



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

بهبود محاسبه اشباع آب در مخازن هیدروکربوری کربناته به کمک
داده های چاه نگاری و آزمایشگاهی

دانشجو:

یاسر سلیمی دلشاد

اساتید راهنما:

دکتر علی مراد زاده

دکتر عزت اله کاظم زاده

تابستان ۱۳۸۹



دانشگاه شهردرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی

ارشد خاتم / آقای یاسر سلیمی (نشار رشته مهندسی گرایش الکترونیک) تحت عنوان پیوسته مفاسد اشباع

آب در مقارن هیبرید و کربوری کربناته به کمک داده های پناه پیمایی و آزمایشگاهی که در تاریخ ۱۳۰۴/۱۶ با حضور

هیات محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

<input type="checkbox"/> مردود	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input checked="" type="checkbox"/> امتیاز عالی (۱۹-۱۶)
--------------------------------	------------------------------------	---

۲- بسیار خوب (۱۶-۱۷/۹۹)

۱- عالی (۱۸-۲۰)

۴- قابل قبول (۱۲-۱۳/۹۹)

۳- خوب (۱۴-۱۵/۹۹)

۱- استاد راهنما	دکتر علی مرزوقی	دانشیار
۲- استاد مفلح برهنه	دکتر عزتاله کاظمی	استاد
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر حمید آقاچانی	استادیار
۴- استاد ممتحن	دکتر ابراهیم کامکار	استادیار
۵- استاد ممتحن	دکتر بهزاد نعمتی	استادیار

تأیید رئیس دانشکده:

تقدیم به:

به منجی عالم بشریت: مهدی موعود
اسوه های مقاومت و ایثار: شهدا
کوه صبر و بردباری: پدر و مادرم
همراه لحظه های سخت: همسر
که آفتاب مهرشان در دلم غروب نخواهد کرد.

با تشکر و سپاسگذاری از

جناب آقایان دکتر علی مراد زاده و دکتر عزت اله کاظم زاده، اساتید راهنمای اینجانب، به خاطر بهره مندی از تجربیات و راهنمایی‌هایشان، همکاران محترم واحد پژوهش مغزه های نفتی پژوهشگاه صنعت نفت به خاطر همفکری‌های ارزشمندشان و با تقدیر از مهندس میثم سلیمی دلشاد و مهندس داودی و دیگر دوستانی که مرا در تکمیل این مهم یاری کردند.

اقرارنامه و واگذاری حقوق

اینجانب یاسر سلیمی دلشاد تایید می نمایم که مطالب مندرج در این پایان نامه کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

یاسر سلیمی دلشاد

مرداد 89

چکیده

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که لازم است با دقت بالا محاسبه شود، میزان اشباع شدگی آب است. روش متداول برای این منظور، استفاده از داده‌های حاصل از تگارهای الکتریکی مختلف و به کارگیری روابط مربوطه می باشد که البته با فرضیات انجام شده در این روش، در بعضی از موارد نتایج از دقت لازم برخوردار نمی باشد.

از آنجائیکه داده‌های آزمایشگاهی حاصل از آزمایش‌های مغزه دارای دقت بالا می باشد، در این پایان نامه هدف اصلی به کارگیری داده‌های مغزه به منظور محاسبه اشباع شدگی آب با دقت بالا در عمق‌های مختلف یکی از چاه‌های مخزن پارس جنوبی می باشد. در این راستا از روشی بهبود یافته استفاده شده است. در این روش با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی، به روش تزریق جیوه و طبقه‌بندی سنگ‌های کربناته با استفاده از مفهوم واحد‌های جریان هیدرولیکی و همچنین استفاده از تابع لورت و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، میزان اشباع شدگی آب در چاه مورد مطالعه محاسبه، و در پایان مقادیر اشباع شدگی آب حاصل شده از این روش، با مقادیر اشباع شدگی آب به-دست آمده از تگارهای چاه‌پیمایی مقایسه می‌شود. نتایج این مقایسه نشان می‌دهند که با استفاده از روش مورد مطالعه، می‌توان میزان اشباع شدگی آب را در نقاط مختلف چاه، در مخازن هیدروکربوری با دقت بالا محاسبه نمود.

همچنین روابطی بین شاخص کیفیت مخزن و میزان اشباع شدگی آب غیر قابل استحصال، در هر واحد جریان هیدرولیکی ارائه شده است که می‌توان از این روابط در پیش بینی مستقیم و سریع میزان اشباع آب غیر قابل استحصال در هر نقطه از چاه مورد مطالعه، در صورت داشتن تخلخل، تراوایی و تعیین شاخص کیفیت مخزنی، استفاده نمود.

لیست مقالات مندرج

1- تلفیق داده های فشار موئینگی و واحدهای جریان هیدرولیکی به منظور تعیین اشباع آب

کاهش نیافتنی در مخازن کربناته هیدروکربوری

2- Combination of capillary pressure and hydraulic flow units for estimation of irreducible water saturation in carbonate hydrocarbon reservoir

فهرست

1	فصل اول (کلیات).....
2	1-1- مقدمه
2	2-1- تاریخچه
7	3-1- بررسی سوابق و ضرورت مطالعه حاضر.....
11	4-1- هدف و روش مورد تحقیق
12	5-1- ساختار پایان نامه.....
13	فصل دوم (مفاهیم و تئوری)
14	1-2- مقدمه
14	2-2- تخلخل
15	1-2-2- تقسیم بندی تخلخل
16	2-2-2- روش های محاسبه تخلخل
16	2-2-2-2- محاسبه تخلخل با استفاده از روش های چشمی و شمارش نقطه ای
16	2-2-2-2- محاسبه تخلخل با استفاده از روش های آزمایشگاهی
17	2-2-2-3- محاسبه تخلخل با استفاده از داده های چاه نگاری
17	2-2-2-3-1- محاسبه تخلخل با استفاده از یک نگار
18	2-2-2-3-2- محاسبه تخلخل با استفاده از دو نگار
18	الف- محاسبه تخلخل بوسیله نمودار متقاطع نوترون-چگالی
20	ب- محاسبه تخلخل با استفاده از نمودار متقاطع نوترون-صوتی
22	ج- محدودیتهای استفاده از نمودارهای متقاطع
23	3-2- تراوایی
24	1-3-2- روش های اندازه گیری و محاسبه تراوایی
24	3-2-1- استفاده از داده های چاه پیمایی
24	الف) تخمین تراوایی با استفاده از فشار موئینه
25	ب) محاسبه تراوایی از روی شیب مقاومت

- 26.....ج) تخمین تراوایی بوسیله تخلخل و اشباع شدگی آب غیر قابل استحصال.....
- 27.....2-1-3-2- استفاده از مغزه.....
- 28.....4-2- رابطه تخلخل و تراوایی در واحدهای جریان هیدرولیکی.....
- 33.....5-2- مفهوم فشار موئینگی.....
- 33.....1-5-2- فشار موئینه.....
- 35.....2-5-2- روشهای اندازه گیری فشار موئینگی.....
- 36.....1-2-5-2- روش سانتیفریوژ.....
- 36.....1-1-2-5-2- محاسبات.....
- 37.....2-1-2-5-2- روش انجام آزمایش.....
- 38.....2-2-5-2- روش تزریق جیوه.....
- 38.....1-2-2-5-2- اندازه گیری فشار موئینه به روش تزریق جیوه.....
- 41.....2-2-2-5-2- تئوری.....
- 42.....3-2-2-5-2- محاسبات قطرفضای متخلخل.....
- 43.....6-2- تابع لورت J.....
- 44.....7-2- محاسبه اشباع شدگی.....
- 45.....1-7-2- محاسبه اشباع شدگی در سازندهای شیل دار (ر.س).....
- 49.....8-2- نرمال کردن اشباع آب.....
- 50.....فصل سوم (موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه).....
- 51.....1-3- مقدمه.....
- 51.....2-3- موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی.....
- 52.....3-3- زمین شناسی ساختمانی.....
- 52.....4-3- چینه شناسی سنگ های مخزن.....
- 52.....1-4-3- واحد k_1
- 53.....2-4-3- واحد k_2
- 54.....3-4-3- واحد k_3
- 54.....4-4-3- واحد k_4

54	..... 3-4-5 واحد k_5
55	..... 3-4-6 واحد نار
55	..... 3-4-4 معرفی اطلاعات موجود از چاه مورد مطالعه
57	..... فصل چهارم (پردازش داده ها)
58	..... 4-1 مقدمه
58	..... 4-2 پردازش داده ها
61	..... 4-2-1- تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی
63	..... الف- آنالیز هیستوگرام
64	..... ب- مجموع مربع خطا
67	..... محاسبه FZI هر واحد جریانی
69	..... 4-2-2- محاسبه تابع لورت (J) برای تمامی نمونه ها
70	..... 4-2-3- محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir)
76	..... 4-2-4- محاسبه اشباع آب نرمال شده
78	..... 4-2-5- بدست آوردن رابطه ای بین Sw^* و تابع لورت
81	..... 4-2-6- محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب
83	..... 4-2-7- محاسبه تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب
86	..... 4-2-8- محاسبه مقادیر Sw^* برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن
89	..... 4-2-9- محاسبه مقادیر Sw برای هر نقطه ارتفاعی بالای سطح ایستابی آب مخزن
92	..... 4-2-10- مقایسه مقادیر Sw محاسبه شده، با مقادیر Sw حاصل از لاگ چاه پیمایی
94	..... فصل پنجم (نتیجه گیری و پیشنهادات)
95	..... 5-1- جمع بندی نتایج
95	..... 5-2- نتایج حاصل شده در زمینه محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir)
96	..... 5-3- نتایج حاصل شده در زمینه محاسبه اشباع شدگی آب (Sw)
99	..... 5-4- پیشنهادات
100	..... منابع
100	..... منابع فارسی

100.....	منابع لاتین
105.....	پیوست
106.....	پیوست الف (چگونگی محاسبه تخلخل به کمک نگارهای نوترون، چگالی و صوتی)
107.....	الف-1- اندازه گیری تخلخل با استفاده از نگار نوترون
110.....	الف-2- اندازه گیری تخلخل به وسیله نگار چگالی (گاما- گاما)
112.....	الف-3- اندازه گیری تخلخل با استفاده از نگار صوتی
116.....	پیوست ب (نحوه آماده سازی نمونه و آزمایشات مغزه)
117.....	ب-1- آماده سازی نمونه جهت انجام آزمایش
117.....	ب-1-1- تهیه نمونه پلاگ
117.....	ب-1-2- شستشوی نمونه های پلاگ
117.....	ب-1-3- خشک کردن پلاگها
117.....	ب-2- اندازه گیری تخلخل و تراوایی نمونه ها در آزمایشگاه
118.....	ب-2-1- اندازه گیری تخلخل و وزن مخصوص دانه ای در آزمایشگاه
118.....	ب-2-1-1- تکنیک قانون بویل
118.....	ب-2-1-2- حجم کل
119.....	ب-2-1-3- حجم ذرات
119.....	ب-2-1-4- حجم منافذ
120.....	ب-2-2- اندازه گیری تراوایی در آزمایشگاه
121.....	ب-3- اندازه گیری فشار موئینگی در آزمایشگاه

فهرست اشکال

- شکل 2-1: نمودار چگالی-نوترون جهت تعیین تخلخل 19
- شکل 2-2: نمودار نوترون-صوتی جهت تعیین تخلخل 21
- شکل 2-3: نمودار لگاریتم تراوایی k در مقابل تخلخل \emptyset در چاه مورد مطالعه 29
- شکل 2-4: منحنی فشار موئینه تزریق جیوه (MICP) 39
- شکل 3-1: موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی 51
- شکل 3-2: ستون چینه شناسی سازند کنگان و دالان در میدان پارس جنوبی 53
- شکل 3-3: مقادیر اشباع شدگی آب و هیدروکربور، میزان شیل و میزان دولومیت حاصل از داده‌های چاه‌پیمایی، در عمق‌های مختلف 56
- شکل 4-1: برخی نشانه‌های زمین شناسی مهم که با چشم قابل تشخیص است 60
- شکل 4-2: آنالیز هیستوگرام بر روی داده های لگاریتمی شاخص جریان منطقه‌ای 63
- شکل 4-3: نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحد های جریان هیدرولیکی 65
- شکل 4-4: نمودار لگاریتمی شاخص کیفیت مخزن در مقابل نسبت پوکی برای سه واحد جریان هیدرولیکی 67
- شکل 4-5: بدست آوردن **Swir** با استفاده از نمودار **Pc - Sw** برای نمونه شماره 9 73
- شکل 4-6: رابطه بین **Swir** و **RQI** برای تمامی نمونه ها 74
- شکل 4-7: رابطه بین **Swir** و **RQI** در واحد جریان هیدرولیکی 1 74
- شکل 4-8: رابطه بین **Swir** و **RQI** در واحد جریان هیدرولیکی 2 75
- شکل 4-9: رابطه بین **Swir** و **RQI** در واحد جریان هیدرولیکی 3 75
- شکل 4-10: رابطه بین **Sw*** و تابع **J** برای واحد جریان هیدرولیکی شماره 1 79
- شکل 4-11: رابطه بین **Sw*** و تابع **J** برای واحد جریان هیدرولیکی شماره 2 80
- شکل 4-12: رابطه بین **Sw*** و تابع **J** برای واحد جریان هیدرولیکی شماره 3 80
- شکل 4-13: مقایسه اشباع های آب بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و داده های چاه پیمایی 92

- شکل (الف-1): نمودار تصحیح ماتریکس بر روی تخلخل نوترون 109
- شکل (الف-2): نمودار تصحیح ضخامت سله گل بر روی تخلخل نوترون 109
- شکل (الف-3): نمودار تعیین تخلخل از روی نگار چگالی 111
- شکل (الف-4): نمودار تعیین تخلخل از روی نگار صوتی 115
- شکل ب-1: شکل شماتیک دستگاه اندازه گیری تخلخل با استفاده از گاز هلیوم 119
- شکل ب-2: تصویری که به طور شماتیک، دستگاه اندازه گیری تراوایی را نشان می دهد 120

فهرست جداول

- جدول 2-1: تقسیم بندی کیفی سنگ های مخزن بر اساس تراوایی 24
- جدول 2-2: ظرفیت تبادل کاتیونی به عنوان تابعی از نوع شیل 47
- جدول 4-1: مقادیر کشش سطحی و زاویه تماس در شرایط آزمایشگاه و مخزن 58
- جدول 4-2: داده های پتروفیزیکی حاصل از آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه های مغزه 59
- جدول 4-3: مقادیر θ_z ، RQI ، FZI هر نمونه 62
- جدول 4-4: دسته بندی نمونه ها در واحد های جریان هیدرولیکی 66
- جدول 4-5: مقادیر متوسط شاخص جریان منطقه ای (FZI) در هر واحد جریان هیدرولیکی 68
- جدول 4-6: محاسبه تابع لورت برای نمونه شماره 9 69
- جدول 4-7: تبدیل مقادیر فشار موئینه آزمایشگاهی به شرایط مخزن برای نمونه شماره 9 71
- جدول 4-8: مقادیر Sw^* در فشار های موئینگی مختلف برای نمونه شماره 9 77
- جدول 4-9: مقادیر تابع J و اشباع آب نرمال شده در فشارهای موئینگی مختلف برای نمونه شماره 9 78
- جدول 4-10: محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب 81
- جدول 4-11: مقادیر تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح بدون 84
- جدول 4-12: Sw^* محاسبه شده به ازای مقادیر J در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب 87
- جدول 4-13: Sw محاسبه شده برای مخزن 90
- جدول (الف-1): مقادیر چگالی، زمان عبور صوت و نوترون برای کانیهای مختلف 111

فصل اول

کلیات

1-1- مقدمه

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که لازم است با دقت بالا محاسبه شود، میزان اشباع شدگی آب است. اشباع آب در ارتباط مستقیم با مقادیر آب، نفت و گاز موجود در خلل و فرج مخازن هیدروکربوری است. این ضریب به طور کلی بیانگر اشغال بخشی از حجم حفرات توسط سیالات مخزنی به حساب می‌آید. از طرفی تخمین صحیح اشباع آب در ارزیابی مخازن هیدروکربوری، امری اجتناب ناپذیر بوده و بررسی تغییرات ایجاد شده در میزان اشباع آب در اثر تولید سیال هیدروکربوری، می‌تواند بیانگر تولید مؤثر از مخزن باشد. این مسئله همواره به مهندسان مخزن کمک می‌کند تا بتوانند نحوه توزیع سیالات مختلف (آب، نفت و گاز) در داخل شکاف‌ها و حفرات موجود در مخزن را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و به عوامل اساسی که توزیع سیالات مذکور را کنترل می‌کند، توجه بیشتری داشته باشند. این عامل در بسیاری از محاسبات و مدل سازی های مخزن، نقش مؤثری ایفا می‌کند. هرگونه اشتباه در محاسبه میزان اشباع شدگی آب، می‌تواند منجر به از دست دادن زون های بهره ده نفت شود. اگر در محاسبه اشباع شدگی آب خطای خاصی رخ دهد، ممکن است تخمین زیاد¹، در مورد مخزنی با آب اشباع شدگی کم، سبب شود تا آن مخزن بلا استفاده رها شود. عکس این پدیده نیز ممکن است اتفاق بیافتد، بدین صورت که مخزن دارای اشباع شدگی آب زیاد باشد و به دلیل خطای محاسبه، مقدار آن کمتر تخمین زده شود² و در نتیجه هزینه های هنگفتی صرف مخزنی شود که پتانسیل تولید هیدروکربن را ندارد.

1-2- تاریخچه

امروزه ارزیابی ذخایر هیدروکربوری توسط شیوه‌های چاه‌پیمایی نقش مهمی را ایفا می‌کنند. محاسبه اشباع شدگی آب که در مخازن هیدروکربوری از اهمیت ویژه ای برخوردار است، به طور معمول با

¹. overestimation

². underestimation

استفاده از تگارهای چاه پیمایی و به کارگیری فرمول های اشباع شدگی آب، صورت می گیرد. چاه پیمایی، روشی است که در شناخت سازندهای هیدروکربوری و منابع زیرزمینی و ویژگی های آنها مؤثر می باشد و نیز قابلیت بهره دهی مخازن فوق را کنترل کمی و کیفی می نماید. اغلب شیوه های ارزیابی اشباع شدگی این سازندها، با اندازه گیری و تفسیر نگارهای مقاومت ویژه، انجام می پذیرد. نگار مقاومت ویژه، از شاخص ترین ابزار، جهت تعیین خواص سنگ مخزن و سیالات درون آنها است. این نگارها بازتابی از اندازه گیری مقاومت ویژه سنگ های حاوی سیال تشکیل دهنده سازندها است.

آرچی^۱ نخستین پژوهشگری بود که مقاومت ویژه الکتریکی مخازن هیدروکربوری و ارتباط آن با اشباع آب سازند را مطالعه نمود و یکی از اساسی ترین فرمول های محاسبه اشباع شدگی آب را ارائه کرد. او نشان داد که در نمونه های ماسه سنگی، رابطه بین تخلخل (\emptyset) و اشباع آب سازند (S_w)، از تلفیق دو فرمول تجربی زیر بدست می آید [Archie, 1942]:

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{f^m} \quad (1-1)$$

$$I = \frac{R_t}{R_o} = \frac{1}{S_w^n} \quad (2-1)$$

$$S_w = \left(\frac{a}{f^m} \times \frac{R_w}{R_t} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3-1)$$

در این روابط:

F: ضریب مقاومت ویژه سازند

I: شاخص مقاومت ویژه سازند

S_w : اشباع آب سازند

a: ضریب ثابت آرچی ($a=1$)

m: ضریب سیمان شدگی ($m=2$)

¹. Archie

n : نمای اشباعی یا توان اشباع شدگی ($n=2$)

R_w : مقاومت آب سازندی

R_t : مقاومت نمونه ای است که علاوه بر آب سازندی از هیدروکربور نیز اشباع شده است.

R_o : مقاومت نمونه ای تمیز است که صد درصد اشباع از آب سازندی باشد.

معادله آرچی، معادله ای است که دیگر معادلات اشباع شدگی آب براساس آن، بنیاد گذاشته شده است.

آزمایش‌هایی که در شرکت ژئوتک¹، بر روی سنگ‌های کربناته، با درجه تخلخل کمتر از ده درصد انجام شد، حاکی از متغیر بودن پارامترهای a ، m و n است و همچنین بین ضریب مقاومت ویژه سازند، تخلخل و نیز درصد اشباع آب سازند برای این گونه سنگ‌ها، مقدار پارامترهای فوق، غیر از مقادیر آرچی گزارش گردید.

آرچی مقدار ثابت a را مساوی عدد یک در نظر گرفت و وینسور² مقدار ثابت a را، غیر از این عدد گزارش نموده است و آن را تابع مقدار درصد اشباع آب درون منافذ می‌داند [Winsauer, 1952].

پژوهشگران دیگری مانند ویبل و فت³ اثر فشار را بر روی پارامترهای آرچی، با نمونه‌های سنگ‌های کربناته و ماسه سنگ مورد آزمایش قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد اثر فشار برای ماسه سنگ‌ها، موثرتر از سنگ‌های کربناته می‌باشد و ارتباط بین مقاومت الکتریکی اشباع آب سنگ‌های مورد آزمایش در فشارهای متفاوت، غالباً از روابط آرچی با مقادیر ثابت در نظر گرفته شده برای ضرایب m و n برابر 2، پیروی نمی‌کند. افزایش یا کاهش فشار برای مقدار توان اشباعی، تابع نوع سنگ است.

¹. Geotech

². Winsuar

³. Fatt, (1957) and Wyble, (1958)

روابطی چند برای ارتباط بین تخلخل و ضریب مقاومت ویژه سازند برای ماسه سنگ ها ابداع گردیده، که در این رابطه، ماکسول¹ ضریب مقاومت ویژه سازند را به صورت تابعی تنها از تخلخل دانسته است [Maxwell, 1881].

شکل کامل تری از این ارتباط، توسط فریک² گزارش شده است. او رابطه بین ضریب مقاومت ویژه سازند و تخلخل را با در نظر گرفتن پارامتری که تابع شکل هندسی دانه های تشکیل دهنده سنگ عنوان گردیده، ارائه نموده است [Fricke, 1931].

محققین دیگری روابط آرچی را از نظر شکل هندسی منافذ و مجاری ارتباطی بین آنها، مورد مطالعه قرار داده اند. بررسی ها نشان می دهد که این روابط مستقل از اشکال هندسی منافذ و مجاری ارتباطی بین آنها است. آنالیز مغزه های تشکیلات مخازن هیدروکربوری، حاکی از متغیر بودن شکل هندسی و مجاری ارتباطی در سنگ ها است. مقدار ثابت برای ضریب سیمان شدگی، در محاسبات اشباع سیالات سازندها، می تواند با خطا همراه باشد [Focke and Munn, 1987].

بوری³ آزمایش هایی بر روی نمونه های آهکی و سنگ های دولومیت آهکی در فشار مخزن، انجام داده و با مقایسه نگارهای چاه پیمایی، رابطه ای برای این گونه سنگ ها بین ضریب مقاومت ویژه سازند و تخلخل گزارش نموده است. این رابطه نشان می دهد با افزایش تخلخل، مقدار ضریب سیمان شدگی کاهش می یابد و تغییرات کمی در مقدار این ضریب سبب افزایش قابل ملاحظه ای در درصد اشباع سیالات درون تشکیلات مخازن هیدروکربوری می گردد [Borai, 1985].

پژوهش های مرفی⁴ نشان داد، بعضی از سنگ های مخازن هیدروکربوری مقاومت ویژه کم دارند (کمتر از یک اهم). تشخیص آنها به دلیل مقاومت کم از نواحی که دارای اشباع آب زیاد می باشند یا مشکل است و یا امکان ندارد [Murphy, 1972]. نگارهای چاه پیمایی نشان می دهند که در این نواحی درصد اشباع آب بیش از پنجاه درصد است، تجربیات گواه آن است که هدایت الکتریکی این گونه

¹ . Maxwell

² . Frick

³ . Borai

⁴ . Murphy

سنگ‌ها، بالا است. این می‌تواند ناشی از غلظت بالای نمک درون آب منافذ سنگ‌هایی که دارای تخلخل زیاد هستند باشد. در این موارد تعیین توان اشباعی با استفاده از شیوه‌های آزمایشگاهی، تخمین دقیق‌تری از اشباع شدگی مخزن را می‌دهد.

آندرسن^۱ نیز عامل ترشوندگی سنگ‌های هیدروکربوری را مورد مطالعه قرار داده است، نتایج حاکی از آن است که پارامترهای اشباعی در سنگ‌هایی که طبیعت آنها آب دوست نباشد، بیش از 2 می‌باشد و این مقدار در سنگ‌های نفت‌دوست، به ده درصد می‌رسد. زیرا بخش‌هایی از سنگ، که آب درون منافذ آنها محدود شده باشد، قادر به توزیع در سنگ نیست، در نتیجه هدایت الکتریکی بسیار کم می‌شود [Anderson, 1975].

کلر [Keller, 1953] دریافت که مقدارهای متفاوت مقاومت در آب اشباع شدگی یکسان، اگر ترشوندگی متغیر باشد بدست می‌آید و مقدار n را، از $1/5$ برای نمونه‌های تر شونده نسبت به آب تا $1/7$ برای نمونه‌های تر شونده نسبت به نفت بدست آورد.

سوئنی و جنینگ [Sweeney and Jennings, 1960] منحنی‌های شاخص مقاوت سنگهای کربناته را اندازه‌گیری کرده و دریافتند که مقدار توان اشباع شدگی برای مغزه‌های تر شونده نسبت به آب، برابر $1/6$ و برای نمونه‌های حدوسط، برابر $1/9$ و برای نمونه‌های تر شونده نسبت به نفت، برابر 8 الی 12 است.

زمانک^۲ بر روی ماسه سنگ‌های حاوی درصدی از کانی‌های رسی، مطالعه نمود. او پی برد وجود این کانی‌ها، سبب افزایش درصد اشباع آب درون آنها می‌گردد و محاسبه اشباع آب برای این گونه سنگ‌ها، با بکارگیری قوانین آرچی همراه با خطا است [Zemanek, 1989]. روابط آرچی برای یک سنگ مخزن، عاری از شیل، پایه‌گذاری گردیده است. از عوامل موثری که سبب تغییر توان اشباعی می‌گردد، همگنی توزیع اشباع آب درون منافذ سنگ‌های مخازن هیدروکربوری است که در این رابطه

¹. Anderson

². Zmank

میلز^۱ مطالعات و آزمایشاتی بر روی سنگ ها انجام داده است. نتایج نشان می دهند که برای سنگ-هایی که توزیع اشباعی آب یک دست داشته باشند، مقدار توان اشباعی ثابت است و چنانچه این توزیع همگن نباشد، مقادیر متغیری برای این پارامتر بدست خواهد آمد.

بررسی های فاک^۲ بر روی سنگ های کربناته، تغییرات پارامتر سیمان شدگی را در این گونه سنگ ها، قابل ملاحظه نشان می دهد و این تغییر را به نوع سنگ و میزان تخلخل نسبت می دهد به طوری که وی دامنه تغییرات این پارامتر برای تخلخل 5 تا 35 درصد را، از 2 تا 5 گزارش نموده است [Focke, 1987].

ویبل^۳ تأثیر فشار در هدایت الکتریکی ماسه سنگ های اشباع شده با آب سازند را مورد مطالعه قرار داد و پی برد مقاومت ویژه تابع فشار است. او افزایش ضریب مقاومت ویژه سازند و سیمان شدگی را تا فشار 3500 پوند بر اینچ مربع گزارش نموده است [Wyble, 1958].

گلانوئل^۴ آزمایشاتی بر روی نمونه های ماسه ای و آهکی و دولومیتی در آزمایشگاه انجام داده است و نتیجه گرفت که افزایش فشار سبب افزایش مقاومت ویژه نیز می گردد [Glanville, 1959].

3-1- بررسی سوابق و ضرورت مطالعه حاضر

همانطور که اشاره شد، یکی از مهم ترین مسائل در صنعت نفت، تخمین اشباع آب (S_w)، در چاه ها با دقت بالا و هزینه پایین است. پیش بینی میزان اشباع آب به دلیل پیچیدگی و ناهمگنی مخازن کربناته، همواره امری بسیار دشوار بوده است. طبق آمار منتشره، میزان نفت تولیدی جهان، عمدتاً وابسته به سازندهای عظیم کربناته، به ویژه در حوزه های نفتی مختلف در خاورمیانه است. از طرفی کارشناسان ذیربط سعی دارند تا بتوانند روشهای مختلفی را به منظور محاسبه دقیق اشباع آب در سازندهای کربناته بیابند.

¹ . Mills

² . Fock

³ . Vybl

⁴ . Glanville

اکثر سازندهای کربناته در خواص پتروفیزیکی خود از جمله ناهمگنی‌ها و اندازه حفرات دارای تغییرات گسترده‌ای می‌باشند. تخمین اشباع آب از جمله مواردی است که تعیین آن در این نوع مخازن، کاری بسیار پیچیده و دشوار به حساب می‌آید. اشباع آب، تخلخل و نفوذپذیری از مهم‌ترین عوامل در طراحی برنامه تولید و مدل‌سازی مخازن هیدروکربوری به شمار می‌روند. بدین منظور برای ارزیابی پارامترهای فوق در سازندهای مختلف، مانند سازندهای آواری (به‌عنوان مثال ماسه سنگ‌ها)، معمولاً می‌توان به روابط و فرضیاتی که بین عوامل مذکور وجود دارد به صورت ذیل اشاره کرد [Allen, et al, 2009]:

- ارتباط نفوذپذیری با نوع سنگ شناسی مخازن هیدروکربوری
 - ارتباط اشباع آب با مقاومت ویژه سیالات موجود در مخازن
 - شناخت و حل آسان مسائل مرتبط با رس و شیل موجود در سازندهای هیدروکربوری
 - ارتباط بین فشار موئینه و نفوذپذیری نسبی براساس تخلخل، اشباع آب و نوع لیتولوژی
- این در حالی است که در سنگ‌های کربناته، شکل هندسی حفرات و نوع لیتولوژی، غالباً ناهمگن نمی‌باشند و همچنین به دلیل آنکه ضرایب آرچی (ضریب سیمان شدگی (m) و توان اشباع (n))، با کانی‌شناسی و حفرات موجود در مخزن در ارتباط نیستند، بنابراین مقوله ارزیابی اشباع آب، دشوار شده و باعث می‌شود تا مقادیر ترشودگی در سنگ‌های کربناته در گستره وسیعی از توان اشباع (n) دچار نوسان شود. این مسئله باعث شده دانشمندان بسیاری حساسیت عوامل مختلف پتروفیزیکی، بر محاسبه آب اشباع شدگی را بررسی کنند.

مفهوم فشار موئینه می‌تواند بوسیله زمین‌شناسان، پتروفیزیک‌ها و مهندسیین نفت برای ارزیابی کیفیت سنگ مخزن، اشباع سیالات مخزن، عمق سطوح تماس سیالات، ضخامت ناحیه حد واسط، ظرفیت پوش سنگ، ناحیه تولیدی در مقابل ناحیه غیر تولیدی و تخمین راندمان بازیافت در زمان بازیافت اولیه و ثانویه، استفاده شود. در این پایان‌نامه به منظور تعیین اشباع آب برای هر نمونه، از روش آزمایشگاهی تزریق جیوه استفاده شده است. روش تزریق جیوه برای ارزیابی توزیع استاتیک

اولیه سیالات مخزن قبل از تولید، پیشنهاد می شود، زیرا این توزیع، به وسیله مشخصات اشباع شدگی اولیه کنترل می شود. فشار موئینه تزریق جیوه، برای کاربردهای زمین شناسی مانند تعیین اندازه و جورشدگی گلوگاه های تخلخل نیز مناسب می باشد [Cruzl, et al, 1995]. اختلافات بین منحنی تخلیه^۱ و آشام^۲، می تواند در تعیین راندمان بازیافت استفاده شود. ارتفاع بالای سطح آب آزاد می تواند به وسیله مقایسه داده های فشار موئینه و اشباع سیالات تعیین شود. همچنین اطلاعات فشار موئینه می تواند برای تفکیک سنگ های مخزنی از غیر مخزنی و زون تولیدی از زون غیر تولیدی، بر اساس اشباع فاز غیر مرطوب کننده، استفاده شود. [Washburn, 1921].

رابطه بین فشار موئینه و اشباع آب، که روشی برای تخمین اشباع آب بر حسب عمق می باشد و مستقل از نگارها است، می تواند برای کالیبره کردن اشباع آب بدست آمده از نگارها استفاده کرد. مدل های اشباع-ارتفاع، اگر به طور موفقیت آمیز اجرا شوند، می توانند عدم قطعیت اندازه گیری پارامترهای الکتریکی را کاهش داده و یا به طور کامل حذف کنند. برای کامل شدن این مدل ها، به اندازه گیری های خواص مغزه و داده های مربوط به فشار موئینه نیاز داریم. مدل های متعددی از اشباع-ارتفاع، که در صنعت نفت استفاده می شوند، وجود دارد که تابع لورت^۳ یکی از این مدل ها است. تابع لورت به صورت گسترده ای برای توصیف فضای متخلخل به کار می رود [Garrouch, 1999].

یک واحد جریان هیدرولیکی^۴ در حقیقت بخشی از مخزن است که از لحاظ خصوصیات کنترل کننده حرکت سیال و یا به عبارتی خصوصیات هیدرولیکی، با سایر بخش های مخزن متفاوت است [Amaefule, et al, 1993 and Abbaszadeh, et al, 1996].

فهد و استفن^۵ (2000) با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی، تراوایی را از داده های نگارهای چاه پیمایی در یک مخزن ماسه سنگی عربستان، تخمین زدند. شدید و ریاض^۶ (2002) یک

¹ . Drainage

² . Imbibition

³ . Levert function

⁴ . Flow Zone Indicator, FZI

⁵ . Fahad and Stephen., 2001

⁶ . Shedin and Reyadh1, 2002

روش جدید برای توصیف مخازن کربناته، با تعریف عدد مشخصه ارائه نمودند. آنها بر روی 83 نمونه، پارامترهای تخلخل، اشباع آب باقی و تراوایی آب و نفت را اندازه‌گیری نمودند. نتایج حاصل بیانگر توصیف بهتر مخزن، با به کارگیری مفهوم شاخص کیفیت مخزنی نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.

کاظم زاده¹ و همکاران (2007) ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل را در واحدهای جریان هیدرولیکی بررسی نمودند. رضایی² و همکاران (2007) مشابه شاخص‌های کیفیت مخزنی، شاخص شعاع الکتریکی را برای توصیف خواص الکتریکی سنگ‌ها، در واحدهای جریان الکتریکی ارائه نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان می‌دهد که با استفاده از روش واحدهای جریان الکتریکی، ارتباط مقاومت ویژه سازندی و تخلخل به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد همچنین تحقیقات انجام شده توسط پراساد³ (2003)، بیانگر بهبود ارتباط بین سرعت امواج تراکمی و تراوایی درون واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد. ضریب همبستگی بین سرعت امواج تراکمی و تراوایی برای واحدهای جریان هیدرولیکی، در محدوده 0/65 تا 0/87 گزارش شده است.

واحدهای جریان هیدرولیکی، تابع شاخص منطقه جریانی هستند. شاخص منطقه جریانی نیز تابعی از شاخص کیفیت مخزن⁴ و نسبت پوکی⁵ است که دو پارامتر مذکور با استفاده از تراوایی مغزه و تخلخل مؤثر قابل محاسبه می‌باشند.

همان‌طور که اشاره شد در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری بر روی نگارهای چاه پیمایی و تصحیحات مربوطه و فرمول‌های اشباع شدگی آب، به خصوص معادله آرچی، به عنوان یک معادله اساسی، به منظور محاسبه اشباع شدگی آب در عمق‌های مختلف چاه صورت گرفته است. اما با توجه به مطالب ارائه شده، پارامترهای لازم برای محاسبه اشباع شدگی آب با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی، به عوامل و شرایط مختلف حساس بوده و با فرضیاتی همراه می‌باشند، و روی دقت این

¹.Kazemzadeh et al., 2007

². Rezaee et al., 2007

³. Prasad ., 2003

⁴. Reservoir Quality Index, RQI

⁵. Void Ratio, \emptyset

روش در شرایط مختلف بحث است چرا که روابط در اصل برای مخازن ماسه سنگی تمیز ارائه شده است و برای مخازن شیل‌دار و کربناته با فرضیات و اصلاحاتی باید همراه باشند که در صورت اشتباه در فرضیات قطعا از دقت کار کاسته خواهد شد. بنابراین می‌توان گفت محاسبه اشباع شدگی آب در مخازن هیدروکربوری به خصوص مخازن هیدروکربوری کربناته با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی امری بسیار دشوار و توأم با خطا می‌باشد. در این شرایط به نظر می‌رسد استفاده از روشی که بتوان در آن از داده‌های حاصل از آزمایشات مغزه (بدلیل دقت بالا در نتایج) و مفاهیم واحدهای جریان هیدرولیکی، فشار موئینگی و تابع لورت به منظور محاسبه هر چه دقیق‌تر اشباع شدگی آب در نقاط مختلف مخازن هیدروکربوری استفاده نمود، امری ضروری باشد

1-4- هدف و روش مورد تحقیق

هدف اصلی پایان نامه محاسبه اشباع شدگی آب در یکی از مخازن هیدروکربوری کربناته، با استفاده از داده‌های مغزه‌های سنگی و بکارگیری روشی بهبود یافته است.

علت انتخاب مخزن کربناته در مطالعه، تحقیق در این زمینه است که آیا می‌توان به منظور محاسبه اشباع شدگی آب در مخازن هیدروکربوری کربناته، از روش مورد مطالعه به طور گسترده در صنعت نفت کشورمان، استفاده نمود یا خیر؟ چرا که اکثر مخازن هیدروکربوری کشورمان از جنس کربناته می‌باشد و تخمین اشباع شدگی آب از جمله مواردی است که تعیین آن در این نوع مخازن کاری بسیار پیچیده و دشوار به حساب می‌آید.

روش مورد مطالعه در این پایان نامه، روشی است که برای مخازن هیدروکربوری ماسه سنگی ارائه شده است. همانطور که اشاره شد یکی از اهداف مطالعه حاضر، استفاده از این روش در مخازن هیدروکربوری کربناته می‌باشد. در این روش با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش

تزریق جیوه و طبقه بندی سنگ‌های کربناته با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی¹ و همچنین استفاده از تابع لورت² و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، میزان اشباع شدگی آب را در عمق های مخزن مختلف محاسبه می نماییم. همچنین نتایج حاصل شده از این روش، با مقادیر اشباع شدگی آب بدست آمده از تگارهای چاه پیمایی مورد بررسی و مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

1-5- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر شامل پنج فصل می باشد. فصل اول به تشریح اهمیت و ضرورت مطالعه در زمینه اشباع شدگی آب در مخازن هیدرو کربوری و تاریخچه ای از مطالعات انجام شده در این زمینه پرداخته شده است. سپس هدف و روش مورد مطالعه به منظور محاسبه اشباع شدگی آب بطور اختصار معرفی گردیده است.

در فصل دوم تئوری ها و مفاهیم مرتبط با روش مورد استفاده در پایان نامه شرح داده شده است. فصل سوم در بر گیرنده موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه به همراه معرفی داده‌های موجود می باشد. پردازش داده ها و مراحل انجام کار در فصل چهارم گنجانده شده است و در نهایت در فصل پنجم نتایج بدست آمده از پایان نامه ارائه و در مورد آنها بحث و نتیجه گیری شده است.

¹ . Hydraulic Flow Units, HFU

² . Levert function

فصل دوم

مفاهیم و تئوری

2-1- مقدمه

برای ارزیابی سطوح تماس سیالات، حرکت سیال و میزان تولید از یک مخزن، آگاهی از تخلخل و تراوایی آن مخزن ضروری است. با داشتن تراوایی و تخلخل و آگاهی از دیگر پارامترها، می‌توان نحوه حرکت سیال در محیط متخلخل را تشخیص داد. تکنیک‌های مختلف تعریف خواص مخزن، از پارامترهای مهم برای دست‌یابی به قابلیت انباشتی مخزن و خواص سیال آن و همچنین مبنایی برای توسعه مدل شبیه‌سازی مخزن هستند. کاربرد این تکنیک‌ها برای تعریف مشخصات مخزن، خصوصاً در مخازن کربناته که دارای ناهمگنی زیادی هستند از اهمیت زیادی برخوردار است. در این فصل به منظور آشنایی خوانندگان محترم، مفاهیم و تئوری‌های بکار گرفته شده در پایان‌نامه، آورده شده است.

2-2- تخلخل

تخلخل عبارتست از نسبت حجم فضاهای خالی به حجم کل سنگ، که به صورت درصد بیان می‌شود. در مخازن هیدروکربنی حجم فضای خالی توسط سیالاتی نظیر گاز، نفت و آب اشغال شده است. تخلخل یکی از دو پارامتر ضروری برای یک سنگ مخزن هیدروکربنی بوده و در تعیین حجم ذخیره، دارای اهمیت فراوان می‌باشد [رضایی، 1381]. تخلخل کمیتی غیر برداری است، زیرا تابعی از حجم کل توده سنگ است. به این معنی که بسته به مقیاس مورد مطالعه، مقدار آن متغیر است. بیشترین تخلخل، در حالتی ایجاد می‌شود که تمام اجزاء سنگ به صورت کره‌های مساوی باشند و طرز قرار گرفتن آنها طوری باشد که خط‌المرکزین کره‌های هر ردیف به خط‌المرکزین کره‌های هر ستون عمود باشد. در این صورت تخلخل محاسبه شده برابر 47% است. در صورتی که تجمع به صورت

رومبیک¹ باشد، تخلخل محاسبه شده برابر 30% و در تجمع هگزاگونال²، تخلخل 26% می باشد. در طبیعت، هرگز حالت ایده آل فوق وجود ندارد [رمضی، 1377].
تخلخل به کمک رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$f = \left[\frac{V_v}{V_v + V_s} \right] \times 100 \quad (1-2)$$

که در آن:

V_v : حجم فضاهای خالی

V_s : حجم قسمت جامد (حجم دانه‌ها) است.

2-2-1- تقسیم بندی تخلخل

تخلخل، تقسیم بندی های مختلفی از نظر زمان تشکیل، مؤثر بودن در تولید و اندازه دانه ها دارد [رضایی، 1381].

الف) از نظر زمان تشکیل

- تخلخل اولیه³ و تخلخل ثانویه⁴

ب) از نظر اندازه

- ریز تخلخل⁵ و درشت تخلخل⁶

ج) از نظر مؤثر بودن برای تولید

- تخلخل کل⁷، تخلخل جدا افتاده⁸ و تخلخل مفید⁹

¹ . Rombic packing
² . Hexagonal
³ . Primary porosity
⁴ . Secondary porosity
⁵ . Micro porosity
⁶ . Marco porosity
⁷ . Total proosity
⁸ . Isolated porosity
⁹ . Effective porosity

2-2-2- روش های محاسبه تخلخل

محاسبه تخلخل در برآورد ذخایر هیدروکربوری، اهمیت ویژه ای دارد. محاسبه تخلخل به روش های مختلفی نظیر روش های چشمی و شمارش نقطه ای، روش های آزمایشگاهی و استفاده از نگارهای چاه نگاری، قابل تعیین می باشد. در ذیل خلاصه ای از این روش ها آورده شده است.

2-2-2-1- محاسبه تخلخل با استفاده از روش های چشمی¹ و شمارش نقطه ای²

روش های چشمی اندازه گیری تخلخل، صرفاً تخمینی هستند. در بیشتر اوقات تخلخل با مشاهده برش مغزه با بزرگنمایی پایین، تخمین زده می شود. تخلخل قابل رویت را، می توان از راه شمارش آنها در مقاطع نازک و یا با استفاده از نرم افزار تحلیل گر تصاویر³، محاسبه نمود. نتایج شمارش چشمی با نتایج شمارش نقطه ای، باید کالیبره شود، در غیر این صورت خطاهای زیادی به وجود خواهد آمد [James White, 1998].

2-2-2-2- محاسبه تخلخل با استفاده از روش های آزمایشگاهی

در روش های آزمایشگاهی، آگاهی از حجم کل، حجم فضاهای خالی و حجم قسمت جامد ضروری است. حجم کل توده سنگ، یا به روش مستقیم و یا با جابجایی حجمی⁴ یک سیال غیر ترکننده⁵ نظیر جیوه، تعیین می شود. حجم فضاهای خالی نیز با استفاده از روش مجموع سیالات⁶، که کم دقت ترین روش است و یا به وسیله انبساط گاز⁷ و قانون بویل⁸، تعیین می شود. جهت اندازه گیری حجم فضاهای خالی و توزیع فضایی اندازه فضاهای خالی، از تزریق جیوه با فشار خیلی زیاد استفاده می شود. مقادیر تخلخل حاصل از روش های آزمایشگاهی، بیشتر از روش های انبساط گاز و قانون بویل است زیرا در روش های آزمایشگاهی، حفرات ریز که با روش های چشمی قابل رویت نیستند نیز،

¹. Visual method

². Point counting

³. Image analyzer

⁴. Volumetric displacement

⁵. Non-wetting fluid

⁶. Summation of fluids

⁷. Gas expansion

⁸. Boyle's law

اندازه‌گیری می‌شوند. خطاهایی که در نتایج آزمایشگاهی ممکن است حاصل شود، ناشی از آماده سازی نامناسب نمونه و روش‌های نامناسب نمونه برداری است. اندازه‌گیری‌های تخلخل باید در شرایط فشار مخزن انجام شود، چون سنگ‌های کربناته تراکم‌پذیرند و تخلخل در آنها با افزایش تنش موثر، کاهش می‌یابد. روش معمول آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری تخلخل، به صورت افزایش فشار همه جانبه است، در حالی که فشار منفذی¹، ثابت نگه داشته می‌شود.

2-2-2-3- محاسبه تخلخل با استفاده از داده‌های چاه نگاری

روشی که بکار برده می‌شود، وابسته به نوع نگارهای موجود می‌باشد. برای محاسبه تخلخل، از نگارهای تخلخل، یعنی نوترون، چگالی و صوتی استفاده می‌شود. تخلخل را می‌توان با کمک یک نگار یا ترکیبی از نگارهای مختلف بدست آورد [Hearst et al, 2000]. برای دستیابی به تخلخل صحیح، لازم است که تصحیحات محیطی، تصحیح اثر هیدروکربن و تصحیح اثر شیل انجام پذیرد.

علاوه بر روش‌های فوق، با استفاده از نتایج حاصل از وارون سازی لرزه‌ای² و به دنبال آن، با استفاده از ویژگی امپدانس صوتی³ سنگ، تا حد زیادی می‌توان به میزان تخلخل پی‌برد.

2-2-2-3-1- محاسبه تخلخل با استفاده از یک نگار

برای محاسبه تخلخل از یک نگار، لازم است که بعضی از پارامترهای مربوط به خمیره سنگ شامل وزن مخصوص خمیره⁴، زمان عبور در خمیره⁵ و تخلخل نوترون خمیره سنگ⁶، مشخص باشد. علاوه بر این، لازم است که خواص سیال شامل وزن مخصوص سیال⁷ زمان عبور در سیال⁸ و تخلخل نوترون سیال⁹ مشخص باشد.

در پیوست الف چگونگی محاسبه تخلخل به کمک نگارهای نوترون، چگالی و صوتی آورده شده است.

1 . Pore pressure
 2 . Seismic inversion
 3 . Acoustic impedance
 4 . ρ_{ma}
 5 . ΔT_{ma}
 6 . ϕ_{Nma}
 7 . ρ_f
 8 . ΔT_f
 9 . ϕ_{Nf}

2-2-2-3-2- محاسبه تخلخل با استفاده از دو نگار

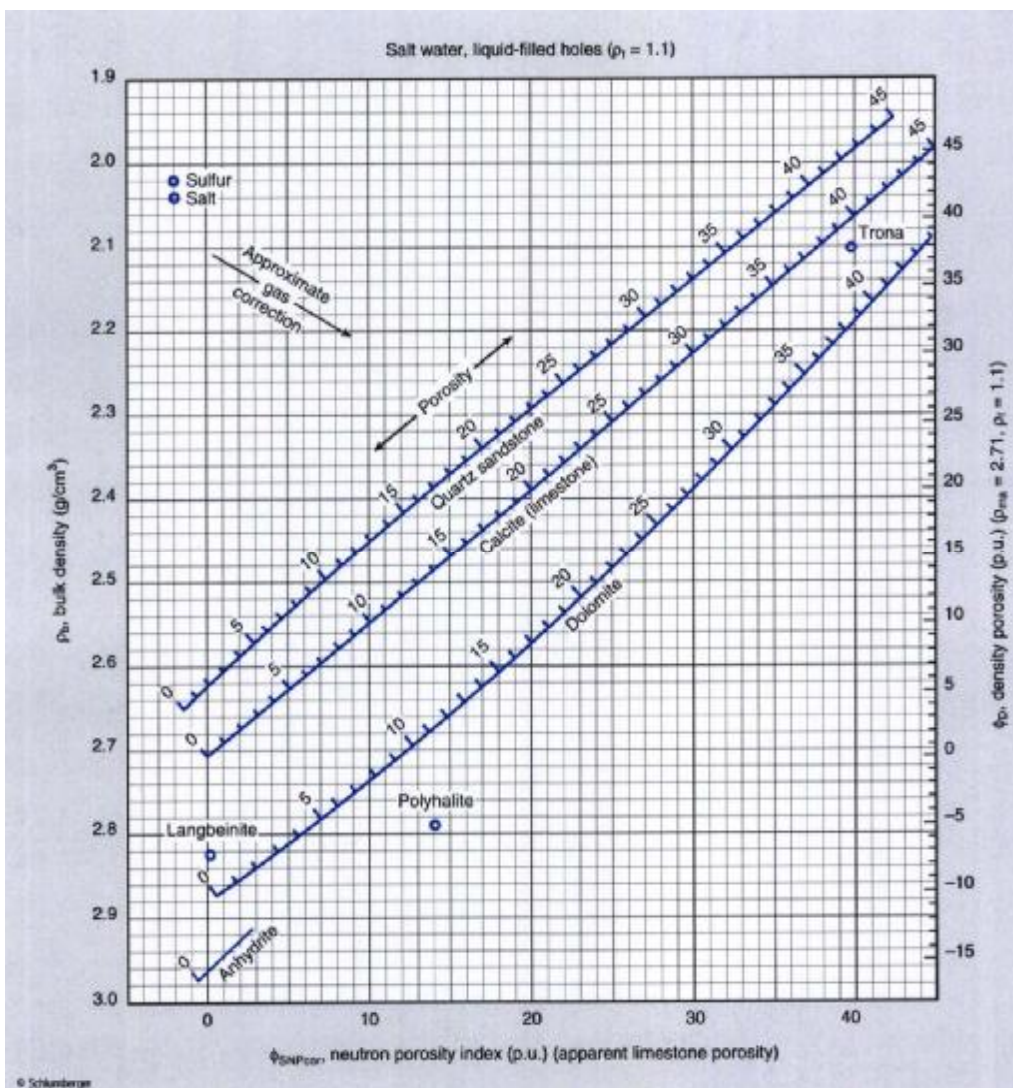
از آنجایی که در تمام روش‌های تخمین تخلخل به وسیله یک نگار، دانستن نوع خمیره سنگ، اهمیت اساسی دارد و با توجه به این که نوع خمیره، معمولاً به طور دقیق مشخص نیست، در عمل جهت حذف دخالت نوع و مقدار خمیره و همچنین اجتناب از محدودیت‌های مربوط به استفاده از یک نگار، از دو نگار بصورت توأم یا نمودارهای متقاطع¹ استفاده می‌شود.

الف - محاسبه تخلخل بوسیله نمودار متقاطع نوترون-چگالی

برای این کار، در شکل (1-2) مقدار تخلخل حاصل از نگار نوترون جبرانی یا نوترون جداره‌ای، در مقابل مقادیر نگار چگالی رسم می‌شوند. محل رسم شدن نقطه با توجه به فاصله نقطه از خطوط ماتریکس (خطوط ترسیم شده در نمودار متقاطع) درصد لیتولوژی را نتیجه می‌دهد. با رسم خطوط هم‌تخلخل روی خطوط ماتریکس، مقدار تخلخل نقطه پلات شده، بدست می‌آید. در این نمودار، منحنی شدن خطوط خمیره دولومیت و ماسه سنگ، موجب انجام گرفتن تصحیح ماتریکس می‌شود. وجود هیدروکربن، به ویژه گاز در سازند، موجب کمتر شدن چگالی سنگ و در نتیجه قرائت کم نگار چگالی می‌شود. همچنین، این امر موجب تراکم کمتر شاخص هیدروژنی در سازند می‌شود و روی نگار نوترونی تاثیر می‌گذارد. بنابراین، وقتی این دو نگار در کنار هم قرار می‌گیرند، در زون گازدار از هم جدا می‌شوند، که به آن اثر توپی² اطلاق می‌شود [Brock, 1986]. بنابراین نقاط مربوط به زون گازی، در قسمت بالا و سمت چپ نمودار متقاطع قرار می‌گیرند، که باعث خطا در محاسبه لیتولوژی می‌شود.

¹. Cross plot

². Footbal Effect



شکل 2-1: نمودار چگالی-نوترون جهت تعیین تخلخل [Schlumberger, 1989]

فرتل روابطی را جهت بدست آوردن تخلخل نوترون-چگالی بدست آورد. او تخلخل نوترون و چگالی را، برابر قرار داد و پاسخ نگار نوترون و چگالی را به صورت زیر نوشت [Fertle, 1988]:

$$\rho = \rho_{m1}F_1 + \rho_{m2}F_2 + \rho_F \emptyset$$

$$\emptyset_N = \emptyset_{N1}F_1 + \emptyset_{N2}F_2 + \emptyset_{NF} \emptyset$$

$$F_1 + F_2 + \emptyset = 1$$

که در آنها:

ρ : پاسخ نگار چگالی

ρ_{m1} : چگالی کانی خمیره $m1$

F_1 : حجم (کسر) کانی m_1

ρ_{m2} : چگالی کانی خمیره m_2

F_2 : حجم کانی m_2

ρ_F : چگالی سیال سنگ

\emptyset : تخلخل سنگ

\emptyset_N : پاسخ نگار نوترون

\emptyset_{N1} : پاسخ نگار نوترون به کانی m_1

\emptyset_{N2} : پاسخ نگار نوترون به کانی m_2

\emptyset_{NF} : پاسخ نگار نوترون به سیال سنگ می باشد.

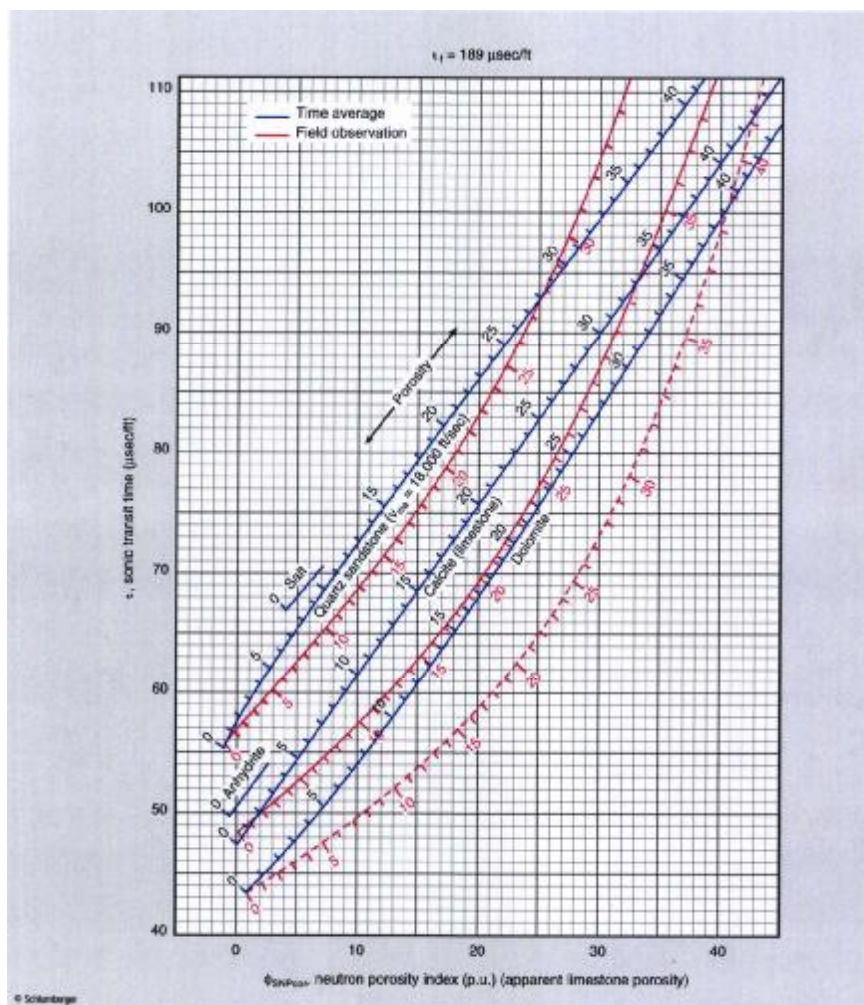
از حل معادلات فوق رابطه زیر بدست می آید:

$$f = \frac{(r - r_{m_1})f_{N_2} - f(r_{m_2} - r_{m_1})}{(r_f - r_{m_1})f_{N_2} - (r_{m_2} - r_{m_1})} \quad (2-2)$$

در صورت وجود شیل در سازند، نقاط در پایین و سمت راست قرار می گیرند. بنابراین لازم است که، قبل از استفاده از نمودار متقاطع، هر دو نگار از نظر شیل تصحیح شده و بعد از نمودار متقاطع استفاده گردد.

ب - محاسبه تخلخل با استفاده از نمودار متقاطع نوترون-صوتی

برای این کار، در شکل (2-2) مقادیر CNL یا SNP، در مقابل ΔT رسم می شوند و مقدار تخلخل و درصد لیتولوژی بدست می آید.



شکل 2-2- نمودار نوترون-صوتی جهت تعیین تخلخل [Schlumberger, 1989]

همچنین فرتل، روابطی را ارائه کرد که بوسیله آن تخلخل نوترون-صوتی قابل محاسبه است

[Fertle, 1988]:

$$\emptyset_N = \emptyset_{N1}F_1 + \emptyset_{N2}F_2 + \emptyset_{NF} \emptyset$$

$$\Delta T = \Delta T_{m1}F_1 + \Delta T_{m2}F_2 + \Delta T_f \emptyset$$

$$F_1 + F_2 + \emptyset = 1$$

که در آن:

\emptyset : تخلخل سنگ

ΔT_{m1} : پاسخ نگار صوتی به کانی m1

ΔT_{m2} : پاسخ نگار صوتی به کانی m2

و ΔT_f : پاسخ نگار صوتی به سیال سنگ می‌باشد.

از حل معادلات فوق، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f = \frac{(\Delta t - \Delta t_{m_1})f_{N_2} - f_N(\Delta t_{m_2} - \Delta t_{m_1})}{(\Delta t_f - \Delta t_m)f_{N_2} - f_N(\Delta t_{m_2} - \Delta t_{m_1})} \quad (3-2)$$

در صورت وجود هیدروکربن‌های مایع، نقاط در بالا و سمت راست قرار می‌گیرند. بنابراین، قبل از استفاده از این نمودار متقاطع، لازم است که نگارهای نوترون و صوتی، از لحاظ هیدروکربن تصحیح شوند. وجود گاز، باعث افزایش شدید ΔT می‌شود و نقاط در روی نمودار متقاطع قرار نمی‌گیرند. در صورت وجود شیل نیز، لازم است که قبلاً تصحیح شیل بر روی نگارها انجام گرفته باشد.

ج- محدودیت‌های استفاده از نمودارهای متقاطع

از محدودیت‌های نمودار متقاطع چگالی-صوتی، وجود گاز یا هیدروکربن سبک و ژئیس، در یک لیتولوژی خاص می‌باشد که باعث کاهش چگالی شده و محل نمونه مورد نظر را به طرف بالای نمودار متقاطع جابجا می‌کند. در این حالت، تخلخل بدست آمده از این روش، بیشتر از مقدار واقعی خواهد بود. علاوه بر این، جابجایی نقاط، باعث تفسیر نادرستی از لیتولوژی می‌شود.

اگر بخشی از تخلخل موجود در سنگ، تخلخل ثانویه باشد، زمان عبور صوت، کمتر از حالتی است که تمام تخلخل سنگ، اولیه باشد. بنابراین محل نمونه مورد نظر، به سمت چپ (کاهش ΔT) جابجا می‌شود. وجود شیل و فشردگی کم، هر دو باعث کاهش اندک چگالی و افزایش ΔT می‌شوند و محل نقاط به سمت راست جابجا می‌شود.

از محدودیت‌های نمودار متقاطع نوترون-صوتی، وجود شیل می‌باشد. وجود شیل به دلیل همراه داشتن آب پیوندی، باعث افزایش تخلخل نوترون و افزایش ΔT می‌گردد و محل نقاط به سمت بالا و سمت راست جابجا می‌شوند. وجود ژئیس نیز برعکس گاز، تخلخل نوترون را افزایش می‌دهد و نقاط مورد نظر به سمت بالا جابجا می‌شوند. وجود گاز، نیز باعث پلات شدن نقاط در سمت پایین می‌شود.

از محدودیت‌های نمودار متقاطع نوترون-چگالی، وجود شیل، ژپیس و گاز می‌باشد. وجود شیل و ژپیس، موجب افزایش تخلخل نوترون و کاهش اندک چگالی می‌شود و نقاط مورد نظر به سمت راست و اندکی بالا جابجا می‌شوند. نمودار متقاطع نوترون-چگالی متداول تر از سایر نمودارهای متقاطع است و نتایج قابل قبول‌تری را می‌دهد [Schumberger,1989].

2-3- تراوایی¹

تراوایی، نشان دهنده توانایی هر ماده در انتقال سیالات است. باید توجه داشت که جریان سیالات در سنگ، هیچ‌گونه تغییر شکل و جابجایی در دانه‌های سنگ، ایجاد نخواهند کرد. تراوایی، وابستگی بسیار زیادی به مجاری به هم مرتبط، توزیع و اندازه آنها در داخل سنگ دارد و به دو صورت، مطلق² و نسبی³ بیان می‌شود. چنانچه تنها یک سیال در سنگ جریان داشته باشد، تراوایی را مطلق و اگر بیش از یک سیال در سنگ جریان داشته باشد، تراوایی را نسبی می‌گویند. واحد تراوایی، داریسی است. تراوایی یک داریسی است که می‌تواند یک سانتیمتر مکعب سیال را با گرانروی یک سانتی پواز، تحت فشار یک اتمسفر بر سانتیمتر مربع، از سطحی معادل یک سانتیمتر مربع عبور دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت تراوایی یک داریسی برابر است با جریان یک بشکه در روز از نفتی با غلظت یک سانتی-پواز از یک فوت از ضخامت مخزن در یک چاه، وقتی که اختلاف برابر یک PSI باشد.

معادله یک داریسی برای یک سیال که از یک محیط متخلخل عبور می‌کند به صورت زیر است [رضایی، 1381].

$$Q = k \frac{A \times \Delta P}{m \times L} \quad (4-2)$$

Q: دبی جریان (cm³/Sec)

ΔP : اختلاف فشار (atm)

A: سطح (cm²)

¹ . Permeability

² . Absolute

³ . Relative

m : ویسکوزیته مایع (centipose)

L : طول (m)

k : تراوایی (Darcy)

واحد داری برای بیان تراوایی سنگ های مخازن هیدروکربوری بسیار بزرگ است. به همین دلیل از واحد میلی داری (md) برای بیان تراوایی سنگ مخزن استفاده می شود. دامنه تغییرات تراوایی وسیع است، به همین علت سازندها می توانند بین 0/1 تا 10000 میلی داری تراوایی داشته باشند. تقسیم بندی کیفی سنگ های مخزن بر اساس تراوایی به صورت زیر است (جدول 2-1).

جدول 2-1: تقسیم بندی کیفی سنگ های مخزن بر اساس تراوایی [Tiab & Donalson , 2004]

کیفیت	واحد	دامنه تغییرات تراوایی
متوسط	(میلی داری)	تراوایی 1-10
خوب	(میلی داری)	تراوایی 10-100
خیلی خوب	(میلی داری)	تراوایی 100-10000

2-3-1- روش های اندازه گیری و محاسبه تراوایی

تراوایی با روش هایی نظیر آزمایش های چاه، استفاده از اطلاعات چاهنگاری و آزمایش مغزه محاسبه می شود [Berg, 1970].

2-3-1-1- استفاده از داده های چاه پیمایی

الف) تخمین تراوایی با استفاده از فشار موئینه

فشار موئینه، تابعی از ارتفاع بالای سطح آب آزاد و تفاوت میان چگالی فاز تر (آب) و فاز غیر تر (نفت) است که با رابطه زیر بیان می شود [Berg, 1970]:

$$h = \frac{P_c}{0.433(r_w - r_{hc})} \quad (5-2)$$

که در آن:

P_c : فشار موئینه بر حسب psi

r_{hc} : چگالی هیدروکربور (g/cm^3)

r_w : چگالی آب (g/cm^3)

h : ارتفاع بالای سطح آب آزاد (ft)

و $0/433$ psi/ft برابر شیب آب خالص در شرایط محیط می باشد.

سپس با استفاده از رابطه زیر می توان تراوایی را محاسبه کرد [Schlumberger, 1989]:

$$k = \frac{f S^2 J^2}{P_c^2} \quad (6-2)$$

که

در آن:

J : تابعی از درجه اشباع شدگی آب (S_w) است که از روی نمودار $P_c - S_w$ محاسبه می شود.

S : کشش سطحی است.

ب) محاسبه تراوایی از روی شیب مقاومت¹

با کاهش درجه اشباع شدگی، مقدار مقاومت ویژه سازند افزایش می یابد. با فرض تخلخل یکنواخت، مقدار مقاومت ویژه سازند، از سطح آب تا منطقه اشباع شدگی آب غیر قابل استحصال² افزایش یافته، و به مقدار حداکثر می رسد. تغییرات مقاومت ویژه، با عمق رابطه خطی دارد و می توان تراوایی را از روی شیب نمودار مقاومت در مقابل عمق به کمک فرمول زیر، بدست آورد [Schlumberger, 1989]:

$$k = C \left(a \times \frac{2.3}{r_w - r_h} \right)^2 \quad (7-2)$$

¹. Resistivity gradient

². Irreducible water saturation

$$a = \frac{\Delta R}{\Delta D} \times \frac{1}{R_0} \quad (8-2)$$

که در آن:

C: عدد ثابت، معمولاً مقدار آن 20 است.

ΔR : تغییرات مقاومت (ohm-m)

ΔD : تغییرات عمق مربوطه به ΔR (ft)

R_0 : مقاومت ویژه سازند تمیز با اشباع شدگی صد در صد از آب

r_w : چگالی آب (g/cm^3)

و r_h : چگالی هیدروکربن (g/cm^3)

ج) تخمین تراوایی بوسیله تخلخل و اشباع شدگی آب غیر قابل استحصال

روابط تجربی زیادی برای تخمین تراوایی از روی تخلخل، ارائه شده است. اما هر کدام از آنها مربوط به یک منطقه خاص بوده و نمی توان بصورت عمومی از آن استفاه نمود. وایلی و رز رابطه ای بین تراوایی، تخلخل و اشباع شدگی آب غیر قابل استحصال ارائه دادند، که شکل عمومی آن بصورت زیر است [Wyllie And Rose, 1950]:

$$K = C \frac{f^x}{S_{wir}^y} \quad (9-2)$$

محققان زیادی مقادیری برای x و y ارائه کرده اند [Schlumberger, 1989]:

تکسیر¹ را بطه بالا را به شکل زیر ارائه نمود:

$$K^{1/2} = 250 \frac{f^3}{S_{wir}} \quad (10-2)$$

¹. Tixier

1

نتیجه مطالعات تیمور رابطه زیر می باشد:

$$K^{1/2} = 100 \frac{f^{2.25}}{S_{wir}} \quad (11-2)$$

2

حاصل تحقیقات کوآتس دامانور معادله زیر شده است:

$$K^{1/2} = \frac{300}{w^4} \left(\frac{f}{S_{wir}} \right)^w \quad (12-2)$$

3

کوآتس نیز رابطه زیر را ارائه نمود:

$$K^{1/2} = 70 \frac{f_c^2 (1 - S_{wir})}{S_{wir}} \quad (13-2)$$

که در آنها:

S_{wir} : آب اشباع شدگی غیر قابل استحصال

w : پارامتر مربوط به بافت سنگ بوده که به سیمان شدگی و اشباع شدگی وابسته است.

2-3-1-2- استفاده از مغزه

تراوایی سنگ مخزن در آزمایشگاه، با قرار دادن قطعه ای از مغزه تهیه شده در دستگاه تراواسنج⁴، اندازه گیری می شود. تراواسنج ها از نظر شکل و طرح مختلف هستند، ولی اصولاً از یک گیره و یک پمپ جهت فرستادن سیال به داخل مغزه، یک فشارسنج جهت اندازه گیری اختلاف فشار در دو سر مغزه، و یک جریان سنج⁵ برای اندازه گیری شدت جریان سیال در داخل مغزه تشکیل شده اند. نمونه های مغزه که برای آزمایش به کار می رود، دارای قطر 1/5 اینچ و طول 4-5 اینچ هستند. سیال مورد استفاده برای سنجش تراوایی یک سنگ مخزن، معمولاً هوا و یا گاز خشک است. فشار وارده به

¹ . Timur

² . Coates-Dumanoir

³ . Coates

⁴ . Permeameter

⁵ . Flow meter

سیال بسیار کم و فقط در حدی است که به توان شدت جریان سیال را اندازه گرفت. هوا، به علت بی اثر بودن و عدم ایجاد هر گونه واکنش شیمیایی و یا تغییر کیفی در بافت و ترکیب عوامل تشکیل دهنده سنگ مخزن، جهت اندازه گیری تراوایی مورد استفاده قرار می گیرد [Berg, 1970].

2-4- رابطه تخلخل و تراوایی در واحدهای جریان هیدرولیکی

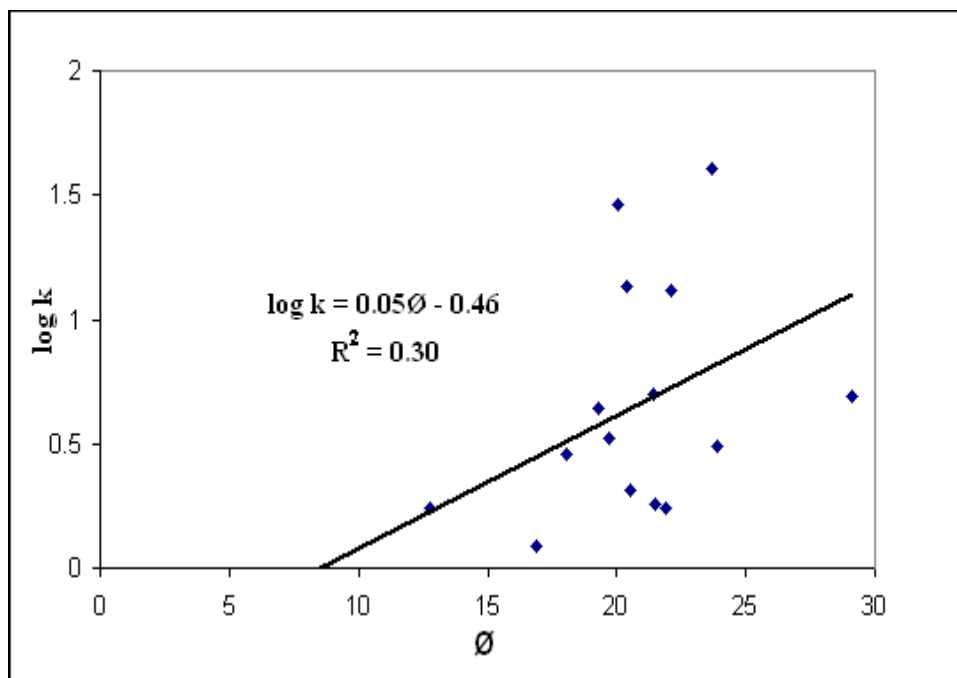
واحدهای جریان هیدرولیکی، روشی برای طبقه‌بندی انواع سنگ‌ها نسبت به خواص جریانی، بر پایه پارامترهای زمین‌شناسی و فیزیکی جریان سیالات در مقیاس منافذ است. تئوری روش، ابتدا توسط آمیفل¹ و همکاران (1993) و سپس توسط سایر محققین تعمیم یافت. این روش، بیشتر در تخمین تراوایی چاه‌های فاقد مغزه با استفاده از اطلاعات تگاریهای چاه‌پیمایی به کار گرفته شده است. راه‌های متداول برای تخمین تراوایی (k)، بر اساس رگرسیون‌های لگاریتمی، از تگاریهای چاه‌پیمایی تخلخل (\emptyset) بوده و یا بر پایه روابط تجربی می‌باشند که تراوایی را به تگاریهای چاه‌پیمایی مختلف مرتبط می‌سازند.

هر دو روش تجربی هستند و پایه فیزیکی و زمین‌شناسی ندارند. یک واحد جریان هیدرولیکی، زیرمجموعه‌ای از کل گونه‌های سنگ مخزن می‌باشد که خواص زمین‌شناسی و پتروفیزیکی کنترل‌کننده جریان سیال در آن مشابه بوده و از دیگر سنگ‌ها متفاوت می‌باشد. عمده‌ترین پارامترهایی که جریان سیال را تحت الشعاع قرار می‌دهند، شامل نوع کانی، فراوانی و محل قرارگیری کانی‌ها و بافت سنگ‌ها (شامل اندازه دانه، شکل دانه، جورشدگی و فشردگی) می‌باشند. تلفیق‌های متنوع از عوامل تأثیرگذار زمین‌شناسی، می‌توانند واحدهای جریان هیدرولیکی مجزا را به وجود آورند که هر کدام خواص انتقال سیال مشابه‌ای دارند. بنابراین واحدهای جریان هیدرولیکی، شامل گونه‌های زمین‌شناسی متفاوت می‌باشند، و گروه‌بندی سنگ‌ها، بر اساس شاخص‌های زمین‌شناسی سنگ مرتبط با جریان، مبنای طبقه‌بندی واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد [Abbaszadeh, et al, 1996].

1. Amaefule et al, 1993

زمانی که داده های تخلخل و تراوایی را در مقابل هم ترسیم کنیم، مشاهده می شود داده ها از یک توزیع نیمه لگاریتمی تبعیت می کنند (شکل 2-3) و می توان رابطه کلی زیر را بین تراوایی و تخلخل نوشت:

$$\text{Log}k = af + b \quad (14-2)$$



شکل 2-3: نمودار لگاریتم تراوایی k در مقابل تخلخل Ø در چاه مورد مطالعه

وقتی که داده‌ها در حالت‌هایی نظیر مقیاس خطی در مقابل هم ترسیم شوند، نمی‌توان هیچ گونه ارتباطی بین آنها برقرار کرد. کوزنی و کارمن¹ جهت برقراری ارتباطی مناسب بین تراوایی و تخلخل، محیط متخلخل را به صورت مجموعه ای از لوله های موئینه، مدل سازی کردند و با ترکیب قانون داری برای حرکت سیال در محیط متخلخل و قانون پوزیل برای حرکت سیال در لوله ها، رابطه جدیدی به شرح ذیل بین تخلخل و تراوایی ارائه دادند. در این رابطه فاکتوری به نام عامل پیچاپیچی² هم، به رابطه اضافه شده است، زیرا در یک مدل واقعی، لوله‌های موئینه مستقیم نبوده و دارای خمیدگی‌هایی هستند [Al-Ajmi and Holditch, 2000].

¹. Carmen, 1937

². Tortuosity factor

$$k = \frac{f_e r_{mh}^2}{8t^2} \quad (15-2)$$

که در آن:

r : شعاع لوله های موئینه

و t : عامل پیچاپیچی است.

آمیفل و همکاران پارامتری را به نام شعاع هیدرولیکی میانگین¹ مطرح کرد و به نقش آن در واحدهای جریان هیدرولیکی، توجه بیشتری نمود و پس از ترکیب آن با رابطه کوزنی-کارمن، رابطه زیر را بدست آوردند [Amaefule et al., 1993]:

$$k = \frac{f_e r_{mh}^2}{2t^2} \quad (16-2)$$

$$r_{mh} = \frac{\text{Cross Section Area}}{\text{Wetted Perimeter}} = \frac{r}{2} \quad (17-2)$$

همچنین می توان بین شعاع هیدرولیکی میانگین و مساحت سطح بر واحد حجم دانه ها²، ارتباط زیر را برقرار کرد:

$$S_{gv} = \frac{1}{r_{mh}} \left[\frac{f_e}{1-f_e} \right] \quad (18-2)$$

و با ترکیب رابطه 17-2 و 18-2 داریم:

$$k = \left[\frac{f_e^3}{(1-f_e)^2} \right] \frac{1}{F_s t^2 S_{gv}^2} \quad (19-2)$$

در این رابطه، تراوایی (k) بر حسب mm^2 است. همانطور که مشاهده می شود در این رابطه عامل شکل³ (F_s) نیز آورده شده است. زمانی که لوله های موئینه به صورت استوانه ای با مقطع دایره، فرض شوند مقدار F_s برابر 2 است. در این رابطه عبارت $F_s t^2$ ، به عنوان ثابت کوزنی شناخته می شود و مقدار

¹ . Mean hydraulic radius

² . Surface area per unit grain volume

³ . Shape factor

آن بین 5 تا 100 متغیر است. در حقیقت عبارت $F_s t^2 S_{gv}^2$ ، تابعی از خصوصیات زمین شناسی محیط متخلخل و تغییرات هندسه حفرات است. به همین علت می توان از آن به عنوان معیاری جهت تمایز واحدهای جریان هیدرولیکی از یکدیگر استفاده کرد [Amaefule et al, 1993].

با تقسیم کردن رابطه 2-19 به \emptyset_e و جذرگیری از آن، رابطه ساده تری را می توان ارائه داد:

$$0/0314 \sqrt{\frac{k}{f_e}} = \left(\frac{f_e}{1-f_e} \right) \frac{1}{\sqrt{F_s t S_{gv}}} \quad (20-2)$$

در این رابطه می توان شاخص کیفیت مخزن (RQI)¹، شاخص جریان منطقه‌ای (FZI)² و نسبت پوکی (\emptyset_z) (نسبت حجم فضای منافذ به حجم خمیره سنگ)³ (PMR) را به صورت زیر تعریف کرد

[Tiab and Donaldson , 2004]:

$$RQI = 0/0314 \sqrt{\frac{k}{f_e}} \quad (21-2)$$

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s t S_{gv}}} \quad (22-2)$$

$$f_z = \left(\frac{f_e}{1-f_e} \right) \quad (23-2)$$

در این روابط، k بر حسب میلی داریسی (md) است و عدد ثابت $0/0314$ ، برای تبدیل k از mm^2 به میلی داریسی (md) آورده شده است.

بنابراین می توان رابطه 2-20 را به صورت زیر نوشت:

$$RQI = f_z \times FZI \quad (24-2)$$

مبنای طبقه‌بندی واحدهای جریان هیدرولیکی، جداسازی گروه های داده با استفاده از خطوط راست با شیب واحد، روی نمودار لگاریتمی RQI بر حسب PMR است. تراوایی نقاط نمونه از یک واحد

¹ . Reservoir Quality Index

² . Flow Zone Indicator

³ . Pore to Matrix Ratio

جریانی هیدرولیکی با به کار بردن مقادیر متوسط *FZI* و مقادیر تخلخل مربوطه از رابطه زیر به دست می‌آید [اسویرسکی¹ و همکاران، 2004].

$$K = 1014 FZI^2 \frac{f_e^3}{(1 - f_e)^2} \quad (25-2)$$

تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی درون یک مخزن با داده‌های مغزه انجام می‌شود. اندازه‌گیری‌های تخلخل بر حسب تراوایی مغزه، تحت فشار همه‌جانبه، برای محاسبه کمیت‌های *FZI*، *PMR* و *RQI* مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگرچه برای هر واحد جریانی می‌بایستی یک مقدار *FZI* در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود داشته باشد، ولی به دلیل خطاهای اندازه‌گیری تصادفی در آنالیز مغزه، یک توزیع از *FZI* در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود دارد. تابع توزیع کلی *FZI* ها یک انطباق از توابع توزیع جداگانه، اطراف متوسط *FZI* مربوط به هر واحد جریان هیدرولیکی است. تعیین هر مقدار متوسط *FZI* و یا هر واحد جریان هیدرولیکی، نیازمند تجزیه کلی توزیع *FZI* به عناصر تشکیل دهنده آنها می‌باشد. در واقع این مسئله یک انطباق مجدد است که تکنیک آنالیز طبقه‌بندی، امکان انجام این فرآیند را میسر می‌سازد. در حال حاضر سه روش آنالیز هستوگرام، نمودار احتمال و مجموع مربع خطاها، جهت گروه‌بندی مناسب واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده می‌شود. روش‌های طبقه‌بندی نموداری، شامل آنالیز هستوگرام و نمودارهای احتمالی، توزیع *FZI* را به صورت تصویری مشخص می‌سازد که به وسیله آن، امکان تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، را فراهم می‌سازد. در این پایان نامه جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، از روش آنالیز هستوگرام و مجموع مربع خطاها استفاده شده است، که نتایج نشان دهنده سه واحد جریان هیدرولیکی برای کل داده‌ها می‌باشد.

¹. Svirsky

2-5- مفهوم فشار موئینگی

مفهوم فشار موئینه می تواند بوسیله زمین شناسان، پتروفیزیکست ها و مهندسیین نفت برای ارزیابی کیفیت سنگ مخزن، اشباع سیالات مخزن، عمق سطوح تماس سیالات، ضخامت ناحیه حد واسط، ظرفیت پوش سنگ (یعنی ارتفاع ستون هیدروکربوری که یک پوش سنگ می تواند قبل از نشت کردن در زیر خود نگه دارد)، ناحیه تولیدی در مقابل ناحیه غیر تولیدی و تخمین راندمان بازیافت در زمان بازیافت اولیه و ثانویه، استفاده می شود [De la Cruzl, et al, 1995]. با توجه به موارد یاد شده، بدست آوردن منحنی های فشار موئینگی برای شناسایی مخزن و بررسی رفتار محیط متخلخل ضروری است. امروزه در اغلب موارد، فشار موئینگی در شرایط آزمایشگاهی و در حضور دو فاز استاندارد و یا استفاده از روش های متداول به دست آمده و بر اساس آن، منحنی آزمایشگاهی فشار موئینگی رسم می شود. سپس با استفاده از این منحنی و معادله یانگ-لاپلاس (معادل بودن فشار موئینگی با کشش سطحی)، منحنی فشار موئینگی در مخزن تعیین می شود [Glottin, et al , 1990].

2-5-1- فشار موئینه

فشار موئینه، اختلاف در فشار بین دو سیال غیر قابل امتزاج در عرض یک سطح مشترک انحنادار در حال تعادل می باشد. انحنای سطح مشترک، نتیجه ایی از مرطوب شدگی ترجیحی دیوارهای موئینه، به وسیله یکی از فازها می باشد. به عبارتی فشار موئینه به عنوان اختلاف فشار بین فازهای غیر مرطوب کننده و مرطوب کننده به صورت زیر تعریف می شود [Tiab and Donaldson , 2004]:

$$P_c = P_{mw} - P_w \quad (26-2)$$

که در آن:

P_c فشار موئینه (Psi)

و P_{mw} فشار سیال غیر مرطوب کننده (Psi)

و P_w فشار سیال مرطوب کننده (Psi) می باشد.

به عبارت دیگر، فشار موئینه، مقدار فشار لازم برای راندن فاز غیر مرطوب کننده به داخل لوله های موئینه، به منظور جابجا کردن فاز مرطوب کننده می باشد. فشار موئینه (P_c) می تواند به وسیله معادلات زیر محاسبه گردد:

$$P_c = (r_w - r_{nw})gh \quad (27-2)$$

$$P_c = \frac{2.S.\cos q}{r_c} \quad (28-2)$$

که در آن:

r_w و r_{nw} : به ترتیب وزن مخصوص سیالات مرطوب کننده و غیر مرطوب کننده

g : ثابت ثقل

h : ارتفاع بالای سطح آب آزاد

S : کشش سطحی

q : زاویه تماس سیالات و لوله موئینه

و r_c شعاع لوله موئینه می باشد.

این معادله ثابت می کند که در سطح آب آزاد، فشار موئینه صفر می باشد. همچنین فشار موئینه، نسبت مستقیم با ارتفاع بالای سطح آب آزاد و نسبت معکوس با شعاع لوله موئینه دارد [Vavra et al, 1992]. اندازه و توزیع گلوگاههای تخلخل در یک سنگ مشخصات فشار موئینه و آن

نیز به نوبه خود رفتار سیال در سیستم منافذ را کنترل می کند [Jennings, 1987].

فشار موئینه تزریق جیوه، برای کاربردهای زمین شناسی مانند تعیین اندازه و جورشدگی گلوگاههای تخلخل مناسب می باشد. اختلافات بین منحنی تزریق¹ و باز پس گیری²، می تواند در تعیین راندمان بازیافت استفاده شود [De la Cruzl, et al, 1995]. ارتفاع بالای سطح آب آزاد می تواند به وسیله مقایسه داده های فشار موئینه و اشباع سیالات، تعیین شود. همچنین اطلاعات فشار موئینه می تواند

¹. Injection

². Withdrawal

برای تفکیک سنگ‌های مخزنی از غیر مخزنی و زون تولیدی از زون غیر تولیدی بر اساس اشباع فاز غیر مرطوب کننده، استفاده شود. دیگر کاربردهای فشار موئینه، شامل ارتباط دادن آن با تراوایی‌های مطلق و نسبی می‌باشد. ارزیابی فشار موئینه سنگهای بالقوه پوش سنگی و مخزنی هیدروکربور بسیار مهم می‌باشد زیرا لوله‌های موئینه توزیع استاتیک سیالات را در مخزن، قبل از تولید و هیدروکربورهای باقی‌مانده بعد از تولید اولیه را، کنترل می‌کند [Hassler & Brunner, 2007].

2-5-2- روشهای اندازه گیری فشار موئینگی

روشهای مختلفی برای اندازه گیری فشار موئینگی پیشنهاد شده است. سه روشی که امروزه در صنعت بیشتر متداول بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از [Glotin, et al, 1990]:

1- روش صفحه متخلخل

2- روش سانتریفوژ

3- روش تزریق جیوه

استفاده از صفحه متخلخل، روشی دقیق برای اندازه گیری فشار موئینگی است و نتایج حاصل از آزمایش‌ها به طور مستقیم برای ترسیم منحنی فشار موئینگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین در این روش، انجام آزمایش‌ها در شرایط مخزن میسر بوده و می‌توان بسته به هدف آزمایش، از سیالات مختلفی استفاده کرد. یکی از معایب روش صفحه متخلخل، طولانی بودن زمان انجام آزمایش‌هاست. در مورد اختلاف فشاری که با استفاده از روش فوق می‌توان بین دو فاز اعمال کرد، نیز محدودیت وجود دارد. روش تزریق جیوه روشی سریع برای اندازه گیری فشار موئینگی است. از معایب این روش، استفاده از سیالی متفاوت (جیوه) با ماهیت سیالات موجود در سنگ مخزن است.

روش سانتریفوژ در مقایسه با روش صفحه متخلخل، روشی سریعتر برای اندازه گیری فشار موئینگی است و دلیل برتری آن بر روش تزریق جیوه، امکان استفاده از سیالاتی مشابه به سیالات مخزن می‌باشد.

در این بخش به بحث و بررسی این سه روش می‌پردازیم.

2-5-2-1- روش سانتریفیوژ

استفاده از دستگاه سانتریفیوژ، روش سریعی برای بدست آوردن منحنی‌های فشار موئینگی، رساندن مقدار آب موجود در نمونه به اشباع آب غیر قابل استحصال¹ و مقدار نفت موجود در نمونه به نفت باقی‌مانده² می‌باشد. در روش سانتریفیوژ، بسته به هدف آزمایش از سیالات مختلفی می‌توان استفاده نمود. (گاز/نفت، گاز/آب، آب/نفت). اگر سنگ مخزنی که با آب اشباع شده است، در محفظه‌ای حاوی نفت و یا هوا قرار گرفته و با سرعت مناسب دوران کند، درصد اشباع آب می‌تواند تا رسیدن به درصد اشباع غیر قابل استحصال کاهش یابد. برای بدست آوردن منحنی فشار موئینگی از سرعت‌های دورانی متوسط استفاده می‌شود و سرعت و آب جابجا شده در هر مرحله تعادلی اندازه‌گیری می‌شود. به گونه‌ای مشابه اگر رسیدن به درصد اشباع نفت باقی‌مانده مورد نظر باشد، سنگ مخزنی که شامل آب همزاد و نفت است باید در محفظه‌ای که حاوی آب هوا است قرار گرفته و در سانتریفیوژ دوران کند، وقتی هوا فاز جابجا کننده باشد، نفت جابجا شده در قسمت پائین محفظه جمع‌آوری و اگر فاز جابجا کننده آب باشد، نفت جابجا شده در سطح آب جمع‌آوری می‌شود.

2-5-2-1- محاسبات

در روش سانتریفیوژ اختلاف فشار بین فازها توسط سرعت دورانی ایجاد می‌شود. معادله نهایی که بیانگر اختلاف فشار بین فازها است، به صورت زیر می‌باشد [Glotin, et al, 1990].

$$\Delta P = 1.578 E - 7 \Delta r (r_r - \frac{h}{2}) h n^2 \quad (29-2)$$

ΔP = فشار موئینگی (psi)

Δr = اختلاف چگالی (gr/cm^3)

r_r = فاصله مرکز روتور (cm)

h = طول نمونه (cm)

¹ . Irreduce water saturation

² . Residual oil saturation

$n =$ تعداد دور در دقیقه

این معادله با دقت خوبی بیانگر اختلاف فشار بین فازهاست. برای بدست آوردن مقدار درصد اشباع در هر سرعت دورانی با مشخص بودن حجم فضای خالی نمونه و حجم سیال جابجا شونده، در هر مرحله، میزان سیال تر¹ موجود در نمونه محاسبه می شود. سپس با تقسیم حجم سیال تر موجود در نمونه بر حجم کل فضای متخلخل، درصد اشباع سیال تر (آب) محاسبه می شود.

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} * 100 \quad (30-2)$$

$S_w =$ اشباع فاز تر

$V_p =$ حجم منافذ (cm^3)

$V_w =$ حجم سیال تر (cm^3)

2-5-2-1-2- روش انجام آزمایش

مرحله اول آزمایش فشار موئینگی عملکرد تخلیه² در حالت دو فازی سیستم آب نمک - نفت می باشد. در این مرحله نمونه های مغزه که با آب نمک اشباع شده اند در محفظه درب داری قرار گرفته و اطراف آنرا پر از نفت می کنیم تا نمونه در مجاورت نفت قرار گیرد. در این حالت نمونه ها که در محفظه درب دار قرار دارند را در داخل سانتریفیوژ گذاشته در دورهای مختلفی از 500 تا 12000 دور در دقیقه (RPM) دوران می دهند. پس از رسیدن به حالت تعادل در هر مرحله، میزان آب نمک خروجی توسط اپراتور خوانده و یادداشت می شود. سپس با افزایش دور، مرحله دیگری از آزمایش شروع می شود و این کار را تا رسیدن به دور 12000 دور در دقیقه ادامه می دهیم. در پایان مرحله تخلیه، نمونه در شرایط اشباع از نفت همراه با اشباع آب غیر قابل استحصال³ قرار دارد.

¹ . Wet

² . Drainage

³ . Irreducible water saturation

مرحله دوم آزمایش فشار موئینگی عملکرد آشام¹ در حالت دوفازی سیستم آب نمک- نفت می باشد. در این مرحله نمونه های مغزه بعد از پایان مرحله تخلیه در محفظه درب دار دیگری قرار گرفته و اطراف آنرا پر از آب نمک می کنیم تا نمونه در مجاورت آب نمک قرار گیرد. فرایند آزمایش همانند مرحله تخلیه می باشد. بعد از پایان این مرحله میزان درصد اشباع نفت باقی مانده نمونه محاسبه خواهد شد.

2-5-2-2- روش تزریق جیوه

روش تزریق جیوه¹ مشخصات مرطوب شدگی قبل از مهاجرت سنگ مخزن را شبیه سازی می کند. این روش برای ارزیابی توزیع استاتیک اولیه سیالات مخزن قبل از تولید، پیشنهاد می شود، زیرا این توزیع به وسیله مشخصات مرطوب شدگی اولیه کنترل می شود [Cruzl,et al,1995]. همچنین این روش نسبت به دو روش اندازه گیری فشار موئینگی با استفاده از روش صفحه متخلخل² (نیمه تراوا)، و روش سانتیفریوژ ارزانتر و سریعتر می باشد. به علاوه تزریق جیوه می تواند به آسانی به داده های به کار رفته در سیستم سیال واقعی مخزن تبدیل شود.

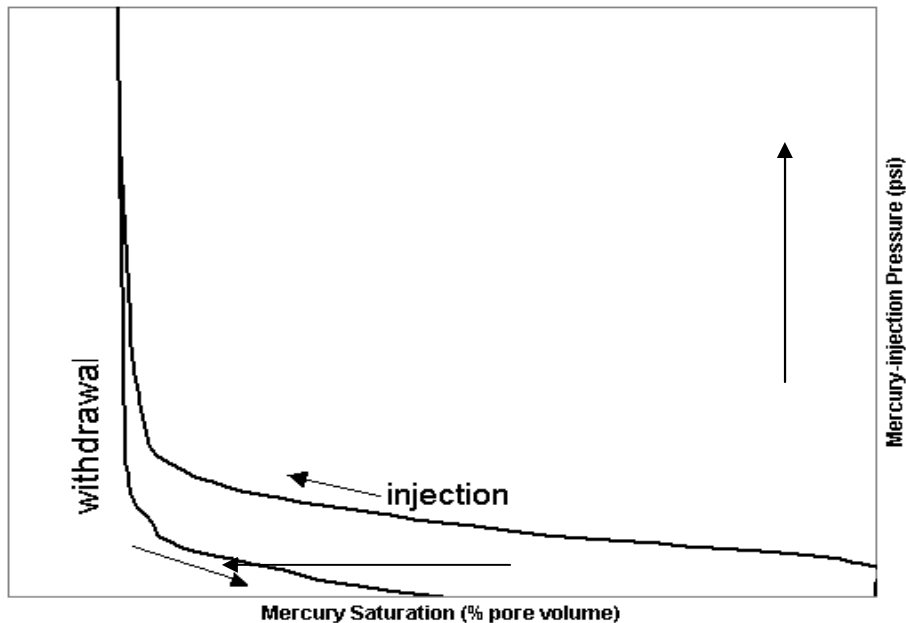
2-5-2-2-1- اندازه گیری فشار موئینه به روش تزریق جیوه

اطلاعات فشار موئینه تزریق جیوه به وسیله تزریق جیوه به درون یک پلاگ مغزه تمیز خشک شده صورت می گیرد. فشار موئینه به صورت مرحله به مرحله افزایش یافته و حجم منافذ اشباع شده سنگ از جیوه در هر مرحله بعد از به تعادل رسیدن ثبت می شود. منحنی های تزریق جیوه به وسیله رسم کردن فشار در مقابل اشباع جیوه به دست می آید [Cruzl,et al,1995]. (شکل 2-4)

¹ . Imbibition

¹ . Mercury injection

² . Porous plate



شکل 2-4: منحنی فشار موئینه تزریق جیوه (MICP) [Cruzl, et al, 1995]

منحنی‌های تزریق جیوه¹ متداول تر از منحنی‌های بازپس‌گیری² می‌باشند. منحنی‌های بازپس‌گیری بعد از رسیدن به فشار تزریق حداکثر به دست می‌آیند، در این موقع فشار به صورت مرحله به مرحله کاهش یافته و هوا (فاز مرطوب کننده در سیستم هوا/جیوه) اجازه وارد شدن به داخل منافذ را پیدا می‌کند. مقدار جیوه خارج شده از نمونه در هر فشار به صورت درصد حجم کل منافذ یا حجم کل بیان می‌شود. سپس فشار در مقابل اشباع جیوه رسم می‌گردد (شکل 2-4). حجم منافذ اشباع با جیوه بعد از کاهش فشار به مقدار حداقل، اشباع جیوه باقی‌مانده گفته می‌شود.³ اختلاف شکل منحنی‌های تزریق و بازپس‌گیری حاصل به تله افتادن جیوه در منافذ ته بسته⁴ یا منافذ نسبتاً بزرگ که به وسیله گلوگاه‌های نسبتاً کوچک به هم متصل شده، می‌باشد. داده‌های حاصل از منحنی‌های

¹. Injection
². Withdrawal
³. S_R
⁴. dead-end

بازپس گیری جیوه (اشباع هوا) می تواند حاوی اطلاعاتی در مورد راندمان بازپس گیری فاز غیر مرطوب کننده از سیستم منافذ باشد [Sheawi and White, 2007].

نمونه‌ها برای آنالیز تزریق جیوه باید به دقت انتخاب و توصیف شده، و عکس و مقاطع نازک آنها قبل از آنالیز تهیه شوند. اگر کل مغزه یا پلاگ های مغزه در دسترس هستند، باید مغزه نماینده‌ای از مخزن بوده و لیتولوژی آن یکنواخت باشد. حتی المقدور باید نمونه فاقد شکستگی های خارجی و حفرات سطحی باشد. اگر نمونه های خرده سنگی یا دیواره چاه استفاده می شوند باید با نگارها برای ارزیابی اینکه نماینده ای از مخزن هستند یا خیر، مقایسه گردند.

نمونه‌های دیواره چاه نیز باید با دقت از اندود گل تمیز شوند زیرا می توانند بر نتایج تأثیر بگذارند. خرده سنگ ها نیز باید دارای لیتولوژی یکنواخت باشند و همچنین برای تعیین مناسب بودن برای آنالیز بررسی شوند، برای مثال خرده سنگ های ماسه های دانه ریز ممکن است برای ارزیابی پوش سنگی یک شیل مناسب بوده اما برای ارزیابی زون تولیدی یک ماسه دانه درشت کافی نباشد. برای ارزیابی زون تولید خالص باید از انواع سنگ های غیر مخزنی و مخزنی بالقوه نمونه گیری صورت بگیرد. اگر هدف ارزیابی پوش سنگ باشد باید از همه سنگ های مخزنی و پوش سنگی بالقوه نمونه برداشته شود. قبل از اینکه داده های تزریق جیوه بتواند برای مخزن به کار روند، داده ها باید از سیستم هوا/جیوه آزمایشگاه به سیستم هیدروکربور/آب شور مخزن تبدیل شوند.

رابطه‌ای که برای تبدیل نتایج آزمایشگاهی به شرایط مخزن مورد استفاده قرار می گیرد به صورت ذیل است [Hassler and Brunner, 2007]:

$$P_{c_{res}} = P_{c_{lab}} \cdot \frac{(S \cdot \cos \theta)_{res}}{(S \cdot \cos \theta)_{lab}} \quad (31-2)$$

P_c = فشار موئینگی (psi)

σ = کشش سطحی $\left(\frac{dynse}{cm} \right)$

θ = زاویه تماس (درجه)

$()_{res} =$ شرایط مخزن

$()_{lab} =$ شرایط آزمایشگاه

2-2-2-5-2- تئوری

پایه و اساس اندازه گیری فضای متخلخل به وسیله جیوه، تزریق سیال در فضای کوچک و استفاده از قوانین فشار موئینگی می باشد که در آن یک فاز غیر تر مانند جیوه به فضای سیلندری تزریق می شود که قطر آن با معادله واشبورن قابل اندازه گیری می باشد [Washburn, 1921]:

$$D = \left(\frac{1}{P}\right) \cdot 4 \cdot S \cdot \cos q \quad (32-2)$$

که D : قطر فضای خالی

P : فشار اعمال شده

S : کشش سطحی

و q زاویه تماس می باشد.

حجمی از جیوه (V) که در حفره ها نفوذ می کند مستقیماً از روی معادله ای بر اساس اختلاف فشار تزریق بدست می آید. فشار و حجم تزریق تنها کاراکترهای بکار رفته شده از ساختار فضای خالی می باشند. در واقع بندرت فضاهاى خالی به صورت سیلندری می باشند. بنابراین معادله فوق یک مدل مخصوص است که بیانگر خوبی از فضای متخلخل واقعی باشد. اما به طور توافقی از این معادله استفاده می شود در غیر اینصورت محاسبات پیچیده می شود.

کشش سطحی جیوه با درجه خلوص آن متغیر است اما به طور توافقی $485 \frac{\text{dynes}}{\text{cm}}$ در نظر گرفته می شود. زاویه تماس جیوه نیز به ترکیبات سطح جامد بستگی دارد که به طور معمول 130 درجه در نظر گرفته می شود مگر در مواردی که سطوح ویژه باشند.

به محض کاهش فشار، جیوه شروع به خارج شدن از فضای متخلخل می کند. پس از مرحله تخلیه متوجه می شویم که حجم جیوه خروجی از جیوه تزریق شده کمتر است این نشان دهنده این است که

در حالت واقعی مقداری جیوه در فضای تخلخل به دام می افتد. اولین دلیل این پدیده این است که زاویه تماس جیوه در مرحله تخلیه کمتر از زاویه تماس در مرحله تزریق می باشد. دومین دلیل این پدیده وجود فضای تخلخل ناهمجنس می باشد که نشان دهنده گلوگاه و محفظه‌هایی با قطر بزرگتر از گلوگاه می باشد [Mannseth and Mykkeltveite, 2005].

2-5-2-2-3- محاسبات قطر فضای متخلخل

برای محاسبه قطر فضای تخلخل از رابطه واشبورن استفاده می کنیم [Washburn, 1921]:

$$D_i = \frac{WASHcon \times s(-4 \cos q)}{P_i} \quad (33-2)$$

D_i = قطر فضای متخلخل

WASHcon = ثابت واشبورن

σ = کشش سطحی $\left(\frac{dynse}{cm} \right)$

θ = زاویه تماس (درجه)

برای بدست آوردن توزیع سطوح فضای متخلخل به ترتیب زیر عمل می کنیم:

$$R_i = D_i / 2$$

R_i = شعاع هر نقطه

مقدار کل جیوه تزریقی مخصوص برای هر نقطه:

$$I_i = V_i / W_s$$

V_i = حجم جیوه تزریقی

W_s = وزن نمونه

I_i = مقدار کل جیوه تزریقی مخصوص برای هر نقطه

سطح فضای متخلخل:

$$A_i = 4 * I_i / D_{mi}$$

A_i = سطح فضای متخلخل

D_{mi} = متوسط قطر منافذ

2-6- تابع لورت J

با استفاده از ارزیابی منحنی های فشارموییگی، تابع لورت¹ به صورت گسترده ای برای توصیف فضای متخلخل به کار می رود. تابع لورت به صورت زیر تعریف می شود [Garrouch, 1999]:

$$J_{sw} = \frac{0.217P_c}{s \cos q} \sqrt{\frac{k}{f}} \quad (34-2)$$

J_{sw} = تابع لورت (بدون بعد)

P_c = فشار موئینگی (psi)

σ = کشش سطحی $\left(\frac{dynse}{cm} \right)$

θ = زاویه تماس (درجه)

k = نفوذپذیری (md)

\emptyset = تخلخل

با داشتن اطلاعات فشار موئینگی می توان اطلاعات زیادی را در مورد ساختار متخلخل بدست آورد. به هر حال کاربرد تابع لورت بسته به دقت ابزار اندازه گیری، جمع آوری داده ها و تفسیر روی داده ها با محدودیت هایی روبرو است.

زاویه تماس و کشش سطحی برای سیالات استفاده شده در آزمایشگاه می باید در آزمایشگاه اندازه گیری شوند. کشش سطحی سیالات بخصوص برای مخازن مهم می باید به طور تجربی تعیین گردد. چنانچه داده های این اندازه گیری ها در دسترس نباشند مقادیر تخمینی برای بعضی از نفت های خام که خود تابعی از دما و فشار هستند وجود دارد [Garrouch Ali, 1999].

¹ . Levert function

2-7- محاسبه اشباع شدگی

مقدار اشباع شدگی آب (S_w) را می‌توان با استفاده از رابطه بروک¹ به صورت زیر بدست آورد.

[Brock, 1986]

(35-2)

$$S_w = \frac{R_w L_b}{R_t f}$$

در این رابطه L_b پارامتر مهمی است که خود تابع چندین پارامتر دیگر است. این پارامترها اولین بار توسط آرچی معرفی شد و شامل a , n , m می‌باشد. فرمول آرچی را می‌توان به صورت زیر نوشت

[آرچی 1942]:

$$S_w = \left[\frac{a R_w}{f^m R_t} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (36-2)$$

در این رابطه R_t با استفاده از نگارهای مقاومت و تخلخل با استفاده از نگارهای تخلخل و یا با اندازه‌گیری آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های مغزه قابل محاسبه می‌باشد.

از این رابطه در سازندهای تمیز عاری از شیل استفاده می‌شود. در صورتی که مقادیر واقعی پارامترهای a , n , m در دسترس نباشد، می‌توان از برخی روابط ارائه شده توسط محققین استفاده کرد

[Sclumberger, 1989]:

1- فرمول آرچی² [1942] برای کربناتها:

$$S_w = \left(\frac{R_w}{f^2 R_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (37-2)$$

2- فرمول هامبل³ برای ماسه سنگها:

¹ . Brock
² . Archie
³ . Humble

$$S_w = \left(\frac{0.62 R_w}{f^{2.15} R_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (38-2)$$

3- فرمول تیکسییر¹ برای ماسه سنگها که مشتق شده از فرمول هامبل است:

$$S_w = \left(\frac{0.81 R_w}{f^2 R_t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (39-2)$$

2-7-1- محاسبه اشباع شدگی در سازندهای شیل دار (رس)

از آنجا که فرمول آرچی، با فرض اینکه فقط الکترولیت موجود در فضاهای خالی رسانای جریان بوده و سایر بخش‌های سنگ نارسانا است، بنا نهاده شده است، بنابراین با حضور شیل در سنگ، فرمول آرچی بایستی تغییر یابد تا تاثیر شیل لحاظ شود، و مدلی جدید ارائه گردد تا پارامترهای اشباع شدگی و مقاومت در سازندهای شیلی را بهم مرتبط سازد.

زمانی که شیل وجود دارد، برای مرتبط کردن فاکتور مقاومت سازندی با مقاومت سازند، از مدل‌هایی استفاده می شود که در آنها از رسانایی² استفاده شده است. در رابطه با مدل سازی بر حسب رسانایی برای ارتباط فاکتور مقاومت سازندی با مقاومت سازند و ارتباط آن با اشباع شدگی، محققین بسیاری، دست به بررسی و پژوهش زده‌اند.

وایلی و پاتنود³ یکی از اولین مدل های رسانایی برای سازندهای شیل دار را ارائه نمودند [Patnode and Wyllie, 1950]:

$$C_o = \frac{C_w}{F} + C_s \quad (40-2)$$

C_o: رسانایی سنگ 100% اشباع از آب

C_w: رسانایی آب سازندی

¹. Tixier

². Conductivity

³. Wyllie & Patnod

F: ضریب مقاومت ویژه سازند

Cs: رسانایی که مستقل از میزان اشباع سیالات است و فقط در ارتباط با رسانایی سطحی مربوط به شیل ها است.

وینسور و مک کاردل¹ با مقایسه این رابطه و نتایج خود رابطه‌ای به صورت زیر ارائه دادند
:[Winsauere and Mc cardell, 1953]

$$C_o = \frac{1}{F} (C_w + C_z) \quad (41-2)$$

Cz: رسانایی دو لایه‌ای² نامیده شده و به عنوان تابعی از Cw می باشد. زمانی که $C_w \rightarrow 0$ برود، Cz نیز به سمت صفر می‌رود.

هر دو مدل معنای فیزیکی واضحی ندارند و حس فیزیکی در فرد ایجاد نمی‌کنند. در سال های بعد واکسمن و اسمیت سعی در از بین بردن این موضوع نمودند. [Waxman and Smits, 1968] آنها از مقادیر عظیمی داده‌ها از آزمایشگاه‌های شل استفاده کرده بودند، رابطه پیشنهادی آنها به صورت زیر است:

$$C_o = \frac{1}{F} (B.Q_v + C_w) \quad (42-2)$$

در این معادله:

B: به عنوان رسانایی معادل تبادل کاتیونها در شیل نظر گرفته شده است، که متناسب با قابلیت حرکت یون‌ها³ است.

Qv: متناسب با غلظت بار الکتریکی⁴ (که بر حسب میلی اکی والان بر میلی لیتر بیان می‌شود) ناشی از تبادل کاتیون ها در شیل می باشد.

¹ . Winsuar & Mack kardel

² . Double – Iayer Conductivity

³ . Mobility Ion

⁴ . Counter Ion Charge Concentration

در غلظت های بالای نمک آب سازندی، مقدار B برابر $3/83 \text{ per } meq/ml \text{ } S/m$ می باشد. Q_v برای برخی شیل ها نظیر اسمکتیت ها بالا، و برای برخی چون کائولینیت ها، پایین است. برای اشباع شدگی های نسبی واکسمن و اسمیت رابطه اشباع شدگی را به صورت زیر ارائه نمودند [Waxman and Smits, 1968]:

$$C_t = \frac{S_w^n}{F} \left(\frac{B \cdot Q_v}{S_w} + C_w \right) \quad (43-2)$$

در این رابطه مشاهده می شود که رسانایی شیل ها تابعی ضعیف از اشباع شدگی آب است. رسانایی در این حالت بوسیله تخلخل، رسانایی آب شور سازندی، اشباع شدگی آب و Q_v کنترل می شود که Q_v به ظرفیت تبادل کاتیونی رس ها¹ مرتبط می شود، که این ارتباط در فرمول زیر نشان داده شده است:

$$CEC = 100 Q_v \emptyset [\rho_g (1 - \emptyset)] \quad (44-2)$$

ρ_g ، دانسیته دانه ها بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب می باشد.

معمولا ظرفیت تبادل کاتیونی در آزمایشگاه برای انواع رس ها تخمین زده می شود. در جدول (2-2) تعدادی از انواع شیل ها و ظرفیت تبادل کاتیونی آنها آورده شده است.

جدول 2-2: ظرفیت تبادل کاتیونی به عنوان تابعی از نوع شیل

[De wan, 1983; Weaver, 1989; Van olphen & Fripiat, 1979]

ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)	نوع شیل (رس)
0-10	کلریت
2-7	کائولینیت
10-40	ایلیت
70-120	مونت موریلونیت

¹ . Cation Exchange Capacity, CEC

همانگونه که در مباحث قبلی بیان شد، ظرفیت تبادل کاتیونی در شیل ها یک خاصیت ذاتی است و به دلیل کمبود بار الکتریکی مثبت در سطح شیل ها ایجاد می شود. شیل ها کانی های سیلیکاته آبداری هستند که در سطح آن ها آنیون های AL^{3-} وجود دارد به دلیل این بار منفی میدان الکتریکی ضعیفی در سطح آن ها ایجاد شده که با جذب و تبادل کاتیون های موجود در آب سازندی مانند Ca^{2+} و Na^{2+} به حالت تعادل می رسند.

بنابراین در سطح شیل ها تبادل کاتیون ها در جریان است که در سنگ ها خود می تواند به عنوان یک مسیر جریان الکتریکی (رسانای الکتریکی) عمل نماید.

طبق فرضیه لایه دو گانه در سطح شیل ها که به صورت معمولاً ورقه ای هستند، دو لایه وجود دارد:

1- لایه استرن¹ که بر روی سطح شیل قرار دارد.

2- لایه گوی² که عمدتاً حامل Na^+ می باشد.

این دو لایه یک مسیر رسانای جریان الکتریکی در سنگ ایجاد می کنند.

با استفاده از داده های حاصل از نمودارگیری های ژئوشیمیایی³ همراه با استفاده از نگار طیفسنجی پرتو گاما تخمین خوبی از ظرفیت تبادل کاتیونی رس ها و همچنین Q_v بدست می آید [Herron, 1986].

مدل ارائه شده توسط واکسمن و اسمیت، در آنالیز نگارها به صورت وسیعی استفاده می شود، اما بدلیل اینکه به نوع رس ها از نظر پراکندگی هیچ توجهی نشده است (ساختاری، نواری و . . .)، دارای نقص است. همچنین در این مدل، برای رسانایی ناشی از تبادل بارهای الکتریکی در آب و رس مقدار یکسانی در نظر گرفته شده است. محققین در سال های بعد برای حل این مشکلات سعی در ارائه

¹ . Stern Layer

² . Gouy Layer

³ . Geochemical Logging

نمودن پارامترهایی جهت دخالت نوع توزیع رس در سنگ برآمدند (شکل ژئومتری رس در سنگ). از جمله می توان کلاویر و سن¹ را نام برد.

سن و همکاران نتایج تحقیقات خود را به صورت زیر ارائه دادند [Sen et al, 1990]:

$$Co = \frac{1}{F} \left[C_w + \frac{A \cdot Q_v}{\left(1 + \frac{C \cdot Q_v}{C_w}\right)} \right] + E \cdot Q_v \quad (45-2)$$

پارامترهای E و C برای در نظر گرفتن شکل هندسی² توزیع رس در سنگ می باشند و پارامتر A معادل پارامتر B در مدل ارائه شده توسط واکسمن و اسمیت است.

برای سنگ های تمیز و عاری از شیل «رس»، $Q_v = 0$ شده و فرمول سن به همان فرمول آرچی تبدیل می گردد:

$$Q_v = 0 \Rightarrow Co = \frac{Cw}{F} \Rightarrow F = \frac{Cw}{Co} = \frac{R_o}{Rw} \quad (46-2) \text{ (فرمول آرچی)}$$

در نهایت می توان بیان کرد که بررسی همه عوامل در مدل های ساخته شده برای شیل ها «رس ها»، معادلات حاصل و روش های بدست آوردن پارامترهای لازم برای آنها را بسیار سخت می کند. در بسیاری از حالت ها، یک معادله ساده می تواند جواب کافی و لازم را برای سنگ ما بدهد. اما برای همه مدل ها لازم است در حد کافی نوع و حجم شیل موجود در سنگ را تعیین کنیم.

2-8- نرمال کردن اشباع آب

محاسبه اشباع نرمال فاز تر از رابطه زیر بدست می آید [Core lab UK,2002].

$$S_w^* = \frac{S_w - S_{wir}}{1 - S_{wir}} \quad (47-2)$$

S_w^* = اشباع نرمال شده

S_w = اشباع شدگی آب

S_{wir} = اشباع آب غیر قابل استحصال

¹ . Clavier et al, 1977 and Sen et al, 1988

² . geometry

فصل سوم

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

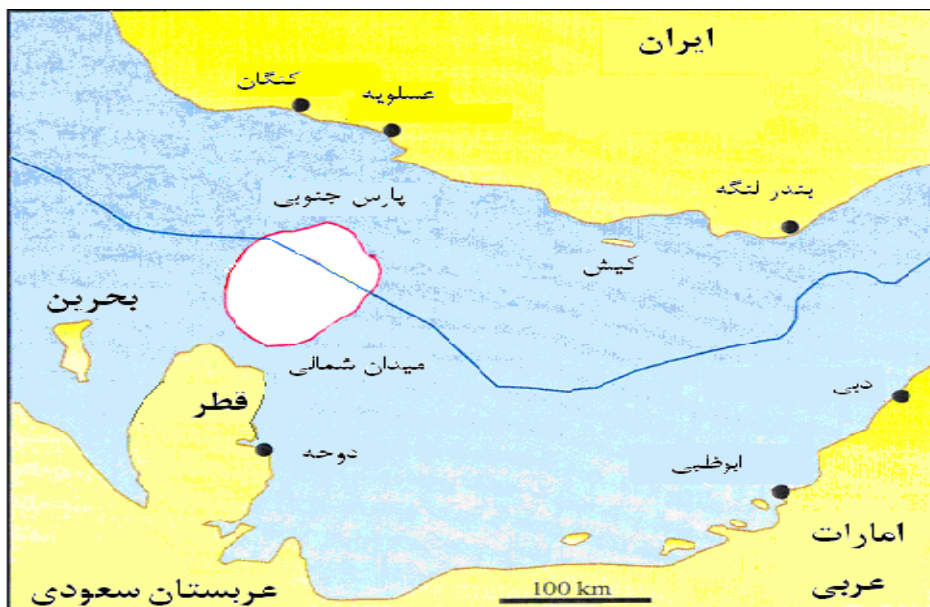
مورد مطالعه

3-1- مقدمه

از آنجایی که در نظر است از اطلاعات یکی از چاه‌های حفر شده در میدان کربناته پارس جنوبی استفاده کنیم، در این فصل ابتدا مختصری در مورد محل و موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی بحث می‌شود، سپس در زمینه زمین شناسی منطقه مطالبی ارائه گردیده و در انتها داده‌های در اختیار قرار گرفته از چاه مورد مطالعه را معرفی می‌نماییم.

3-2- موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی

میدان پارس جنوبی در موقعیت 52 تا 52/5 درجه شرقی و 26/5 تا 27 درجه شمالی قرار دارد. این میدان در 105 کیلومتری جنوب غربی بندر عسلویه در آب‌های خلیج فارس واقع است که ادامه میدان گازی گنبد شمالی امیرنشین قطر می‌باشد. مساحت کل این میدان 10,000 کیلومتر مربع است که 3700 کیلومتر مربع از آن متعلق به ایران می‌باشد. سازندهای کنگان و دالان به سن پرموتریاس، مخازن اصلی این میدان را تشکیل می‌دهند. مخزن میدان پارس جنوبی از نظر زمین شناسی، بخش شمالی گنبد پارس جنوبی شمال قطر را شامل می‌شود (شکل 3-1). میدان مزبور دارای طول تقریبی 150 کیلومتر و عرض تقریبی 70 کیلومتر می‌باشد [Kashfi, 1992].



شکل 3-1: موقعیت جغرافیایی میدان پارس جنوبی [رحیمی، 1381]

3-3- زمین شناسی ساختمانی

ساختمان زمین شناسی پارس جنوبی گنبدی شکل با یال‌های ملایم بوده که این خود تشکیل دهنده یکی از چند قله ساختمانی بالآمدگی قطر-پارس جنوبی بر روی پلاتفرم کربناته منطقه خاورمیانه می‌باشد.

بخاطر اختلاف ارتفاع بنیادی در منطقه میانی خلیج فارس بین بالآمدگی قطر-پارس جنوبی و حوضه‌های رسوبی جانبی، طبقات حفاری شده در چاه‌های مجاور ضخیم‌تر می‌باشد. جهت و امتداد ساختمان، شمال شرق-جنوب غرب و یال جنوب شرقی آن دارای شیب ملایم و یال شمال غرب دارای شیب تندتری می‌باشد [رحیمی، 1381].

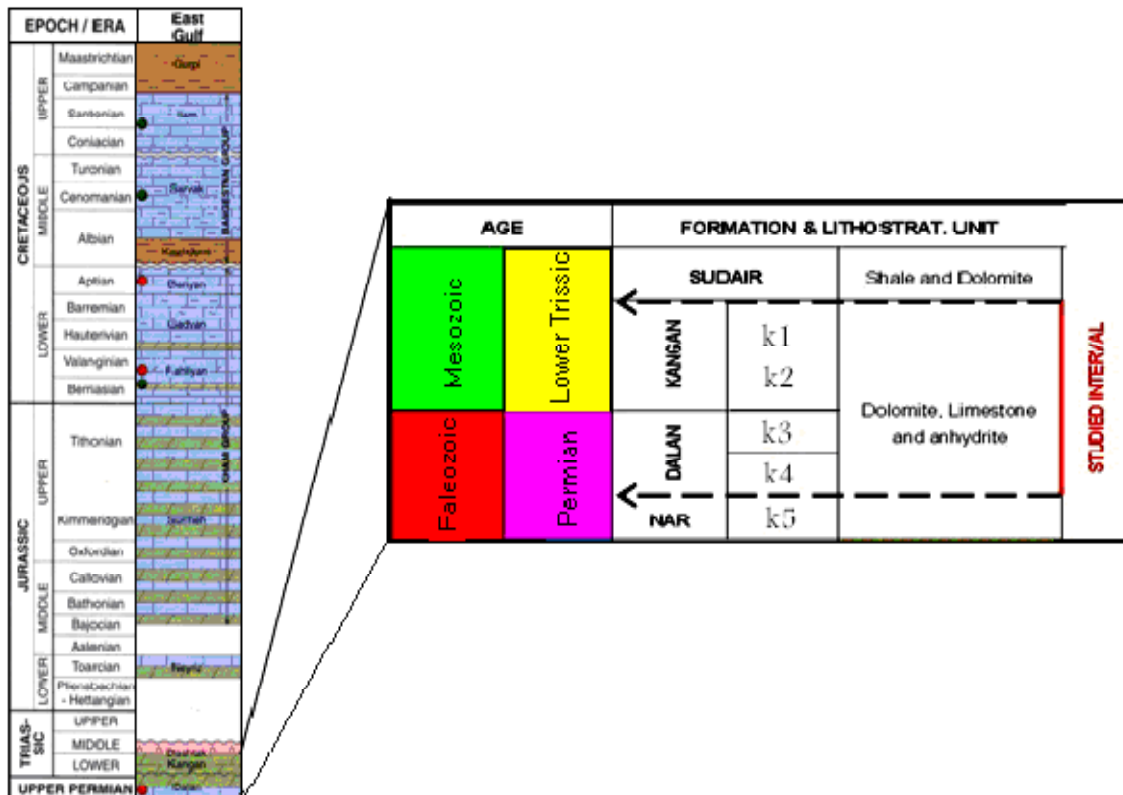
3-4- چینه شناسی سنگ های مخزن

سازند کنگان و دالان با سن تریاس زیرین و پرمین بالایی [لطف پور و همکاران، 1384] مخزن اصلی ذخایر گازی حوضه خلیج فارس را تشکیل می‌دهند که بر اساس شرایط مخزنی به واحدهای K_1 ، K_2 ، K_3 ، K_4 و K_5 و بر روی بخش تبخیری نار قرار می‌گیرد (شکل 3-2).

3-4-1- واحد K_1

ضخامت این واحد تقریباً 111 متر می‌باشد. به علت کیفیت پایین مخزنی واحد K_1 ، تنها از واحد K_2 سازند کنگان به منظور مطالعه خصوصیات مخزن استفاده شده است.

لیتولوژی این بخش تناوبی از دولومیت، آهک و لایه های انیدریتی می‌باشد و کمترین سهم را در تولید از مخزن دارا می‌باشد [لطف پور و همکاران، 1384].



شکل 2-3: ستون چینه شناسی سازند کنگان و دالان در میدان پارس جنوبی [رحیمی، 1381]

3-4-2- واحد K₂

ضخامت این واحد تقریباً 43 متر می باشد بر اساس مطالعات میکروپالئونتولوژی سن این بخش تریاس زیرین بوده (اشکوب¹) و بر مبنای تغییرات سنگ شناسی این واحد به دو زیر واحد تقسیم می شود [لطف پور و همکاران، 1384]:

الف- قسمت بالایی (K_{2a}): این بخش عمدتاً دولومیتی بوده و در آن، گاه به گاه ندول‌هایی از انیدریت مشاهده می شود.

ب- قسمت زیرین (K_{2b}): این زیر واحد از تناوب آهک، دولومیت و آهک دولومیتی تشکیل شده است ولی قسمت اعظم آن آهکی می باشد. در این بخش برخلاف بخش بالایی ندول‌های انیدریتی مشاهده نمی شود. قسمت زیرین این بخش منطبق بر مرز سازند کنگان/دالان است.

¹. Scythian

3-4-3 - واحد K₃

ضخامت این واحد تقریباً 121 متر می باشد و براساس تغییرات سنگ شناسی به سه زیر واحد تقسیم می شود [لطف پور و همکاران، 1384]:

الف- بخش بالایی (K_{3a}): این بخش دولومیتی است.

ب- بخش میانی (K_{3b}): اغلب از آهک تشکیل شده است.

ج- بخش زیرین (K_{3c}): از میان لایه‌های دولومیت و ندول‌های انیدریت دیاژنتیک تشکیل شده است.

3-4-4 - واحد K₄

ضخامت این واحد تقریباً 165 متر می‌باشد. این واحد نیز همچون واحد K₃ از سه زیر واحد سنگ شناسی تشکیل شده است [لطف پور و همکاران، 1384]:

الف- بخش بالایی (K_{4a}): متشکل از انیدریت و دولومیت است.

ب- بخش میانی (K_{4b}): اغلب از آهک تشکیل شده است. این بخش مخزن اصلی گاز در فواصل پرموتریاس است.

ج- بخش زیرین (K_{4c}): از لایه‌های دولومیتی تشکیل شده است که مرز بین واحد تبخیری نار و واحدهای K₄ است.

3-4-5 - واحد K₅

ضخامت این واحد تقریباً 174 متر می باشد. در قسمت زیرین متشکل از لایه های شیلی می‌باشد که ناشی از تبدیل ماسه سنگ فراقان به شیل دالان می باشد. قسمت میانی شامل دولومیت خاکستری روشن و خرمایی می باشد و قسمت بالایی حاوی آهک های خاکستری تا تیره است که بخشی از آن اوولیتی شده است [لطف پور و همکاران، 1384].

3-4-6- واحد نار

متشکل از انیدریت، دولومیت و لایه های آهکی دولومیتی اوولیتی است که قسمت زیرین آن حدوداً 10 فوت انیدریت می باشد. قسمت میانی دارای دو لایه انیدریتی متراکم و سفید رنگ است به دولومیت های خاکستری روشن با لایه هایی از آهک دولومیتی اوولیتی تبدیل می شود. قسمت بالایی همانند قسمت میانی می باشد. سطح چینه ای مرز بالایی این واحد متفاوت است، زیرا با تغییرات سنگ شناسی مواجه است. به عنوان مثال یک لایه انیدریتی در جوانب، ابتدا تبدیل به دولومیت انیدریتی و بالاخره دولومیت می شود. شاید تغییر رخساره علت اصلی تغییرات ضخامت باشد [لطف پور و همکاران، 1384].

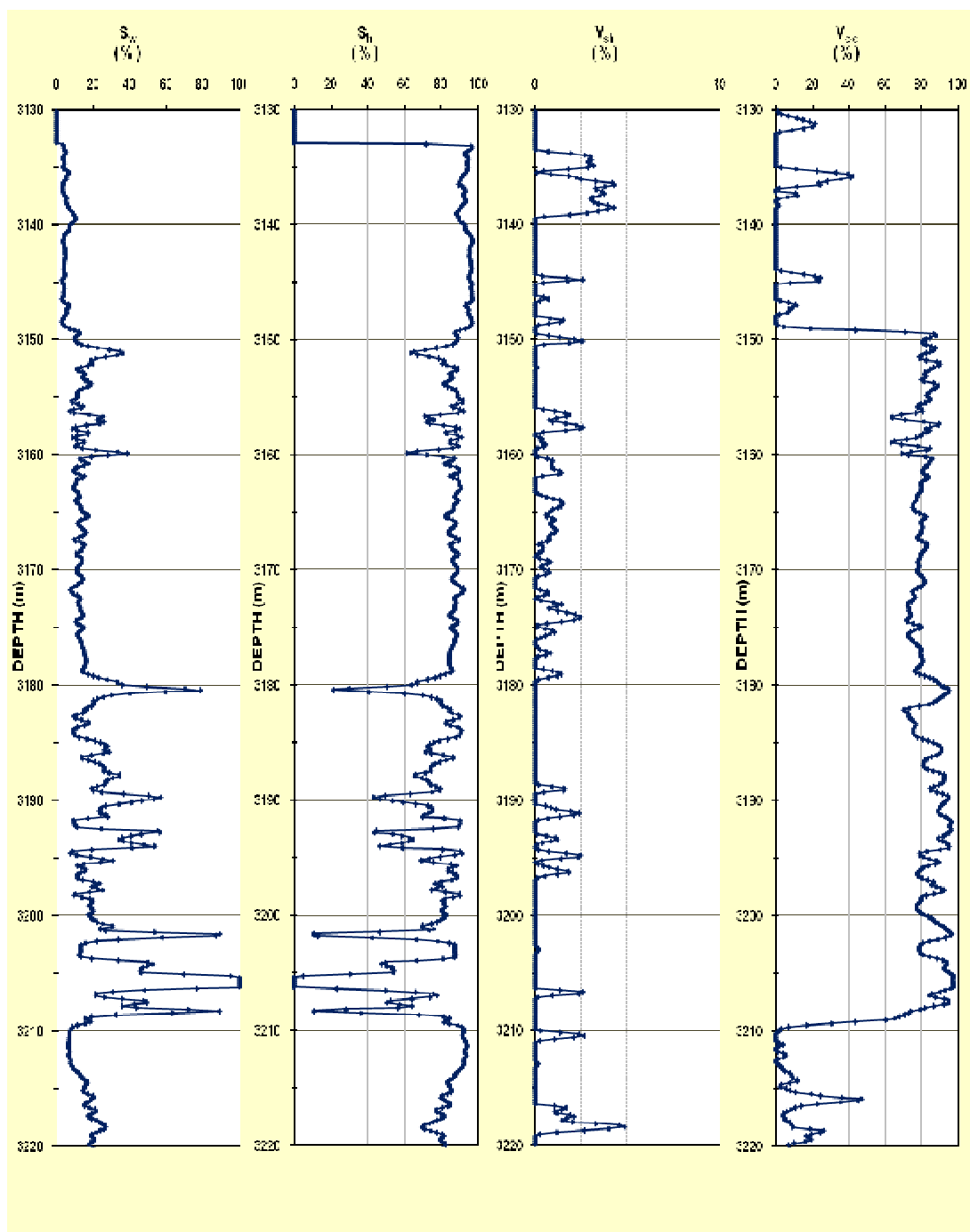
3-4- معرفی اطلاعات موجود از چاه مورد مطالعه

داده های که توسط شرکت نفت و گاز پارس جنوبی در اختیارمان قرار گرفته است، مربوط به چاه A از میدان پارس جنوبی می باشد. داده های موجود شامل گزارش آزمایش های ویژه مغزه (SCAL)¹ می باشد، که دربرگیرنده نتایج آزمایش های صورت گرفته به منظور بررسی پارامترهای پتروفیزیکی، خصوصیات سیالات، کشش سطحی و زوایای تماس سیالات در شرایط آزمایشگاه و مخزن، آزمایش های فشار موئینگی، اندازه گیری خصوصیات الکتریکی و ترشوندگی 23 نمونه کربناته، به همراه مقادیر اشباع شدگی آب و هیدروکربور در عمق های مختلف و ستون سنگ شناسی²، حاصل از تفسیر نگارهای چاه پیمایی در چاه A می باشد. همچنین مقادیر تخلخل و نفوذپذیری حاصل از مغزه برای این چاه در فاصله عمقی 3100-3200 متری از گزارش زمین شناسی این چاه اقتباس شده است.

در شکل (3-3) مقادیر اشباع شدگی آب و هیدروکربور، میزان شیل و میزان دولومیت در عمق های مختلف که از تفسیر داده های چاه پیمایی به دست آمده، نشان می دهد. در فصل بعد جزئیات بیشتر داده ها و چگونگی پردازش آنها مورد بحث قرار می گیرد.

¹ . Special Core Analysis SCAL

² . Lithology column



شکل 3-3: مقادیر اشباع شدگی آب و هیدروکربور، میزان شیل و میزان دولومیت حاصل از داده‌های چاه‌پیمایی، در

عمق‌های مختلف

فصل چهارم

پردازش داده ها

4-1 مقدمه

حال که با مفاهیم و همچنین زمین شناسی منطقه مورد مطالعه آشنا شدیم، در این فصل به پردازش داده‌های مغزه چاه A از میدان هیدروکربوری پارس جنوبی، به منظور محاسبه اشباع شدگی آب در نقاط مختلف این چاه می‌پردازیم. سپس نتایج حاصله را با مقادیر اشباع شدگی آب بدست آمده از نگارهای چاه‌پیمایی چاه مذکور، که توسط شرکت نفت و گاز پارس در اختیارمان قرار گرفته، مقایسه می‌نماییم.

4-2 پردازش داده‌ها

اطلاعات مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از کشش سطحی و زوایای تماس سیالات در شرایط آزمایشگاه و مخزن (جدول 4-1)، خواص پتروفیزیکی (تخلخل و نفوذپذیری آزمایشگاهی) (جدول 4-2) و داده‌های فشار موئینگی برای 23 نمونه کربناته (شرح نحوه آماده سازی نمونه‌ها و همچنین چگونگی آزمایش‌های تعیین تخلخل، تراوایی و فشار موئینگی در پیوست ب آورده شده است)، و همچنین مقادیر اشباع شدگی آب بدست آمده از داده‌های چاه‌پیمایی در عمق‌های مختلف چاه A میدان پارس جنوبی می‌باشد، که تمامی این اطلاعات از شرکت نفت و گاز پارس گرفته شده است.

جدول 4-1: مقادیر کشش سطحی و زاویه تماس در شرایط آزمایشگاه و مخزن [گزارش SCAL چاه A]

سیستم	زاویه تماس (θ)	کشش سطحی (σ) (dyne/cm)	$\sigma * \cos \theta$
گاز/آب نمک	0	50	50
گاز/جیوه	140	480	367

جدول 4-2: داده‌های پتروفیزیکی حاصل از آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه‌های مغزه [گزارش SCAL چاه A]

شماره نمونه‌ها	عمق (m)	نفوذپذیری (mD)	تخلخل %	چگالی gr/cm ³	طبقه بندی آرچی ¹
1	2896.1	10.639	11.49	2.75	I, A, Fracture
2	2901.1	4.892	29.08	2.71	II, B/C
3	2904.1	3.112	23.87	2.69	II, B/C
4	2921.9	28.982	20.04	2.85	I, D/C, Fracture
5	2925.2	3.303	19.71	2.86	I, B, Anhydrite
6	2970.2	10.465	8.76	2.86	I, A/B, Fracture
7	2974.9	17.735	12.8	2.85	I, B/C
8	2984.4	247.78	22.33	2.84	II, B/C
9	2989.2	13.157	22.09	2.72	II, B/D, Vuggy
10	3000.2	0.962	9.69	2.72	II, B/C
11	3017.2	44.487	17.19	2.84	II/I, B/C
12	3036.9	1.093	5.98	2.86	I, B
13	3134.4	1.735	12.76	2.84	I/II, A/B
14	3138.5	0.985	10.17	2.86	I, A
15	3147.3	1.741	21.9	2.71	II, C/D, Cracks
16	3160.4	5.018	21.39	2.71	II, C
17	3162.9	1.8	21.52	2.71	II, C
18	3165.5	2.888	18.03	2.7	II, C
19	3168.2	13.459	20.38	2.71	II, C/D
20	3170.5	40.248	23.65	2.71	II, B/D
21	3183.7	4.408	19.31	2.69	II, D/C
22	3192.8	1.22	16.88	2.72	II, C/D
23	3200.5	2.046	20.56	2.71	II, C, Vuggy

¹. Archie classification

توضیح علائم اختصاری بکار برده شده در جدول (2-4) به همراه برخی نشانه‌های زمین شناسی مهم که با چشم قابل تشخیص است در شکل زیر موجود می‌باشد.



SS: رگه های انحلال فشاری

I, II, III, A, B, C, D : دسته بندی آرچی

H,V: پلاگهای افقی وعمودی

Type I : خمیره کریستالین

AN: انیدرید

Type II : خمیره چالکی

F: فرکچر

Type III : خمیره دانه شکری

VUG: حفرات غاری

A: حفرات غیر قابل تشخیص با چشم

MF: فرکچر ریز

B: حفرات قابل دید با چشم بین 0/1 تا 0/1 میلیمتر

CRK: ترک

C: حفرات قابل دید با چشم بین 0/1 تا 2 میلیمتر

STY: استالولیت

D: حفرات قابل دید با چشم بزرگتر از 2 میلیمتر

شکل 1-4: برخی نشانه‌های زمین شناسی مهم که با چشم قابل تشخیص است [گزارش SCAL چاه A].

حال به پردازش داده‌های مغزه موجود به منظور محاسبه اشباع شدگی آب می پردازیم. مراحل انجام

کار به 10 مرحله زیر تقسیم بندی شده است:

- 1- تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی
 - 2- محاسبه تابع لورت (J) برای تمامی نمونه ها
 - 3- محاسبه اشباع آب کاهش نیافتنی (Swir)
 - 4- محاسبه اشباع آب نرمال شده
 - 5- بدست آوردن رابطه ای بین اشباع آب نرمال شده و تابع لورت
 - 6- محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب
 - 7- محاسبه تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب
 - 8- محاسبه مقادیر Sw^* برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن
 - 9- محاسبه مقادیر Sw برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن
 - 10- مقایسه مقادیر Sw محاسبه شده، با مقادیر Sw حاصل از نگار چاه پیمایی
- شرح این مراحل در ادامه آورده شده است.

4-2-1- تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی

برای تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی ابتدا با استفاده از فرمولهای (21-2)، (22-2) و

(23-2) شاخص جریان منطقه‌ای (FZI) هر نمونه را بدست می آوریم، جدول (3-4) مقادیر $RQI, \theta z$

و FZI محاسبه شده برای نمونه های مورد آزمایش را نشان می دهد.

جدول 3-4: مقادیر RQI, \emptyset_z و FZI هر نمونه

شماره نمونه	نسبت پوکی	شاخص کیفیت مخزن	شاخص جریان منطقه‌ای
1	0.13	0.3	2.33
2	0.41	0.13	0.31
3	0.31	0.11	0.36
4	0.25	0.38	1.51
5	0.25	0.13	0.52
6	0.1	0.34	3.57
7	0.15	0.37	2.52
8	0.29	1.05	3.64
9	0.28	0.24	0.85
10	0.11	0.1	0.92
11	0.21	0.51	2.43
12	0.06	0.13	2.11
13	0.15	0.12	0.79
14	0.11	0.1	0.86
15	0.28	0.09	0.32
16	0.27	0.15	0.56
17	0.27	0.09	0.33
18	0.22	0.13	0.57
19	0.26	0.26	1
20	0.31	0.41	1.32
21	0.24	0.15	0.63
22	0.2	0.08	0.42
23	0.26	0.1	0.38

بعد از بدست آوردن FZI هر نمونه نوبت به تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی می شود. در مطالعه حاضر جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی از دو روش آنالیز هیستوگرام و مجموع مربع خطاها با استفاده از نرم افزار Matlab استفاده شده است، که شرح این دو روش در ادامه آورده شده است.

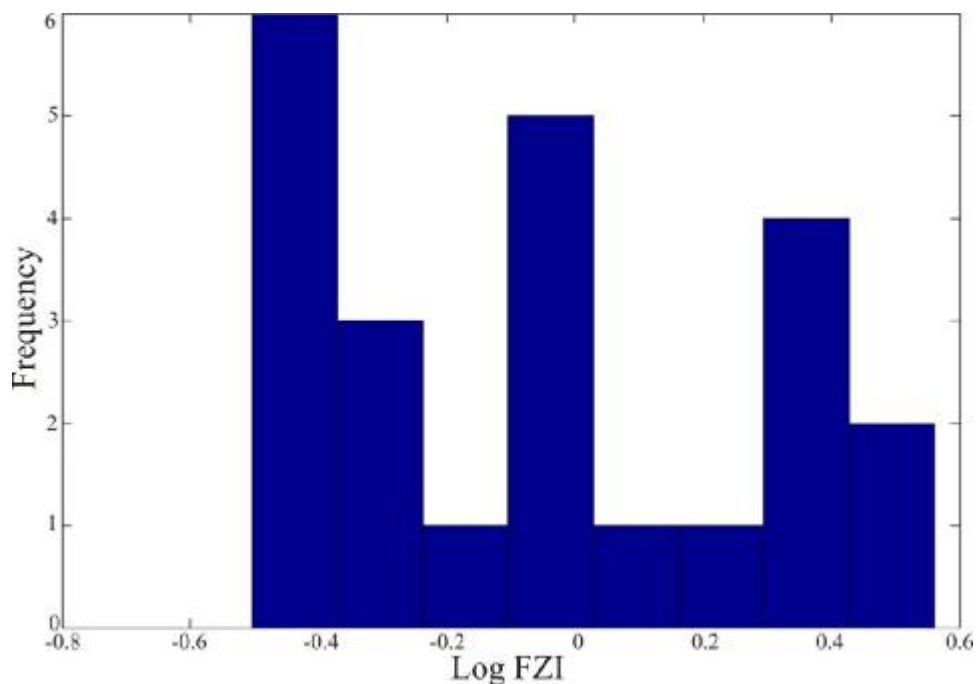
الف - آنالیز هیستوگرام

جهت تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش آنالیز هیستوگرام، ابتدا فایل Excel حاوی مقادیر لگاریتمی FZI که در یک ستون مرتب شده است را در نرم افزار Matlab وارد نموده، سپس با استفاده از دستور زیر

(تعداد دسته، نام فایل حاوی مقادیر لگاریتمی FZI که در نرم افزار Import شده) hist

نرم افزار نمودار فراوانی مقادیر لگاریتمی FZI در تعداد دسته‌های خواسته شده در دستور رسم هیستوگرام را به ما می‌دهد. عدد تعداد دسته‌هایی که در دستور hist می‌آید، طوری انتخاب شده است که خروجی نرم‌افزار (نمودار فراوانی بر حسب مقادیر لگاریتمی شاخص جریان منطقه‌ای) بهترین توزیع‌های نرمال را نشان دهد (این عدد با آزمون و خطا بدست می‌آید). تعداد توزیع‌های نرمال که در خروجی وجود دارد بیانگر تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی می‌باشد.

نتایج بیانگر تبعیت توزیع شاخص منطقه‌ای جریان از 3 توزیع نرمال می‌باشد بنابراین داده‌ها به سه واحد جریان هیدرولیکی تقسیم گردیدند (شکل 4-2).



شکل 4-2: آنالیز هیستوگرام بر روی داده‌های لگاریتمی شاخص جریان منطقه‌ای

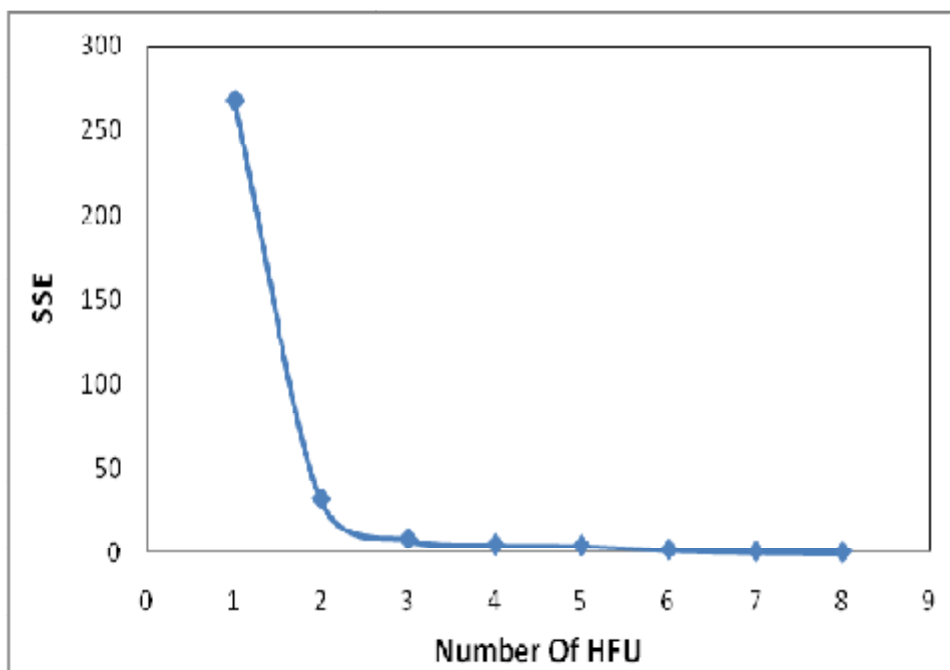
ب - مجموع مربع خطا

از آنجایی که تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از آنالیز خوشه ای و آنالیز احتمال نرمال تابع کاربر می باشد و احتمال ایجاد خطا در محاسبات زیاد است، لذا به منظور کاهش خطا از پارامتر مجموع مربع خطاها¹ (SSE) استفاده شده است.

روش کار بدین صورت است که ابتدا تعداد دسته‌ها را برابر یک فرض کرده و آنالیز خوشه‌ای K-means را توسط نرم افزار Matlab انجام می‌دهیم. سپس آنالیز رگرسیون خطی را بر روی داده‌ها انجام داده و مقدار مجموع مربع خطاها را محاسبه می‌کنیم. این کار را به همین صورت برای تعداد دسته‌های دیگر نیز انجام و در نهایت نموداری از مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد دسته‌ها ترسیم می‌کنیم (شکل 4-3).

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی مقدار مجموع مربع خطاها کاهش یافته، اما از یک مقداری به بعد تغییرات در مجموع مربع خطاها محسوس نبوده و قابل صرف نظر کردن است. این مقدار همان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه است. تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه به این معنی است که، می‌توان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را بیش از مقدار بهینه نیز انتخاب نمود، اما بهبودی در نتایج حاصل نشده و تنها محاسبات مشکل‌تر و پیچیده‌تر می‌شود.

¹.Sum of squar error (SSE)



شکل 4-3: نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحد های جریان هیدرولیکی

بنابراین نتایج حاصل از دو روش نشان می دهند که داده ها به سه واحد جریان هیدرولیکی تقسیم می شوند.

پس از تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، برای اینکه مجموعه ای از داده ها را که بسیار شبیه به هم هستند را در یک گروه قرار دهیم، از آنالیز خوشه ای K-means به کمک نرم افزار Matlab، برای مقادیر FZI استفاده شده است. آنالیز خوشه ای به روش K-means، داده ها را در گروه های مشخص از هم جدا کرده به طوریکه داده های مربوط به هر گروه با سایر گروه ها متفاوت است. در این روش بعد از تعیین تعداد دسته ها که از آنالیز هیستوگرام و مجموع مربع خطاها استفاده شده است، نرم افزار به تعیین دسته های تعیین شده نقاطی را به عنوان نقاط مرکزی در نظر می گیرد و فاصله سایر نقاط تا نقطه مرکزی را محاسبه می کند و بدین ترتیب داده ها را در گروه های مختلف دسته بندی می کند (جدول 4-4). نرم افزار Matlab به کاربر این قابلیت را می دهد که به هر تعداد که مورد نظر است محل نقطه مرکزی را تا حصول نتیجه بهتر تغییر دهد.

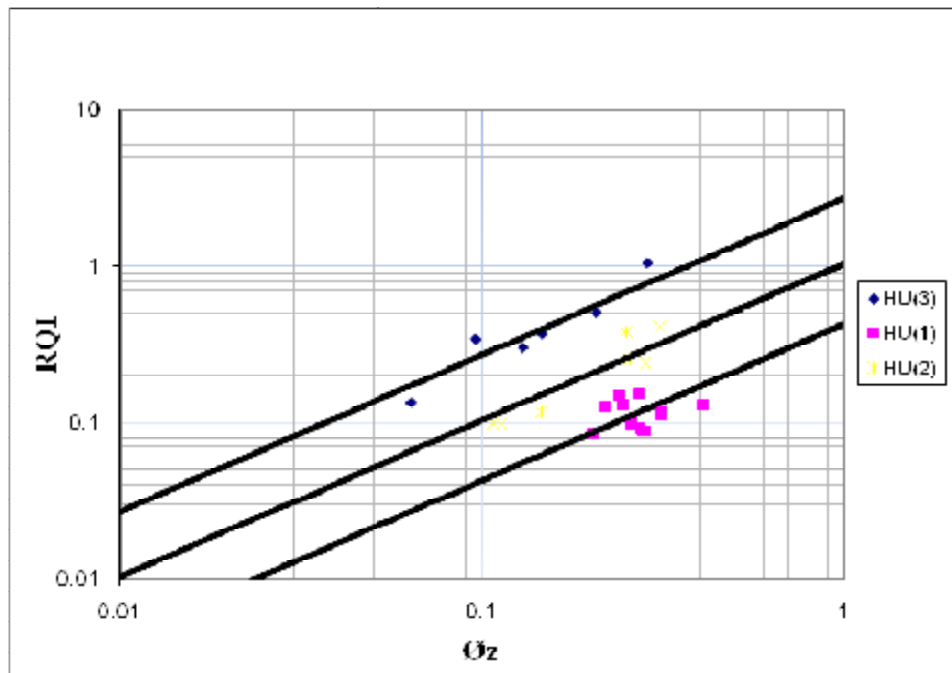
جدول 4-4: دسته بندی نمونه ها در واحد های جریان هیدرولیکی

شماره نمونه‌ها	عمق (m)	نفوذپذیری (mD)	تخلخل %	چگالی gr/cm ³	نسبت پوکی	شاخص کیفیت مخزن	شاخص جریان منطقه‌ای	واحد جریان هیدرولیکی
2	2901.07	4.89	29.08	2.71	0.41	0.13	0.31	1
3	2904.09	3.11	23.87	2.69	0.31	0.11	0.36	1
15	3147.31	1.74	21.9	2.71	0.28	0.09	0.32	1
17	3162.89	1.80	21.52	2.71	0.27	0.09	0.33	1
22	3192.84	1.22	16.88	2.72	0.20	0.08	0.42	1
23	3200.54	2.05	20.56	2.71	0.26	0.10	0.38	1
5	2925.21	3.30	19.71	2.86	0.25	0.13	0.52	1
16	3160.41	5.02	21.39	2.71	0.27	0.15	0.56	1
18	3165.49	2.89	18.03	2.7	0.22	0.13	0.57	1
21	3183.74	4.41	19.31	2.69	0.24	0.15	0.63	1
9	2989.16	13.16	22.09	2.72	0.28	0.24	0.86	2
10	3000.15	0.96	9.69	2.72	0.11	0.10	0.92	2
13	3134.43	1.74	12.76	2.84	0.15	0.12	0.79	2
14	3138.53	0.99	10.17	2.86	0.11	0.10	0.86	2
19	3168.18	13.46	20.38	2.71	0.26	0.26	1.00	2
20	3170.45	40.25	23.65	2.71	0.31	0.41	1.32	2
4	2921.92	28.98	20.04	2.85	0.25	0.38	1.51	2
1	2896.13	10.64	11.49	2.75	0.13	0.30	2.33	3
7	2974.87	17.74	12.8	2.85	0.15	0.37	2.52	3
11	3017.17	44.49	17.19	2.84	0.21	0.51	2.43	3
12	3036.87	1.09	5.98	2.86	0.06	0.13	2.11	3
6	2970.18	10.47	8.76	2.86	0.10	0.34	3.58	3
8	2984.38	247.78	22.33	2.84	0.29	1.05	3.64	3

با لگاریتم گیری از دو طرف رابطه 2-24 خواهیم داشت:

$$\text{LogRQI} = \text{Log}f_z + \text{LogFZI} \quad (1-4)$$

طبق رابطه 2-4 چنانچه مقادیر θ_z و RQI را در یک مقیاس Log-Log ترسیم کنیم داده‌هایی که دارای مقادیر یکسان FZI هستند بر روی یک خط با شیب ثابت قرار می‌گیرند و نمونه‌های با مقادیر متفاوت FZI بر روی خطوط موازی هم قرار می‌گیرند. اما مطابق شکل (4-4) مقادیر FZI مربوط به یک واحد جریان هیدرولیکی به دلایل مختلف نظیر، خطاهای آزمایشگاهی، انجام ندادن آزمایشات در زمان مناسب، آماده سازی نامناسب نمونه‌ها و ... دقیقاً یکسان نیستند. به همین منظور از آنالیز خوشه‌ای برای قرار دادن مقادیر بسیار نزدیک به هم FZI در یک گروه استفاده شده است.



شکل 4-4: نمودار لگاریتمی شاخص کیفیت مخزن در مقابل نسبت پوکی برای سه واحد جریان هیدرولیکی

محاسبه FZI هر واحد جریانی

برای بدست آوردن یک مقدار معادل FZI برای هر گروه طبق معادله 1-4 وقتی RQI را برحسب θ_z در یک نمودار کامل لگاریتمی رسم می‌کنیم باید یک خط با زاویه 45° بدست آوریم. برای بدست

آوردن خط تقریبی با زاویه 45° ($y=x+b$) از روش کمینه کردن مربع خطاها (انحراف مقادیر واقعی از خط تقریب) استفاده شده است.

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum (Y - y)^2 = S \quad (2-4)$$

e = خطا (انحراف)

Y = هر نمونه RQI

y = یک واحد RQI

حال فرمول 1-4 را به صورت یک فرمول خطی در نظر می‌گیریم که در آن

$$y = \log RQI$$

$$x = \text{Log}f_z$$

$$b = \text{Log}FZI$$

برای کاهش انحراف باید مشتق فرمول انحراف را بر حسب متغیر برابر صفر قرار داد که خواهیم داشت:

$$S = \sum (Y - x - b)^2$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n 2(-1)(y - x - b) = 0$$

$$\Rightarrow \sum_{i=1}^n (y - x - b) = 0$$

$$\Rightarrow \sum y - \sum x = nb$$

$$\Rightarrow b = \frac{\sum y - \sum x}{n}$$

بعد از بدست آوردن b می‌توان FZI را برای هر واحد محاسبه کرد (جدول 4-5).

جدول 4-5: مقادیر متوسط شاخص جریان منطقه‌ای (FZI) در هر واحد جریان هیدرولیکی

3	2	1	واحد جریان هیدرولیکی
2.70	1.01	0.43	شاخص جریان منطقه‌ای

4-2-2- محاسبه تابع لورت (J) برای تمامی نمونه ها

در این مرحله با استفاده از فرمول تابع لورت (2-34) و داشتن مقادیر فشار موئینگی تزریق جیوه، تخلخل و نفوذپذیری هر نمونه و همچنین زاویه تماس و کشش سطحی سیالات در شرایط آزمایشگاه (جدول 4-1)، مقادیر تابع لورت را برای هر نمونه بر حسب Pc محاسبه می نماییم. به عنوان نمونه مقادیر تابع J برای نمونه شماره 9 در جدول 4-6 آورده شده است.

جدول 4-6: محاسبه تابع لورت برای نمونه شماره 9

شماره نمونه	فشار موئینگی Pc (psi)	نفوذپذیری k (mD)	تخلخل Ø (%)	تابع لورت (گاز/آب نمک)
9	0.52	13.16	0.22	0.00
9	1.07	13.16	0.22	0.01
9	2.07	13.16	0.22	0.01
9	3.07	13.16	0.22	0.01
9	4.06	13.16	0.22	0.02
9	5.06	13.16	0.22	0.02
9	6.06	13.16	0.22	0.03
9	7.06	13.16	0.22	0.03
9	8.05	13.16	0.22	0.04
9	10.04	13.16	0.22	0.05
9	12.74	13.16	0.22	0.06
9	26.52	13.16	0.22	0.12
9	36.51	13.16	0.22	0.17
9	60.70	13.16	0.22	0.28
9	80.76	13.16	0.22	0.37
9	90.30	13.16	0.22	0.41
9	99.99	13.16	0.22	0.46
9	124.66	13.16	0.22	0.57
9	149.67	13.16	0.22	0.68
9	175.01	13.16	0.22	0.80
9	199.42	13.16	0.22	0.91
9	249.54	13.16	0.22	1.14
9	299.05	13.16	0.22	1.37
9	350.00	13.16	0.22	1.60
9	399.05	13.16	0.22	1.83

ادامه جدول 4-6

شماره نمونه	فشار موئینگی Pc (psi)	نفوذپذیری k (mD)	تخلخل Ø (%)	تابع لورت (گاز/آب نمک)
9	452.22	13.16	0.22	2.07
9	499.01	13.16	0.22	2.28
9	753.57	13.16	0.22	3.45
9	1003.21	13.16	0.22	4.59
9	1250.83	13.16	0.22	5.72
9	1499.03	13.16	0.22	6.85
9	1746.55	13.16	0.22	7.99
9	1993.64	13.16	0.22	9.12
9	2489.81	13.16	0.22	11.39
9	2990.26	13.16	0.22	13.67
9	3490.71	13.16	0.22	15.96
9	3989.43	13.16	0.22	18.24
9	5978.88	13.16	0.22	27.34
9	7961.03	13.16	0.22	36.40
9	9955.41	13.16	0.22	45.52
9	14925.72	13.16	0.22	68.25
9	19926.99	13.16	0.22	91.12
9	24890.46	13.16	0.22	113.81
9	29870.85	13.16	0.22	136.59

4-2-3 - محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir)

اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir) یکی از مهمترین پارامترهای مخازن هیدروکربوری است که در بسیاری از محاسبات و مدل‌سازی های مطالعات مخزن نقش مؤثری ایفاء می کند. تعیین Swir به روش‌های مختلفی نظیر آزمایشات چاه، استفاده از داده های چاه نگاری و آزمایش مغزه انجام می‌گیرد. دقیق ترین و البته پر هزینه ترین روش جهت تعیین اشباع آب غیر قابل استحصال انجام آزمایش مغزه است. اما به علل مختلفی نظیر هزینه‌های بسیار بالا و یا عدم امکان تهیه مغزه در بعضی نقاط از چاه نمی توان از این روش جهت تعیین Swir استفاده نمود. به همین دلیل در این مطالعه سعی شده از روشی دیگر برای تعیین Swir، با استفاده از سایر پارامترها (Ø و K) در نقاط دیگر چاه استفاده شود.

بدین منظور ابتدا رابطه بین اشباع آب غیر قابل استحصال و شاخص کیفیت مخزن در هر واحد جریان هیدرولیکی بدست می‌آید و سپس میزان Swir مخزن (در صورت داشتن مقادیر K و Ø مخزن) پیش بینی می‌شود.

قبل از اینکه داده های تزریق جیوه بتواند برای مخزن به کار روند، داده ها باید از سیستم هوا/جیوه آزمایشگاه به سیستم هیدروکربور/آب شور مخزن تبدیل شوند. این عمل می تواند به وسیله معادله 31-2 انجام گردد.

مقادیر q_r و q_l به ترتیب زاویه تماس سیستم های هیدروکربور/آب شور/سنگ در مخزن و هوا/جیوه/سنگ در آزمایشگاه و همچنین s_r و s_l به ترتیب کشش های سطحی سیستم های هیدروکربور/آب شور و هوا/جیوه می باشند که مقادیر آنها در جدول 4-1 آورده شده است. به عنوان مثال مقادیر فشار موئینه تزریق جیوه که به شرایط مخزن تبدیل شده برای نمونه شماره 9 در جدول 4-7 آورده شده است.

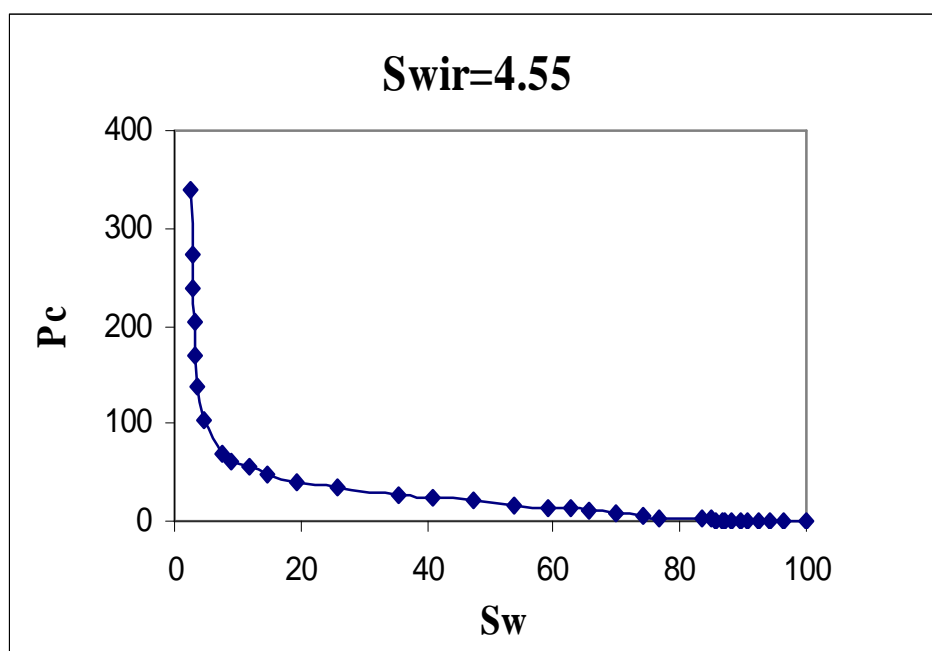
جدول 4-7: تبدیل مقادیر فشار موئینه آزمایشگاهی به شرایط مخزن برای نمونه شماره 9

شماره نمونه	فشار موئینگی آزمایشگاهی (گاز/جیوه) (psi)	فشار موئینگی مخزن (گاز/آب نمک) (psi)
9	0.52	0.07
9	1.07	0.15
9	2.07	0.28
9	3.07	0.42
9	4.06	0.55
9	5.06	0.69
9	6.06	0.83
9	7.06	0.96
9	8.05	1.10
9	9.05	1.23
9	10.04	1.37
9	12.74	1.74
9	26.52	3.61
9	36.51	4.97

ادامه جدول 7-4

شماره نمونه	فشار موئینگی آزمایشگاهی (گاز/جیوه) (psi)	فشار موئینگی مخزن (گاز/آب نمک) (psi)
9	60.70	8.27
9	80.76	11.00
9	90.30	12.30
9	99.99	13.62
9	124.66	16.98
9	149.67	20.39
9	175.01	23.84
9	199.42	27.17
9	249.54	34.00
9	299.05	40.74
9	350.00	47.68
9	399.05	54.37
9	452.22	61.61
9	499.01	67.99
9	753.57	102.67
9	1003.21	136.68
9	1250.83	170.41
9	1499.03	204.23
9	1746.55	237.95
9	1993.64	271.61
9	2489.81	339.21
9	2990.26	407.39
9	3490.71	475.57
9	3989.43	543.52
9	5978.88	814.56
9	7961.03	1084.61
9	9955.41	1356.32
9	14925.72	2033.48
9	19926.99	2714.85
9	24890.46	3391.07
9	29870.85	4069.60

مقادیر اشباع آب، از کم کردن میزان اشباع جیوه در هر مرحله از آزمایش تزریق جیوه از عدد 100 بدست خواهد آمد. (جدول 4-8). با رسم نمودار P_c در برابر S_w می توان میزان S_{wir} را برای هر نمونه بدست آورد. اشباع آب غیر قابل استحصال برای هر نمونه عبارت است از اشباعی که در آن، منحنی مذکور مجانب خط قائم شود (شکل 4-5).

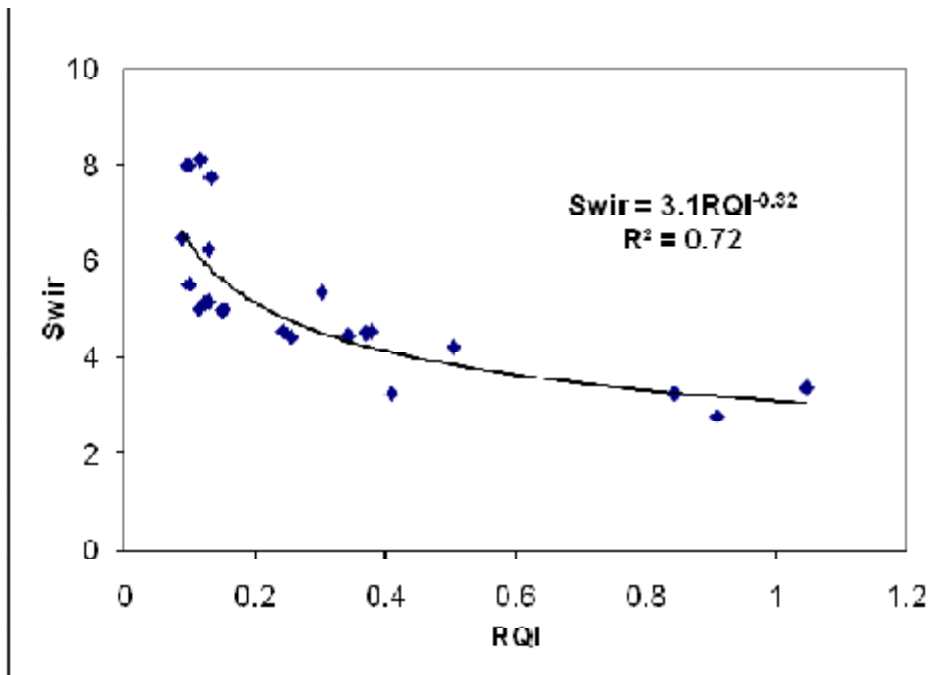


شکل 4-5: بدست آوردن S_{wir} با استفاده از نمودار $P_c - S_w$ برای نمونه شماره 9

با آزمایشات فشار موئینگی به روش تزریق جیوه بر روی نمونه ها و تبدیل آن ها به شرایط مخزن، مقادیر اشباع آب غیر قابل استحصال برای هر نمونه مشخص شد. همچنین از آنجایی که مقادیر تخلخل و نفوذپذیری هر نمونه موجود می باشد، یک مقدار RQI برای هر نمونه قابل محاسبه می باشد.

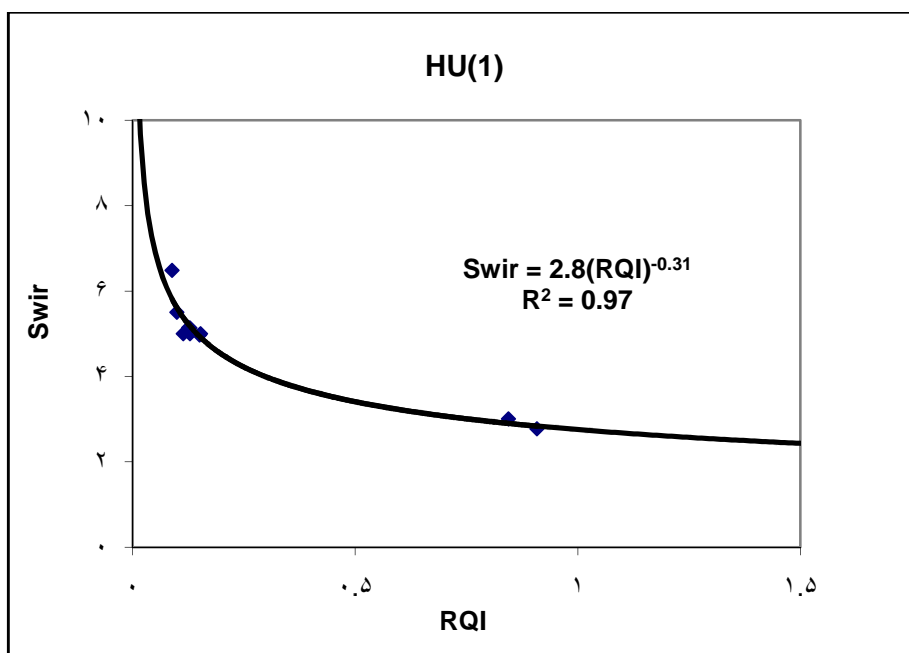
پس از رسم نمودار S_{wir} برحسب RQI برای تمامی نمونه ها مشاهده شد ضریب تعیین بین اشباع آب غیر قابل استحصال و شاخص کیفیت مخزن برابر $0/72$ می باشد (شکل 4-6).

¹. Determination coefficient

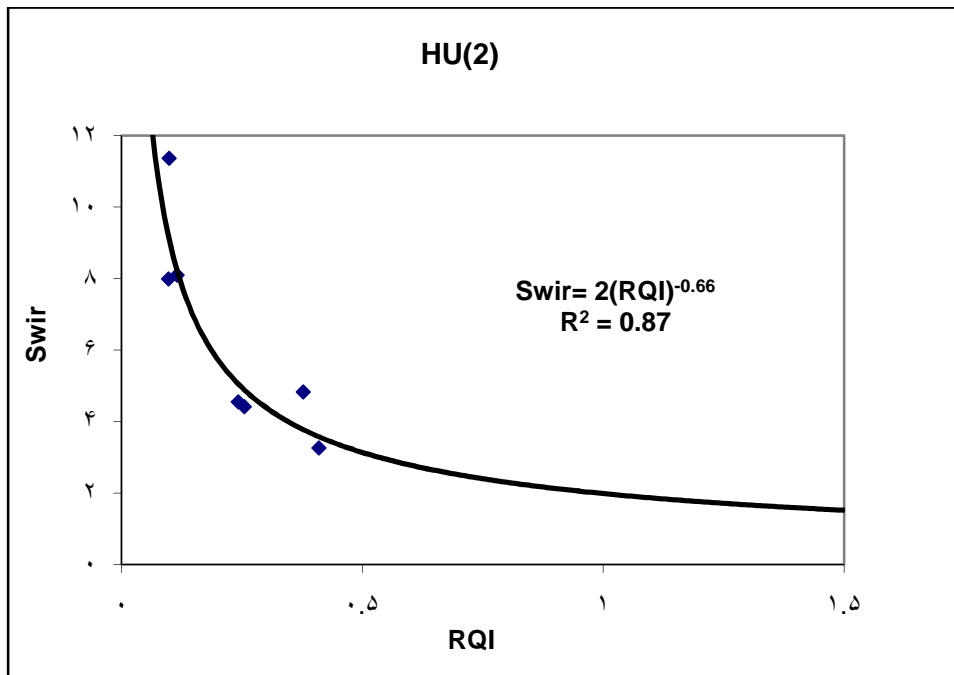


شکل 4-6: رابطه بین Swir و RQI برای تمامی نمونه ها

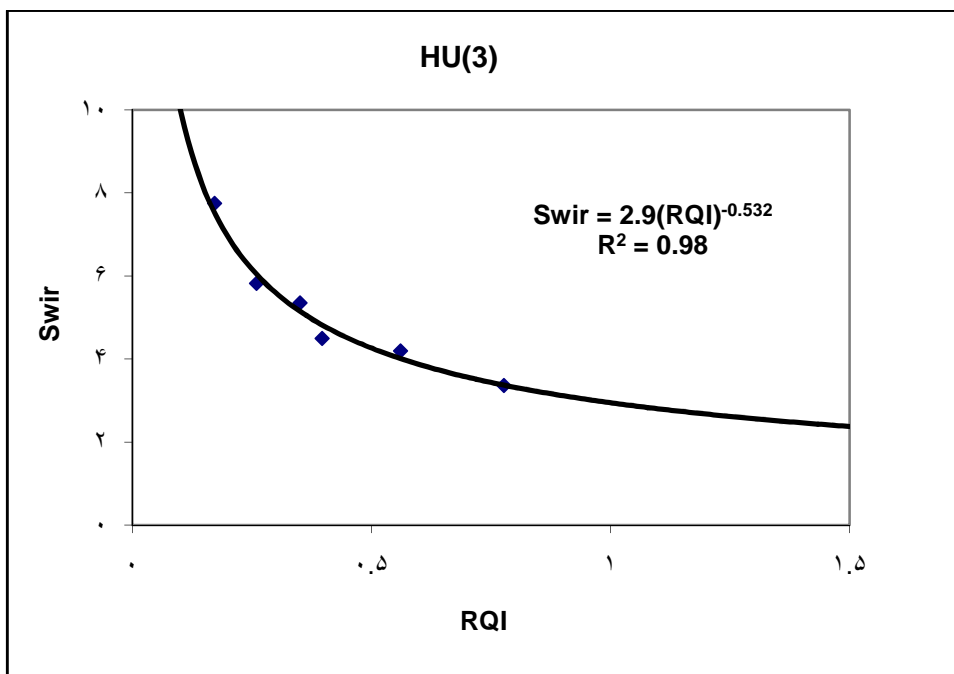
حال برای هر واحد جریان هیدرولیکی RQI را بر حسب Swir در نمودارهای جداگانه رسم نموده و معادلات بهترین توابع برازش شده بر آنها مشخص گردید (شکل های 4-7، 4-8 و 4-9).



شکل 4-7: رابطه بین Swir و RQI در واحد جریان هیدرولیکی 1



شکل 8-4: رابطه بین Swir و RQI در واحد جریان هیدرولیکی 2



شکل 9-4: رابطه بین Swir و RQI در واحد جریان هیدرولیکی 3

همان طوری که مشاهده می شود ارتباط اشباع آب غیر قابل استحصال با شاخص کیفیت مخزنی در هر واحد جریان هیدرولیکی تطابق خوبی را دارند بطوریکه مقدار ضریب تعیین بین اشباع آب غیر قابل استحصال و شاخص کیفیت مخزن در واحدهای جریان هیدرولیکی به ترتیب اعداد 0/87، 0/98 و 0/97 می باشد.

بنابراین با طبقه بندی داده ها با استفاده از مفهوم واحد های جریان هیدرولیکی و رسم نمودار RQI بر حسب $Swir$ در هر واحد جریان هیدرولیکی می توان همبستگی این دو پارامتر را به خوبی مشاهده نموده و روابطی با دقت بالا بین پارامتر های مذکور بدست آورد. روابط ارائه شده را می توان در پیش بینی مسقیم و سریع میزان اشباع آب غیر قابل استحصال در هر نقطه از چاه در صورت داشتن K ، \emptyset و تعیین شاخص کیفیت مخزنی مورد استفاده قرار داد. بدین ترتیب که در نقاطی از چاه که K ، \emptyset و در نهایت RQI آن در اختیار است با استفاده از نمودار لگاریتمی شاخص کیفیت مخزن در مقابل نسبت پوکی (شکل 4-4) بررسی می کنیم که خصوصیات نقطه عمقی مورد مطالعه به کدام یک از واحدهای جریان هیدرولیکی نزدیک تر است. در نهایت از رابطه موجود بین $Swir$ و RQI برای آن واحد جریان هیدرولیکی استفاده نموده و اشباع آب غیر قابل استحصال را برای آن نقطه از چاه را محاسبه می نماییم.

4-2-4- محاسبه اشباع آب نرمال شده

پس از محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال با استفاده از فرمول 2-47 اشباع آب نرمال شده برای یکایک نمونه ها در مقادیر مختلف فشار موئینه محاسبه می گردد. در جدول 4-8 مقادیر محاسبه شده Sw^* برای نمونه شماره 9 آورده شده است.

جدول 4-8- مقادیر S_w^* در فشار های موئینگی مختلف برای نمونه شماره 9

شماره نمونه	فشار موئینگی (psia)	اشباع جیوه (%)	اشباع آب S_w (%)	اشباع آب نرمال شده S_w^*
9	0.52	0.00	100.00	1.00
9	1.07	3.60	96.40	0.96
9	2.07	5.58	94.42	0.94
9	3.07	7.63	92.37	0.92
9	4.06	9.17	90.83	0.90
9	5.06	10.34	89.66	0.89
9	6.06	11.74	88.26	0.88
9	7.06	12.77	87.23	0.87
9	8.05	13.43	86.57	0.86
9	9.05	14.23	85.77	0.85
9	10.04	14.97	85.03	0.84
9	12.74	16.43	83.57	0.83
9	26.52	23.26	76.74	0.76
9	36.51	25.97	74.03	0.73
9	60.70	30.15	69.85	0.69
9	80.76	34.34	65.66	0.64
9	90.30	37.27	62.73	0.61
9	99.99	40.72	59.28	0.58
9	124.66	46.07	53.93	0.52
9	149.67	52.75	47.25	0.45
9	175.01	59.21	40.79	0.38
9	199.42	64.64	35.36	0.33
9	249.54	74.25	25.75	0.23
9	299.05	80.70	19.30	0.16
9	350.00	85.25	14.75	0.11
9	399.05	88.33	11.67	0.08
9	452.22	90.90	9.10	0.06
9	499.01	92.30	7.70	0.04
9	753.57	95.45	4.55	0.01

4-2-5- بدست آوردن رابطه ای بین Sw^* و تابع لورت

همانطور که مشاهده شد مقادیر تابع لورت و اشباع آب نرمال شده (Sw^*) برای هر نمونه در فشارهای موئینگی مختلف محاسبه شد. واضح است که هر دو پارامتر مذکور تابعی از فشار موئینگی هستند، بنابراین رابطه‌ای بین مقادیر تابع لورت و اشباع آب غیر قابل استحصال در فشارهای موئینگی مختلف در هر نمونه وجود خواهد داشت. جدول 4-9 مقادیر تابع J و اشباع آب نرمال شده را در فشارهای موئینگی مختلف، برای نمونه شماره 9 نشان می‌دهد.

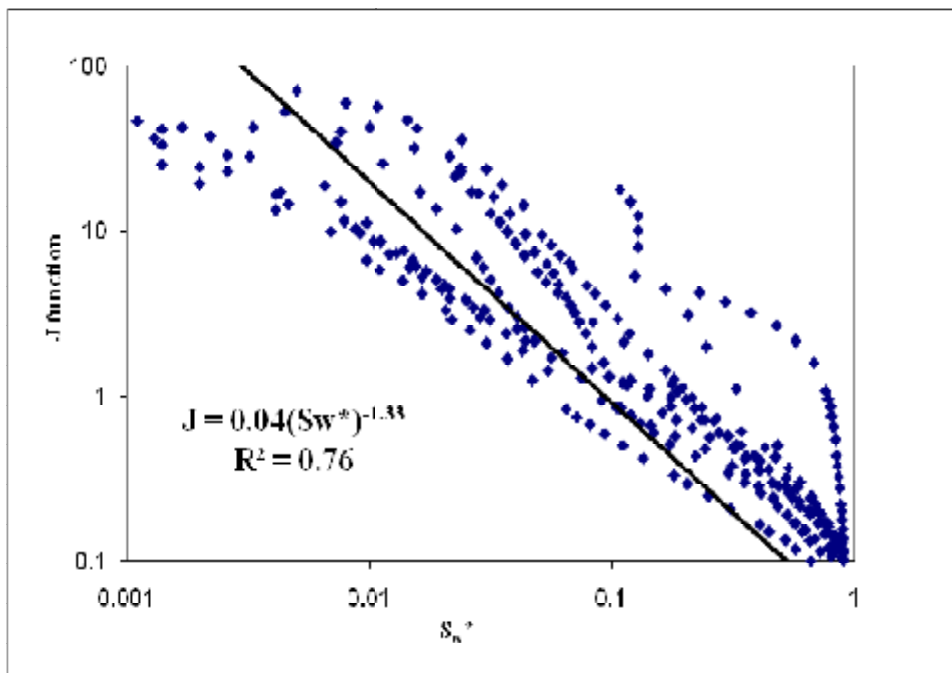
جدول 4-9: مقادیر تابع J و اشباع آب نرمال شده در فشارهای موئینگی مختلف برای نمونه شماره 9

شماره نمونه	فشار موئینگی (psia)	اشباع جیوه (%)	اشباع آب Sw (%)	اشباع آب نرمال شده Sw^*	تابع J
9	0.52	0.00	100.00	1.00	0.00
9	1.07	3.60	96.40	0.96	0.01
9	2.07	5.58	94.42	0.94	0.01
9	3.07	7.63	92.37	0.92	0.01
9	4.06	9.17	90.83	0.91	0.02
9	5.06	10.34	89.66	0.89	0.02
9	6.06	11.74	88.26	0.88	0.03
9	7.06	12.77	87.23	0.87	0.03
9	8.05	13.43	86.57	0.86	0.04
9	9.05	14.23	85.77	0.85	0.04
9	10.04	14.97	85.03	0.84	0.05
9	12.74	16.43	83.57	0.83	0.06
9	26.52	23.26	76.74	0.76	0.12
9	36.51	25.97	74.03	0.73	0.17
9	60.70	30.15	69.85	0.69	0.28
9	80.76	34.34	65.66	0.64	0.37
9	90.30	37.27	62.73	0.61	0.41
9	99.99	40.72	59.28	0.58	0.46
9	124.66	46.07	53.93	0.52	0.57
9	149.67	52.75	47.25	0.45	0.68
9	175.01	59.21	40.79	0.39	0.80
9	199.42	64.64	35.36	0.33	0.91
9	249.54	74.25	25.75	0.23	1.14
9	299.05	80.70	19.30	0.16	1.37

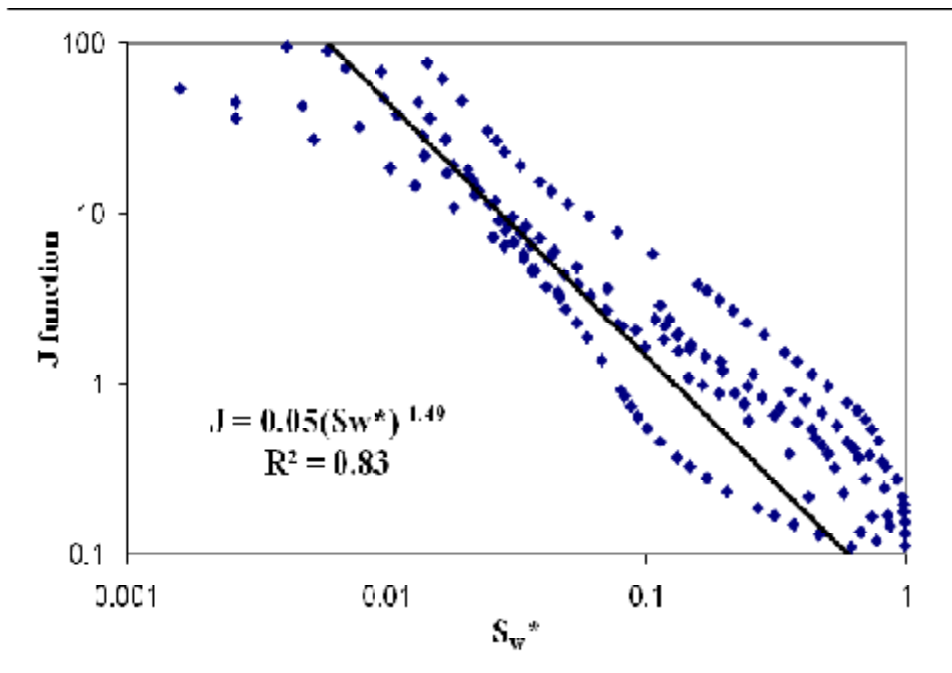
ادامه جدول 9-4

شماره نمونه	فشار موئینگی (psia)	اشباع جیوه (%)	اشباع آب . Sw (%)	اشباع آب نرمال شده Sw*	تابع لورت
9	350.00	85.25	14.75	0.11	1.60
9	399.05	88.33	11.67	0.08	1.82
9	452.22	90.90	9.10	0.06	2.06
9	499.01	92.30	7.70	0.04	2.28
9	753.57	95.45	4.55	0.01	3.44

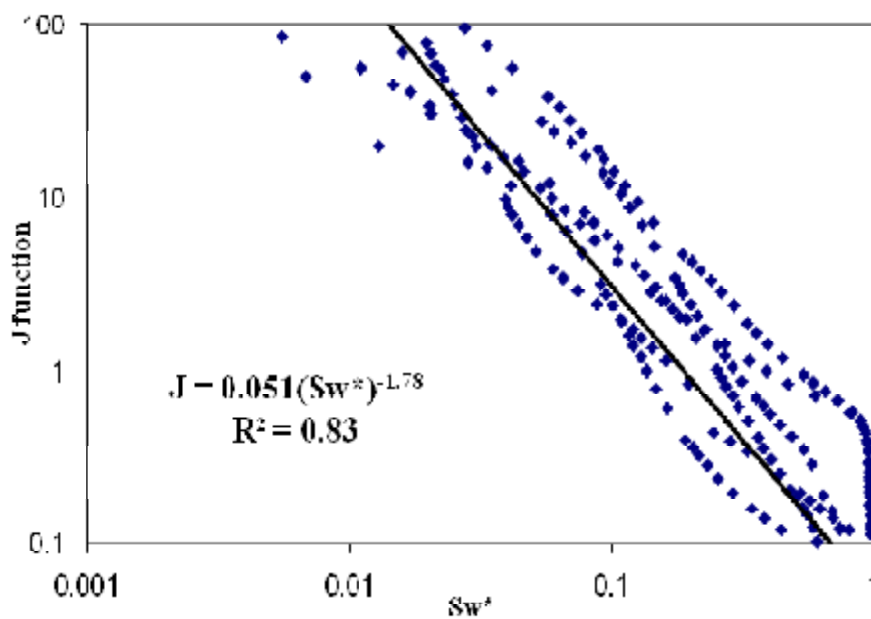
حال مقادیر تابع J را بر حسب اشباع آب نرمال شده نمونه های هر واحد جریان هیدرولیکی بطور مجزا بر روی یک نمودار لگاریتمی کامل رسم نموده تا معادله ای بین این دو پارامتر در هر واحد جریان هیدرولیکی بدست آید. نتایج در اشکال 10-4، 11-4 و 12-4 آورده شده است.



شکل 10-4: رابطه بین Sw* و تابع J برای واحد جریان هیدرولیکی شماره 1



شکل 4-11: رابطه بین S_w^* و تابع J برای واحد جریان هیدرولیکی شماره 2



شکل 4-12: رابطه بین S_w^* و تابع J برای واحد جریان هیدرولیکی شماره 3

مشاهده شد که برای هر واحد جریان هیدرولیکی معادله ای بین Sw^* و تابع J با ضریب تعیین بالا بدست آمد.

4-2-6- محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب

فشار موئینه تابعی از ارتفاع بالای سطح آب آزاد و تفاوت میان چگالی فاز تر (آب) و فاز غیر تر (هیدروکربور) است

همانطور که از فرمول 2-5 مشاهده می شود برای محاسبه فشار موئینه، داشتن مقادیر چگالی آب و هیدروکربور و همچنین ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب الزامی می باشد. سطح آب آزاد¹ تعیین شده برای چاه A بر اساس گزارش شرکت نفت و گاز پارس عمق 3261 متری از سطح زمین می باشد. همچنین مقادیر چگالی آب نمک 1/107 و چگالی گاز 0/26 در نظر گرفته شده است. بنابراین مقادیر فشار موئینه در نقاط مختلف چاه قابل محاسبه است (جدول 4-10).

توضیح آنکه نقاطی به عنوان نقاط ارتفاعی بالای سطح ایستابی آب در نظر گرفته شده اند، که در آنها داده های تخلخل و نفوذپذیری آزمایشگاهی موجود می باشند.

جدول 4-10: محاسبه فشار موئینگی در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب

عمق (m)	ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب FWL(m)	ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب FWL(ft)	فشار موئینه Pc(psi)
3200.54	60.46	198.31	72.58
3200.18	60.82	199.49	73.01
3199.91	61.09	200.38	73.34
3199.15	61.85	202.87	74.25
3195.57	65.43	214.61	78.55
3195.09	65.91	216.18	79.12
3194.84	66.16	217.00	79.42
3193.93	67.07	219.99	80.52
3193.10	67.90	222.71	81.51
3192.94	68.06	223.24	81.70

¹ . Free Water Level

ادامه جدول 10-4

عمق (m)	ارتفاع های بالای سطح ایستایی آب FWL(m)	ارتفاع های بالای سطح ایستایی آب FWL(ft)	فشار موئینه Pc(psi)
3192.66	68.34	224.16	82.04
3192.32	68.68	225.27	82.45
3192.11	68.89	225.96	82.70
3191.83	69.17	226.88	83.04
3191.48	69.52	228.03	83.46
3190.43	70.57	231.47	84.72
3190.10	70.90	232.55	85.11
3188.18	72.82	238.85	85.55
3186.51	74.49	244.33	87.42
3185.22	75.78	248.56	89.42
3184.89	76.11	249.64	90.97
3184.52	76.48	250.85	91.37
3183.74	77.26	253.41	91.81
3183.46	77.54	254.33	92.75
3183.16	77.84	255.32	93.09
3181.91	79.09	259.42	93.45
3181.63	79.37	260.33	94.95
3180.82	80.18	262.99	95.28
3179.42	81.58	267.58	96.25
3179.17	81.83	268.40	97.94
3178.57	82.43	270.37	98.24
3177.33	83.67	274.44	98.96
3176.91	84.09	275.82	100.44
3175.87	85.13	279.23	100.95
3175.15	85.85	281.59	102.20
3174.87	86.13	282.51	103.06
3173.46	87.54	287.13	103.40
3172.55	88.45	290.12	105.09
3171.41	89.59	293.86	106.18
3170.16	90.84	297.96	107.55
3169.86	91.14	298.94	109.05
3167.83	93.17	305.60	109.41
3166.89	94.11	308.68	111.85
3165.49	95.51	313.27	112.98
3164.10	96.90	317.83	114.66

ادامه جدول 10-4

عمق (m)	ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب FWL(m)	ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب FWL(ft)	فشار موئینه Pc(psi)
3163.22	97.78	320.72	116.33
3161.42	99.58	326.62	117.38
3159.00	102.00	334.56	119.54
3158.50	102.50	336.20	122.45
3157.93	103.07	338.07	123.05
3156.10	104.90	344.07	123.73
3154.80	106.20	348.34	125.93
3152.83	108.17	354.80	127.49
3152.19	108.81	356.90	129.86
3150.10	110.90	363.75	130.62
3189.74	71.26	233.73	133.13
3149.12	111.88	366.97	134.31
3147.50	113.50	372.28	136.25
3146.39	114.61	375.92	137.59
3146.13	114.87	376.77	137.90
3145.18	115.82	379.89	139.04
3143.40	117.60	385.73	141.18
3141.45	119.55	392.12	143.52
3140.78	120.22	394.32	144.32
3139.17	121.83	399.60	146.25

4-2-7- محاسبه تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب

در این مرحله می بایست تابع J برای نقاط بالای سطح ایستابی آب محاسبه گردد. بدین منظور از فرمول تابع لورت (2-34)، استفاده شده است.

در اینجا به معرفی ورودی های مورد نیاز تابع لورت می پردازیم:

الف) Pc: فشار موئینگی در شرایط مخزن که در مرحله پیشین محاسبه شده است.

ب) K و Ø: نفوذ پذیری و تخلخل آزمایشگاهی در تمامی نقاط ارتفاعی در نظر گرفته شده موجود می باشد.

ج) σ و θ : کشش سطحی و زاویه تماس سیستم های هیدروکربور/ آب شور در شرایط مخزن (جدول 4-1).

نتایج محاسبات تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در جدول 4-11 آورده شده است.

جدول 4-11: مقادیر تابع J برای هر ارتفاع بالای سطح بدون

عمق m	تخاقل Ø (%)	نفوذپذیری k (mD)	فشار موئینه □ Pc(psi)	تابع لورت (گاز/آب نمک)
3200.54	20.56	2.05	72.58	0.99
3200.18	20.25	0.94	73.01	0.68
3199.91	4.45	29.48	73.34	8.19
3199.15	6.81	18.09	74.25	5.25
3195.57	23.71	6.05	78.55	1.72
3195.09	7.52	15.26	79.12	4.89
3194.84	6.76	10.84	79.42	4.36
3193.93	23.03	33.91	80.52	4.24
3193.1	21.17	2.42	81.51	1.20
3192.94	16.88	2.11	81.70	1.25
3192.66	4.04	0.05	82.04	0.39
3192.32	14.39	0.31	82.45	0.52
3192.11	9.91	0.24	82.70	0.56
3191.83	0.27	0.05	83.04	1.60
3191.48	5.93	2.36	83.46	2.28
3190.43	4.43	0.07	84.72	0.46
3190.1	4.16	0.18	85.11	0.76
3188.18	10.47	0.41	85.55	0.74
3186.51	16.59	7.98	87.42	0.75
3185.22	2.33	12.69	89.42	2.69
3184.89	21.33	10.10	90.97	9.21
3184.52	10.35	2.76	91.37	2.73
3183.74	19.31	6.85	91.81	2.06
3183.46	18.15	1.42	92.75	2.40
3183.16	20.22	20.53	93.09	1.13
3181.91	27.07	1.08	93.45	4.09
3181.63	15.44	1.51	94.95	0.82
3180.82	24.52	1.42	95.28	1.29

ادامه جدول 11-4

عمق (m)	تخلخل Ø %	نفوذپذیری k (mD)	فشار موئینه Pc (psi)	تابع لورت (گاز/آب نمک)
3179.42	30.79	1.38	96.25	1.01
3179.17	27.82	0.28	97.94	0.90
3178.57	10.91	44.35	98.24	0.43
3177.33	15.00	6.33	98.96	8.66
3176.91	12.40	2.33	100.44	2.83
3175.87	20.12	4.08	100.95	1.90
3175.15	20.08	2.56	102.20	2.00
3174.87	20.12	4.43	103.06	1.60
3173.46	25.39	8.23	103.40	2.11
3172.55	27.09	2.50	105.09	2.60
3171.41	27.09	0.47	106.18	1.40
3170.16	24.98	6.52	107.55	0.61
3169.86	20.03	4.23	109.05	2.42
3167.83	18.27	8.50	109.41	2.18
3166.89	22.55	4.49	111.85	3.31
3165.49	18.03	2.88	112.98	2.19
3164.1	17.47	3.63	114.66	1.99
3163.22	18.81	1.87	116.33	2.30
3161.42	23.40	0.97	117.38	1.61
3159	22.06	1.29	119.54	1.06
3158.5	16.06	4.54	122.45	1.29
3157.93	23.37	10.96	123.05	2.84
3156.1	9.25	0.18	123.73	3.68
3154.8	18.52	3.27	125.93	0.77
3152.83	9.46	0.20	127.49	2.32
3152.19	11.22	0.38	129.86	0.82
3150.1	16.22	5.75	130.62	1.04
3189.74	12.80	0.50	133.13	3.44
3149.12	16.33	17.59	134.31	6.05
3147.5	11.48	34.61	136.25	10.27
3146.39	12.21	1.15	137.59	1.83
3146.13	9.36	0.96	137.90	1.92
3145.18	19.66	14.70	139.04	5.22
3143.4	15.68	7.98	141.18	4.37
3141.45	16.42	9.07	143.52	4.63
3140.78	11.84	19.21	144.32	7.98

ادامه جدول 11-4

عمق (m)	تخلخل \emptyset %	نفوذپذیری k (mD)	فشار موئینه Pc (psi)	تابع J (گاز/آب نمک)
3139.17	13.59	12.21	146.25	6.02

4-2-8- محاسبه مقادیر Sw^* برای هر ارتفاع بالای سطح ایستابی آب در مخزن

همانطور که مشاهده شد در مرحله 4-2-5 در هر واحد جریان هیدرولیکی رابطه ای بین تابع J و Sw^* بدست آمد که با استفاده از این روابط در صورت حضور هر یک از دو پارامتر (Sw^* یا تابع J)، پارامتر دیگر به راحتی قابل محاسبه می باشد. در اینجا پارامتر معلوم تابع J و مجهول Sw^* می باشد. حال می بایست مشخص شود که برای هر نقطه ارتفاعی از کدام یک از روابط موجود (سه رابطه به ازای تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی) استفاده شود. بدین منظور با استفاده از تخلخل و نفوذپذیری موجود برای نقاط ارتفاعی بالای سطح ایستابی آب، مقادیر RQI و \emptyset_z را محاسبه نموده، سپس مقادیر RQI و \emptyset_z آن نقطه را روی نمودار \emptyset_z -RQI (شکل 4-4) پیاده نموده و با توجه به دسته بندی صورت گرفته، بررسی می شود هر نقطه به کدام دسته نزدیک تر است. پس می توان گفت خصوصیات هر نقطه به کدام واحد جریان هیدرولیکی شبیه تر است، بنابراین رابطه ای که می بایست برای هر نقطه ارتفاعی بکار گرفته شود، با توجه به دسته بندی صورت گرفته بوسیله مفهومی واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص می شود.

نتایج محاسبات فوق در جدول 4-12 آورده شده است.

جدول 4-12: S_w^* محاسبه شده به ازای مقادیر J در ارتفاع های بالای سطح ایستابی آب

عمق (m)	شاخص کیفیت مخزن RQI	نسبت پوکی $\emptyset z$	واحد جریان هیدرولیکی	تابع لورت (گاز/آب نمک)	اشباع آب نرمال شده S_w^*
3200.54	0.10	0.26	1	0.99	0.09
3200.18	0.07	0.25	1	0.68	0.12
3199.91	0.81	0.05	3	8.19	0.06
3199.15	0.51	0.07	3	5.25	0.07
3195.57	0.16	0.31	1	1.72	0.06
3195.09	0.45	0.08	3	4.89	0.08
3194.84	0.40	0.07	3	4.36	0.08
3193.93	0.38	0.30	2	4.24	0.05
3193.1	0.11	0.27	1	1.20	0.08
3192.94	0.11	0.20	1	1.25	0.08
3192.66	0.03	0.04	2	0.39	0.24
3192.32	0.05	0.17	1	0.52	0.15
3192.11	0.05	0.11	1	0.56	0.14
3191.83	0.14	0.00	3	1.60	0.15
3191.48	0.20	0.06	3	2.28	0.12
3190.43	0.04	0.05	2	0.46	0.22
3190.1	0.06	0.04	2	0.76	0.15
3189.74	0.06	0.15	2	0.74	0.16
3188.18	0.06	0.12	1	0.75	0.11
3186.51	0.22	0.20	3	2.69	0.11
3185.22	0.73	0.02	2	9.21	0.03
3184.89	0.22	0.27	2	2.73	0.07
3184.52	0.16	0.12	2	2.06	0.08
3183.74	0.19	0.24	2	2.40	0.07
3183.46	0.09	0.22	1	1.13	0.08
3183.16	0.32	0.25	2	4.09	0.05
3181.91	0.06	0.37	1	0.82	0.11
3181.63	0.10	0.18	1	1.29	0.08
3180.82	0.08	0.32	1	1.01	0.09
3179.42	0.07	0.44	1	0.90	0.10
3179.17	0.03	0.39	1	0.43	0.17
3178.57	0.63	0.12	3	8.66	0.06
3177.33	0.20	0.18	2	2.83	0.06
3176.91	0.14	0.14	2	1.90	0.08
3175.87	0.14	0.25	1	2.00	0.05
3175.15	0.11	0.25	1	1.60	0.06

ادامه جدول 4-12

عمق (m)	شاخص کیفیت مخزن RQI	نسبت پوکی ϕ_z	واحد جریان هیدرولیکی	تابع J (گاز/آب نمک)	اشباع آب نرمال شده Sw*
3174.87	0.15	0.25	1	2.11	0.05
3173.46	0.18	0.34	1	2.60	0.04
3172.55	0.10	0.37	1	1.40	0.07
3171.41	0.04	0.37	1	0.61	0.13
3170.16	0.16	0.33	1	2.42	0.05
3169.86	0.14	0.25	1	2.18	0.05
3167.83	0.21	0.22	2	3.31	0.06
3166.89	0.14	0.29	1	2.19	0.05
3165.49	0.13	0.22	1	1.99	0.05
3164.1	0.14	0.21	1	2.30	0.05
3163.22	0.10	0.23	1	1.61	0.06
3161.42	0.06	0.31	1	1.06	0.09
3159	0.08	0.28	1	1.29	0.08
3158.5	0.17	0.19	2	2.84	0.06
3157.93	0.21	0.30	2	3.68	0.05
3156.1	0.04	0.10	1	0.77	0.11
3154.8	0.13	0.23	1	2.32	0.05
3152.83	0.05	0.10	1	0.82	0.11
3152.19	0.06	0.13	1	1.04	0.09
3150.1	0.19	0.19	2	3.44	0.06
3149.12	0.33	0.20	2	6.05	0.04
3147.5	0.55	0.13	1	10.27	0.02
3146.39	0.10	0.14	2	1.83	0.09
3146.13	0.10	0.10	2	1.92	0.08
3145.18	0.27	0.24	2	5.22	0.04
3143.4	0.22	0.19	2	4.37	0.05
3141.45	0.23	0.20	2	4.63	0.05
3140.78	0.40	0.13	3	7.98	0.06
3139.17	0.30	0.16	3	6.02	0.07

4-2-9- محاسبه مقادیر Sw برای هر نقطه ارتفاعی بالای سطح ایستابی آب مخزن

در این بخش هدف محاسبه مقادیر Sw مخزن در هر نقطه ارتفاعی بالای سطح ایستابی آب می باشد. برای این منظور همانطور که در فرمول زیر مشاهده می شود بایستی Sw^* و Sw_{ir} در اختیار باشد. بین Sw^* ، Sw_{ir} و Sw رابطه زیر برقرار می باشد [Core lab UK, 2002].

$$Sw = Sw^*(1 - Sw_{ir}) + Sw_{ir}$$

Sw^* = اشباع نرمال شده

Sw = اشباع آب

Sw_{ir} = اشباع آب غیر قابل استحصال

همانطور که مشاهده شد با طبقه بندی داده ها با استفاده از مفهوم واحد های جریان هیدرولیکی و رسم نمودار RQI بر حسب Sw_{ir} در هر واحد جریان هیدرولیکی می توان همبستگی این دو پارامتر را به خوبی مشاهده نموده و روابطی با دقت بالا بین پارامتر های مذکور بدست آورد. روابط ارائه شده را می توان در پیش بینی مسقیم و سریع میزان اشباع آب غیر قابل استحصال در هر نقطه از چاه در صورت داشتن K ، \emptyset و تعیین شاخص کیفیت مخزنی مورد استفاده قرار داد. بدین ترتیب که در نقاطی از چاه که K ، \emptyset و در نهایت RQI آن در اختیار است با استفاده از نمودار لگاریتمی شاخص کیفیت مخزن در مقابل نسبت پوکی (شکل 4-4) بررسی می کنیم که خصوصیات نقطه عمقی مورد مطالعه به کدام یک از واحد های جریان هیدرولیکی نزدیک تر است. در نهایت از رابطه موجود بین Sw_{ir} و RQI برای آن واحد جریان هیدرولیکی استفاده نموده و Sw_{ir} را برای آن نقطه از چاه محاسبه می نماییم. نتایج در جدول 4-13 آورده داده شده است.

جدول 4-13: Sw محاسبه شده برای مخزن

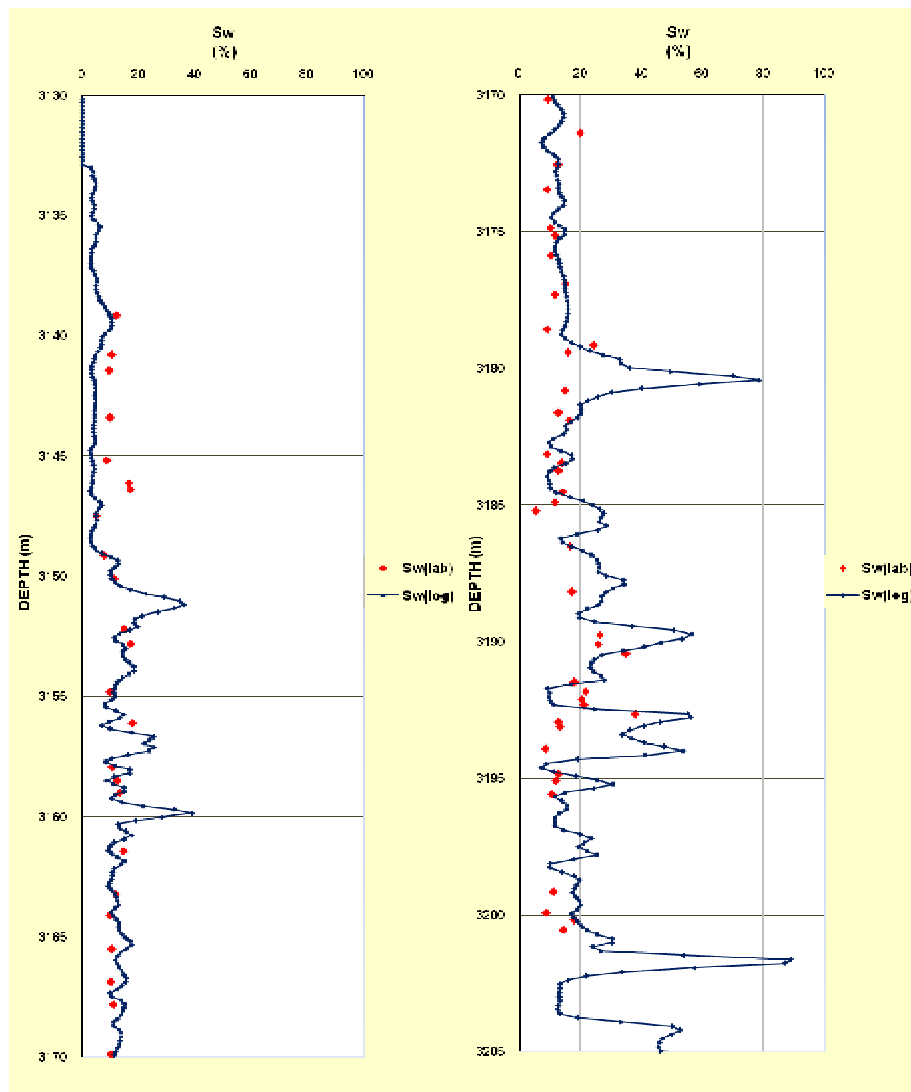
عمق (m)	شاخص کیفیت مخزن RQI	نسبت پوکی $\emptyset z$	واحد جریان هیدرولیکی	اشباع آب نرمال شده Sw*	اشباع آب Sw
3200.54	0.10	0.26	1	0.09	0.14
3200.18	0.07	0.25	1	0.12	0.17
3199.91	0.81	0.05	3	0.06	0.09
3199.15	0.51	0.07	3	0.07	0.11
3195.57	0.16	0.31	1	0.06	0.10
3195.09	0.45	0.08	3	0.07	0.12
3194.84	0.40	0.07	3	0.08	0.12
3193.93	0.38	0.30	2	0.05	0.08
3193.1	0.11	0.27	1	0.08	0.13
3192.94	0.11	0.20	1	0.07	0.12
3192.66	0.03	0.04	2	0.23	0.37
3192.32	0.05	0.17	1	0.14	0.20
3192.11	0.05	0.11	1	0.13	0.20
3191.83	0.14	0.00	3	0.14	0.21
3191.48	0.20	0.06	3	0.11	0.18
3190.43	0.04	0.05	2	0.21	0.34
3190.1	0.06	0.04	2	0.15	0.25
3189.74	0.06	0.15	2	0.15	0.26
3188.18	0.06	0.12	1	0.11	0.17
3186.51	0.22	0.20	3	0.10	0.16
3185.22	0.73	0.02	2	0.03	0.05
3184.89	0.22	0.27	2	0.06	0.11
3184.52	0.16	0.12	2	0.08	0.14
3183.74	0.19	0.24	2	0.07	0.12
3183.46	0.09	0.22	1	0.08	0.13
3183.16	0.32	0.25	2	0.05	0.09
3181.91	0.06	0.37	1	0.10	0.16
3181.63	0.10	0.18	1	0.07	0.12
3180.82	0.08	0.32	1	0.09	0.14
3179.42	0.07	0.44	1	0.09	0.15
3179.17	0.03	0.39	1	0.17	0.23
3178.57	0.63	0.12	3	0.05	0.09
3177.33	0.20	0.18	2	0.06	0.11

ادامه جدول 13-4

عمق (m)	شاخص کیفیت مخزن RQI	نسبت پوکی Øz	واحد جریان هیدرولیکی	اشباع آب نرمال شده Sw*	اشباع آب Sw
3176.91	0.14	0.14	2	0.08	0.15
3175.87	0.14	0.25	1	0.05	0.10
3175.15	0.11	0.25	1	0.06	0.11
3174.87	0.15	0.25	1	0.05	0.10
3173.46	0.18	0.34	1	0.04	0.09
3172.55	0.10	0.37	1	0.07	0.12
3171.41	0.04	0.37	1	0.13	0.19
3170.16	0.16	0.33	1	0.04	0.09
3169.86	0.14	0.25	1	0.05	0.10
3167.83	0.21	0.22	2	0.06	0.11
3166.89	0.14	0.29	1	0.05	0.10
3165.49	0.13	0.22	1	0.05	0.10
3164.1	0.14	0.21	1	0.05	0.10
3163.22	0.10	0.23	1	0.06	0.11
3161.42	0.06	0.31	1	0.08	0.14
3159	0.08	0.28	1	0.07	0.13
3158.5	0.17	0.19	2	0.06	0.12
3157.93	0.21	0.30	2	0.05	0.10
3156.1	0.04	0.10	1	0.11	0.17
3154.8	0.13	0.23	1	0.05	0.10
3152.83	0.05	0.10	1	0.10	0.17
3152.19	0.06	0.13	1	0.08	0.15
3150.1	0.19	0.19	2	0.05	0.11
3149.12	0.33	0.20	2	0.04	0.08
3147.5	0.55	0.13	1	0.02	0.05
3146.39	0.10	0.14	2	0.08	0.17
3146.13	0.10	0.10	2	0.08	0.16
3145.18	0.27	0.24	2	0.04	0.09
3143.4	0.22	0.19	2	0.05	0.10
3141.45	0.23	0.20	2	0.04	0.09
3140.78	0.40	0.13	3	0.06	0.10
3139.17	0.30	0.16	3	0.07	0.12

4-2-10- مقایسه مقادیر S_w محاسبه شده، با مقادیر S_w حاصل از لاگ چاه پیمایی

در این مرحله هدف مقایسه مقادیر اشباع آب بدست آمده از این روش، با مقادیر S_w حاصل شده از داده‌های چاه پیمایی می باشد. برای آنکه بتوانیم این دو دسته مقادیر S_w را با یکدیگر مقایسه نماییم، بایستی یک نقطه عمقی مشترک مشخص شود. از آنجایی مبنای ارتفاعی در نظر گرفته شده برای محاسبه اشباع آب در روش مورد مطالعه سطح آزاد آب (FWL) است، پس بهتر است نقطه مبنا برای مقایسه مقادیر اشباع آب حاصل از داده های چاه پیمایی و داده های آزمایشگاهی نیز همین نقطه (FWL=3261 متری) در نظر گرفته شود.



شکل 4-13: مقایسه اشباع های آب بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و داده های چاه پیمایی

همانطوریکه در شکل 4-13 مشاهده می‌شود بین مقادیر اشباع‌های آب بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و داده های چاه پیمایی تطابق نسبتاً خوبی وجود دارد. میزان خطای RMS (جزر میانگین مربع خطاها) مقادیر اشباع آب بدست آمده از نگارهای چاه‌پیمایی نسبت به مقادیر اشباع آب بدست آمده از داده‌های مغزه، در 64 نقطه از چاه در فاصله عمقی 3130-3205 عدد 10/4 می باشد. با وجود این در بعضی نقاط بین نتایج دو روش اختلافاتی وجود دارد که این مسئله احتمالاً به علت حضور درصد متفات شیل در بخش های مختلف می باشد.

بررسی درصد شیل در عمق‌هایی که بین اشباع آب بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و اشباع آب بدست آمده از نگار چاه، نسبت به سایر نقاط اختلاف بیشتری وجود دارد، نشان می‌دهد که در این نقاط درصد شیل نسبت به سایر نقاط بیشتر است، بنابراین می توان گفت این اختلاف ناشی از خطای حاصل از حضور شیل می باشد. از آنجایی که داده‌های مورد استفاده به منظور محاسبه اشباع شدگی آب با استفاده از روش مورد مطالعه، داده‌های حاصل از آزمایشات مغزه بوده است، و حضور شیل تاثیری در نتایج این آزمایشات ندارد، می‌توان گفت مقادیر اشباع آب بدست آمده از این روش، دقیق‌تر و قابل اعتمادتر می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به منظور محاسبه اشباع شدگی آب در مخازن هیدروکربوری می‌توان از روش مورد مطالعه استفاده نمود.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

5-1- جمع بندی نتایج

همانطور که در فصول گذشته اشاره شد اشباع شدگی آب و همچنین اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir) دو پارامتر بسیار مهم در مخازن هیدرو کربوری می باشند که در بسیاری از محاسبات و مدلسازی‌های مطالعات مخزن نقش مؤثری ایفاء می کنند. هدف از این پایان نامه محاسبه اشباع شدگی آب در نقاط مختلف چاه های مخازن هیدروکربوری با استفاده از داده های حاصل از آزمایشات مغزه بوده است که برای این هدف در اختیار داشتن مقادیر اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir) در نقاط مختلف چاه الزامی می باشد که این پارامتر بایستی محاسبه گردد. بنابراین نظر به اهمیت این دو پارامتر مجموعه نتایج حاصل شده در زمینه محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir) و محاسبه اشباع شدگی آب (Sw) بوسیله داده‌های آزمایشگاهی در نقاط مختلف چاه مطرح و مورد بحث قرار می‌گیرد.

5-2- نتایج حاصل شده در زمینه محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir)

اشباع آب غیر قابل استحصال (Swir) یکی از مهمترین پارامترهای مخازن هیدروکربوری است که تعیین آن به روش‌های مختلفی نظیر آزمایشات چاه، استفاده از داده های چاه نگاری و آزمایش مغزه انجام می گیرد. دقیق ترین و البته پر هزینه ترین روش جهت تعیین این پارامتر مهم انجام آزمایش مغزه است. اما به علل مختلفی نظیر هزینه های بسیار بالا و یا عدم امکان تهیه مغزه در بعضی نقاط از چاه‌ها، نمی توان از این روش جهت تعیین این پارامتر در همه جا استفاده نمود. به همین دلیل در این مطالعه سعی شد از روشی دیگر برای تعیین Swir، با استفاده از سایر پارامترهای مخزن مثل تخلخل و نفوذپذیری در نقاط دیگر چاه استفاده شود. نتایج حاصل شده از این روش به قرار زیر می‌باشند.

- با طبقه بندی و مرتب نمودن داده ها بر حسب واحدهای جریان هیدرولیکی همبستگی قوی بین اشباع آب غیر قابل استحصال حاصل از آزمایشات فشار موئینگی و شاخص منطقه‌ای جریان در هر واحد جریان هیدرولیکی مشاهده شد.

- معادلات توانی به شکل $y=ax^b$ بهترین برازش را بین داده های اشباع آب باقی مانده و شاخص کیفیت مخزن دارد.
- متوسط ضریب تعیین بین داده های اشباع آب باقیمانده و شاخص کیفیت مخزن در واحد های جریان هیدرولیکی برابر 0/95 می باشد در حالیکه برای کل نمونه ها این مقدار برابر 0/72 است.
- روابط ارائه شده را می توان در پیش بینی مستقیم و سریع میزان اشباع غیر قابل استحصال در هر نقطه از چاه در صورت داشتن تراوایی ، تخلخل و تعیین شاخص کیفیت مخزنی مورد استفاده قرار داد.
- با توجه به اینکه اشباع آب غیر قابل استحصال یکی از مهمترین پارامترها در ارزیابی مخازن هیدروکربوری می باشد که تعیین مستقیم آن هزینه زیادی دارد، استفاده از روش ارائه شده می تواند در توصیف مخازن ارزش قابل توجهی داشته باشد.

3-5- نتایج حاصل شده در زمینه محاسبه اشباع شدگی آب (Sw)

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که می بایست با دقت بالا محاسبه شود، میزان اشباع شدگی آب است. روش های متداول برای این منظور، استفاده از داده های حاصل از نگارهای الکتریکی مختلف و بکارگیری روابط مربوطه می باشد، ولی روی دقت این روش در شرایط مختلف بحث است چرا که روابط در اصل برای مخازن ماسه سنگی تمیز ارائه شده است و برای مخازن شیل دار و کربناته با فرضیات و اصلاحاتی باید همراه باشد که اگر فرضیات درست نباشد، قطعاً از دقت کار کاسته خواهد شد.

در این پایان نامه با استفاده از روشی بهبود یافته با تلفیق داده های آزمایشگاهی فشار موئینگی به روش تزریق جیوه و طبقه بندی سنگ های کربناته با استفاده از مفهوم واحد های جریان هیدرولیکی

و همچنین استفاده از تابع لورت و ارتباط آن با اشباع آب نرمال شده، میزان اشباع شدگی آب در عمق‌های مختلف مخزن محاسبه شده و در پایان مقادیر اشباع شدگی آب حاصل شده از این روش را با مقادیر اشباع شدگی آب بدست آمده از تگاره‌های چاه پیمایی مقایسه شد که نتایج آن به شرح زیر می باشد.

- به منظور تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی از دو روش آنالیز هسیتوگرام و مجموع مربع خطاها استفاده شد که با استفاده از نرم افزار Matlab و آنالیز خوشه‌ای مقادیر FZI، سه واحد جریان هیدرولیکی برای کل داده‌ها بدست آمد.

- به کمک مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و تعریف شاخص کیفیت مخزن و نسبت پوکی و با داشتن تخلخل و نفوذپذیری هر نقطه از چاه تعیین شد که هر نقطه عمقی در کدام یک از واحد جریان هیدرولیکی قرار می گیرد.

- با طبقه بندی و مرتب نمودن داده ها بر حسب واحدهای جریان هیدرولیکی همبستگی قوی بین داده‌های اشباع آب نرمال شده و مقادیر تابع لورت در هر واحد جریان هیدرولیکی مشاهده شد بطوریکه ضریب تعیین بین داده های اشباع آب نرمال شده و مقادیر تابع لورت در واحد های جریان هیدرولیکی برابر $0/83$ ، $0/83$ و $0/76$ می باشد.

- از آنجایی که داده‌های مورد استفاده به منظور محاسبه اشباع شدگی آب، داده‌های حاصل از آزمایشات مغزه می باشد بنابراین می توان گفت مقادیر اشباع آب بدست آمده از این روش دقیق و قابل اعتماد می باشند.

- بررسی درصد شیل موجود در عمق‌هایی که در آن بین اشباع آب بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و اشباع آب بدست آمده از نگار چاه، نسبت به سایر نقاط اختلاف بیشتری وجود دارد، نشان می دهد که در این نقاط درصد شیل نسبت به سایر نقاط بیشتر است.

- در عمق‌هایی که درصد شیل دارای تغییرات زیاد می باشد، مقادیر اشباع آب حاصل از نگار چاه پیمایی نیز دارای نوسانات زیادی می باشند که این مطلب می تواند بیانگر خطای حاصل از حضور شیل در سازند باشد.
- خطای محاسبه شده بین اشباع آب بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و اشباع آب بدست آمده از نگار چاه در 64 نقطه عمقی، 10/4 می باشد.
- با حذف مقادیر اشباع 12 نقطه عمقی که در آن‌ها درصد شیل بالا می باشد، خطای RMS بین اشباع آب بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و اشباع آب بدست آمده از نگار چاه، به حدود 6/5 کاهش می یابد.
- روش مورد مطالعه اساسا به منظور محاسبه اشباع شدگی آب در مخازن هیدروکربوری از نوع ماسه سنگی ارائه شده است. یکی از اهداف پایان نامه بکارگیری و ارزیابی این روش در مخازن هیدروکربوری کربناته بوده است که نتایج بدست آمده نشان می دهد که از این روش می توان در مخازن کربناته نیز با دقت قابل قبولی استفاده نمود.
- ¹ در صورت در اختیار داشتن اطلاعات کافی برای تطابق عمق مغزه و نگارهای چاه پیمایی درصد خطای بین اشباع آب بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و اشباع آب بدست آمده از نگار چاه کمتر خواهد شد.
- از آنجایی که اکثر سازندهای کربناته دارای تغییرات گسترده ای در خواص پتروفیزیکی خود از جمله ناهمگنی ها و اندازه حفرات می باشند. تخمین اشباع آب از جمله مواردی است که تعیین آن در این نوع مخازن کاری بسیار پیچیده و دشوار به حساب می آید، که این روش می تواند در این زمینه کمک به سزایی داشته، و در صنعت نفت کشورمان کاربردی شود.

¹ . Depht matching

4-5- پیشنهادات

- چون روابط ارائه شده از داده‌های مغزه یک چاه نتیجه شده است، با توجه به ناهمگنی مخزن، پیشنهاد می‌شود این چنین روابط بر اساس اطلاعات چاه‌های بیشتری باشد، تا روابط ارائه شده در هر واحد هیدرولیکی معرف کاملی از مخزن باشد.
- پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش خطای حاصل از حضور شیل در محاسبه اشباع شدگی آب با استفاده از نگار مقاومت ویژه، از روش مورد مطالعه جهت محاسبه اشباع شدگی آب در زون‌های شیل دار استفاده گردد.
- در صورت استفاده از روش مورد مطالعه در چاه‌های دیگر، پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش درصد خطای احتمالی بین اشباع آب بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی و اشباع آب بدست آمده از نگار چاه، در صورت در اختیار داشتن اطلاعات کافی، تطابق عمق مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی انجام شود.
- اگر بتوان با استفاده از روش‌های آماری و هوشمند شاخص کیفیت مخزن را از نگار تخمین زد، محاسبه اشباع آب غیر قابل استحصال با استفاده از روش ارائه شده، می‌تواند به مراتب کاربردی تر گردد.

منابع

منابع فارسی

- رحیمی، م، 1381، "تعبیر و تفسیر لرزه ای ناحیه پارس جنوبی در افقهای آسماری، جهرم، سروک، داریان، فهلیان، سورمه، کنگان، نار و فراقون"، مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران.
- رضایی، محمدرضا، 1381، زمین شناسی نفت، انتشارات علوی
- رمضی، ح، 1377، چاه پیمایی، انتشارات صنم
- شرکت نفت و گاز پارس، 1386، گزارش داخلی شرکت ملی نفت ایران، شماره سیزدهم.
- کاظم زاده، ع، نبی بیدهدی، م، رضایی، م، 1387. "مطالعه مقاومت ویژه سازندی با استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته"، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد 34، شماره 1، صفحه 13-21.
- گزارش آزمایشات ویژه مغزه (SCAL) چاه A، (1384)، میدان پارس جنوبی، واحد پژوهش مغزه‌های نفتی، پژوهشگاه صنعت نفت.
- لطف پور م، آدابی م، صادقی ع و معلمی ع، (1384)، "بررسی محیط رسوبی و چینه شناسی سکانسی سازند دالان در ناحیه زاگرس"، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد 31، شماره 1، صفحات 199-228.

منابع لاتین

Archie, G.E., (1942), "The electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics", Trans. AIME, 146, 54-62.

Abbaszadeh M.R.J., Fujii H., Fujimoto F., (1996), "Permeability Prediction by Hydraulic Flow Units-Theory and Applications", SPE Formation Evaluation, 263-271.

Al-Ajmi F.A., Holditch S.A., (2000), "Permeability Estimation Using Hydraulic Flow Units in a Central Arabia Reservoir". SPE, Formation Evaluation, 63254.

Allen, D., Griffiths, R., Montaron, B., and Ramamoorthy, Raghu, (2009), "Improving Formation Evaluation and Reserves Estimation", Vol. 9, Middle East & Asia Reservoir Review.

Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D.G., and Kedan, D.k., (1993), "Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells", Presented at 68th Annual Technical Conference and Exhibition Houston, Tx SPE paper No. 26436.

Anderson, G., (1975), "Coring and Core Analysis Handbook". Petroleum Publ. Co., Tulsa, OK, 200 pp.

Berg, R.R., (1970), "Method for determining permeability from reservoir rock properties", Trans, GCAGS 20, 303.

Borai, A.M., (1985). "A New Correlation for Cementation Factor in Low-Porosity Carbonates", paper SPE 14401 presented at the 1985 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Sept., pp. 22-25.

Brock, J., (1986), "Applied Open-Hole Log Analysis", Gulf, Houston, 284 pp.

Carman, P. C., (1937), "Fluid flow through granular beds", Trans, AIChE, 15, 150-166.

Clavier, C, Coates, G. and Dumanoir, J., (1977), "Theoretical and Experimental Bases for The Dual Water Model for Interpretation of Shaly Sands", Paper SPE 6859, in 52nd Annual Technical Conference and Exhibition: Society of Professional Engineers.

De la Cruzl V, Spenos and yang, (1995), "Macroscopic capillary pressure".

Dewan, J.T., (1983), "Essentials of Modern Open-Hole Log Interpretation", PennWell Publ., Tulsa, OK 361 pp.

Fahad A. A., and Stephen A. H., (2000), "Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia Reservoir", SPE paper No. 63254, 787-799.

Fatt, I., (1957), "Effect of overburden and reservoir pressure on electrical logging formation factor", Am, Assoc, Pet. Geol. Bull. Vol.41, No.11, pp. 2456-2466.

Fertle, (1988), "Total organic carbon content determined from well logs", SPE Form. Eval. 15612, pp. 407–419.

Focke, J.W., and Munn, D., (1987), "Cementation exponents in Middle Eastern carbonate reservoirs", SPE paper No. 13735, SPE Formation Evaluation, 2, 155-167.

Fricke, H., (1931), "The electrical conductivity and capacity of disperse system", Physics 1, 106-115.

Fundamentals of reservoir rock properties and core analysis, Course note, Core lab UK, 2, 5-8 March (2002).

Garrouch A, (1999), "A Modified Leverett J-Function for the Dune and Yates Carbonate Fields", American Chemical Society.

Garrouch Ali, (1999), "A modified leverett J-function for the Dune and Yates carbonate fields"

Glanville, C.R., (1959), "Laboratory study indicates significant effect of pressure on resistivity of reservoir rock", J. Pet. Technol., pp. 20-26.

Glottin, G., Grad, J., Klein p., (1990), "Computation of drainage and imbibition capillary pressure curves from centrifuge experiment", SPE 20502.

Hassler G.L., and Brunner E., Shell Development Co, (2007), "Measurement of Capillary Pressures in Small Core Samples", SPE 945114.

Hearst, J., Nelson, P., and Paillet, F.L., (2000), "Well logging for physical properties", 2nd edition, John Wiley & sons Ltd, 106p.

Herron, M.N, (1986), "Mineralogy from geochemical well logging clay and clay minerals", 34,2, pp.204-213.

James V. White, Brenda L Kirkl., (1998), "Quantitative Porosity Determination of Thin Sections Using Digitized Images Journal of Sedimentary Research", Volume 68.

Jennings, J.J., (1987), "Capillary pressure techniques: application to exploration and development geology", AAPG Bulletin, v. 71 (10), p. 1196-1209.

Kashfi, M.S., (1999), "geology of Permian "super-giant" gas reservoir in the greater Persian Gulf area, Journal of petroleum geology, v.15, pp.465-480.

Keller, G.V., (1953), "Effect of wettability on the electrical resistivity of sands", Oil and Gas Journal., Vol.51, No.34, pp.62-68.

Manneth N.T, Mykkeltveit T., (2005), "Effect of Rock heterogeneities on capillary pressure and relative permeability", SPE 50571.

Maxwell, J. C., (1881), "A treatise on electricity and magnetism", Oxford University Press, Inc.,

Murphy, R.P. and Owens, W.W., (1972), "A New approach for low resistivity sand log analysis", JPT, p. 1302-1306.

Patnode, W. H. and Wyllie, M. R. J., (1950), "The presence of conductive solids in reservoir rocks as factor in electric log interpretation", Pet. Trans. AIME, 189, 47–52.

Prasad M. (2003), "Velocity–Permeability relation within hydraulic units". Geophysics, 68: 108-117.

Rezaee, M.R., Motiei, H., Kazemzadeh, E., (2007), "A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 56, No. 4, P. 241–251.

Schlumberger, (1989), "Log Interpretation Principles/Application", Eight-Printing Feb 1999.

Sen, P. N., Straley, C., Kenyon, W. E., and Whittingham, M. S., (1990), "Surface- to volume ratio, charge density, nuclear magnetic relaxation, and permeability in clay-bearing sandstones", Geophysics, 55, 61-69.

Shamsuddin Sheawi, Jerry White, (2007) "permeability and water saturation distribution by lithological facies and hydraulic units", SPE105273.

Shedid A.S., Reyadh A.A. (2002), "A new approach of reservoir description of carbonate reservoirs", SPE, 74344: 1-10.

Svirsky, D., Ryazanov, A., Pankov, M., and Posysoev, A., (2004), "Hydraulic flow units resolve reservoir description challenges in a Siberian oil field", SPE paper No. 87056, 1-15.

Sweeney, S. A., and Jennings, H. V., (1960), "Effect of wettability on electrical resistivity of carbonate rock from petroleum reservoir", J. Phys. Chem, 64, 551-553.

Tiab, D., and Donaldson, E.C., (2004), "Petrophysics, Theory and practice of measuring reservoir rocks and fluid transport properties", Gulf Pub, Houston, TX, 706.

Vavra, C. L., Kaldi, J. G. and Sneider, R. M. (1992). "Geological Applications of Capillary Pressure: A Review". American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 76, 840-850.

Washburn E. W., (1921), "The dynamics of capillary flow", Phys. Rev., 17 273 – 283.

Washburn, E. W., (1921), "Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material", Proceedings of the National Academy of Science, v. 7, p. 115-116.

Waxman, M. H. and Smits, L. J. M., (1968), "Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands", J. Soc. Pet. Eng., 8, 107–122.

Waxman, M.H. and Smits, L.J.M., (1968), "Electrical Conductivity in Oil Bearing Shaly Sands: Society of Petroleum Engineers Journal", June, p. 107-122.

Winsauer, W. O., and McCardell, W. M., (1953), "Ionic double-layer conductivity in reservoir rock", Pet. Trans. AIME, 98, 129–134.

Winsauer, W. O., Shearin, H. M., Masson, P. H., and Williams, M., (1952) "Resistivity of Brine Saturated Sands in Relation to Pore Geometry", AAPG, February.

Wyble, D.O., (1958), "Effect of applied pressure on the conductivity, porosity and permeability of sandstones", J. Pet. Technol., Vol.10, pp.57-59.

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 Electric Log Data", Trans. AIME, Vol. 189, pp. 105-118.

Wyllie, M. R. J., Gregory, A. R., and Gardner, L. W., (1956), "Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media", Geophysics, 21, 41-70.

Zemanek, J. (1989), "Low-Resistivity Hydrocarbon-Bearing Sand Reservoirs", SPEFE, Dec., pp. 515-521.

پیوست

پیوست الف

چگونگی محاسبه تخلخل به کمک نگارهای

نوترون، چگالی و صوتی

الف-1- اندازه گیری تخلخل با استفاده از نگار نوترون

این روش، به دو صورت نوترون-نوترون و نوترون-گاما انجام می شود. اساس این روش، بمباران دیواره چاه توسط نوترون های سریع و پر انرژی است. نوترون ها در طول مسیر با هسته مواد مختلف برخورد کرده و انرژی شان کاسته و تبدیل به نوترون ترمال شده و توسط گیرنده هایی اندازه گیری می شوند (روش نوترون-نوترون) و یا در اثر این برخورد و وجود هیدروژن زیاد در سازند، نوترون ترمال جذب شده و ذرات سازند از خود پرتو گاما ساطع می کنند و گیرنده ها میزان پرتو گاما را اندازه گیری می کنند (روش نوترون-گاما). در این روش، یک چشمه تولید نوترون همراه یک گیرنده، در ابزار نگارگری جاسازی شده و به داخل چاه فرستاده می شود. سازوکار برخورد نوترون با هسته مواد، بستگی به تراکم جرمی مواد و نزدیکی جرم اتمی آنها با جرم اتمی نوترون دارد. هر چه اختلاف جرم اتمی مواد با جرم اتمی نوترون بیشتر باشد، برخورد الاستیک تر است و کمتر از انرژی نوترون کاسته می شود. بنابراین نوترون می تواند مسیر بیشتری را درون سازند سپری کند. هیدروژن، جرم اتمی خیلی نزدیکی با نوترون دارد، به همین دلیل، در اثر این برخورد، انرژی بیشتری از نوترون از بین می رود و نوترون ها تندتر انرژی خود را از دست می دهند [رمضی، 1377]. هیدروژن، هم در آب و هم در هیدروکربن ها وجود دارد و فضاهای خالی را اشغال می کند. به همین دلیل می توان از نگار نوترون، جهت تعیین تخلخل استفاده کرد. مقایسه نگار نوترون با نگارهای دیگر تخلخل، اطلاعات بسیار مفیدی در مورد نوع هیدروکربور سازند، در اختیار ما قرار می دهد. گاز، برخلاف روش صوتی، بر روی روش نوترون تأثیر قابل ملاحظه ای دارد، بنابراین با مقایسه این نگارها، می توان سازندهای گازدار را شناسایی کرد. با توجه به اینکه ابزار نگار نوترون، نسبت به آهک کالیبره شده است، در سازندهای تمیز، چنانچه لیتولوژی آهک باشد، مقادیر بدست آمده از نگار نوترون، مستقیماً تخلخل را می دهند. چنانچه خمیره (ماتریکس) سنگ از آهک نباشد، مقادیر تخلخل، بایستی نسبت به خمیره تصحیح شوند. در

سازندهای تمیز با استفاده از شکل (الف-1)، تصحیح خمیره مربوط به نگارهای نوترون جبرانی¹ و جدارهای² انجام می‌گیرد. علاوه بر آن، با استفاده از رابطه زیر نیز می‌توان تخلخل تصحیح شده را بدست آورد [Schlumberger,1989]:

$$\emptyset = \frac{\emptyset_N - \emptyset_{Nma}}{\emptyset_{Nf} - \emptyset_{Nma}} \quad \text{(الف-1)}$$

که در آن:

\emptyset_N : تخلخل نگار نوترون

\emptyset_{Nma} : تخلخل نوترون مربوط به خمیره

\emptyset_{Nf} : تخلخل نوترون سیال سازند می‌باشد.

در جدول (الف-1) مقادیر \emptyset_{Nma} ، برای کانی‌های مختلف آمده است. همچنین با کمک رابطه زیر نیز می‌توان تخلخل نوترون تصحیح شده را بدست آورد [Schlumberger,1989]:

$$\emptyset_{Ncorr} = \emptyset_{Nlst} + \Delta_{environment} + \Delta_{matrix} \quad \text{(الف-2)}$$

که در آن:

\emptyset_{Nlst} : تخلخل مربوط به نگار نوترون است که با خمیره آهکی کالیبره شده است.

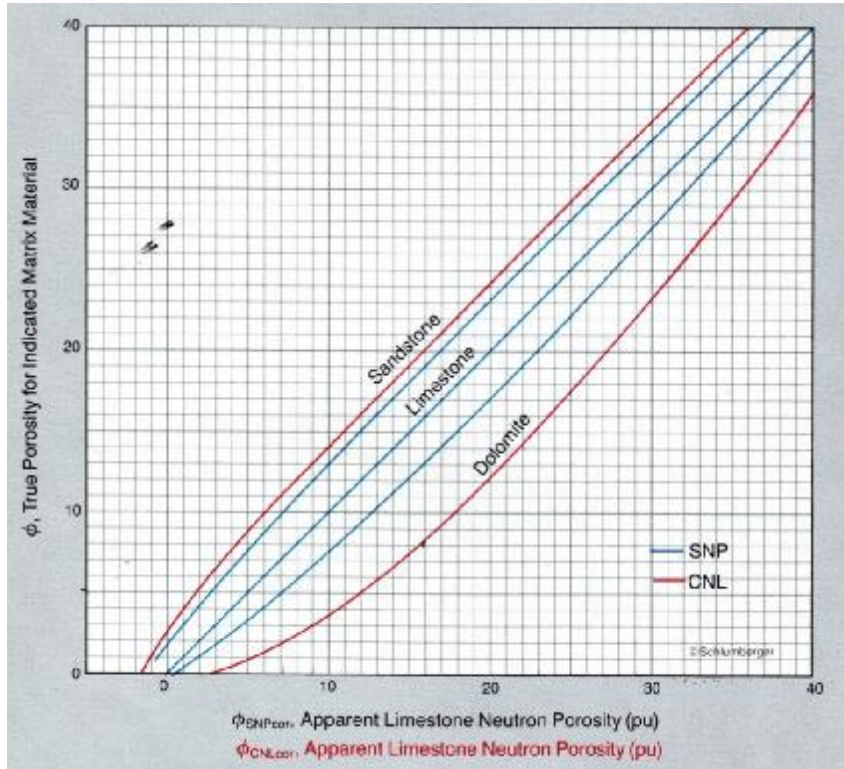
$\Delta_{environment}$: تصحیح محیطی

و Δ_{matrix} : تصحیح مربوط به تصحیح خمیره می‌باشد.

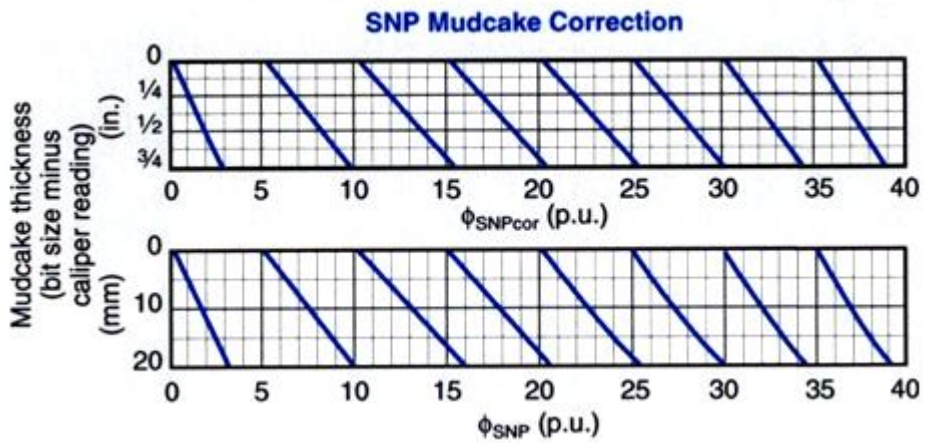
ابزار CNL به گونه‌ای طراحی شده است که، تأثیر عوامل محیطی به حداقل برسد. تصحیحات محیطی مربوط به نگار SNP، شامل شوری گل سازند، چگالی گل، قطر چاه و دما، خود به خود انجام می‌گیرد. اما تصحیح مربوط به اندود گل، با استفاده از شکل (الف-2) صورت می‌پذیرد.

¹ . Compensated Neutron Log ,CNL

² . Sidewall epithermal Neutron Porosity, SNP



شکل (الف-1): نمودار تصحیح ماتریکس بر روی تخلخل نوترون [Schlumberger,1989]



شکل (الف-2): نمودار تصحیح ضخامت سله گل بر روی تخلخل نوترون [Schlumberger,1989]

الف-2- اندازه گیری تخلخل به وسیله نگار چگالی (گاما- گاما)

در این روش، یک چشمه پرتو گاما همراه یک گیرنده، درون ابزار نگارگیری جاسازی شده است و پرتوهای گاما را به داخل سازند می فرستد. در اثر برخورد پرتو گاما با هسته مواد، انرژی آن کاسته شده و سپس توسط گیرنده جذب می شود. میزان جذب پرتوهای گاما به وسیله گیرنده، بستگی به تراکم مواد بین گیرنده و فرستنده، یعنی سازند زمین شناسی و سیال دارد. هر چه تراکم بیشتر باشد، پرتوهای گاما زودتر انرژی خود را از دست داده و کمتر به گیرنده می رسند و در تراکم کمتر، این پرتوها سریع تر و بیشتر به گیرنده می رسند. بنابراین از این روش، می توان برای برآورد جرم مخصوص و تخلخل استفاده نمود. باید توجه داشت که اگر نگار، میزان پرتوهای گاما را نشان دهد، گاما-گاما نامیده می شود و اگر میزان پرتوهای دریافتی، پردازش و بر اساس، آن جرم مخصوص محاسبه شود، نگار جرم مخصوص رسم خواهد شد و نگار جرم مخصوص $(g-g-D.L)$ نامیده می شود. باید توجه داشت که، جهت تغییرات این دو نگار خلاف یکدیگر است چون هر چه جرم مخصوص بیشتر باشد، میزان پرتوهای رسیده به دستگاه، کمتر خواهد بود.

در مخازن تمیز، با استفاده از داده های نگار چگالی با کمک شکل (الف-3) و یا با کمک رابطه (الف-3) می توان مقدار تخلخل را بدست آورد [Schlumberger,1989]:

$$f_D = \frac{r_{ma} - r_b}{r_{ma} - r_f} \quad \text{(الف-3)}$$

که در آن:

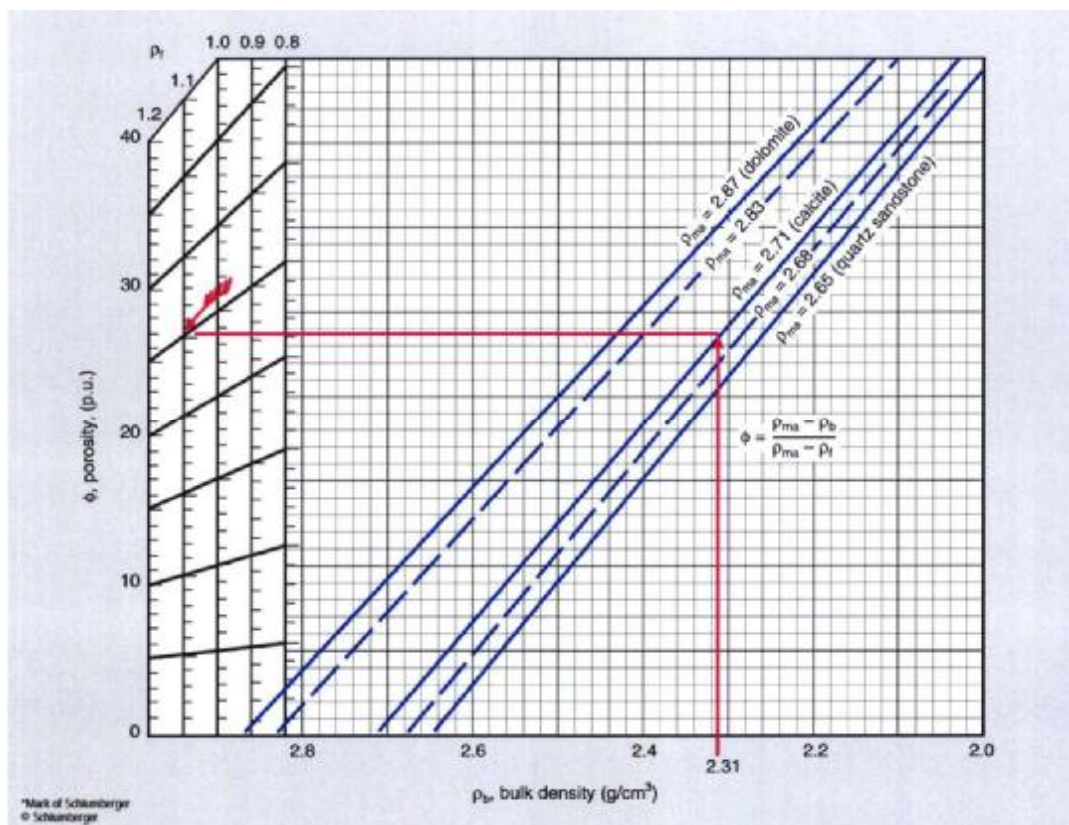
\emptyset_D : تخلخل حاصل از نگار چگالی

ρ_{ma} : چگالی خمیره

ρ_b : چگالی مربوط به نگار جرم مخصوص (دانسیته)

و ρ_f : چگالی سیال می باشد.

در جدول (الف-1) مقادیر چگالی خمیره برای کانی های مختلف آمده است.



شکل (الف-3): نمودار تعیین تخلخل از روی نگار چگالی [Schlumberger, 1989]

جدول (الف-1): مقادیر چگالی، زمان عبور صوت و نوترون برای کانی‌های مختلف [Hearst et al, 2000]

Mineral		γ -Ray API	Density (g/cm ³)	Acoustic (μ s/ft)	Neutron limestone
Calcite	CaCO ₃	0	2.71	46-49	0.0
Dolomite	CaCO ₃ MgCO ₃	0	2.87	41-44	0.04
Magnesite	MgCO ₃	0	2.96	—	- 0.016
Siderite	FeCO ₃	0	3.96	44-47	0.129
Halite	NaCl	0	2.16	67	- 0.018
Sylvite	KCl	747	1.98	74	- 0.041
Carnallite	KMgCl ₃ ·6H ₂ O	200	1.60	78	0.584
Trona	Na ₂ CO ₃ NaHCO ₃ ·2H ₂ O	0	2.12	65	0.549
Sulfur	S	0	2.03	122	0.0
Anhydrite	CaSO ₄	0	2.96	52-55	- 0.07
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	0	2.32	52.5	0.576
Langbeinite	K ₂ SO ₄ Mg ₂ (SO ₄) ₂	268	2.83	52	0.002
Polyhalite	K ₂ SO ₄ MgSO ₄ (Ca(SO ₄)) ₂ ·2H ₂ O	185	2.78	57.5	0.216
Hematite	Fe ₂ O ₃	0	5.25	71-79	0.126
Ilmenite	FeTiO ₃	0	4.50	—	0.098
Magnetite	Fe ₃ O ₄	0	5.18	73	0.112
Goethite	HFeO ₂	0	4.25	—	> 0.6

الف-3- اندازه گیری تخلخل با استفاده از نگار صوتی¹

در روش های لرزه ای و صوتی، از اختلاف سرعت امواج برای تمایز، جدایش و شناسایی سنگ ها استفاده می شود. چنانچه ترکیب کانی شناسی سنگ ثابت باشد، سرعت امواج به شدت تابع ساخت و بافت سنگ به ویژه تخلخل و میزان خردشدگی آن است. به همین علت، از روش های صوتی می توان برای برآورد تخلخل، درجه خردشدگی و ثابت های الاستیکی سنگ ها استفاده نمود. از طرف دیگر، ترکیب این نگار با نگار های دیگر، مانند نگارهای هسته ای، مقاومت ویژه الکتریکی و پتانسیل خودزا² می تواند به شناسایی نوع سنگ نیز کمک نماید.

در سازندهای تمیز، وایلی [Wyllie, 1956] رابطه خطی زیر را، جهت محاسبه تخلخل در سازندهای تمیز، ارائه داد:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{f}{V_f} - \frac{1-f}{V_{ma}} \quad \text{(الف-4) (معادله متوسط زمانی)³}$$

که در آن:

V_p : سرعت موج طولی در لایه مخزنی

V_f : سرعت موج در سیال

V_{ma} : سرعت موج در خمیره سنگ

اگر امواج فشاری را در نظر بگیریم، زمان گذر موج از واحد طول سازند (یک فوت)، برابر مجموع زمان گذر از قسمت جامد سنگ و قسمت سیال سنگ است [رمضی، 1377]:

$$\Delta T = \Delta T_f + \Delta T_{ma} \quad \text{(الف-5)}$$

که در آن:

ΔT : زمان گذر موج

ΔT_f : زمان گذر موج در سیال سازند

¹ . Sonic log

² . Self potential

³ . Wyllie time-average equation

ΔT_{ma} : زمان گذر موج در بخش جامد سنگ است.

اگر تخلخل را در سازند، برابر f در نظر بگیریم و زمان گذر کل را در واحد طول سازند، برآورد کنیم، زمانی که موج، بخشی از مسیر را در سیال سپری می کند، برابر است با:

$$\Delta T_f = f \times \Delta T_f \quad (\text{الف-6})$$

که در آن ΔT_f زمان گذر سیال نامیده می شود و زمان سپری شده در بخش جامد، برابر می شود با:

$$\Delta T_{mt} = \Delta T_{ma} (1 - f) \quad (\text{الف-7})$$

که در آن ΔT_{ma} زمان گذر موج از یکای طول بخش جامد سازند است که به اختصار، زمان گذر خمیره نامیده می شود.

با جایگزینی ΔT_f و ΔT_{ma} ، در رابطه الف-6 و با در نظر گرفتن اینکه زمان گذر را می توان از نگار تعیین نمود، داریم:

$$\Delta T_1 = f \times \Delta T_f + (1 - f) \times \Delta T_{ma} \quad (\text{الف-8})$$

که در آن ΔT_1 زمان گذر بدست آمده از نگار صوتی است.

با ساده کردن رابطه بالا، برای محاسبه تخلخل داریم [Schlumberger, 1989]:

$$f = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_{ma}}{\Delta T_f - \Delta T_{ma}} \quad (\text{الف-9})$$

معمولاً نوع سازند و سیال آن مشخص است و مقادیر ΔT_f و ΔT_{ma} ، تعیین شده و به دستگاه داده می شود. این رابطه برای سازندهایی که فقط از یک نوع سنگ تراوا تشکیل شده باشند، کاربرد دارد. اگر سازند فقط حاوی آب باشد، دقت تخلخل برآورد شده، افزایش می یابد، زیرا اثر ناحیه تراویده و آغشته در سازندهای آبدار، در مقایسه با سازندهای هیدروکربوردار، کاهش خواهد یافت. در صورتی که سازند، شرایط فوق را نداشته باشد، لازم است تخلخل محاسبه شده، اصلاح شود. عوامل مهمی که می توانند روی تخلخل محاسبه شده اثر گذار باشند، عبارتند از:

الف) وجود شیل در سازند

ب) عدم فشردگی سازند

ج) درزه ها و شکستگی ها

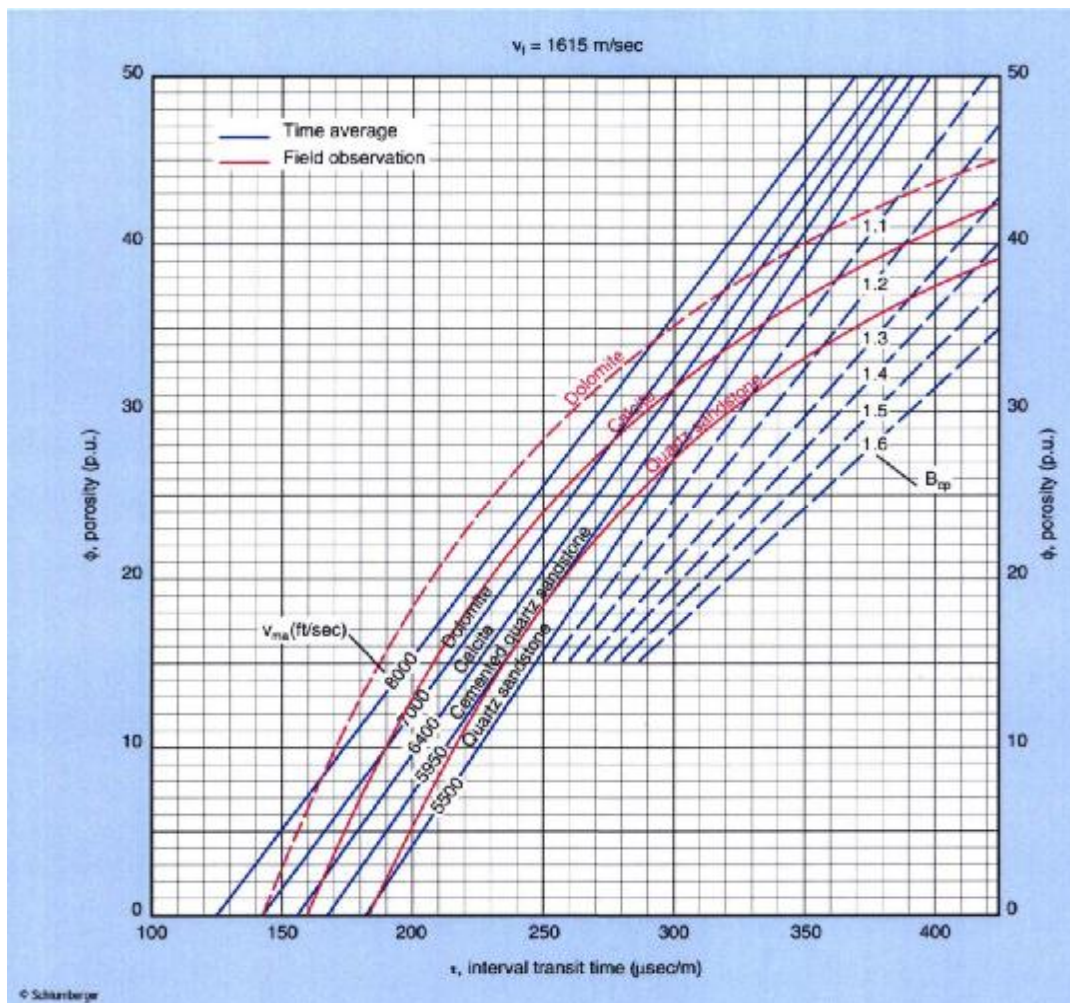
د) وجود گاز تحت فشار در سازند

علاوه بر استفاده از فرمول فوق با کمک شکل (الف-4) نیز می‌توان تخلخل حاصل از نگار صوتی را بدست آورد.

به طور کلی، عواملی از قبیل نوع لیتولوژی، تراکم سنگ، نوع سیال و نوع تخلخل، در مقدار زمان عبور صوت، مؤثر می‌باشند. در جدول (الف-1) زمان عبور صوت مربوط به کانی‌های مختلف، آمده است. در سنگ‌های حفره و یا شکاف دار، چنانچه حفره‌ها به خوبی بهم متصل نباشند و پراکنده باشند، موج صوتی، سریع‌ترین مسیر را انتخاب کرده و وارد حفره نمی‌شود، بلکه آن را دور می‌زند و زمان عبور، کمتر از زمان عبور مورد انتظار بوده و تخلخل محاسبه شده به وسیله معادله وایلی، کمتر از تخلخل مغزه می‌باشد. به همین دلیل، ابزار نگار صوتی، تخلخل ثانویه را نادیده می‌گیرد. بنابراین تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای را که اتصال خوبی نسبت بهم ندارند، در بر نمی‌گیرد.

جهت بدست آوردن میزان تخلخل ثانویه، کافی است تخلخل حاصل از نگار صوتی از تخلخل حاصل از نگار نوترون یا چگالی، کسر گردد. سیالات موجود در سازند، بر روی معادله وایلی تاثیر می‌گذارند. با توجه به این که نفت، از نظر چگالی، سبکتر از آب می‌باشد، سرعت صوت در نفت، می‌بایست کمتر از آب باشد که زیاد محسوس نمی‌باشد. اما اگر گاز به صورت محلول در آب باشد، اثر محسوس را بر سرعت صوت می‌گذارد. جهت تصحیح اثر نفت بر اساس روش تجربی، تخلخل، در عدد 9/ ضرب می‌شود. گاز از نظر چگالی، از نفت و آب سبکتر می‌باشد بنابراین سرعت صوت در آن، خیلی کمتر است. به صورت تجربی جهت تصحیح اثر گاز، تخلخل در عدد 7/ ضرب می‌شود [بروک¹، 1986].

¹ . Brock



شکل (الف-4): نمودار تعیین تخلخل از روی نگار صوتی [Schlumberger, 1989]

پیوست ب

نحوه آماده سازی نمونه و آزمایشات مغزه

ب-1- آماده سازی نمونه جهت انجام آزمایش

در این قسمت نحوه تهیه نمونه پلاگ، آماده کردن نمونه جهت انجام آزمایش توضیح داده می شود.

ب-1-1- تهیه نمونه پلاگ¹

پس از اینکه مغزه ها در جعبه های فایبرگلاس به صورت ایزوله شده به آزمایشگاه آورده می شود، هر مغزه یک متری به چهار قسمت بیست و پنج سانتی متری تقسیم می گردد که از هر 25 سانتی متر، 15 سانتی متر آن به تهیه پلاگ (پلاگ قائم و افقی نسبت به محور اصلی مغزه) اختصاص می یابد و 10 سانتی متر باقیمانده برای استفاده مطالعات زمین شناسی کنار گذاشته می شود.

انتخاب نمونه های مناسب جهت آزمایش، در مخازنی که ناهمگنی بالایی دارند بسیار مهم باشد.

ب-1-2- شستشوی نمونه های پلاگ

تمام پلاگ های انتخاب شده، توسط تولوئن و در حرارت بالا درون ظروف مخصوص شستشو داده می شوند. که بسته به تخلخل، تراوانی و نوع هیدروکربور موجود در آنها، زمان شستشو به طول می انجامد به طوریکه باید کاملاً از وجود همه سیالات، نمک ها، گل حفاری و مواد نفتی پاک شده و هیچ نفتی در آن ها باقی نماند.

ب-1-3- خشک کردن پلاگها

قبل از تعیین خواص پتروفیزیکی سنگ، لازم است نمونه ها خشک شوند که به این منظور نمونه های پلاگ به مدت 24 ساعت در آونی با 60 درجه سانتیگراد قرار داده می شوند.

ب-2- اندازه گیری تخلخل و تراوانی نمونه ها در آزمایشگاه

تخلخل یکی از دو پارامتر ضروری برای یک سنگ مخزن هیدروکربنی است و در تعیین حجم ذخیره، دارای اهمیت فراوانی می باشد. تراوانی نیز یکی از پارامترهای مهم پتروفیزیکی است که معمولاً از طریق اندازه گیری مستقیم کسب می شود. تراوانی مطلق نمونه های پلاگ نسبت به هوا در آزمایشگاه

¹. Plug

با استفاده از دستگاه تراوایی سنج¹ و CMS² اندازه‌گیری می‌شود که نحوه اندازه‌گیری در این فصل ارائه شده است. لازم به ذکر است که دانستن مقادیر تراوایی و تخلخل برای تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی ضروری می‌باشد.

ب-2-1- اندازه‌گیری تخلخل و وزن مخصوص دانه‌ای در آزمایشگاه

تخلخل و وزن مخصوص دانه‌ای نمونه‌های پلاگ توسط دستگاه تخلخل سنج³ اندازه‌گیری شدند. در این دستگاه حجم زمینه سنگ با تزریق هلیوم به نمونه و با استفاده از قانون بویل محاسبه گردیده و با دانستن حجم کل نمونه مقدار تخلخل و وزن مخصوص دانه‌ای سنگ محاسبه می‌شود.

ب-2-1-1- تکنیک قانون بویل

در روش قانون بویل برای اندازه‌گیری تخلخل، گاز متراکم نظیر هلیوم را به داخل منافذ وارد می‌کنند. هلیوم به دلیل کوچکی، به سرعت در منافذ ریز نفوذ می‌کند و به علت خنثی بودن، جذب دیواره و سطوح سنگ نمی‌شود (شکل ب-1).

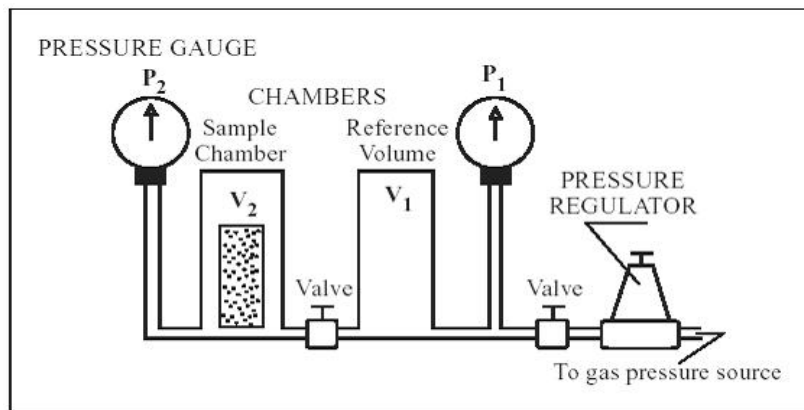
ب-2-1-2- حجم کل

حجم کل در آزمایشگاه مطالعه مغزه پژوهشگاه صنعت نفت از اندازه‌گیری طول و قطر یک نمونه مغزه و با استفاده از فرمول‌های مناسب ریاضی محاسبه می‌شود.

¹ . Ultraperm

² . Core Measurement System

³ . Ultraporosimeter 200



شکل ب-1: شکل شماتیک دستگاه اندازه گیری تخلخل با استفاده از گاز هلیوم [رضایی، 1381]

ب-2-1-3- حجم ذرات

اندازه گیری حجم ذرات با استفاده از قانون بویل بسیار راحت می باشد. یک نمونه تمیز و خشک در یک محفظه که حجم معین دارد گذاشته می شود. این محفظه از محفظه فشار بالا¹ مجزا شده است و در عین حال محفظه فشار بالا هم دارای حجم معین است. فشار محفظه فشار بالا تا حدود 100 psi رسانده می شود. پس از آن ارتباط دو محفظه باز می شود و گاز درون محفظه نمونه توسعه می یابد، لذا فشار اولیه کاهش می یابد. با توجه به مشخص بودن حجم دو محفظه، حجم ذرات را می توان با اندازه گیری فشار ثانویه و با استفاده از قانون بویل به دست آورد.

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (ب-1)$$

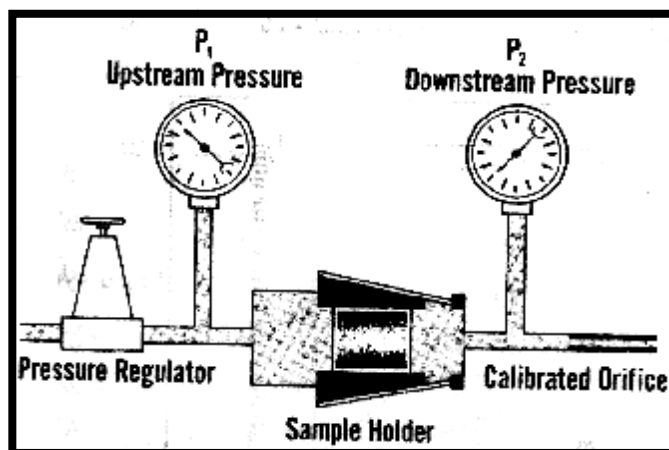
ب-2-1-4- حجم منافذ

حجم منافذ اغلب به صورت غیر مستقیم از اختلاف حجم کل و حجم ذرات به دست می آید که در آزمایشگاه مطالعه مغزه پژوهشگاه صنعت نفت، مقادیر حجم کل و حجم ذره اندازه گیری و محاسبه می شود و سپس از اختلاف حجم کل و حجم ذرات مقدار حجم منافذ (تخلخل) حاصل می شود.

¹. Upstream

ب-2-2- اندازه گیری تراوایی در آزمایشگاه

تراوایی مطلق نسبت به هوا توسط دستگاه Ultraperm اندازه گیری شده است. در این دستگاه با اندازه گیری مقدار جریان هوا از درون نمونه، اختلاف فشار دو سر نمونه، سطح مقطع و طول نمونه با استفاده از قانون داری تراوایی مطلق نمونه نسبت به هوا (K_a) محاسبه گردیده است (شکل ب-2).



شکل ب-2: تصویری که به طور شماتیک، دستگاه اندازه گیری تراوایی را نشان می دهد [رضایی، 1381].

برای تعیین تراوایی، از گاز خشک به عنوان یک سیال استاندارد استفاده می شود. زیرا این گاز، کمترین واکنش را با سنگ ها دارد و به راحتی قابل استفاده است. در هنگام اندازه گیری تراوایی در آزمایشگاه، هوا (گاز خشک) به داخل نمونه پلاگ با قطر و طول مشخص، خشک و تمیز تزریق شده و جریان می یابد. سپس اختلاف فشار و سرعت جریان اندازه گیری شده و تراوایی توسط معادله داری فرمول (2-4) محاسبه می گردد.

با اندازه گیری تراوایی نمونه های پلاگ افقی که به موازات سطوح لایه بندی گرفته شده اند، تراوایی افقی¹ و با اندازه گیری تراوایی نمونه های پلاگ عمودی که عمود بر سطوح لایه بندی گرفته شده اند تراوایی عمودی² محاسبه می شود.

¹ . Horizontal Permeability (K_h)

² . Vertical Permeability (K_v)

ب-3- اندازه گیری فشار موئینگی در آزمایشگاه

داده‌های فشار موئینه که در این تحقیق بکار گرفته شده، از روش تزریق جیوه بدست آمده است. توضیحات مربوط به این روش در فصل دوم آورده شده است.

Abstract

One of the most important parameters in hydrocarbon reservoir evaluation is water saturation, which commonly determines from electrical logs data and respective equations, but these methods conclude assumptions that are caused uncertainty in the results.

Whereas core data have high accuracy, the main target of this study is calculation of water saturation in different depths of reservoir, by using core data and improved method.

In this study, estimation of water saturation has been done by combination of capillary pressure data obtained by mercury injection and classification of carbonate rocks using hydraulic flow units, and relation between leverett function and normalized water saturation. Finally the calculated water saturation is compared with water saturation from log data. The results show that the presented method can be used for determination of water saturation in reservoir.

Also, the results show acceptable correlation between irreducible water saturation and reservoir quality index in differens hydraulic flow units, these relationships can be used for estimation of irreducible water saturation from porosity and permeability data in each part of well.



Shahrood University of technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

An improvement of water saturation calculation using well logs and laboratory data in carbonate hydrocarbon reservoirs

A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of
Master of Science
in Mining Exploration Engineering

By:
Yaser Salimi Delshad

Supervisores:
Dr. Ali Moradzade
Dr. Ezatallah Kazemzadeh

July 2010