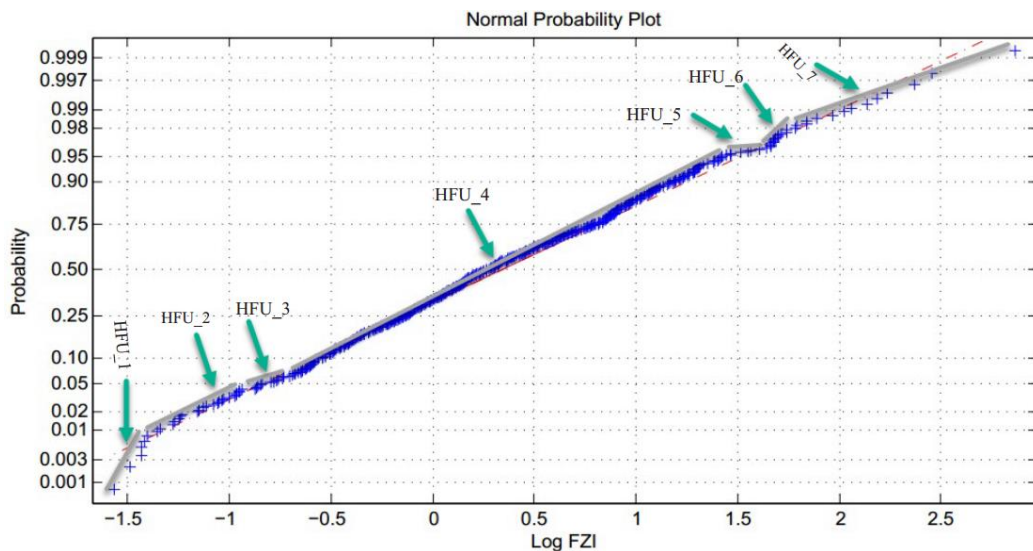
### ۴-۱-۳-۴- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با روش آنالیز احتمال نرمال

روش رسم نمودار احتمال لگاریتم شاخص جریان، روش دیگری برای به دست آوردن تعداد واحدهای جریان بر مبنای شاخص زون جریان است. بدین ترتیب اگر شاخص زون جریان با احتمال تجزیه و تحلیل شود،  $n$  تابع توزیع خطی به دست می‌آید که نشان‌دهنده  $n$  واحد جریان هیدرولیکی است. نمودار

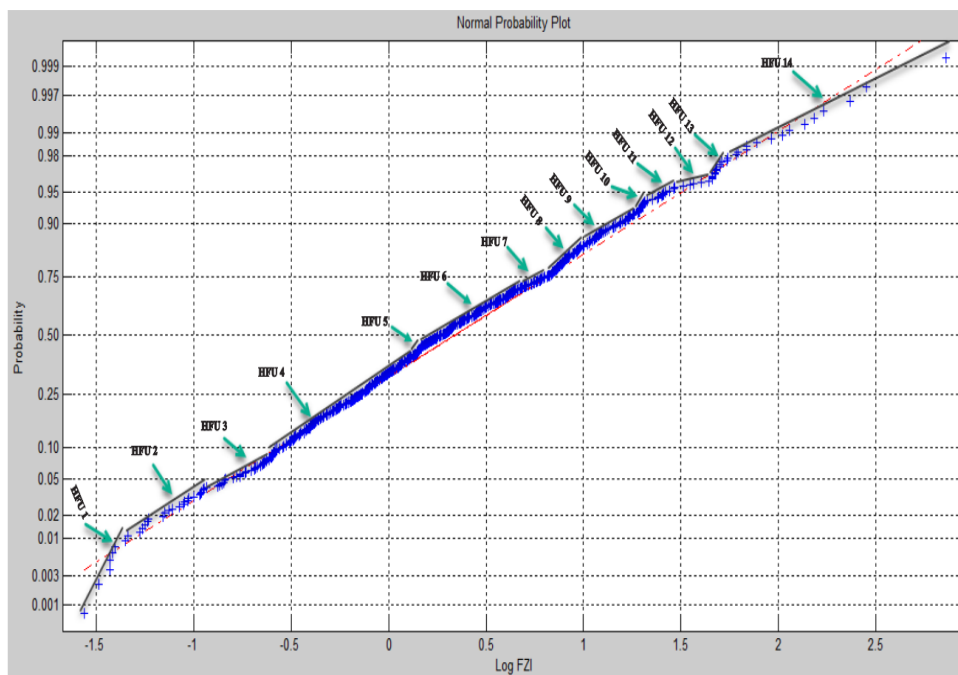


احتمال (تابع توزیع تجمعی)، انتگرال تابع چگالی احتمال (هیستوگرام) است. توزیع نرمال به شکل یک خط مستقیم مجزا در یک نمودار احتمال است. بنابراین، تعداد خطوط مستقیم در نمودار احتمال برای تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی جریان در مخزن استفاده می‌شوند [۲۹]. با استفاده از روش شاخص زون جریان و رسم نمودار احتمال لگاریتم FZI تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی برای مخزن مورد مطالعه در چاه SP\_15، ۷ واحد هیدرولیک جریان به دست آمد، که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. به دلیل سهولت شناسایی بصری خطوط مستقیم، این روش بسیار مفیدتر از روش هیستوگرام است. هر چند اثرات تلفیقی ممکن است تا حدودی خطوط مستقیم را کج کرده و سبب تغییر مکان آنها شود.

چون در این روش تعیین خطوط مستقیم توسط خود کاربر انجام می‌شود، می‌توان با توجه به شکستگی‌ها تعداد خطوط مستقیم را افزایش داد. در این مطالعه همان طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌شود تعداد خطوط مستقیم و در نتیجه تعداد واحدهای جریان به ۱۴ واحد هیدرولیکی هم رسید که برای سادگی تفسیر نتایج، ۷ واحد جریان هیدرولیکی انتخاب شد.



شکل ۴-۱۱) نمودار احتمال نرمال با استفاده از روش شاخص زون جریان و تعیین ۷ واحد جریان هیدرولیکی در داده‌های مورد مطالعه برای چاه SP\_15



شکل ۴-۱۲) نمودار احتمال نرمال با استفاده از روش شاخص زون جریان و تعیین ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی در داده‌های مورد مطالعه برای چاه SP\_15

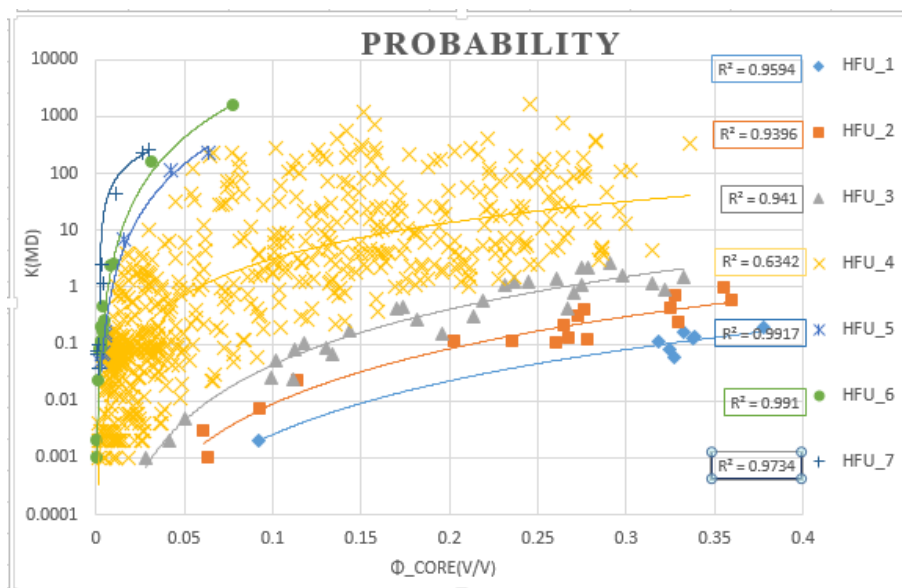
سپس به منظور تعیین رابطه میان تخلخل و تراوایی در هر یک از واحدهای جریان، نمودار نیمه‌لگاریتمی تخلخل- تراوایی در هر یک از این واحدها برای چاه مورد بررسی رسم گردید. شکل ۴-۱۳ و شکل ۴-۱۴ نمودار نیمه لگاریتمی تخلخل- تراوایی در چاه SP\_15 را به ترتیب برای ۷ و ۱۴ واحد هیدرولیکی نشان می‌دهد. همان طور که از شکل‌های مزبور دیده می‌شود میزان همبستگی بین تخلخل و تراوایی در اکثر واحدهای جریان چاه مورد نظر بالا می‌باشد. همچنین جدول ۴-۷ مقادیر مشخص FZI را برای ۷ و ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی نشان می‌دهد.

جدول ۴-۷) مقادیر FZI برای ۷ و ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی

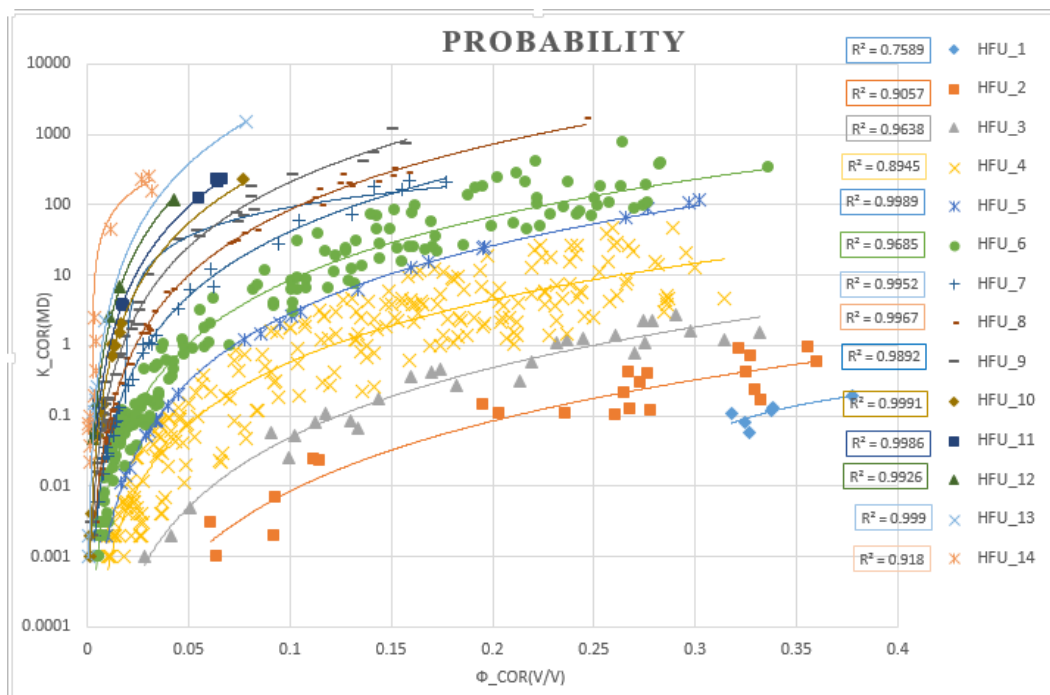
مقادیر مشخص FZI برای ۷ واحد هیدرولیکی		مقادیر مشخص FZI برای ۱۴ واحد هیدرولیکی	
HFU_۱	$\text{Log FZI} \leq -۱/۳۳۹$	HFU_۱	$\text{Log FZI} \leq -۱/۴۰۴۸$
HFU_۲	$-۱/۳۳۹ < \text{Log FZI} \leq -۰/۹۳۵۱$	HFU_۲	$-۱/۴۰۴۸ < \text{Log FZI} \leq -۰/۹۳۵$
HFU_۳	$-۰/۹۳۵۱ < \text{Log FZI} \leq -۰/۶۱۳۹$	HFU_۳	$-۰/۹۳۵ < \text{Log FZI} \leq -۰/۶۰۰۰۶$
HFU_۴	$-۰/۶۱۳۹ < \text{Log FZI} \leq ۱/۴۲۰۷$	HFU_۴	$-۰/۶۰۰۰۶ < \text{Log FZI} \leq ۰/۱۳۵۹$
HFU_۵	$۱/۴۲۰۷ < \text{Log FZI} \leq ۱/۶۴۴۹$	HFU_۵	$۰/۱۳۵۹ < \text{Log FZI} \leq ۰/۱۷۸۹۶$

ادامه جدول (۴-۷) مقادیر FZI برای ۷ و ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی

HFU_۶	$1/6449 < \text{Log FZI} \leq 1/8904$	HFU_۶	$0.17896 < \text{Log FZI} \leq 0.18055$
HFU_۷	$\text{Log FZI} \geq 1/8904$	HFU_۷	$0.18055 < \text{Log FZI} \leq 0.18243$
		HFU_۸	$0.18243 < \text{Log FZI} \leq 0.19883$
		HFU_۹	$0.19883 < \text{Log FZI} \leq 1/2793$
		HFU_۱۰	$1/2793 < \text{Log FZI} \leq 1/3542$
		HFU_۱۱	$1/3542 < \text{Log FZI} \leq 1/4673$
		HFU_۱۲	$1/4673 < \text{Log FZI} \leq 1/6606$
		HFU_۱۳	$1/6606 < \text{Log FZI} \leq 1/7433$
		HFU_۱۴	$\text{Log FZI} \geq 1/7433$



شکل (۴-۱۳) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی در چاه SP\_15 با استفاده از روش آنالیز احتمال نرمال (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).



شکل ۴-۱۴) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۱۴ واحد جریان هیدرولیکی در چاه SP\_15 با استفاده از روش آنالیز احتمال نرمال (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).

### ۴-۳-۱-۵- تعیین واحدهای جریان با استفاده از روش گونه‌های سنگی ناپیوسته<sup>۱</sup> (DRT)

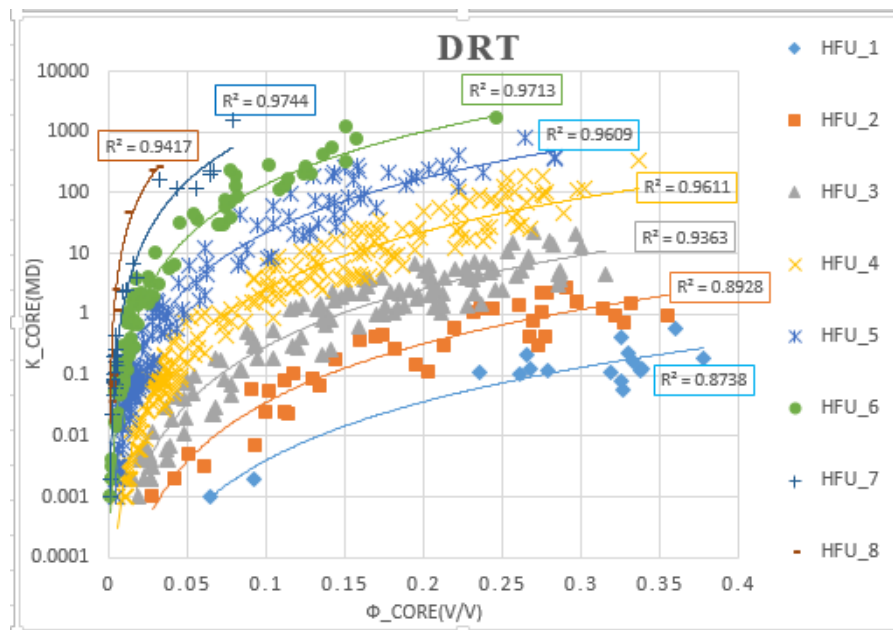
از آنجایی که مقادیر FZI متغیری پیوسته است، با استفاده از معادله (۴-۹) می‌توان متغیر پیوسته FZI را به متغیر ناپیوسته تبدیل کرد. در این حالت نمونه‌ها در دسته‌های مجزایی طبقه‌بندی می‌شوند.

این معادله توسط چکانی و خرات (۲۰۱۲)، برای توصیف مخازن کربناته استفاده شده است [۱۶۴]:

$$DRT = Round(2Log(FZI)+10.7) \quad (۴-۹)$$

بر اساس این رابطه، ۸ دسته برای DRT داده‌های مغزه مخزن مورد مطالعه تعیین شد (شکل ۴-۱۵). همان‌طور که در شکل مزبور دیده می‌شود میزان همبستگی بین تخلخل و تراوایی در همه واحدهای جریان چاه مورد نظر بالا است. جدول ۴-۸ مقادیر DRT به دست آمده از رابطه (۴-۹) و همچنین مقادیر میانگین FZI، تخلخل و تراوایی را برای هر واحد جریان نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Discontinuous rock types



شکل ۴-۱۵) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۸ واحد هیدرولیکی با استفاده از روش DRT

جدول ۴-۸) مقادیر میانگین هر واحد جریان به روش DRT

Number	DRT	Mean			فراوانی
		Log_FZI	K_Core(MD)	PHI_Core(V/V)	
HFU_1	8	-1.30836	0.16305	0.28433	17
HFU_2	9	-0.79997	0.62126	0.19693	41
HFU_3	10	-0.33023	2.58986	0.14776	133
HFU_4	11	0.14576	17.3551	0.10815	210
HFU_5	12	0.65005	40.85215	0.059524	157
HFU_6	13	1.09601	73.89512	0.03713	99
HFU_7	14	1.62466	86.67956	0.017433	30
HFU_8	15	2.25354	59.66155	0.009	9

#### ۴-۳-۱-۶- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای

عوامل مختلفی هستند که می‌توان براساس آنها رخساره‌های سنگی را در گروه‌های مختلف قرار

داد، بدین ترتیب که برای هر گروه سنگی یک یا چند مشخصه کلیدی تعریف می‌شود که بر اساس آنها

هر نمونه‌ای که بیشترین شباهت را به تعاریف مورد نظر داشته باشد در آن گروه قرار داده می‌شود. معمولاً داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به گروه‌های سنگی تعیین شده بر روی نمودار تخلخل و تراوایی به خوبی تفکیکی نشده و دارای هم پوشانی می‌باشند. به منظور تفکیک دقیق داده‌ها و تعیین گروه‌های سنگی، از تکنیک آنالیز خوشه‌ای استفاده می‌شود. هدف آنالیز خوشه‌ای قرار دادن یک مجموعه از داده‌ها در گروه‌هایی (که خوشه نامیده می‌شود) می‌باشد به طوری که داده‌ها درون هر یک از گروه‌ها اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و همگن باشند و نسبت به گروه‌های دیگر ناهمگن باشند [۱۶۵]. آنالیز خوشه‌ای داده‌ها را در گروه‌هایی قرار می‌دهد که معنادار و مفید باشند. بیشترین شباهت (همگن بودن) در یک گروه و بیشترین اختلاف بین گروه‌ها، نشان‌دهنده بهترین خوشه‌سازی می‌باشد [۱۶۶]. در این روش نوع رخساره اهمیت ندارد بلکه پتانسیل مخزنی سازند بر اساس تخلخل و تراوایی مورد توجه قرار می‌گیرد، چرا که فرآیندهای دیاژنزی بعضاً چنان تأثیری بر مخازن مخصوصاً کربناته می‌گذارند که هر رخساره می‌تواند هر نوع تخلخل و تراوایی را از خود نشان دهد [۱۶۷]. بنابراین صرف دانستن رخساره نخواهد توانست به شناخت پتانسیل مخزنی و تولید کمک کند. در این مطالعه برای تعیین واحدهای جریان به روش آنالیز خوشه‌ای از دو روش K-means و سلسله مراتبی استفاده شده است.

#### ۴-۳-۱-۶-۱- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای K-means

پس از تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، برای اینکه مجموعه‌ای از داده‌ها را که بسیار شبیه به هم هستند را در یک گروه قرار دهیم از آنالیز خوشه‌ای K-means استفاده می‌کنیم. آنالیز خوشه‌ای داده‌ها به روش K-means داده‌ها را در گروه مشخصی از هم جدا کرده به طوری که داده‌های مربوط به هر گروه با سایر گروه‌ها متفاوت است. در این روش بعد از تعیین تعداد دسته‌ها که از روش آنالیز احتمال نرمال یا آنالیز هیستوگرام استفاده می‌شود، نرم‌افزار به تعداد دسته‌های تعیین شده نقاطی را به عنوان نقاط مرکزی در نظر می‌گیرد و فاصله سایر نقاط تا نقاط مرکزی را محاسبه می‌کند و بدین ترتیب داده‌ها را در گروه‌های مختلف دسته‌بندی می‌کند. نرم‌افزار MATLAB بر اساس این قابلیت

می‌تواند به هر تعداد که لازم باشد محل نقطه مرکزی را تا حصول نتیجه بهتر تغییر دهد (با کمتر شدن انحراف معیار داده‌ها از نقطه مرکزی). در روش آنالیز خوشه‌ای داده‌ها بر اساس آنالیز خوشه‌ای K-means بر روی FZI از ۱ تا ۱۵ دسته تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال وقتی که تعداد واحدهای جریان را ۶ در نظر می‌گیریم و آنالیز خوشه‌ای K-means را انجام می‌دهیم، مقادیر FZI از شماره ۱ تا ۶ دسته‌بندی می‌شوند و مقادیر با شماره‌های یکسان در یک گروه قرار می‌گیرند.

#### ۴-۳-۱-۶-۱-۱- مجموع مربعات خطا<sup>۱</sup>

همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل اینکه تعیین تعداد خطوط مماس در آنالیز احتمال نرمال که نشان‌دهنده تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد، تابع کاربر است (بنا به نظر و تجربه کاربر این تعداد تغییر می‌کند)، لذا احتمال ایجاد خطا در محاسبات زیاد است. به همین دلیل به منظور کاهش خطاها سعی شده است تا برای تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی از پارامتر مجموع مربع خطاها استفاده شود.

در استفاده از مجموع مربع خطاها روش کار بدین صورت است که ابتدا تعداد دسته‌ها را برابر یک فرض کرده ( $HFU=1$ )، و آنالیز خوشه‌ای K-means توسط نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شود، سپس آنالیز رگرسیون خطی را بر روی داده‌ها انجام و در نهایت نموداری از مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد دسته‌ها ترسیم می‌شود که (شکل ۴-۱۶). همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی مقدار مجموع مربع خطاها کاهش یافته، اما از یک مقدار به بعد تغییرات در مجموع مربع خطاها محسوس نبوده و قابل صرف‌نظر کردن است. این مقدار همان تعداد بهینه واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد. تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه به این معناست که می‌توان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را بیش از مقدار بهینه نیز انتخاب کرد، اما بهبودی در نتایج حاصل نشده و تنها محاسبات مشکل‌تر و پیچیده‌تر می‌شود. مزیت این روش در این است که مستقل از کاربر بوده و

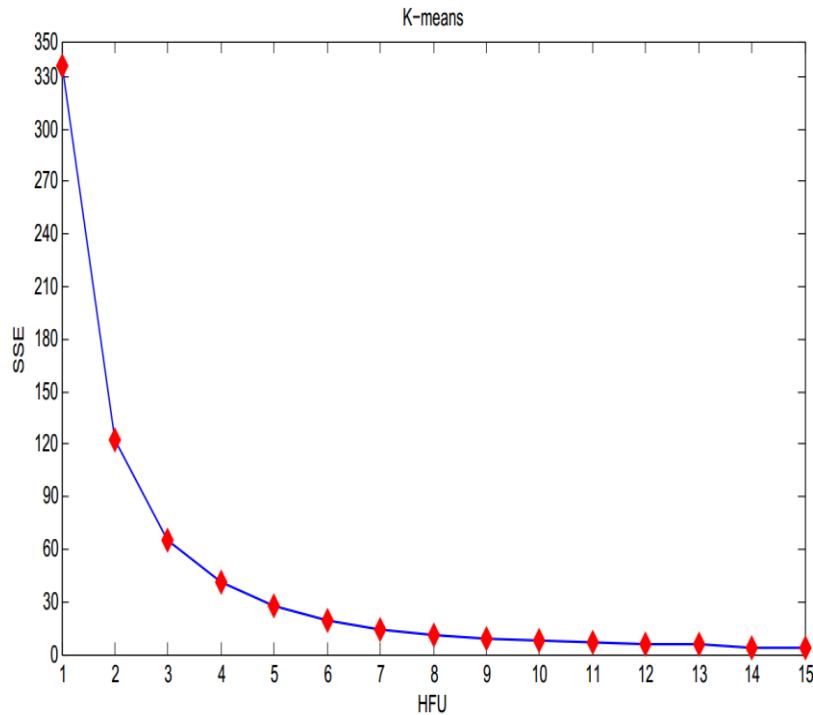
<sup>۱</sup> Sum of square errors (SSE)

دقت بالاتری در تعیین تعداد دسته‌ها دارد. بر اساس این روش برای داده‌های مورد استفاده در این مطالعه ۷ واحد جریان هیدرولیکی تشخیص داده شد. همچنین جدول ۴-۹ مقادیر خطای محاسبه شده به ازای هر واحد جریان را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۷ نمودار توزیع تخلخل - تراوایی را برای ۷ واحد هیدرولیکی بر اساس روش K-means نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مزبور دیده می‌شود میزان همبستگی بین تخلخل و تراوایی در اکثر واحدهای جریان چاه مورد نظر بالا است.

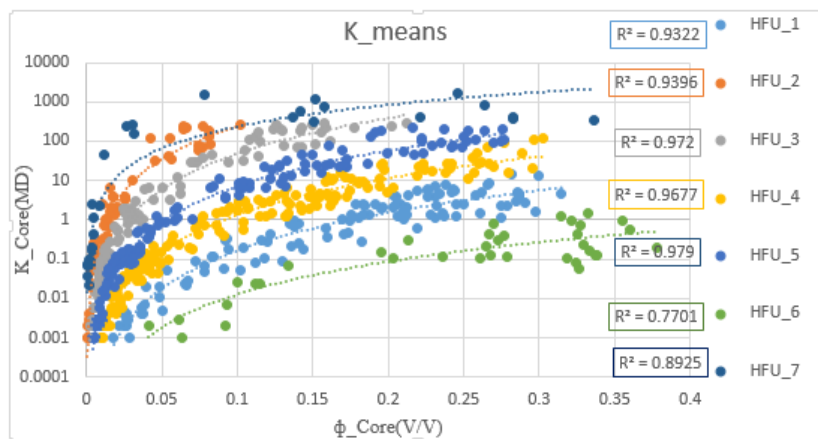
جدول ۴-۹) مقادیر خطای محاسبه شده به ازای تعداد واحد جریان هیدرولیکی

Nu. of HFU	SSE
1	335.482
2	122.885
3	65.329
4	41.2529
5	27.9689
6	18.772
7	14.0864
8	10.7561
9	9.00607
10	7.64266
11	6.44134
12	6.19124
13	5.62122
14	3.67951
15	3.54108





شکل ۴-۱۶) نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی



شکل ۴-۱۷) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی با روش K-means (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).

#### ۴-۳-۱-۶-۲- تعیین واحدهای جریان با استفاده از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی<sup>۱</sup>

خوشه‌بندی به روش سلسله مراتبی، یک ابزار مفید و مؤثر برای زون‌بندی مخازن نفت و گاز محسوب می‌شود [۱۶۸]. خوشه‌سازی سلسله مراتبی روشی برای گروه‌بندی داده‌ها به طور هم‌زمان در مقیاس‌های مختلف با استفاده از درخت خوشه‌ای است، به بیان دیگر، تولید یک سلسله خوشه از خوشه‌های کوچک‌تر

<sup>۱</sup> Hierarchical clustering

با محتوای داده‌ای خیلی شبیه به هم برای تولید خوشه‌های بزرگ‌تر که حاوی محتوای داده‌ای با بیشترین اختلاف می‌باشد از وظایف خوشه‌سازی سلسله‌ای می‌باشد [۱۶۵, ۱۶۹]. این روش، یک خروجی گرافیکی تولید می‌نماید که به نمودار دندروگرام<sup>۱</sup> یا درختی، معروف است، به طوری که نشان‌دهنده ساختار خوشه‌سازی سلسله‌مراتبی می‌باشد [۱۷۰]، این درخت یک مجموعه مستقل از داده‌ها نیست، بلکه بیشتر به عنوان یک طبقه‌بندی چند سطحی است که خوشه‌ها در یک سطح پایین‌تر به خوشه‌های سطوح بالاتر متصل می‌شوند [۱۶۵]. این خاصیت به ما اجازه می‌دهد که تصمیم بگیریم کدام سطح یا مقیاس از خوشه‌سازی برای موضوع مورد نظر مناسب‌تر است [۱۷۱]. برای انجام خوشه‌ای سلسله‌مراتبی لازم است که مراحل زیر را انجام دهیم [۱۷۱]:

#### ۱- محاسبه فاصله بین بردارهای ورودی

برای محاسبه فاصله بین متغیرهای داده‌ای، توابع مختلفی وجود دارد. فاصله، میزان جدا بودن دو شی از همدیگر را بازگو می‌کند. یکی از رایج‌ترین روش‌های به کار رفته برای محاسبه فاصله بین بردارهای ورودی و یا به عبارت دیگر فاصله بین تمام زوج داده‌ها، محاسبه فاصله اقلیدوسی بین داده‌ها می‌باشد، که به صورت مجموع مربع تفاضل بین همه داده‌ها و یا متغیرها تعریف می‌شود. در صورتی که دو زوج داده  $(x_1, y_1)$  و  $(x_2, y_2)$  داشته باشیم، فاصله اقلیدوسی آنها طبق فرمول (۱۰-۴) محاسبه می‌شود:

$$\text{فاصله اقلیدوسی} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (10-4)$$

با استفاده از معادله (۱۰-۴)، فاصله اقلیدوسی بین تمام زوج داده‌ها محاسبه شده است.

#### ۲- برقراری ارتباط بین اجزای مربوط به فواصل

در این مرحله لازم است تعیین شود که کدام یک از زوج‌های تشکیل شده باید در یک خوشه قرار گیرند. توابع مختلفی برای برقراری ارتباط بین داده‌ها و گروه‌بندی آنها وجود دارد، به طوری که حداکثر فاصله بین اجزاء، حداقل فاصله، میانگین فواصل و فاصله بین مرکز ثقل همه اجزای بردار می‌توانند در

<sup>۱</sup> Dendrogram

این تابع قرار گیرند. در این نوع از محاسبه، نزدیکی دو خوشه و قرارگیری آنها در یک خوشه و تشکیل خوشه جدیدتر، به صورت حداکثر فاصله (حداقل شباهت)، بین همه اجزای موجود در دو خوشه تعریف می‌شود. به عنوان مثال، اگر دو خوشه با نام‌های  $r$  و  $s$  داشته باشیم، طبق رابطه (۴-۱۱) خواهیم داشت:

$$D(r, s) = \max \left( \text{dist} \left( X_{ri}, X_{sj} \right) \right), i \in \{1, \dots, n_r\}, j \in \{1, \dots, n_s\} \quad (4-11)$$

در عبارت فوق،  $n_r$  تعداد اجزای خوشه  $r$ ،  $n_s$  تعداد اجزای خوشه  $s$ ،  $X_{ri}$ ،  $i$  امین جز خوشه  $i$  و  $X_{sj}$ ،

$j$  امین جز خوشه  $s$  می‌باشد.

### ۳- تشکیل درخت خوشه

در این مرحله با استفاده از اطلاعات حاصل از درجه ارتباط داده‌ها که آنها را در گروه‌های مربوط قرار می‌دهد، درخت خوشه‌ای، تشکیل می‌شود. درخت خوشه‌ای متشکل از مجموعه خوشه‌های مختلف بوده، به طوری که هر یک از خوشه‌ها به یکدیگر مرتبط می‌باشند. در این نوع درخت، محور افقی شامل تعداد داده‌ها و محور عمودی مقادیری را نشان می‌دهد که خوشه‌های مختلف برای تشکیل خوشه‌های جدیدتر به یکدیگر می‌پیوندند. روش‌های مختلفی برای تشکیل درخت خوشه‌ای وجود دارد. اما روشی که در این مطالعه استفاده شده، روش خوشه‌سازی سلسله‌ای متراکم به هم پیوسته<sup>۱</sup> می‌باشد. این روش خوشه‌سازی به مجموعه‌ای از تکنیک‌های خوشه‌سازی با روابط نزدیک به هم اشاره دارد که در آن، هر نقطه، به عنوان یک خوشه مجزا در نظر گرفته شده و سپس مکرراً دو خوشه نزدیک به هم را (بر اساس میزان فاصله) با یکدیگر ترکیب می‌کند، عمل ترکیب کردن خوشه‌ها تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در نهایت یک خوشه بزرگ‌تر، همه خوشه‌های زیرین را احاطه می‌کند. بنابراین، این روش نیازمند تعریف مفهوم نزدیکی خوشه‌ای<sup>۲</sup> می‌باشد. در واقع، محاسبه نزدیکی بین دو خوشه به عنوان عملکرد کلیدی در این روش بوده که از آن به عنوان نزدیکی خوشه‌ای یاد می‌شود. برای محاسبه مقادیر نزدیکی خوشه‌ای، از مقادیر فاصله‌ای حداقل<sup>۳</sup>، حداکثر<sup>۴</sup> و میانگین گروه<sup>۵</sup> استفاده می‌شود. در فاصله حداقل، نزدیکی

<sup>۱</sup> Agglomerative hierarchical clustering

<sup>۲</sup> Cluster proximity

<sup>۳</sup> Maximum

<sup>۴</sup> Minimum

<sup>۵</sup> Group average

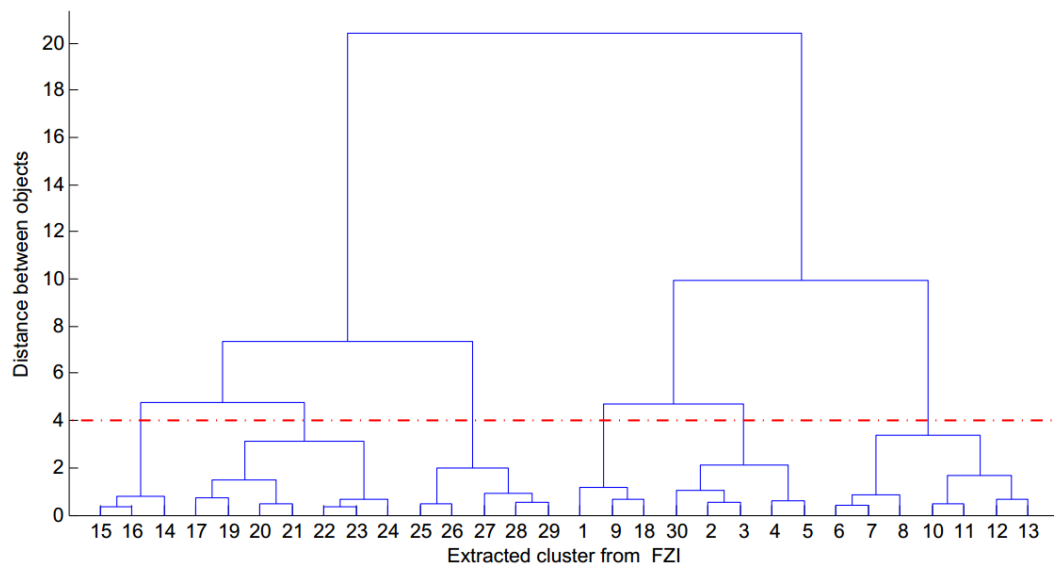
خوشه‌ای، به صورت نزدیکی بین دو نقطه موجود در خوشه‌های جداگانه و با کمترین فاصله بین دو نقطه مذکور تعریف می‌شود. فاصله حداکثر، نزدیکی بین دو نقطه با حداکثر فاصله بین آنها را به عنوان نزدیکی خوشه‌ای تعریف کرده و در نهایت فاصله میانگین گروهی، نزدیکی خوشه‌ای را به صورت میانگین مقادیر نزدیکی زوج داده‌ها در خوشه‌های مختلف، محاسبه می‌کند. در این مطالعه و به منظور ایجاد درخت خوشه‌ای، از حداکثر فاصله (حداقل شباهت) بین هر دو نقطه در دو خوشه مختلف به عنوان نزدیکی دو خوشه استفاده می‌شود.

در این روش، تمام نقاط به عنوان یک خوشه مجزا در نظر گرفته می‌شود، سپس با اضافه شدن درجه ارتباط هر کدام از داده‌ها که در مراحل قبلی محاسبه شده است، در ابتدا داده‌های با حداقل فاصله به یکدیگر می‌پیوندند و تشکیل خوشه جدید را می‌دهند. در ادامه داده‌های نزدیک‌تر به هر کدام از خوشه‌ها بر اساس حداکثر فاصله بین جفت داده‌ها به خوشه‌ها پیوسته و خوشه جدید تشکیل می‌شود، این عمل تا جایی ادامه پیدا می‌کند که همه داده‌ها و خوشه‌ها تشکیل یک خوشه واحد جدید را می‌دهند.

#### ۴- ایجاد خوشه‌ها

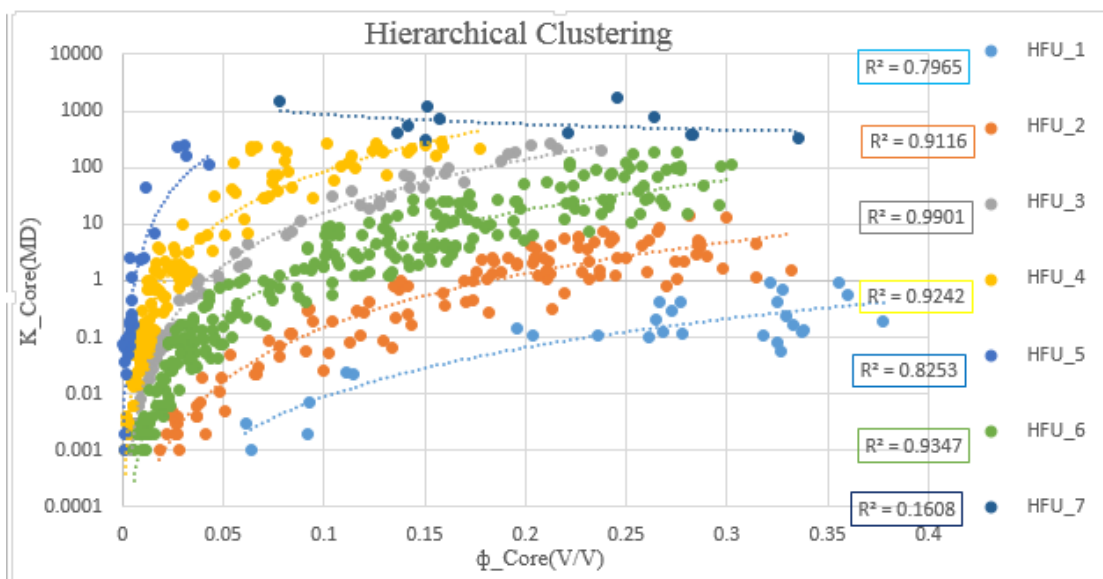
بعد از تشکیل درخت خوشه‌ها می‌توان با تعریف یک سطح خاص به نام cut off خوشه‌های دلخواه بزرگ یا کوچک را تعریف نمود. در مطالعه حاضر و با استفاده از آنالیز خوشه‌ای، بعد از برقراری ارتباط بین خوشه‌های مختلف با یکدیگر بر اساس حداکثر فاصله بین اجزای موجود در هر خوشه و تشکیل گروه یا خوشه‌های بزرگ‌تر، درخت خوشه‌ای با خوشه‌های مختلف تشکیل گردید. هدف بعدی انتخاب بهترین و مناسب‌ترین تعداد خوشه ترسیم شده بوده، به طوری که این تعداد خوشه ترسیم شده که مجموعاً یک درخت خوشه‌ای را درست می‌کنند، بازگوکننده مناسب‌ترین گونه‌های سنگی برای مخازن کربناته باشد. در مطالعه حاضر و با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای و به منظور پیوستگی و مطابقت داده‌ها با تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی معرفی شده، با تعیین مقدار  $cut\ off = 6$  تعداد ۶ خوشه

ساخته شد، بدین ترتیب تمام زوج داده‌های تخلخل و تراوایی بر اساس شباهت یا فاصله بین‌شان در شش گروه مختلف جای داده شده و تشکیل شش خوشه را دادند. چون در بین داده‌ها هم ۱۲ داده تراوایی وجود داشت که مقادیر خیلی بالا را نشان می‌داد به عنوان داده پرت شناخته شدند و به هنگام تشکیل درخت خوشه‌ای حذف شدند و بعداً یک خوشه در نظر گرفته شد (خوشه ۷)، و نهایتاً هفت خوشه در نظر گرفته شد، سپس هر یک از خوشه‌ها به عنوان نماینده گونه سنگی<sup>۱</sup> معرفی شدند (شکل ۴-۱۸). در نهایت توزیع تخلخل - تراوایی را برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی ترسیم شده است (شکل ۴-۱۹). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان همبستگی بین تخلخل و تراوایی در اکثر واحدهای جریان چاه مورد نظر بالا است.



شکل ۴-۱۸) دندروگرام استخراج شده از داده‌های FZI در حالت تفکیک ۶ خوشه مربوط به چاه SP\_15

<sup>۱</sup> Rock types



شکل ۴-۱۹) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای ۷ واحد جریان هیدرولیکی با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).

### ۴-۳-۱-۷- تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از شاخص کیفیت مخزن (RQI)

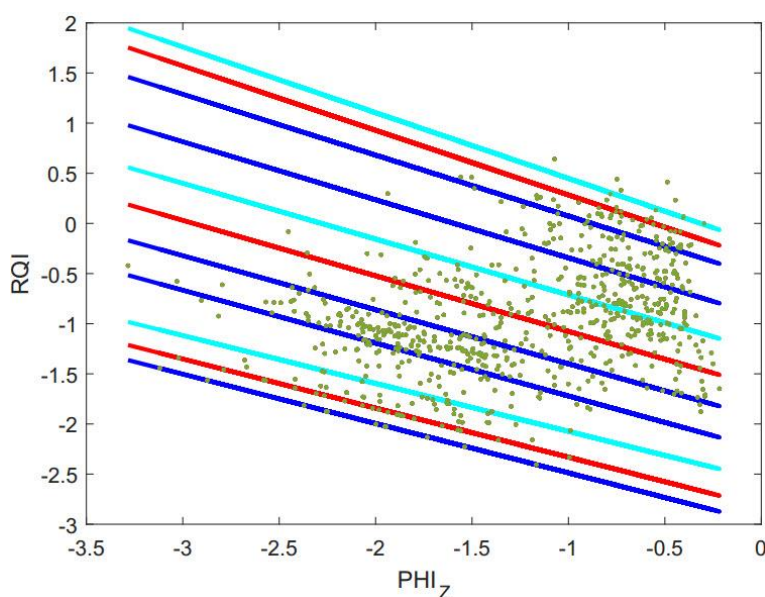
در شرایط ایده‌آل نمودار لگاریتمی RQI بر حسب  $\phi_z$  یک نمودار خطی با شیب واحد<sup>۱</sup> خواهد بود که هر خط یک واحد جریان هیدرولیکی است و محل تلاقی هر یک از این خطوط با خط  $\phi_z = 1$  مقدار متوسط FZI برای این واحد جریان هیدرولیکی می‌باشد [۱۷۲]. نمونه‌های با مقادیر مختلف FZI بر روی سایر خطوط موازی قرار دارند. نمونه‌هایی که بر روی یک خط مستقیم قرار دارند دارای ویژگی‌های دهانه خلل و فرج مشابه هستند و بنابراین یک واحد جریان را تشکیل می‌دهند. هر خط مستقیم با شیب برابر واحد به طور اولیه یک سازند ماسه‌سنگی تمیز محسوب می‌شود و شیب‌های بزرگتر از یک نشان‌دهنده سازندهای شیلی خواهد بود.

شاخص کیفیت مخزن پارامتر منحصر به فردی است که شامل ویژگی‌های زمین‌شناسی بافت و کانی‌شناسی در ساختار رخساره‌های هندسی دارای خلل و فرج مجزا می‌باشد. به طور کلی سنگ‌هایی که شامل خلل و فرج ذاتی ریز، خلل و فرج پر شده با ذرات کانی‌ها و دارای رس به عنوان پلی بین خلل

<sup>۱</sup> Unit slope

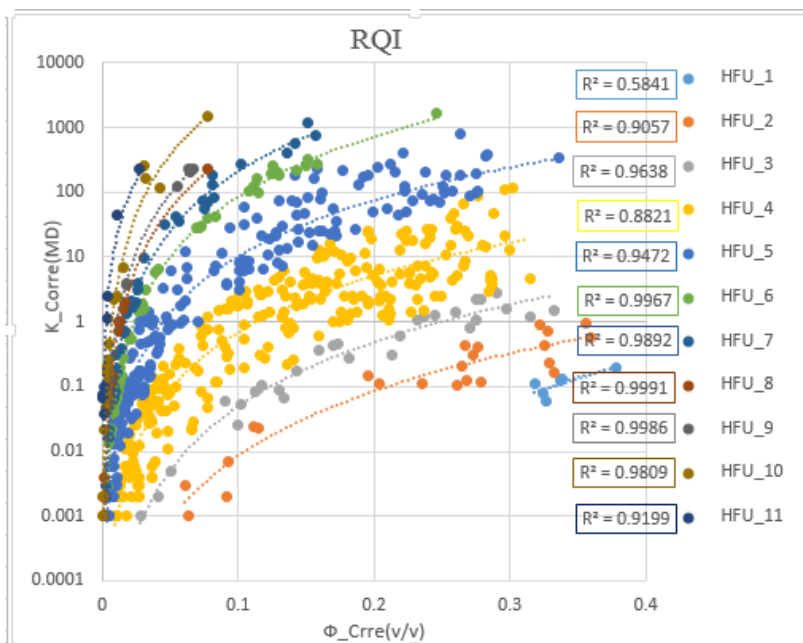
و فرج باشند، از RQI پایینی برخوردارند. ماسه‌های ریز دانه و جور نشده، با توجه به اینکه معمولاً از مساحت سطح و ضریب پیچاپیچی بالایی برخوردارند، در نتیجه RQI پایینی دارند. در مقابل ماسه‌های درشت‌دانه و جور شده که حاوی شیل کمتری می‌باشند، با توجه به مساحت سطح، ضریب پیچاپیچی و عامل شکل کمتر، در نتیجه RQI بالاتری دارند. به طور کلی، محیط‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی مختلف، هندسه مخزن و در نتیجه، RQI (یا FZI) را کنترل می‌نمایند [۳].

شکل ۴-۲۰ نمودار لگاریتمی شاخص کیفیت مخزن در مقابل تخلخل نرمال شده در چاه SP\_15 را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از روش شاخص کیفیت مخزن که در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده با استفاده از کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB به‌دست آمده‌اند. همان‌طور که از روی این شکل دیده می‌شود ۱۱ واحد جریان در چاه مورد مطالعه با استفاده از روش شاخص کیفیت مخزن به‌دست آمده است.



شکل ۴-۲۰ نمودار شاخص کیفیت مخزنی در مقابل تخلخل نرمالیزه شده در چاه SP\_15

سپس به منظور تعیین رابطه میان تخلخل و تراوایی در هر یک از این واحدهای جریان، نمودار نیمه لگاریتمی تخلخل- تراوایی در هر یک از این واحدها برای چاه مورد بررسی رسم گردید (شکل ۴-۲۱). همان‌طور که ملاحظه می‌شود میزان همبستگی بین تراوایی و تخلخل در اکثر واحدهای جریان چاه مورد نظر بالا می‌باشد.



شکل ۴-۲۱) نمودار توزیع تخلخل - تراوایی برای هر یک از واحدهای جریان در چاه SP\_15 با استفاده از روش شاخص کیفیت مخزن (میزان همبستگی هر واحد جریان در مقابل آن واحد جریان نوشته شده است).

#### ۴-۴- مدل سازی تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه

پارامترهای پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی برای انجام مدل سازی سه بعدی مخزن و پیش بینی سناریوهای تولید برای تصمیم گیری های اقتصادی در خصوص مدیریت یک میدان و یا یک مخزن نقش به سزایی دارد. بنابراین تعیین پارامترهای پتروفیزیکی در میدان هیدروکربوری با استفاده از داده های موجود، از جایگاه ویژه ای در پروژه های اکتشاف و بهره برداری در صنعت نفت برخوردار است. همچنین با توجه به پیچیده بودن سیستم های طبیعی، فهم و درک کامل آن بسیار مشکل می باشد. مدل سازی کوششی برای ساده نمودن این پیچیدگی ها است. مدل سازی مخزن تنها یک علم مهندسی و یا فقط مربوط به زمین شناسی نیست، بلکه یک مدل جامع تلفیقی از مهندسی و زمین شناسی است. برای این منظور استفاده از روش های زمین آماری بهترین گزینه خواهد بود، زیرا علاوه بر تخمین مقدار پارامتر در هر نقطه از فضای مورد نظر با کمترین خطای ممکن، میزان عدم قطعیت یا خطای تخمین را نیز می توان به دست آورد.

صنعت نفت و گاز از صنایعی هستند که علم زمین آمار با سرعت بسیاری در آن همه گیر شده و



رشد سریعی داشته است. یکی از علل این رشد سریع به ماهیت داده‌های مخزن برمی‌گردد. داده‌های پتروفیزیکی مخازن مانند تخلخل و تراوایی داده‌هایی هستند که در فضای مخزن ارتباط و همبستگی فضایی و یا ساختار فضایی نشان می‌دهند که این نتیجه اعمال روش‌های زمین‌آماری بر روی داده‌ها است. از طرف دیگر با توجه به داده‌های کم مخزن در مقیاس با حجم مخزن همواره مهندسان مخازن را در پی یافتن روشی برای تخمین توزیع فضایی پارامترهای پتروفیزیکی در فضای مخزن بوده‌اند [۱۷۳]. در کنار تمام مزایای روش تخمین زمین‌آماری نسبت به روش‌های دیگر این واقعیت به چشم می‌خورد که روش‌های تخمین زمین‌آماری نیز مانند روش‌های دیگر تخمین متکی به نوع میانگین‌گیری هستند. این مهم مهندسان را بر آن داشت که به روش‌های نوین روی آورند. این روش‌ها بیان کمی از توزیع فضایی پارامترهای پتروفیزیکی در یک فضای احتمال‌پذیر دارند. بدین ترتیب که پس از بلوک‌بندی مخزن برای هر بلوک دامنه‌ای از داده‌ها ایجاد و برای هر پارامتر پتروفیزیکی چندین واقعیت محتمل شبیه‌سازی می‌شود [۵، ۱۷۴]. ورود روش‌های زمین‌آمار در عرصه مدل‌سازی مخازن نفتی، تحول ایجاد نموده است. علم زمین‌آمار اولین بار توسط جرج ماترون در سال ۱۹۶۲ میلادی و در مرکز ریاضیات مونولوژی فرانسه مطرح شد [۱۷۵]. اساس کار ایشان مدل‌سازی بر پایه واریوگرام است. مدل‌های بر پایه واریوگرام به دو دسته تقسیم می‌شوند [۱۷۶]: دسته اول، مدل‌های قطعی می‌باشند که روش‌های تخمین نظیر کریجینگ و کریجینگ متوالی و ... را شامل می‌شود. این گونه روش‌های تخمین، زمین‌آماری می‌باشند که به ازای هر واریوگرافی، یک مدل به‌دست می‌آید، به دلیل روش‌های تخمین، به مدل قطعی منتهی می‌شود. دسته دوم، مدل‌های احتمالی نام دارند. اساس این مدل‌ها روش‌های شبیه‌سازی می‌باشد. در روش‌های شبیه‌سازی، با یک واریوگرافی چندین مدل به‌دست می‌آید، بدین دلیل از روش‌های شبیه‌سازی، مدل‌های احتمالی حاصل می‌شود.

امروزه روش‌های زمین‌آماری نوین مانند روش‌های مدل‌سازی سه‌بعدی خواص پتروفیزیکی از طریق زمین‌آمار و در قالب بسته نرم‌افزارهای متنوع مانند نرم‌افزارهای Petrel و RMS در جهت حل مشکل یاد شده و همچنین مطالعه دقیق‌تر مخازن هیدروکربنی ارائه شده‌اند. روش‌های زمین‌آماری برای توصیف

ناهمگنی در مخازنی که مقیاس آنها کوچکتر از فاصله چاهها است، به کار می‌روند. در حال حاضر روش زمین‌آمار یک ابزار قدرتمند در مدل‌سازی است. به طور کلی، زمین‌آمار مطالعه پدیده‌هایی است که در مکان تغییر می‌کنند [۱۰].

#### ۴-۴-۱- مؤلفه‌ها و الگوریتم‌های اساسی در زمین‌آمار

مؤلفه‌ها و الگوریتم‌های اساسی در زمین‌آمار عبارتند از:

الف) آنالیز واریوگرام<sup>۱</sup>: ویژگی‌هایی از تطابق مکانی.

ب) کریجینگ<sup>۲</sup>: کریجینگ متداول‌ترین الگوریتم برای مدل‌سازی ایستایی مخزن است و اساس کار آن بر پایه یک تکنیک درون‌یابی خطی است. در این تکنیک هر نقطه مجهول با استفاده از رابطه یک خطی (رابطه ۴-۱۲)) از نقطه‌های معلوم مجاور تعیین می‌شود. رابطه معرفی شده برای تعیین نقاط معلوم عامل فضا یا به عبارت دیگر، فاصله هر کدام از نقاط معلوم مجاور با نقطه مجهول را به عنوان وزن و میزان تأثیر همان نقطه معلوم بر نقطه مجهول در حال محاسبه در نظر می‌گیرد (۴-۱۲) [۱۱, ۱۷۷].

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^N (\lambda_i Z(X_i)) \quad (4-12)$$

در این رابطه  $Z(X_0)$  مقدار مجهول در نقطه  $X_0$ ،  $\lambda_i$  وزن هر نقطه و  $Z(X_i)$  مقدار معلوم در نقطه  $X_i$  است. این روش محتمل‌ترین مقدار را برای نقاط مجهول محاسبه می‌کند، ولی نمی‌توان با قطعیت گفت که روش کریجینگ توزیع قطعی و کاملاً دقیق متغیرها را نشان می‌دهد.

ج) شبیه‌سازی گوسی متوالی (پی در پی)<sup>۳</sup>: این روش نیز از رایج‌ترین روش در مطالعات زمین‌آمار مخازن است. در این روش برای محاسبه یک نقطه مجهول از تکرار فرآیندهای آماری مشابه استفاده می‌شود و توزیع داده‌ها از نمودارهای توزیع گوسی<sup>۴</sup> پیروی می‌کند. نقاط مجهول با استفاده از توابع تعیین شده گویای نحوه توزیع مقادیر معلوم و محاسبه شده در مجاور نقطه مجهول، محاسبه می‌شود.

<sup>۱</sup> Variogram analysis

<sup>۲</sup> Kriging

<sup>۳</sup> Sequential gaussian simulation

<sup>۴</sup> Guissian distribution

الگوریتم به صورت کاملاً تصادفی یک نقطه را انتخاب و سپس، کل شبکه را به ترتیب و به شکل متوالی شبیه‌سازی می‌کند. مرتبه و نحوه‌ی پیش‌روی الگوریتم در شبیه‌سازی نقاط مجهول به صورت تئوری مشخص نمی‌شود و یک روند متوالی تصادفی در کار است [۱۷۸].

روش شبیه‌سازی گوسی متوالی (SGS) در شبیه‌سازی پارامترهای تخلخل و تراوایی بسیار معمول 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 این مهم توجه داشت که روش SGS دارای مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد [۱۷۹]. که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف) 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 به دست می‌دهد که از این بین می‌توان بهترین حالت که میانگینی از مدل‌های مختلف است را به عنوان مدل نهایی انتخاب کرد.

ب) اعمال ناهمگنی مخزن: روش SGS قادر به ساخت مدل مبتنی بر واقعیت ناهمگنی در مخزن است. ج) در نظر گرفتن داده‌های پیچیده: در این روش می‌توان دامنه وسیعی از داده‌های مختلف مثل داده‌های پتروفیزیکی را برای به دست آوردن مدل بهتر با هم ادغام کند [۱۷۹].

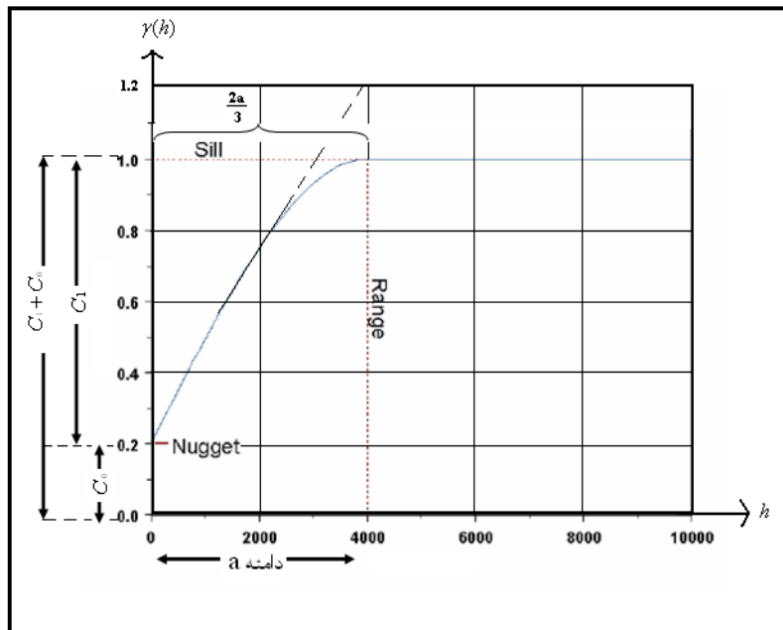
#### ۴-۴-۲- واریوگرام

در ادامه توضیح مختصری در باره روش واریوگرام به عنوان یکی از روش‌های اصلی به کار گرفته شده در این مطالعه ارائه می‌گردد. اگر مقادیر کمیت مورد بررسی بسیار متغیر باشد، استفاده از واریوگرام توصیه می‌شود [۱۸۰]. برای بسیاری از مدل‌سازی‌ها، مدل واریوگرام مانند (شکل ۴-۲۲)، از مقداری مخالف صفر شروع شده و به دامنه‌ای به نام دامنه تأثیر<sup>۱</sup> (a) افزایش می‌یابد و در نهایت به مقدار ثابتی

---

<sup>۱</sup> Range

به نام سقف یا سیل<sup>۱</sup> می‌رسد.



شکل ۴-۲۲) مثالی از یک واریوگرام مورد استفاده در این پژوهش

محدوده ساختار داده‌ها در فاصله دامنه تأثیر آن‌ها است، یعنی دو داده که به فاصله بین صفر تا  $a$  از یکدیگر قرار داشته باشند، دارای ارتباط فضایی بوده و کوواریانس آنها صفر نیست، ولی دو نمونه که به فاصله بزرگتری از دامنه تأثیر قرار دارند، مقدار داده‌های نظیرشان مستقل از یکدیگر بوده و کوواریانس آن‌ها صفر می‌باشد. از نظر تئوری، مقدار واریوگرام به ازای فاصله صفر بین دو داده باید برابر صفر شود. زیرا دو نمونه که بر هم منطبق باشند مقدار کمیت مورد نظر در آن‌ها نباید اختلافی داشته باشد و در نتیجه پراش بین داده‌های آن‌ها صفر خواهد بود. در عمل معمولاً واریوگرام تجربی<sup>۲</sup> از صفر شروع نمی‌شود و مقدار واریوگرام به ازای  $h=0$  برابر عددی مانند  $N$  است که به آن اثر قطعه‌ای<sup>۳</sup> گفته می‌شود. [۱۸۱].

پس از محاسبه واریوگرام تجربی، باید به واریوگرام حاصل یک مدل تئوریک برازش شود. در واقع باید مدل واریوگرام و پارامترهای آن بر اساس واریوگرام تجربی تخمین زده شوند. مدل‌های تئوریک مختلفی برای برازش به واریوگرام تجربی وجود دارد. یکی از معمول‌ترین مدل‌ها، مدل کروی است که

<sup>۱</sup> Sill

<sup>۲</sup> Experimental variogram

<sup>۳</sup> Nugget effect

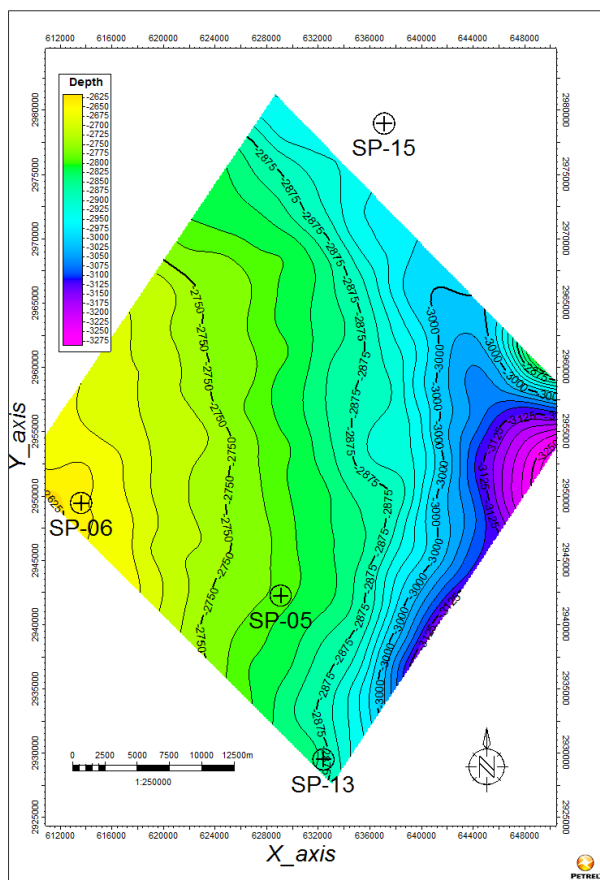
مطابق معادلات (۴-۱۳) و (۴-۱۴) تعریف می‌شود [۱۸۲].

$$\gamma(h) = C_1 \left( \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \frac{h_3}{a_3} \right) + C_0 \quad h \leq a \quad (۴-۱۳)$$

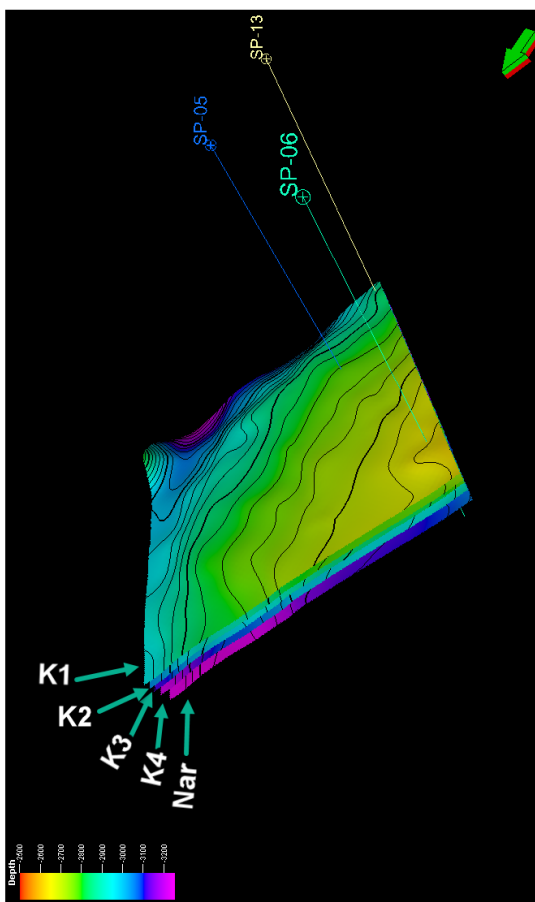
$$\gamma(h) = C_1 + C_0 \quad h > a \quad (۴-۱۴)$$

که در آن  $C_0$  اثر قطعه‌ای،  $C_1$  فاصله بین اثر قطعه‌ای و سقف واریوگرام و  $a$  دامنه تأثیر واریوگرام است. مقدار  $C_1+C_0$ ، کل پراش داده را معرفی می‌کند. از خصوصیات این مدل این است که قسمت ابتدای منحنی آن دارای تغییرات خطی است. اگر بخش خطی آن را ادامه دهیم، سقف واریوگرام را در نقطه‌ای به طول  $\frac{2a}{3}$  (تصویر نقطه روی محور  $h$ ) قطع می‌کند (شکل ۴-۲۲). اگر در محاسبه واریوگرام به ازای هر گام معینی بردار  $h$  نظیر آن گام در فضا در هر جهتی بتواند قرار گیرد، واریوگرام حاصل را، واریوگرام غیر جهتی می‌نامند. اگر در محاسبه واریوگرام فقط از زوج نقاطی که بردار  $h$  آنها (برداری که دو نقطه را به هم وصل می‌کند) در امتداد معین معلومی قرار داشته باشد استفاده شود، آن واریوگرام را واریوگرام جهتی می‌نامند [۵۰].

در مطالعه حاضر با استفاده از روش‌های زمین‌آماری، به مدل‌سازی سه‌بعدی پارامترهای پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی به روش شبیه‌سازی گوسی متوالی در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. با ورود اطلاعات مربوط به ۳ حلقه چاه (SP\_05، SP\_06 و SP\_13) به نرم‌افزار Petrel که دارای اطلاعات تخلخل و تراوایی بودند، در مرحله اول و با توجه به موقعیت چاه‌ها، محدوده‌ای برای میدان تحت مطالعه تعریف شده است. همچنین با استفاده از نقشه دیجیتالی میدان (UGC)، سطوح مخزنی نیز تعریف شدند (شکل ۴-۲۳).



ب



الف

شکل ۴-۲۳) نقشه هم‌تراز عمقی (UGC) از الف) سازندهای کل میدان و ب) سرسازند کنگان به همراه موقعیت

چاه‌های مورد مطالعه بر روی آنها

#### ۴-۵- مراحل مدل‌سازی تخلخل و تراوایی

در این قسمت به اختصار مراحل اصلی و مهم مدل‌سازی پارامترهای پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی در مخزن مورد مطالعه (چهار زون کنگان بترتیب به نام‌های K<sub>1</sub> Kangan, K<sub>2</sub> Kangan, K<sub>3</sub> Dalan و Upper K<sub>4</sub>) و در نرم‌افزار Petrel به اختصار ارائه شده است.

#### ۴-۵-۱- آماده‌سازی داده‌ها

اطلاعات پتروفیزیکی مربوط به چاه‌های SP\_05, SP\_06 و SP\_13 از مخزن میدان مورد مطالعه در دسترس می‌باشد. از آنجایی که هدف اصلی این پژوهش، مدل‌سازی تغییرات فضایی تخلخل و تراوایی

است، در نتیجه نیاز است که در مرحله اول قبل از بارگذاری داده‌ها، داده‌های تخلخل و تراوایی موجود در چاه‌های مغزه‌دار را به سایر چاه‌ها تعمیم داد. در مرحله آماده سازی داده‌ها، ابتدا می‌بایست داده‌های Null (مقادیر ۹۹۹/۲۵- در داده‌های رقومی نمودارهای چاه‌پیمایی)، Log Tail (مقادیر تکرار شده) و Bad Hole Flag (اینتروال‌هایی که اختلاف مقادیر نمودار کالیپر و قطر سرمته در آنها بیش از ۱/۵ اینچ است، که این فواصل نشان‌دهنده نواحی ریزشی در دیواره چاه می‌باشند) حذف گردد. (لازم به ذکر است که مرحله آماده‌سازی داده‌ها بین تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی و مدل‌سازی تخلخل و تراوایی مشترک است).

#### ۴-۵-۲- بارگذاری داده‌ها

بارگذاری داده‌ها نخستین گام در ایجاد یک مدل سه‌بعدی از مخزن می‌باشد. این داده‌ها عبارتند از: اطلاعات مربوط به چاه‌های مخزن شامل سربرگ چاه‌ها<sup>۱</sup>، داده‌های مسیر و انحراف چاه‌ها<sup>۲</sup>، نگارهای پتروفیزیکی<sup>۳</sup>، نقشه‌های هم‌تراز عمقی (UGC) مخزن شامل  $K_1, K_2, K_3, K_4$  و نار و داده‌های مربوط به سرسازندها<sup>۴</sup>.

#### ۴-۵-۳- مدل‌سازی ساختاری

مدل ساختاری<sup>۵</sup> در واقع اسکلت زمین‌شناسی مخزن است که نقش حیاتی در توصیف مخزن ایفا می‌کند [۱۸۳]. در حقیقت مدل‌سازی ساختاری مخزن، ساخت چهارچوب مخزن و شبکه‌بندی آن است به طوری که کلیه اطلاعات و داده‌های ساختاری به صورت یک مدل سه‌بعدی مشاهده می‌شود. مراحل اصلی مدل‌سازی ساختاری انجام شده در این پژوهش شامل موارد ذیل می‌باشد: الف) تعیین محدوده پروژه، ب) شبکه‌بندی مخزن، ج) ساخت افق‌های زمین‌شناسی، د) تعیین زون‌های مخزنی، ه) لایه‌بندی. لازم به ذکر است که در اجرای مدل‌سازی ساختاری و پتروفیزیکی، تقسیم‌بندی مخزن به سلول‌های کوچکتر الزامی است، یک مدل شبکه‌بندی مخزن شامل سلول‌های سه‌بعدی است که هر یک از این

<sup>۱</sup> Well head

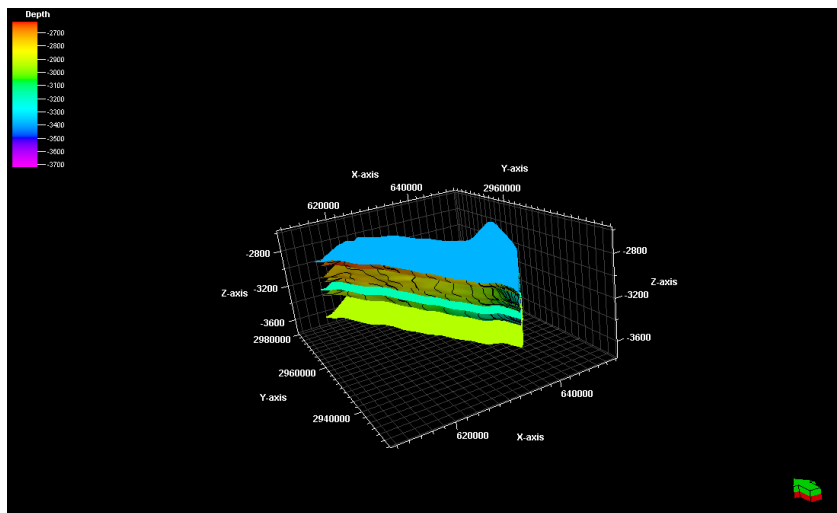
<sup>۲</sup> Well log

<sup>۵</sup> Structure modelig

<sup>۲</sup> Well path deviation

<sup>۴</sup> Well top

سلول‌ها در برگیرنده میانگینی از کلیه پارامترهای پتروفیزیکی می‌باشد [۱۸۴]. در این مرحله مخزن به یک شبکه سلول‌بندی شده تقسیم می‌شود که تمامی خواص هر سلول مانند خواص پتروفیزیکی و لیتولوژیکی در تمام حجم آن یکسان است و با توجه به فاصله شبکه‌ها از یکدیگر و میزان داده‌ها، می‌توان خواص مشابه موجود در سلول‌های فاقد اطلاعات را تخمین زد. بدیهی که هر چه میزان این اطلاعات بیشتر باشد، تخمین‌ها به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. ابعاد سلول‌های این شبکه در راستای X و Y میدان ۱۰۰\*۱۰۰ متر در نظر گرفته شد و بعد از ساخت افق‌ها و در زمان لایه‌بندی این بلوک‌ها در جهت Z و عمود، در زون‌های مخزنی با فواصل یک متری تفکیک شدند (شکل ۴-۲۴).



شکل ۴-۲۴) نمایی از شبکه سلولی ایجاد شده به همراه افق‌های ساخته شده

#### ۴-۵-۴- درشت‌نمایی<sup>۱</sup>

در این مرحله، اطلاعات حاصل از نگارهای پتروفیزیکی با درشت‌نمایی، آماده تبدیل به یک مدل سه‌بعدی می‌گردند. درشت‌نمایی، عمل نسبت دادن مقادیر ثبت‌شده نگارها به سلول‌هایی از شبکه سه‌بعدی است که اطلاعات لاگ آنها در دسترس است [۱۸۵]. از آنجایی که قرائت‌های لاگ در فواصل ۱۵ سانتی‌متری صورت می‌پذیرد، لذا درشت‌نمایی آنها برای توزیع هر کدام در هر یک از سلول‌ها به منظور استفاده در مدل‌سازی و تعمیم این خواص به کل شبکه سلول‌بندی شده، لازم می‌باشد. نظر به

<sup>۱</sup> Scale up

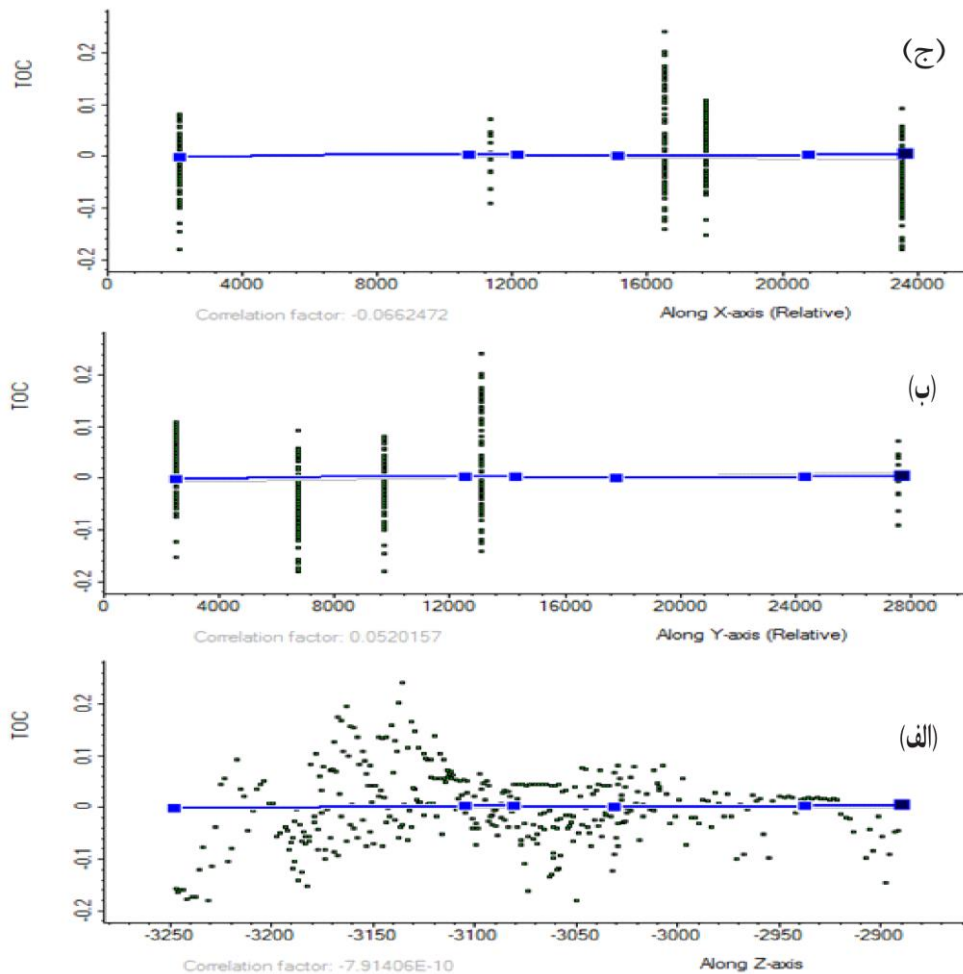


اینکه هر سلول فقط یک مقدار می‌تواند داشته باشد، مقادیر لاگ باید میانگین‌گیری شود. تکنیک‌های زیادی جهت میانگین‌گیری ارائه شده است [۱۸۵]، که بهترین آنها با توجه به ایستا بودن بیشتر پارامترهای پتروفیزیکی، روش میانگین‌گیری عددی می‌باشد [۱۸۶]. این اطلاعات درشت‌نما شده برای انجام واریوگرافی از نظر داشتن دو ویژگی توزیع نرمال و حذف روندهای احتمالی در داده‌ها، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۵-۵- نرمال‌سازی و حذف روند داده‌ها

بعد از درشت‌نمایی داده‌ها دو شرط اساسی در محاسبات زمین‌آماری پارامترهای پتروفیزیکی این است که، اولاً داده‌ها دارای توزیع نرمال بوده و ثانیاً روندی در آنها موجود نباشد. در توزیع نرمال، داده‌ها دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک بوده و نمودار توزیع آنها به صورت زنگوله‌ای می‌باشد. شکل این نمودارها به گونه‌ای است که توزیع داده‌ها در دو طرف این منحنی‌ها به یک اندازه است و بیشترین داده‌ها در مرکز آن می‌باشند.

همچنین حذف روند داده‌ها طی سه مرحله صورت می‌گیرد: ابتدا حذف روند در جهت ضخامت قائم چاه به منظور حذف پیوستگی لیتولوژیکی داده‌ها، سپس حذف روند در جهت عمود بر لایه‌بندی به منظور حذف روند ناشی از محیط رسوبی و نهایتاً حذف روند کلی میدان در جهت عمود بر محور تاقدیس به منظور حذف روند ناشی از تغییرات ناحیه‌ای (شکل ۴-۲۵) [۱۸۶].



شکل ۴-۲۵) چگونگی حذف روند داده‌ها در الف) در جهت ضخامت چاه ب) در جهت عمود بر لایه‌بندی ج) در جهت کلی میدان عمود بر محور ناقدیس، برای مدل‌سازی داده‌های تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه

#### ۴-۵-۶- تعیین ساختار فضایی برای داده‌ها

روش تخمین زمین‌آماري پارامترهای پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی شامل دو مرحله می‌باشد؛ مرحله اول شامل شناخت و مدل‌سازی ساختار فضایی پارامترهای پتروفیزیکی مورد تخمین است. در این مرحله مفهوم پیوستگی، همگنی، ناهمگنی، و نهایتاً ساختار فضایی پارامترهای پتروفیزیکی مورد تخمین به وسیله واریوگرام بررسی می‌شود. در مرحله دوم، تخمین یا مدل‌سازی آماری پارامترهای پتروفیزیکی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري مانند روش کریجینگ، SGS و سایر روش‌ها که به مشخصات واریوگرام برآزش شده در مرحله اول وابسته است و چنانچه در انتخاب مدل واریوگرام اشتباهی صورت گیرد در کلیه مراحل بعدی منعکس می‌گردد [۱۸۲]. واریوگرام، پایه بسیاری از محاسبات

زمین‌آماری است و مهم‌ترین ابزار بروز همبستگی فضایی بین داده‌ها است. در حقیقت واریوگرام، تغییرپذیری داده‌ها را با افزایش فاصله نشان می‌دهد که یک محور آن تغییرپذیری (واریانس) و محور دیگر فاصله می‌باشد. به منظور تعیین ساختارهای فضایی پارامترهای پتروفیزیکی مورد بررسی در مخزن، برای هر یک از زون‌های مخزنی و هر کدام از پارامترهای مورد مطالعه در جهت‌های اصلی<sup>۱</sup>، فرعی<sup>۲</sup> و عمقی<sup>۳</sup> واریوگرام ترسیم شده است (شکل ۴-۲۶ و شکل ۴-۲۷). همان‌طور که ملاحظه می‌شود تغییرات تراوایی برای زون  $K_1$  شدیدتر از تغییرات تخلخل است اما برای زون  $K_2$  تغییرات تخلخل شدیدتر و تراوایی افزایش و کاهش یافته است. لازم به یادآوری است که پس از محاسبه واریوگرام تجربی باید به واریوگرام حاصل از یک مدل تئوریک برازش شود. مدل‌های تئوریک مختلفی برای برازش به واریوگرام تجربی وجود دارد که رایج‌ترین این مدل‌ها، مدل کروی<sup>۴</sup> است که در این پژوهش از این مدل استفاده شده است.

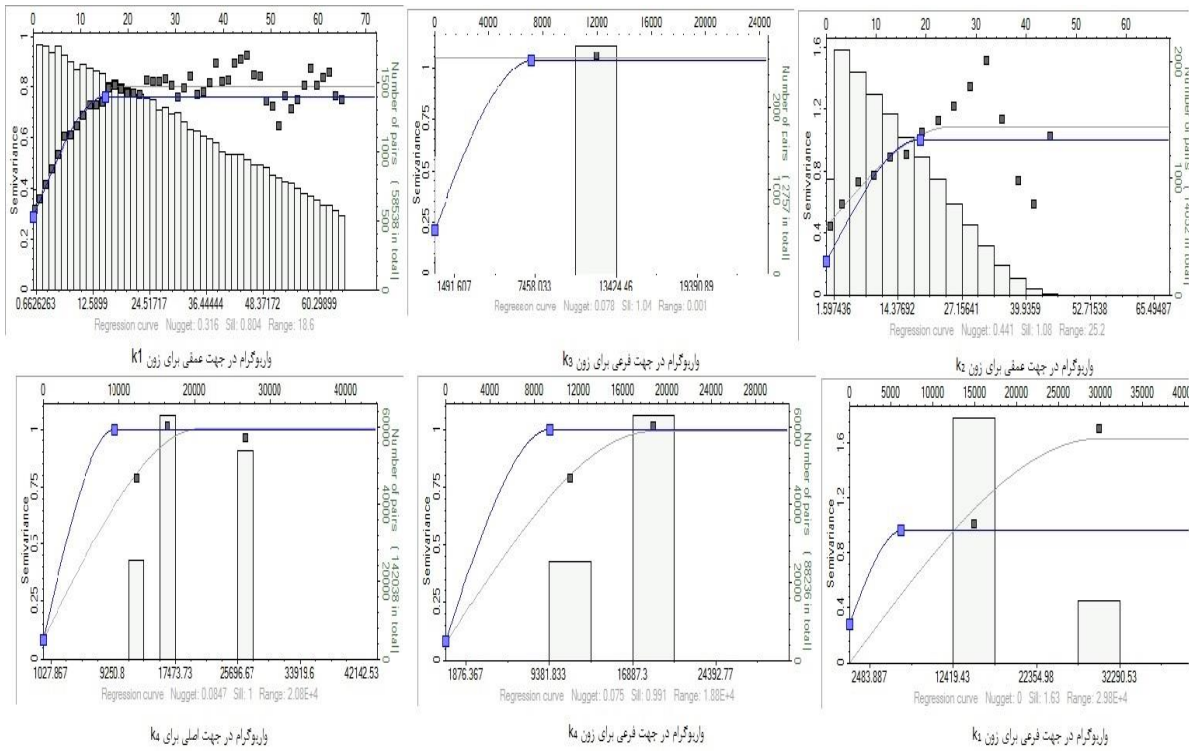
---

<sup>۱</sup> Major

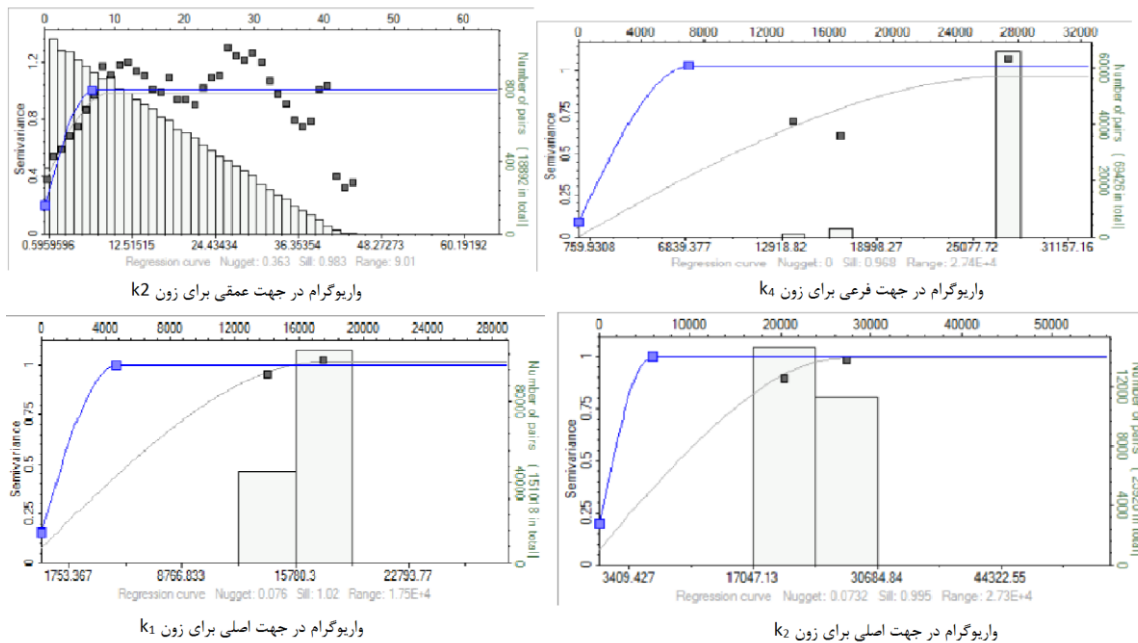
<sup>۲</sup> Minor

<sup>۳</sup> Vertical

<sup>۴</sup> Spherical



شکل ۴-۲۶) نمونه‌ای از واریوگرام‌های به کار رفته در این پژوهش برای پارامتر تراوی



شکل ۴-۲۷) نمونه‌ای از واریوگرام‌های به کار رفته در این پژوهش برای پارامتر تخلخل

#### ۴-۵-۷- مدل سازی همزمان خواص پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) با استفاده از روش های

شبیه سازی گوسی متوالی (پی در پی) (SGS)

در این مرحله با استفاده از روش های شبیه سازی SGS مدل سه بعدی تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه تهیه شده است. روش شبیه سازی SGS یکی از روش های شبیه سازی تصادفی می باشد که از قوانین زمین آمار برای پیش بینی و شبیه سازی پارامترهای پتروفیزیکی مخزنی در سه بعد استفاده می کند.

مراحل انجام الگوریتم SGS به صورت زیر بیان می گردد:

۱- انتقال داده ها به یک توزیع استاندارد نرمال (یعنی تمام مراحل الگوریتم در یک فضای نرمال انجام شود).

۲- رسم واریوگرام با استفاده از داده های نرمال استاندارد.

۳- در هر موقعیت  $u$ ، عملیات کریجینگ انجام شده و یک مقدار تخمین کریجینگ . واریانس کریجینگ مربوط به آن به دست می آید (۴-۱۵):

$$y^*(u) = \sum_{B=1}^n \lambda_B \cdot y(u) \quad (۱۵-۴)$$

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

۵- اضافه کردن باقیمانده به تخمین کریجینگ و دستیابی به یک مقدار شبیه سازی شده (۴-۱۶).

$$y_s(u) = y^*(u) + R(u) \quad (۱۶-۴)$$

مقدار شبیه سازی شده برابر است با  $y_s(u)$ .

۶- مقدار  $y_s(u)$  را به مجموعه داده ها اضافه کنید تا مطمئن شوید که کواریانس میان این مقادیر و تمام مقادیری که در ادامه پیش بینی (شبیه سازی) خواهد شد صحیح باشد. این ایده کلید شبیه سازی گوسی پی در پی است. یعنی با استفاده از مقادیر شبیه سازی شده قبلی به عنوان داده تا کواریانس در

میان تمام مقادیر شبیه‌سازی شده قابل دوباره‌سازی باشد.

۷- پس از تولید مدل، تبدیل عکس نرمال تمام مقادیر داده‌ها و مقادیر شبیه‌سازی شده (یعنی

برگشت از توزیع نرمال به شکل توزیع اولیه)

۸- ایجاد هر تحقق با تکرار عملیات شبیه‌سازی شده و تغییر مقدار عددی بسیار بزرگ، تفاوت در

مقدار این عدد سبب ایجاد تفاوت میان مجموعه‌های هر بار شبیه‌سازی می‌شود، زیرا در هر بار گشتن،

نقاط متفاوت باقی‌مانده‌ها و مقادیر شبیه‌سازی شده در عملیات شرکت می‌کنند [۱۸].

#### ۴-۶- نتایج و تفسیر مدل‌های سه‌بعدی تخلخل و تراوایی

با انجام مراحل ذکر شده مدل‌های سه‌بعدی تخلخل و تراوایی در میدان هیدروکربنی مورد مطالعه

با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی پی در پی تهیه شد (شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹). نتایج حاصل از

مدل‌سازی زمین‌آماری پارامترهای تخلخل و تراوایی در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد که میانگین

تخلخل و تراوایی در زون‌های  $K_2$  و  $K_4$  بالا است و میانگین تخلخل در هر دو زون فوق حدود ۱۰ درصد

و میانگین تراوایی به ترتیب در زون  $K_2$  و  $K_4$  حدود ۴۶ و ۲۴ میلی‌داری است (لذا به نظر می‌رسد که

دو زون فوق کیفیت مخزنی بالایی داشته باشند). کمترین میزان تخلخل و تراوایی مربوط به زون  $K_3$

که به ترتیب ۴ درصد و ۱۱ میلی‌داری است که دارای کمترین کیفیت مخزنی است. همچنین میزان

تخلخل و تراوایی در زون  $K_1$  به ترتیب ۵ درصد و ۱۷ میلی‌داری است و در نهایت میانگین تخلخل و

تراوایی در کل گستره مخزن میدان مورد مطالعه به ترتیب ۷ درصد و ۲۴/۵ میلی‌داری می‌باشد. در

نهایت به منظور ارزیابی میزان دقت مدل‌های ایجاد شده، نتایج مدل‌ها را با داده‌های موجود در چاه‌ها

مقایسه شد (صحت‌سنجی) که این نتایج حاکی از آن است که در اکثر مدل‌های ایجاد شده تطابق خوبی

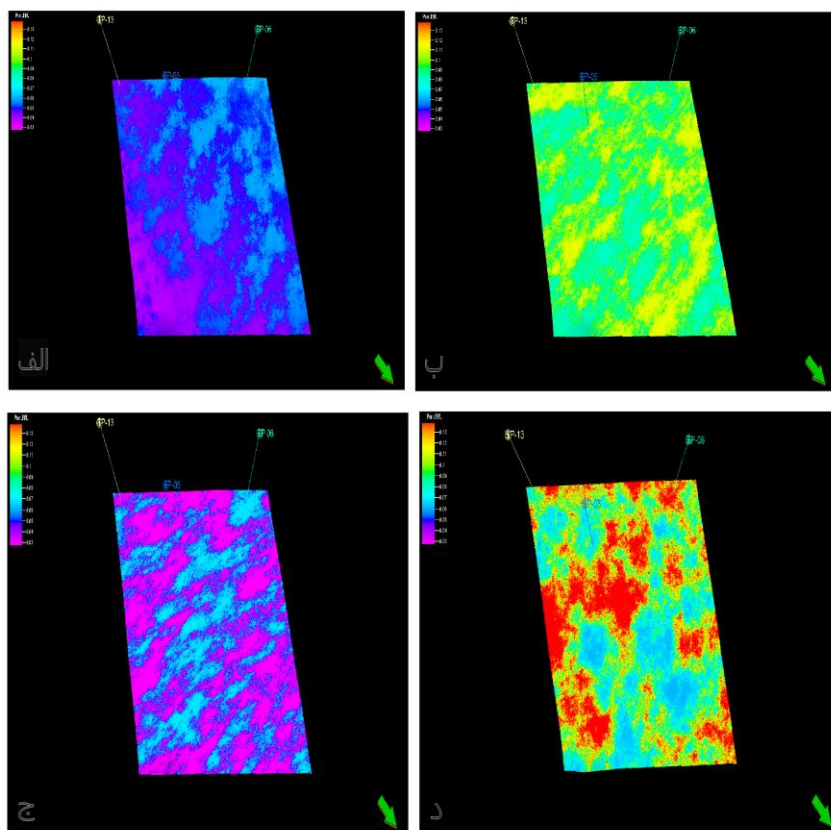
بین نتایج مدل‌ها و داده‌های واقعی برقرار می‌باشد (شکل ۴-۳۰). همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی

پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد که در این مخزن، ارتباط مستحکمی بین تخلخل و تراوایی برقرار

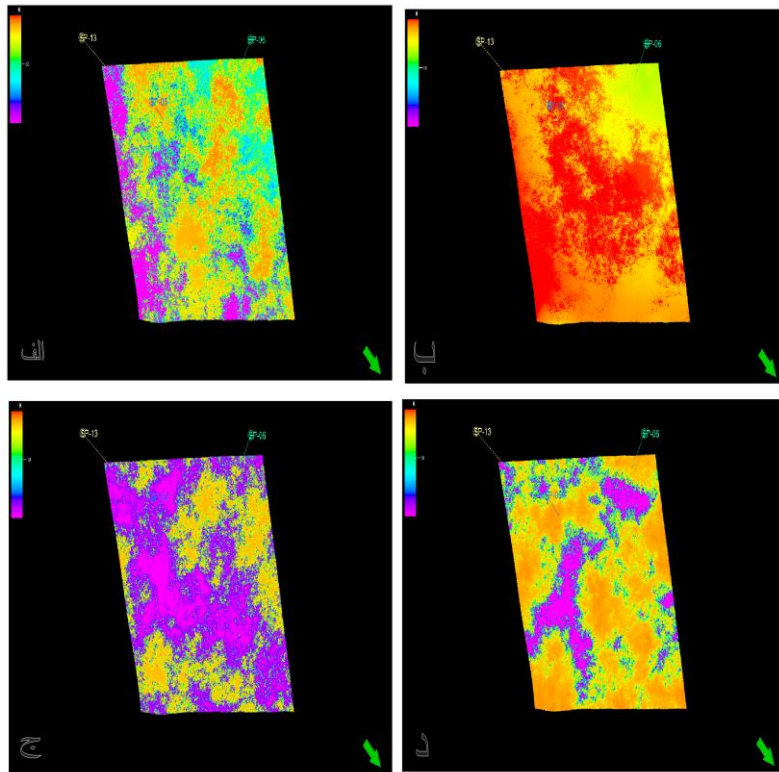
نیست. در نهایت نتایج حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل و تراوایی در عمق چاه‌های مخزن مورد

مطالعه قابل اعتماد است ولی نتایج در افق‌های مخزنی به دلیل کمبود چاه‌ها قابل اعتماد نیست، هر

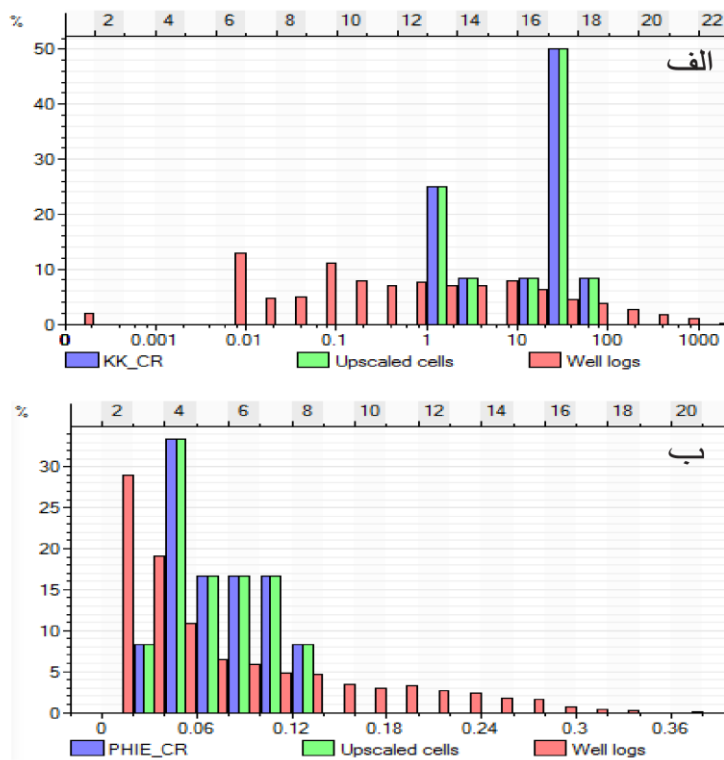
چند مدل سازی سه بعدی تخلخل و تراوایی با تعداد چاه کم نظیر پیامنی (۱۳۹۲)، [۱۹] با چهار چاه، سلیمی دلشاد (۱۳۹۲)، [۱۸۷] با پنج چاه و فرد لزرجانی (۱۳۹۵)، [۱۸۸] با سه چاه، انجام شده است و نتایج قابل قبولی را نیز به دست آورده اند.



شکل ۴-۲۸) مدل سه بعدی تخلخل در میدان مورد مطالعه برای زون های: الف)  $K_1$ ، ب)  $K_2$ ، ج)  $K_3$  و د)  $K_4$



شکل ۴-۲۹) مدل سه بعدی تراوایی در میدان مورد مطالعه برای زون‌های: الف)  $K_1$ ، ب)  $K_2$ ، ج)  $K_3$  و د)  $K_4$



شکل ۴-۳۰) الف) نتیجه صحت‌سنجی مدل تراوایی و ب) نتیجه صحت‌سنجی مدل تخلخل



#### ۴-۷- جمع‌بندی

در این فصل به بررسی رابطه تخلخل - تراوایی در چاه SP\_15 میدان مورد مطالعه پرداخته شد. از آن جایی که رابطه خطی ایجاد شده بین تخلخل و تراوایی ضریب تعیین پایینی را نشان داد ( $R^2=0.4492$ ) به بررسی رابطه تخلخل - تراوایی با استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی پرداخته شد و در این بین تمامی روش‌ها به جزء روش رخساره‌های الکتریکی ضرایب همبستگی بالایی را نشان دادند. در انتهای این بخش پایان‌نامه هم به مدل‌سازی تخلخل و تراوایی با استفاده از علم زمین‌آمار در بخش مخزنی میدان مورد مطالعه پرداخته شد و نتیجه به دست آمده رابطه نسبتاً ضعیفی را بین تخلخل و تراوایی در چاه‌های میدان مورد مطالعه نشان داد.



# فصل پنجم

## نتیجہ و مشاہدات

## ۵-۱- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از این پایان‌نامه را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱- واحدهای جریان هیدرولیکی در یک میدان هیدروکربوری در جنوب ایران، با استفاده از روش‌های رخساره‌های الکتریکی، شاخص زون جریان، روش DRT، روش هیستوگرام، روش مجموع مربعات خطا، روش خوشه‌بندی K-means و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی تعیین شد و سپس رابطه تخلخل - تراوایی در میدان مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از تعیین تعداد واحدهای هیدرولیکی به‌دست آمده در مخزن مورد مطالعه بر اساس روش‌های مورد استفاده در این تحقیق، نشان‌دهنده متفاوت بودن تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی در این روش‌ها می‌باشد ولی در کل برای سادگی تفسیر ۷ نوع واحد جریان هیدرولیکی در نظر گرفته شد. در روش مجموع مربعات خطا (SSE)، به دلیل این‌که مستقل از کاربرد عمل می‌کند و همچنین به دلیل افزایش همبستگی بین داده‌ها با افزایش تعداد گروه‌های سنگی، میزان خطا کاهش می‌یابد و ابزار مناسب‌تری برای تعیین تعداد واحدهای جریان می‌باشد. روش DRT، به دلیل قرار دادن داده‌ها در دسته‌های مجزا و عملکرد مناسب آن، روش مؤثری برای تعیین واحدهای جریان محسوب می‌شود. در بین روش‌های تعیین واحد جریان، روش هیستوگرام دارای خطای بالایی می‌باشد و روش شاخص زون جریان، روش DRT، روش خوشه‌بندی K-means و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی و روش شاخص کیفیت مخزن ضریب همبستگی بالایی را بین تخلخل و تراوایی در مخزن مورد مطالعه نشان می‌دهند. واحدهای جریان به‌دست آمده از روش رخساره‌های الکتریکی بیانگر این موضوع است که در هر واحد جریان به ازای یک مقدار مشخص تراوایی، تخلخل افزایش می‌یابد. در واقع این واحدها تغییرات تخلخل به ازای یک مقدار مشخص تراوایی را بررسی می‌کنند. در این روش با وجود این‌که برای چاه مورد مطالعه، تعداد ۱۳ و ۵ رخساره الکتریکی و یا به عبارت دیگر ۱۳ و ۵ واحد جریان در نظر گرفته شد و با توجه به این‌که در این روش علاوه بر نگار تخلخل و تراوایی، نگارهای دیگری چون نگار صوتی، اشعه گاما، تخلخل نوترون و چگالی نیز در خوشه‌بندی تأثیرگذار بوده‌اند، پس این عدم تطابق بین تعداد رخساره‌های الکتریکی و

تعداد واحدهای جریان در نمودارهای تخلخل و تراوایی در چاه مورد مطالعه قابل توجیه است.

۲- نتایج حاصل از مدل‌سازی زمین‌آماری پارامتر تخلخل در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد که

میانگین تخلخل در زون  $K_1$ ، ۵ درصد در زون  $K_2$ ، ۱۰ درصد در زون  $K_3$ ، ۴ درصد و در زون  $K_4$ ، ۱۰ درصد و میانگین تخلخل در کل گستره مخزن ۷ درصد می‌باشد.

۳- مدل‌های تخلخل در زون‌های مختلف نشان می‌دهد که تخلخل در سرتاسر میدان مورد مطالعه

از نظم خاصی پیروی نمی‌کند و از زونی به زون دیگر تغییر پیدا می‌کند.

۴- در کل نتایج حاصل از مدل‌سازی زمین‌آماری پارامتر تراوایی در میدان مورد مطالعه نشان

می‌دهد که میانگین تراوایی در زون  $K_1$ ، ۱۷ میلی‌داری، در زون  $K_2$ ، ۴۶ میلی‌داری، در زون  $K_3$ ، ۱۱ میلی‌داری و در زون  $K_4$ ، ۲۴ میلی‌داری است و در نهایت در کل گستره مخزن میدان مورد مطالعه برابر با ۲۴/۵ میلی‌داری می‌باشد و بر مبنای میزان تراوایی این مخزن در گروه‌های سنگی دارای کیفیت مخزنی متوسط تا خوب می‌باشد.

۵- نتایج حاصل از ارزیابی پتروفیزیکی و مدل‌سازی زمین‌آماری پارامترهای تخلخل و تراوایی در

میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد که ارتباط تخلخل و تراوایی در تمام زون‌های مخزنی این میدان ارتباط نسبتاً ضعیفی 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 مورد مطالعه می‌باشد.

۶- 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 خوبی بین تخلخل و تراوایی در مخزن مورد مطالعه به دست نیامد. این امر می‌تواند بیان‌گر درجه ناهمگنی بالای سازندهای تشکیل‌دهنده مخزن مورد مطالعه باشد که در اثر تغییرپذیری گسترده خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی آن

منطقه به وجود آمده است.

## ۵-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر، می توان پیشنهادهای زیر را برای ادامه این تحقیق توصیه نمود:

۱- با توجه به این که تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی در میدان مورد مطالعه به دلیل کمبود داده تخلخل و تراوایی مغزه فقط در یک چاه انجام شد، لذا توصیه می شود تعیین تعداد واحدهای جریان با تعداد داده های بیشتر و نیز چاه های بیشتر در منطقه مورد مطالعه انجام شود.

۲- در این تحقیق، مدل سازی تخلخل و تراوایی و ارائه مدل تخلخل - تراوایی بر اساس یک سری داده های محدود و نسبتاً کم پتروفیزیکی و بدون داده های لرزه نگاری در یکی از میادین هیدروکربوری جنوب ایران انجام شده است، و بنابراین نتایج به دست آمده از دقت پایینی برخوردارند. به همین دلیل توصیه می شود از داده های لرزه نگاری و پتروفیزیکی بیشتری برای مدل سازی تخلخل و تراوایی استفاده گردد، مخصوصاً این که چاه های بیشتری در میدان مورد مطالعه وجود دارد و در صورت لحاظ نمودن نگارهای پتروفیزیکی حاصل از آن چاه ها می توان به نتایج بهتری در میدان مورد مطالعه دست یافت.

۳- از آن جایی که پارامتر تراوایی ارتباط مستقیمی با میزان تولید هیدروکربور دارد و حساس ترین پارامتر پتروفیزیکی است، به منظور به دست آوردن مقدار دقیق آن و کاهش خطا، بهتر است با استفاده از نگار تشدید مغناطیس هسته ای (NMR) نیز برآورد گردد و نتایج آن با نتایج تعیین تراوایی از مغزه ها مقایسه گردد.

۴- همچنین در صورت وجود داده های چاه آزمایی مانند داده های حاصل از آزمایش اندازه گیری فشار با زمان در چاه ها و نیز با در نظر گرفتن نتایج تعیین تراوایی حاصل از آنالیز مغزه ها، تعیین تراوایی به منظور بهره برداری و تولید و همچنین به منظور تعیین محل حفر چاه های تولیدی و ارزیابی های اقتصادی با دقت مطمئن تر و بالاتری انجام شود.

منابع و مأخذ

1. Stewart R. R. and Fraquelli H. A., (2012) "Estimating Reservoir Oil Volume and its Likelihood from 3C-3D Seismic Data, Well Logs, and Geostatistics" **Geoconvention: vision**.
۲. رحیمی دلخانی ا.، و کشاورز فرج‌خواه ن.، (۱۳۹۲)، "ارزیابی روش‌های تخمین تخلخل با تلفیق داده‌های چاه‌پیمایی و لرزه‌نگاری"، **نهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن ایران**، بیرجند، دانشگاه بیرجند.
3. Tiab D. and Donaldson E. C., (2015), "**Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties**" Gulf professional publishing.
۴. اکور ای. جی. پیترز (۱۳۹۱)، **پتروفیزیک (خواص فیزیکی سنگ‌های مخزن)**، شبانی‌نژاد، م.، باقری‌پور حقیقی، م.، سینایی، م.، و کلانتری اصل، ع.، چاپ اول، انتشارات راه نوین.
5. Deutsch C. V. and Journel A. G., (1992), "**Gslb: Geostatistical Software Library and User's Guide**" Oxford University Press.
6. Lopez A. G. T. Marchesi V. R. Domingues D. L. P. da Fontoura, S. A. B. Gonçalves C. J. and Alcure M. F., (2014), "3D Geological Modeling of Subsurface for Drilling Purposes Using Neural Networks and Fuzzy Logic" **SBMR 2014- ISRM Specialized Conference 09-13 September**, pp pp9.
۷. برقی ع.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه ارشد، "پیش‌بینی نفوذپذیری با استفاده از رگرسیون چندمتغیره (MIRA) با داده‌های لاگ در یکی از میادین نفتی جنوب ایران"، دانشکده مهندسی نفت، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی.
۸. موسوی ض. ا.، (۱۳۹۱)، "تخمین تخلخل نگار NMR از نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از رگرسیون خطی و شبکه عصبی مصنوعی در میدان گازی پارس جنوبی"، **ماهنامه اکتشاف و تولید**، شماره ۸۸، ص ۷۲-۷۷.
9. Journel A. G. and Gomez H. J., (1989), "Stochastic imaging of the Wilmington Clastic Sequence: Soc" **Petr Eng, Am Inst Min, Metall Petr Eng, SPE** , 19857.
10. Deutsch C. V., (2002), "Geostatistical reservoir modeling: " **Oxford University Press, New York, 376 p**.
11. Doyen P. M., (1988), "Permeability, conductivity, and pore geometry of sandstone" **Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 93, B7**, pp 7729-40.
12. Dubrule A., (1998), "Geostatistics in the Petroleum Geology, Computer methods in the Geoscines" **AAPG Continuing Education Course Notes Series, 38** .
13. Hohn M. E., (1998), "Geostatistics in the Petroleum Geology, Computer methods in the Geoscines" **Van nostrand riahold**.
14. Srisuriyon J. and Pumjan S., (2007), "**Geostatistical to petroleum Reservoir Characterization**".
15. Wang L. Wong P. and Shibli S., (1998), "editors. Modelling porosity distribution in the A'nan Oilfield: Use of geological quantification, neural networks and geostatistics", **SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China: Society of Petroleum Engineers**.
16. Zhao S. Zhou Y., Wang M. Xin X. and Chen F., (2014), "Thickness, porosity, and



permeability prediction: comparative studies and application of the geostatistical modeling in an Oil field" **Environmental Systems Research**, **3**, **1**, pp 7.

17. Zhang Y., Xu Q., Guo Y., Li S., Ma J., and Zhang F., (2015), "Seismic Reservoir Characterization of the Low Porosity and Permeability Reservoir—A Case Study outside Daqing Oilfield, China", **International Journal of Engineering Practical Research**.

۱۸. مهدوی ر.، (۱۳۸۵)، پایان‌نامه ارشد، "مدل‌سازی آماری خواص پتروفیزیکی تخلخل و تراوایی یکی از میدان‌های خلیج فارس با استفاده از شبیه‌سازی به روش گوسی پی در پی"، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تهران، ۷۷ صفحه.

۱۹. پیامنی ک.، کدخدایی ع.، حمدی ب.، حسنی‌گیو م.، و رشیدی نژاد ا.، (۱۳۹۲)، "مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل و تراوایی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري در یکی از میادین گازی در خلیج فارس"، **مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته**، اهواز، شماره ۹، ص ۲۰-۳۰.

۲۰. مؤمن‌زاده ح.، کمالی م. ر.، و کدخدایی ع.، (۱۳۹۳)، "مدل‌سازی سه‌بعدی استاتیکی تخلخل مؤثر سازند سروک در یکی از میادین نفتی جنوب ایران"، **هجدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران**، تهران، دانشگاه تربیت مدرس.

۲۱. اصغری ا.، و رحیم ع.، (۱۳۸۰)، "شبیه‌سازی زمین‌آماري تخلخل و آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر آن در مخزن نفتی مشیریف"، **مجله اکتشاف و تولید**، شماره ۱۴۰.

۲۲. ولی‌زاده الوان ح.، (۱۳۸۷)، "شبیه‌سازی زمین‌آماري پارامترهای پتروفیزیکی مخازن نفتی"، **دومین کنفرانس مهندسی معدن ایران**، دانشگاه تهران.

۲۳. فرج‌پور ز.، (۱۳۸۹)، "مقایسه‌ی روش‌های زمین‌آماري جهت تعیین توزیع تخلخل در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران"، **چهارمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران**.

۲۴. قبادی ح.، (۱۳۸۱)، پایان‌نامه ارشد، "مدل‌سازی توزیع فضایی تراوایی در مخزن منصوره بنگستان با چاه‌آزمایی"، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

۲۵. نجف‌زاده ک.، و ریاحی م. ع.، (۱۳۸۹)، "تعیین ویژگی‌های پتروفیزیکی مخزن با استفاده از زمین‌آمار در یکی از میادین نفتی"، **بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین**.

26. Amaefule J. O. Altunbay M. Tiab D. Kersey D. and Keelan D. K., (1993), "Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells". **SPE annual technical conference and exhibition; Society of Petroleum Engineers**.

27. Abbaszadeh M. Fujii H. and Fujimoto F., (1996), "Permeability prediction by hydraulic flow units-theory and applications" **SPE Formation Evaluation**, **11**, **04**, pp 263-71.

28. Al-Ajmi F. A. and Holditch S. A., (200), "Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia reservoir". **SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Society of Petroleum Engineers**.

29. Abed A. A., (2014), "Hydraulic flow units and permeability prediction in a carbonate reservoir, Southern Iraq from well log data using non-parametric correlation" **Int J Enhanc Res Sci Technol Eng**, **3**, **1**, pp 480-6.

۳۰. نوریان ی.، موسوی حرمی س. ر.، محبوبی ا.، کدخدایی ع. و عبدالهی موسوی س. ع. ا.، (۱۳۹۳)، "تفکیک گروه‌های سنگی با استفاده از واحدهای جریان‌ی و روش خوشه‌بندی: مطالعه موردی، مخزن بنگستان در میدان منصوری"، **مجله چینه‌شناسی و رسوب‌شناسی**، ۹۵ (۲۴)، ۲۰۸-۱۹۹.
31. Se Serra O. and Abbott H. T., (1982), "The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy" **Society of Petroleum Engineers Journal**, 22, 01, pp 117-31.
32. Ye S. J. and Rabiller p., (200), A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering. SPWLA 41st annual logging symposium; **Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts**.
33. Khoshbakht F. and Mohammadnia M., (2012), "Assessment of Clustering Methods for Predicting Permeability in a Heterogeneous Carbonate Reservoir" **Journal of Petroleum Science and Technology**, 2, 2, pp 50-7.
34. Bastani Karizak A. and Nabi Bidhendi M., (2015), "Determination of rock typing in one of carbonate reservoirs in South of Iran by using of MRGC method and hydraulic flow" **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences (JBES)**, 6, 4, pp 571-5.
35. Rastegarnia M. Sanati A. and Javani D., (2016), "A comparative study of 3D FZI and electrofacies modeling using seismic attribute analysis and neural network technique: A case study of Cheshmeh-Khosh Oil field in Iran" **Petroleum**, 2, 3, pp 225-35.
۳۶. سفیداری ا.، امینی ع.، و اسعدی ع.، (۱۳۹۱)، "استفاده از رخساره‌های لاگ در مدل‌سازی مخزن و مطالعات چینه‌نگاری سکانسی، با مثالی از میدان پارس جنوبی"، **شانزدهمین انجمن زمین‌شناسی ایران**.
۳۷. کدخدائی ایلخچی، ر.، رضایی، م. ر.، موسوی حرمی، ر. و کدخدائی ایلخچی ع.، (۱۳۹۳)، "بررسی رخساره‌های الکتریکی مخزن در قالب واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی در میدان ویچرنج مربوط به حوضه پرت واقع در استرالیای غربی"، **مجله پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی**، ۱، ۲۲-۱.
۳۸. سلیمانی ب.، غبیشاوی ع.، و توسلی کجانی ا. ر.، (۱۳۹۲)، "رخساره‌های الکتریکی و انطباق آنها با تراکم شکستگی‌ها در مخزن آسماری میدان نفتی لالی"، **مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته**، ۱۰.
۳۹. فرازانی ن.، خوشبخت ف.، و توکلی و.، (۱۳۹۳)، "بهبود تعیین نوع رخساره‌های الکتریکی با تلفیق لاگ‌های چاه‌پیمایی و تصویرگر در سازند آسماری با استفاده از روش خوشه‌بندی گرافیکی MRGC"، **مجله پژوهش نفت**، ۸۳، ص ۱۸۶-۹۴.
۴۰. صالحی م. ع.، کاظم شیروودی س.، موسوی حرمی س. ر.، غفوری م.، لشکری پور غ. ر.، (۱۳۹۴)، "تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی برای بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میادین نفتی بخش مرکزی خلیج فارس"، **مجله پژوهش نفت**، ۸۴، ص ۸۷-۷۲.
۴۱. زحمت‌کش ا.، سلیمانی ب.، غبیشاوی ع.، و شیخزاده ح.، (۱۳۹۴)، "شناسایی و تفسیر رخساره‌های الکتریکی و استفاده از آن جهت پیش‌بینی رخساره‌های رسوبی در مخزن آسماری یکی از

میادین نفتی جنوب غرب ایران"، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۱۶.

42. Delhomme J. P. Chery L. and de Marsily G., (2007), "The quest for permeability evaluation in wireline logging" **Aquifer systems management: Darcy's legacy in a world of impending water shortage**, pp 55-70.
43. Balan B. Mohaghegh S. and Ameri S., (1995), "State-of-the-art in permeability determination from well log data: Part 1-A comparative study, model development. SPE Eastern Regional Meeting"; **Society of Petroleum Engineers**.
44. Coates G. R. and Dumanoir J. L., (1974), "A new approach to improved log-derived permeability". **SPWLA 14th Annual Logging Symposium; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts**.
45. Herron M. M., (1987), "Estimating the intrinsic permeability of clastic sediments from geochemical data". **SPWLA 28th Annual Logging Symposium; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts**.
46. Jamialahmadi M. and Javadpour F. G., (2000), "Relationship of permeability, porosity and depth using an artificial neural network" **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 26, 1, pp 235-9.
47. Gholinezhad S. and Masihi M., (2012), "A physical-based model of permeability/porosity relationship for the rock data of Iran southern carbonate reservoirs" **Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology**, 1, 1, pp 25-36.
۴۸. مسلمان‌نژاد ح.، رضایی م.، و دهقان‌زاده م.، (۱۳۸۵)، "ارزیابی کمی تراوایی با استفاده از امواج آکوستیک و مقایسه آن با تراوایی حاصل از NMR و آنالیز مغزه (سازندکنگان در میدان پارس جنوبی)"، اولین کنگره مهندسی نفت ایران.
۴۹. قاسم‌العسگری م. ک.، (۱۳۹۰)، "اصول پتروفیزیک"، انتشارات ستایش، ۴۹۹ صفحه.
۵۰. حسنی پاک ع. ا.، و شرف‌الدین م.، (۱۳۸۰)، "تحلیل داده‌های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران.
51. Friedman M, editor Porosity, permeability, and rock mechanics-a review. The 17th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS); 1976: American Rock Mechanics Association.
52. Berkowitz B., (2002), "Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review" **Advances in water resources**, 25, 8, pp 861-84.
53. Zhu W. and Wong, T. F., (1997), "The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Permeability evolution" **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 102, B2, pp 3027-41.
54. Morris J. P. Lomov I. N. and Glenn L. A., (2003), "A constitutive model for stress-induced permeability and porosity evolution of Berea sandstone" **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 108, B10.
55. a J., (2015), "Review of permeability evolution model for fractured porous media", **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 7, 3, pp 351-7.
56. Kozeny J., (1927), "Uber die kapillare Leitung des Wassers im Boden (Aufstieg Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung. Sitz. Ber. Akad. Wiss, Wien, Math. Nat.(Abt. Iia), 136a".
57. Wyllie M. R. J. and Spangler M. B., (1952), "Application of electrical resistivity measurements to problem of fluid flow in porous media" **AAPG Bulletin**, 36, 2, pp 359-

403.

58. Carman P. C., (1937), "Fluid flow through granular beds" **Transactions-Institution of Chemical Engineeres**, **15**, pp 150-66.
59. Tixier M., (1949), "Evaluation of permeability from electric-log resistivity gradients" **Oil and Gas Journal**, **48**, **6**, pp 113-23.
60. Wyllie M. R. J. and Rose W. D., (1950), "Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from electrical log data" **Journal of Petroleum Technology**, **2**, **04**, pp 105-18.
61. Pirson S. J., (1963), "Handbook of well log analysis for oil and gas formation evaluation".
62. Timur A., (1968), "An investigation of permeability, porosity, and residual water saturation relationships". **SPWLA 9th annual logging symposium; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts**.
63. Coates G. and Denoo S., (1981), "The Producibility Answer Product" **Tech RevSchlumberge**, **2**, pp 55-66.
64. Hu D. W. Zhou H. Zhang F. and Shao J. F., (2010), "Evolution of poroelastic properties and permeability in damaged sandstone" **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, **47**, **7**, pp 962-73.
65. Schutjens P. M. T. M. Hanssen T. H. H. H. H. Merour J. De Bree P. H. and Coremans J. W. A., (2004), "Compaction-induced porosity/permeability reduction in sandstone reservoirs: Data and model for elasticity-dominated deformation", **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, **7**, **03**, pp 202-16.
66. Zhang S. Cox S. F. and Paterson M. S., (1994b), "The influence of room temperature deformation on porosity and permeability in calcite aggregates", **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, **99**, **B8**, pp 15761-75.
67. Zhu W. Montési L. G. J. and Wong T. F., (2007), "A probabilistic damage model of stress-induced permeability anisotropy during cataclastic flow", **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, **112**, **B10**.
68. Sulem J. and Ouffroukh H., (2006), "Shear banding in drained and undrained triaxial tests on a saturated sandstone: Porosity and permeability evolution", **International journal of rock mechanics and mining sciences**, **43**, **2**, pp 292-310.
69. Bernabé Y. Mok U. and Evans B., (2003), "Permeability-porosity relationships in rocks subjected to various evolution processes", **Pure and Applied Geophysics**, **160**, **5**, pp 937-60.
70. David C. Wong T. F. Zhu W. and Zhang J., (1994), "Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: Implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust", **Pure and Applied Geophysics**, **143**, **1-3**, pp 425-56.
71. Zhu W. and Walsh J. B., (2006), "A new model for analyzing the effect of fractures on triaxial deformation", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, **43**, **8**, pp 1241-55.
72. Bayles G. A. Klinzing G. E. and Chiang S. H., (1989), "Fractal mathematics applied to flow in porous systems", **Particle & Particle Systems Characterization**, **6**, **1-4**, pp 168-75.
73. Costa A., (2006), "Permeability-porosity relationship: A reexamination of the

- Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption", **Geophysical research letters**, **33**, 2.
74. Rodriguez E. Giacomelli F. and Vazquez A., (2004), "Permeability-porosity relationship in RTM for different fiberglass and natural reinforcements", **Journal of composite materials**, **38**, 3, pp 259-68.
75. Ghabezloo S. Sulem J. and Saint-Marc J., (2009), "Evaluation of a permeability-porosity relationship in a low-permeability creeping material using a single transient test", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, **46**, 4, pp 761-8.
76. Alkan H., (2009), "Percolation model for dilatancy-induced permeability of the excavation damaged zone in rock salt", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, **46**, 4, pp 716-24.
77. Dienes J. K., (1983), "Permeability, percolation and statistical crack mechanics", **The 23rd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)**; American Rock Mechanics Association.
78. Guéguen Y. Chelidze T. and Le R. M., (1997), "Microstructures, percolation thresholds, and rock physical properties", **Tectonophysics**, **279**, 1, pp 23-35.
79. Sahimi M., (1994), **"Applications of percolation theory"**, CRC Press.
80. Yang Y. and Aplin A. C., (2010), "A permeability-porosity relationship for mudstones", **Marine and Petroleum Geology**, **27**, 8, pp 1692-7.
81. Dewhurst D. N. Yang Y. and Aplin A. C., (1999), "Permeability and fluid flow in natural mudstones", **Geological Society, London, Special Publications**, **158**, 1, pp 23-43.
82. Nagaraj T. S. Pandian N. S. and Raju P. S. R. N., (1994), "Stress-state—permeability relations for overconsolidated clays", **Geotechnique**, **44**, 2, pp 349-52.
83. Rice J. R., (1992), "Fault stress states, pore pressure distributions, and the weakness of the San Andreas fault", **International Geophysics**, **51**, pp 475-503.
84. Lyakhovskiy V. and Hamiel Y., (2007), "Damage evolution and fluid flow in poroelastic rock", **Izvestiya Physics of the Solid Earth**, **43**, 1, pp 13-23.
85. Tenthorey E. Scholz C. H. Aharonov E. and Léger A., (1998), "Precipitation sealing and diagenesis: 1. Experimental results", **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, **103**, B10, pp 23951-67.
86. Tang C. A., Tham L. G. Lee P. K. K. Yang T. H. Li L. C., (2002), "Coupled analysis of flow, stress and damage (FSD) in rock failure", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, **39**, 4, pp 477-89.
87. Li G. Tang C. A. and Li L. C., (2010), "Three-dimensional micro flow-stress-damage (FSD) model and application in hydraulic fracturing in brittle and heterogeneous rocks", *Key Engineering Materials; Trans Tech Publ.*
88. Paterson M. S., (1983), "The equivalent channel model for permeability and resistivity in fluid-saturated rock—a re-appraisal", **Mechanics of Materials**, **2**, 4, pp 345-52.
89. Walsh J. B. and Brace W. F., (1984), "The effect of pressure on porosity and the transport properties of rock", **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, **89**, B11, pp 9425-31.

90. Van Marcke P. Verleye B. Carmeliet J. Roose D. and Swennen R., (2010), "An improved pore network model for the computation of the saturated permeability of porous rock", **Transport in Porous Media**, **85**, **2**, pp 451-76.
91. Zhu W, David C, Wong TF. (1995) "Network modeling of permeability evolution during cementation and hot isostatic pressing" *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **100**, **B8**, pp 15451-64.
92. Bernabe Y., (1991), "Pore geometry and pressure dependence of the transport properties in sandstones": **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**; Pergamon, V56, N4, April 1991, P436–446.
93. Fatt I., (1956), "The network model of porous media. 2. Dynamic properties of a single size tube network", **Transactions of the American institute of mining and metallurgical engineers**, **207**, **7**, pp 160-3.
94. Garboczi E. J. and Bentz D. P., (1996), "Modelling of the microstructure and transport properties of concrete", **Construction and Building Materials**, **10**, **5**, pp 293-300.
95. Adin A., (1978), "Prediction of granular water filter performance for optimum design", **Filtration and Separation**, **15**, **1**, pp 55-60.
96. Rajani B. B., (1988), "A simple model for describing variation of permeability with porosity for unconsolidated sands", **In Situ;(United States)**, **12**, **3**, .
97. Chang F. F. and Civan F., (1991), "Modeling of formation damage due to physical and chemical interactions between fluids and reservoir rocks", **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**; Society of Petroleum Engineers.
98. Chang F. F. and Civan F., (1992), "Predictability of formation damage by modeling chemical and mechanical processes", **SPE Formation Damage Control Symposium**; Society of Petroleum Engineers.
99. Chang F. F. and Civan F., (1997), "Practical model for chemically induced formation damage", **Journal of Petroleum Science and Engineering**, **17**, **1-2**, pp 123-37.
100. Ohen H. A. and Civan F., (1993), "Simulation of formation damage in petroleum reservoirs", **SPE Advanced Technology Series**, **1**, **01**, pp 27-35.
101. Ochi J. and Vernoux J. F., (1998), "Permeability decrease in sandstone reservoirs by fluid injection: hydrodynamic and chemical effects", **Journal of hydrology**, **208**, **3**, pp 237-48.
102. Hagiwara T., (1986), "Archie's" m" For Permeability", **The Log Analyst**, **27**, **01**.
103. Salem H. S., (1993), "Derivation of the cementation factor (Archie's exponent) and the Kozeny-Carman constant from well log data, and their dependence on lithology and other physical parameters".
104. Helander D. P. and Campbell J. M., (1966), "The effects of pore configuration, pressure temperature on rock resistivity", **Trans, SPWLA, 7th Annual Logging Symposium**, pp W1-29.
105. Towle G., (1962), "An analysis of the formation resistivity factor-porosity relationship of some assumed pore geometries", **SPWLA 3rd annual logging symposium**; Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.

106. Beard D. C. Weyl P. K., (1973), "Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand", **AAPG bulletin**, **57**, **2**, pp **349-69**.
107. Krumbein W. C. and Monk G. D., (1943), "Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sand", **Transactions of the AIME**, **151**, **01**, pp **153-63**.
108. Morrow N. R. Huppler J. D. and Simmons A. B., (1969), "Porosity and permeability of unconsolidated, upper Miocene sands from grain-size analysis", **Journal of Sedimentary Research**, **39**, **1**, pp **312-21**.
109. Berg R. R., (1970), "Method for determining permeability from reservoir rock properties".
110. Van Baaren J. P., (1979), "Quick-look permeability estimates using sidewall samples and porosity logs", **Transactions of the 6th Annual European Logging Symposium**.
111. Xu P. and Yu B., (2008), "Developing a new form of permeability and Kozeny–Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry", **Advances in water resources**, **31** ,**1** ,pp **74-81**.
112. Katz A. J. and Thompson A. H., (1985), "Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation", **Physical Review Letters**, **54**, **12**, pp **1325**.
113. Yu B. and Cheng P., (2002), "A fractal permeability model for bi-dispersed porous media", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, **45**, **14**, pp **2983-93**.
114. Yu B. Lee L. J. and Cao H., (2002), "A fractal in-plane permeability model for fabrics", **Polymer Composites**, **23**, **2**, pp **201-21**.
115. Yu B. and Li J., (2001), "Some fractal characters of porous media", **Fractals**, **9**, **03**, pp **365-72**.
116. Kaviany M., (1995), "Fluid Mechanics .Principles of Heat Transfer in Porous Media", pp. 429-508.
117. McGregor R., (1965), "The effect of rate of flow on rate of dyeing II—the mechanism of fluid flow through textiles and its significance in dyeing", **Coloration Technology**, **81**, **10**, pp **429-38**..
118. Bourbié T. h. Coussy O. and Zinszner B., (1987), "Acoustics of porous media: Editions Technip".
119. Panda M. N. and Lake L. W., (1994), "Estimation of single-phase permeability from parameters of particle-size distribution", **AAPG bulletin**, **78**, **7**, pp **1028-39**.
120. Shih C. H. and Lee L. J., (1998), "Effect of fiber architecture on permeability in liquid composite molding", **Polymer Composites**, **19**, **5**, pp **626-39**.
121. Koponen A. Kataja M. and Timonen J., (1997), "Permeability and effective porosity of porous media", **Physical Review E**, **56**, **3**, pp **3319**.
122. Mavko G. and Nur A., (1997), "The effect of a percolation threshold in the Kozeny-Carman relation", **Geophysics**, **62**, **5**, pp **1480-2**.
123. Civan F., (2001a), "Scale effect on porosity and permeability: Kinetics, model, and correlation", **AIChE journal**, **47**, **2**, pp **271-87**..
124. Pape H. Clauser C. and Iffland J., (2000), "Variation of permeability with porosity in sandstone diagenesis interpreted with a fractal pore space model", **Pure and Applied Geophysics**, **157**, **4**, pp **603-20**.

125. Civan, F., (2016), "Chapter 4 - Alteration of the Porosity and Permeability of Geologic Formations – Basic and Advanced Relationships. **Reservoir Formation Damage (Third Edition)**". Boston: Gulf Professional Publishing; pp. 51-76.
126. Panda M. N. and Lake L. W., (1995), "A physical model of cementation and its effects on single-phase permeability", **AAPG bulletin**, **79**, **3**, pp **431-43**.
127. Civan F., (1996a), "A multi-purpose formation damage model", **SPE Formation Damage Control Symposium**; Society of Petroleum Engineers.
128. Civan F., (2000), "Predictability of porosity and permeability alterations by geochemical and geomechanical rock and fluid interactions", **SPE international symposium on formation damage control**.
129. Civan F., (2001b), "Modeling well performance under nonequilibrium deposition conditions", **SPE Production and Operations Symposium**; Society of Petroleum Engineers.
130. Civan F., (2001c), "Water Sensitivity and Swelling Characteristics of Petroleum-Bearing Formations: Kinetics and Correlation", **SPE Production and Operations Symposium**; Society of Petroleum Engineers..
131. Civan F., (2003), "Leaky-tube permeability model for identification, characterization, and calibration of reservoir flow units", **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**; Society of Petroleum Engineers.
132. Civan F., (2005), "Improved permeability equation from the bundle-of-leaky-capillary-tubes model", **SPE Production Operations Symposium**; Society of Petroleum Engineers.
133. Civan F., (1996b), "Interactions of the horizontal wellbore hydraulics and formation damage", **Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference**; Society of Petroleum Engineers.
134. Nolan G. Amaefule J. O. Kersey D. G. Ross G. and Rubio R., (1992), "Problems Associated with Permeability and V Clay Models from Textural Properties of Unconsolidated Reservoir Rocks", **Soc Core Analysts Publ**, **9225**.
135. Civan F., (1998), "Practical model for compressive cake filtration including fine particle invasion", **AIChE journal**, **44**, **11**, pp **2388-98**.
136. Khilar K. C. and Fogler H. S., (1987), "Colloidally induced fines migration in porous media", **Reviews in chemical engineering**, **4**, **1-2**, pp **41-108**.
137. Sharma M. M. Pang S. Wennberg K. E. and Morgenthaler L. N., (2000), "Injectivity decline in water injection wells: an offshore Gulf of Mexico case study", **SPE Prod Facil J**.
138. Granberry R. J. Keelan D. K., (1977), "Critical water estimates for Gulf Coast sands".
139. Ahmad U. Crary S. F. and Coates G. R., (1989), "Permeability estimation, the various sources and their interrelationship", **SPE-19604 in 1989 SPE annual technical conference proceedings**, v omega: **Society of Petroleum Engineers**, pp **649-62**.
140. Rowser K. R. and Morrow N. R., (1985), "Fluid flow in cracks as related to low-permeability gas sands", **Society of Petroleum Engineers Journal**, **25**, **02**, pp **191-201**.
141. Kilmer N. H. Morrow N. R. and Pitman J. K., (1987), "Pressure sensitivity of low permeability sandstones", **Journal of Petroleum Science and Engineering**, **1**, **1**, pp **65-**



81.

142. Liu H. H. Rutqvist J. and Berryman J. G., (2009), "On the relationship between stress and elastic strain for porous and fractured rock", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, **46, 2**, pp 289-96.

۱۴۳. نجم‌آبادی س.، (۱۳۷۲)، "گزارش نهایی زمین‌شناسی چاه شماره ۱ میدان گازی پارس جنوبی، گزارش داخلی شرکت ملی نفت ایران".

144. Al-Husseini M. I., (2000), "Origin of the Arabian Plate structures: Amar collision and Najd rift", **GEOARABIA-MANAMA-**, **5**, pp 527-42.

145. Ghazban F., (2007), "**Petroleum Geology of the Persian Gulf. Adviser: H. Motiei.**", University of Tehran press, . pp 707.

146. Sfidari, E., Amini, A., Kadkhodaie, A., & Ahmadi, B., (2012), Electrofacies clustering and a hybrid intelligent based method for porosity and permeability prediction in the South Pars Gas Field, Persian Gulf. *Geopersia*, 2(2), 11-23.

147. POGC report, (2003), "South Pars Gas field geological study. Prepared by Tehran Energy Consultant (TEC) for Pars Oil and Gas Company of Iran (POGC), (unpublished report).

۱۴۸. آقاناتی ع.، (۱۳۸۳)، "زمین‌شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور".

149. Konert G. Afifi A. M. Al-Hajri S. A. De G. K. Al Naim A. A. and Droste H. J., (2001), "AAPG Memoir 74, Chapter 24: Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate".

150. Bordenave M. L., (2002), "Gas prospective areas in the Zagros domain of Iran and in the Gulf Iranian Waters", **AAPG Annual Meeting**, March.

151. Ghavidel-Syooki M., (2003), "Palynostratigraphy of Devonian sediments in the Zagros Basin, southern Iran", **Review of Palaeobotany and Palynology**, **127, 3**, pp 241-68.

152. Szabo F. and Kheradpir A., (1978), "PERMIAN AND TRIASSIC STRATIGRAPHY, ZAGROS BASIN, SOUTH-WEST IRAN", **Journal of Petroleum Geology**, **1, 2**, pp 57-82.

۱۵۳. مطیعی ه.، (۱۳۷۴)، "زمین‌شناسی ایران: زمین‌شناسی نفت زاگرس-۱، سازمان زمین‌شناسی کشور".

154. Ebanks Jr. W. J., (1987), "Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects", **AAPG (Am Assoc Pet Geol) Bull;(United States)**, **71, CONF-870606-**.

155. Gunter G. W. Finneran J. M. Hartmann D. J. and Miller J. D., (1997), "Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method", **SPE Annual Technical Conference and Exhibition; Society of Petroleum Engineers.**

156. Winland H. D., (1972), "Oil accumulation in response to pore size changes, Weyburn field, Saskatchewan", **Amoco Production Company report F72-G-25 (unpublished), Tulsa, OK, 20.**

157. Al-Baldawi B. A. and Nasser M. E., (2013), "Investigation of Reservoir Flow Unit

and Rock Types of Mishrif Formation in Amara Oil Field and Prediction of Performance", **Proceeding of the 2nd International Conference on Iraq Oil Studies**.

158. Orodu O. D. Tang Z. and Fei Q., (2016), "Hydraulic (Flow) Unit Determination and Permeability Prediction: A Case Study of Block Shen-95, Liaohe Oilfield, North\_East China", **Journal of Applied Sciences**, **9, 10**, pp 1801-16.

159. Paradigm Company, (2009), "Electrofacies Modeling: Using Multi-Resolution Graph-based Clustering (MRGC) Analysis in a Carbonate Field in Venezuela", In: [www.pdgm.com/resource-library/customer-stories](http://www.pdgm.com/resource-library/customer-stories).

۱۶۰. رضایی م. ر.، و چهرازی ع.، (۱۳۸۵)، "اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاهپیمایی"، انتشارات دانشگاه تهران. ۶۹۹ صفحه.

161. Verbiest N. Cornelis C. and Jensen R., (2012), "Fuzzy rough positive region based nearest neighbour classification. Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)", **IEEE International Conference on; IEEE**.

۱۶۲. عارفیان م.، و افتخاری م.، (۱۳۹۲)، "روش جدید نزدیک‌ترین همسایه فازی و ناهموار برای طبقه‌بندی نیمه نظارتی، مهندسی کامپیوتر و توسعه پایدار با محوریت شبکه‌های کامپیوتری، مدل‌سازی و امنیت سیستم‌ها" موسسه آموزش عالی خاوران.

۱۶۳. ایزدی، م. و خراط، ر.، (۱۳۹۱)، "محاسبه تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی"، ماهنامه اکتشاف و تولید، شماره ۹۸.

164. Chekani M. and Kharrat R., (2012), "An integrated reservoir characterization analysis in a carbonate reservoir: A case study", **Petroleum Science and Technology**, **30, 14**, pp 1468-85.

165. Holland M. S., (2006), "CLUSTER ANALYSIS", **Department of Geology, University of Georgia, Athen, 30602- 2501**.

166. Loo A. H. B. Tan H. T. W. Kumar P. P. and Saw L. G., (2001), "Intraspecific variation in *Licuala glabra* Griff.(Palmae) in Peninsular Malaysia—a morphometric analysis", **Biological Journal of the Linnean Society**, **72, 1**, pp 115-28.

167. Kadkhodaie-Ilkhchi A. and Amini A., (2009), "A fuzzy logic approach to estimating hydraulic flow units from well log data: A case study from the Ahwaz oilfield, South Iran", **Journal of Petroleum Geology**, **32, 1**, pp 67-78.

۱۶۸. کدخدائی ایلخچی، ر.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بررسی اثرات دیاژنزی بر روی ویژگی‌های مخزنی بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان با نگرشی ویژه بر اثر انیدریت بر کیفیت مخزنی در میدان پارس جنوبی. دانشگاه تهران.

169. Lukas C. Landewe R. Sieper J. Dougados M. Davis J. and Braun, J., (2009), "Development of an ASAS-endorsed disease activity score (ASDAS) in patients with ankylosing spondylitis", **Annals of the rheumatic diseases**, **68, 1**, pp 18-24.

170. Castillo E. Gutiérrez J. M. and Hadi A. S., (1997), "Sensitivity analysis in discrete Bayesian networks", **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans**, **27, 4**, pp 412-23.

۱۷۱. آقازاده، ن.، رحیم‌پور بناب، ح.، کدخدایی ایلخچی، ع. و اسعدی، ا.، ۱۳۸۹، "تعیین گروه‌های

- سنگی با استفاده از مفهوم واحدهای جریان و روش تحلیل خوشه‌ای: مطالعه موردی از سازند داریان، میدان چارس جنوبی"، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۵ شماره ۴.
۱۷۲. کاظم‌زاده ع. ا.، نبی بیدهندی م.، و رضایی م. ر.، (۱۳۸۷)، "مطالعه مقاومت‌ویژه سازندی با استفاده روش واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته"، **مجله علوم دانشگاه تهران**، جلد ۳۴، شماره ۱، ص ۲۱-۱۳.
173. Costa J. F. Zingano A. C. and KOPPE J. C., (2000), "Simulation—an approach to risk analysis in coal mining", **Exploration and Mining Geology**, **9**, **1**, pp 43-9.
174. Sahin A. and Al-Salem A. A., (2001), "Stochastic Modeling of Porosity Distribution in a Multi-Zonal Carbonate Reservoir. **SPE Middle East Oil Show**; Society of Petroleum Engineers.
۱۷۵. خواجه م. م.، و آقابیگی م.، (۱۳۸۷)، "تخمین و شبیه‌سازی توزیع فضایی تراوایی یکی از مخازن جنوب ایران با استفاده از روش‌های زمین‌آماري"، **ماهنامه اکتشاف و تولید**، جلد ۵۳، ص ۶۲-۵۹.
176. Dubrule O., (2003), "**Geostatistics for seismic data integration in earth models**", Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers.
177. Carr L. A. Benteau R. I. Corrigan M. P. and Van Doorne G. G., (1989), "A Complex, Reservoir Characterized By Three-Dimensional Seismic, Geostatistical Reservoir Description, and Sponge-Core Analysis", **SPE Formation Evaluation**, **4**, **03**, pp 335-42.
178. Kelkar M. Perez G. and Chopra A., (2002), "**Applied geostatistics for reservoir characterization**", Society of petroleum engineers Richardson, TX.
179. Askari A. A. Karimi G. H. Shabani F. Bashiri G. R. Hashemi S. M. and Keramati M., (2010), "Integrated study of the fields in the Arvandan Area", **RIPI**.
180. Wellmer F. W., (2012), "**Statistical evaluations in exploration for mineral deposits**", Springer Science & Business Media.
181. Journel A. G. and Huijbregts C. h. J., (1978), "**Mining geostatistics**", Academic press.
۱۸۲. حسنی پاک ع. ا.، (۱۳۸۵)، "زمین‌آمار (ژئوستاتیک)"، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۱۴ صفحه.
183. Petro J. D. and Paulo J. R., (2007), "Model – based Geostatistics", **Springer Science, Library of Congress**.
184. Soleimani B. Shabani F. AmirBakhtiar H. and Haghparast G., (2008), " Fault effect at volumetric modeling in Shadegan Oil Field using RMS software", **New York Science Journal**, **Vol, 1**, **No. 4**,, pp **P.36**.
185. Schlumberger, (2006), "Petrel introduction course, Schlumberger information solutions".
۱۸۶. 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 ۶، ص ۶۶-۵۳.

۱۸۷. سلیمی دلشاد، م.، کاظم‌زاده، ع.، اصغری، ا. و نادری، ا.، (۱۳۹۲)، "مدل‌سازی سه بعدی تخلخل مخزن با استفاده از شبیه‌سازی توام در یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران"، مجله پژوهش نفت، شماره ۷۶، ص ۱۵۳-۱۳۸.

۱۸۸. فرد لزرجانی، س.، کمالی، م. ر.، کدخدایی ایلخچی، ع. و صبحی، ق. ع.، (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی سه‌بعدی تخلخل با استفاده از روش شبیه‌سازی گوسی متوالی در یکی از میادین نفتی خلیج فارس"، مجله پژوهش نفت، شماره ۸۷، ص ۸۸-۹۵.

## **Abstract**

Generally, there is no clear and precise relationship between porosity and permeability values. The relationship between porosity and permeability is qualitative and we do not have a general quantitative relationship between them can be valid in all cases.

One of the useful methods for classifying reservoir rocks and separating production and non-productive zones is the definition of reservoir zones based on hydraulic flow units using the concept of cluster analysis, which has a new perspective on the definition of rock type and reservoir zoning. In this way, the disadvantages of common geological and petrophysical zoning are eliminated.

determination of hydraulic flow units is a suitable method for studying and evaluating the porosity-permeability relationship in hydrocarbon reservoirs.

In this study, for the purpose of providing the porosity-permeability relationship, hydraulic flow units were first determined in a well of the study field using the methods of flow zone index, electrical facies, histogram, discontinuous rock type, K-means clustering, hierarchical clustering and reservoir quality index.

In order to determine the flow units as well as to investigate the porosity-permeability relationship, the Excel software is used and a computer program is made in MATLAB. In addition, the Geolog software is used to determine the flow units by utilizing the electrofacies. The results show different numbers of hydraulic flow units using the above-mentioned methods. However, in general, for the simplicity of the interpretation of the results, 7 hydraulic flow units were considered.

The results of the study of porosity-permeability relationship in the studied well showed a high correlation coefficient between porosity and permeability values using in the methods of flow-zone index, DRT, K-means clustering and hierarchical clustering.

However, the determination of hydraulic flow units using the method of electric facies is possible with the help of petrophysical logs, even if porosity and permeability data are not available.

In the final stage of this study, porosity and permeability have been modeled using geostatistical methods by the Petrel software in the reservoir being studied. The results indicate that porosity and permeability throughout the studied reservoir do not follow a particular pattern and change from zone to zone. The relationship between porosity and permeability in all reservoir zones is relatively weak. The average values of porosity and permeability throughout the reservoir are 7% and 24.5% millidarcy, respectively.

**Keywords:** Porosity-permeability relationship, Kozeny–Carman equation, Hydraulic flow units, Porosity and permeability modeling, Geostatistical methods.



**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics**

**M.Sc. Thesis in petroleum Engineering – Exploration**

**Determination of porosity-permeability model in one of oil fields in  
south of Iran**

**By: Mohsen Mollaei**

**Supervisors:**

**Dr Abolghasim Kamkar Rouhani**

**Dr Reza Ghavami Riabi**

**Advisor:**

**Dr Ebrahim Sefidari**

**December 2017**