

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت- اکتشاف

## ارزیابی پتروفیزیکی و زون بندی مخزنی بر اساس داده های پتروفیزیکی و مغزه ها در یکی از مخازن کربناته ایران

نگارنده : حمیدرضا آزادی

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر بهزاد تخم چی

استاد مشاور

دکتر نوشین جباری

اردیبهشت ۹۸

## تقدیم بہ

سیاہ پر مہر پدرم و دعای خیر مادرم کہ آرام بخش سحطات نگرانی و

سخت زندگی و مایہ دگر می و قوت قلب من بوده است

بہ برادر و خواہرانم کہ خلوص محبت پیام ہمیشگی مگاہشان است.

# تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از راهنمایی‌های اساتید گرانقدر جناب آقای دکتر ابوالقاسم کاکار روحانی، آقای دکتر بهزاد تخم‌چی و خانم دکتر نوشین جباری که در تمامی مراحل انجام این پایان‌نامه مرا یاری نموده‌اند صمیمانه سپاسگزاری نمایم. از اساتید محترم دانشکده‌ی معدن، نفت و زمین‌شناسی دانشگاه صنعتی شاهرود و همه دوستان عزیزم که به هر نحوی در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، نهایت تشکر را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب حمیدرضا آزادی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " ارزیابی پتروفیزیکی و زونبندی مخزنی بر اساس داده‌های پتروفیزیکی و مغزه‌ها در یکی از مخازن کربناته ایران " تحت راهنمایی اساتید گرامی جناب آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر بهزاد تخم چی متعهد می شوم:

- تحقیقات این پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته و یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

اردیبهشت ۱۳۹۸

حمیدرضا آزادی

### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزار و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. 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 نمی‌باشد.

## چکیده

ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای مخزنی بر مبنای تفسیر اطلاعات نگارهای پتروفیزیکی و مغزه‌ها به منظور بررسی کیفیت و زون‌بندی مخازن جهت تعیین توالی‌های با نرخ بهره‌برداری مناسب، انجام می‌شود. شناخت نوع لیتولوژی، محاسبه پارامترهای مخزنی از قبیل حجم شیل و رس، میزان تخلخل کل و مؤثر و درجه‌اشباع از آب در ارزیابی پتروفیزیکی به جهت پی‌بردن به کیفیت مخزنی سازندها و مدل‌سازی مخازن امری ضروری است. میدان کوپال یکی از میادین بزرگ ناحیه فروافتادگی دزفول می‌باشد. سازندهای ایلام و سروک، سازندهای مخزنی این میدان می‌باشند. در تحقیق حاضر تلاش شد تا پس از مطالعه‌ی دقیق منابع و گردآوری داده‌ها و اطلاعات چاه‌پیمایی، و با استفاده از روش محاسبه‌ی قطعی و احتمالی در نرم‌افزار Geolog، لیتولوژی، توزیع تخلخل، توزیع اشباع از آب و میزان هیدروکربن به همراه تعیین زون‌ها با کمک نمودارهای چاه‌نگاری و نمونه مغزه در چاه مورد مطالعه به دست آید. اطلاعات حاصل از تحلیل نمودارهای چاه‌نگاری در چاه مورد مطالعه و نتایج حاصل از مطالعه مغزه و مقاطع نازک به دست آمده از این چاه به شرح زیر است:

تحلیل تصاویر مقاطع نازک دو مغزه‌ی مورد بررسی نشان داد که نوع بافت سنگ به صورت وکستون بوده و میزان کلسیت زیاد است. همچنین از لحاظ فسیل‌شناختی، فسیل‌ها از نوع فرامینیفر، میلیولید، استراکود، گاستروپد و فرومینیفر فرانگتون بوده است. همچنین لیتولوژی مخزن در چاه مورد مطالعه با کمک نمودارهای متقاطع نوترون- چگالی و صوتی- چگالی مشخص شد که به صورت عمده از کربناته کلسیتی و مقدار کم ماسه‌سنگ و دولومیت است. همچنین میزان توزیع اشباع از آب در بازه ۰ تا ۱۰۰ درصد با توزیع فراوان ۳۵ درصد به دست آمد. میزان تخلخل دارای توزیع ۰ تا ۱۲ درصد بوده که از نظر تخلخل سنگ با تخلخل کم محسوب می‌شود. علاوه براین، توزیع تخلخل مؤثر با استفاده از داده‌های مغزه به روش آزمایشگاهی در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر اندازه‌گیری شد و با تخلخل مؤثر محاسبه شده از نرم‌افزار Geolog از نمودارهای چگالی، نوترون و صوتی مقایسه شد. نتایج دو روش نشان داد که داده‌های تخلخل دارای تطابق خوبی هستند. در پایان مدل پتروفیزیکی چاه مورد مطالعه در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر به دست آمد. به طوری که، سازند در این ضخامت با محتوی آب زیاد و مقدار کم نفت، دارای سه زون نفتی است. همچنین از نظر زون‌بندی سنگ‌شناسی دارای دو زون ماسه‌سنگی به همراه دو زون کربناته آهکی است. به طور کلی تحلیل نتایج به روش نمودارگیری چاه و مطالعه

آزمایشگاهی مغزه نشان داد که تطابق خوبی بین این دو روش برای مطالعه مخزن وجود دارد و سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه دارای تخلخل کم، محتوی آب زیاد، محتوی نفت کم و از نظر سنگ-شناسی عمدتاً کربناته کلسیتی با محتوی اندک ماسه سنگ است و کیفیت مخزنی در خانواده مخازن خوب روبه ضعیف قرار می گیرد.

**کلمات کلیدی:** ارزیابی پتروفیزیکی، نرم افزار Geolog، نگارهای چاه پیمایی، مغزه ها.

## فهرست مطالب

ز	فهرست شکل‌ها	.....
ش	فهرست جدول‌ها	.....
۱	۱. فصل اول: کلیات	.....
۲	۱-۱ مقدمه	.....
۲	۱-۲ بیان مساله	.....
۵	۱-۳ سابقه‌ی تحقیق	.....
۵	۱-۳-۱ سابقه پژوهش در دنیا	.....
۶	۱-۳-۲ سابقه پژوهش در ایران	.....
۱۰	۱-۴ اهداف و ضرورت تحقیق	.....
۱۰	۱-۵ روش انجام تحقیق	.....
۱۱	۱-۶ ساختار پایان‌نامه	.....
۱۳	۲. فصل دوم: اصول بنیادی و مفاهیم تحقیق	.....
۱۴	۲-۱ مقدمه	.....
۱۵	۲-۲ مفاهیم پتروفیزیکی	.....
۱۵	۲-۲-۱ میزان تخلخل کل و مؤثر	.....
۱۵	۲-۲-۲ حجم شیل	.....
۱۶	۲-۲-۳ درجه‌ی اشباع از آب	.....
۱۶	۳-۲ روش‌های چاه‌نگاری	.....
۱۷	۲-۳-۱ نمودارهای چاه‌نگاری هسته‌ای	.....
۱۸	۲-۳-۱-۱ اشعه‌ی گامای طبیعی متداول (GR)	.....



۲۰	..... ۲-۱-۳-۲ اشعه‌ی گامای طیفی (SGR)
۲۰	..... ۳-۱-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری چگالی
۲۲	..... ۴-۱-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری نوترونی
۲۳	..... ۲-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری صوت
۲۵	..... ۳-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری الکتریکی
۲۶	..... ۱-۳-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری پتانسیل خودزا
۲۷	..... ۲-۳-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری مقاومتی
۲۸	..... ۴-۲ جمع‌بندی
۲۹	..... ۳. فصل سوم: روش انجام تحقیق
۳۰	..... ۱-۳ مقدمه
۳۰	..... ۲-۳ ناحیه‌ی مورد مطالعه
۳۱	..... ۳-۳ روش کار
۳۲	..... ۱-۳-۳ آنالیز پتروفیزیکی به کمک داده‌های نمودارگیری
۳۴	..... ۱-۱-۳-۳ ارزیابی پتروفیزیکی
۳۴	..... ۱-۱-۳-۳ تشخیص لیتولوژی
۳۹	..... ۲-۱-۳-۳ محاسبه‌ی تخلخل و آب اشباع
۴۱	..... ۲-۳-۳ مطالعه آزمایشگاهی مغزه
۴۲	..... ۳-۴ جمع‌بندی
۴۳	..... ۴. فصل چهارم: تجزیه تحلیل نتایج
۴۴	..... ۱-۴ مقدمه
۴۴	..... ۲-۴ آنالیز تصاویر مغزه
۴۶	..... ۳-۴ تحلیل نمودارهای پتروفیزیکی

۴۹	..... تعیین لیتولوژی
۵۴	..... توزیع تخلخل
۵۵	..... توزیع اشباع از آب
۵۷	..... مقایسه داده تخلخل حاصل از آزمایش مغزه و داده نمودارگیری
۵۸	..... مدل پتروفیزیکی
۶۰	..... مقایسه نتایج تحلیل نمودارهای چاهنگاری و آنالیز مغزه
۶۱	..... فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶۲	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری
۶۳	..... ۲-۵ پیشنهادات
۶۴	..... منابع و ماخذ

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲- نمودار نگار اشعه‌ی گاما . . . . . ۱۹
- شکل ۲-۲- پراکندگی کامپتون اشعه‌های گاما . . . . . ۲۱
- شکل ۳-۲- چاه نگاری چگالی و فتوالکتریکی و ارتباط آن با انرژی گاما . . . . . ۲۲
- شکل ۴-۲- سرعت نوترونی در مقابل منبع . . . . . ۲۳
- شکل ۵-۲- موقعیت فرستنده‌ها و دریافت‌کننده‌ها در نگار صوتی . . . . . ۲۴
- شکل ۶-۲- منحنی پتانسیل خودبه خودی، پتانسیل خود به خودی استاتیک و خط شیل. . . . . ۲۶
- شکل ۷-۲- نمونه‌ای از نمودار مقاومتی در عمق چاه. . . . . ۲۷
- شکل ۱-۳- موقعیت میدان کوپال در فروافتادگی دزفول. . . . . ۳۱
- شکل ۲-۳- بخشی از گراف نمودارهای چاه‌پیمایی در چاه مورد مطالعه. . . . . ۳۳
- شکل ۳-۳- مقادیر حجم رس محاسبه شده بر اساس نگار اشعه‌ی گاما با استفاده از روش‌های مختلف. . . . . ۳۵
- شکل ۴-۳- نمودار حجم رس محاسبه شده با استفاده از نمودار متقاطع چگالی و تخلخل نوترون. . . . . ۳۶
- شکل ۵-۳- نمودار مدل سنگ‌شناسی تخلخل نوترونی- چگالی (چارت استاندارد CP-15 شلمبرژر). . . . . ۳۷
- شکل ۶-۳- نمودار متقاطع سرعت عبور صوت- چگالی برای تشخیص لیتولوژی (چارت استاندارد CP-7 شلمبرژر). . . . . ۳۸
- شکل ۱-۴- تصاویر میکروگراف از مقاطع نازک مغزه‌ی مربوط به عمق ۴۳۶۰ متری (a1). . . . . ۴۵
- شکل ۲-۴- تصاویر میکروگراف از مقاطع نازک مغزه‌ی مربوط به عمق ۴۴۵۰ متری (a2). . . . . ۴۶
- شکل ۳-۴- نمودار پتروفیزیکی رسم شده در کل عمق نمودارگیری شده از چاه مورد مطالعه. . . . . ۴۷
- شکل ۴-۴- نمودار پتروفیزیکی در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری از چاه مورد مطالعه که از آن نمونه مغزه تهیه شده است. . . . . ۴۸

- شکل ۴-۵- نمودار متقاطع چگالی و تخلخل نوترونی داده‌های خام و هم‌تراز شده. ۵۰.....
- شکل ۴-۶- نمودار متقاطع چگالی- نوترون در عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری که نمونه مغزه از آن تهیه شده است. ۵۱.....
- شکل ۴-۷- نمودار متقاطع صوت- چگالی برای تعیین لیتولوژی در کل عمق نمودارگیری شده از چاه مورد مطالعه. ۵۲.....
- شکل ۴-۸- نمودار متقاطع صوت- چگالی در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از چاه مورد مطالعه برای تعیین لیتولوژی. ۵۳.....
- شکل ۴-۹- توزیع فراوانی تخلخل موثر در کل عمق سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه. ۵۴.....
- شکل ۴-۱۰- توزیع فراوانی تخلخل موثر در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه. ۵۵.....
- شکل ۴-۱۱- توزیع فراوانی اشباع از آب در کل عمق سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه. ۵۶.....
- شکل ۴-۱۲- توزیع فراوانی اشباع از آب در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه. ۵۷.....
- شکل ۴-۱۳- مقایسه تخلخل حاصل از آزمایش مغزه و نمودارگیری چاه در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر. ۵۸.....
- شکل ۴-۱۴- مدل پتروفیزیکی از سازند حفاری شده در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از چاه مورد مطالعه. ۵۹.....

## فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۲- زمان معمول سیر موج صوتی در بعضی سنگ‌ها . ..... ۲۵



## فصل اول: کلیات

## ۱-۱ مقدمه

ارزیابی پتروفیزیکی و تعیین زون‌های مخزنی یکی از مراحل مهم در مطالعات مخازن است. برای تعیین زون‌های مخزنی می‌توان با استفاده از داده‌های پتروگرافی- پتروفیزیکی و مغزه‌ها به تقسیم‌بندی مخزن به زون‌های مختلف با ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مشخص اقدام نمود. جهت رسیدن به این مقصود، از نتایج تفسیر و ارزیابی پتروفیزیکی نمودارهای چاه‌نگاری، آنالیز مغزه‌ها و روش‌های اندازه‌گیری خواص پتروفیزیکی و زمین‌شناسی سازند استفاده شده است. در فصل حاضر پس از بیان مسئله، سابقه تحقیق بیان شده و در نهایت پس از ذکر هدف و ضرورت انجام تحقیق حاضر، روش انجام تحقیق و ساختار پایان‌نامه ارائه خواهد شد.

## ۱-۲ بیان مساله

میدان کوپال یکی از میادین بزرگ ناحیه فروافتادگی دزفول می باشد که در جنوب شرقی اهواز قرار گرفته شده است. سازندهای ایلام و سروک مخازن هیدروکربنی این میدان می‌باشند. سازند ایلام قسمتی از گروه بنگستان می‌باشد که بین دو سازند شیلی گورپی (در بالا) و سورگه (در پایین) واقع شده است. در تحقیق سلیمانی و همکاران (۱۳۸۹)، از مقاطع نازک، مغزه‌ها و نگارهای پتروفیزیکی گاما و صوتی چاه شماره ۱۴ آب‌تیمور برای زمین‌شناسی سازند ایلام استفاده گردید. جهت شناسایی میکرورخساره‌ها، مقاطع نازک با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و میکرورخساره‌های تعیین شده با استفاده از روش دانهام<sup>۲</sup> نام‌گذاری شدند. برای تفسیر محیط رسوبی نیز از روش ویلسون - فلوگل<sup>۳</sup> استفاده شد. نهشته‌های سازند ایلام در این چاه، دربردارنده رخساره‌های کربناته می‌باشند. بر اساس مطالعات میکروسکوپی، تعداد ۶ میکرورخساره مربوط به سه زیرمحیط شیبدار<sup>۴</sup> داخلی، شیبدار میانی و شیبدار خارجی تعیین و مشخص گردید. در این نهشته‌ها، دو توالی<sup>۵</sup> رده سوم با مرز نوع دو

---

<sup>۱</sup> Microfacies

<sup>۲</sup> Dunham

<sup>۳</sup> Wilson- Flugle

<sup>۴</sup> Ramp

<sup>۵</sup> Sequence



تشخیص داده شدند که با توالی‌های صفحه عربی هم خوانی دارند (سلیمانی و همکاران، ۱۳۸۹). سازند سروک دومین سازند مخزنی مهم پس از سازند آسماری در مخازن جنوب غرب ایران به شمار می‌رود که بخش قابل توجهی از ذخایر هیدروکربنی را در خود جای داده است. کربنات‌های این سازند به دلیل متحمل شدن شرایط و محیط‌های دیاژنزی مختلف، دارای خواص مخزنی متفاوت و پیچیده‌ای می‌باشند. به منظور تعیین محیط رسوب‌گذاری سازند سروک و نیز فرآیندهای دیاژنزی اصلی که آن را تحت تأثیر قرار داده‌اند و ارتباط آن‌ها با جایگاه‌های توالی رسوبات، مطالعات دقیق رخساره‌ای و دیاژنزی بر روی مقاطع نازک میکروسکوپی همراه با تفاسیر چینه‌نگاری سکانسی با استفاده از نتایج مطالعات زیست چینه‌نگاری (بایوستراتیگرافی<sup>۱</sup>)، داده‌های نگار و نتایج آنالیزهای تصاویر میکروسکوپی توسط مهرابی و همکاران در سال ۱۳۹۱ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. انجام مطالعات رخساره‌ای حاکی از تشکیل کربنات‌های این سازند در یک محیط پلانفرمی از نوع شیبدار هم‌شیب است که ویژگی‌های رخساره‌ای نظیر گل غالب بودن آن‌ها و تنوع کم رخساره‌های شناسایی شده در آن در این میدان حاکی از پشت به باد بودن این محیط رسوبی شیبدار می‌باشد. فرآیندهای دیاژنزی مهمی که کربنات‌های این سازند را تحت تأثیر قرار داده‌اند شامل انحلال، دولومیتی‌شدن، سیمانی‌شدن، میکرایتی‌شدن، فشردگی مکانیکی، استیلولیتی‌شدن، دولومیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن، پیریتی‌شدن، تبلور مجدد و شکستگی می‌باشند. بررسی‌های چینه‌نگاری توالی منجر به شناسایی سه توالی رده سوم در بخش مورد مطالعه از این سازند گردیده و ارتباط رخساره‌ها و فرآیندهای دیاژنزی با جایگاه‌های توالی رسوبات بررسی شد (مهرابی و همکاران ۱۳۹۱).

ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای مخزنی بر مبنای تعبیر و تفسیر اطلاعات نمودارهای چاه‌نگاری پتروفیزیکی و مغزه‌ها به منظور بررسی کیفیت و زون‌بندی مخازن جهت تعیین توالی‌هایی با نرخ بهره‌برداری مناسب، انجام می‌شود. شناخت نوع لیتولوژی، محاسبه پارامترهای مخزنی از قبیل حجم شیل و رس، میزان تخلخل کل و مؤثر و درجه اشباع از آب در ارزیابی پتروفیزیکی به جهت پی‌بردن به کیفیت مخزنی سازندها و مدل‌سازی مخازن امری ضروری است (Ghadami et al., 2015). نرم‌افزار Geolog یک نرم‌افزار حرفه‌ای است که در حوضه اکتشاف ذخایر هیدروکربنی در زمینه ژئوفیزیک و حفاری‌های سرچاهی کاربردهای گسترده‌ای دارد. اما، عمده‌ترین توانایی و کاربرد تخصصی این نرم‌افزار در تفسیرهای اطلاعات پتروفیزیکی

---

<sup>۱</sup> Biostratigraphy

است. استفاده از توانایی‌های مختلف این نرم‌افزار، امکان دستیابی به نتایج بسیار دقیقی را برای زمین شناسان و مهندسی‌ن نفت فراهم ساخته است.

تفسیرهای پتروفیزیکی نمودارهای زمین‌شناسی با استفاده از دو روش عمده آنالیزهای پتروفیزیکی یعنی روش قطعی<sup>۱</sup> و احتمالی<sup>۲</sup> ممکن است. روش قطعی، به محاسبات مرحله‌ای و پیوسته شامل محاسبه حجم شیل، تخلخل، درجه اشباع از آب و هیدروکربن انجام می‌دهد. روش احتمالی، کاربرد بیشتری در ارزیابی سازندهای درون‌چاهی دارد و با استفاده از ساختن مدل توسط نمودارهای چاه‌نگاری مختلف و مناسب پتروفیزیکی، پارامترهای مجهول را محاسبه می‌نماید. بهترین نتیجه زمانی به دست می‌آید که مجموعه نمودارهای چاه‌نگاری رانده شده در چاه به طور کامل موجود باشند. مدل احتمالی با توجه به سیالات، ماتریکس، نمودارهای موجود و با استفاده از فرمول‌های مختلف، خصوصیات پتروفیزیکی مجهول مخزن را تعیین می‌کند. به کمک این مدل می‌توان تخلخل کل و مؤثر، درجه اشباع از آب و هیدروکربن، حجم شیل، میزان سیالات و کانی‌ها، نسبت ضخامت خالص به ناخالص و ضخامت ستون هیدروکربن را تعیین نمود (مهرابی و همکاران ۱۳۹۱).

تعیین کیفیت پتروفیزیکی و زون‌بندی مخزن در مطالعات توسعه مخازن یکی از مراحل اصلی می‌باشد. با تعیین زون‌های مخزنی با کیفیت بهتر نسبت به دیگر زون‌های مخزن، برای تعیین نقاط مناسب حفاری و تکمیل چاه، تولید از مخزن بصورت بهتری انجام می‌شود (Askari and Behrouz, 2011). هدف از این پژوهش، ارزیابی پتروفیزیکی و تعیین زون‌های مخزنی به منظور مشخص‌سازی بخش‌های مناسب مخزن برای مطالعات یک سازند کربناته در یکی از مخازن هیدروکربنی ایران است. تعیین دقیق زون‌های مخزنی باعث مدل‌سازی استاتیکی بهتر و در نتیجه مدل‌سازی دینامیکی مناسب‌تری می‌گردد. متغیرهای عمده این تحقیق، تغییرات پتروفیزیکی و زمین‌شناسی مخزن در نواحی مختلف آن نسبت به عمق می‌باشد. استفاده از یک روش مناسب برای تفسیر داده‌های پتروفیزیکی و استفاده از این داده‌ها برای تعیین زون‌های مخزنی مناسب اساس این تحقیق می‌باشد. برای این کار ابتدا داده‌های نمودارهای چاه‌نگاری تفسیر شده و پس از جمع‌آوری داده‌های پتروفیزیکی، بر اساس روش شاخص زون جریان، کیفیت مخزنی ارزیابی شده و زون‌بندی مخزن انجام می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Deterministic

<sup>۲</sup> Probabilistic

## ۱-۳ سابقه‌ی تحقیق

تحقیقات متنوعی در سرتاسر جهان برای ارزیابی پتروفیزیکی منابع نفتی و گازی صورت گرفته است که در ادامه ابتدا به برخی از این پژوهش‌ها در دنیا و سپس به طور مفصل‌تر به سابقه چنین تحقیق‌های در ایران پرداخته می‌شود.

### ۱-۳-۱ سابقه پژوهش در دنیا

ایسلام<sup>۱</sup> (۲۰۱۰)، سنگ‌های ماسه‌ای مخازن زیرلایه در میدان گازی شهبازپور<sup>۲</sup> بنگلادش را با استفاده از داده‌های مغزه و نمودارها از نظر پتروفیزیکی ارزیابی کرد. آنالیز مغزه نشان داد که متوسط تخلخل مغزه، تراوایی و مقدار دهانه حفرات به ترتیب ۲۰ درصد، ۲۰۹ mD و ۴۴۰۲۰ آنگستروم می‌باشد. این مقادیر اندازه‌گیری نشان می‌دهد که مخازن ماسه‌سنگ در گروه مخازن با کیفیت بالا دسته‌بندی می‌شوند. تراوایی و تخلخل همچنین وابسته به پارامترهای بافتی شامل اندازه، شکل، جورشدگی و ماتریکس سنگ‌های مخزن است. پارامترهای پتروفیزیکی شامل حجم شیل، تخلخل، اشباع از آب و هیدروکربن، تراوایی، شاخص تحرک‌پذیری و حجم آب توده بود. متوسط مقادیر به ترتیب ۲۰٪، ۲۲٪، ۲۶٪، ۷۴٪، ۱۱۰ mD، ۰/۲۸ و ۰/۰۵ بدست آمد. این مطالعه نشان داد که ۲۳ ناحیه با ضخامت کلی ۳۸۵ متر، مخزن مورد نظر را پوشش می‌دهد (Islam, 2010).

کاراسکولا<sup>۳</sup> (۲۰۱۵)، داده‌های زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و پتروفیزیکی لایه‌ی نفتی در جنوب غربی برزیل را به منظور دستیابی به ویژگی‌های فیزیکی مخازن هیدروکربنی بررسی کردند. او از تکنیک هوش مصنوعی برای ایجاد پارامترهایی از قبیل تخلخل و تراوایی هر کدام از مخازن با استفاده از داده‌های نمودار چاه مورد مطالعه (گاما، نوترون، چگالی و مقاومتی) استفاده کرد. نتایج نشان داد که ترکیب تکنیک‌های هوش مصنوعی با داده‌های پتروفیزیکی به صورت قابل توجهی ارزیابی پتروفیزیکی را بهبود می‌دهد (Carrasquilla, 2015).

---

<sup>۱</sup> Islam

<sup>۲</sup> Shahbazpur

<sup>۳</sup> Carrasquilla

نظری استاد<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی و روشی بر مبنای مفاهیم زمین‌آماري شبکه‌ي شکنندگي را مدل‌سازي کردند. مدل‌سازي شبکه‌ي شکنندگي مخازن هيدروکربني نقشي مهم در شبیه‌سازي دينامیک در داخل فضای متخلخل بازي می‌کند. این مدل‌سازي به صورت متداول با استفاده از روش‌های تصادفي بر مبنای راندن نمودارهای چاه‌نگاري در تعداد کمی چاه انجام می‌گیرد. استفاده از روش‌های تصادفي نمی‌تواند منجر به مدل‌هایی معتبر برای شبکه‌های شکنندگي مخازن شود. اما در این تحقیق، از الگوریتمی بر پایه‌ي متغیرهای اولیه و ثانویه شامل داده‌های پتروفیزیکی استفاده شد. نتایج نشان داد که شبکه‌های شکنندگي حاصل با مفاهیم زمین‌شناسي تطابق بالایی دارد (Nazari Ostad et al., 2016).

قنیمی<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷)، با استفاده از نمودارهای چاه‌نگاري، به ارزیابی پتروفیزیکی مخزن ابومادی<sup>۳</sup> در شمال دلتای نیل در کشور مصر پرداختند و نقشه‌های توزیع پارامترهایی اعم از حجم شیل، تخلخل مؤثر، اشباع از آب، ضخامت و اشباع از هيدروکربن برای ارائه تغییرات ویژگی‌های پتروفیزیکی مورد استفاده قرار گرفت (Ghoneimi et al., 2017).

## ۲-۳-۱ سابقه پژوهش در ایران

تدینی و نبی بیدهندي (۱۳۸۵)، مقاله‌ای با هدف مدل‌سازي یک شبکه عصبی مصنوعی و تعمیم آن جهت پیش‌بینی مقادیر واقعی پارامترهای مخزنی از روی داده‌های نگار بدست آمده از چاه‌های میدان نفتی پارسی واقع در جنوب شرقی ایران ارائه کردند. در این میدان داده‌های حاصل از مغزه تنها در چاه‌های شماره ۱۸ و ۱۹ کامل بود لذا در تعیین خواص مخزنی از نمودارهای پتروفیزیکی و نرم‌افزارهای Logic و RMS استفاده شد. از شبکه عصبی مصنوعی پس انتشار خطا (BP-ANN<sup>۴</sup>) برای پیش‌بینی خواص مخزنی (تخلخل، آب اشباع‌شدگی و تراوایی) استفاده شد. برای تعیین تخلخل توسط شبکه از دو گروه نمودارهای پتروفیزیکی که گروه اول شامل نمودارهای نوترون، گاما، چگالی و صوتی و گروه دوم شامل

<sup>۱</sup> Nazari Ostad

<sup>۲</sup> Ghoneimi

<sup>۳</sup> Abu Madi

<sup>۴</sup> Before Propagation Artificial Neural Network

نمودارهای مقاومت ویژه (LLD و LLS و MSFL) و میزان اشباع از آب حاصل از روش سیماندوکس<sup>۱</sup> می‌باشد (Simandoux, 1982)، استفاده شد. همچنین برای تعیین میزان اشباع از آب توسط شبکه نمودارهای مقاومت ویژه (LLD و LLS و MSFL) و تخلخل حاصل از نگار بعنوان ورودی بکار رفت. ضریب همبستگی بین تخلخل حاصل از مغزه و تخلخل شبیه‌سازی توسط شبکه در چاه‌های شماره ۳۳ و ۶۱ برای گروه اول داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۷۸ و ۰/۹۲۹ و برای گروه دوم داده‌ها به ترتیب برابر با ۰/۹۳۵ و ۰/۹۴۵ بدست آمد. ضریب همبستگی اشباع از آب بدست آمده توسط شبکه و اشباع از آب حاصل از روش سیماندوکس نیز برای چاه‌های شماره ۳۳ و ۶۱ به ترتیب برابر با ۰/۹۴۳ و ۰/۹۸۰ بدست آمد. به علت دقت کم شبکه در فرآیند تعمیم‌پذیری پس از زون‌بندی میدان (بر اساس خواص پتروفیزیکی)، در ۴ زون این میدان فرآیندهای آموزش، اعتبارسنجی و آزمون اجرا شده و در آخر میزان ضرایب همبستگی در زون‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۰/۹۳۲، ۰/۹۶۱، ۰/۸۸۷ و ۰/۹۲۱ حاصل شد (تدینی و نبی بیدهندي، ۱۳۸۵).

بهلولی و همکاران (۱۳۸۷)، به محاسبه‌ی خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن سازند قم در میدان گازی سراجیه پرداختند. جهت محاسبه‌ی حجم شیل، تخلخل مؤثر سنگ، اشباع‌شدگی از آب و آب کاهش-نیافتنی از نمودارهای پتروفیزیکی و برای محاسبه‌ی تراوایی از فرمول‌های مختلف تجربی استفاده شد. تراوایی افقی مغزه نیز اندازه‌گیری شد و سپس نتایج نمودارها با مقادیر تراوایی مغزه مقایسه گردید. تراوایی افقی بین ۰/۱ تا ۱ میلی داری و دامنه‌ی تغییر تراوایی به دست آمده از نمودار نیز بین ۰/۰۱ تا ۰/۱ میلی داری به دست آمد. دو رابطه‌ی تجربی کرین<sup>۲</sup> و وایلی-رز<sup>۳</sup> نزدیک‌ترین اعداد به نتایج مغزه را ایجاد کرد. بنابراین برای میدان مذکور می‌توان از آن‌ها استفاده کرد (بهلولی و همکاران، ۱۳۸۷).

جوزانی کهن و همکاران (۱۳۹۳)، روابط پتروفیزیکی تعیین حجم رس را بررسی کرده و برای سازند مخزنی شوربجه به کار بردند. خطا در تخمین حجم رس، منجر به محاسبه نادرست پارامترهای مخزنی از جمله تخلخل مؤثر و درجه اشباع آب می‌شود که نهایتاً خطر تفسیر نادرست از تولید مخزن را در پی دارد. لذا تخمین صحیح این پارامتر، یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی کیفیت مخازن ماسه‌سنگی به شمار

---

<sup>۱</sup> Simandoux

<sup>۲</sup> Crain correlation

<sup>۳</sup> Wyllie & Rose correlation

می‌رود. روش‌های پتروفیزیکی متعددی مبتنی بر داده‌های یک یا چند نگار برای تخمین حجم شیل وجود دارد که در این پژوهش، پس از انجام آنالیز حساسیت روی سری کامل داده‌های نگارهای پتروفیزیکی سازند مخزنی شوربجه به سن کرتاسه تحتانی و حجم رس آزمایشگاهی داده‌های مغزه این سازند در دو چاه تولیدی A و خشک B یکی از میادین شرق حوضه رسوبی کپه‌داغ، هفت رابطه پتروفیزیکی با استفاده از داده‌های شش نوع نگار و ترکیب برخی از آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال کلیه تصحیحات روی تخمین‌های حجم شیل به دست آمده از این روش‌ها، تخمین‌های متعددی از حجم رس حاصل شد. مقایسه نتایج این تخمین‌ها با مقادیر اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی این پارامتر در ۷۶ نمونه مغزه نشان داد. همچنین بهترین رابطه تصحیح‌کننده تجربی برای این منطقه براساس داده‌های حجم شیل شاخص پرتوی گاما به دست آمد که کمترین خطای متوسط را به نسبت سایر تصحیحات در هر روش دارد (جوزانی کهن و همکاران، ۱۳۹۳).

پارسامنش و همکاران (۱۳۹۳)، ویژگی‌های پتروفیزیکی سازند ایلام در مرز دو میدان نفتی جنوب ایران را با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری، چاه‌نگاری و آزمایش چاه بررسی کردند. با توجه به ارزیابی پتروفیزیکی انجام شده در این تحقیق، سازند ایلام در این ناحیه از سنگ آهک، سنگ دولومیت و شیل تشکیل شده است. در ستون لیتولوژی به دست آمده، با افزایش عمق، حجم شیل در بخش ایلام بالایی کاهش یافته و به مقدار سنگ آهک در بخش ایلام اصلی افزوده می‌شود. تخلخل در هر دو چاه مورد بررسی به نام‌های  $A_1$  و  $B_1$  بیش از مقدار میانگین تخلخل در میدان‌های نفتی A و B است. سازند ایلام در چاه  $A_1$  دارای تخلخل تقریباً یکنواخت در کل سازند و اشباع از آب بالاست. اما در بخش ایلام اصلی چاه  $B_1$  به تدریج تخلخل کاهش و اشباع آب در قسمت پایین سازند افزایش می‌یابد، همچنین عمق ۲۹۶۴ تا ۳۰۰۰ متری دارای پتانسیل نفتی است. نتایج آنالیز تزریق جیوه، افزایش اشباع آب کاهش‌نیافتنی، در بخش زیرین سازند ایلام اصلی را تأیید کرد. آزمایش آنالیز چاه‌ها نیز تأییدکننده‌ی نتایج پتروفیزیکی به دست آمده بود. جهت اعتبارسنجی و ارزیابی بیشتر، نمودارهای تخلخل، حجم شیل و مقاومت صوتی محاسبه شده از داده‌های چاه‌نگاری با نتایج تفسیر مقطع نشانگر مقاومت صوتی (امپدانس) به دست آمده از داده‌های لرزه-نگاری در نرم افزار Hampson-Russell، مورد مقایسه قرار گرفت. علاوه بر هم‌خوانی نتایج، در مقطع مقاومت صوتی با پیشروی از چاه  $B_1$  به سمت چاه  $A_1$ ، از تخلخل لایه‌ی مخزنی کاسته می‌شود. گزارش‌های زمین‌شناسی منطقه نیز، تغییر جنس لایه از سنگ آهک به سنگ رس در محدوده بین دو

چاه را عنوان کرده‌اند. بر این اساس، تغییر رخساره رسوبی و یک سیل جانبی بین چاه‌های  $A_1$  و  $B_1$  می‌تواند وجود داشته باشد. این سیل می‌تواند به دلیل عملکرد گسل‌هایی در اعماق بیشتر حوضه رسوبی باشد که با تشدید نمودن تغییرات رخساره‌ها، توانسته بر مسیر مهاجرت و سیستم تخلخل مخزن تأثیرگذار بوده و مانع از حرکت نفت به سمت چاه  $A_1$  شود (پارسامنش و همکاران، ۱۳۹۳).

احمدی و بختیار (۱۳۹۵)، به ارزیابی خواص پتروفیزیکی سازند آسماری میدان نفتی بزرگ مارون واقع در جنوب غرب کشور با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی پرداختند. هدف از پژوهش مذکور بررسی کیفیت میدان نفتی مارون واقع در جنوب غرب کشور با استفاده از مطالعات پتروفیزیکی بود. برای این منظور با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی و اطلاعات مغزه ۱۲۱۱ داده نقطه‌ای و به کمک نرم‌افزار Geolog، پارامترهای پتروفیزیکی سازند آسماری در سه حلقه چاه این میدان نفتی مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از نمودارهای متقاطع نوترون-چگالی و  $M-N$ ، سنگ‌شناسی غالب سازند از نوع کربناته و به مقدار کمتر ماسه‌سنگ و شیل تشخیص داده شد. میزان تخلخل مؤثر متوسط سازند نیز در این سه چاه به ترتیب برابر با ۱۰/۱۷، ۹/۴۵ و ۸/۱۵ درصد و اشباع شدگی آب سازند کمتری در فواصل سازندهای ماسه-سنگی نسبت به کربناته بدست آمد. براساس نتایج تحقیق کیفیت این مخزن در مجموع، متوسط و در فواصل عمقی سازند ماسه‌سنگی از کیفیت بهتر و در نتیجه امکان عملیات تولید نفت بهتری برخوردار است (احمدی و بختیار، ۱۳۹۵).

نظام اسلامی و همکاران (۱۳۹۵)، به ارزیابی پتروفیزیکی و تعیین خصوصیات مخزنی سازندهای کنگان و دالان بالایی در دو چاه  $A$  و  $B$  با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی در یکی از میادین جنوب غربی ایران پرداختند. پس از تصحیحات لازم روی نمودارها، لیتولوژی سازند کنگان و بخش بالای سازند دالان با استفاده از نمودار متقاطع نوترون-چگالی شناسایی شد. با توجه به لیتولوژی بخش بالایی سازند دالان و بر اساس حجم شیل و حضور نهشته‌های تبخیری سازند کنگان، چاه‌های  $A$  و  $B$  به بخش‌های کوچکتری تقسیم شدند. سازند کنگان در هر دو چاه به یازده بخش  $K_1$  تا  $K_{11}$  و سازند دالان بالایی نیز به هشت بخش  $D_1$  تا  $D_8$  تقسیم شد. نتایج نشان داد که بخش‌های  $K_3$  تا  $K_5$  و همچنین بخش  $D_5$  در چاه  $A$  و بخش  $D_6$  در چاه  $B$  از نظر مقدار اشباع‌شدگی، تخلخل و لیتولوژی، شرایط یک مخزن مناسب را دارند (نظام اسلامی و همکاران، ۱۳۹۵).

## ۱-۴ اهداف و ضرورت تحقیق

ارزیابی پتروفیزیکی مخازن یکی از مراحل مهم در مطالعات توسعه مخازن است که بر اساس آن تولید اقتصادی از مخزن و تعیین حجم سیالات درون مخزن، انجام می‌شود. همچنین تعیین زون‌های تولیدی و مکان حفاری چاه بر اساس کیفیت پتروفیزیکی مخزن انجام می‌شود. از طرفی تعیین زون‌بندی مخزنی برای ورودی مدل‌های شبیه‌سازی مخزن، دقت آن را در پیش‌بینی سناریوهای توسعه‌ای افزایش می‌دهد. بنابراین زون‌بندی و ارزیابی پتروفیزیکی مخازن از اهمیت فراوانی برخوردار است و یکی از ضرورت‌های مطالعات توسعه مخازن می‌باشد.

در تحقیق حاضر تلاش بر این است تا پس از مطالعه‌ی دقیق منابع و گردآوری داده‌ها و اطلاعات چاه‌پیمایی، با استفاده از نرم‌افزار Geolog و با استفاده از روش محاسبه‌ی قطعی و احتمالی، تخلخل، تراوایی، اشباع از آب و میزان هیدروکربن و زون‌های جریان‌ی در مخزن در ناحیه‌ی نفت‌خیز کشور، به دست آید.

## ۱-۵ روش انجام تحقیق

با توجه به موضوع تحقیق و با در نظر گرفتن داده‌های در دسترس مراحل مطالعاتی به صورت زیر انجام خواهد شد.

مرحله اول گردآوری داده‌ها و اطلاعات چاه‌پیمایی و مغزه‌های چاه مورد مطالعه است. در این مرحله اطلاعات چاه‌نگاری چاه مورد مطالعه و نمونه‌های مغزه تهیه می‌شود. در مرحله دوم به مطالعات کتابخانه‌ای درباره موضوع تحقیق و مفاهیم اساسی مورد بحث، مطالعه و جمع‌آوری اطلاعات پرداخته می‌شود. در مرحله سوم براساس داده‌های مرحله اول و اطلاعات مرحله دوم، تبدیل فرمت داده‌ها برای استفاده در نرم‌افزار Geolog و اعمال تصحیحات بر روی آنها انجام می‌شود. در مرحله چهارم به ارزیابی پتروفیزیکی جهت تعیین لیتولوژی، تخلخل، اشباع از آب و میزان هیدروکربن پرداخته می‌شود. سپس در مرحله پنجم، به تعیین کیفیت مخزنی و زون‌های جریان‌ی در مخزن (زون‌های مخزنی) و تحلیل نتایج با استفاده از اطلاعات حفاری و مغزه‌ها پرداخته می‌شود. در مرحله آخر گزارش حاصل از تجزیه و تحلیل نتایج ارائه می‌شود.



## ۱-۶ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در پنج فصل تدوین شده است. در فصل اول کلیات مربوط به این پژوهش، ضرورت تحقیق، پیشینه و اهداف تحقیق مطرح می‌شود. فصل دوم به ارائه مفاهیم بنیادی دخیل در پژوهش و مبانی اصلی تحقیق می‌پردازد. در این فصل انواع نمودارهای چاه پیمایی و مفاهیم پتروفیزیکی ارائه می‌شود. روش کار پژوهش حاضر در فصل سوم شرح داده می‌شود. در این فصل منطقه مورد بررسی نیز معرفی می‌شود. سپس مراحل انجام کار و روابط مورد استفاده برای محاسبه پارامترهای پتروفیزیکی توضیح داده می‌شود. در فصل چهارم نتایج حاصل از این پژوهش ذکر می‌شود و به تحلیل نتایج پرداخته می‌شود. در این فصل نتایج در بخش مطالعه مغزه‌ها در ابتدا ذکر می‌شود و سپس به تجزیه و تحلیل نتایج نمودارگیری چاه پرداخته می‌شود. در فصل پنجم نتیجه‌گیری از این پژوهش ذکر شده و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده بیان می‌شود.



## فصل دوم: اصول بنیادی و مفاهیم تحقیق

تقریباً تمام نفت و گازی که امروزه از مخازن نفتی و گازی استخراج می‌شوند در شرایط طبیعی خود در خلل و فرج موجود در سنگ مخزن قرار دارند. بنابراین شناخت سنگ مخزن و کسب اطلاع بیشتر از لایه‌های تولیدکننده در جهت توسعه بهره‌برداری و افزایش راندمان تولید، تأثیر بسیاری خواهد داشت. یکی از روش‌های متداول برای جمع‌آوری اطلاعات لازم و تحقیق راجع به سنگ مخزن، نمودارگیری از داخل چاه‌ها می‌باشد. این نمودارها به وسیله ابزار بخصوصی که تحت کنترل و توسط سیم رابط به داخل چاه فرستاده می‌شوند، تهیه می‌گردند و بدیهی است هر یک از نمودارها مصرف خاصی داشته و قسمتی از مجهولات را روشن می‌کند. لذا به منظور تجزیه و تحلیل کامل سنگ مخزن و لایه تولیدی و بعضی مشخصات سیال موجود در لایه، لازم است که نمودارهای مختلف تهیه گردند. چاه‌نگاری سیمی<sup>۱</sup> فرآیندی وابسته به پایین بردن دستگاه نمودارگیری با کابل چاه‌نگاری به داخل حفره‌ی چاه برای اندازه‌گیری خواص فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی مخلوط‌های سنگ و سیالی است. چاه‌نگاری معمولاً توسط ابزار و تجهیزاتی که با استفاده از کابل فولادی معلق هستند و یا تجهیزاتی که در رشته حفاری<sup>۲</sup> قرار دارند، صورت می‌گیرد. نتیجه نمودار با استفاده از کابل، یک گراف است که داده‌های حاصل از اندازه‌گیری پیوسته‌ی پارامترها (تخلخل، تراوایی، مقاومت ویژه الکتریکی، میزان اشعه گاما) نسبت به عمق می‌باشد. جنسیت سنگ مخزن، نوع سیال موجود در سنگ، درصد خلل و فرج، دما و فشار لایه‌های مختلف از جمله اطلاعاتی هستند که توسط نمودارها کسب می‌گردند. نقش چاه‌پیمایی در مطالعات اکتشافی هیدروکربن‌ها و ارزشیابی افق‌های حفاری بسیار چشمگیر است. بنابراین در این بخش پس از معرفی مفاهیم پتروفیزیکی در سنگ مخزن به انواع روش‌های چاه‌نگاری پرداخته می‌شود. در این فصل به مفاهیم بنیادی دخیل در پژوهش شامل اصول نمودارگیری چاه و مفاهیم پتروفیزیکی پرداخته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Wireline logging

<sup>۲</sup> Embedded in the drill string (logging while drilling, LWD)

## ۲-۲ مفاهیم پتروفیزیکی

### ۲-۲-۱ میزان تخلخل کل و مؤثر

تخلخل، یکی از ویژگی‌های مهم و اساسی در مطالعات جامع مخزن است و برآورد مقدار صحیح آن در ارزیابی میزان ذخیره مخزن از اهمیت خاصی برخوردار است. به طور معمول، برای تعیین تخلخل در یک مخزن دو روش وجود دارد: روش اول اندازه‌گیری مستقیم تخلخل با انجام آزمایش‌ها بر روی مغزه‌ها است که روشی مشکل، وقت‌گیر و بسیار پرهزینه است و با مسائل و محدودیت‌هایی همراه است. روش دوم که غیرمستقیم است، استفاده از نگارهای چاه است. این روش نسبت به روش اول آسان‌تر است و اطلاعات را به صورت پیوسته از چاه ثبت می‌کند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است (Lin et al., 2016). با وجود این مزایا، پیچیدگی‌های طبیعت ناهمگون زمین و مشکلات و محدودیت‌های عملی ناشی از چاه در قرائت‌های دستگاه‌ها، وضعیتی را به وجود می‌آورد که برای دستیابی به نتیجه قابل قبول، باید تصحیحات لازم اعمال شود. برای انجام این تصحیحات به اطلاعات کافی از نقطه قرائت و زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی آن، شامل ترکیب سنگ، سیالات سازند، لایه‌های ناخالص شیلی، وضعیت دیواره چاه و غیره نیاز است (احمدی و بختیار، ۱۳۹۵).

### ۲-۲-۲ حجم شیل

واژه شیل به گروهی از سنگ‌های رسوبی ریزدانه متورق با اندازه ذرات کوچکتر از  $0.004$  میلیمتر اطلاق می‌شود. به طور معمول برای تخمین حجم شیل در مطالعات پتروفیزیکی از نمودار گاما استفاده می‌شود. نمودار گاما میزان رادیواکتیویته سازند را اندازه‌گیری می‌کند و به منظور شناسایی لیتولوژی و انطباق استفاده می‌گردد. در ماسه‌سنگ‌های تمیز و آهک‌ها تمرکز عناصر رادیواکتیو کم و میزان قرائت نمودار گاما نیز پایین است؛ درمقابل لایه‌های شیلی و ماسه‌سنگ‌های فلدسپاتی میزان قرائت گامای بالایی دارند (Ellis and Singer, 2018). به طور کلی برخی از فرمول‌های تجربی برای محاسبه حجم شیل توسط محققین پیشنهاد شده است؛ به عنوان مثال لارینوف<sup>۱</sup> برای محاسبه حجم شیل برای سنگ‌های با سن

---

<sup>۱</sup> Larinof

ترشیری رابطه‌ی (۱-۲) و سنگ‌های قدیمی‌تر از آن رابطه‌ی (۲-۲) را پیشنهاد نمود که در این روابط برای محاسبه حجم شیل از نمودار گاما استفاده می‌شود (Sahabi, 2009).

$$V_{Sh} = 0.083(2^{3/7GR} - 1) \quad (۲-۱)$$

$$V_{Sh} = 0.33(2^{2GR} - 1) \quad (۲-۲)$$

$V_{sh}$  و GR به ترتیب نشان‌دهنده‌ی حجم شیل و میزان قرائت نمودار گاما می‌باشد.

### ۲-۲-۳ درجه‌ی اشباع از آب

درجه‌ی اشباع از آب ( $S_w$ ) عبارت است از حجمی از تخلخل سنگ که توسط آب اشغال شده ( $V_w$ ) به کل حجم فضای خالی سنگ ( $V_v$ ) که از رابطه‌ی (۲-۳) به دست می‌آید. درجه‌ی اشباع از هیدروکربن ( $S_h$ ) نیز به صورت رابطه‌ی (۲-۴) بیان می‌شود.

$$S_w = \frac{V_w}{V_v} \quad (۲-۳)$$

$$S_h = 1 - S_w \quad (۴-۲)$$

### ۲-۲-۳ روش‌های چاه‌نگاری

چاه‌پیمایی مجموعه‌ای از روش‌هاست که در طی آن اطلاعات پیوسته‌ای از خصوصیات مختلف مخزن ثبت می‌شود. در عملیات چاه‌پیمایی، اطلاعاتی از خصوصیات فیزیکی مخزن شامل خواص سنگ‌ها و همچنین سیالات موجود در آن به دست می‌آید. این نتایج که لاگ نامیده می‌شوند، در توصیف زمین‌شناسی، مهندسی مخزن و مهندسی بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به اهمیت روز افزون چاه-پیمایی، ابزار و روش‌های گوناگونی در این زمینه به وجود آمده و توسعه یافته‌اند، که پیشرفت تکنولوژی-های الکترونیکی و مخابراتی این امر را محقق نموده‌اند. چاه‌نگاری ژئوفیزیکی چاه ابتدا برای صنعت نفت توسط مارسل<sup>۱</sup> و شلومبرژه<sup>۲</sup> در سال ۱۹۲۷ ایجاد شد. برادران ابزار مقاومتی برای تشخیص تخلخل

<sup>۱</sup> Marcel

<sup>۲</sup> Schlumberger

سنگ‌های بستر میدان نفتی در غرب فرانسه ابداع کردند. چاه‌نگاری با استفاده از کابل روشی برای جمع‌آوری اطلاعات مربوط به وضعیت مخازن هیدروکربنی نسبت به طول ایجاد کرده و هدف از آن به دست آوردن اطلاعاتی در رابطه با هیدروکربن است. خواص فیزیکی اعم از مقاومت، چگالی، تشعشع گاما و رزونانس مغناطیسی به صورت تابعی از عمق ثبت می‌شوند. این خواص فیزیکی به خواص پتروفیزیکی سازند تبدیل می‌شود. چاه‌نگاری با استفاده از کابل را می‌توان به دو دسته اعم از چاه‌نگاری حفره باز و حفره پوشانده‌شده<sup>۱</sup> تقسیم کرد. چاه‌نگاری حفره باز بر اساس اندازه‌گیری‌های خواص الکتریکی، صوت و هسته‌ای می‌باشد. در مقابل، چاه‌نگاری دارای لوله جداري شامل اندازه‌گیری‌های هسته‌ای، صوت و مغناطیسی است. در تحقیق حاضر چاه‌نگاری حفره باز مورد توجه است. بعضی از نمودارهای چاه‌نگاری، داده‌های جمع‌آوری شده از سطح را ایجاد می‌کنند. چاه‌نگاری با استفاده از کابل را می‌توان به دو نوع ابزار فعال و گذرا تقسیم کرد. ابزار فعال، پاسخ سازند به بعضی انگیزش در سیال یا سنگ را اندازه‌گیری می‌کنند. مثال‌های برای این مورد عبارتند از ابزار چگالی، نوترونی، مقاومت و تشدید مغناطیسی هسته‌ای. ابزار گذرا وقوع پدیده‌های طبیعی را اندازه‌گیری می‌کنند. برای مثال، تشعشع گامای انتشار یافته توسط اجزای متشکل سازند و یا پتانسیل الکتریکی منجر به تفاوت در شوری گل در چاه و آب سازند می‌شود. نمودارهای چاه‌نگاری اشعه‌ی گاما و پتانسیل خودبه‌خودی<sup>۲</sup> از نوع گذرا هستند ( Schlumberger Ltd., 1989).

### ۲-۳-۱ نمودارهای چاه‌نگاری هسته‌ای

نمودارهای چاه‌نگاری هسته‌ای<sup>۳</sup> رادیواکتیویته‌ی انتشار یافته به صورت طبیعی و یا حاصل بمباران ذره را ثبت می‌کند. مواد رادیواکتیو تشعشعات آلفا، بتا و گاما انتشار می‌دهند که تنها اشعه گاما انرژی نفوذ لازم برای استفاده در چاه‌نگاری چاه را دارند. نوترون‌ها برای تحریک اتم‌های سازند به وسیله‌ی بمباران در چاه‌نگاری مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوترون‌ها انرژی نفوذ بالای داشته و تنها توسط اتم‌های هیدروژن

---

<sup>۱</sup> Cased-hole logging

<sup>۲</sup> Spontaneous potential log

<sup>۳</sup> Nuclear logging

جذب می‌شوند. اتم‌های هیدروژن در سیالات سازند در کاهش نوترون‌ها بسیار مؤثر بوده و بنابراین خاصیت مهمی در چاه‌نگاری محسوب می‌شوند (Schlumberger Ltd., 1989).

- نمودارهای چاه‌نگاری هسته‌ای اصلی شامل موارد زیر است:
- اشعه‌ی گامای طبیعی متداول<sup>۱</sup>
- اشعه‌ی گامای طیفی<sup>۲</sup>
- چگالی سازند<sup>۳</sup>
- اثر فتوالکتریک<sup>۴</sup>
- نوترون جبران شده<sup>۵</sup>

در ادامه در رابطه با هر کدام از موارد فوق توضیح مختصری داده خواهد شد.

## ۲-۳-۱-۱ اشعه‌ی گامای طبیعی متداول (GR)

تشعشع طبیعی به دلیل فروپاشی هسته در زیرلایه صورت می‌گیرد. پتاسیم، توریوم و اورانیوم مواد اصلی هستند که در تشعشع طبیعی نقش دارند. این عناصر در سنگ نفت‌زا<sup>۶</sup> تجمع یافته و در فلدسپات و میکاهای که در بسیاری از سنگ‌های بستر مخازن وجود دارند، دیده می‌شوند. نگار اشعه‌ی گاما، نگار مربوط به اندازه‌گیری این تشعشع طبیعی است. اندازه‌گیری‌ها برای محاسبه‌ی مقدار شیل به عنوان تابعی از عمق استفاده شده و قدرت تفکیک عمودی ابزار تقریباً ۰/۶ m با عمق بررسی ۰/۱۵ m تا ۰/۳ m متناسب با چگالی سنگ بستر می‌باشد. نگار اشعه‌ی گاما برای آنالیز لیتولوژی، تخمین کمی مقدار رس، ارتباط سازندها و عمق تطبیق راندن‌های مختلف دستگاه استفاده می‌شود. نگار اشعه‌ی گامای ساده در

---

<sup>۱</sup> Natuaral gamma ray

<sup>۲</sup> Specetra gamma ray

<sup>۳</sup> Bulk density

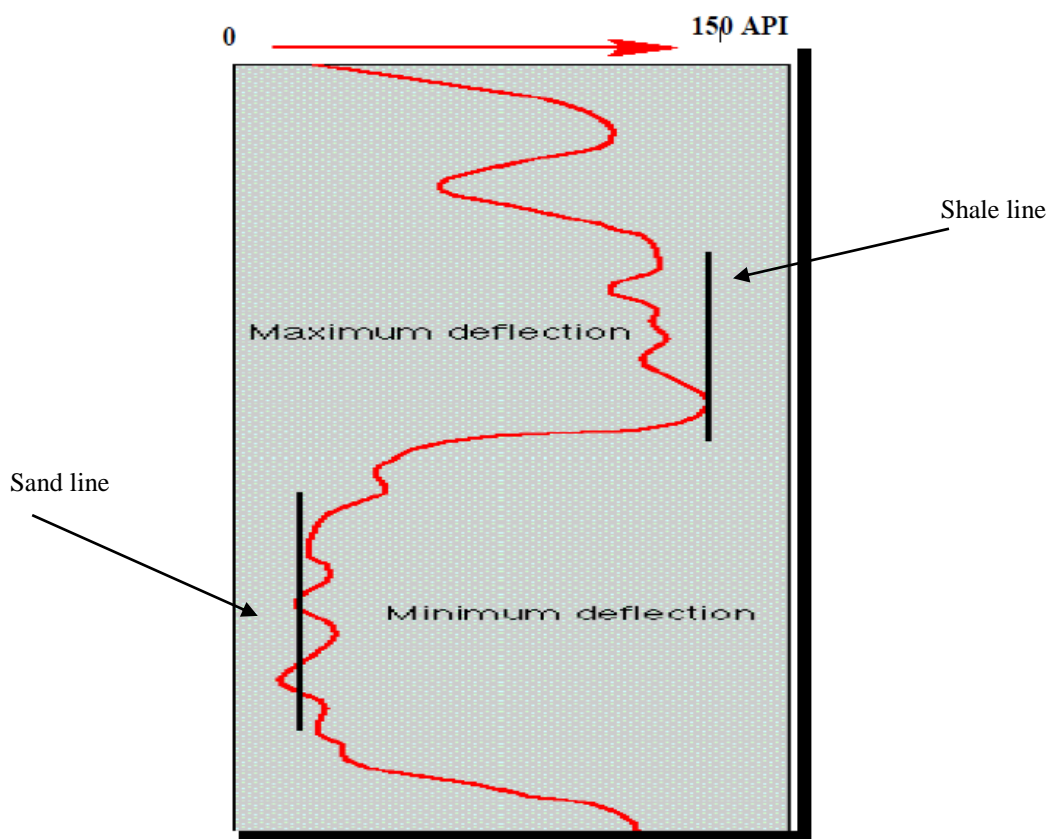
<sup>۴</sup> Photoelectric effect

<sup>۵</sup>Componsated notron log

<sup>۶</sup> shales



شیار قرار گرفته و مقیاس‌ها به صورت محلی انتخاب می‌شوند اما API<sup>۱</sup> بین ۰ تا ۱۰۰ و ۰ تا ۱۵۰ متداول هستند. همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، انحراف نگار اشعه‌ی گاما به راست نشان‌دهنده‌ی شیل بوده و رادیواکتیویته‌ی ماکزیمم و ثابت ثبت شده در سمت راست، خط شیل را نشان می‌دهد. انحراف به چپ اشعه گاما بیانگر ماسه‌سنگ بوده و رادیواکتیو ماکزیمم و ثابت ثبت شده در سمت چپ، خط ماسه‌سنگ را نشان می‌دهد (Russel, 1944). نمونه نگار اشعه‌ی گاما در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- نمودار نگار اشعه‌ی گاما (Russel, 1944).

در ابزار متداول گاما، یک شمارنده جرقه‌ای کل فروپاشی‌ها از منابع موجود در ناحیه‌ی شعاعی نزدیک به حفره را تشخیص می‌دهد. آشکارساز جرقه‌ای، از کریستال سدیم یدید جفت شده با یک لوله‌های

<sup>۱</sup> American petroleum institute

متمرکزکننده نوری برای تشخیص فلاش‌های کوچکی از نور همراه با نفوذهای اشعه‌ی گاما به کریستال استفاده می‌کند (Russel, 1944).

### ۲-۳-۱-۲ اشعه‌ی گامای طیفی (SGR)

نگار اشعه‌ی گامای طیفی پاسخ‌های تکی برای مواد پتاسیم، توریم و اورانیوم ثبت می‌کند. آشکارسازها تشعشع ورودی را در چندین روزنه‌ی انرژی اعم از اشعه‌ی گامای پتاسیم، اشعه‌ی گامای توریم و اشعه‌ی گامای اورانیوم ثبت می‌کنند. در ۳ ابزار روزنه‌ای، غلظت سه عنصر رادیواکتیوی تخمین زده می‌شود. ابزارهای اشعه گامای طیفی مجموع اشعه‌ی گاما را که برابر با نگار گامای متداول است را نیز ارائه می‌دهند (Russel, 1944). کاربردهای اصلی نمودارهای چاه‌نگاری گامای طیفی به صورت زیر است:

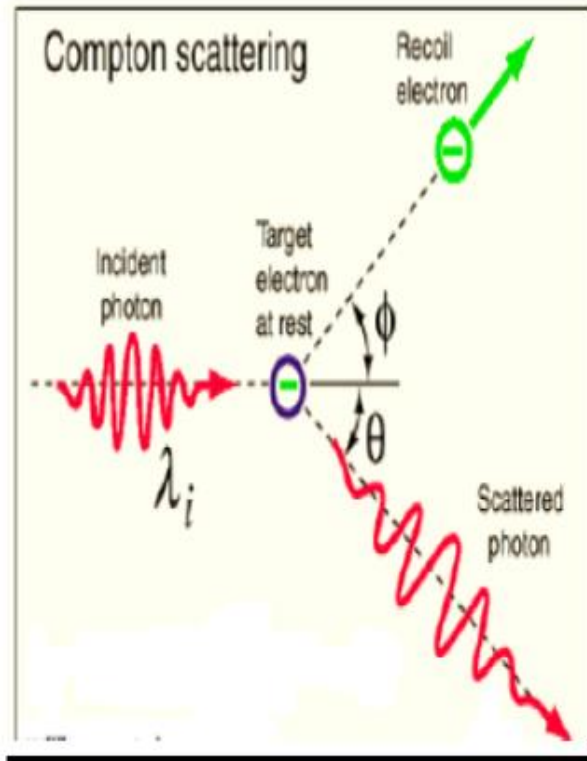
- ارزیابی مقدار رس: نمودارهای چاه‌نگاری طیفی بین انواع رس‌ها و دیگر مواد معدنی رادیواکتیوی از قبیل فسفات را تمییز می‌دهند.
- تشخیص نوع رس: نسبت‌هایی از قبیل توریم به پتاسیم به عنوان شاخصی برای تشخیص نوع رس استفاده می‌شود.

### ۲-۳-۱-۳ نمودارهای چاه‌نگاری چگالی

چاه‌نگاری چگالی از تشعشع تصادفی گاما استفاده می‌کند که منجر به جاذبه‌هایی بین ابر الکترونی و اتم‌های والد آن‌ها می‌شود. روش‌های چاه‌نگاری چگالی عبارتند از چگالی الکترونی توده و چگالی فتوالکترونی. پراکندگی کامپتون<sup>۱</sup> امکان اندازه‌گیری چگالی توده بر اساس غلظت الکترون در میزان عبور گاما را فراهم می‌کند. پاسخ فتوالکتریک در انرژی‌های پایین‌تری که اشعه‌های گاما توسط اتم‌ها جذب شده و سپس اشعه‌های گامای ثانویه از آن‌ها خارج می‌شود، رخ می‌دهد. سهم انرژی پایین طیف توسط اثر فتوالکتریک غالب می‌شود. منبع اشعه‌های گاما با انرژی بالا را که از سازند تا زمان پراکنده شدن عبور می‌کنند، منتشر کرده و سپس به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده، دو آشکارساز یدید سدیم در داخل در ابر قرار گرفته‌اند که بخشی از اشعه‌های پراکنده شده را به دام انداخته و آن‌ها را می‌شمارند (Mimonitu, 2010).

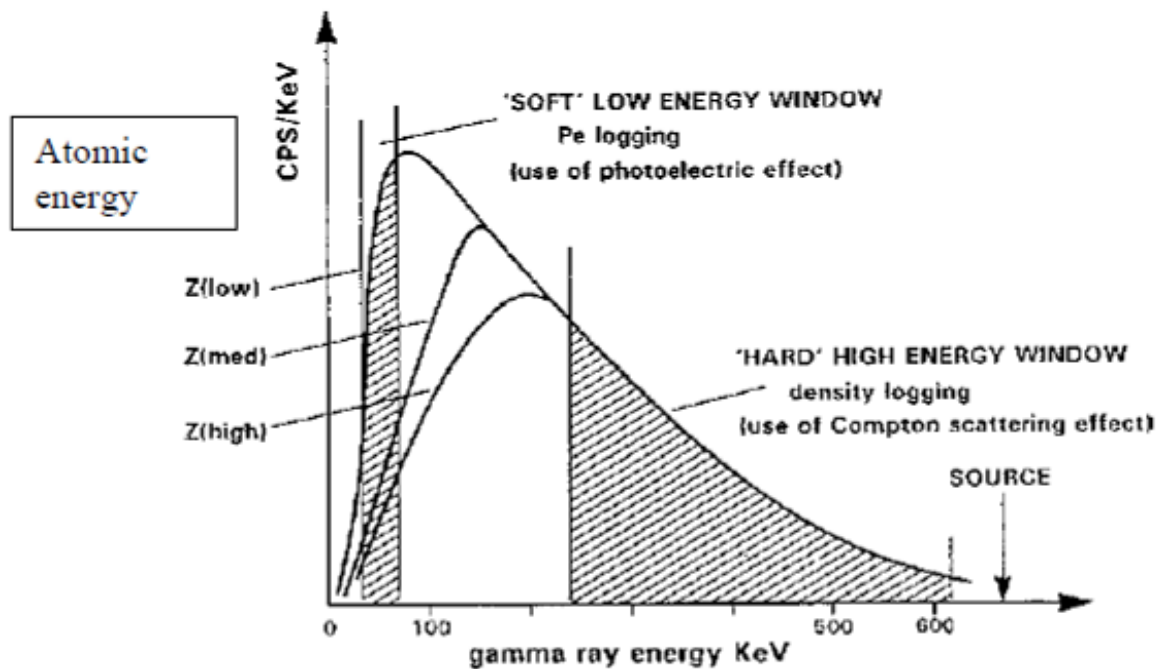
---

<sup>۱</sup> Compton scattering



شکل ۲-۲- پراکندگی کامپتون اشعه‌های گاما (Mimonitu, 2010).

نرخ شمارش در هر آشکارساز متناسب با چگالی الکترونی بستر سنگی و متناسب با چگالی توده است. منبع رادیواکتیوی که در اکثر موارد برای چاه‌نگاری چگالی استفاده می‌شود،  $^{137}\text{Cs}$  است. این به این دلیل است که  $^{137}\text{Cs}$  دارای انرژی  $662 \text{ KeV}$  می‌باشد. همان طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده، این مقدار در مرکز بازه‌ی انرژی‌های که در آن‌ها احتمال پراکندگی کامپتون بالاترین است، قرار دارد. یک نگار چگالی، تعدادی از اشعه‌های گامای کم انرژی را در اطراف ابزار اندازه‌گیری می‌کند. در حقیقت در این نگار، چگالی الکترونی اندازه‌گیری می‌شود (Ellis and Singer, 1987).



شکل ۲-۳- چاه نگاری چگالی و اثر فتوالکتریک و ارتباط آن با انرژی گاما (Ellis and Singer, 1987).

در ابزار چگالی از منبع اشعه‌ی گاما و سه شناساگر استفاده می‌شود. اشعه‌های گامای برگشته به شناساگر متناسب با چگالی الکترونی است. چگالی الکترونی  $\rho_e$  را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۲-۵) و در نهایت به صورت رابطه‌ی (۲-۶) به چگالی توده مواد معدنی ارتباط داد (Ellis and Singer, 1987).

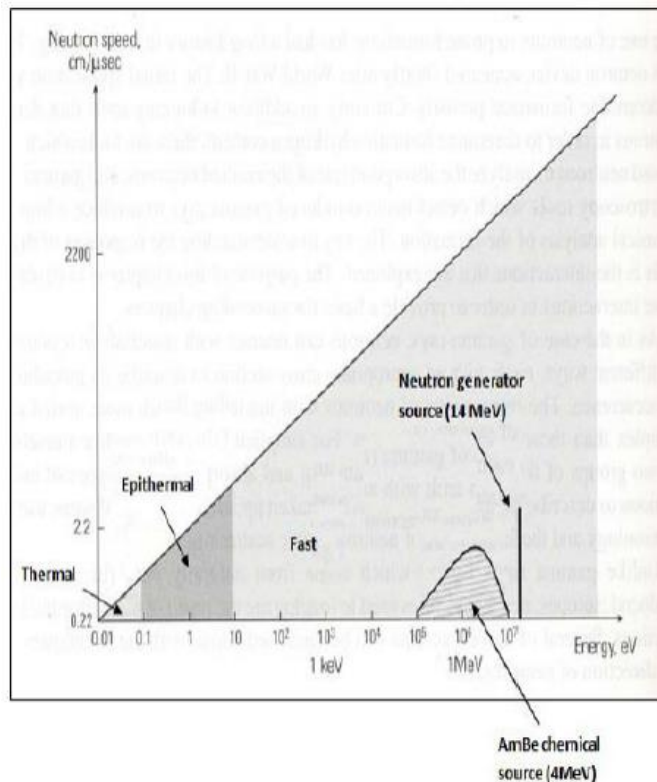
$$\rho_e = \rho \left( \frac{2Z}{A} \right) \quad (۲-۵)$$

به طوری که  $Z$  تعداد الکترون‌ها در اتم و  $A$  وزن اتمی است. چگالی اندازه‌گیری شده به صورت تجربی به فرم رابطه‌ی (۲-۶)، به چگالی الکترونی ارتباط داده می‌شود (Ellis and Singer, 1987).

$$\rho_b = 1.0704\rho_e - 0.1883 \quad (۲-۶)$$

### ۲-۳-۱-۴ نمودارهای چاه‌نگاری نوترونی

در نمودارهای چاه‌نگاری نوترونی، نوترون‌های سریع توسط یک منبع شیمیایی در ابزار چاه‌نگاری مورد نظر آزاد شده و در میان سازند حرکت کرده و با برخورد با اتم‌های هیدروژن از سرعت‌شان کاسته می‌شود. همان طور که در شکل ۲-۴ نشان داده شده، نوترون‌های آرام توسط اتم‌ها با صدور اشعه‌ی گاما در انرژی‌ها و سرعت‌های مختلف به دام می‌افتند (Ellis and Singer, 1987).



شکل ۲-۴- وضعیت انرژی نوترونی در مقابل منبع (Ellis and Singer, 1987).

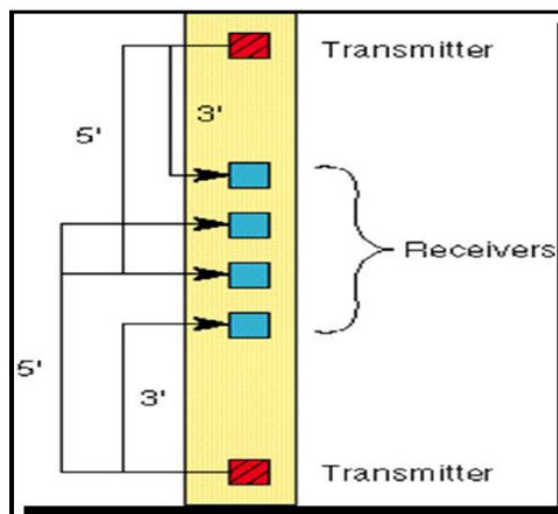
نمودارهای چاهنگاری مختلف، اشعه‌های گامای به دام افتاده، نوترون‌های حرارتی آرام و نوترون‌های اپی‌ترمال (شبه حرارتی با انرژی کمتر از انرژی نوترون) که به صورت نسبی آرام شده‌اند را تشخیص می‌دهند. دو نوع جاذبه وجود دارد که بر شمارش نوترون‌ها در ابزار آشکارساز نمودارگیری تأثیر می‌گذارد. نگار در حضور هیدروژن یا به عبارت بهتر آب در سازند، واکنش می‌دهد. این امر تخلخل اولیه و ثانویه سازند را نشان می‌دهد. سیستم را می‌توان برای تخمین درصد فضای خالی در سنگ‌های ماسه‌ای تمیز، سنگ آهک و دولومیت کالیبره کرد (Ellis and Singer, 1987).

### ۲-۳-۲ نمودارهای چاهنگاری صوت

چاهنگاری صوتی شامل اندازه‌گیری زمان عبور موج فشرده<sup>۱</sup> در زمان و تبدیل آن به سرعت برای کاربردهای لیتولوژی، لرزه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد. نگار صوتی اندازه‌گیری بازه‌های زمانی عبور صوت در

<sup>۱</sup> Compressional wave measurement

سازند ( $\Delta t$ ) را فراهم می‌کند. زمان حرکت یا موج فشرده به دلیل تغییر نوع سنگ و تراکم آن، تغییر می‌کند. موج P (اولیه) یک موج انعکاسی یا بازتابی است که از میان جرم سنگ عبور می‌کند. این موج، موجی سریع بوده و زودتر به مخزن می‌رسد. ابزار صوتی، یک سیگنال صوت ایجاد کرده و مسافت عبوری در میان سنگ را اندازه‌گیری می‌کنند. از این طریق می‌توان به راحتی خواص سازند را به دست آورد. دامنه‌ی سیگنال نیز اطلاعاتی در رابطه با سازند می‌دهد. این ابزار از تعدادی فرستنده و ۴ دریافت‌کننده برای جبران حفرات و شیب ابزار استفاده می‌کند. فضای نرمال بین فرستنده‌ها و دریافت‌کننده‌ها ۳ تا ۵ اینچ است. در شکل ۲-۵، آرایش مربوط به نگار صوتی نشان داده شده است. در شکل ۲-۵، آرایش نشان داده شده است. آرایش نشان داده شده یک فشرده‌سازی آهسته را با اندازه‌گیری اولین زمان‌های ارسال رسیدن ایجاد می‌کند. ابزار متمرکز شده و در هر دقیقه ۶ متر در آب رانده شده و در ۲۰ KHz، ۱۰ بار در ثانیه انتقال می‌دهد. هر رسیدن در هر دریافت‌کننده، ولتاژی ایجاد می‌کند که معرف تعیین زمان عبور است ( Ellis and Singer, 1987).



شکل ۲-۵- موقعیت فرستنده‌ها و دریافت‌کننده‌ها در نگار صوتی (Mimonitu, 2010).

نگار صوتی در سنگ‌های رسوبی، نگار تخلخل محسوب می‌شود به طوری که نتایج آن قابل مقایسه با نتایج نمودارهای چاه‌نگاری چگالی و نوترون است. علاوه بر این، هیچ‌گونه کالیبراسیونی برای نگار صوتی در اندازه‌گیری تخلخل لازم نیست. اما نگارهای نوترون و چگالی نسبت به سنگ آهک باید کالیبره شوند.

معادله‌ی پایه برای تخلخل صوتی، متوسط زمانی وایلی<sup>۱</sup> است که به صورت رابطه‌ی (۷-۲) می‌باشد (Mimonitu, 2010).

$$\Phi = \frac{\Delta t_{\log} - \Delta t_{ma}}{\Delta t_f - \Delta t_{ma}} \quad (۲-۷)$$

به طوری که  $\Phi$  تخلخل صوتی،  $\Delta t_{\log}$  زمان ثبت شده توسط نگار صوتی،  $\Delta t_{\max}$  زمان سیر موج صوتی در ماتریکس سنگ و  $\Delta t_f$  زمان سیر موج در سیال گل می‌باشد. در جدول ۱-۲، زمان‌های سیر موج صوتی در بعضی از سنگ‌ها ارائه شده است.

جدول ۱-۲- زمان معمول سیر موج صوتی در بعضی سنگ‌ها (Rider MH, 1996).

نوع ماده‌ی معدنی (سنگ)	زمان سیر موج صوتی از ماتریکس سنگ ( $\Delta t_{\max}$ ) (میلی ثانیه)
ماسه سنگ	۵۵-۵۱
سنگ آهک	۴۷/۶-۵۳
دولومیت	۳۸/۴۵-۵
انیدریت	۵۰
نمک	۹۰-۶۷
شیل	۶۲/۱۶۷-۵

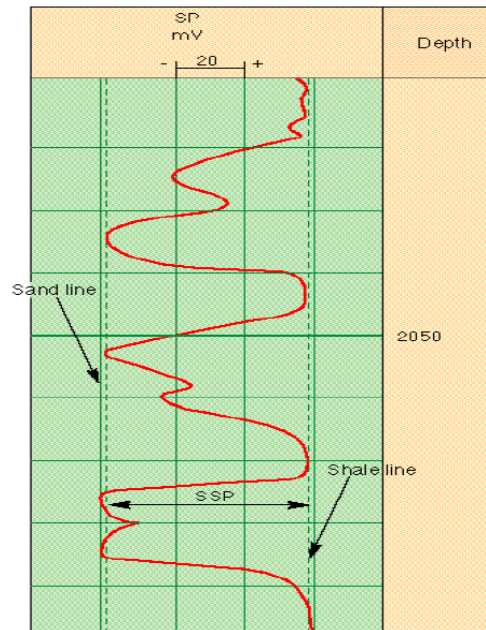
### ۳-۳-۲ نمودارهای چاه‌نگاری الکتریکی

نمودارهای چاه‌نگاری الکترونی خواص الکتریکی سازند در بازه‌های فرکانسی مختلف را تعیین می‌کنند. نمودارهای چاه‌نگاری مقاومتی و چاه‌نگاری پتانسیل خودزا در این دسته هستند (Rider MH, 1996).

<sup>۱</sup> Wyllie

## ۲-۳-۱ نمودارهای چاهنگاری پتانسیل خودزا

نگار پتانسیل خودزا عبارت است از اندازه‌گیری ولتاژهای الکتریکی بسیار کوچک حاصل از جریان‌های الکتریکی در گمانه یا چاه که در نتیجه‌ی اختلاف بین شوری آب سازند و جریان فیلتر شده گل حفاری به وجود آمده است. تغییرات ولتاژ توسط الکترودهای قرار گرفته در داخل حفره نسبت به سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود. پتانسیل خودزا دارای مقیاس میلی‌ولت است. پتانسیل‌های خوانده شده برای شیل با تغییر عمق اندکی تغییر می‌یابند. همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است، انحراف‌های منفی و به سمت چپ خط پایه‌ی شیل، در سنگ‌های متضاد رخ داده و در سنگ‌های متخلخل تمیز به ماکزیمم می‌رسد. در صورتی که گل حفاری شورتر از آب سازند باشد، پتانسیل خودزا مثبت و در غیر این صورت منفی است (Mimonitu, 2010).



شکل ۲-۶- منحنی پتانسیل خودبه خودی، پتانسیل خود به خودی استاتیک و خط شیل (Mimonitu, 2010).

نگار پتانسیل خودزا برای تعیین مقاومت آب با استفاده از رابطه‌ی (۲-۴):

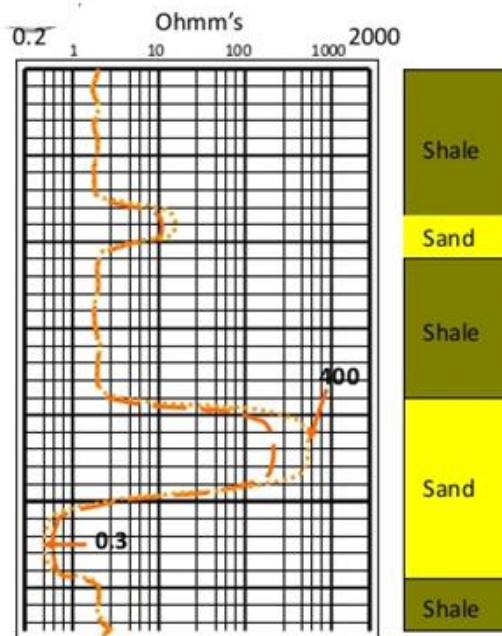
$$SSP = -k \log \frac{R_{mfe}}{R_{we}} \quad (2-4)$$

به طوری که  $K$ ، ثابت وابسته به دمای سازند،  $R_{mf}$  مقاومت ویژه تراویده (فیلتر) در دمای مخزن،  $R_{we}$  مقاومت ویژه معادل آب و  $SSP$  مقدار پتانسیل خودزا است.



## ۲-۳-۳-۲ نمودارهای چاهنگاری مقاومتی

نمودارهای چاهنگاری مقاومتی با استفاده از قانون اهم و جریان مستقیم، مقاومت ویژه سازند را اندازه‌گیری می‌کنند. مقاومت یک ماده به توانایی آن در جلوگیری از جریان یافتن جریان الکتریکی اطلاق می‌گردد. سیستم اندازه‌گیری پایه شامل دو الکتروود جریان و دو الکتروود پتانسیل است. مقاومت ویژه تعیین کننده اشباع هیدروکربن و واحد اندازه‌گیری آن اهم‌متر بوده و در مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود. نمودارهای چاهنگاری مقاومتی خود شامل سه دسته اعم از نمودارهای چاهنگاری القایی، نمودارهای چاهنگاری جانبی و اندازه‌گیری‌های میکرومقاومت هستند. شکل ۲-۷ یک نگار مقاومتی را نشان می‌دهد. در این نگار، مقاومت با عمق نفوذ کوتاه و زیاد در نظر گرفته شده است. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، در لیتولوژی شیل نمودار مقاومتی مقدار کم را نشان می‌دهد و دو نگار بر روی هم منطبق شدند، این بیانگر حضور آب در این بخش است. اما در لیتولوژی ماسه سنگی نگار مقاومتی مقدار مقاومت بیشتر را نشان می‌دهد، این نشان‌دهنده عدم حضور آب در سازند است. همچنین فاصله بین دو نگار (مقاومتی با عمق نفوذ کم و زیاد) در این بخش نشان‌دهنده حضور هیدروکربن است (Mimonitu, 2010).



شکل ۲-۷- نمونه‌ای از نمودار مقاومتی در عمق چاه (Mimonitu, 2010).

## ۲-۴ جمع‌بندی

بنابر آنچه در این فصل ذکر شد، نمودارگیری از چاه یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش برای دستیابی به اطلاعات زیرزمینی در یک سازند است که در آن چاه حفاری شده است. چاه‌نگاری دارای روش‌های مختلفی است که هرکدام از این روش‌ها با توجه به یک خصوصیت خاص سازند به وجود آمده‌اند. بنابراین با روش‌های مختلف چاه‌نگاری می‌توان اطلاعات مختلفی در زمینه لیتولوژی، اشباع از سیالات، تخلخل، تراوایی و ... به دست آورد. از اطلاعاتی که به کمک چاه‌نگاری به دست می‌آیند می‌توان برای ساخت مدل پتروفیزیکی مخزن و تعیین زون‌های مختلف با توجه به بافت سنگ و سیال استفاده کرد. ساخت یک مدل پتروفیزیکی مناسب با کمک نمودارگیری و اطلاعات مغزه می‌تواند به تولید بهتر از مخزن کمک کند

## فصل سوم: روش انجام تحقیق

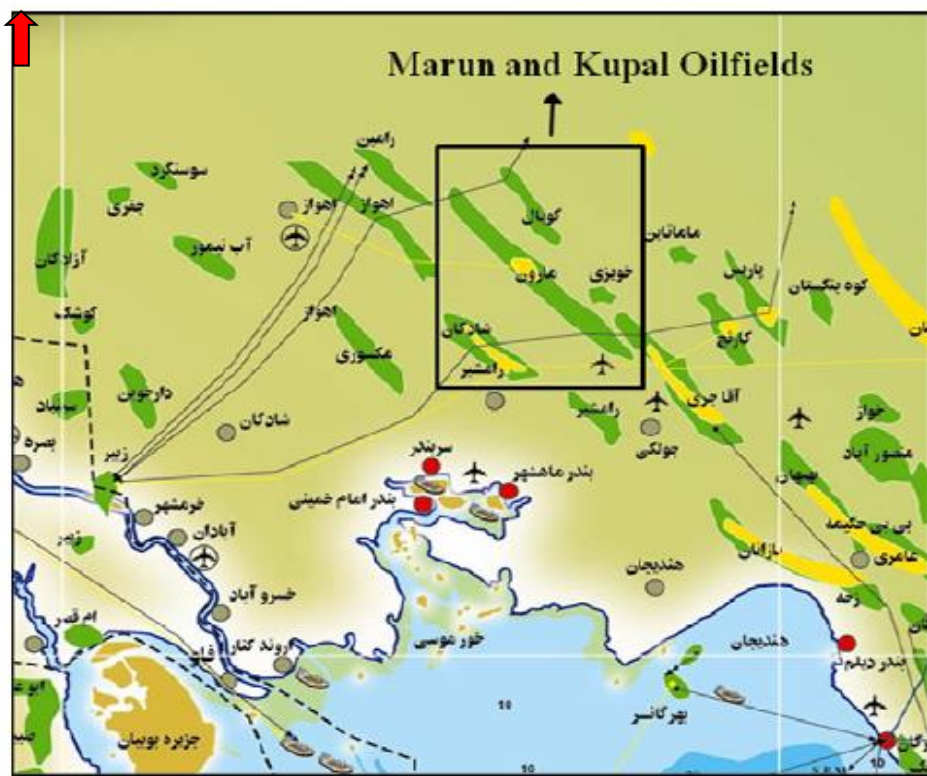
### ۳-۱ مقدمه

ارزیابی پتروفیزیکی سازندهای مخزنی بر مبنای تفسیر اطلاعات نمودارهای چاهنگاری پتروفیزیکی و مغزه‌ها به منظور بررسی کیفیت و زون‌بندی مخازن جهت تعیین توالی‌هایی با نرخ تولید مناسب، انجام می‌شود. شناخت نوع لیتولوژی، محاسبه پارامترهای مخزنی از قبیل حجم شیل، میزان تخلخل کل و مؤثر و درجه اشباع از آب در ارزیابی پتروفیزیکی به جهت پی‌بردن به کیفیت مخزنی سازندها و مدل‌سازی مخازن امری ضروری است. در تحقیق حاضر تلاش می‌شود تا با استفاده از نرم‌افزار Geolog 7.1، لیتولوژی، تخلخل، اشباع از آب و میزان هیدروکربن در ناحیه‌ی نفت‌خیز میدان کوپال که یکی از میداین بزرگ ناحیه فروافتادگی دزفول می‌باشد، به دست آید. برای رسیدن به هدف پژوهش از تحلیل پتروفیزیکی به وسیله نمودارگیری و آنالیز مغزه استفاده می‌شود. به طوری که داده‌های نمودارگیری از چاه مورد مطالعه در اختیار قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر نمونه مغزه تهیه شده و مورد آنالیز معمول آزمایشگاهی قرار گرفت. همچنین تعداد دو عدد مقطع نازک نیز در دو عمق مختلف از مغزه‌ها برای تشخیص بافت سنگ و فسیل آن تهیه شد. در فصل حاضر پس از معرفی منطقه مورد مطالعه به روش‌های در نظر گرفته برای رسیدن به هدف پژوهش ذکر می‌شود.

### ۳-۲ ناحیه‌ی مورد مطالعه

میدان کوپال یکی از میداین بزرگ ناحیه فروافتادگی دزفول می باشد که در جنوب شرقی اهواز قرار گرفته شده است. سازندهای ایلام و سروک مخازن هیدروکربنی این میدان می باشند. میدان نفتی کوپال در ناحیه دزفول شمالی به صورت تاقدیس کشیده شده است. بلندی اصلی میدان در غرب قرار گرفته است و بر روی سطح تماس آب و نفت خود دارای ۴۰ کیلومتر طول و ۴ کیلومتر عرض می باشد، حال آنکه بلندی بخش شرقی با تنها چاه خود ۱/۵ کیلومتر عرض حدود ۸ کیلومتر طول داشته و از ستون نفت کمتری نیز برخوردار می‌باشد. ذخایر نفت میدان کوپال حدود ۱/۱ میلیارد بشکه و ذخایر گاز آن ۵ تریلیون فوت‌مکعب برآورد می‌شود. در سازند بنگستان، نفت خام کوپال با درجه ۲۶ API دارای ۲ درصد

وزنی گوگرد است. سنگ‌های مخزنی مورد مطالعه میادین مارون و کوپال، سازندهای ایلام و سروک است که غالباً دارای لیتولوژی کربناته هستند. شکل ۳-۱ نقشه جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- موقعیت میدان کوپال در فروافتادگی دزفول (شرکت مناطق نفت خیز جنوب).

### ۳-۳ روش کار

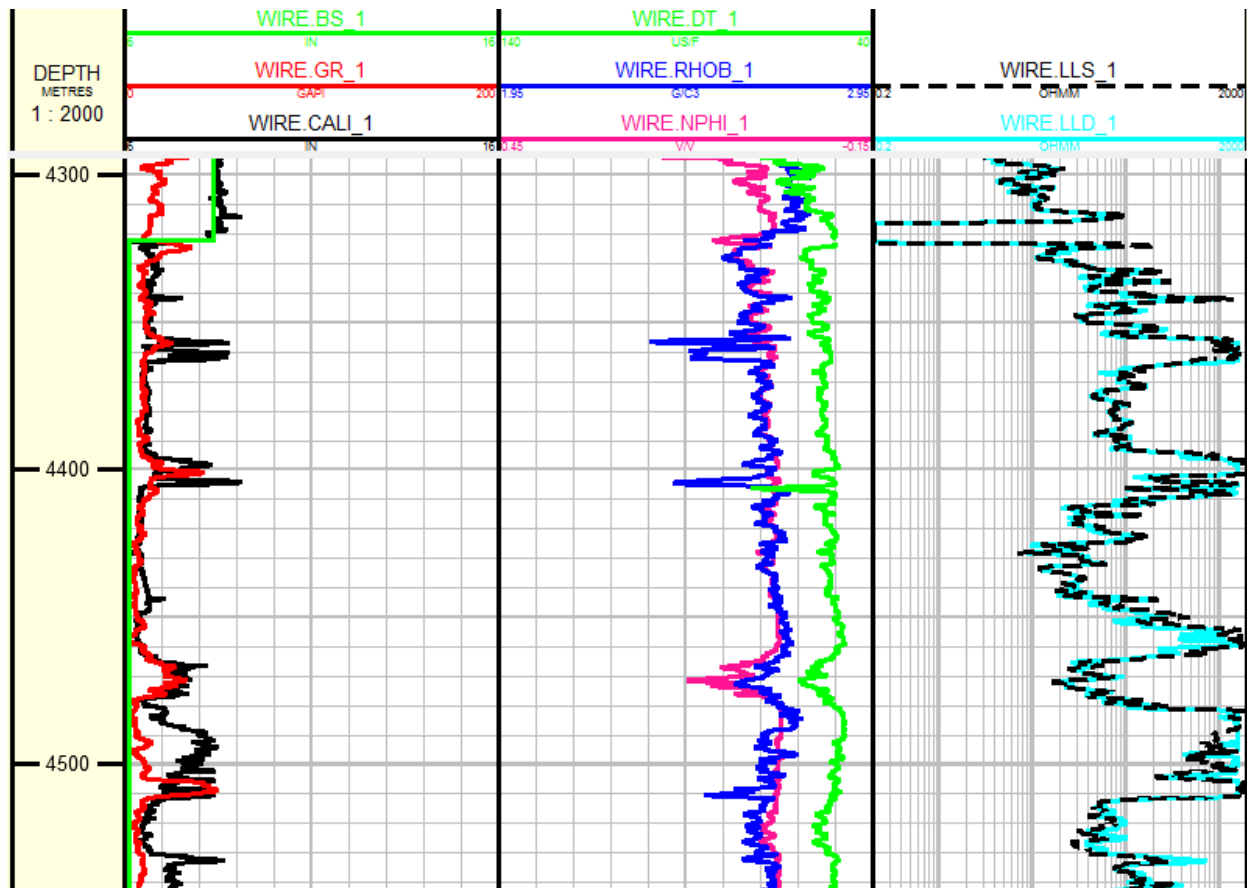
در این پژوهش به منظور شناخت بهتر سازند حفاری شده از داده‌های آزمایشگاهی مغزه و تحلیل نرم‌افزاری نمودارهای چاه‌نگاری استفاده می‌شود. در این قسمت ابتدا به روش کار استفاده از داده‌های چاه‌نگاری پرداخته می‌شود و سپس روش کار آزمایشگاهی مطالعه مغزه بیان می‌شود.

### ۳-۳-۱ آنالیز پتروفیزیکی به کمک داده‌های نمودارگیری

در کل اطلاعات مربوط به پاسخ‌های نمودارهای چاه‌نگاری متداول چاه carb-04 در ناحیه‌ی مورد مطالعه اعم از نمودارهای چاه‌نگاری اشعه‌ی گاما، نمودارهای چاه‌نگاری قطر سنجی<sup>۱</sup>، مقاومت ویژه الکتریکی با برد بسیار کوتاه، کوتاه و بلند، نمودارهای تخلخل شامل چگالی، نوترونی و صوتی در دسترس بودند. پس از بارگذاری و چک داده‌های چاه‌پیمایی، مشخص می‌شود که داده‌ها مربوط به عمق ۴۲۲۵ تا ۴۸۵۴ متری هستند. مرحله‌ی بعدی، آماده‌سازی داده‌های چاه‌پیمایی برای ارزیابی پتروفیزیکی، جایگزینی داده‌های چاه‌پیمایی با کیفیت کم با داده‌های سنتزی است. به طور کلی نمودارهای چاه‌نگاری اصلی برای ارزیابی پتروفیزیکی همگی هم‌تراز می‌شوند. بدین صورت داده‌های سنتزی نگار چگالی با استفاده از رگرسیون خطی منحنی‌های سایر نمودارهای چاه‌نگاری بدست می‌آید. فرمول رگرسیون با اعمال آنالیز رگرسیون برای نمودارهای چاه‌نگاری چاه carb-04 در محل‌های که داده‌های چگالی کیفیت خوبی دارند حاصل می‌شود. در ادامه، منحنی چگالی سنتز شده با نگار چگالی اندازه‌گیری شده مقایسه می‌شود. سپس منحنی سنتز شده جایگزینی منحنی اندازه‌گیری می‌شود. هم‌ترازی یک مرحله‌ی بسیار مهم می‌باشد، زیرا آنالیزهای تخلخل، حجم رس و آنالیز فیزیک سنگ به شدت وابسته به داده‌های نگار چگالی است. همان طور که شکل ۳-۲ در زیر نشان می‌دهد، گراف نمودارهای مختلف چاه مورد مطالعه ایجاد شد.

---

<sup>۱</sup> Caliper



شکل ۳-۲- بخشی از گراف نمودارهای چاه پیمایی در چاه مورد مطالعه.

در شکل ۳-۲ نمودارهای پتروفیزیکی شامل پرتو گاما (رنگ قرمز، Wire\_GR)، تغییر قطر دهانه چاه (رنگ سیاه، Wire\_CALI)، چگالی (رنگ آبی، Wire\_RHOB)، نوترون (رنگ صورتی، Wire\_NPHI)، سرعت عبور صوت در سازند (رنگ سبز، Wire\_DT)، مقاومت ویژه الکتریکی برد بسیار کوتاه (رنگ سبز یشمی با خط بریده بریده، Wire\_MSFL)، مقاومت ویژه الکتریکی برد کوتاه (رنگ سیاه خط بریده بریده، Wire\_LLS) و مقاومت ویژه الکتریکی برد بلند (رنگ آبی روشن، Wire\_LLD) از چاه مورد مطالعه است. از نمودارهای چگالی، نوترون و سرعت صوت برای تعیین تخلخل و لیتولوژی سازند استفاده می‌شود. از نمودارهای مقاومتی برد بلند، کوتاه و بسیار کوتاه برای تشخیص زون هیدروکربنی از زون محتوی آب و همچنین برای تشخیص اشباع از آب استفاده می‌شود. از نمودار پرتو گاما برای تشخیص لایه‌های شیلی استفاده می‌شود. لازم است تا به منظور حصول اطمینان از قابل اطمینان بودن روند اصلاح و هم‌ترازی، داده‌های هم‌تراز شده با استفاده از روش‌های کنترل کیفیت تایید شوند. بنابراین در تحقیق حاضر، از

منحنی‌های متقاطع به منظور کنترل کیفیت داده‌های هم‌تراز شده استفاده می‌شود. یکی از شرایط مهم برای مدل‌سازی فیزیک سنگ این است که داده‌های ورودی چاه در نواحی مختلف متناسب باشد در غیر این صورت تغییرات زمین‌شناسی قابل توجهی مشاهده می‌گردد. بنابراین، بدون داده‌های ورودی چاه‌پیمایی متناسب، ایجاد یک مدل فیزیکی برای سنگ بستر ممکن نیست.

### ۳-۳-۱-۱-۱ ارزیابی پتروفیزیکی

تجزیه تحلیل پتروفیزیکی با خواصی چون تخلخل، تراوایی، اشباع از آب، تعیین سیال، مقاومت و ... به خصوص در سنگ‌های مخزنی و سیالات حاوی آن سر و کار دارد (Kumar et al., 2018). این خواص و رابطه‌ی بین آن‌ها برای تعیین و ارزیابی سنگ مخزن استفاده می‌شود. تجزیه تحلیل پتروفیزیکی، داده‌های ورودی مناسبی برای مطالعات فیزیک سنگ و ارزیابی خواص پتروفیزیکی آن را تأمین می‌کند. با تجزیه و تحلیل داده‌های نمودارگیری می‌توان به نوع لیتولوژی، توزیع تخلخل، توزیع اشباع آب، حضور هیدروکربن و در نهایت زون‌بندی مخزن پرداخت. در این قسمت به این موارد اشاره می‌شود.

### ۳-۳-۱-۱-۲ تشخیص لیتولوژی

حجم لایه‌ی رس با استفاده از نمودارهای چاه‌نگاری اشعه‌ی گاما و یا ترکیبی از نمودارهای چاه‌نگاری اشعه‌ی گاما و چگالی-نوترونی محاسبه می‌گردد. زمانی که ترکیبی از شاخص‌های رسی مختلف استفاده شود، محاسبه‌ی حجم رس برای هر شاخص انجام شده و حجم نهایی رس در هر عمق، حداقل حجم رس برای شاخص‌ها می‌باشد. در جاهایی که دو منحنی با هم تطابق نداشته باشند، نظر نهایی بر اساس دیگر شاخص‌های حجم رس اعم از نمودارهای چاه‌نگاری خود به خودی، مقاومت، صوتی و ... داده می‌شود. حجم رس با استفاده از شاخص اشعه‌ی گاما، از رابطه (۳-۱) به دست می‌آید. در شکل ۳-۳، حجم‌های رس محاسبه شده از روش‌های مختلف و نمودارهای چاه‌نگاری اشعه‌ی گاما نشان داده شده است (Kumar et al., 2018).

(۳-۱)

$$VCL = 0.0006078 \times (100 \times I)^{1.58527} \quad I \leq 0.55$$

$$VCL = 2.1212 \times I - 0.81667 \quad 0.55 < I < 0.73$$

$$VCL = I \quad I \geq 0.73$$

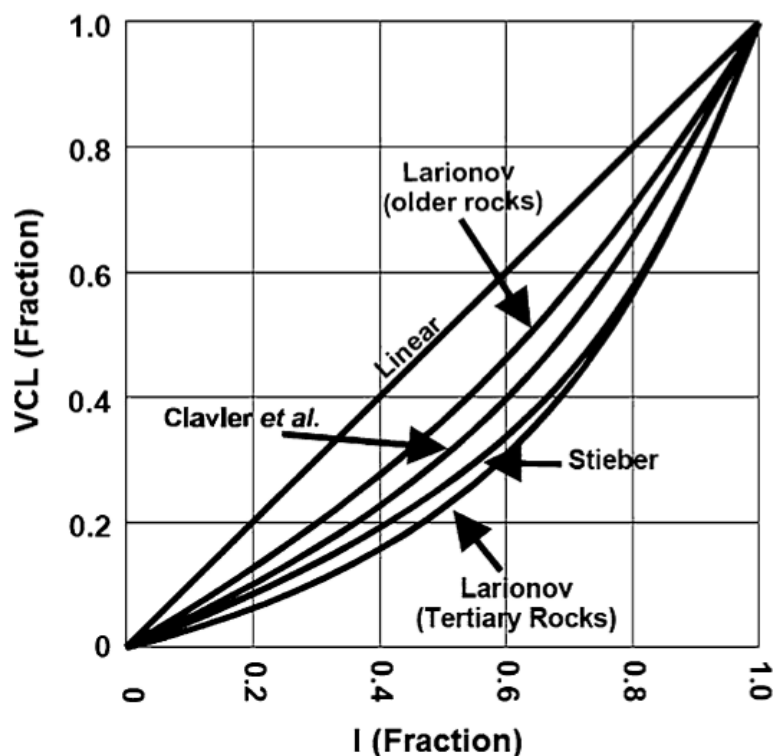
در رابطه‌ی فوق I بر اساس رابطه‌ی (۳-۲) محاسبه می‌شود.



(۳-۲)

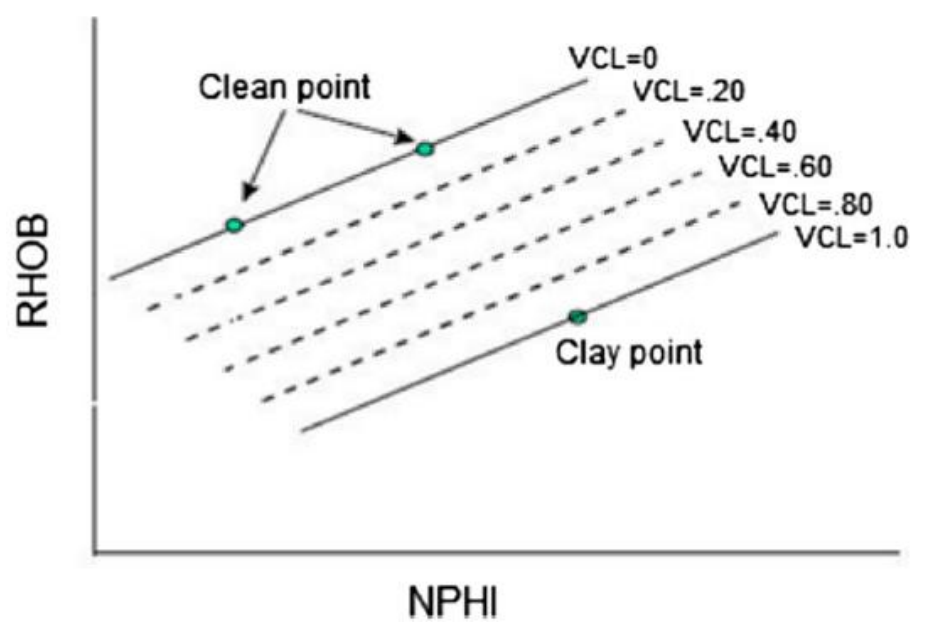
$$I = \frac{GR_{log} - GR_{clean}}{GR_{clay} - GR_{clean}}$$

که در آن  $GR_{log}$  مقدار گاما در عمق مورد نظر،  $GR_{clean}$  مقدار گاما در عمقی که نمودار کمترین مقدار گاما را دارد،  $GR_{clay}$  مقدار گاما در عمقی که نمودار بیشترین مقدار گاما را دارد.



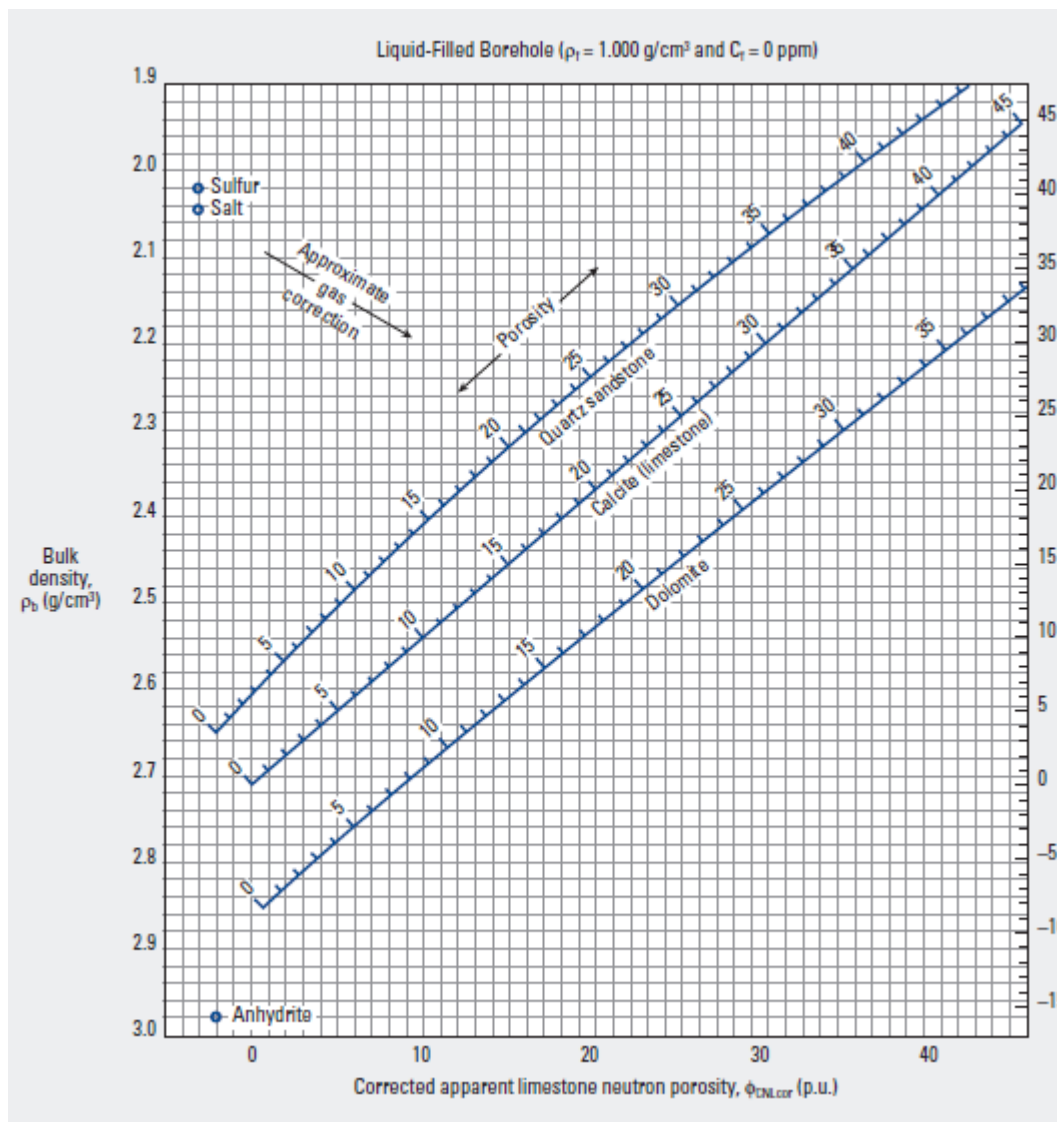
شکل ۳-۳- مقادیر حجم رس محاسبه شده بر اساس نگار اشعه‌ی گاما با استفاده از روش‌های مختلف (Kumar et al., 2018).

در شکل ۳-۴، نحوه‌ی محاسبه‌ی حجم رس با استفاده از منحنی متقاطع، چگالی-نوترون نشان داده شده است. نقاط تمیز به عنوان خط  $VCL=0$  تعریف می‌شود. خط رس  $VCL=1$  به موازات خط تمیز بوده و از نقطه‌ی رس عبور می‌کند. خطوط  $VCL$  به صورت موازت بین این دو خط رسم می‌شوند. در پژوهش حاضر چون نمودار SGR در دسترس نیست و تنها نمودار پرتو کلی گاما در اختیار است، بنابراین تشخیص حجم شیل امکان پذیر نیست. هرچند، نمودار پرتو کلی گاما نیز مقدار قابل توجهی را در سازند مورد مطالعه نشان نمی‌دهد.



شکل ۳-۴- نمودار حجم رس محاسبه شده با استفاده از نمودار متقاطع چگالی و تخلخل نوترون (Kumar et al., 2018).

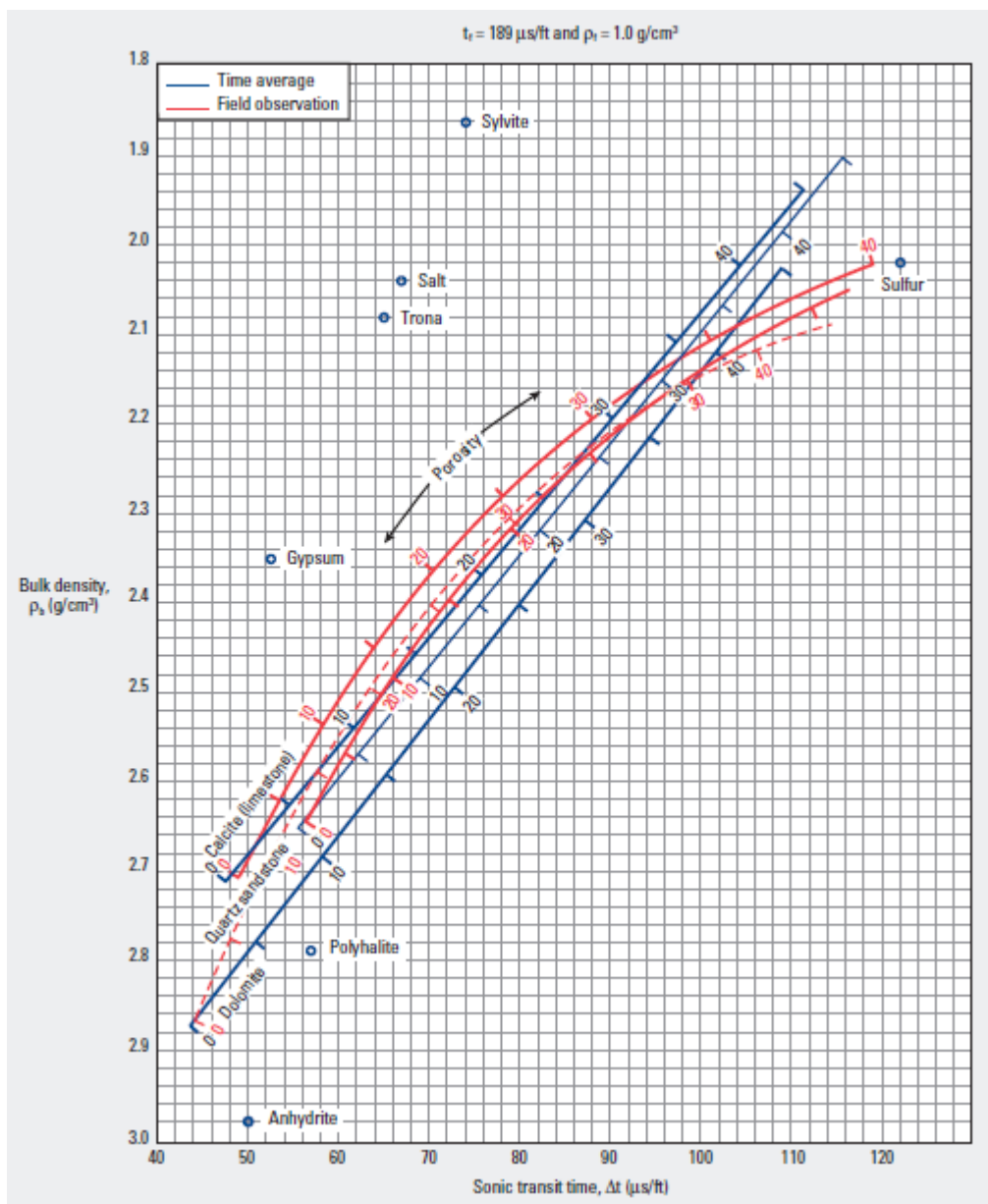
برای تشخیص لیتولوژی در این پژوهش از ترکیب نمودارهای چگالی، نوترون و سرعت صوت کمک گرفته می‌شود. به طوری که نمودارهای متقاطع نوترون- چگالی و صوتی- چگالی ایجاد شده و با مقایسه با چارت‌های استاندارد نوع لیتولوژی تشخیص داده می‌شود. تعیین لیتولوژی برای چاه مورد مطالعه علاوه بر آن که در کل عمق نمودارگیری چاه انجام می‌شود، برای بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر نیز انجام می‌شود. برای تعیین لیتولوژی در نرم‌افزار Geolog نمودار متقاطع نوترون- چگالی رسم می‌شود. برای تشخیص لیتولوژی در این حالت، همان‌طور که شکل ۳-۵ نشان می‌دهد از چارت استاندارد CP-15 که از مجموعه چارت‌های استاندارد شرکت شلومبرژه است، استفاده می‌شود. همان‌طور که شکل ۳-۵ نشان می‌دهد، سه نوع سنگ دولومیت، کلسیت و ماسه‌سنگ در آن مشخص شده است. با توجه به این که توزیع داده‌های نمودارهای نوترون و چگالی در چه فواصلی از این خطوط قرار می‌گیرد، لیتولوژی تعیین می‌شود.



شکل ۳-۵- نمودار مدل سنگ‌شناسی تخلخل نوترونی- چگالی (چارت استاندارد CP-15 شلومبرژه).

علاوه بر نمودار متقاطع نوترون- چگالی، برای تفکیک بهتر و تشخیص لیتولوژی از نمودار متقاطع صوتی- چگالی نیز برای تشخیص لیتولوژی استفاده می‌شود. برای تحقق این هدف، ابتدا نمودار متقاطع صوتی- چگالی در نرم‌افزار Geolog ایجاد می‌شود، سپس توزیع نقاط حاصل از نمودارهای سرعت عبور صوت و چگالی در چارت استاندارد CP-7 از مجموعه چارت‌های استاندارد شرکت شلومبرژه برای تشخیص لیتولوژی استفاده می‌شود. شکل ۳-۶ در زیر چارت استاندارد CP-7 را نشان می‌دهد. در این چارت نیز سه

خط برای تفکیک لیتولوژی کلسیت، دولومیت و ماسه سنگ تعبیه شده است. با توجه به این که توزیع داده‌های نمودارگیری به چه صورت است، نوع لیتولوژی مشخص می‌شود.



شکل ۳-۶- نمودار متقاطع سرعت عبور صوت- چگالی برای تشخیص لیتولوژی (چارت استاندارد CP-7 شلومبرژه).

### ۳-۱-۱-۲ محاسبه‌ی تخلخل و اشباع از آب

میزان تخلخل را می‌توان با استفاده از توزیع داده‌های نمودار چگالی، نوترون و سرعت عبور صوت مطابق چارت‌های استاندارد CP-15 و CP-7 همان‌طور که در بخش قبل ذکر شد، قرائت کرد. اما برای تعیین دقیق تخلخل در عمق‌های مختلف و ایجاد نمودار توزیع تخلخل در چاه مورد مطالعه می‌توان از بخش دیگر نرم‌افزار Geolog کمک گرفت. بدین منظور، تخلخل با استفاده از روش Multimin و نمودارهای چاه‌نگاری چگالی و نوترون محاسبه می‌شود. نقاط انتهایی رس که برای محاسبات تخلخل استفاده شده، همان نقاط برای محاسبات حجم رس می‌باشد. تخلخل مؤثر به کمک رابطه‌ی (۳-۳) و با استفاده از نمودار متقاطع نوترونی- چگالی محاسبه می‌شود (Bateman, 1985).

$$\phi_e = \frac{\phi_D \times \phi_{N_{sh}} - \phi_N \times \phi_{D_{sh}}}{\phi_{N_{sh}} - \phi_{D_{sh}}} \quad (3-3)$$

در رابطه‌ی فوق  $\phi_e$  تخلخل مؤثر،  $\phi_D$  تخلخل چگالی،  $\phi_{N_{sh}}$  تخلخل نوترونی شیل،  $\phi_N$  تخلخل نوترونی،  $\phi_{D_{sh}}$  تخلخل چگالی شیل می‌باشد. تخلخل‌های  $\phi_D$  و  $\phi_N$  در رابطه‌ی فوق تاثیر هیدروکربن موجود در بستر را اصلاح می‌کند. با استفاده از رابطه‌ی (۳-۴) محاسبه می‌گردد.

(۳-۴)

$$\phi_D = \frac{\left( \delta_{ma} - \delta + 1.07 \left( \frac{R_{mf}}{R_{xo}} \right)^{0.5} (1.11 - 1.24 \delta_h) \right)}{(\delta_{ma} - 1 + 1.07 (1.11 - 1.24 \delta_h))}$$

در رابطه‌ی فوق،  $\delta_{ma}$  چگالی ماتریس،  $\delta$  چگالی حاصل از نگار،  $\delta_h$  چگالی هیدروکربن،  $R_{mf}$  مقاومت گل،  $R_{xo}$  مقاومت ناحیه‌ی شسته شده<sup>۱</sup> و  $\phi_D$  تخلخل اصلاح شده‌ی هیدروکربن باقی‌مانده می‌باشد. تخلخل حاصل از نمودارهای چاه‌نگاری نوترونی  $\phi_N$  با استفاده از رابطه‌ی (۳-۵) محاسبه می‌شود (Dresser, 1981).

<sup>۱</sup> Flushed zone

(۳-۵)

$$\phi_N = \frac{\phi_{na}}{(1 - S_{hr}) \left( \frac{\delta_{mf}(1 - P) - \delta_h - 0.3}{\delta_{mf}(1 - P)} \right)}$$

در رابطه‌ی فوق،  $\phi_{na}$  تخلخل نوترونی آشکار، P شوری گل و  $\phi_N$  تخلخل نوترونی اصلاح شده است.

اشباع آب در شیل با استفاده از مدل پپون-لووکس<sup>۱</sup>، رابطه‌ی (۳-۶) محاسبه می‌شود. در رابطه‌ی فوق،  $\phi_e$  تخلخل مؤثر،  $V_{sh}$  حجم شیل،  $R_{xol}$  مقاومت شیل،  $R_w$  مقاومت آب،  $R_{tol}$  مقاومت عمق و  $S_w$  اشباع از آب است. در

(۳-۶)

$$S_w = \left( \left( \left( \frac{V_{sh}^{2-V_{sh}}}{R_{xol}} \right)^{0.5} + \left( \frac{\phi_c^m}{R_w} \right)^{0.5} \right)^2 R_{tol} \right)^{-\frac{1}{n}}$$

با توجه به ارزیابی اولیه از بافت سنگ در سازند مورد مطالعه، این نتیجه حاصل می‌شود که سازند مقدار کمی شیل دارد. در نتیجه برای تعیین اشباع از آب از بخش دیگر نرم‌افزار Geolog با عنوان Determine و با کمک رابطه آرچی<sup>۲</sup> برای محاسبه اشباع از آب در سازند استفاده می‌شود.

(۳-۷)

$$S_{wT}^n = \frac{R_w \times a}{R_T \times \phi^m}$$

مطابق با رابطه‌ی ۳-۷،  $S_{wT}$  آب اشباع کل، n توان اشباع،  $R_w$  مقاومت شورآب، a ثابت سیمانی Archie،  $R_T$  مقاومت ویژه واقعی سازند،  $\phi$  تخلخل کل و m توان سیمانی Archie است.

---

<sup>۱</sup> Poupon-Leveaux

<sup>۲</sup> Archie

## ۳-۲-۳ مطالعه آزمایشگاهی مغزه

اندازه‌گیری آزمایشگاهی خواص مغزه اطلاعات با ارزشی در رابطه با تخلخل و اشباع سیالات در اختیار می‌گذارد که برای مطالعات شبیه‌سازی مخزن و دیگر مطالعات طراحی و توسعه میادین هیدروکربنی کاربرد دارد. در تحقیق حاضر از عمق  $4357/12$  تا  $4469/581$  متر تعدادی مغزه تهیه شد. بر روی مغزه‌ها آزمایش متداول آزمایشگاهی (RCAL)<sup>۱</sup> انجام شد. در این پژوهش تخلخل با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری CMS-300 اندازه‌گیری شد. همچنین میزان نفت باقی مانده و آب باقی مانده در نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری‌ها در پلاگ‌های استوانه‌ای با قطر  $1/5$  و طول  $3$  اینچ انجام شده است. علاوه بر این، مغزه‌های a1 (نمونه از عمق  $4360$  متر) و a2 (نمونه از عمق  $4450$  متر) برای مطالعه بافت سنگ‌شناسی و فسیل با استفاده از مقطع نازک در نظر گرفته شد. برای مطالعه فسیل شناسی دو مغزه ابتدا مقاطع نازک از آن‌ها تهیه شد. برای تهیه یک مقطع نازک به این ترتیب عمل می‌کنیم: ابتدا سنگ را به اندازه لام برش می‌دهیم و بعد با پودر کروندوم<sup>۲</sup> با مش‌های متفاوت، ابتدا از مش  $80$  شروع می‌کنیم و به ترتیب با سایز مش  $320$ ،  $400$ ،  $600$  صیقل می‌دهیم تا جای آره کاملاً از بین برود. بعد لام<sup>۳</sup> را با همان پودر کروندوم پولیش می‌دهیم تا کمی کدر شده و مثل سطح سنگ شود. سپس سطحی از رنگ را که کاملاً صیقلی کرده‌ایم، با چسب صمغ کانادا به لام می‌چسبانیم تا  $24$  ساعت به همان حالت باقی بماند و چسب محکم شود. بعد سنگ را برش می‌دهیم تا حدود  $2$  میلی‌متر روی لام باقی بماند. در این حالت ضخامت برای مطالعه مقطع بسیار زیاد است، چون نور از مقطع عبور نمی‌کند. سپس باید با پودر کروندوم از ضخامت آن بکاهیم. در کل دو مقطع نازک از مغزه‌ها به منظور بررسی اجزای فسیلی و بافت آماده‌سازی تهیه شده است. سپس با استفاده از میکروسکوپ الکترونی تصاویر میکروگراف از مقاطع گرفته می‌شود. در پایان، نتایج حاصل از اندازه‌گیری تخلخل و تشخیص بافت سنگ با استفاده از روش آزمایشگاهی با نتایج حاصل از تحلیل پتروفیزیکی نمودارگیری چاه مقایسه می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Rutine core analysis laboratory

<sup>۲</sup> Corandom

<sup>۳</sup> Lam

## ۳-۴ جمع بندی

بنابر آنچه در این فصل ذکر شد، از روش‌های نمودارگیری چاه و نتایج آنالیز آزمایشگاهی مغزه برای تعیین خصوصیات سازند شامل نوع لیتولوژی، توزیع تخلخل، توزیع اشباع آب، حضور هیدروکربن و ایجاد یک مدل پتروفیزیکی استفاده می‌شود. در نهایت نیز نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل نمودارگیری چاه با نتایج حاصل از آنالیز آزمایشگاهی مغزه در یک بازه عمقی که از آن نمونه برداری انجام شده است، مقایسه انجام می‌شود.



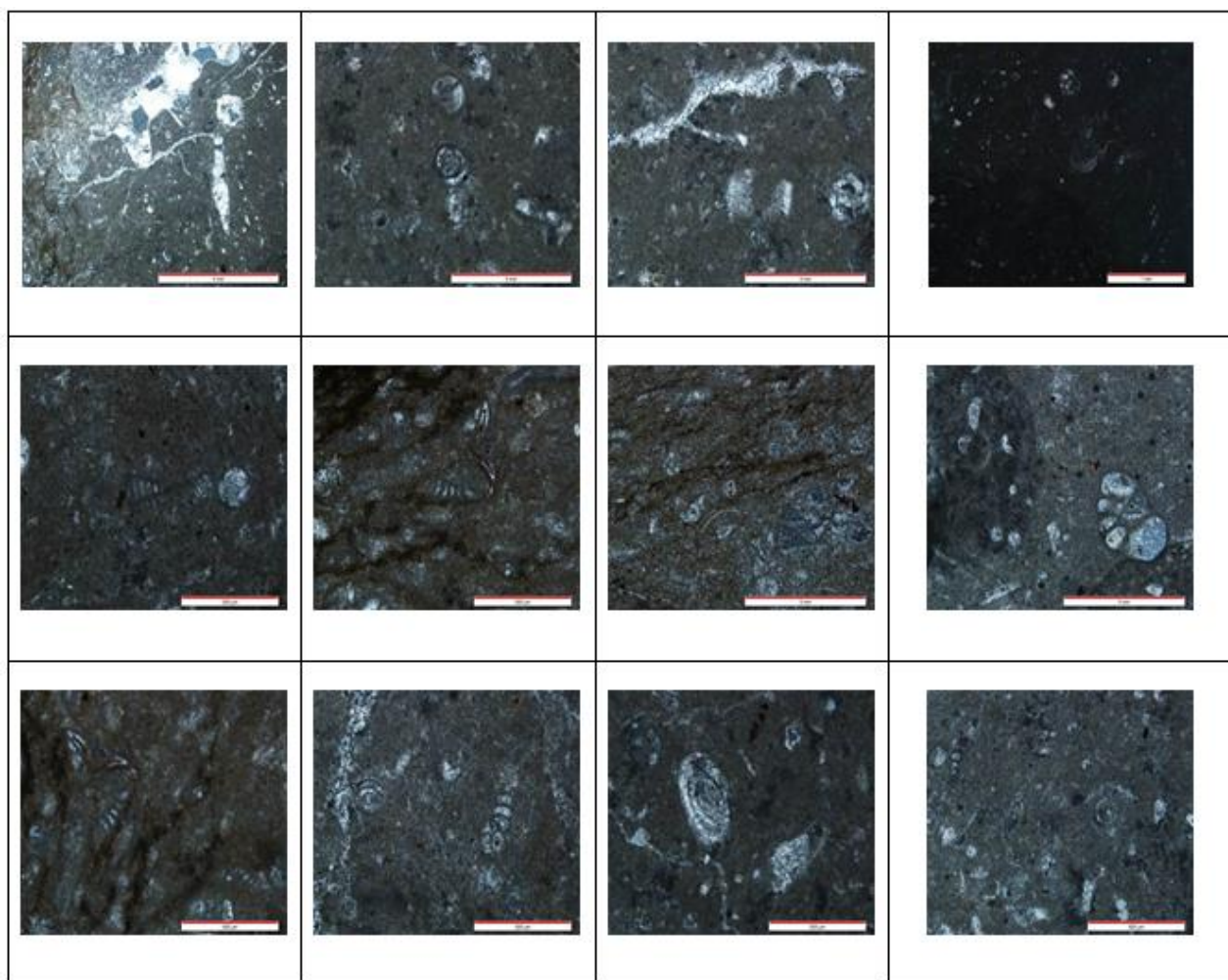
## فصل چهارم: تجزیه تحلیل نتایج

#### ۴-۱ مقدمه

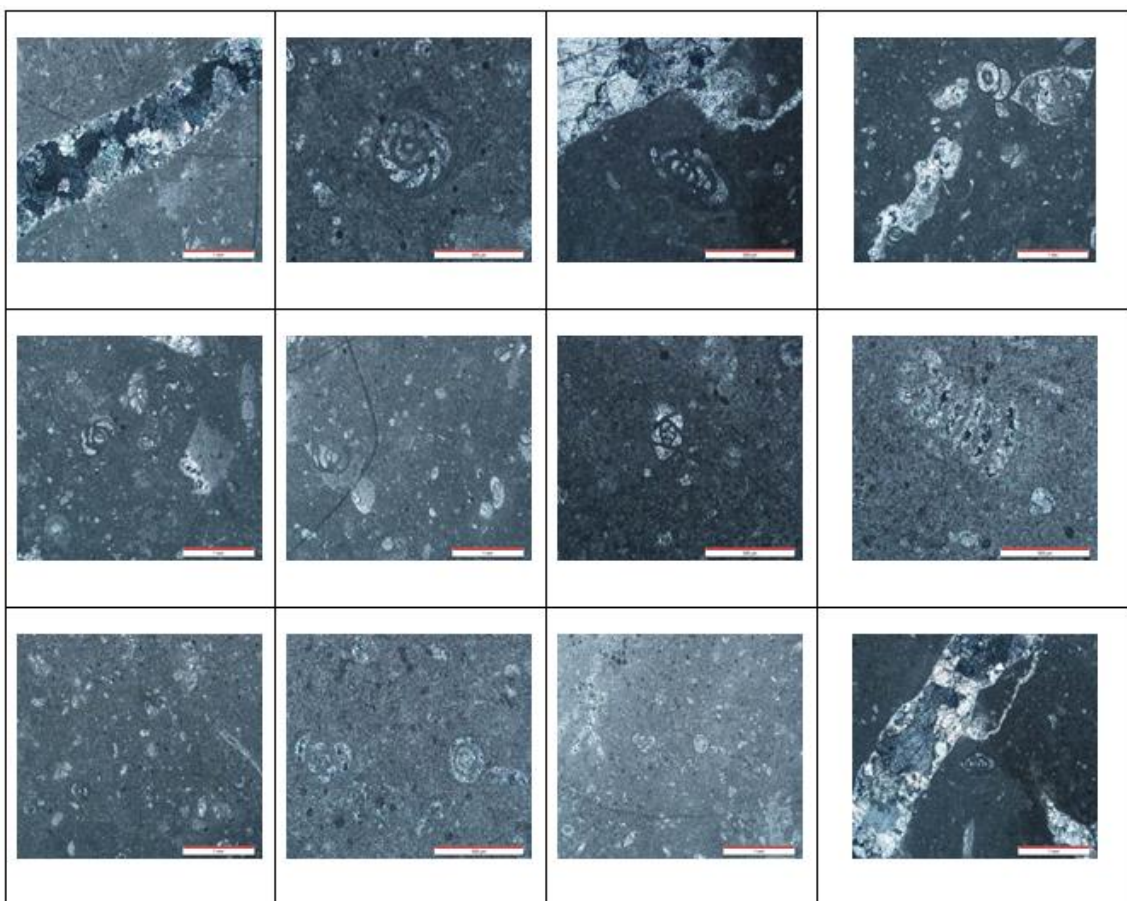
تعیین کیفیت پتروفیزیکی و زون‌بندی مخزن در مطالعات توسعه مخازن یکی از مراحل اصلی می‌باشد. با تعیین زون‌های مخزنی با کیفیت بهتر نسبت به دیگر زون‌های مخزن، تعیین نقاط مناسب حفاری و تکمیل چاه، تولید از مخزن بصورت بهتری انجام می‌شود. همان طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، هدف از این پژوهش، ارزیابی پتروفیزیکی و تعیین زون‌های مخزنی به منظور مشخص‌سازی بخش‌های مناسب مخزن برای مطالعات یک سازند کربناته در یکی از مخازن هیدروکربنی ایران واقع در میدان نفتی کوپال است. تعیین دقیق زون‌های مخزنی باعث مدل‌سازی استاتیکی بهتر و در نتیجه مدل‌سازی دینامیک مناسب‌تری می‌گردد. در بخش حاضر نتایج مربوط به بررسی‌های ارزیابی پتروفیزیکی اعم از شناخت لیتولوژی، محاسبه‌ی تخلخل و اشباع از آب مربوط به چاه نفتی crab-04 واقع در میدان نفتی کوپال که داده‌های چاه‌نگاری آن در دسترس بود، ارائه شده است.

#### ۴-۲ آنالیز تصاویر مغزه

با توجه به این که از عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر، نمونه مغزه برای آنالیز در آزمایشگاه تهیه شد، از بین تعداد مغزه‌های در دسترس دو مقطع نازک از مغزه‌ها به منظور بررسی اجزای فسیلی و بافت آماده‌سازی شد. این کار کمک می‌کند تا بافت سنگ‌شناسی نمونه‌ها مشخص شود و نتایج آزمایشگاهی با نتایج تحلیل پتروفیزیکی نمودارگیری چاه مقایسه شود. بنابراین از مقاطع نازک تهیه شده از قبل، تصاویر میکروگراف تهیه شد. با توجه به تصاویر نشان داده شده در شکل‌های ۴-۱ و ۴-۲، برای مغزه‌های a1 (نمونه از عمق ۴۳۶۰ متر) و a2 (نمونه از عمق ۴۴۵۰ متر)، درصد فسیل بین ۱۰ تا ۵۰ درصد می‌باشد. بنابراین نوع سنگ وکستون بوده و کلسیت فراوانی دارد. همچنین قالب فسیل‌ها از نوع فرامینیفر، میلیولید، استراکود، گاستروپد و فرومینیفر فرانگتون می‌باشد.



شکل ۴-۱- تصاویر میکروگراف از مقاطع نازک مغزه‌ی مربوط به عمق ۴۳۶۰ متری (a1).

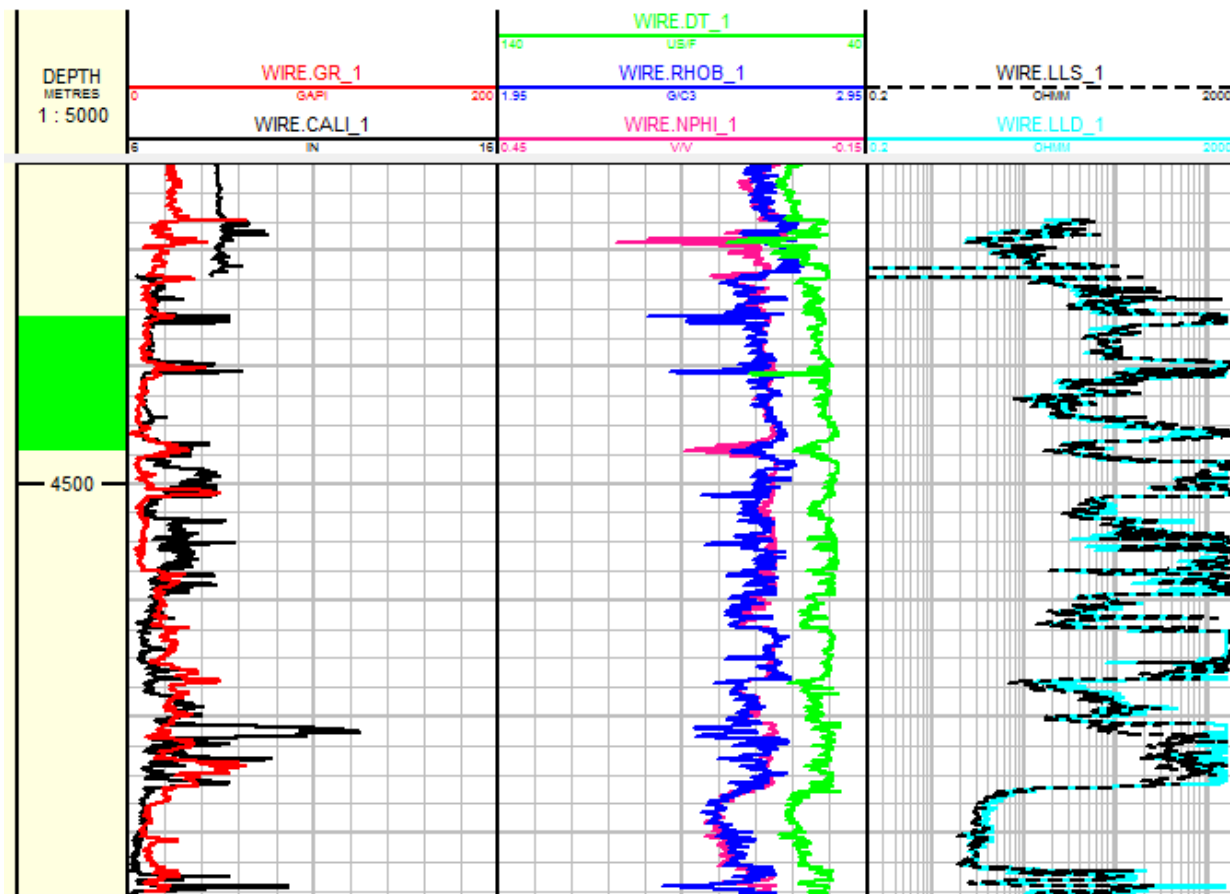


شکل ۴-۲- تصاویر میکروگراف از مقاطع نازک مغزه‌ی مربوط به عمق ۴۴۵۰ متری (a2).

### ۴-۳ تحلیل نمودارهای پتروفیزیکی

در ابتدا نمودارهای پتروفیزیکی چاه مورد مطالعه به صورت گراف ایجاد شد. در این گراف نمودارهای پرتو گاما، تغییرات قطر دهانه چاه (Caliper) میزان نوترون، چگالی، سرعت عبور صوت، مقاومت ویژه الکتریکی با برد کوتاه و بلند قرار داده شد. همان طور که در شکل ۴-۳ آمده است، نمودار تغییرات پرتو گاما با رنگ قرمز، تغییرات قطر دهانه چاه با رنگ سیاه، نمودار تغییرات سرعت صوت با رنگ سبز، تغییرات چگالی با رنگ آبی، تغییرات میزان قرائت نوترون با رنگ صورتی، مقاومت ویژه الکتریکی با برد کوتاه با رنگ مشکی با خط مقطع و نمودار مقاومت ویژه الکتریکی برد بلند با رنگ آبی روشن نشان داده شده‌اند. همان طور که شکل ۴-۳ نشان می‌دهد، میزان قرائت اشعه گاما در مقیاس GAPI در عمق چاه مورد مطالعه میزان قابل توجهی نیست و مقادیر پرتو گاما کم است. در بعضی نقاط چاه، نمودار پرتو گاما دارای جهش به صورت

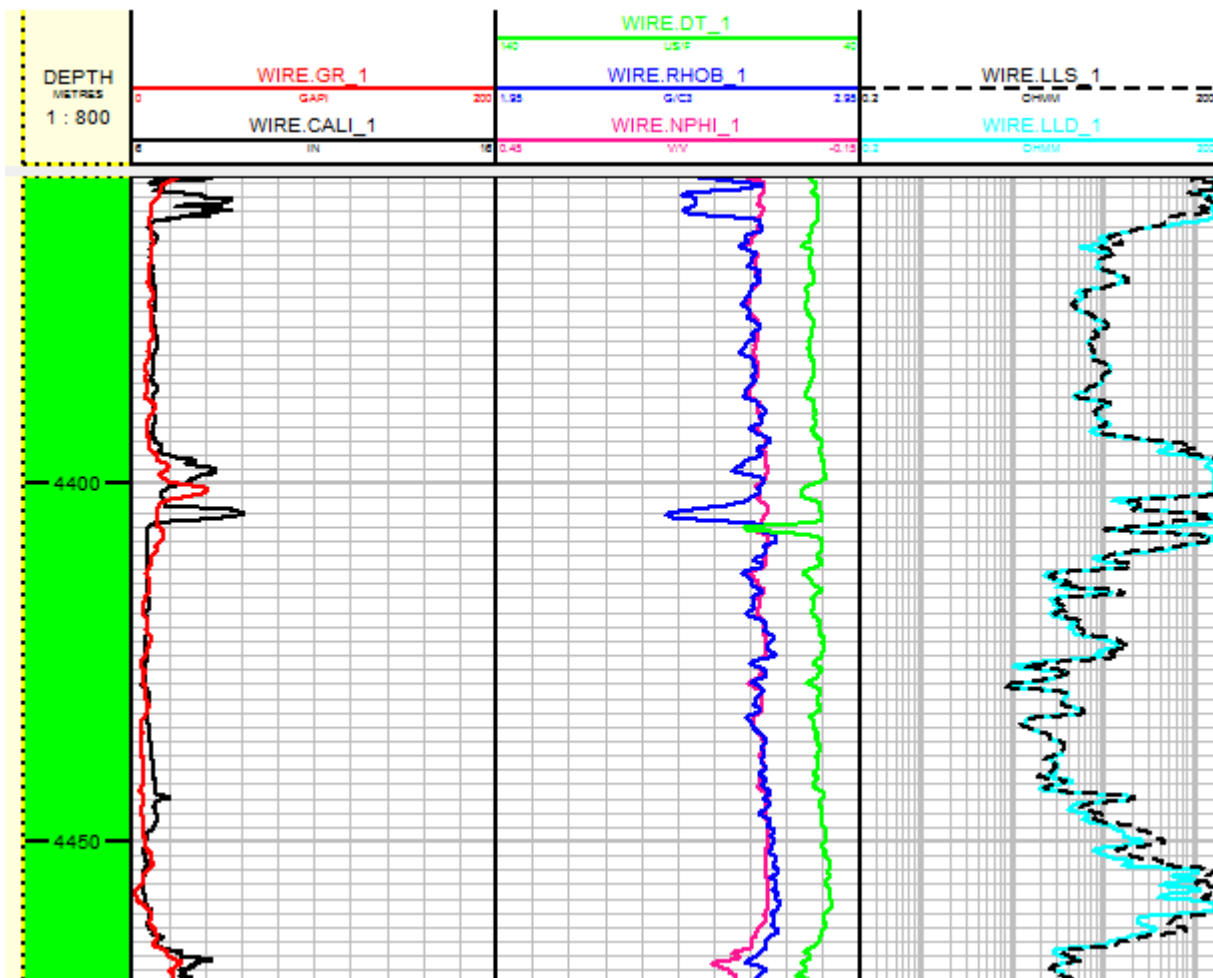
پیک است که نشان دهنده حضور مواد سازندی با تشعشع گاما زیاد است. علاوه بر این، تغییرات نمودارهای نوترون و چگالی تقریباً در طول عمق چاه مشابه است و این نشان‌دهنده سنگ‌شناسی کربناته سازند در چاه است. همچنین، تغییرات نمودارهای مقاومتی برد بلند و کوتاه تقریباً مشابه هم است که نشان می‌دهد که سازند محتوی آب است. در برخی نقاط عمق چاه نمودار مقاومت برد بلند مقدار بیشتری نسبت به نمودار مقاومتی برد کوتاه نشان می‌دهد که نشان‌دهنده حضور هیدروکربن در این عمق است.



شکل ۳-۴- نمودار پتروفیزیکی رسم شده در کل عمق نمودارگیری شده از چاه مورد مطالعه.

علاوه بر این که در کل عمق چاه مورد مطالعه نمودار پتروفیزیکی مورد بررسی قرار گرفت، مطابق شکل ۴-۳ بخشی که با رنگ سبز در بخش عمق مشخص شده است، عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر را نشان می‌دهد که در این بازه از چاه نمونه مغزه تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. بنابراین، نمودار پتروفیزیکی برای این بازه از عمق چاه به صورت آنچه در شکل ۴-۴ آمده است رسم شد. همان طور که شکل ۴-۴ نشان می‌دهد، در طول این بازه نمودارهای چگالی و نوترون تقریباً روی هم قرار گرفته‌اند. این

ویژگی نشان می‌دهد که لیتولوژی به صورت عمده آهکی است. در بخش‌های از این بازه که نمودار چگالی در سمت راست نمودار نوترون قرار می‌گیرد، لیتولوژی دولومیتی را نشان می‌دهد. همچنین در بخش‌های که نمودار چگالی در سمت چپ نمودار نوترون قرار می‌گیرد نشان دهنده لیتولوژی ماسه‌سنگی است. نمودار پرتو گاما نیز در این بازه مقدار بسیار کمی را نشان می‌دهد که به واسطه حضور کم شیل و لیتولوژی عمده آهک است.



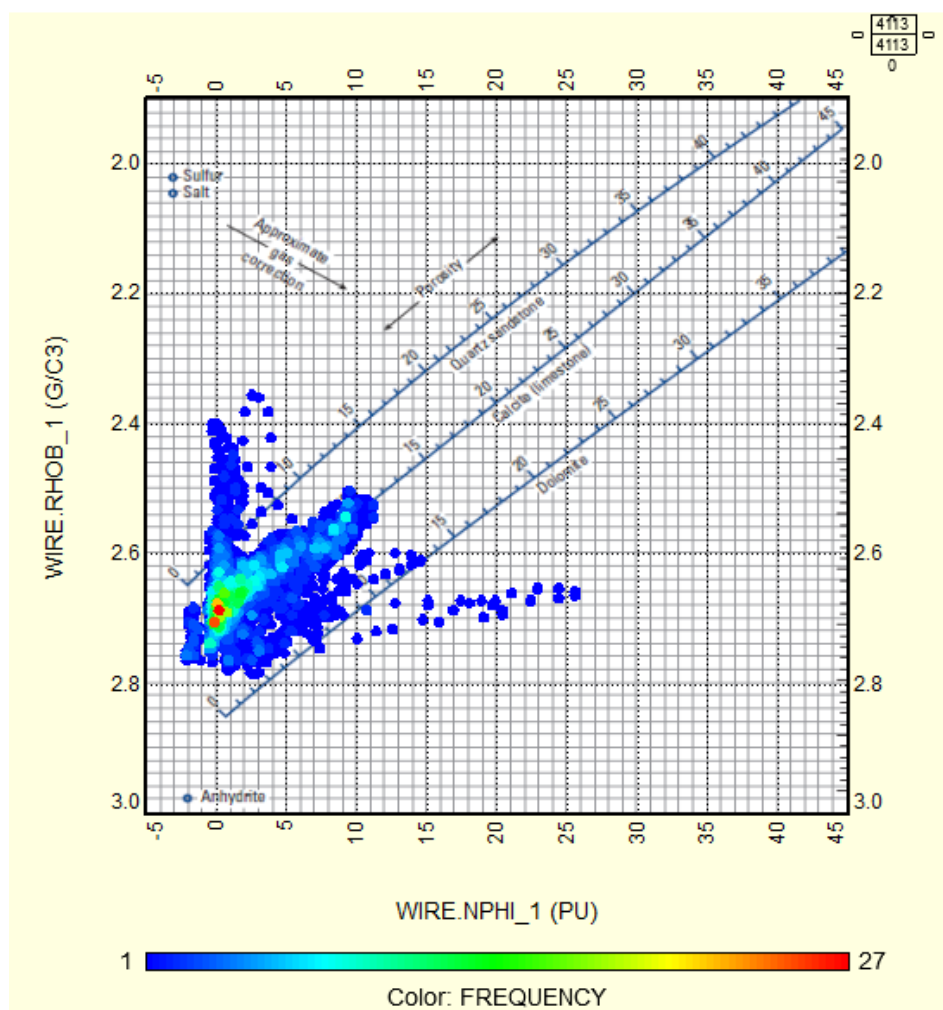
شکل ۴-۴- نمودار پتروفیزیکی در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری از چاه مورد مطالعه که از آن نمونه مغزه تهیه شده است.

با توجه به نمودارهای پتروفیزیکی که از چاه مورد مطالعه رسم و بررسی شد، می‌توان لیتولوژی سازند حفاری شده را تشخیص داد. اما برای تشخیص لیتولوژی به صورت تخصصی از نمودارهای متقاطع استفاده

شده است که در ادامه ذکر می‌شوند. همچنین با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی توزیع تخلخل، اشباع از آب و اشباع از سیالات هیدروکربنی در ادامه تعیین شده و بررسی می‌شوند.

### ۱-۳-۴ تعیین لیتولوژی

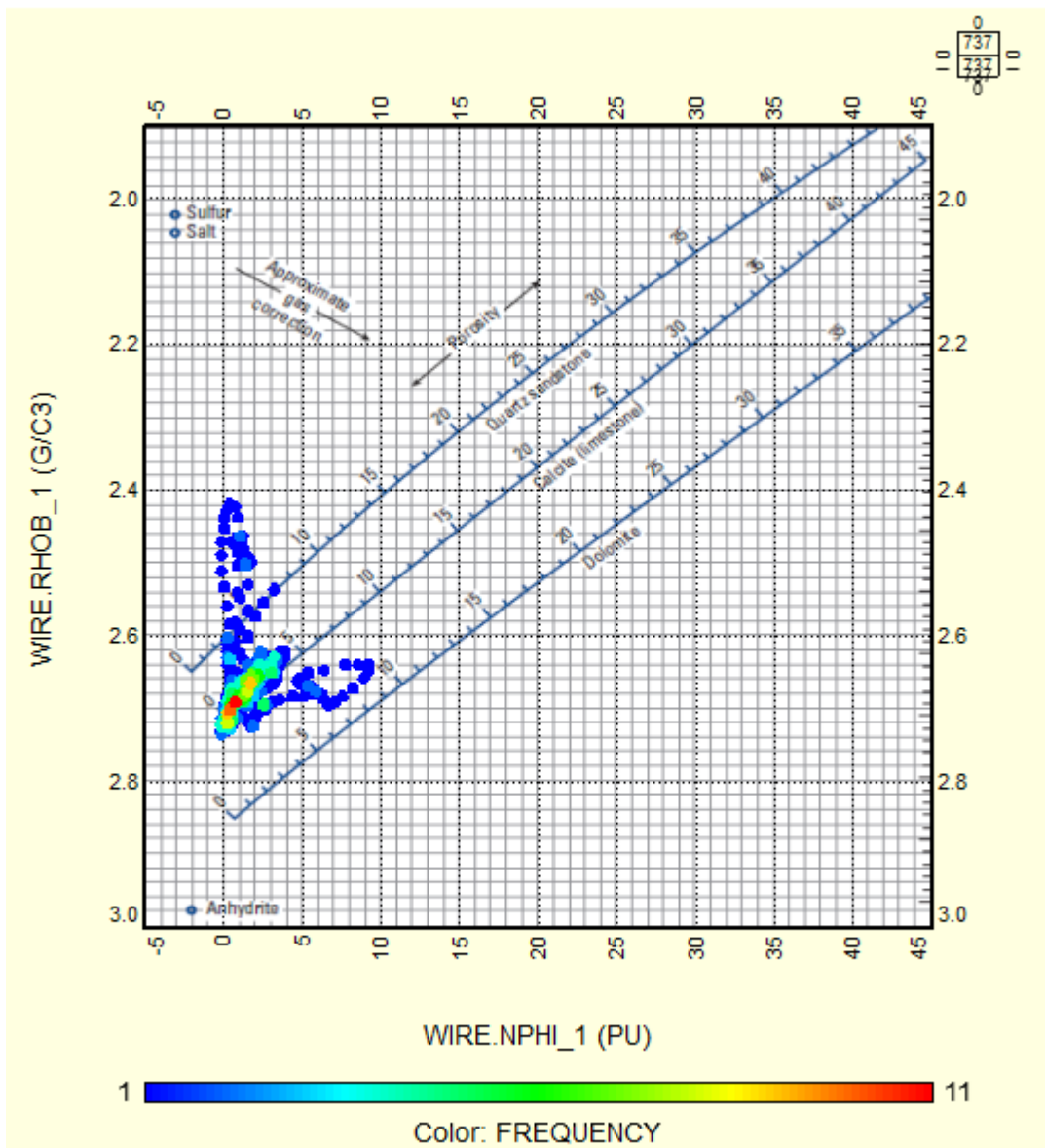
نمودار متقاطع نوترون - چگالی بهترین حد تفکیک کانی‌های مختلف سازند را در بین چارت‌های دوتایی دارد. علاوه بر این، نمودار متقاطع صوتی - چگالی نیز برای تفکیک لیتولوژی در چاه استفاده می‌شود. همان‌طور که شکل ۴-۵ در زیر نشان می‌دهد، نمودار متقاطع نوترون - چگالی برای داده‌های چاه مورد مطالعه در کل عمق چاه که نمودارگیری انجام شد، رسم شد. همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، پراکندگی داده‌ها در بین سه خط لیتولوژی ماسه‌سنگ، دولومیت و کلسیت مشاهده می‌شود. اما، بیشترین تمرکز یا به عبارتی تجمع داده‌ها بر روی خط کلسیت صورت گرفته است. بنابراین همان‌طور که شکل نشان می‌دهد، جنس سنگ در چاه مورد مطالعه بیشتر از نوع سنگ آهک کلسیتی است که به همراه آن مقادیری دولومیت و ماسه‌سنگ نیز به چشم می‌خورد.



شکل ۴-۵- نمودار متقاطع چگالی و تخلخل نوترونی داده‌های خام و هم‌تراز شده.

علاوه بر این که در کل عمق چاه نمودار متقاطع نوترون-چگالی برای تعیین لیتولوژی رسم شد، در عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر که نمونه مغزه از چاه تهیه شده بود و آنالیز بر روی آن به صورت تست معمول (Routine) انجام شده بود، نمودار متقاطع نوترون-چگالی رسم شد. همان طور که شکل ۴-۶ نشان می‌دهد، تمرکز داده‌ها با شدت بیشتر در ناحیه خط مربوط به کلسیت به چشم می‌خورد. بنابراین، لیتولوژی در عمق ذکر شده در فوق که نمونه مغزه نیز از آن تهیه شده بود، از نوع سنگ آهک کلسیتی است که مقدار بسیار کم ماسه و دولومیت نیز مشاهده می‌شود که با توجه به تجمع شدید داده‌ها در ناحیه خط کلسیتی زیاد به چشم نمی‌آیند.

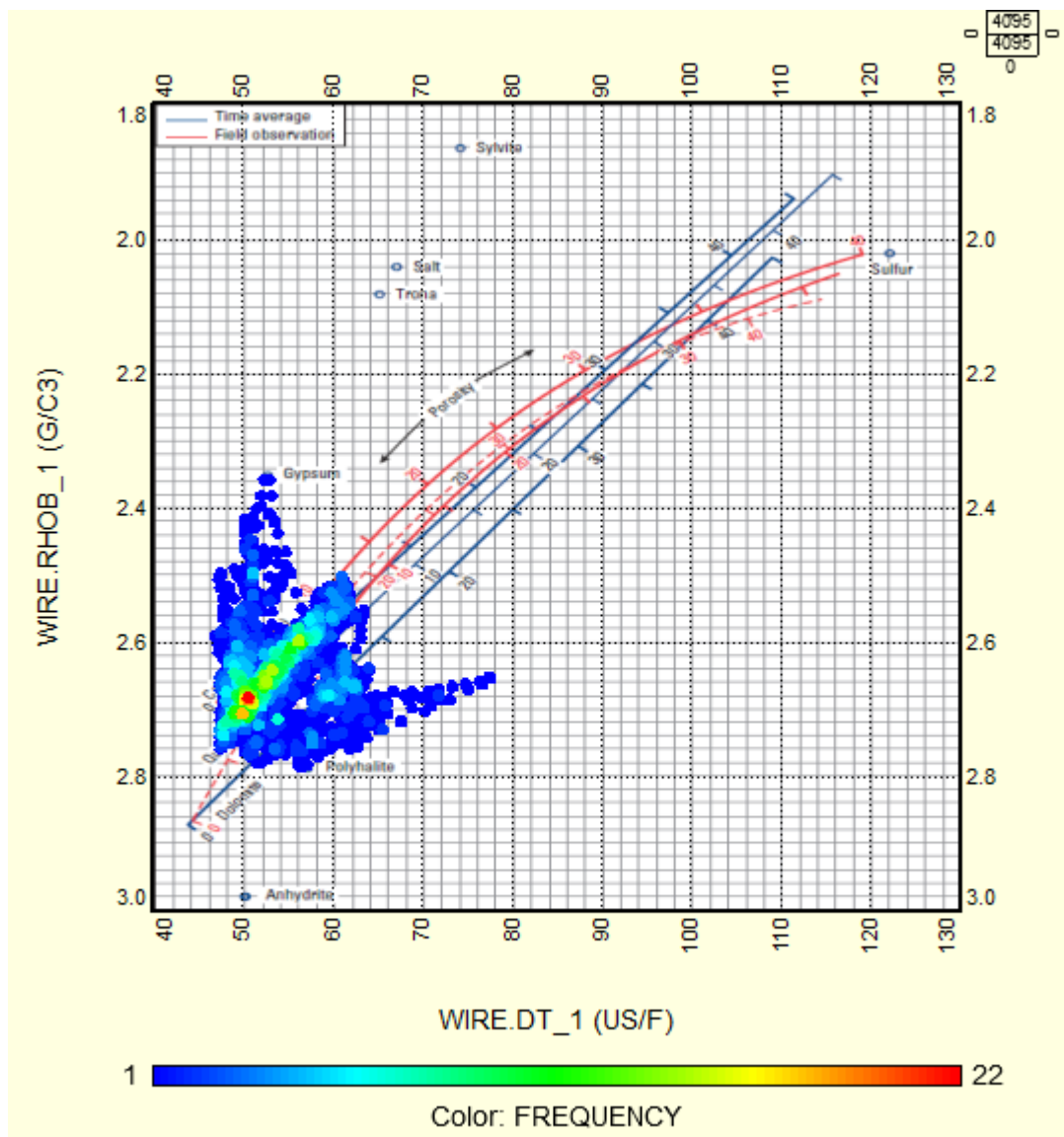




شکل ۴-۶- نمودار متقاطع چگالی- نوترون در عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری که نمونه مغزه از آن تهیه شده است.

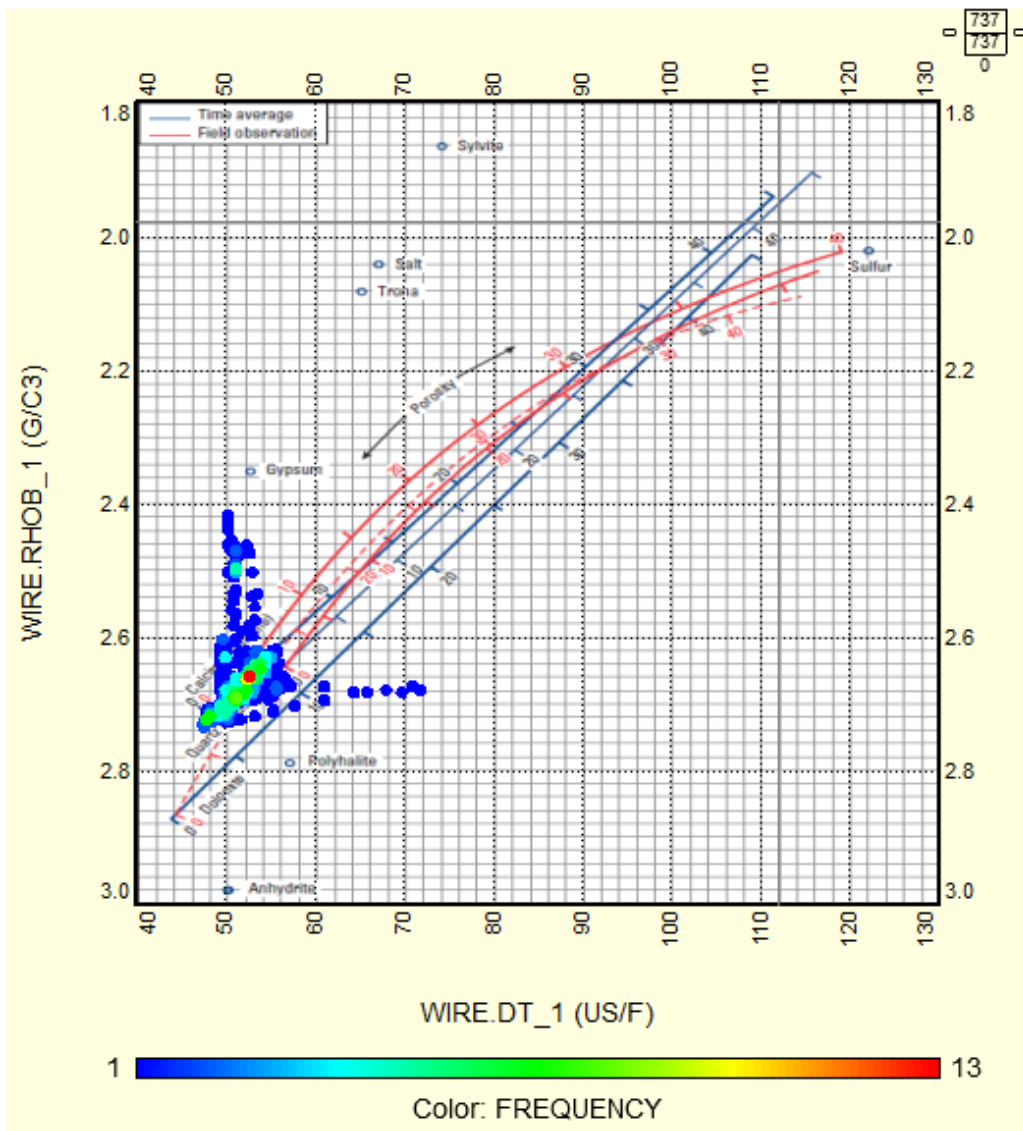
علاوه بر نمودار متقاطع نوترون- چگالی، نمودار متقاطع صوتی- چگالی نیز برای تشخیص با قطعیت بیشتر در کل عمق نمودارگیری شده از چاه و همچنین به طور مجزا برای عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری که نمونه مغزه نیز از آن تهیه شد، رسم شد. همانطور که شکل ۴-۷ نشان می‌دهد، پراکندگی داده‌ها در محدوده دولومیت، ماسه‌سنگ و کلسیت است، اما بیشترین تمرکز داده‌ها با تکرار زیاد در محدوده سنگ آهک کلسیتی مشاهده می‌شود. بنابراین، نتایج حاصل از تفسیر نمودار متقاطع صوتی- چگالی نیز مشابه

نمودار متقاطع نوترون- چگالی است و لیتولوژی به طور عمده در چاه مورد مطالعه از نوع سنگ آهک کلسیتی است.



شکل ۴-۷- نمودار متقاطع صوتی- چگالی برای تعیین لیتولوژی در کل عمق نمودارگیری شده از چاه مورد مطالعه.

همچنین، نمودار متقاطع صوتی- چگالی در عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از چاه مورد مطالعه که نمونه مغزه از آن تهیه شده بود، مطابق شکل ۴-۸ رسم شد. همان طور که شکل ۴-۸ نشان می‌دهد، در این بازه عمق لیتولوژی از نوع سنگ آهک کلسیتی است و مقدار بسیار ناچیز ماسه‌سنگ و دولومیت به چشم می‌خورد.

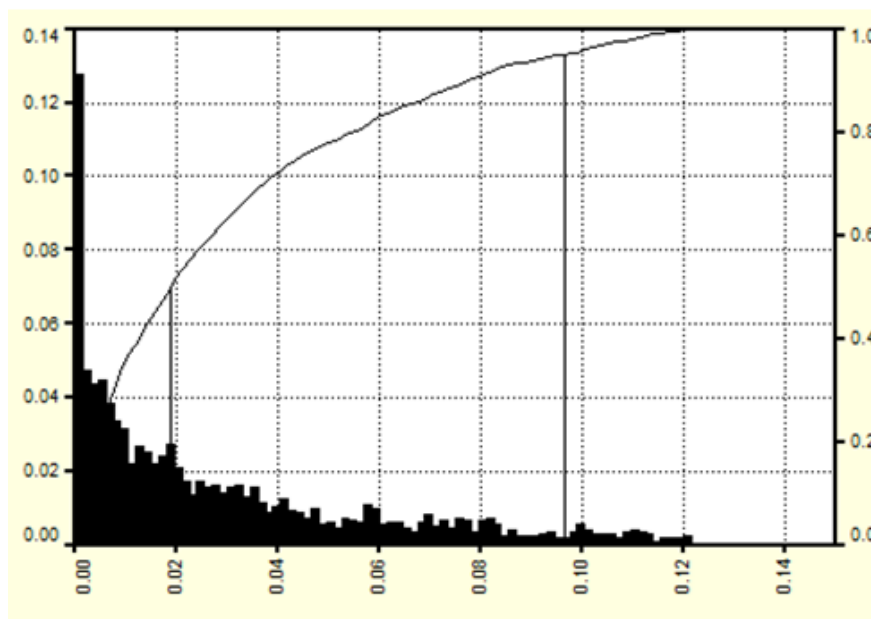


شکل ۴-۸- نمودار متقاطع صوتی- چگالی در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از چاه مورد مطالعه برای تعیین لیتولوژی.

با توجه به نمودارهای متقاطع رسم شده در کل عمق چاه و بازه عمقی نمونه‌گیری شده، لیتولوژی به طور عمده از کلسیت است و مقادیر کمی از دولومیت و ماسه نیز مشاهده می‌شود. همچنین نتایج حاصل از مطالعه مقاطع نازک از نمونه‌ها از چاه مورد مطالعه نیز میزان بالای کلسیت در بافت سنگ را نشان داد. بنابراین با توجه به این که نتایج تحلیل پتروفیزیکی به وسیله نمودارگیری چاه و مطالعه آزمایشگاهی مقطع نازک یکدیگر را تایید می‌کنند، در چاه مورد مطالعه لیتولوژی به صورت سنگ آهک کلسیتی به همراه مقادیر ناچیز دولومیت و ماسه‌سنگ است.

## ۲-۳-۴ توزیع تخلخل

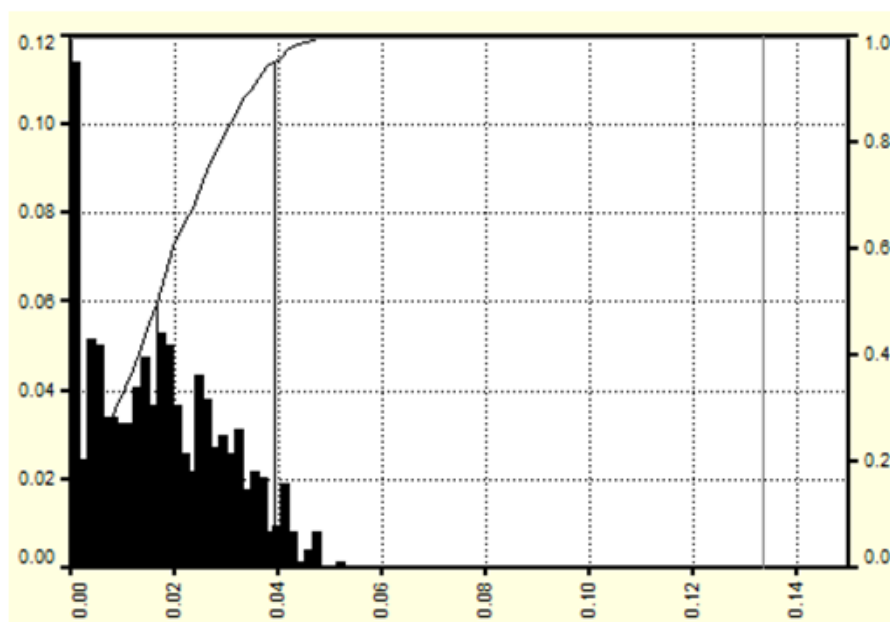
میزان تخلخل به کمک نمودارهای نوترون، چگالی و سرعت صوت تخمین زده می‌شود. بنابراین، همان‌طور که در بخش قبل نمودارهای متقاطع نوترون-چگالی (شکل ۴-۵) و صوتی-چگالی (شکل ۴-۷) نشان داده شد، میزان تخلخل در کل عمق نمودارگیری شده چاه در بازه ۰ تا ۱۵ درصد قرار دارد. علاوه بر این، در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر که نمونه مغزه تهیه شده است، با توجه به نمودار متقاطع نوترون-چگالی و صوتی-چگالی میزان تخلخل در این بازه دارای مقدار ۰ تا ۵ درصد است. علاوه بر این، میزان تخلخل مؤثر با استفاده از روابط ذکر شده در فصل سوم و با استفاده از بخش Determin نرم‌افزار Geolog محاسبه شد. همان‌طور که شکل ۴-۹ نشان می‌دهد، توزیع تخلخل مؤثر در بازه ۰ تا ۱۲ درصد است. بیشترین فراوانی تخلخل مربوط به تخلخل ۰/۲ درصد است. بنابراین سازند حفاری شده دارای تخلخل مؤثر بسیار کم است. در این شکل محور افقی میزان تخلخل به صورت نسبت، محور قائم سمت چپ فراوانی و محور قائم سمت راست مجموع فراوانی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹- توزیع فراوانی تخلخل مؤثر در کل عمق سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه.

علاوه بر این، توزیع تخلخل مؤثر برای بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر، نیز رسم شد. همان‌طور که شکل ۴-۱۰ نشان می‌دهد، توزیع تخلخل در این بازه از عمق چاه دارای مقادیر ۰ تا ۵ درصد است. به

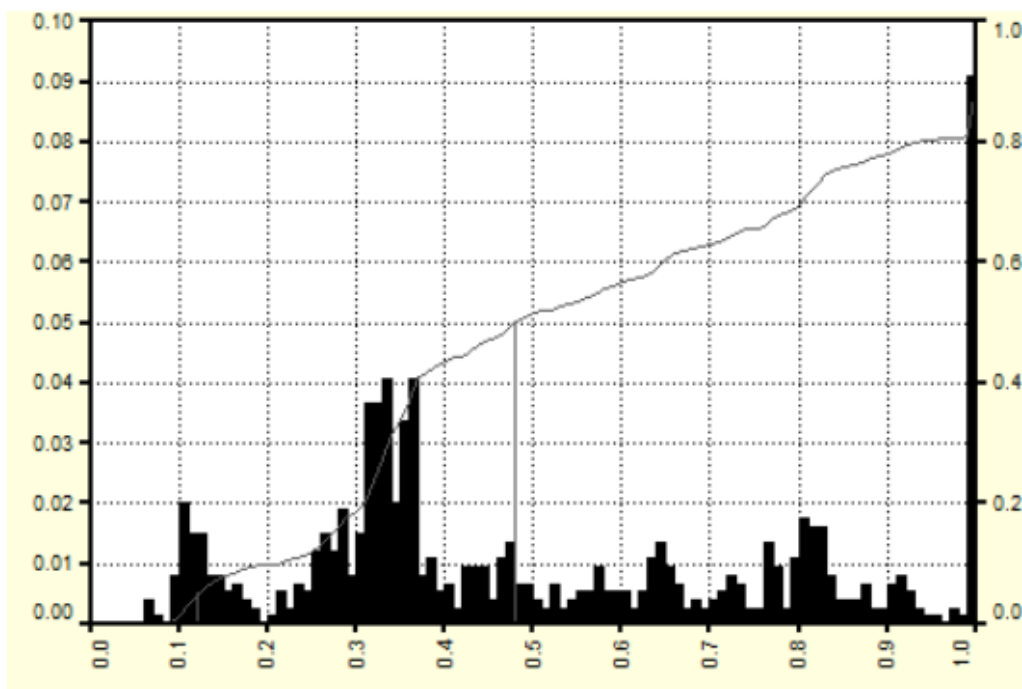
طوری که بیشترین فراوانی تخلخل برای تخلخل ۲ درصد است. در این شکل محور افقی میزان تخلخل به صورت نسبت، محور قائم سمت چپ فراوانی و محور قائم سمت راست مجموع فراوانی را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۰- توزیع فراوانی تخلخل موثر در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه.

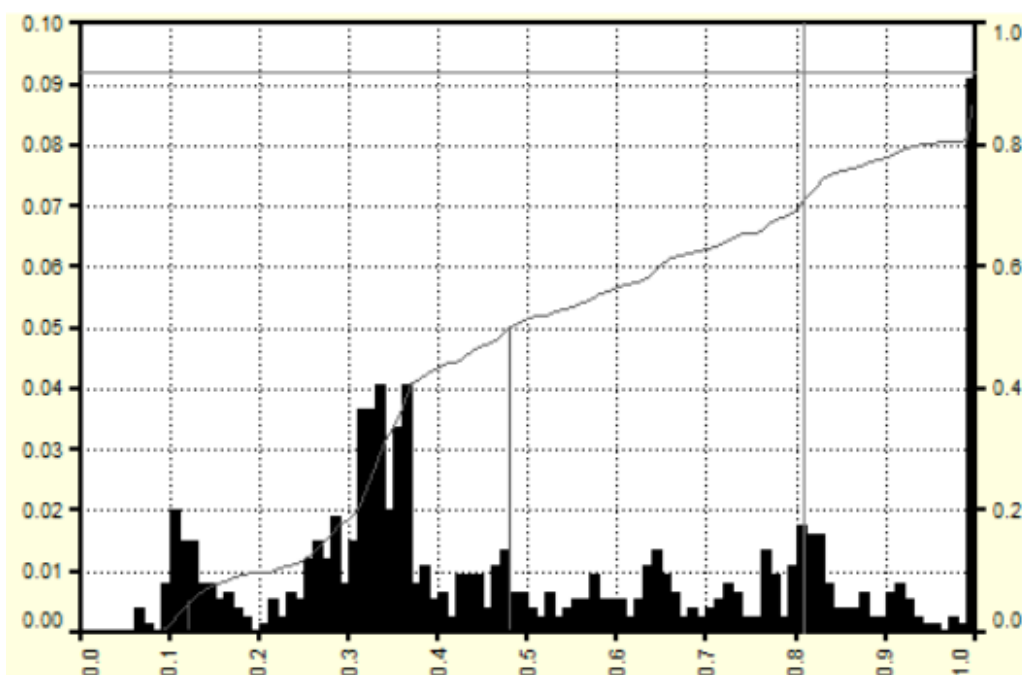
### ۳-۳-۴ توزیع اشباع از آب

با توجه به روابط ذکر شده در فصل سوم، میزان اشباع از آب با استفاده از رابطه آرچی به کمک نمودارهای مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه می‌شود. برای محاسبه اشباع از آب در نرم‌افزار Geolog از بخش Determin به water saturation و به کمک رابطه Archie مراجعه کرده و میزان اشباع از آب در سازند محاسبه شد. بنابراین همان طور که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است، میزان اشباع از آب در کل عمق نمودارگیری شده چاه مورد مطالعه در بازه ۰ تا ۱۰۰ درصد است. متوسط اشباع از آب ۳۵ درصد است.



شکل ۴-۱۱- توزیع فراوانی اشباع از آب در کل عمق سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه.

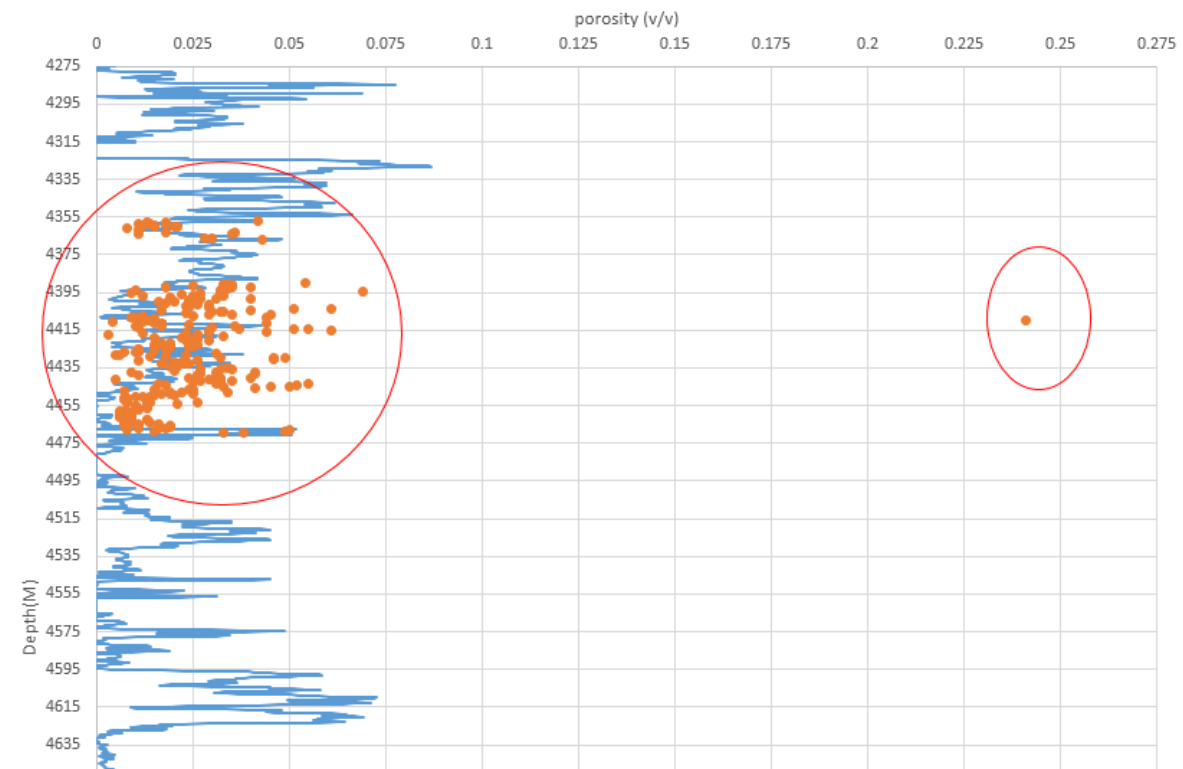
علاوه بر این، توزیع اشباع از آب برای بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر رسم شد. همان طور که در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است، میزان اشباع از آب در این بازه مشابه کل عمق نمودارگیری شده چاه است.



شکل ۴-۱۲- توزیع فراوانی اشباع از آب در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه.

#### ۴-۳-۴ مقایسه داده تخلخل حاصل از آزمایش مغزه و داده نمودارگیری

میزان تخلخل نمونه مغزه‌های تهیه شده از چاه مورد مطالعه در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر با استفاده از روش معمول آزمایش مغزه (Rutine Core Analysis) به دست آمد. میزان تخلخل مؤثر نیز با استفاده از بخش Determine در نرم افزار Geolog با کمک نگارهای چگالی، صوتی و نوترون برای کل عمق نمودارگیری شده چاه رسم شد. همان طور که شکل ۴-۱۳ نشان می‌دهد، نتایج به دست آمده از آنالیز مغزه در آزمایشگاه با نتایج حاصل از داده‌های نمودارگیری چاه مورد مطالعه تطبیق خوبی دارد. همان طور که شکل ۴-۱۳ نشان می‌دهد در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر، تخلخل بدست آمده از آزمایشگاه در یک نقطه کاملاً از داده‌های آزمایشگاهی و نمودارگیری چاه جدا افتاده که نشان می‌دهد در این عمق تخلخل به دست آمده در آزمایشگاه دارای خطا می‌باشد که در حال اندازه‌گیری تخلخل یا در زمان ثبت داده رخ داده است. هرچند تعداد انگشت شماری از داده‌های تخلخل حاصل از آزمایشگاه در برخی نقاط بر نمودار تخلخل منطبق نیستند که این می‌تواند به واسطه خطای اندازه‌گیری تخلخل در آزمایشگاه یا نمودارگیری باشد، اما تطبیق حداکثری نقاط نشان دهنده ارتباط قوی بین داده تخلخل حاصل از آزمایشگاه و نمودارگیری چاه می‌باشد.

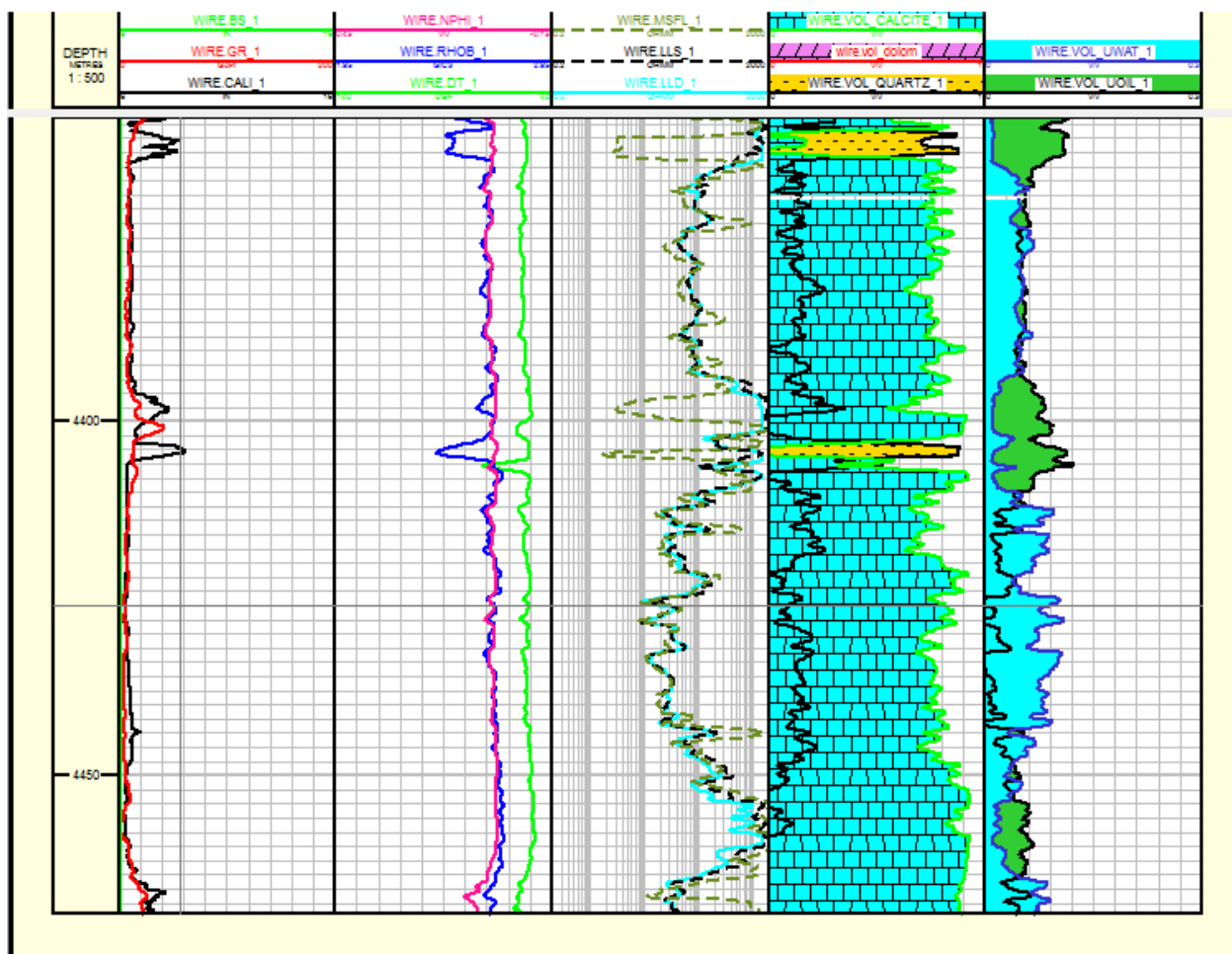


شکل ۴-۱۳- مقایسه تخلخل حاصل از آزمایش مغزه و نمودارگیری چاه در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر.

### ۵-۳-۴ مدل پتروفیزیکی

با توجه به آن که نمودارهای پتروفیزیکی شامل پرتو گاما (رنگ قرمز، Wire\_GR)، تغییر قطر دهانه چاه (رنگ سیاه، Wire\_CALI)، چگالی (رنگ آبی، Wire\_RHOB)، نوترون (رنگ صورتی، Wire\_NPHI)، سرعت عبور صوت در سازند (رنگ سبز، Wire\_DT)، مقاومت ویژه الکتریکی برد بسیار کوتاه (رنگ سبز یشمی با خط بریده بریده، Wire\_MSFL)، مقاومت ویژه الکتریکی برد کوتاه (رنگ سیاه خط بریده بریده، Wire\_LLS) و مقاومت ویژه الکتریکی برد بلند (رنگ آبی روشن، Wire\_LLD) از چاه مورد مطالعه در دسترس بود، با توجه به آن که در مرحله قبل با استفاده از تحلیل نمودارهای چگالی-نوترون و چگالی-صوتی نوع لیتولوژی سازند حفاری شده در چاه مورد مطالعه به دست آمد، حجم هریک از لیتولوژی در نرم افزار Geolog با استفاده از بخش Multimin محاسبه شد.





شکل ۴-۱۴- مدل پتروفیزیکی از سازند حفاری شده در بازه عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر از چاه مورد مطالعه.

همان طور که شکل ۴-۱۴ نشان می‌دهد برای عمق ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر (داده‌های MSFL برای تمام عمق حفاری شده در دسترس نبوده، این بازه عمقی که داده نمودارگیری چاه کامل بوده و داده مغزه نیز وجود دارد برای رسم مدل پتروفیزیکی در نظر گرفته شده است)، در ستون دومی از سمت راست شکل، لیتولوژی کلسیت و ماسه‌سنگ مشخص شده است. همان طور که از قبل انتظار داشتیم لیتولوژی عمده از نوع آهک کلسیتی است و ماسه‌سنگ نیز به مقدار کم در سازند حضور دارد. بنابراین، ضخامت ۱۱۲/۴۶ متری از سازند که نمونه مخزنی دارد از نظر سنگ‌شناسی چهار زون است. زون اول که بالاترین قسمت می‌باشد عمدتاً ماسه‌سنگی با نفوذ در لایه آهکی، زون دوم بخش آهک کلسیتی در میان دو بخش ماسه‌سنگی، زون سوم بخش ماسه‌سنگ میانی و زون چهارم بخش آهک کلسیتی زیرین است. علاوه بر تعیین بافت سنگ‌شناسی سازند حفاری شده در این بازه عمقی، توزیع حجم نفت و آب نیز به دست آمد.

همان طور که در ستون اول از سمت راست شکل ۴-۱۴ مشخص شده است، سه زون نفتی در این بازه عمقی به چشم می‌خورد. زون اول در بخش ماسه‌سنگی، زون دوم در بخش ماسه‌سنگ میانی و زون سوم در بخش پایین زون چهارم سنگ‌شناسی یعنی در سنگ آهک چهارم دیده می‌شود. بنابراین در این بخش از سازند که چاه مورد مطالعه از آن عبور کرده است سنگ‌شناسی به طور عمده کربناته از نوع آهک کلسیتی و مقدار کم ماسه‌سنگ بوده و سیال موجود در منافذ به صورت نفت و آب است.

#### ۴-۴ مقایسه نتایج تحلیل نمودارهای چاه‌نگاری و آنالیز مغزه

ابتدا دو نمونه مغزه برای چاه‌های مورد مطالعه تهیه شد. سپس مقاطع نازک از هر مغزه تهیه شد. مقاطع نازک مورد مطالعه میکروسکوپی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز مقاطع نازک حاصل از مغزه‌ها نشان داد که بافت سنگ‌شناسی به صورت عمده آهک کلسیتی است. آنالیز نمودارگیری چاه با استفاده از نمودارهای متقاطع نوترون-چگالی و صوتی-چگالی نشان داد که لیتولوژی به صورت عمده کربناته از نوع آهک کلسیتی به همراه مقداری ماسه‌سنگ در بعضی نقاط از عمق چاه مورد مطالعه است. همچنین تخلخل تعدادی مغزه در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متر در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. علاوه بر این تخلخل مؤثر نیز به کمک نمودارگیری چاه با استفاده از نرم‌افزار Geolog محاسبه شد. تحلیل نتایج این دو روش برای تخلخل نشان داد تطبیق بسیار زیادی بین داده‌های این دو روش وجود دارد. بنابراین می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که بین نتایج نمودار چاه‌نگاری و آنالیز مغزه برای تعیین لیتولوژی و تخلخل تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد.

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ نتیجه گیری

در تحقیق حاضر تلاش شد تا پس از مطالعه‌ی دقیق منابع و گردآوری داده‌ها و اطلاعات چاه‌پیمایی، با استفاده از نرم‌افزار Geolog و با استفاده از روش محاسبه‌ی قطعی و احتمالی، لیتولوژی سازند حفاری شده، میزان توزیع تخلخل، اشباع از آب و میزان هیدروکربن تعیین و زون‌های مخزنی واقع در چاه مورد مطالعه در ناحیه‌ی نفت‌خیز کشور واقع در میدان نفتی کوپال بررسی شود. بدین منظور، اطلاعات مربوط به پاسخ‌های نمودارهای چاه‌نگاری متداول چاه crab-04 در ناحیه‌ی مورد مطالعه اعم از نمودارهای چاه‌نگاری اشعه‌ی گاما، کالیپر، مقاومت، چگالی، تخلخل نوترونی و صوتی در اختیار قرار گرفت. علاوه بر این در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری تعدادی مغزه تهیه شد و با روش آزمایشگاهی خواص پتروفیزیکی آن مشخص شد. دو مغزه از عمق‌های ۴۳۶۰ و ۴۴۵۰ متر برای تشخیص بافت سنگ‌شناسی و فسیل تهیه شد. سپس مقاطع نازک از دو مغزه تهیه شد. با ترکیب داده‌های حاصل از نمودارگیری و مغزه نتایج زیر حاصل شد:

- آنالیز تصاویر حاصل از مقاطع نازک دو مغزه‌ی مورد بررسی نشان داد که نوع سنگ وکستون بوده و کلسیت فراوانی دارد. همچنین قالب فسیل‌ها از نوع فرامینیفر، میلیولید، استراکود، گاستروپد و فرومینیفر فرانگتون بود.
- آنالیز نمودارهای چاه‌نگاری به کمک رسم نمودارهای متقاطع نوترون-چگالی و صوتی-چگالی به کمک چارت‌های استاندارد CP-7 و CP-15 مختلف نشان داد که لیتولوژی عمدتاً از نوع کربناته کلسیتی و مقادیر اندک ماسه‌سنگی و دولومیتی در چاه مورد مطالعه است.
- میزان تخلخل نمونه‌ها در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری با استفاده از روش آزمایشگاهی بدست آمد. همچنین در این بازه میزان تخلخل مؤثر با استفاده از تحلیل نمودارهای چگالی، نوترون و صوتی در نرم‌افزار Geolog محاسبه شد. مقایسه نتایج دو روش نشان داد تطابق بسیار قوی بین مقدار تخلخل در دو روش وجود دارد.
- توزیع تخلخل در کل عمق چاه مورد مطالعه در بازه ۰ تا ۱۲ درصد و در بازه عمقی ۴۳۵۷/۱۲ تا ۴۴۶۹/۵۸ متری در بازه ۰ تا ۵ درصد قرار دارد. این نتایج نشان می‌دهد، سازند در چاه مورد مطالعه دارای تخلخل بسیار کم است.

- اشباع از آب در کل عمق چاه مورد مطالعه در بازه ۰ تا ۱۰۰ درصد قرار دارد، به طوری که بیشترین تمرکز اشباع از آب در محدوده ۳۵ درصد است. این نتایج نشان می‌دهد که سازند در چاه مورد مطالعه دارای محتوی آب زیاد است.
- مدل پتروفیزیکی ایجاد شده در چاه مورد مطالعه نشان داد که از نظر سنگ‌شناسی بافت سنگ کربناته کلسیتی با نفوذ ماسه‌سنگ است که دو زون ماسه‌سنگی دارد و دو زون کربناته کلسیتی است. همچنین، از نظر محتوی حجم نفت، مخزن دارای درصد اشباع نفت زیادی نیست و سه زون مخزنی با اشباع نفت نسبتاً خوب قابل مشاهده و تفکیک است.
- در پایان، مقایسه نتایج آنالیز آزمایشگاهی مغزه‌ها شامل تعیین تخلخل به روش آزمایشگاهی و تهیه مقاطع نازک با نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای چاه‌نگاری نشان‌دهنده تطبیق نسبتاً خوب بین دو روش است.

## ۵-۲ پیشنهادات

با توجه به این پژوهش و پژوهش‌های مشابه، به نظر می‌رسد که پیشنهادات زیر برای مطالعات آینده مفید واقع شود:

- بررسی عدم قطعیت‌ها و تعیین میزان عدم قطعیت در ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی (تخلخل، اشباع سیال، حجم شیل) با استفاده از روش‌های آماری مونت-کارلو
- بررسی تاثیر حضور گاز بر تخمین پارامترهای مخزنی با روش احتمالی با استفاده از نتایج نمودارگیری چاه و مقایسه نتایج با نمونه‌های مغزه و مقاطع نازک
- استفاده از روش‌های هوش مصنوعی برای تخمین پارامترهای مخزن با استفاده از داده‌های نمودارگیری و تعیین میزان عدم قطعیت‌ها در تخمین نتایج

## منابع و ماخذ

- احمدی، ر.، امیری بختیار، م.ص.، ارزیابی خواص پتروفیزیکی سازند آسماری میدان نفتی بزرگ مارون واقع در جنوب غرب کشور با استفاده از نگارای چاه پیمایی، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۶، شماره ۱۹، بهار ۱۳۹۵، صفحه 22-10
- بهلولی، ب.، حقزاده، ر.، حسنی، ع.، تعیین پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن در میدان سراجیه قم، ۱۳۸۷، مجله علوم دانشگاه تهران، دوره ۳۴، شماره ۲، ۵۵-۶۴
- پارسامنش، ا.، شاه‌پسندزاده، م.، صابری، ف.، نبی بیدهدی، م.، بررسی ویژگی‌های پتروفیزیکی سازند ایلام در مرز دو میدان نفتی اکتشافی جنوب ایران با استفاده از داده‌های لرزه‌نگاری، چاه‌نگاری و آزمایش چاه، ۱۳۹۳، ماهنامه علمی-ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۱۷
- تاج‌الدینی، م.، کدخدایی، ع.، جهانگیری، ب.، ارزیابی پتروفیزیکی و بررسی کیفیت مخزنی سازندهای کنگان و دالان در میدان گازی پارس جنوبی، ۱۳۹۱، اولین همایش زمین شناسی فلات ایران
- تدینی، م.، نبی بیدهدی، م.، تعیین خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن میدان پارس با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، ۱۳۸۵، اولین کنگره مهندسی نفت ایران
- جوزانی کهن، گ.، نوروزی، غ.، سحابی، ف.، معماریان، ح.، مروری بر روابط پتروفیزیکی تعیین حجم رس، مطالعه موردی سازند مخزنی شوربچه، ۱۳۹۳، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره نهم، شماره ۲۴، ۶۵-۷۵
- سلیمانی، ب.، خسروتهرانی، خ.، افقه، م.، ۱۳۸۹، محیط رسوبی و چینه نگاری توالی سازند ایلام در میدان نفتی آب تیمور، زمین شناسی ژئوتکنیک (زمین شناسی کاربردی)، دوره ۶، شماره ۴؛ از صفحه ۲۸۷ تا صفحه ۲۹۳.
- مهرابی، ح.، رحیم پوربناب، ح.، امیدوار، م.، حاجی مشهدی، ح.، ۱۳۹۱، مطالعه محیط رسوبی، دیاژنز و چینه نگاری توالی سازند سروک در میدان نفتی آب تیمور در بخش غربی ناحیه فروافتادگی دزفول، پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب شناسی (مجله پژوهشی علوم پایه دانشگاه اصفهان): تابستان ۱۳۹۱، دوره ۲۸، شماره ۲؛ از صفحه ۲۵ تا صفحه ۵۰.
- نظام اسلامی، م.، موحد، ب.، کهنسال قدیم وند، ن.، زمان نژاد، م.، (۱۳۹۵)، ارزیابی پتروفیزیکی و تعیین خصوصیات مخزنی سازندهای کنگان دالان بالایی در چاه‌های A و B با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی در یکی از میادین جنوب غربی ایران، ماهنامه اکتشاف و تولید نفت و گاز، شماره ۱۳۶

Abreu, C., & Carrasquilla, A. (2015, August). Preliminary analysis of petrophysical data set of a carbonate reservoir from Field A in Campos Basin. In *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 3-6 August (pp. 793-798)*. Brazilian Geophysical Society.

Askari, A.A., and Behrouz, T., (2011). A Fully Integrated Method for Dynamic Rock Type Characterization Development in One of Iranian Off-Shore Oil Reservoir. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tehran, 45 (2): 83-96*.

Bateman RM (1985) Open-hole log analysis and formation evaluation Schlumberger Inc. In: Log interpretation principles. *Schlumberger education services, Houston, USA*

Dresser A (1981) Well logging and interpretation techniques. *Dresser Industries Inc., Addison*

Ellis DV, Singer JM (1987): Well logging for Earth Scientist.

Ellis, D. V., Singer, J. M., 2008, "Well Logging for Earth Scientists", *2nd edition, Springer Publication, 692 p.*

Gaymard R, Poupon A (1968) Response of neutron and formation density logs in hydrocarbon bearing formations. *Log Anal 9(5):3-12*

Ghadami, N., Rasaei, M.R., Hejri, S., Sajedian, A. and Afsari, K., (2015). Consistent porosity–permeability modeling, reservoir rock typing and hydraulic flow unitization in a giant carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering, 131, pp.58-69*.

Ghoneimi A, Ibrahim SA, El-Kenawy A, Farrag K (2017) Use of well logs for petrophysical evaluation of Abu Madi reservoir in Abu Madi-ElQara-Nidoco area, Northern Nile Delta, *Egypt. J Geol Geophys*.

Islam, M. A. (2010). Petrophysical evaluation of subsurface reservoir sandstones of Bengal Basin, Bangladesh. *Journal of the Geological Society of India, 76(6), 621-631*.

Kumar, M., Dasgupta, R., Singha, D. K., & Singh, N. P. (2018). Petrophysical evaluation of well log data and rock physics modeling for characterization of Eocene reservoir in Chandmari oil field of Assam-Arakan basin, India. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 1-18*.

Lin, Q., Al-Khulaifi, Y., Blunt, M.J. and Bijeljic, B., (2016). Quantification of sub-resolution porosity in carbonate rocks by applying high-salinity contrast brine using X-ray microtomography differential imaging. *Advances in Water Resources, 96, pp.306-322*.

Mimonitu, 2010, Petrophysical evaluation of the aliban age gas bearing sandstone reservoirs of the O-M field, orange basin, South Africa, *PhD thesis, University of Western Cape, Bellville, South Africa*

Ostad, M. N., Asghari, O., Emery, X., Azizzadeh, M., & Khoshbakht, F. (2016). Fracture network modeling using petrophysical data, an approach based on geostatistical concepts. *Journal of Natural Gas Science and Engineering, 31, 758-768*.

Rider MH (1996): The geological Interpretation of well logs; *John Wiley and sons, New York*.

Russel WL (1944): The Total Gamma- Ray Activity of Sedimentary Rocks as indicated by Geiger-Counter Determinations. *Geophysics, April 1944*.

Sahabi, F., 2009, "Sedimentary Petrology", 6<sup>th</sup> edition, *University of Tehran Publication, 266 p*.

Schlumberger (1967) Well evaluation conference Middle East, vol 1, Text vol 2, Examples 2. *Schlumberger, Paris, France*

Schlumberger Ltd (1989): Log Interpretation Principles/Applications. *New York*.

Simandoux, P. Mesures Dielectriques en Milieu Poreux, Application a Mesure des Saturations en Eau, Etude du Comportement des Massifs Argileux, *Revue de l'Institut Francais du Petrole, Issue Supplementaire*, pp. 193-215, 1963. Translated in Shaly Sand SWPLA Reprint Volume, 1982.



## **Abstract**

Reservoir petro physical evaluation by using well logging interpretation and coring is employed to determine the best quality of reservoir and choice the best production zone. It is important to determine the shale volume, lithology, total and effective porosity and water saturation to estimate the best quality of reservoir in field and reservoir modeling. Copal filed is one of the important Iranian oil filed in Defuel embayment. The Illam and Sarvak are the two oil formations in this field. The present study focused on the reservoir evaluation and choice the best zonation using combination of core data and well logging interpretation by Geolog in cases of deterministic and probabilistic analysis. The summary of the main results from the present study are presented in below:

The analysis of two thin sections from core showed that rock is Wake stone and have some Calcite. More than, the fossils of these thin sections are Foraminifer, Miliolid, Strakood, Gastroper, Foraminifer Frangton. Also, the results of cross-plot analysis using Neutron-Density and Sonic- Density showed that formation have limestone, sand stone and dolomite but, the limestone was more than other. More than, the frequency of water saturation was in interval between 0 to 100 percent and 35 percent was the most frequency. On the other hand, the porosity has distribution between 0 to 12 percent. That shows this rock have low porosity. More than, the effective porosity was estimated using Neutron and Density log. This results were compared with core lab data. The results show the estimated effective porosity from logging have strong relation with core data. Finally, the petro physical model of well was estimated in depth of 4357.12m to 4469.58m. The results show this formation have large volume of water and three zones of oil. But, based on lithology have two sandstone zones and two limestone zones. In summary, the logging interpretation and coring data analysis showed this formation have limestone with low volume of sandstone, large volume of water, low porosity and low oil volume. This shows this oil formation have good to fair quality of reservoir.

**Keywords:** Petro physical Evaluation, Geolog, Well logging, Cores.



**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering - Exploraation**

**Petrophysical Evalution and Zoning of Reservoir based on  
Petrophysical and cores Data in One of Iranian Carbonate  
Reservoirs**

**By: Hamidreza Azadi**

**Supervisors:**

**Dr Abolghasim Kamkar Rouhani**

**Dr Behzad Tokhmechi**

**April 2019**