





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی نفت-اکتشاف

ارائه روش های عددی-تحلیلی برای تخمین فشار منفذی در سازند گچساران

علی اصغر حیدری

اساتید راهنما

دکتر بهزاد تخم چی

دکتر سید رضا قوامی ریابی

اساتید مشاور

دکتر احمد رمضانزاده

دکتر مرتضی آزادپور

بهمن ماه ۱۳۹۹

شماره: ۱۴۰۴۲۰۶۹
تاریخ: ۱۳۰۲/۰۵/۱۴

باسمه تعالی



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

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای علی اصغر حیدری با شماره دانشجویی ۹۶۰۱۵۴ رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف تحت عنوان ارائه روش های عددی تحلیلی برای تخمین فشار منفذی در سازند گچساران که در تاریخ ۱۳۹۹/۱۱/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۸
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۶	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴/۹۹ - ۱۴
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد.	
نوع تحقیق: ☒ نظری ☐ عملی	

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر بهزاد نخمچی	دانشیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر سیدرضا قوامی ربابی	دانشیار	
۳- استاد مشاور	مهندس احمد رمضان زاده	دانشیار	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر یوسف شمیری	استادیار	
۵- استاد منتحن اول	دکتر علیرضا عرب امیری	دانشیار	
۶- استاد منتحن دوم	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد عطایی



تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم اثر

تقدیم به پدر بزرگوارم

که هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشق چشمانش سیراب می کند.

تقدیم به

مقدس ترین واژه ها در لغت نامه دلم، مادر مهربانم که زندگیم را مدیون مهر و عطف او می دانم.

تقدیم به اساتید دلسوزم

که آموختند مرا تا بیاموزم.

سپاس گزار کسانی هستم که سر آغاز تولد من هستند. از یکی زاده می شوم و از دیگری جاودانه.

استادی که سپیدی را بر تخته سیاه زندگیم نگاشت و مادری که تار مویی از او به پای من سیاه نماند.

شکر و قدردانی

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پژوهش را به پایان برسانم.
به رسم ادب و احترام بر خود لازم می‌دانم از یاری استادان و دوستانی که در تدوین و نگارش این تحقیق مرا یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم:

با تقدیر و تشکر شایسته از اساتید فرهیخته و فرزانه آقای دکتر بهزاد تخم‌چی و آقای دکتر سید رضا قوامی ریایی که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمودند و همواره راهنما و راهگشای اینجانب در اتمام و اکمال این پژوهش بوده‌اند.

از آقای دکتر احمد رمضان‌زاده که زحمت مشاوره این پایان‌نامه را بر عهده گرفتند و همچنین از آقای دکتر آزادپور که با راهنمایی‌های فراوان خود، تکمیل این پایان‌نامه را میسر نمودند، تشکر می‌نمایم.
از دوستان مهربانم برای راهنمایی‌های بی‌دریغشان که مرا در انجام این تحقیق یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

خدای را بسی شاکرم، پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه پر بار وجودشان
بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش
نمایم.

این تحقیق با همکاری و حمایت شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب انجام شده است. ضروری است تا از مدیریت محترم واحد پژوهش و فناوری این شرکت به دلیل هماهنگی‌های به عمل آمده در تصویب پروژه و در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

تهیه نامه

اینجانب علی اصغر حیدری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی نفت گرایش اکتشاف دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارائه روش های عددی-تحلیلی برای تخمین فشار منفذی در سازند گچساران تحت راهنمایی دکتر بهزاد تخم چی و دکتر سید رضا قوامی ریابی متعهد می شوم:

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

فشار منفذی به عنوان فشار سیال داخل حفرات سنگ شناخته می شود؛ که از پارامترهای مهم در مدل سازی ژئومکانیک است. دقت در پیش بینی فشار منفذی باعث می شود تا وزن گل بهینه و نقاط پاشنه لوله های جداری به درستی انتخاب شود. بنابراین، تخمین صحیح فشار منفذی ضمن افزایش ایمنی در جلوگیری از فروپاشی دیواره چاه، در بهینه سازی هزینه ها و حفاری اقتصادی نقش مؤثری دارد.

از جمله مهم ترین سازندهای مناطق نفت خیز جنوب ایران، سازند گچساران است؛ که به عنوان پوش سنگ سازند آسماری عمل می کند. به علت شرایط خاص ژئومکانیکی و سنگ شناسی، تخمین و تهیه مدل فشاری در آن همواره چالش آفرین بوده است.

در این تحقیق سعی بر آن است که با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی، اطلاعات زمین شناسی، سرعت VSP و پارامترهای حفاری در ۳ چاه میدان نفتی آغا جاری و مارون، مدل فشاری با استفاده از روابط گوناگون برای سازند گچساران ارائه شود. برای انجام این مهم، نخست با استفاده از داده های سرعت در مقابل چگالی مکانیسم ایجاد فشار بالا بررسی شد؛ که نتیجه امر بیانگر وجود تحکیم نامتوازن به عنوان مکانیسم اصلی ایجاد فشار بالا در میدان های مورد مطالعه می باشد. با توجه به مکانیسم شناسایی شده، از روش های تحلیلی ایتون و فرم ساده روش باورز و همچنین روش تخمین مبتنی بر پارامترهای حفاری ایتون محاسبه فشار منفذی انجام شد و نتایج حاصل از روش های فوق با وزن گل و شواهد و گزارش های حفاری اعتبارسنجی شد. در پایان نیز از زبان برنامه نویسی Matlab و کدهای مربوط به روش های ترکیب اطلاعات، برای ترکیب نتایج تخمین فشار به روش های مختلف، به منظور رسیدن به پاسخی مطلوب و قابل تعمیم، استفاده شد.

نتایج بررسی ها نشان داد روش ایتون در میدان مارون با ثابت نمایی $2/2$ و در میدان آغا جاری با ثابت نمایی $1/5$ قابل استفاده است. همچنین نتایج روش های ترکیب اطلاعات بیانگر برتری روش ایتون سپس روش پارامترهای حفاری ایتون و در آخر روش باورز در میدان مارون می باشد.

کلمات کلیدی: فشار منفذی، میدان آغاجاری، میدان مارون، سازند گچساران، روش ایتون، روش باورز،

روش پارامترهای حفاری ایتون، OWA، سوگنو و چوکویت

فهرست مطالب

۵	فهرست جداول
۹	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ مفاهیم.....
۶	۳-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق.....
۹	۴-۱ اهداف و نوآوری تحقیق.....
۱۱	۵-۱ روش انجام تحقیق.....
۱۲	۶-۱ ساختار پایان نامه.....
۱۳	فصل ۲: مبانی نظری
۱۴	۱-۲ مقدمه.....
۱۵	۲-۲ مکانیسم‌های ایجاد فشار منفذی.....
۱۶	۱-۲-۲ بارگذاری.....
۱۶	۲-۲-۲ افزایش حجم سیال.....
۱۸	۳-۲-۲ حرکت سیال.....
۲۱	۳-۲ روش‌های اندازه‌گیری فشار منفذی.....
۲۲	۱-۳-۲ روش‌های مستقیم.....
۲۴	۲-۳-۲ روش‌های غیرمستقیم.....
۲۸	۴-۲ جمع بندی.....

- ۳-۱ مقدمه..... ۳۰
- ۳-۲ اهمیت تخمین فشار منفذی..... ۳۰
- ۳-۳ زمینه‌های پژوهشی فشار منفذی..... ۳۱
- ۳-۳-۱ پیش‌بینی فشار منفذی براساس سرعت و نگار صوتی..... ۳۱
- ۳-۳-۲ پیش‌بینی فشار منفذی براساس سرعت لرزه‌ای..... ۳۵
- ۳-۳-۳ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از تخلخل..... ۳۶
- ۳-۳-۴ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از تراکم‌پذیری..... ۳۶
- ۳-۳-۵ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از پارامترهای حفاری..... ۳۷
- ۳-۴ اهمیت ترکیب اطلاعات..... ۳۸
- ۳-۵ زمینه‌های پژوهشی ترکیب اطلاعات..... ۳۹

فصل ۴: زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه و بررسی داده‌های موجود

- ۴-۱ مقدمه..... ۴۲
- ۴-۲ معرفی میدان‌های مورد مطالعه..... ۴۲
- ۴-۲-۱ ابعاد میدان..... ۴۳
- ۴-۲-۲ موقعیت چاه‌ها در میدان..... ۴۶
- ۴-۳ سازند گچساران..... ۴۷
- ۴-۳-۱ بخش ۱..... ۵۰
- ۴-۳-۲ بخش ۲..... ۵۰
- ۴-۳-۳ بخش ۳..... ۵۰
- ۴-۳-۴ بخش ۴..... ۵۱
- ۴-۳-۵ بخش ۵..... ۵۱

۵۱	۶-۳-۴ بخش ۶
۵۲	۷-۳-۴ بخش ۷
۵۲	۴-۴ بررسی داده‌ها
۵۲	۱-۴-۴ داده‌های پتروفیزیک
۵۴	۲-۴-۴ داده‌های حفاری
۵۴	۳-۴-۴ داده‌های اندازه‌گیری شده فشار منفذی
۵۵	۵-۴ تخمین نگار صوتی
۵۶	۶-۴ جمع بندی
۵۷	فصل ۵: بررسی مکانیسم فشار غالب میدان و روش‌شناسی تحقیق
۵۸	۱-۵ مقدمه
۵۸	۲-۵ بررسی مکانیسم ایجاد فشار بالا در سازند مورد مطالعه
۶۳	۳-۵ مدل‌های فشار منفذی مورد استفاده
۶۳	۱-۳-۵ روش ایتون
۶۵	۲-۳-۵ روش باورز
۶۸	۴-۵ روش‌های ترکیب اطلاعات مورد استفاده
۶۸	۱-۴-۵ روش میانگین وزنی مرتب‌شده
۷۱	۲-۴-۵ روش‌های انتگرال فازی
۷۵	۵-۵ جمع بندی
۷۷	فصل ۶: یافته‌های تحقیق
۷۸	۱-۶ مقدمه
۷۹	۲-۶ تعیین پارامترهای مورد نیاز برای تخمین مدل‌های تجربی
۷۹	۱-۲-۶ محاسبه فشار هیدرواستاتیک

۸۰	۶-۲-۲ محاسبه فشار روبارم.....
۸۰	۶-۳ مدل تجربی ایتون براساس مؤلفه زمان انتقال موج صوتی.....
۸۹	۶-۴ مدل تجربی باورز.....
۹۵	۶-۵ مدل تجربی ایتون براساس پارامترهای حفاری.....
۱۰۳	۶-۶: مقایسه روش‌های تحلیلی با روش‌های عددی.....

فصل ۷: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۵

۱۱۶	۷-۱ نتیجه‌گیری.....
۱۱۸	۷-۲ پیشنهادات.....

مراجع ۱۲۰

فهرست جداول

جدول ۱-۴: موقعیت و ضخامت بخش‌های مختلف سازند گچساران در برش‌های نمونه تلفیقی.....	۴۹
جدول ۲-۴: ویژگی‌های بخش‌های هفت‌گانه سازند گچساران در برش نمونه تلفیقی.....	۵۰
جدول ۳-۴: عمق نمودارهای موجود در چاه A.....	۵۲
جدول ۴-۴: عمق نمودارهای موجود در چاه B.....	۵۳
جدول ۵-۴: عمق نمودارهای موجود در چاه C.....	۵۴
جدول ۶-۴: نتایج حاصل از تخمین نگار صوتی با استفاده از شبکه عصبی MLP.....	۵۶
جدول ۱-۵: مقادیر خروجی چهار سنجنده.....	۷۰
جدول ۲-۵: چینش مقادیر خروجی سنجنده‌ها به صورت نزولی.....	۷۰
جدول ۳-۵: مقادیر متناظر برای مجموعه X.....	۷۴
جدول ۴-۵: چینش مقادیر به صورت صعودی برای مجموعه X.....	۷۴
جدول ۵-۵: مقادیر اندازه فازی.....	۷۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: نمایش فشار هیدرواستاتیک در مقابل عمق برای گرادیان 0.433 psi/ft آب خالص..... ۳
- شکل ۱-۲: شماتیک کلی گرادیان‌های فشار هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک با افزایش عمق..... ۵
- شکل ۱-۳: گرادیان فشار گل حفاری..... ۶
- شکل ۱-۲: نمایش تخمین تغییر حجم در اثر شکست هیدروکربن..... ۱۸
- شکل ۲-۲: نیروی شناوری هیدروکربن ناشی از چگالی کمتر نفت و گاز نسبت به آب..... ۲۰
- شکل ۳-۲: اثر مهاجرت جانبی سیال بر روی فشار منفذی..... ۲۱
- شکل ۴-۲: روند سرعت در مقابل چگالی برای مکانیسم‌های مختلف ایجاد فشار بالا..... ۲۱
- شکل ۵-۲: گستره دما و فشار برای ابزار XPT..... ۲۴
- شکل ۱-۴: موقعیت جغرافیایی میدان‌های مورد مطالعه..... ۴۵
- شکل ۲-۴: موقعیت چاه A در میدان آغاجاری..... ۴۶
- شکل ۳-۴: موقعیت چاه B و C در میدان نفتی مارون..... ۴۷
- شکل ۱-۵: مدل ساختار منافذ ذخیره و منافذ ارتباطی..... ۵۹
- شکل ۲-۵: نمودار سرعت در مقابل چگالی با رنگ‌بندی برحسب عمق در چاه A..... ۶۰
- شکل ۳-۵: نمودار سرعت در مقابل چگالی با رنگ‌بندی برحسب عمق در چاه B..... ۶۱
- شکل ۴-۵: نمودار سرعت در مقابل چگالی با رنگ‌بندی برحسب عمق در چاه C..... ۶۲
- شکل ۵-۵: نمودار رفتار پلاستیک رسوبات در حالت دست‌نخورده و حالت باربرداری..... ۶۷
- شکل ۶-۵: نمودار α نسبت به SSE و محل قرارگیری α بهینه..... ۷۱
- شکل ۷-۵: مفهوم پایه انتگرال چوکویت..... ۷۴
- شکل ۱-۶: شماتیک کلی فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره مقابل عمق در چاه A..... ۸۱
- شکل ۲-۶: شماتیک کلی فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره مقابل عمق در چاه B..... ۸۲
- شکل ۳-۶: شماتیک کلی فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره مقابل عمق در چاه C..... ۸۲
- شکل ۴-۶: خط روند نرمال بر روی نگاره صوتی در میدان آغاجاری..... ۸۴
- شکل ۵-۶: خط روند نرمال بر روی داده‌های VSP در میدان مارون..... ۸۴
- شکل ۶-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش ایتون در چاه A..... ۸۵
- شکل ۷-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش ایتون در چاه B..... ۸۶
- شکل ۸-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش ایتون در چاه C..... ۸۷
- شکل ۹-۶: نمودار سرعت در مقابل تنش مؤثر در میدان آغاجاری..... ۹۰
- شکل ۱۰-۶: نمودار سرعت در مقابل تنش مؤثر در میدان مارون..... ۹۰
- شکل ۱۱-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش باورز در چاه A..... ۹۲
- شکل ۱۲-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش باورز در چاه B..... ۹۳
- شکل ۱۳-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش باورز در چاه C..... ۹۴

- شکل ۶-۱۴: خط روند نرمال بر روی پارامتر بدون بعد dc در میدان مارون..... ۹۶
- شکل ۶-۱۵: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در محدوده گچساران چاه A..... ۹۷
- شکل ۶-۱۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در محدوده گچساران چاه B..... ۹۸
- شکل ۶-۱۷: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در محدوده گچساران چاه C..... ۹۹
- شکل ۶-۱۸: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در چاه A..... ۱۰۰
- شکل ۶-۱۹: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در چاه B..... ۱۰۱
- شکل ۶-۲۰: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در چاه C..... ۱۰۲
- شکل ۶-۲۱: خروجی روش OWA در چاه A..... ۱۰۴
- شکل ۶-۲۲: مقایسه روش‌های تحلیلی با استفاده از OWA براساس لایه‌های مختلف چاه A..... ۱۰۵
- شکل ۶-۲۳: خروجی روش OWA در چاه B..... ۱۰۷
- شکل ۶-۲۴: مقایسه روش‌های تحلیلی با استفاده از OWA براساس لایه‌های مختلف چاه B..... ۱۰۸
- شکل ۶-۲۵: خروجی روش OWA در چاه C..... ۱۱۱
- شکل ۶-۲۶: مقایسه روش‌های تحلیلی با استفاده از OWA براساس لایه‌های مختلف چاه C..... ۱۱۲

فصل ۱: کلیات

۱-۱ مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل در حفاری چاه‌های جدید، پیش‌بینی فشار منفذی^۱ قبل از حفاری است. فشار منفذی در واقع فشار درون حفرات سنگ است. پس از حفر چاه، سیالات سازندی با این فشار وارد چاه می‌شوند. فشار منفذی با تحمل بخشی از تنش روباره^۲، میزان تنش وارده بر سنگ‌ها را کاهش می‌دهد. به همین دلیل در بسیاری از کارهای ژئومکانیکی از تنش مؤثر^۳ استفاده می‌شود [۱].

در صنعت نفت داده‌های فشار برای برنامه‌ریزی حفاری و توسعه میدان‌ها در مناطقی که به لحاظ فشارهای غیرعادی زمین دارای ریسک زیادی هستند، اهمیت فراوانی دارد. تاکنون روش‌ها و مدل‌های زیادی برای تخمین فشار منفذی ارائه شده؛ که صرف‌نظر از دقت آن‌ها، میزان اهمیت دستیابی به فشار منفذی را نشان می‌دهد [۲].

در این فصل ضمن آشنایی با مفاهیم و تعاریف اولیه‌ی مرتبط با فشار منفذی، به مروری بر اهمیت و ضرورت تخمین فشار منفذی پرداخته می‌شود و روند کلی ارائه‌ی مطالب در این پایان‌نامه بررسی خواهد شد.

۲-۱ مفاهیم

• فشار منفذی

به فشار سیال درون حفرات سنگ گفته می‌شود. در رسوبات متخلخل، هر نقطه‌ی درون حوضه‌ی رسوبی دارای یک فشار منفذی مربوط به خود است؛ که این فشار می‌تواند از نوع هیدرواستاتیک^۴، فشار بالا یا فشار پایین باشد.

^۱ Pore pressure

^۲ Overburden Stress

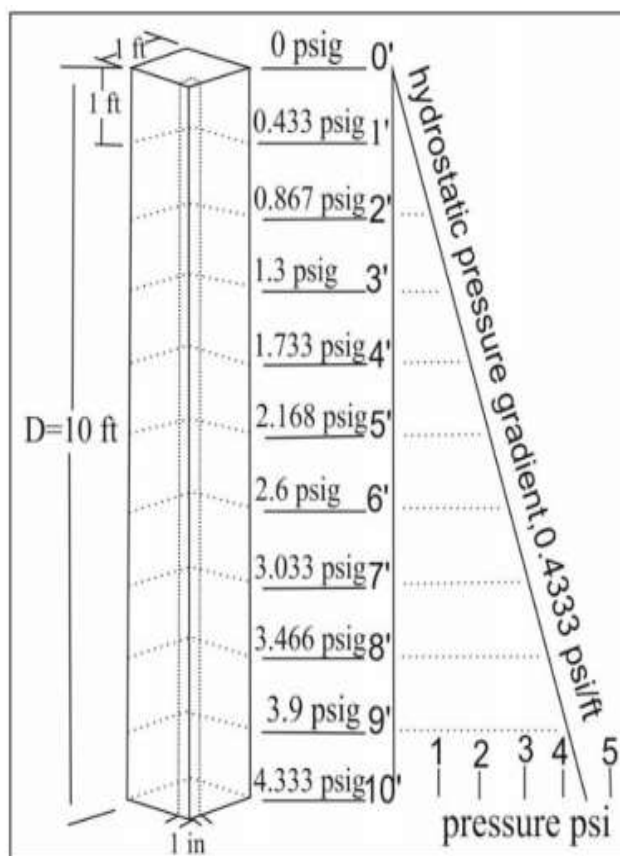
^۳ Effective Stress

^۴ Hydrostatic

• فشار هیدرواستاتیک

فشار هیدرواستاتیک فشار ستون آب از سطح تا عمق موردنظر است. مقدار فشار هیدرواستاتیک با افزایش عمق و درجه شوری آب افزایش می‌یابد؛ اما گرادیان نرمال آن ۱ MPa/Km یا ۰٫۴۴ psi/ft است. درواقع فشار هیدرواستاتیک متناظر با شبکه‌ای از شکستگی‌های باز است؛ که از سطح تا عمق موردنظر ادامه می‌یابد (شکل ۱-۱) [۱،۳].

در مناطقی که تخمین فشار منفذی قبل از حفاری انجام نشده و اطلاعات زیادی نیز از منطقه در دسترس نیست، معمولاً وزن گل^۱ به نحوی تعیین می‌شود که فشار ناشی از آن بیشتر از فشار هیدرواستاتیک باشد. در عمل، وزن گل اندکی بیشتر از مقدار این فشار تعیین می‌شود [۴].



شکل ۱-۱: نمایش فشار هیدرواستاتیک در مقابل عمق برای گرادیان ۰٫۴۳۳ psi/ft آب خالص [۴].

^۱ Mud weight

- فشار لیتواستاتیک^۱ (فشار روباره)

فشار لیتواستاتیک حاصل وزن ستون سنگی طبقات فوقانی و تابعی از وزن مخصوص سنگ‌هاست و متناسب با عمق افزایش می‌یابد. مجموع وزن ماتریکس^۲ سنگ و فشار هیدرواستاتیک برابر با فشار روباره می‌باشد. از آنجا که فشار روباره با عمق افزایش می‌یابد، به آن تنش قائم نیز می‌گویند [۴].

- تنش مؤثر

این مفهوم برای اولین بار توسط ترزاکی^۳ بیان شد. او متوجه شد که رفتار خاک متأثر از اختلاف بین فشار خارجی واردشده بر آن (تنش قائم) و فشار سیالات منفذی درون آن است [۵].

- فشار بالا

اگر فشار منفذی در عمق از فشار هیدرواستاتیکی نرمال بیشتر شود، حالت فشار بالا رخ خواهد داد. در ایران و عراق، سازندهای فشار بالایی وجود دارند؛ که گرادیان فشار آن‌ها ۰/۸۵ psi/ft تا ۰/۹۷ psi/ft است. برای کنترل این فشار در عملیات حفاری، وزن گل‌ها حدود ۲۲ ppg مورد نیاز است.

- فشار پایین

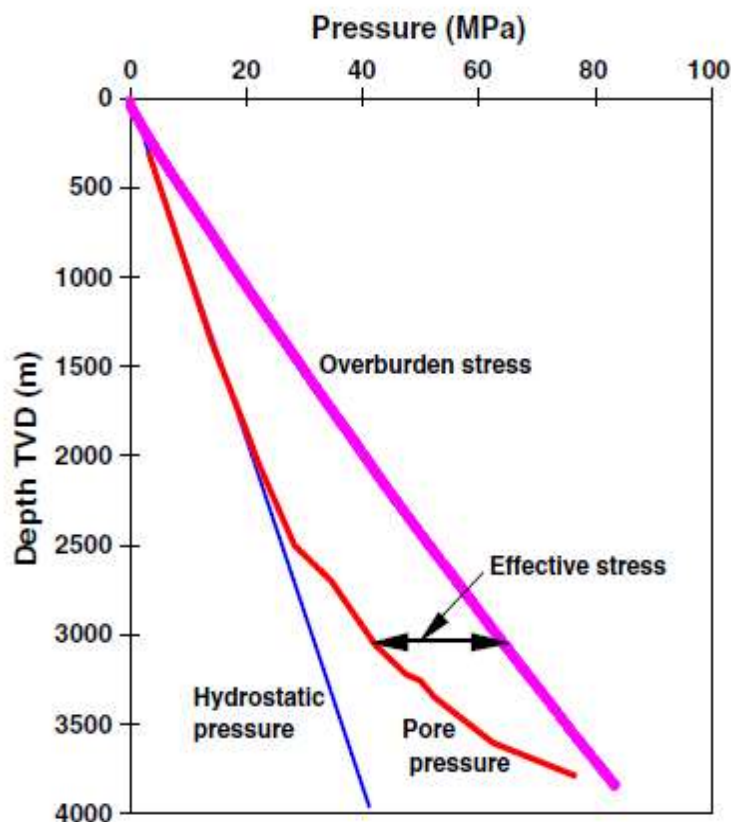
در صورتی که فشار منفذی کمتر از فشار هیدرواستاتیک باشد، حالت فشار پایین اتفاق می‌افتد [۳].

تغییرپذیری نرمال این گرادیان‌ها با عمق، در شکل ۱-۲ دیده می‌شود [۶].

^۱ Lithostatic pressure

^۲ matrix

^۳ Terzaghi

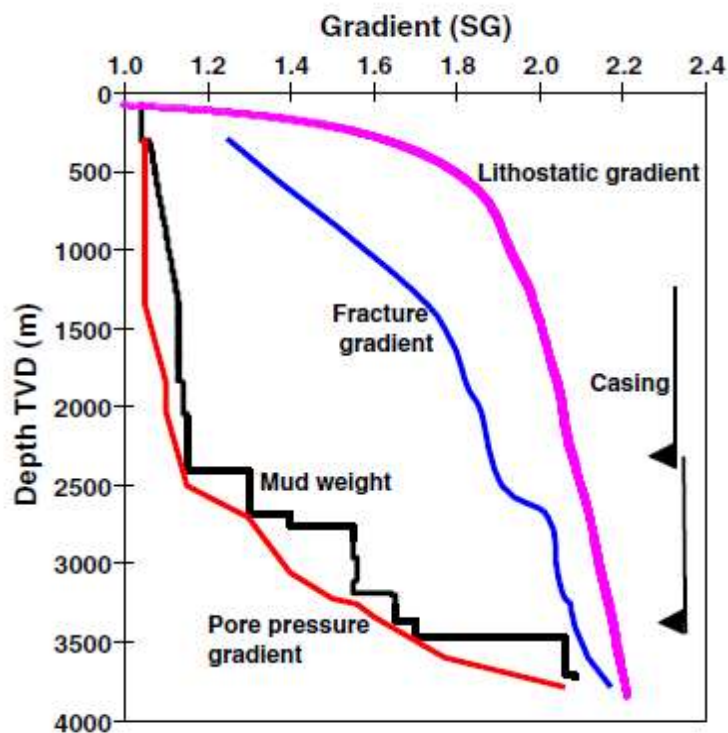


شکل ۲-۱: شماتیک کلی گرادین‌های فشار هیدرواستاتیک و لیتواستاتیک با افزایش عمق [۶]

• وزن گل

متخصصین حفاری، وزن گل معادل را واحد اندازه‌گیری پرمعناتری برای بیان فشار می‌دانند. در حفاری، وزن گل حفاری در بازه‌های مشخص، ثابت است. از طرف دیگر این وزن باید بین وزن گل معادل فشار منفذی و گرادین گسیختگی دیواره چاه باشد. برای ماندن در بازه ایمن باید تا عمق مشخص حفاری کرد و سپس لوله‌های جداری را نصب کرد. لوله‌های جداری از سازند در مقابل شکستگی‌های احتمالی در اثر وزن گل زیادتری که برای حفاری در عمق‌های بیشتر استفاده می‌شوند، محافظت می‌کنند [۳].

شماتیک کلی از وزن گل و پنجره‌ی ایمن گل در شکل ۳-۱ دیده می‌شود [۶].



شکل ۳-۱: گرادیان فشار گل حفاری [۶]

۳-۱ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق

شاید مهم‌ترین دلیل برای تخمین فشار منفذی، تعیین آن برای تهیه‌ی برنامه‌ای مناسب، برای وزن گل حفاری در اعماق مختلف باشد. در هر نقطه از عمق زمین و در جهات مختلف، فشاری وجود دارد که ناشی از وزن طبقات فوقانی بوده و تابعی از عوامل مختلف مانند نوع و چگالی سنگ‌های تشکیل‌دهنده زمین، میزان تخلخل، نوع و چگالی سیال پرکننده منافذ سنگ‌ها، اثرات دیاژنتیک^۱، عوامل تکتونیکی و غیره است. این فشار شامل فشار لیتواستاتیک و فشار هیدرواستاتیک است. اطلاع کامل از فشار منفذی برای ارزیابی و برنامه‌ریزی حفر چاه، طراحی لوله‌گذاری^۲ و گل حفاری برای مهندسان حائز اهمیت است و همچنین در زمینه اکتشاف نفت می‌توان از مفهوم فشار منفذی در تحلیل و بررسی مسیرهای مهاجرت

^۱ Diagenetic

^۲ Casing

نفت و در بررسی کیفیت پوش سنگ^۱ استفاده کرد. این اطلاعات برای زمین شناسان با هدف ارزیابی صحیح روند گسل ها و دینامیک مهاجرت هیدروکربن^۲ بسیار مفید هستند. اثر این برنامه ریزی ها نیز به نوبه خود در کاهش هزینه های حفاری، افزایش ایمنی چاه و حفظ محیط زیست حائز اهمیت می باشد. بنابراین اطلاع از فشار منفذی برای طراحی، کنترل و ایمنی چاه ها، کاهش و حذف مشکلات عملیات حفاری و کاهش ریسک اقتصادی برنامه توسعه میدان ها ضروری است [۲،۳].

به طور معمول، برای پیش بینی فشار منفذی دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. روش های مستقیم به روش هایی مانند آزمایش های اندازه گیری فشار درون چاهی گفته می شود؛ که فشار منفذی را به طور مستقیم اندازه گیری می کنند. در روش غیرمستقیم با اندازه گیری ویژگی های فیزیکی و پتروفیزیکی، میزان انحراف این ویژگی ها از حالت نرمال، اندازه گیری می شود و ارتباط این انحراف با تغییرات فشار مورد بررسی قرار می گیرد [۷].

سازند گچساران اولین سازند گروه فارس و پوش سنگ مخزن آسماری است. این سازند از لحاظ پیچیدگی سنگ شناسی در هر قسمت به هفت بخش تفکیک می شود. بخش ۱ به عنوان پوش سنگ نیز خوانده می شود و کم ضخامت ترین بخش سازند گچساران را تشکیل می دهد. در اکثر میدان های نفتی دنیا پوش سنگ تنها به عنوان لایه پوشش و حافظ مواد نفتی موجود در سنگ مخزن، عمل می کند، در حالی که در میدان های نفتی منطقه زاگرس (میدان های مناطق نفت خیز جنوب) علاوه بر وظیفه مهم فوق (پوش سنگ)، جداکننده دو منطقه فشاری کاملاً متفاوت (منطقه پر فشار) یعنی سازند گچساران و (منطقه کم فشار) سازند آسماری از یکدیگر است. توضیحات دیگر بخش های گچساران به صورت مفصل در فصل مربوطه آمده است. در حوضه های تبخیری در نتیجه افزایش تبخیر، سطح آب در حوضه رسوبی پایین می آید و به طور هم زمان غلظت یونی و چگالی آب افزایش می یابد. بر این اساس ۷ مدل پایه ای در

^۱ Cap rock

^۲ Hydrocarbon migration

مورد رسوب گذاری مستقیم تبخیری ها، شامل حوضه دریای بسته، حوضه لاگونی^۱ کم عمق، حوضه ناشی از پایین آمدن سطح آب در بخش های عمیق، حوضه تبخیری عمیق، سیکل های تبخیری فرعی کنترل شده به وسیله تغییرات سطح آب دریا، سبخای^۲ ساحلی و حوضه های تبخیری مرکب ارائه شده است. فرآیندهای اصلی در تغلیظ شورابه و رسوب گذاری تبخیری ها مشابه و تنها اختلاف موجود در تغییرات محیط های تکتونیکی و تکامل حوضه هاست. در حوضه رسوبی زاگرس بر اثر فعالیت مجدد گسل های پی سنگ در طی میوسن، شرایط تشکیل محیط محصور به وجود آمده و سبب گسترش تبخیری ها شده است. این گسل ها نقش یک سد را برای تشکیل محیط تبخیری ایجاد کرده اند. فرونشینی تکتونیکی در حوضه به وسیله تهنشست تبخیری ها شدت گرفته است؛ به طوری که موجب تکرار پیشروی و پسروی دریا و تهنشست توالی ضخیم سازند گچساران در یک محیط دریایی کم عمق ساحلی شده است [۸].

تاکنون روش های مختلفی برای پیش بینی فشار منفذی ارائه شده؛ که اغلب براساس استفاده از داده های پتروفیزیک و لرزه است. در هر یک از این روش ها، مکانیسم خاصی به عنوان عامل اصلی ایجاد فشار بالا در نظر گرفته شده و بر اساس آن روابط تجربی مربوطه نیز ارائه شده است. از این رو در تعیین فشار منفذی یک منطقه، انجام مطالعات زمین شناسی برای شناخت مکانیسم ایجاد فشار بالا و انتخاب مناسب ترین روش تعیین فشار منفذی بسیار مهم و قابل توجه است [۹].

از جمله مهم ترین داده های مورد استفاده در این پژوهش می توان به نمودارهای پتروفیزیکی اشاره نمود. از مزایای استفاده از این داده ها به سهولت و تسریع کار مطالعه و امکان شناسی سازند و تعیین سنگ شناسی آن در اعماق (در مواردی که دسترسی مستقیم به نمونه مقدور نباشد) می توان اشاره کرد و مهم ترین نمودارهای پتروفیزیکی برای تعیین سنگ شناسی و تغییرات ضخامت در پوش سنگ: نمودارهای صوتی، مقاومت، پرتو گاما، چگالی و تخلخل نوترون می باشند.

^۱ Lagoon

^۲ Sabkha

با توجه به اهمیت بالای تعیین فشار منفذی و همچنین فشار شکست در یک سازند، در تحقیق حاضر تلاش بر این است تا با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی و پارامترهای حفاری اندازه‌گیری شده در میدان‌های نفتی جنوب غربی ایران، فشار منفذی با استفاده از روابط تحلیلی گوناگون مشخص شود.

۴-۱ اهداف و نوآوری تحقیق

وجود فشار منفذی در عمق، رفتار مکانیکی سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بر این اساس برای بررسی رفتار سنگ در این محیط‌ها از تئوری پروالاستیسیته^۱ استفاده می‌شود. این تئوری رفتار سنگ را در جامد الاستیک متخلخل و اشباع از یک سیال توصیف می‌کند. سازوکارهای تأثیر فشار منفذی و سنگ به‌صورت متقابل است. به این صورت که افزایش فشار منفذی سبب ایجاد شکاف در سنگ می‌شود و تراکم سنگ نیز در صورت عدم امکان خروج سیال از سنگ، سبب افزایش فشار منفذی می‌شود [۳]. دقت در پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری اجازه می‌دهد تا وزن مناسب برای گل انتخاب و روش نصب لوله‌های جداری، بهینه‌سازی شود. بنابراین، ایمنی را از طریق جلوگیری از فروپاشی دیواره چاه و حفاری‌های اقتصادی را از طریق کاهش هزینه امکان‌پذیر می‌کند [۷].

بسیاری از مشکلات حفاری در هنگام رسیدن به سنگ مخزن در میدان‌های نفتی در ارزیابی صحیح و دقیق پوش‌سنگ مخازن نفتی نهفته است. بخش ۱ سازند گچساران به‌عنوان پوش‌سنگ مخزن آسماری میدان‌های نفتی زاگرس عمل می‌کند؛ که ارزیابی صحیح آن علاوه بر کاهش ریسک حفاری، نقش عمده‌ای در برنامه‌ریزی‌های مدیریت اکتشاف و حفاری ایفا می‌کند. امروزه در صنعت نفت ارزیابی پوش‌سنگ میدان‌های نفتی و شناسایی لایه‌های کلیدی پوش‌سنگ یا در واقع سنگ‌شناسی لایه‌ها با بیشترین دقت ممکن صورت می‌گیرد [۸].

فشار منفذی پوش‌سنگ بسیار بالا می‌باشد و با فشار منفذی مخزن اختلاف دارد و مواقعی که پوش‌سنگ‌های جانبی در برداشت‌های لرزه‌ای به‌راحتی تشخیص داده نمی‌شوند، همین اختلاف فشار

^۱ Poroelasticity

نمایانگر پوش سنگ‌های جانبی می‌شود و همچنین مقدار این فشار می‌تواند بر پتانسیل نشت از گسل‌هایی که به‌عنوان پوش جانبی مخازن عمل می‌کند، مؤثر باشد. شاید مهم‌ترین ضرورت برای تخمین فشار منفذی رسیدن به وزن مناسب گل حفاری در سنگ‌شناسی و اعماق مختلف باشد [۳، ۱۰].

فشار وزن گل بر دیواره‌ی چاه معمولاً در بازه‌ی بین فشار منفذی و فشار شکست قرار داده می‌شود؛ که این بازه پنجره‌ی ایمن گل حفاری شناخته می‌شود. به‌طور کلی، اگر فشار وزن گل کمتر از فشار سازند باشد، این اجازه به سیالات سازندی داده می‌شود که به درون چاه شارش کنند و اگر فشار وزن گل بیشتر از فشار سازند باشد، امکان ایجاد درزه و شکاف در سنگ دیواره‌ی چاه و در نتیجه هرز روی سیال حفاری به درون سازند وجود دارد. حفاری در هر دو حالت، با مشکل روبرو می‌شود؛ که برای عملیات و شرکت‌های حفاری امری خطرناک است.

طبق مطالعات گذشته زمین‌شناسی، تبدیل ژئوپرس به انیدریت در تعیین علت فشار بالا در این بخش بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین وجود لایه‌های مارنی پرفشار در محدوده این سازند می‌تواند علت فشار بالای این ناحیه را توجیه کند؛ که نیاز به بررسی بیشتر دارد. با توجه به ماهیت سازند گچساران، مکانیسم‌های ایجاد فشار بالا (بارگذاری، افزایش حجم سیال و حرکت سیال) طبق مخازن مشابه مورد تحلیل قرار خواهد گرفت و نزدیک‌ترین حالت به آن، به‌عنوان دلیل افزایش فشار منفذی، در نظر گرفته می‌شود.

تمامی روش‌ها و روابط تجربی در مخزن و سنگ‌های شیلی به کار گرفته شده است؛ بنابراین هدف این پژوهش یافتن فشار منفذی در سازند گچساران با بهره‌گیری از روش‌های مختلف (ایتون، باورز و غیره) می‌باشد؛ که به‌عنوان پوش سنگ سازند آسماری بوده و جنس این سازند توالی از سنگ‌های تبخیری مانند نمک، انیدریت، مارن‌های قرمز و خاکستری هست. علاوه بر روش‌های تحلیلی، از روش‌های عددی در این تحقیق برای ترکیب نتایج تخمین‌های مختلف، به‌منظور رسیدن به پاسخی مطلوب، استفاده می‌شود.

۱-۵ روش انجام تحقیق

روش‌های تخمین را به‌طور کلی می‌توان به انواع لرزه‌ای و چاه‌نگاری تقسیم کرد. روش‌های لرزه‌ای نیز خود به دو دسته‌ی روش‌های معمول و نشانگرهای لرزه‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های چاه‌نگاری و لرزه‌ای دسته‌ی اول، عموماً بر مبنای تغییرات روند یکی از کمیت‌های وابسته به عمق پایه‌گذاری شده‌اند. در این مطالعه از تغییر روند نگار صوتی^۱ در روش‌های ایتون و باورز و همچنین استفاده از پارامترهای حفاری برای مدل‌سازی فشار منفذی استفاده شده است.

مراحل مدل‌سازی و یا شبیه‌سازی

الف_ جمع‌آوری اطلاعات و گزارش‌های زمین‌شناسی و ارزیابی پتروفیزیکی مربوط به منطقه مورد مطالعه.

ب_ دریافت اطلاعات موردنیاز از شرکت مربوطه و انجام عملیات آماده‌سازی روی داده‌ها

پ_ تخمین فشار منفذی در سازند گچساران با استفاده از روابط گوناگون که در آن‌ها نمودارهای پتروفیزیک موجود و پارامترهای حفاری به‌عنوان ورودی و فشار منفذی به‌عنوان خروجی خواهد بود. مقادیر فشار منفذی با استفاده از روش‌های گوناگون تخمین زده می‌شود و با توجه به وزن گل نزدیک فشار سازند، در چاه‌های مربوطه تصحیح می‌گردد.

• روابط تحلیلی:

○ ایتون^۲ با استفاده از نگار صوتی

○ باورز^۳

○ ایتون با استفاده از پارامترهای حفاری و غیره

^۱ Log Sonic

^۲ Eaton

^۳ Bowers

ت_ در ادامه مقادیر تصحیح شده فشار منفذی با روش های فوق الذکر، به وسیله ی روش ترکیب اطلاعات و انتگرال های فازی (سوگنو^۱ و چوکویت^۲) برای ترکیب نتایج تخمین های مختلف، به منظور رسیدن به پاسخی مطلوب و قابل تعمیم، استفاده می شود.

۱-۶ ساختار پایان نامه

این پایان نامه در هفت فصل تدوین شده است. در فصل اول کلیات مربوط به این پژوهش، ضرورت تحقیق، اهداف تحقیق و روش انجام تحقیق مطرح می شود. در فصل دوم خلاصه از مبانی نظری مربوط به فشار منفذی و روش های تحلیلی مطرح می گردد. در فصل سوم به صورت خلاصه اهمیت تخمین فشار منفذی مطرح می شود و سپس پژوهش های پیشین، به صورت جداگانه برای هر پارامتر قابل تعیین فشار منفذی مطرح می گردد و سپس خلاصه ای از اهمیت و سوابق پیشین روش های عددی مطرح می شود. در فصل چهارم داده های تحقیق را پردازش و برازش کرده و خلاصه ای از موقعیت چاه ها در میدان ها آورده می شود. در فصل پنجم روش های تحقیق به طور کامل معرفی می شود؛ به صورتی که این روش ها در فصل ششم کاربردی می باشند. در فصل ششم نتایج حاصل از این پژوهش ذکر شده و به تحلیل نتایج پرداخته می شود. در فصل هفتم، نتیجه گیری از این پژوهش ذکر شده و پیشنهادهایی برای پژوهش های آینده بیان می شود.

^۱ Sugeno

^۲ Choquet

فصل ۲ : مبانی نظری

۲-۱ مقدمه

فشار منفذی یا فشار شاره درون حفره‌های سنگ، از جمله کمیت‌های مهم در بحث اکتشاف و حفاری منابع نفت و گاز است. وجود فشار منفذی زیاد باعث ایجاد مشکلات عدیده‌ای از جمله فوران چاه، ناپایدار بودن چاه، گیرکردن لوله حفاری و یا از دست دادن چرخش گل حفاری می‌شود؛ بنابراین پیش‌بینی فشار منفذی در سازندهای با فشار زیاد قبل از حفاری، امری ضروری برای حفاری ایمن و اقتصادی به‌نظر می‌رسد. همچنین در زمینه اکتشاف می‌توان از مفهوم فشار منفذی در تحلیل و بررسی مسیرهای مهاجرت نفت و در بررسی کیفیت پوش‌سنگ استفاده کرد. فشار ناشی از وزن مؤثر ستون شاره در هر عمق را فشار هیدرواستاتیک (فشار نرمال) می‌گویند. فشار عمودی در هر نقطه در زمین با عنوان فشار روباره بیان می‌شود. فشار روباره در هر عمقی تابعی از وزن سنگ و مایعات موجود در فضاهای خالی بالای آن نقطه است. فشار مؤثر بخشی از فشار روباره است؛ که روی ماتریس سنگ اعمال می‌شود. به عبارت دیگر فشار مؤثر، فشاری است که باعث تراکم می‌شود و بنابر اصل ترزاقی از تفاضل فشار روباره و فشار منفذی به دست می‌آید [۱۱].

درصد قابل ملاحظه‌ای از تولید نفت در کشورهای صادر کننده نفت عضو اپک به خصوص ایران، از مخازن شکافدار صورت می‌گیرد. مخازن کربناته شکافدار ایران متشکل از دو محیط با خصوصیات کاملاً متضاد (سنگ مخزن با تخلخل زیاد - تراوایی کم و شبکه شکاف‌ها با تخلخل کم - تراوایی زیاد) می‌باشد. همین امر سبب پیچیدگی فرایندهای تولید در این گروه از مخازن شده است. قابلیت تولید با دبی بالا در زمان‌های اولیه و کاهش نسبی آن با گذشت زمان (متأثر از تغییر مکانیسم تولید از حالت انبساط حجمی به ریزش ثقلی) از خصوصیات بارز مخازن شکافدار ایران است. حجم اولیه نفت درجا در کشور بیش از ۶۰۰ میلیارد بشکه تخمین زده می‌شود؛ که به‌طور متوسط با توجه به ساختار ناهمگون مخازن و مکانیسم‌های پیچیده تولید آن، در صورت ادامه روند گذشته، تنها ۲۰٪ آن قابل استحصال خواهد بود [۱۲].

روش‌های متداول برای پیش‌بینی فشار منفذی با چندین محدودیت مواجه هستند، ساختار منافذ

در سنگ‌های کربناته اغلب در پیش‌بینی فشار منفذی تأثیرگذار است. برای منافذی با ابعاد کوچک (مانند شکستگی‌ها)^۱ منجر به پیش‌بینی بیش از اندازه فشار می‌شود؛ درحالی‌که منافذی مانند حفره‌ها^۲ و قالبی شکل با ابعاد بزرگ منجر به پیش‌بینی کمتر از میزان واقعی فشار می‌شوند.

سیستم منافذ در کربنات‌ها، ترکیبی از چندین نوع سیستم منفذی است؛ که باعث افزایش خطا در پیش‌بینی فشار منفذی می‌شود. روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی که بر اساس شیل‌ها پایه‌گذاری شده، یک ابزار بالقوه مؤثر برای پیش‌بینی فشار منفذی در کربنات‌ها هستند؛ اما اغلب محدود به میان لایه‌های غنی از رس هستند؛ که فرض می‌شود شرایط مکانیکی سنگ‌های اطراف را نشان می‌دهد. این محدودیت باعث می‌شود که کاربرد چنین روش‌هایی فقط به فواصل گسسته یک چاه محدود شود. میان لایه‌های شیلی در سنگ‌های کربناته نازک بسیار کم یافت می‌شود. درحالی‌که دارای مزیت بزرگ ساده و آسان برای اجرای محاسبات است. روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی بر پایه شیل‌ها در بسیاری از رسوبات کربناته خالص قابل اعتماد نیستند. سنگ‌های کربناته می‌توانند به‌عنوان مواد پروالاستیک^۳ شناخته شوند [۱۳].

۲-۲ مکانیسم‌های ایجاد فشار منفذی

بر اساس مطالعات سواربریک و اوسبرن عوامل ایجاد فشار منفذی بالا براساس فرآیندهای ایجادکننده آن به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شود:

- بارگذاری
- افزایش حجم سیال
- حرکت سیال

^۱ Fracture

^۲ Hole

^۳ Poroelastic

۲-۲-۱ بارگذاری

بارگذاری سریع بر روی یک سیستم متخلخل، فشار منفذی را افزایش می‌دهد. با توجه به تنش اعمالی،

بارگذاری به دو صورت می‌تواند رخ دهد:

○ بارگذاری رسوبی

○ بارگذاری تکتونیکی

۱. بارگذاری رسوبی و ایجاد تحکیم نامتوازن^۱

هنگامی که نرخ بارگذاری رسوبی در یک حوضه پایین است، رسوبات لایه‌های زیرین قادر به خارج کردن سیال درون منافذ خود و رسیدن به فشار هیدرواستاتیک یا فشار تعادل هستند؛ اما اگر نرخ بارگذاری رسوبی بالا باشد، رسوبات لایه‌های زیرین نمی‌توانند با سرعت کافی سیال منفذی خود را خارج کنند. بنابراین تحکیم شدگی متوقف‌شده و فضای منفذی با فشار بالا ایجاد می‌شود. این فرآیند تحت عنوان تحکیم نامتوازن شناخته می‌شود [۱۴].

۲. نیروی تکتونیکی

مکانیسم دیگر، مربوط به تنش ناشی از نیروهای تکتونیکی است. فعالیت‌های تکتونیکی همچون گسلش رو رانده^۲ و یا چین‌خوردگی در یک حوضه رسوبی می‌توانند همانند تنش عمودی ناشی از بارگذاری رسوبی، باعث اعمال فشار جانبی به واحدهای سنگی شوند.

۲-۲-۲ افزایش حجم سیال

فشار منفذی بالا همچنین می‌تواند در اثر افزایش حجم سیال درون منافذ ایجاد شود که این شرایط می‌تواند در مواردی همچون افزایش دما (انبساط دمایی) تبدیل کانی‌ها، تولید هیدروکربن، شکست نفت به گاز و انبساط گاز با بالا آمدگی ساختاری^۳ رخ دهد. فشار اضافی ناشی از افزایش حجم سیال، بیشتر

^۱ Compaction Disequilibrium

^۲ Thrust fault

^۳ Gas Expansion with Uplift

در سنگ‌هایی با تراوایی کم رخ می‌دهد. چراکه افزایش حجم سیال منفذی، تخلخل را افزایش نمی‌دهد؛ ولی باعث کاهش فشار مؤثر می‌شود. در واقع نرخ تغییر حجم سیال منفذی، یک عامل کنترل‌کننده در میزان ایجاد فشار بالا است.

۱. افزایش دما

افزایش دما باعث افزایش حجم اشغال سیال می‌شود؛ که ناشی از انبساط گرمایی است؛ مانند انبساط آب زمانی که گرم‌تر از 4°C می‌شود. تبدیل کانی‌ها؛ برخی تبدیل‌های کانی‌شناسی باعث خروج آب در طول واکنش می‌شوند. واکنش‌های رایج شامل آب‌زدایی^۱ اسمکتیت و تبدیل اسمکتیت به ایلیت است [۹،۱۴].

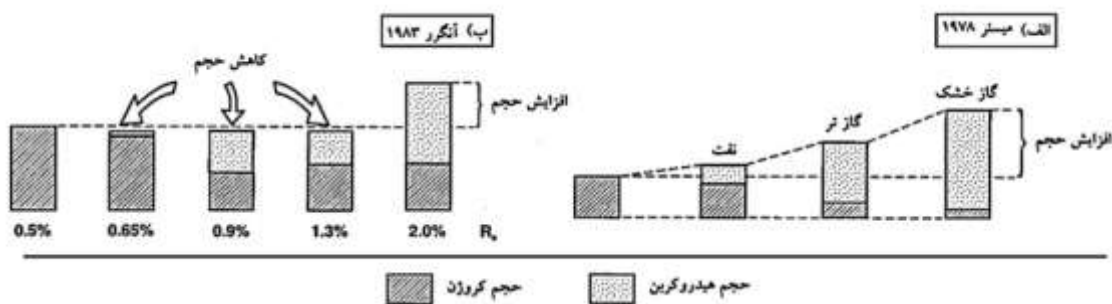
۲. تولید هیدروکربن

تبدیل کروژن به نفت یا گاز باعث تغییر حجم می‌شود. بر اساس مطالعات میسنر^۲ در سال ۱۹۷۸ بر روی شیل‌های سیاه حوضه‌ی پاریس (به‌عنوان شیل‌های نوع ۲ معرفی شده)، افزایش حجم حدود ۰٫۲۵ در روند تولید نفت از کروژن مشاهده شد که این مقدار طی تبدیل شدن به گاز مایع و گاز خشک بیشتر می‌شود؛ از طرف دیگر، بررسی‌های آنگر^۳ و همکاران بر روی افزایش فشار در طول بلوغ کروژن، نشان می‌دهد که کروژن بالغ با انعکاس ویتروینایت ۱/۳٪ با کاهش اندک در حجم همراه است؛ اما در طول بلوغ کروژن با انعکاس ویتروینایت ۲٪ افزایش حجم حدود ۵۰٪ ایجاد می‌شود [۱۴]. نتایج آن‌ها در (شکل ۲-۱) نشان داده شده است.

^۱ Dehydration

^۲ Meissner

^۳ Ungerer



شکل ۲-۱: نمایش تخمین تغییر حجم در اثر شکست هیدروکربن

الف) تبدیل کروژن به نفت و سپس گاز تر و نهایتاً گاز خشک و ب) بلوغ کروژن با انعکاس ویتروینایت ۰/۵ تا ۲ [۱۴].

۳. شکست نفت به گاز

در دمای حدود ۱۲۰ تا ۱۴۰°C، شکست گرمایی هیدروکربن آغاز می‌شود و این شکست در دمای ۱۸۰°C با ایجاد گاز، کامل می‌شود. در دما و فشار استاندارد، یک واحد حجم استاندارد نفت خام به ۵۳۴/۳ واحد حجم گاز تبدیل می‌شود. بنابراین، شکست نفت به گاز، افزایش حجم سیال موجود در سنگ منشأ را به دنبال خواهد داشت [۱۵].

۴. انبساط گاز با بالا آمدگی ساختاری

با بالا آمدن گاز در اثر بالا آمدگی ساختاری، به دلیل کاهش دما، حجم گاز افزایش می‌یابد. اگر گاز در واحد کاملاً محبوس قرار گیرد و به دلیل تراکم ناپذیری سیال اطراف قادر به انبساط نباشد، فشار گاز افزایش می‌یابد.

۲-۳-۲ حرکت سیال

حرکت سیال می‌تواند باعث ایجاد فشار منفذی بالا شود؛ که این شرایط تحت عوامل زیر می‌تواند رخ دهد:

- اختلاف سطح هیدرولیک^۱

^۱ Hydraulic Head

- اسمزی^۱
- نیروی شناوری^۲
- مهاجرت جانبی^۳

۱. اختلاف سطوح هیدرولیک سیال

بالا بودن سطح آب در نواحی مرتفع باعث اعمال فشار به مخازن و سفره‌های زیرزمینی می‌شود. در این شرایط، یک پوش سنگ در بالای سنگ مخزن یا سفره زیرزمینی لازم است. میزان فشار اضافی ایجادشده توسط این فرآیند ناچیز است و برابر فشار مربوط به اختلاف ارتفاع سطح آب نسبت به سطح آب دریا است. چاهی که در این سفره زیرزمینی حفاری می‌شود به‌عنوان چاه آرتزین^۴ شناخته می‌شود [۱۴].

۲. اسمزی

شوری‌های بالا در آب‌های سازندی می‌تواند سبب حرکت سیال از ناحیه با شوری بیشتر به ناحیه با شوری کمتر شود. این امر نه‌تنها باعث ایجاد فشار بالا در ناحیه با شوری کمتر می‌شود؛ بلکه به دلیل خروج آب از ناحیه شورتر، فشار آن ناحیه را نیز کاهش می‌دهد.

۳. نیروی شناوری

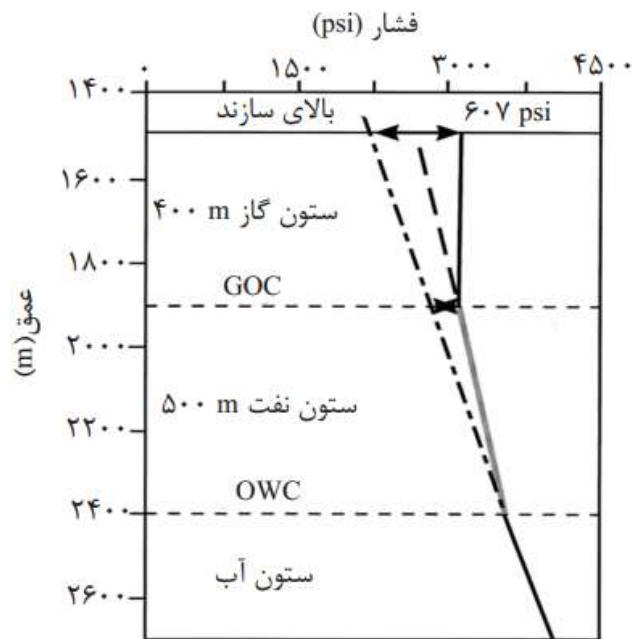
در مخازن دارای آب، نفت و گاز، اختلاف چگالی بین سیالات باعث اختلاف فشار در ستون سیالات مخزن می‌شود. آب سازند در کف ستون هیدروکربنی دارای فشار هیدرواستاتیک است. درحالی‌که نفت و گاز قرارگرفته روی آب سازندی به دلیل چگالی پایین‌تر، گرادیان فشاری کمتری دارد. این امر موجب بیشتر شدن فشار منفذی نسبت به فشار هیدرواستاتیک در ستون هیدروکربن می‌شود (شکل ۲-۲) [۹، ۱۴].

^۱ Osmosis

^۲ Buoyancy

^۳ Lateral Transfer

^۴ Artesian



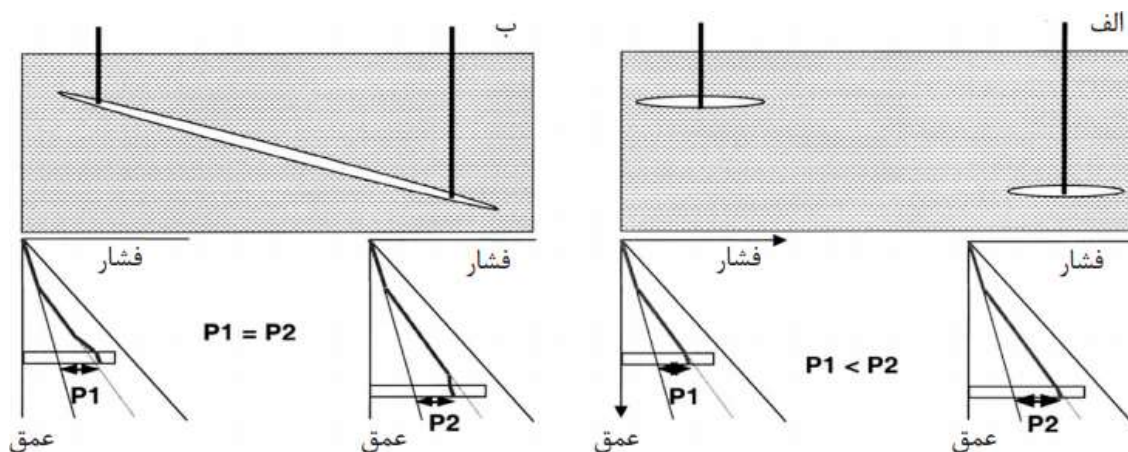
شکل ۲-۲: نیروی شناوری هیدروکربن ناشی از چگالی کمتر نفت و گاز نسبت به آب [۱۴].

۴. مهاجرت جانبی

با توجه به تحقیقات گذشته، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی افزایش فشار ناشی از حرکت سیال را می‌توان در نتیجه مهاجرت جانبی سیال و همچنین تا حدودی متأثر از اثر نیروی شناوری هیدروکربن به‌خصوص گازها دانست. مهاجرت جانبی سیال از اعماق با فشار بالا در حوضه، در راستای سفره‌های شیب‌دار باعث ایجاد فشار بالا در بالای ساختار می‌شود. بدین معنا که فشار مناطق پرفشار توسط یک مسیر تراوا به مناطق کم‌عمق با فشار پایین منتقل می‌شود (شکل ۲-۳) [۱۶].

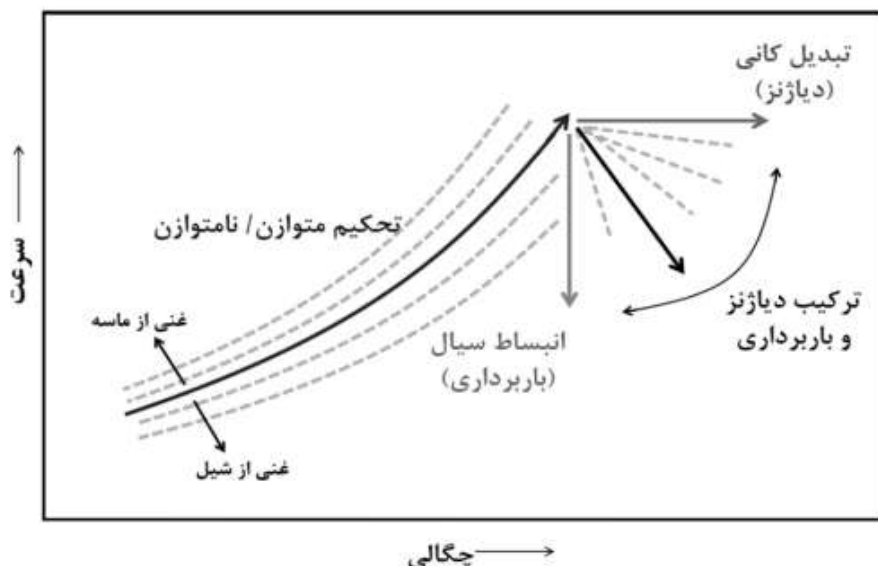
در میان عوامل ذکر شده، مکانیسم‌های تحکیم نامتوازن، باربرداری ناشی از افزایش حجم سیال و مهاجرت سیال به‌عنوان مهم‌ترین عوامل ایجاد فشار بالا شناخته شده‌اند [۹].

مکانیسم‌های مختلف ایجاد فشار بالا بر روی نمودار سرعت در مقابل چگالی در (شکل ۲-۴) نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: اثر مهاجرت جانبی سیال بر روی فشار منفذی.

الف) اثر تحکیم نامتوازن بر ناحیه عمیق تر باعث فشار بیشتر در این ناحیه نسبت به ناحیه مجزا در عمق کمتر شده است. ب) توزیع جانبی فشار توسط یک مسیر تراوا باعث افت فشار در ناحیه با فشار بیشتر و افزایش فشار در ناحیه با فشار کمتر شده است [۱۶].



شکل ۲-۴: روند سرعت در مقابل چگالی برای مکانیسم‌های مختلف ایجاد فشار بالا [۹].

۲-۳ روش‌های اندازه‌گیری فشار منفذی

به‌طور معمول، برای پیش‌بینی فشار منفذی دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد:

روش‌های مستقیم به روش‌هایی مانند آزمایش‌های اندازه‌گیری فشار درون‌چاهی گفته می‌شود؛ که فشار منفذی را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کنند. در روش‌های غیرمستقیم با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و پتروفیزیکی، میزان انحراف این ویژگی‌ها از حالت نرمال، اندازه‌گیری می‌شود و ارتباط این انحراف با تغییرات فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد [۷].

۲-۳-۱ روش‌های مستقیم

برای شناسایی رفتار جریان و خواص سیال یک مخزن، نمونه‌گیری دقیق اهمیت فراوانی دارد. نمونه‌های سیال مخزن گرفته‌شده از ابزارهای آزمون کابلی و نمونه‌گیری، به آزمایشگاه فرستاده می‌شوند و در آنجا اطلاعات مهمی مانند ترکیب اجزا سیال، خواص فیزیکی و حجم نسبی نفت، گاز، آب و فیلتراسیون گل از نمونه سیال کسب می‌شود. اولین نسل ابزارهای نمونه‌گیری درون‌چاهی ابزار (FT^۱) بوده است. این ابزار فقط برای نمونه‌گیری از سیال سازند کاربرد داشته و مشکلات زیادی نیز داشته است. در ادامه نسل‌های بعدی این ابزارها مانند ابزار RFT^۲ قابلیت ثبت فشار را داشتند و مشکلات ابزارهای قبلی به مرور زمان رفع گردید. ابزارهای جدیدتر مانند MDT^۳، XPT^۴ دارای دقت بالاتری در اندازه‌گیری فشار قابلیت نمونه‌گیری با کیفیت بهتر هستند [۱۷].

داده‌های حاصل از چاه آزمایشی، دقیق‌ترین اطلاعات را از فشار چاه و یا نواحی اطراف چاه در اختیار کاربر می‌گذارند؛ اما این اطلاعات بعد از حفاری، تنها برای چاه و اطراف چاه بکار می‌روند. بنابراین، نقش کمی در کاهش ریسک حفاری دارند. همچنین، این اطلاعات تنها برای عمق‌های خاصی از مخزن اندازه‌گیری می‌شوند. نتایج حاصل از داده‌های چاه آزمایشی برای ارزیابی روش‌های دیگر تخمین فشار منفذی استفاده می‌شوند. علاوه بر این، داده‌های چاه آزمایشی برای به دست آوردن ثابت‌های معادلات تبدیل ویژگی‌های فیزیکی به داده‌های فشار در منطقه مورد مطالعه به کار می‌روند [۱۸].

طیف وسیعی از ابزارهای آزمون سیال سازند امروزه در دسترس هستند. از جمله:

- Repeat Formation Tester (RFT)
- Repeat Formation Sampler (RFS)
- Formation Multi-Tester (FMT)
- Modular Dynamics Formation Tester (MDT)
- Express Pressure Test (XPT)

^۱ Formation Tester

^۲ Repeat Formation Tester

^۳ Modular Dynamics Formation Tester

^۴ Express Pressure Test

این ابزارها همگی قابلیت گرفتن نمونه‌های مختلفی از سیال سازند را دارا هستند و هم‌زمان فشار را نیز اندازه‌گیری می‌کنند [۱۷].

RFT.A

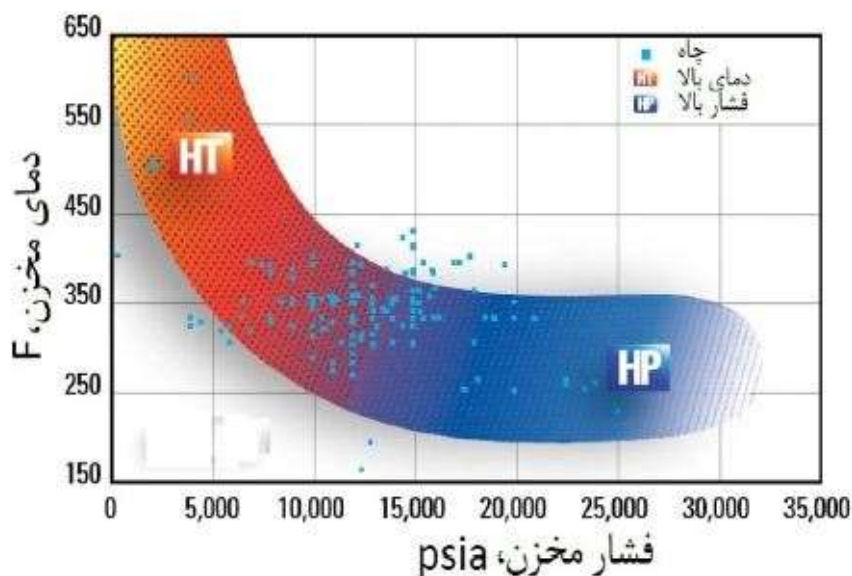
ابزار RFT از جمله معروف‌ترین و قدیمی‌ترین ابزارهای آزمون درون‌چاهی است و به‌وسیله کابل به‌منظور نمونه‌گیری از سیال و ثبت فشار سازند به داخل چاه رانده می‌شود. این فشار در نقاط خاصی از دیواره چاه اندازه‌گیری می‌شود. فشار سازند به‌وسیله بخش Formation sample اندازه‌گیری می‌شود. زمانی که ابزار باز شده و با دیواره چاه (سازند) تماس می‌یابد، نمونه گرفته می‌شود [۱۷، ۱۹].

MDT .B

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ابزار MDT مشابه و ارتقا یافته RFT است؛ با این تفاوت که دارای ماژول‌های مختلفی می‌باشد. در واقع هر ماژول به ابزار یک قابلیت مشخص را می‌بخشد. یکی از مهم‌ترین بهبودهای به وجود آمده در MDT نسبت به ابزارهای قبلی، امکان کنترل بیشتر از سطح زمین می‌باشد. از سیالات گاز میعانی و نزدیک بحرانی می‌توان با افت فشار کم با ابزار MDT به راحتی نمونه‌گیری کرد. یکی از اهداف همیشگی آزمون‌های کابلی، گرفتن نمونه سیال است. این نمونه ممکن است با فیلتراسیون گل مخلوط شود. ابزار MDT با داشتن ۱۲ محفظه نمونه‌گیری بر این مشکل غلبه کرده است.

XPT.C

ابزار XPT از جدیدترین ابزارهای نمونه‌گیری سیال و اندازه‌گیری فشار سازند است و اهدافی مشابه با سایر ابزارهای نمونه‌گیری دارد. این ابزار دارای دقت اندازه‌گیری بالاتری نسبت به ابزارهای قبلی است. تفاوت عمده ابزار XPT با ابزارهای قبلی این است که گستره وسیع‌تری از دما و فشار را پوشش می‌دهد و در چاه‌های افقی و دارای زاویه زیاد عملکرد بهتری دارد. ابزار XPT برای شرایط با دما و فشار بالای سازند (شرایط HPHT) هم طراحی شده است (شکل ۲-۵) [۱۷].



شکل ۲-۵: گستره دما و فشار برای ابزار XPT [۱۷].

۲-۳-۲ روش‌های غیرمستقیم

تغییرات فشار منفذی باعث تغییر در ویژگی‌های فیزیکی سنگ مانند میزان فشردگی سنگ، تخلخل و ویژگی‌های الکتریکی می‌شود. در این روش‌ها با تعیین ویژگی‌های فیزیکی و پتروفیزیکی، میزان انحراف این ویژگی‌ها از حالت نرمال، اندازه‌گیری می‌شود و ارتباط این انحراف با تغییرات فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. تقریباً نمودارهای چاه، روشی کیفی محسوب می‌شود [۷].

أ. نگار صوتی

به تغییرات فشار حساس است. زیرا بین تخلخل، فشردگی، فشار منفذی و پارامترهای صوتی رابطه وجود دارد. افزایش عمق، افزایش فشردگی و کاهش تخلخل را در پی دارد. بنابراین، مدول بالک و مدول برشی افزایش و تراکم‌پذیری کاهش می‌یابند. با تغییر این پارامترها، سطح تماس دانه‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، سرعت موج صوتی افزایش پیدا خواهد کرد؛ اما در نواحی پرفشار، نرخ فشردگی، کاهش و حتی متوقف خواهد شد و در نتیجه، معکوس می‌شود. روابطی که بین سرعت و فشار حاکم است (رابطه ایتون و غیره)، در مورد سرعت لرزه‌ای و سرعت نگار صوتی یکسان است؛ اما ضرایب ثابت متفاوت بوده و این به علت تفاوت در فرکانس اندازه‌گیری این دو نوع سرعت است. نگار صوتی رزولوشن بالاتری دارد [۲۰].

ب. نگار مقاومت الکتریکی

افزایش فشار منفذی باعث کاهش تماس دانه‌ها و افزایش فضای متخلخل می‌شود. بنابراین، رسانندگی الکتریکی سنگ به سیال درون منفذی وابسته می‌شود. فرض کنید که سیال درون فضای متخلخل هیدروکربوری باشد؛ در این صورت، مقاومت ویژه الکتریکی افزایش می‌یابد. تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی به شدت وابسته به نوع سیال و لیتولوژی منطقه است. بنابراین در نواحی پرفشار، باید نگار مقاومت الکتریکی با احتیاط به کار رود [۲۱].

ت. نگارهای تخلخل

فشار مؤثر از پارامترهای مهم در تعیین تخلخل سنگ است؛ که به صورت معمول با عمق افزایش می‌یابد و رابطه عکس با تخلخل دارد. روند کاهش تخلخل و افزایش فشار مؤثر با عمق، در نواحی پرفشار کاهش می‌یابد و یا متوقف می‌شود. به روش تخمین فشار بر اساس تخلخل، روش مبتنی بر تخلخل می‌گویند. در این روش فرض می‌شود که رابطه مستقیمی بین تخلخل اندازه‌گیری شده و فشار وجود دارد. رابطه ترزاقی بیانگر اثر فشار مؤثر بر تخلخل با عمق است.

پیچیدگی سنگ‌شناسی باعث عدم دقت در روش مبتنی بر تخلخل می‌شود. زیرا فشار، تنها عامل کنترل‌کننده تخلخل نیست [۶،۲۲].

فواید و معایب استفاده از چاه‌نگاری به صورت زیر بیان شده است:

معمولاً داده‌های چاه‌نگاری در تخمین کیفی فشار منفذی بکار برده می‌شوند و توانایی تخمین دقیقی از فشار منفذی را ندارند. همچنین روابط مورد استفاده در تخمین فشار منفذی تجربی هستند. این روابط تنها برای نواحی اطراف چاه دقت مناسبی دارند و برای فضای بین چاهی قابل اعتماد نیستند. امروزه از شبکه‌های عصبی مصنوعی نگارهای مختلف چاه برای تخمین کمی فشار از روی داده‌های چاه‌نگاری استفاده می‌شود و تخمین فشار منفذی بین چاهی نسبت به روش‌های پیشین از دقت بیشتری برخوردار است؛ اما باید این نکته را در نظر گرفت که تمام این روش‌ها برای بعد از عملیات حفاری در چاه صورت می‌پذیرد و دقت بالا تنها در نواحی دارای اطلاعات درون چاهی است، حاصل می‌گردد. لذا

استفاده از داده‌های چاه‌نگاری، عدم قطعیت در فضای بین چاهی زیاد است. همچنین باید توجه داشت که به علت نفوذ گل حفاری در ناحیه‌ی دست‌خورده، داده‌های چاه‌نگاری تحت تأثیر این ناحیه قرار می‌گیرند؛ که میزان خطا را بالا می‌برد [۲۲].

ث. پروفایل قائم لرزه‌ای

از جمله بنیان‌گذاران پیش‌بینی فشار منفذی مبتنی بر روش‌های لرزه‌ای می‌توان به وینکلر، نور و نیز به دوتا^۱ اشاره کرد. این روش به‌ویژه در خلیج مکزیک با استقبال گسترده‌ای روبه‌رو شد؛ به نحوی که در سال ۲۰۰۵ مطالعه‌ی جامعی بر روی ۷۰۰ بلوک نفتی این منطقه (شامل ۲۰۰۰ چاه) توسط کلی^۲ و همکاران انجام شد.

امروزه روش‌های لرزه‌ای درون‌چاهی کاربردهای متفاوتی پیدا کرده‌اند؛ که از آن جمله می‌توان به کالیبره کردن داده‌های لرزه‌نگاری سطحی و بهبود کیفیت داده‌های لرزه‌نگاری اعماق زیاد با کیفیت پایین داده اشاره کرد. به‌خصوص این که دستگاه‌های نوین، قابلیت اندازه‌گیری سه مؤلفه موج فشاری و برشی را دارند. بنابراین، اطلاعات کاملی از سیال و زمین‌شناسی سازند می‌توان به دست آورد. در این روش، زمان عبوری موج لرزه‌ای کمتر از برداشت‌های سطحی لرزه‌نگاری است. بنابراین، نسبت سیگنال به نوفه افزایش می‌یابد زیرا گیرنده‌ها نزدیک سطح انعکاسی هستند. رزولوشن داده‌های لرزه‌نگاری درون چاهی بیشتر از داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی است؛ اما داده‌های لرزه‌نگاری درون چاهی گسترش کمی در اطراف چاه دارند و معمولاً داده‌های آن برای اطلاعات زیر مته مناسب است. امروزه شرکت‌های اکتشاف و تولید از توموگرافی متقاطع بین چاهی برای تعیین نوع سیال و جهت حرکت سیال درون ناحیه مخزنی استفاده می‌کنند.

استفاده از آنالیز داده‌های سرعتی در روش پروفیل لرزه‌ای قائم و توموگرافی لرزه‌ای، آنومالی‌های سرعت تعیین می‌شوند و از آن‌ها در تعیین زون‌های فشار غیر نرمال به‌صورت کیفی استفاده می‌گردد.

^۱ Dutta

^۲ Kelly

همچنین این داده‌ها کیفی هستند و باید حفاری متوقف شود، تا برداشت داده انجام شود. این موضوع از مهم‌ترین معایب روش پروفیل لرزه‌ای قائم و توموگرافی لرزه‌ای است [۲۳].

ج. داده‌های گرانشی

از بین روش‌های غیر لرزه‌ای، روش گرانشی اهمیت خاصی در تعیین فشار منفذی دارد. زیرا شیل، دارای چگالی حجمی پایینی است. در شیل‌های پرفشار، چگالی بین ۲۱۰۰ تا ۲۳۰۰ متغیر است. استفاده از این روش برای آنومالی‌های فشار در مقیاس‌های بزرگ امکان‌پذیر است و درجایی که پراکنده و به‌صورت توده‌ای بزرگ نیستند، این روش کارایی ندارد. هرچند روش گرانشی پتانسیل مناسبی برای پیش‌بینی نواحی پرفشار دارد؛ اما دارای رزولوشن پائینی است. در مناطق دریایی، جایی که منطقه گذار فشار بالا در حدود هزاران فوت است؛ این روش کارایی ندارد. در سال ۱۹۶۶ ماسگریو^۱ و هیکس^۲ برای جداسازی شیل‌های تحت فشار و نمک، از روش عملیات انعکاسی^۳ و گرانشی استفاده کردند [۲۴].

ح. داده‌های لرزه‌نگاری

فشار منفذی می‌تواند از رویدادهای لرزه‌نگاری بدست آید. اساس این روش بر پایه این است که هرگونه تغییر فیزیکی سازند روی ویژگی امواج لرزه‌ای اثر می‌گذارد. عمده برداشت‌های لرزه‌ای قبل از فاز حفاری میدان صورت می‌پذیرد. بنابراین این روش تنها روشی است که نتایج آن می‌تواند برای فاز حفاری مورد استفاده قرار گیرد. تخلخل و فشردگی پارامترهایی هستند که پاسخ‌های لرزه‌ای زیرسطحی را کنترل می‌کنند. این پارامترها تنش مؤثر را تحت تأثیر قرار داده‌اند. کاهش تنش مؤثر، افزایش تخلخل و فشار منفذی را در پی دارد. همین مسئله باعث کاهش سطح تماس دانه‌ها و در نتیجه کاهش سرعت موج عبوری از میان سنگ می‌شود. اختلاف بین داده‌های نگار صوتی و سرعت لرزه‌ای در فرکانس و مسیر عبور موج است. یکی از چالش‌های پیش‌بینی فشار منفذی با سرعت لرزه‌ای این است که داده‌های

^۱ Musgrave

^۲ Hicks

^۳ Reflective Operation

سرعت‌های لرزه‌ای و چاه اغلب با هم به‌درستی کالیبره نمی‌شود. وقتی این مسئله پیش می‌آید، این سؤال مطرح می‌شود که کدام نوع داده بهترین کالیبراسیون را برای داده‌های فشار فراهم می‌کند. علاوه بر تفاوت فرکانس، اثرات دیواره چاه و ناحیه تهاجمی رویدادهای سرعت چاه اثر می‌گذارد. به‌طور کلی پارامترهای لرزه‌ای همچون سرعت، فاکتور کیفیت، جذب انرژی و سرعت لحظه‌ای به تغییرات فشار حساس است؛ اما بیشتر مطالعات روی حساسیت سرعت به فشار انجام شده است. در حقیقت، سرعت و فشار مؤثر، مفاهیم یکسانی برای مدول‌های الاستیسیته سنگ هستند. از جمله روابطی که برای تبدیل داده‌های سرعت به فشار استفاده می‌شود، می‌توان به روابط ایتون و باورز اشاره نمود [۲۵].

۲-۴ جمع بندی

در این فصل ابتدا در مورد مکانیسم‌های ایجاد فشار بالا به‌طور کامل توضیح داده شده و سپس دیاگرام کلی عوامل ایجاد فشار بالا با استفاده از نمودار سرعت - چگالی (شکل ۲-۴) نشان داده می‌شود و در نهایت روش‌های اندازه‌گیری فشار منفذی اعم از مستقیم و غیرمستقیم مورد بحث قرار گرفته است. به‌طور کلی می‌توان گفت که از میان روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی، دقت روش‌های مستقیم که از طریق آزمایش‌های درون‌چاهی در نقاطی خاص به دست می‌آید، نسبت به سایر روش‌های پیش‌بینی فشار منفذی بیشتر است. هرچند به دلیل این که از داده‌های بعد از حفاری چاه استفاده می‌کنند، تنها برای مناطق اطراف چاه مناسب است و در فضای بین‌چاهی دقت کمتری دارد. اکثر این روش‌ها کیفی هستند و تأثیر آن‌ها در کاهش ریسک حفاری نسبت به روش‌های اکتشافی مانند داده‌های لرزه‌نگاری خیلی کمتر است؛ زیرا نخست باید چاه حفر گردد.

فصل ۳ : سابقه علمی تحقیق

۳-۱ مقدمه

فشار منفذی به عنوان فشار سازند شناخته می‌شود. فشار منفذی برای پروژه‌های اکتشافی و حفاری اهمیت زیادی دارد. در طول مراحل اکتشاف، پیش‌بینی فشار منفذی می‌تواند برای ارزیابی عوامل خطر ساز از جمله مهاجرت سیال سازند و یکپارچگی پوش سنگ مورد استفاده قرار گیرد. برای تصمیم‌گیری بهینه در مورد حفاری و برنامه‌ریزی چاه در مناطق تحت فشار غیر طبیعی، انجام پیش‌بینی‌های قبل از حفاری ضروری است. دقت در پیش‌بینی فشار منفذی قبل از حفاری اجازه می‌دهد تا وزن مناسب برای گل انتخاب و روش کار گذاشتن لوله‌های جداری، بهینه‌سازی شود. بنابراین، ایمنی را از طریق جلوگیری از فروپاشی دیواره چاه و حفاری‌های اقتصادی را از طریق کاهش هزینه امکان‌پذیر می‌کند. پژوهشگران زیادی بر روی فشار منفذی کار کرده‌اند؛ که در این فصل به آن‌ها پرداخته شده است [۷].

۳-۲ اهمیت تخمین فشار منفذی

پیش‌بینی فشار منفذی اهمیت بسزایی در مراحل مختلف مطالعات مربوط به پروژه‌های هیدروکربنی (اکتشاف، تولید و حفاری) دارد. پیش‌بینی فشار منفذی نه تنها برای حفاری ایمن و مقرون به صرفه است؛ بلکه برای ارزیابی عوامل خطر را در فرایند اکتشافی از جمله مهاجرت سیال سازند و لایه‌های نفوذناپذیر امری ضروری است. وجود مناطق با فشار غیرعادی باعث بروز مشکلات فراوانی نظیر گیر کردن لوله حفاری، فوران چاه، از دست دادن گردش گل حفاری و غیره می‌شود. در واقع پیش‌بینی فشار، ابزاری مناسب برای نصب صحیح لوله جداری و تعیین چگالی گل حفاری است و همچنین پیش‌بینی فشار منفذی قابل اعتماد، کمک شایانی به کاهش ریسک خطرات ناشی از حفاری و ایمنی فراهم می‌کند. در طی فاز اکتشافی، پیش‌بینی فشار منفذی برای کمک به مطالعات تله‌های نفتی^۱، ترسیم مسیر مهاجرت نفت، تجزیه و تحلیل و طبقه‌بندی تله‌های نفتی و ابعاد حوضه رسوبی و به تبع آن، کالیبراسیون برای

^۱ Oil traps

مدل‌سازی حوضه‌ها که حائز اهمیت است، امکان‌پذیر می‌گردد. مکانیسم‌های ایجاد فشار بالا در حوضه‌های رسوبی متفاوت است؛ ولی از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به افزایش تنش و مکانیسم‌های تولید درجای سیال اشاره کرد [۷،۹].

سازندهای پرفشار در مقایسه با سازندهای با فشار عادی در عمق مشابه، چندین ویژگی از خود نشان می‌دهند؛ که این ویژگی‌ها شامل: افزایش تخلخل، کاهش چگالی حجمی، کاهش تنش مؤثر، افزایش درجه حرارت، کاهش سرعت لایه‌ای و افزایش نسبت پواسون است. سرعت بین لایه‌ای با تغییر هر کدام از این ویژگی‌ها تحت تأثیر قرار می‌گیرد، در نتیجه تعیین سرعت، کلید اصلی در پیش‌بینی فشار منفذی و مناطق با فشار غیرعادی است [۲۶].

۳-۳ زمینه‌های پژوهشی فشار منفذی

۳-۳-۱ پیش‌بینی فشار منفذی براساس سرعت و نگار صوتی

تاریخچه پیش‌بینی فشار منفذی به سال‌های ۱۹۵۰ برمی‌گردد. ترزاقی برای تنش مؤثر رابطه‌ای کلی مبنی بر اختلاف فشار روباره و فشار سیالات منفذی درون آن ارائه داد. بر اساس فرضیه ترزاقی، فشار روباره که ناشی از مجموع وزن ماتریکس سنگ و سیال درون حفرات سنگ است؛ به فشار مؤثر (تنش ماتریکس) و فشار منفذی سازند تقسیم می‌شود.

این فرضیه نشان می‌دهد که فشار منفذی در سازند تابعی از تنش کل (تنش روباره) و تنش مؤثر است. تنش روباره، تنش عمودی مؤثر و فشار منفذی در غالب رابطه‌ی (۱-۳) قابل ارائه است:

$$p = (\delta_v - \delta_e) / \alpha \quad (1-3)$$

در این رابطه P فشار منفذی؛ δ_v تنش روباره؛ δ_e تنش عمودی مؤثر و α ضریب تنش مؤثر بایوت است [۵].

هاتمن و جانسون^۱ در سال ۱۹۶۵ احتمالاً اولین کسانی بودند که پیش‌بینی فشار منفذی از خواص شیلی را با استفاده از داده‌های چاه پیمایی انجام دادند. آن‌ها با استفاده از تجزیه و تحلیل زمان انتقال موج صوتی در شیل‌های میوسن و الیگوسن در بالای تگزاس و ساحل جنوبی خلیج لوئیزیانا^۲ نشان دادند که تخلخل به‌عنوان تابعی از عمق کاهش می‌یابد. این روند به‌عنوان تابعی از عمق تدفین نشان داده شده است و فشار مایع در این روند را فشار هیدرواستاتیک می‌نامند. آن‌ها تصریح کردند اگر فشار مایع غیرطبیعی باشد، تخلخل یا زمان انتقال موج صوتی در شیل به‌طور غیرمعمول نسبت به عمق افزایش پیدا می‌کند [۲۷].

پس از آنالیز داده‌ها توسط هاتمن و جانسون، گاردنر^۳ معادله (۲-۳) را برای پیش‌بینی فشار منفذی براساس زمان انتقال موج صوتی ارائه کرد

$$p_f = \delta_v - \frac{(\alpha_v - \beta)/(A_1 - B_1 \ln \Delta t)^3}{Z^2} \quad (2-3)$$

در این رابطه p_f فشار سیال سازند برحسب psi؛ δ_v تنش روباره برحسب psi؛ α_v گرادیان نرمال تنش روباره برحسب psi/ft؛ β گرادیان نرمال فشار سیال برحسب psi/ft؛ Z بیانگر عمق برحسب فوت؛ Δt زمان انتقال موج صوتی برحسب us/ft؛ A_1 و B_1 ضرایب ثابت، $A_1 = 82776$ و $B_1 = 15695$ هست. بعدها، بسیاری از معادلات تجربی برای پیش‌بینی فشار منفذی بر اساس مقاومت، زمان انتقال موج صوتی و دیگر داده‌های چاه ارائه شد [۲۸].

روش مقاومت ویژه ایتون در پیش‌بینی فشار منفذی به‌طور خاص برای حوضه‌های رسوبی جوان کاربرد دارد در صورتی که مقدار مقاومت نرمال شیل به درستی تعیین شده باشد. به‌طور کلی دو رویکرد وجود دارد، که در رویکرد اول مقاومت نرمال شیل ثابت در نظر گرفته می‌شود و در رویکرد دوم باید خط روند نرمال به‌دقت تعیین گردد. ایتون در سال ۱۹۷۲ رابطه‌ی (۳-۳) را به‌منظور تخمین گرادیان

^۱ Hottmann & Johnson

^۲ Louisiana

^۳ Gardner

فشار منفذی در سازندهای شیلی با استفاده از نگار مقاومت ویژه ارائه کرد.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{R}{R_n} \right)^n \quad (3-3)$$

در رابطه‌ی بالا P_{pg} گرادیان فشار منفذی سازند؛ OBG گرادیان تنش روباره؛ P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک (به‌صورت نرمال برابر است با 0.45 psi/ft یا 1.03 Mpa/Km که این مقدار به میزان شوری آب وابسته است)؛ R میزان مقاومت شیل که از نگارهای چاه‌پیمایی به دست می‌آید؛ R_n میزان مقاومت شیل در فشار نرمال؛ n مقدار نمایی معادله که از 0.6 تا 1.5 متغیر است [۲۹].

روش تخمین فشار منفذی ایتون براساس زمان انتقال موج در بعضی از حوضه‌های نفتی کاربرد دارد؛ اما در آن تأثیرات باربرداری^۱ در نظر گرفته نمی‌شود. این عامل کارایی این روش را در مناطق پیچیده از نظر زمین‌شناسی همانند سازندهای دارای بالآمدگی^۲، محدود می‌کند. ایتون در سال ۱۹۷۵ رابطه‌ی تجربی برای تخمین گرادیان فشار منفذی با استفاده از زمان انتقال موج فشاری ارائه کرد [۳۰].

باورز (۱۹۹۵) معادله ترزاقی را برای پیش‌بینی فشار منفذی به کار گرفت. روش وی نیز مبتنی بر تنش مؤثر بوده است و هر دو عامل تراکم نامتوازن و مکانیسم باربرداری حاصل از انبساط سیال را به‌عنوان مکانیسم‌های اصلی ایجاد فشارهای غیرعادی در نظر می‌گیرد. درنهایت باورز رابطه‌ای را برای به دست آوردن فشار منفذی با استفاده از پارامترهای سرعت و تنش مؤثر ارائه کرد [۳۱].

تنش مؤثر و سرعت موج فشاری در صورتی که سازند دارای بالآمدگی یا باربرداری باشد، از منحنی دست‌نخورده پیروی نمی‌کند. باورز همچنین برای در نظر گرفتن اثر بالآمدگی و باربرداری، معادله‌ای را ارائه داد [۳۲].

روش صوتی میلر^۳ (۲۰۰۲) رابطه بین سرعت و تنش مؤثر را توصیف می‌کند؛ که می‌تواند برای ارتباط بین زمان انتقال موج صوتی / لرزه‌ای با فشار منفذی سازند استفاده شود. در روش صوتی میلر پارامتر

^۱ unloading

^۲ uplift

^۳ Miller

ورودی (حداکثر سرعت عمق)، یا همان d_{max} ، شرط بارگذاری یا عدم بارگذاری را کنترل می‌کند. اگر d_{max} کمتر از عمق موردنظر باشد، بارگذاری رخ نداده است؛ در این صورت فشار منفذی را می‌توان از معادله (۴-۳) به دست آورد [۶].

$$P = \delta_v - \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{V_m - V_{ml}}{V_m - V_p} \right) \quad (4-3)$$

در رابطه‌ی بالا P فشار منفذی سازند؛ ∂_v تنش روباره؛ V_m سرعت صوت در ماتریکس شیل؛ V_p سرعت فشاری در عمق موردنظر؛ V_{ml} سرعت صوت در سطح زمین و λ پارامتر تجربی است. اسلوتنیک^۱ (۱۹۳۶) به این نتیجه رسیده است که سرعت فشردگی تابعی از عمق است؛ یعنی سرعت در سازندهای زیرزمینی با عمق افزایش می‌یابد. بنابراین خط روند فشردگی طبیعی با زمان سیر باید تابعی از عمق باشد. سایرس^۲ و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از این مفهوم، سرعت فشار نرمال را برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده کردند [۳۳].

مدل تاو^۳ (۲۰۰۶) یک روش پیش‌بینی فشار منفذی وابسته به سرعت است؛ که توسط شل^۴، متغیر جدیدی به نام تاو برای محاسبه تنش مؤثر بیان کرد و رابطه فشار منفذی باورز را اصلاح نمود. مدل تاو و روش میلر شبیه روش باورز می‌باشد؛ ولی مزیت روش میلر و مدل تاو این است که هر دو اثرات ماتریکس و سرعت مادلاین^۵ را در پیش‌بینی فشار منفذی در نظر می‌گیرند [۶، ۳۴].

فیلیپس و همکاران (۱۹۸۹) طبق معادله ترزاقی روش جدیدی را برای اصلاح فشار روباره و تنش مؤثر ارائه دادند؛ که رابطه بین تنش عمودی مؤثر، تخلخل، سنگ‌شناسی و موج P را با آزمایش‌های آزمایشگاهی تأیید کرد و سپس یک مدل تجربی پیشنهاد دادند. سانگ دنگ^۶ و همکاران (۲۰۱۷) طبق تجربیات آزمایشگاهی دو رویکرد جدید پیشنهاد دادند؛ که در روش اول تست فیلیپس با استفاده از مدل

^۱ Slotnick

^۲ Sayers

^۳ Tau

^۴ Shell

^۵ Mud Line

^۶ Song Deng

خطی_نمایی فشار روباره اصلاح شد و در روش دوم فشار منفذی جدیدی بر پایه‌ی سرعت موج طولی به دست آمد [۳۵].

۳-۲-۳ پیش‌بینی فشار منفذی براساس سرعت لرزه‌ای

سلیمانی و ریاحی در سال ۱۳۹۱ سرعت برانبارش لرزه‌ای را برای پیش‌بینی فشار منفذی در مخزن ماسه‌سنگی میدان منصوری به کار بردند [۳۶].

نوری و همکاران در سال ۱۳۹۲ سرعت حاصل از وارون سازی داده‌های لرزه‌ای را در میدان سفید زاخو مورد استفاده قرار داده و نشان دادند که بخش غربی میدان، فشار منفذی بالایی دارد [۷]. اوگوو^۱ در سال ۲۰۱۵ با استفاده از سرعت لرزه‌ای فشار منفذی و فشار شکستگی را در دلتای نیجر مورد مطالعه قرار داد. وی یک رژیم فشار بالا از رده خفیف تا متوسط را با به‌کارگیری رابطه باربرداری باورز شناسایی کرد [۳۷].

هاسکین و اوکانر^۲ در سال ۲۰۱۶ تأثیر خواص سنگ روی داده‌های سرعت را به‌منظور پیش‌بینی فشار منفذی درجا با استفاده از داده‌های لرزه‌ای مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه تحقیق آن‌ها نشان داد، در صورتی‌که عمل واسنجی^۳ سرعت‌های پردازشی با نگار سرعت به‌درستی انجام نشده باشد، فشار پیش‌بینی شده از مقدار واقعی آن کمتر خواهد بود [۳۸].

محمدی و همکاران در سال ۱۳۹۶ با واسنجی کردن سرعت برانبارش لرزه‌ای به‌وسیله نگارهای موج تراکمی و با به‌کارگیری رابطه باورز در میدان کوپال موفق به شناسایی فشار غیرعادی برای سازندهای گچساران و پابده شدند. هرچند موفق به شناسایی بخش مخزنی سازند کربناته آسماری و مخزن کربناته بنگستان نشدند [۳۹].

^۱ Ugwu

^۲ Hoskin & O'Connor

^۳ Calibration operation

آدیم و همکاران در سال ۱۳۹۷ روش باورز را برای پیش‌بینی فشار منفذی استفاده کردند. این گروه مدل سرعت لرزه‌ای را با استفاده از نگارهای موج تراکمی و به روش کوکریجینگ^۱ و با کمک گرفتن از مکعب مقاومت صوتی به دست آوردند و نتایج پیش‌بینی را با فشار منفذی به‌دست‌آمده از نگارهای چاهی به روش ایتون مقایسه کردند؛ که نتایج به‌دست‌آمده از نگارهای چاهی بهتر بوده است [۴۰].

۳-۳-۳ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از تخلخل

محققان زیادی برای پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از داده‌های تخلخل تلاش کردند. برای مثال هپارد^۲ و همکاران (۱۹۹۸) از معادله تجربی تخلخل مشابه روش صوتی ایتون برای پیش‌بینی فشار منفذی در شیل‌ها و سنگ‌های رسی با استفاده از داده‌های تخلخل شیل استفاده کردند [۴۱]. هولبروک^۳ و همکاران (۲۰۰۵) تنش مؤثر وابسته به تخلخل را برای پیش‌بینی فشار منفذی ارائه کردند و نشان دادند تغییر ناگهانی تخلخل از بدو ورود به مناطق فشار بالا شروع می‌شود [۴۲]. ژانگ (۲۰۰۸) یک معادله نظری برای پیش‌بینی فشار منفذی از تخلخل با توجه به روند تراکم نرمال تخلخل ارائه کرد، که در آن روند تراکم نرمال ثابت نیست؛ بلکه تابعی از عمق می‌باشد [۴۳]. همچنین ژانگ در سال (۲۰۱۱) مدل‌های تئوری جدیدی از جمله مدل تخلخل و مدل زمان انتقال موج صوتی یا سرعت را بیان کرد، که نقص مدل ایتون در پیش‌بینی فشار منفذی برای تراکم نامتوازن شیل‌ها را برطرف می‌کند [۶].

۳-۳-۴ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از تراکم‌پذیری

هرگونه تغییر در فضای خالی، تابعی از فشردگی سنگ و سیال است. زیمرمن (۱۹۹۱) چهار مجموعه از تراکم برای دو حجم مستقل و دو فشار در سنگ متخلخل معرفی کرده است. هر یک از این فشردگی

^۱ Co-kriging

^۲ Heppard

^۳ Holbrook

سنگ متخلخل، تغییرات در حجم منافذ V_p یا حجم کل V_b را به تغییرات فشار منفذی P_p یا فشار محدود کننده P_c مربوط می‌کند.

آتشباری و تینگای (۲۰۱۲) از تعاریف فشردگی معرفی شده توسط زیمرمن و ونگولف برای محاسبه فشار منفذی به عنوان تابعی از تخلخل، فشار روباره مؤثر، فشردگی کل سنگ و فشردگی منافذ استفاده کرد و معادله‌ای جدید برای تخمین فشار منفذی براساس پارامتر تراکم‌پذیری ارائه دادند [۴۴]. آزادپور و همکاران (۲۰۱۵) با بهره از همین تعاریف تراکم‌پذیری، یک رابطه اصلاح شده بر پایه تخلخل، فشار روباره مؤثر و تراکم‌پذیری فضای خلل و فرج به منظور محاسبه فشار منفذی ارائه کردند؛ که با اضافه کردن یک ثابت نمایی به معادله آتشباری برای همبستگی آن در زمینه‌های مختلف زمین‌شناسی، معادله اصلاح شده تخمین فشار منفذی بر پایه تراکم‌پذیری ارائه دادند [۴].

۳-۳-۵ پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از پارامترهای حفاری

عدد بدون بعد حفاری برای تجزیه و تحلیل فشار منفذی سازند ارائه شده است. این تلاش برای نرمال کردن سرعت نفوذ حفاری^۱ در مدل بینگهام، با توجه به پارامترهای وزن روی مته، سرعت چرخشی رشته حفاری و قطر مته اتفاق افتاد. جوردن و شرلی^۲ معادله بینگهام را برای عدد بدون بعد حفاری (d) حل کردند و روش بدون بعد حفاری را در سال ۱۹۶۶ با در نظر گرفتن اثر فشار دیفرانسیل در نرمال‌سازی سرعت نفوذ پیشنهاد دادند [۴۵،۴۶].

رحم و مکلدون^۳ در سال ۱۹۷۱ معادله جوردن و شرلی را با وزن گل اصلاح کردند و آن‌ها با dc نشان دادند [۴۷]. ایتون در سال ۱۹۷۲ رابطه‌ای را به منظور تخمین گرادیان فشار منفذی در سواحل خلیج مکزیک با استفاده از عدد بدون بعد حفاری پیشنهاد کرد [۲۹].

آزادپور و محمدی در سال ۱۳۹۲ با استفاده از پارامترهای حفاری و رابطه‌ی ایتون نشان دادند که

^۱ Rate of penetration

^۲ Jorden & Shirley

^۳ Rehm & McClendon

می‌توان فشار منفذی را هنگام حفاری برآورد کرد. بنابراین می‌توان ضمن تشخیص مناطق با فشار منفذی غیر نرمال، خطر حفاری و هزینه‌های مربوطه در این مناطق را نیز کاهش داد [۱۱].

کردونی و میرزایی در سال ۱۳۹۵ با استفاده از پارامترهای حفاری (نرخ نفوذ، وزن روی مته، سرعت چرخشی رشته حفاری و قطر مته) و روابط ایتون، زامورا توانستند فشار منفذی را در یکی از میدان‌های جنوب غرب ایران تخمین بزنند [۴۸].

طبق سوابق پیش‌بینی فشار منفذی مشاهده می‌شود که تمامی روش‌ها در مخزن و سنگ‌های شیلی به کار گرفته شده‌است. سازند گچساران که به‌عنوان پوش سنگ مخزن آسماری است و جنس این سازند توالی از سنگ‌های تبخیری مانند نمک، انیدریت، مارن‌های قرمز و خاکستری می‌باشد. هدف این پژوهش یافتن فشار منفذی در این سازند، با بهره‌گیری از روش‌های مختلف (ایتون، باورز و غیره) می‌باشد.

۳-۴ اهمیت ترکیب اطلاعات

هدف اصلی ترکیب اطلاعات که تنها نیم‌قرن از معرفی آن می‌گذرد، مدیریت عدم قطعیت و ارتقاء صحت تصمیمات می‌باشد. در واقع ترکیب اطلاعات، ابزاری مفید برای استفاده هم‌زمان از اطلاعات چندین سنجنده به‌جای یک سنجنده است. از مزایای استفاده از چند سنجنده می‌توان به افزودن اطلاعات، کاهش در زمان اندازه‌گیری، افزایش قابلیت اعتماد نتایج، نسبت سیگنال به نویز بزرگ‌تر، کاهش و مدیریت عدم قطعیت در تصمیم‌گیری‌ها، ارائه تصویر کامل‌تری از محیط و کاهش هزینه‌های اندازه‌گیری اشاره نمود. [۴۹].

سه دیدگاه در اهمیت ترکیب اطلاعات عبارت‌اند از:

الف: هر طبقه بند تا حد خاصی قادر به بازشناسی صحیح الگوها است و هیچ طبقه‌بندی قادر به تشخیص صحیح همه الگوها در تمام شرایط نیست. معمولاً برای یک کاربرد خاص، یک طبقه‌بند به‌تنهایی نرخ بازشناسی موردنیاز را برآورده نمی‌کند و به ترکیب چند طبقه‌بند نیاز است.

ب: ویژگی‌های مختلف، بازنمایی‌های متفاوتی از الگو هستند؛ که هر کدام حاوی یک نوع اطلاعات

مفید در مورد آن الگو هستند. برای بازشناسی یک الگو معمولاً به استخراج ویژگی‌های متفاوتی نیاز است. به عنوان مثال استفاده از اثر انگشت، عنیه چشم و صدای شخص یک مسئله متداول در تشخیص هویت است. ترکیب نتایج طبقه‌بندی‌هایی که از ویژگی‌های متفاوتی استفاده می‌کنند، می‌تواند کارایی سیستم تشخیص الگو را بهبود بخشد.

پ: استخراج برخی ویژگی‌ها، منجر به پیدایش یک بردار ویژگی بزرگ می‌شود. تحلیل بردارهای ویژگی بزرگ توسط یک طبقه‌بند، زمان پردازش را طولانی می‌کند. این موضوع در کاربردهایی نظیر سیستم‌های بیومتریک مشکل ایجاد می‌کند. ترکیب طبقه‌بندها، این امکان را فراهم می‌آورد که بردارهای ویژگی با ابعاد بزرگ به بردارهای کوچک‌تری تقسیم‌شده و با طبقه‌بندهای کوچک‌تر و ساده‌تر به صورت هم‌زمان پردازش شوند. طبقه‌بندی‌هایی با ترکیب نتایج این طبقه‌بندها صورت می‌گیرد [۵۰، ۵۱].

روش‌های فازی، برای حالتی استفاده می‌شود که خروجی طبقه‌بندها از نوع چند کلاسه امتیازدار است. به کارگیری این روش برای ترکیب طبقه‌بندها نتایج خوبی به همراه داشته است. با استفاده از روش انتگرال فازی نه تنها می‌توان توانایی یک طبقه‌بند، بلکه هر زیرمجموعه‌ای از طبقه‌بندها را اندازه‌گیری کرد و بدین ترتیب گروه مناسبی از آن‌ها را در سیستم مرکب استفاده کرد [۵۲].

۳-۵ زمینه‌های پژوهشی ترکیب اطلاعات

سوگنو در سال ۱۹۷۹ اولین بار مدل اپراتور انتگرال فازی را ارائه داد؛ که این اپراتور، به کمک اندازه‌های فازی برای حل مسائلی که در آن‌ها ارزیابی یک کمیت بستگی به معیارهای زیادی دارد، مناسب است [۵۳].

یاگر در سال ۱۹۹۴ برای اولین بار یک عملگر برای ترکیب اطلاعات ارائه داد و باگذشت کمتر از دو دهه از اولین ظهور این عملگر، استفاده وسیعی از آن صورت گرفته شد [۵۴].

نبوی کریزی و کبیر در سال ۱۳۸۴ انواع روش‌های مختلف را مورد بررسی قرار دادند؛ به صورتی که برخی روش‌های ترکیب نظیر روش بیز و روش دمپستر-شفر سابقه قبلی طبقه‌بندها را به عنوان دانش

اولیه در قاعده ترکیب استفاده می‌کند و برخی از آن‌ها نظیر روش‌های بیشینه، کمینه، میانگین، حاصل‌ضرب و رأی‌گیری از سابقه قبلی طبقه‌بندها استفاده نمی‌کنند. نتایج نشان داد روش دمپستر-شفر بیشترین پیچیدگی محاسباتی و در عوض بالاترین راندمان را دارد [۵۰].

صیفی و همکاران در سال ۱۳۹۸ با استفاده از سه مدل فیزیک سنگ خودسازگار گاسمن، شوپاین و شووایت دو مدل ترکیبی مختص مخزن را ارائه کردند. ایشان برای انجام این کار از روش ترکیب انتگرال فازی سوگنو و وزن‌دهی افزایشی ساده استفاده کردند [۵۵].

فصل ۴ : زمین شناسی میدان مورد مطالعه و بررسی داده های موجود

۴-۱ مقدمه

سازند گچساران اولین سازند گروه فارس و پوش سنگ مخزن آسماری است. این سازند از لحاظ پیچیدگی سنگ شناسی در هر قسمت به هفت بخش تفکیک می شود. بخش ۱ به عنوان پوش سنگ نیز خوانده می شود و کم ضخامت ترین بخش سازند گچساران را تشکیل می دهد. توضیحات دیگر بخش های گچساران به صورت مفصل در این فصل آمده است [۸].

از جمله مهم ترین داده های مورد استفاده در این پژوهش می توان به نمودارهای پتروفیزیکی اشاره نمود. مزایای استفاده از این داده ها، سهولت و تسریع کار مطالعه و امکان شناسی سازند و تعیین لیتولوژی آن در اعماق (در مواردی که دسترسی مستقیم به نمونه مقدور نباشد) است و مهم ترین نمودارهای پتروفیزیکی برای تعیین لیتولوژی و تغییرات ضخامت در پوش سنگ: نمودارهای صوتی، مقاومت، پرتو گاما، چگالی و تخلخل نوترون می باشند.

۴-۲ معرفی میدان های مورد مطالعه

میدان نفتی آغاچاری از میدان های نفتی ایران است؛ که در شهرستان آغاچاری و در فاصله ۹۰ کیلومتری جنوب شرق اهواز، در استان خوزستان قرار دارد. میدان آغاچاری در سال ۱۳۱۵ توسط شرکت نفت ایران و انگلیس کشف شد و در سال ۱۳۱۷ به بهره برداری رسید. میدان آغاچاری از شمال با میدان نفتی کرنج، از جنوب با میدان نفتی رامشیر، از شرق با میدان نفتی پازنان و از غرب با میدان نفتی مارون هم جوار است. حجم ذخیره در جای نفت خام این میدان در حدود ۲۸ میلیارد بشکه برآورد می شود. هم اکنون میزان تولید نفت خام میدان آغاچاری به طور متوسط ۱۷۰ هزار بشکه و میزان تولید گازهای همراه این میدان ۹۵ میلیون فوت مکعب (۲/۷ میلیون متر مکعب) در روز می باشد. حداکثر میزان تزریق گاز به این میدان نیز روزانه ۲ میلیارد فوت مکعب است که گاز مورد نیاز آن، از طریق خطوط لوله از میدان پارس جنوبی تأمین می شود. هم اکنون تعداد چاه های فعال و غیر فعال این میدان بالغ بر ۲۱۸

حلقه می‌باشد؛ که ۷۳ حلقه چاه نفت، ۳ حلقه چاه گاز و ۳۶ حلقه چاه‌های مشاهده‌ای، تزریقی، توصیفی، معلق و متروکه می‌باشند.

میدان نفتی مارون سومین میدان بزرگ نفتی ایران است؛ که در استان خوزستان، در شمال غرب شهرستان امیدیه و در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب شرق اهواز در مجاورت میدان‌های کوپال، آغاچاری، رامین، شادگان و رامشیر واقع شده است. حجم ذخیره درجای نفت خام این میدان در حدود ۴۶ میلیارد بشکه (۲۲ میلیارد بشکه قابل برداشت) برآورد می‌شود، همچنین حجم گاز درجای میدان مارون ۴۶۲ تریلیون فوت مکعب تخمین زده می‌شود. ظرفیت تولید نفت خام میدان مارون به‌طور میانگین ۵۲۰ هزار بشکه در روز می‌باشد. میدان مارون در سال ۱۳۴۲ (۱۹۶۳ میلادی) کشف و بهره‌برداری از آن در سال ۱۳۴۵ آغاز شد. این میدان از دو مخزن نفتی بنام‌های آسماری و بنگستان و یک مخزن گاز طبیعی بنام خامی تشکیل شده است. تاکنون ۳۴۰ حلقه چاه در این میدان حفاری شده؛ که ۲۵ حلقه چاه در مخزن بنگستان و ۵ حلقه چاه در مخزن خامی حفاری شده است [۵۶].

۴-۲-۱ ابعاد میدان

میدان نفتی آغاچاری ۵۶ کیلومتر طول، ۶ کیلومتر عرض و ۳۸۸۵۰ هکتار مساحت دارد. این میدان همانند دیگر میدان‌های این ناحیه روند عمومی زاگرس را که شمال غرب _ جنوب شرق است، دارا می‌باشد. میدان نفتی آغاچاری در محدوده میانی فروافتادگی دزفول واقع شده و ساختمان آن در سازند آسماری، تاقدیسی طویل و نامتقارن است. در سطح زمین یک گسل واژگونه در یال جنوب این تاقدیس عمل کرده و موجب برگشتگی آن یال در سطح و حذف طبقات سازند گچساران (پوش سنگ) شده است، به همین علت گاز در لایه‌های غیر مخزنی (بخش هفتم سازند گچساران) تجمع داشته؛ یا به سطح زمین منتقل شده است.

طول ساختار مارون در سطح سازند آسماری ۶۷ کیلومتر و عرض آن حداکثر ۷ کیلومتر و در افق سازند ایلام دارای ۶۳ کیلومتر طول و عرض حداکثر ۵ کیلومتر می‌باشد. این در حالی است که ابعاد

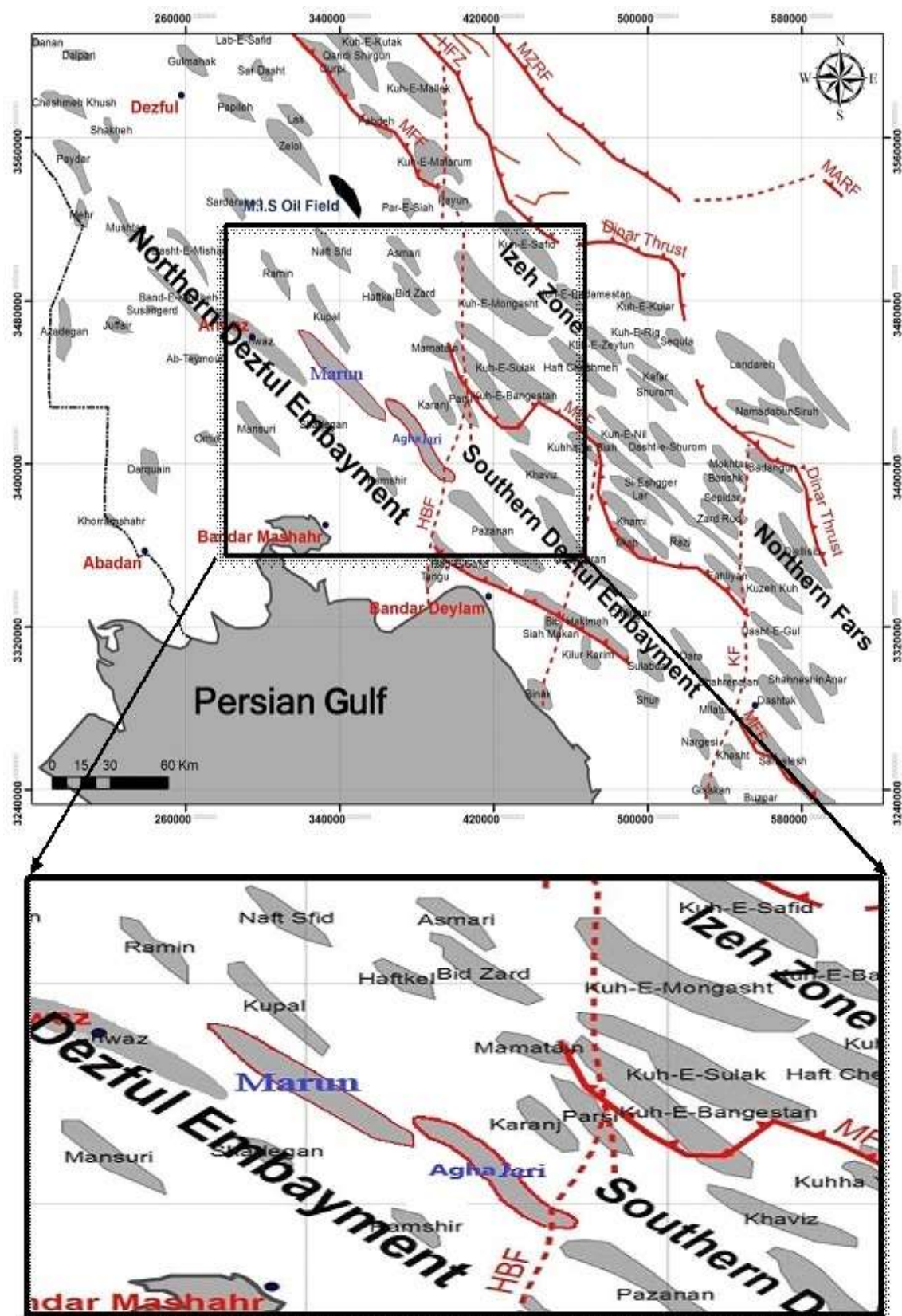
مخزن در رأس سازند داریان به ۶۰ کیلومتر طول و ۳/۵ کیلومتر عرض کاهش می‌یابد. فاصله بین ستیغ مخزن و عمیق‌ترین سطح تماس آب و نفت در سازند آسماری حدود ۲۰۰۰ متر می‌باشد و ضخامت سازند آسماری در این میدان در حدود ۴۵۰ متر است. این میدان یک تاکدیس تقریباً نامتقارن است؛ که دارای شیب متوسط ۴۵-۶۰ درجه در یال جنوب غربی و ۲۵ الی ۴۵ درجه در یال شمال شرقی می‌باشد. همچنین دارای پیچشی در وسط ساختار است؛ که طی آن روند میدان تقریباً ۲۰ درجه تغییر می‌کند.

این مخزن تا محدوده چاه‌های ۲۴ در یال جنوبی و ۷۲ در یال شمالی دارای جهت (شمال غرب- جنوب شرق) همانند ساختمان‌های زاگرس می‌باشد؛ که به طرف انتهای شرقی مخزن از جهت یادشده خارج شده و به سمت شمال منحرف شده است. در میدان مارون به دلیل وقوع دو رخداد مهم تکتونیکی به صورت چین خوردگی^۱ که آثار اصلی کوهزایی زاگرس می‌باشد و خمش^۲ که بعدها در اثر حرکت تحت تأثیر نیروهای تراکمی ایجاد شده و ادامه آن تا به امروز تغییر شیب را در یال‌های این مخزن بسیار متنوع نموده، در نتیجه میزان شعاع انحنا در طول ساختمان در مقاطع مختلف با هم متفاوت گردیده است [۵۷].

موقعیت جغرافیایی میدان‌های مورد مطالعه در (شکل ۴-۱) قابل مشاهده است. بر اساس مطالعات مخزنی، سازند آسماری در این میدان به پنج پهنه تقسیم‌بندی شده؛ که سنگ‌شناسی آن‌ها مشتمل بر انیدریت، ژیپس، مارن و آهک است. همچنین پوش سنگ مخزن آسماری در میدان نفتی مارون درواقع بخش یک سازند تبخیری گچساران می‌باشد.

^۱ Folding

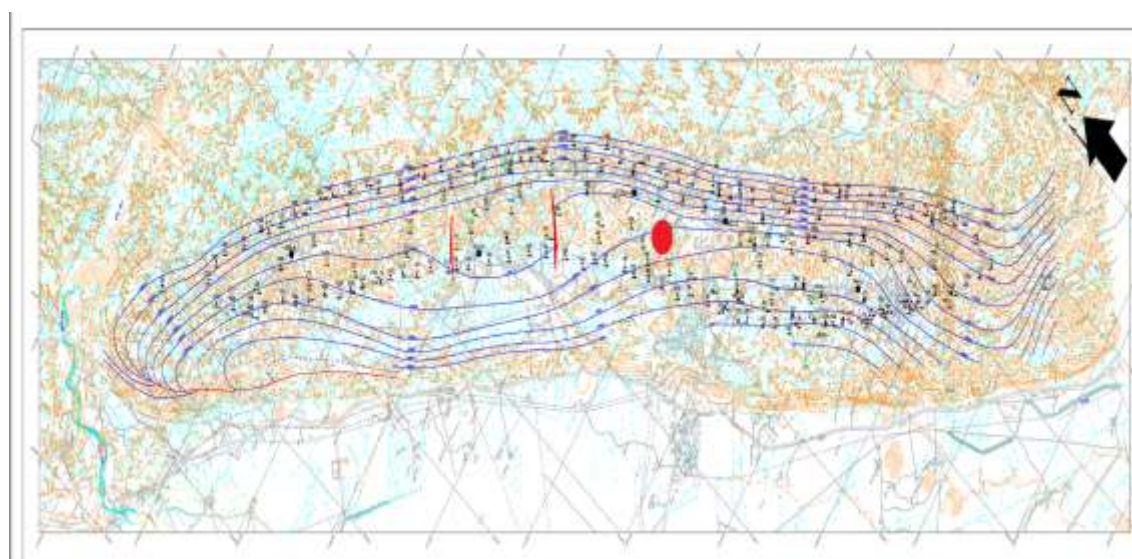
^۲ Bending



شکل ۴-۱: موقعیت جغرافیایی میدان‌های مورد مطالعه [۵۸]

۲-۲-۴ موقعیت چاه‌ها در میدان

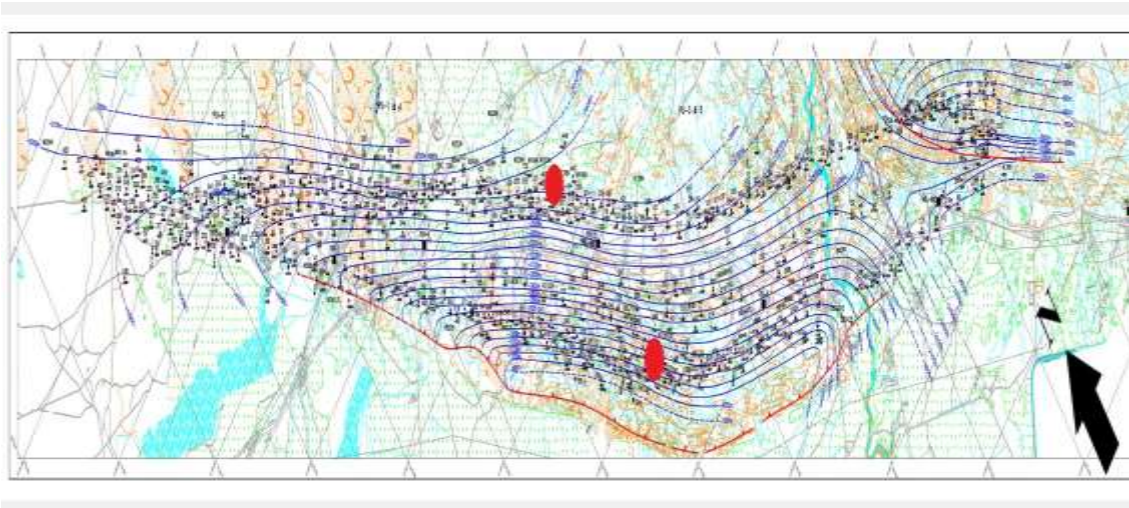
در میدان نفتی آغاچاری داده‌های یک چاه در اختیار قرار گرفته؛ که به اختصار چاه A نامیده می‌شود. چاه A در یال جنوب غربی میدان نفتی آغاچاری واقع شده است و یک ستون چینه‌ای طبیعی از سطح زمین (سازند آغاچاری) تا عمق نهایی درون سازند سروک در این چاه به‌جز قسمت‌هایی از بخش ۲_۶ که در اثر عوامل تکتونیکی حذف‌شده، حفاری شده است. موقعیت چاه A در میدان نفتی آغاچاری در (شکل ۲-۴) آمده است.



شکل ۲-۴: موقعیت چاه A در میدان آغاچاری [۵۸]

در میدان مارون داده‌های دو چاه در اختیار قرار گرفته؛ که به اختصار B و C نام‌گذاری شده‌اند. چاه B بر روی یال جنوبی تاقدیس مارون واقع شده است. سر سازند آسماری در عمق ۲۷۸۵ متر حفار (۲۶۷۶ متر زیر سطح دریا)، نزدیک برنامه پیشنهادی زمین‌شناسی مشخص شده است.

چاه C در یال شمال مخزن آسماری میدان نفتی مارون واقع شده است. سازندها در این چاه با یک ستون (ترادف) چینه‌ای طبیعی از سازند آغاچاری در سطح زمین شروع و تا عمق نهایی (۳۹۳۵ متری) حفاری گردید. فقط بخش‌های ۳ و ۴ سازند گچساران به علت عملکرد گسل و حذف‌شدگی لایه‌هایی از این بخش‌ها غیرقابل تفکیک است. موقعیت چاه‌های B و C در میدان نفتی مارون در (شکل ۳-۴) آمده است.



شکل ۴-۳: موقعیت چاه B و C در میدان نفتی مارون [۵۸]

۴-۳ سازند گچساران

نام این سازند از شهر گچساران (دو گنبدان) گرفته شده است. سازند گچساران قبلاً بنام گروه گچی قاعده‌ای و سری‌های گچی سواحل خلیج فارس و همچنین فارس تحتانی نامیده می‌شد. این سازند به‌عنوان پوش سنگ مخازن نفتی آسماری، نخستین سازند گروه فارس است؛ که در نواحی لرستان، فروافتادگی دزفول تا حوضه خلیج فارس گسترش دارد. در گستره جغرافیایی ضخامت این سازند متغیر است و گاهی به ۱۶۰۰ متر نیز می‌رسد. سازند گچساران یک رسوب هم‌زمان با تکتونیک می‌باشد؛ که طی الیگوسن و میوسن در ناوه‌های ناودیس زاگرس با روند NW-SE (در طی چین خوردگی فعال) رسوب کرده و حوضه پیش بوم زاگرس را به زیرحوضه‌هایی با چرخش ضعیف آب تقسیم کرده است. نقشه‌های لیتوفاسیس سازند گچساران محدوده رسوب‌گذاری این سازند را در یک حوضه باریک (حدود ۱۵۰ کیلومتر عرض) و پیوسته به طول ۲۰۰۰ کیلومتر از جنوب شرق ترکیه تا جزیره قشم نشان می‌دهد. فعالیت دوباره گسل‌های پی‌سنگی در حوضه پیش بوم زاگرس موجب کوتاه شدگی سکانس پوششی و رسوب‌گذاری هم‌زمان با تکتونیک در زیرحوضه‌های محدودشده سازند گچساران گردید و تغییرات ضخامت و رخساره‌ای آن در ارتباط با زمینه ساختاری یک حوضه پیش بوم در حال مهاجرت به سمت جنوب غرب، رشد ساختاری زیرین در طی میوسن پیشین و همچنین رو راندگی ناشی از تکتونیک نمک

درون سازند گچساران در طی تهنشست مولاس در میوسن می‌باشد و در نتیجه مهاجرت، کل حوضه به‌طور هم‌زمان چین خوردند که شاهد این ادعا چین‌خوردگی هم‌زمان میوسن پیشین- میانی سازند گچساران و معادل زمانی آن یعنی سازند رازک می‌باشد.

سازند گچساران در اواخر پلیوسن تحت تأثیر فعالیت تکتونیکی فشارشی قرار گرفته است که در طی آن دیاپیرسم^۱، چین‌خوردگی‌های نامنظم و آشفته، رواندگی و تغییرات ضخامت در آن به وجود آمده است. این فرآیندها تنها تحت تأثیر حرکات فشارشی و شناوری نبوده بلکه وزن چین‌های رشدی (همانند سازند آغاجاری) که هم‌زمان با فرونشست ناودیس‌های حاشیه‌ای پر شده‌اند، این پدیده‌ها را شتاب داده‌اند. سازند گچساران شامل ضخامت زیاد حوضه از سنگ نمک، انیدریت و مارن است که روی سازند آسماری و زیر سازند میشان قرار دارد. از نظر سنی سازند گچساران هم ارزی چندانی ندارد. قاعده سازند گچساران در طول حوضه پیش بوم زاگرس دو زمانه می‌باشد و به سمت شمال غرب با افزایش میزان تبخیری‌ها در این سازند، جوان‌تر می‌گردد.

سنگ‌شناسی کلی سازند گچساران در فروافتادگی دزفول مشتمل بر حدود ۱۶۰۰ متر نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ، سنگ‌آهک و یک لایه شیل بیتومین‌دار می‌باشد. در بعضی از نقاط این سازند ترکیبات سیلویت (کلرور پتاسیم) یافت می‌شود. در سطح زمین به‌جای انیدریت بیشتر ژپس دیده می‌شود و نمک نیز به‌ندرت در سطح زمین یافت شده است. در مناطق شمال رامهرمز، لالی و منطقه دهدشت این نمک‌ها نزدیک به سطح زمین است و برای مصرف خوراکی و صنعتی استخراج می‌شوند. سنگ نمک سازند گچساران ضخیم‌ترین رخساره در مرکز حوضه است و نقشه‌های رخساره‌ای این سازند نشان می‌دهد که توزیع نمک در این حوضه به‌وسیله گسل جبهه کوهستان و بخش برازجان از زون گسله کازرون محدود شده است. بخش اعظم نمک گچساران از رسوب دوباره نمک سری هرمز تشکیل شده است؛ که این نمک‌ها از دیاپیرهایی که در بین سنگ‌های کربناته و آواری شرق گسل کازرون بیرون زده، انحلال یافته است. حجم عظیم نمک میوسن پیشین در شمال غرب حوضه گچساران دلالت می

^۱ Diaperism

کند که حوضه باید با آب‌های آزاد (دریای مدیترانه در شمال غرب و دریای عمان در جنوب شرق) در ارتباط باشد و این ارتباط به‌وسیله سدهایی در عرض حوضه کنترل شده است [۸].

در حال حاضر شاخص اصلی مورد استناد برش تلفیقی غیررسمی است؛ که واتسون^۱ از چاه‌هایی که تا آن زمان حفاری شده بود، ترسیم نمود. از این رو برش تلفیقی چاه‌های میدان‌های مختلف در فروافتادگی دزفول به‌عنوان برش نمونه (غیررسمی) سازند موردنظر قرار گرفته و شامل ۷ بخش است. (جدول ۴-۱) و (جدول ۴-۲) سنگ‌شناسی و ضخامت بخش‌های مختلف از جایی به‌جای دیگر متفاوت و سن آن نیز متغیر است و در برخی مناطق نیز امکان تفکیک بخش‌ها وجود ندارد. به‌طور کلی با لحاظ نمودن اطلاعات وسیعی از چاه‌های حفاری شده در مناطق نفت‌خیز جنوب برای هریک از بخش‌های سازند گچساران یک برش نمونه تحت‌الارضی با مشخصات کامل تعیین شده است. این برش‌های چینه‌ای مآخذ عبارتند از: بخش اول (پوش سنگ) - چاه ۲۵ گچساران / بخش دوم - چاه ۳۱ پازنان / بخش سوم - چاه ۳۱ پازنان / بخش چهارم - چاه ۳۶ پازنان / بخش پنجم - چاه ۱۰۴ آغا‌جاری / بخش ششم - چاه ۱۴۸ آغا‌جاری / بخش هفتم - چاه ۱۴ گچساران.

جدول ۴-۱: موقعیت و ضخامت بخش‌های مختلف سازند گچساران در برش‌های نمونه تلفیقی [۸]

سازند	بخش	نام میدان و شماره چاه	فاصله (متر)	ضخامت (متر)
گچساران	Gs-۷	Gs-۱۴	۷۹۵-۹۳۵	۱۴۰
	Gs-۶	Aj-۱۴۸	۱۳۴۸-۱۵۵۸	۲۱۰
	Gs-۵	Aj-۱۰۴	۱۲۰۷-۱۳۸۷	۱۸۰
	Gs-۴	Pz-۳۶	۱۴۶۵-۱۹۰۶	۴۴۱
	Gs-۳	Pz-۳۱	۲۱۸۹-۲۳۸۷	۱۴۸
	Gs-۲	Pz-۳۱	۲۳۳۷-۲۴۰۵	۶۸
	Gs-۱ (Cap Rock)	Gs-۲۵	۲۳۶۰-۲۴۰۰	۴۰
Gs= Gachsaran, Aj= Aghajari, Pz= Pazanan				

^۱ Watson

جدول ۴-۲: ویژگی‌های بخش‌های هفت‌گانه سازند گچساران در برش نمونه تلفیقی [۸]

بخش	سنگ‌شناسی	ضخامت (متر)
۷	تناوب انیدریت، مارن خاکستری و سنگ آهک (قابل تقسیم به ۵ زون)	۱۴۰
۶	تناوب انیدریت، مارن‌های قرمز و سنگ آهک (در پایین)، سنگ نمک (وسط) انیدریت و مارن (در بالا)	۲۱۰
۵	تناوب انیدریت، مارن قرمز، سنگ نمک و لایه‌های نازک سنگ آهک	۱۸۰
۴	تناوب سنگ نمک ضخیم، مارن‌های خاکستری، انیدریت، کمی لایه‌های سنگ آهک	۴۴۱
۳	تناوب انیدریت و مارن‌های خاکستری ضخیم	۱۴۸
۲	تناوب انیدریت، مارن خاکستری، لایه‌های نازک سنگ آهک و سنگ نمک ضخیم در قاعده	۶۸
۱	تناوب انیدریت، مارن خاکستری، سنگ آهک و یک لایه شیل بیتومین‌دار	۴۰

۴-۳-۱ بخش ۱

این بخش به نام پوش سنگ نیز خوانده می‌شود و کم ضخامت‌ترین بخش سازند گچساران را تشکیل می‌دهد. این بخش از سازند گچساران متشکل از انیدریت، مارن، سنگ آهک و شیل بیتومینه است. سنگ نمک نیز در برخی از میدان‌ها (مانند میدان هفتکل، پازنان، کرنج و غیره) به‌عنوان لیتولوژی پوش سنگ مشاهده می‌شود.

۴-۳-۲ بخش ۲

این بخش، از نمک ضخیم لایه و تناوبی از انیدریت و مارن نازک لایه تشکیل شده است. بخش ۲ سازند گچساران از سه لایه ضخیم نمک و دو لایه انیدریتی با میان لایه‌های نازک مارنی تشکیل گردیده است. لایه ضخیم و قاعده‌ای این سازند تحت عنوان نمک اصلی خوانده می‌شود.

۴-۳-۳ بخش ۳

ترکیب سنگ‌شناسی بخش سوم سازند گچساران شامل لایه‌های نازک و ضخیم انیدریت و مارن‌های خاکستری، نمک و همچنین میان لایه‌های نازک سنگ آهک است. این بخش به علت دربرداشتن لایه‌های مارن ضخیم و میان لایه‌های سنگ آهک، موجب بروز مشکلات فراوانی در حین عملیات حفاری می‌شود. یکی از مهم‌ترین مشخصات این بخش، وجود مارن‌های بیتومن‌دار است.

۴-۳-۴ بخش ۴

عمده لیتولوژی این بخش، نمک‌های ضخیم لایه است. این بخش شامل تناوبی از نمک‌های ضخیم، مارن‌های خاکستری، انیدریت و میان لایه‌هایی از سنگ آهک به مقدار کم است. برخی نواحی، مارن‌های قرمز نیز در این ردیف یافت می‌شود. لایه‌های نمک موجود در بخش ۴ بیشتر در قسمت‌های پایین و بالای آن متمرکز شده‌اند و مرزهای آن را با بخش‌های ۳ و ۵ تشکیل می‌دهند. اغلب پدیده‌های تکتونیکی سازند گچساران ناشی از حرکت توده‌های نمک این بخش است. از مشخصات عمده این بخش، فوران آب‌نمک و تنگ‌شدگی چاه حفاری است.

۴-۳-۵ بخش ۵

ترکیب سنگ‌شناسی این بخش شامل تناوبی از انیدریت، مارن‌های خاکستری و قرمز، نمک و لایه‌های نازک سنگ آهک است. بخش ۵ از قاعده آخرین تجمع‌های مارن قرمز بخش ۶ شروع می‌شود و در ابتدای اولین لایه نمک ضخیم شاخص بخش ۴ خاتمه می‌یابد. مارن‌های موجود در آن بسیار چسبنده و سیلتی هستند. لازم به ذکر است که تعداد و تراکم مارن‌های قرمز در بخش ۵ نسبت به بخش ۶ کمتر است.

۴-۳-۶ بخش ۶

ترکیب سنگ‌شناسی این بخش متشکل از تناوب انیدریت و مارن‌های قرمز به همراه لایه‌های نازک مارن خاکستری شکل است و حد بالایی آن با ظهور اولین لایه مارن قرمز ضخیم تعیین می‌شود. رأس این بخش مترادف است با آغاز منطقه پرفشار، به همین علت ۱ تا ۲ متری قاعده بخش ۷ به‌عنوان نقطه جداره گذاری انتخاب می‌شود. بدین ترتیب زون‌های کم‌فشار بالایی از زون‌های پرفشار پایینی مجزا می‌شوند. بخش ۶ سازند گچساران مانند بخش ۵ دارای تناوب مارن‌های خاکستری و قرمز و لایه‌های نازک سنگ آهک است. تنها تفاوت موجود، ضخامت کمتر و تراکم بیشتر مارن‌های قرمز این بخش است.

۴-۳-۷ بخش ۷

این بخش از سازند گچساران در جنوب غرب ایران اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا بخش مزبور اولاً مرحله آخر رسوبات تبخیری و مرحله تغییر به رسوبات دریایی است. ثانیاً این بخش، آخرین حد سازندهای کم‌فشار آجاجاری و میشان بوده و قاعده آن بر روی بخش‌های ۶-۲ پرفشار سازند گچساران است. نقطه لوله‌گذاری، در حد تحتانی این بخش و در حدود ۱/۵ تا ۲ متر بالای بخش ۶ انتخاب می‌شود. بخش ۷ سازند گچساران شامل تناوب انیدریت، مارن خاکستری و سنگ آهک‌های مارنی است. این بخش دارای لایه‌بندی نازک است و میان لایه‌های سنگ آهک بیشتری نسبت به بخش‌های دیگر دارد [۸، ۵۹].

۴-۴ بررسی داده‌ها

۴-۴-۱ داده‌های پتروفیزیک

در چاه A واقع در میدان آجاجاری، داده‌هایی نظیر نگار پرتو گاما (GR)، نگار چگالی (RHOB)، نگار صوتی (DT)، نگار جذب فوتوالکتریک (PEF) و نگار فطرسنجی (CALI) در قسمت بالای مخزن (سازند گچساران) وجود دارد؛ که از GR، RHOB و DT در این تحقیق استفاده شده است. عمق نمودارهای پتروفیزیکی چاه A در (جدول ۴-۳) آمده است.

جدول ۴-۳: عمق نمودارهای موجود در چاه A

نام نمودار	عمق شروع (m)	عمق پایان (m)
GR	۶۸۳	۱۶۴۴
CALI	۶۶۹	۱۶۵۰
DT	۷۱۳	۱۶۶۵
PEF	۶۹۲	۱۶۵۰
RHOB	۶۹۲	۱۶۵۰

در چاه B واقع در میدان مارون، داده‌هایی نظیر نگار پرتو گاما، نگار چگالی، نگار صوتی، نگار جذب فوتوالکتریک، نگار تخلخل نوترون، نگار مقاومت الکتریکی و نگار قطرسنجی وجود دارد؛ که از GR، RHOB و DT در این تحقیق استفاده شده است. عمق نمودارهای پتروفیزیکی چاه B در (جدول ۴-۴) آمده است.

جدول ۴-۴: عمق نمودارهای موجود در چاه B

نام نمودار	عمق شروع (m)	عمق پایان (m)
CALI	۲۱۴۰	۳۲۹۵
GR	۲۰۰	۳۲۹۸
NPHI	۲۷۶۳	۳۲۹۹
DT	۲۱۰۷	۳۲۹۲
PEF	۲۱۴۰	۳۲۹۹
RHOB	۲۱۴۰	۳۲۹۹
RT	۲۷۷۴	۳۲۹۹

اطلاعات نگاره‌های پتروفیزیکی اغلب از ناحیه پوش سنگ مخزن به پایین برداشت می‌گردند و اطلاعات لایه‌های بالادست معمولاً در دسترس نیست. همچنین، در برخی مواقع ممکن است یک یا چندین نگاره در چاه رانده نشده باشد. در این صورت باید در صورت امکان مقادیر نگاره را با توجه به اطلاعات موجود از سایر نگاره‌ها تخمین زد. لازم به ذکر است که داده‌های نگار صوتی در این چاه از عمق ۲۱۰۷ متری (بالای بخش ۳ گچساران) در دسترس است و برای تخمین آن در مابقی بخش‌های گچساران از داده‌های حفاری کمک گرفته شده است. در ادامه، روش تخمین نگاره صوتی در سنگ با استفاده از اطلاعات موجود پتروفیزیکی و پارامترهای حفاری در چاه B و C میدان مارون شرح داده می‌شود.

در چاه C واقع در میدان مارون، داده‌هایی نظیر نگار پرتو گاما، نگار چگالی، نگار صوتی، نگار جذب فوتوالکتریک، نگار تخلخل نوترون، نگار مقاومت الکتریکی، نگار قطرسنجی و سرعت درون چاهی (Vertical Seismic Profiling) وجود دارد؛ که از GR، RHOB، DT و سرعت درون چاهی در این

تحقیق استفاده شده است. عمق نمودارهای پتروفیزیکی چاه C در (جدول ۴-۵) آمده است.

جدول ۴-۵: عمق نمودارهای موجود در چاه C

نام نمودار	عمق شروع (m)	عمق پایان (m)
CALI	۲۸۷۶	۳۹۳۲
GR	۲۸۷۶	۳۹۱۶
NPHI	۲۸۷۶	۳۹۳۵
DT	۲۸۷۶	۳۹۲۴
PEF	۲۸۷۶	۳۹۴۰
RHOB	۲۸۷۶	۳۹۴۲
RT	۳۵۵۷	۳۹۳۲
VSP ^۱	۸۰	۳۸۶۰

۴-۴-۲ داده‌های حفاری

پارامترهای حفاری در تمامی چاه‌ها از سطح تا پایان حفاری هر چاه در دسترس بوده؛ که از پارامترهایی نظیر نرخ نفوذ حفاری، وزن روی مته، سرعت چرخشی رشته حفاری، وزن گل و قطر مته در این تحقیق استفاده شده است.

۴-۴-۳ داده‌های اندازه‌گیری شده فشار منفذی

برای شناسایی رفتار جریان و خواص سیال یک مخزن، نمونه‌گیری دقیق اهمیت فراوانی دارد. نمونه‌های سیال مخزن گرفته‌شده از ابزارهای آزمون کابلی و نمونه‌گیری، به آزمایشگاه فرستاده می‌شوند و در آنجا اطلاعات مهمی مانند ترکیب اجزا سیال، خواص فیزیکی و حجم نسبی نفت، گاز، آب و فیلتراسیون گل از نمونه سیال کسب می‌شود. تاکنون ادوات و دستورالعمل‌های متعددی باهدف انجام نمونه‌گیری با بالاترین کیفیت ممکن، توسعه یافته‌اند. داده‌های حاصل از چاه آزمایی، دقیق‌ترین اطلاعات از فشار چاه

^۱ Vertical Seismic Profiling

و یا نواحی اطراف چاه را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. طیف وسیعی از ابزارهای آزمون سیال سازند امروزه در دسترس هستند [۱۷]؛ چند نمونه از این ابزارها عبارتند از: RFT، MDT و XPT. متأسفانه در این تحقیق هیچ‌کدام از این موارد ذکر شده موجود نبوده و همین مسئله باعث ایجاد مشکلات فراوان در بخش‌های مختلف این تحقیق است.

۴-۵ تخمین نگار صوتی

سازند گچساران در چاه B واقع در میدان مارون از عمق ۱۲۹۶ متری شروع شده و تا عمق ۲۷۸۷ متری که سر سازند آسماری می‌باشد، ادامه یافته است. در این سازند از عمق ۲۱۰۰ متری تا مخزن اطلاعات نگار صوتی موجود می‌باشد. لذا با کمک داده‌های پتروفیزیکی و پارامترهای حفاری در دو چاه B و C و در نهایت با استفاده از الگوریتم‌های شبکه عصبی مقادیر نگار صوتی از سطح تا عمق ۲۱۰۰ متری تخمین زده شد.

علاوه بر استفاده از روش‌های رگرسیونی، یکی دیگر از روش‌های قابل اطمینان برای پیش‌بینی نگار صوتی، استفاده از شبکه عصبی جهت پیش‌بینی تابع تغییرات نگار صوتی نسبت به سایر پارامترهای وابسته است. به همین منظور، در این تحقیق با استفاده از نگاره‌های مشترک موجود از سایر چاه‌های میدان مارون، ابتدا به شناسایی عوامل مؤثر بر نرخ تغییرات نگار صوتی پرداخته و سپس با به‌کارگیری شبکه عصبی^۱، آموزش^۲، آزمون^۳ و اعتبارسنجی^۴ شبکه انجام می‌گیرد. در نهایت مقادیر نگار صوتی برای چاه B میدان مارون تخمین زده می‌شود.

به این منظور، ابتدا پارامترهای مشترک بین دو چاه B و C برای انجام فرایند تخمین نگار صوتی شناسایی می‌شود. از میان پارامترهای پتروفیزیکی موجود در دو چاه، تنها نگار GR مشترک می‌باشد.

^۱ Neura network

^۲ Train

^۳ Test

^۴ Validation

بنابراین برای تخمین دقیق‌تر به پارامترهای حفاری رجوع می‌شود. با وارد کردن پارامترهای منتخب و پیاده‌سازی شبکه در چاه‌های B و C مقادیر ضریب همبستگی و خطای استاندارد تخمین به شرح (جدول ۴-۶) می‌باشد.

جدول ۴-۶: نتایج حاصل از تخمین نگار صوتی با استفاده از شبکه عصبی MLP

چاه	R	R^2	RMSE
C	۰٫۹۱۸	۰٫۸۴۳	۸٫۲۷
B	۰٫۸۶۵	۰٫۷۴۸	۱۳٫۸۵۲

در گام آخر، با به‌کارگیری نگاره‌های GR و پارامترهای حفاری نظیر نرخ نفوذ حفاری، وزن روی مته، سرعت چرخشی رشته حفاری و وزن گل از چاه C میدان مارون، مقادیر نگاره صوتی در این چاه با استفاده از شبکه عصبی^۱ MLP تخمین زده شده است. با توجه به محوریت نداشتن این موضوع در این پژوهش، از ذکر جزئیات تکمیلی این بخش خودداری می‌گردد.

۴-۶ جمع بندی

در این فصل پس از معرفی میدان‌های مورد مطالعه به ابعاد و موقعیت چاه‌ها در میدان پرداخته شده است و سپس سازند گچساران که بخش اصلی این تحقیق می‌باشد به صورت مفصل آورده شده و به دنبال آن داده‌های موجود اعم از داده‌های پتروفیزیکی، داده‌های حفاری و داده‌های آزمایشگاهی فشار به صورت مجزا مورد بحث و بررسی قرار گرفت و در نهایت توضیح مختصری در مورد تخمین داده‌های ناقص با استفاده از شبکه عصبی MLP آمده است.

^۱ Multilayer perceptron

فصل ۵ : بررسی مکانیسم فشار غالب میدان و روش شناسی تحقیق

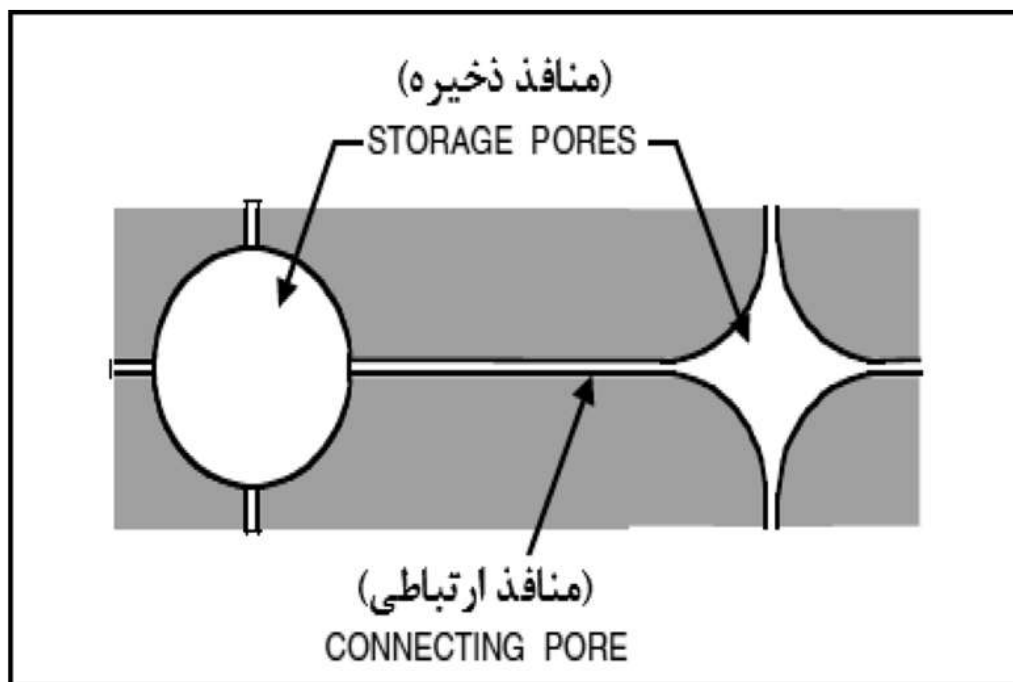
۵-۱ مقدمه

فشار منفذی یکی از پارامترهای کلیدی در مدل ژئومکانیکی است که امکان تصمیم‌گیری بهینه در مورد حفاری و برنامه‌ریزی چاه، بررسی یکپارچگی پوش‌سنگ و همچنین ارزیابی اهداف اکتشافی را فراهم می‌کند. علاوه به این آگاهی از مقدار فشار منفذی باعث می‌شود تا با طراحی صحیح وزن گل حفاری و پوشش جداره چاه‌ها بتوان فشارهای غیرعادی خطرآفرین را کنترل کرد [۴]. همان‌گونه که قبلاً بیان شد، در مسئله‌ی فشار منفذی رویکردهای گوناگونی وجود دارد. در این فصل به رویکردها و روش‌های استفاده شده برای تخمین فشار منفذی در این پایان‌نامه و نظریه‌های آن‌ها پرداخته می‌شود.

در این پایان‌نامه از میان روش‌های وابسته به سرعت موج فشاری و سرعت، روش‌های ایتون و باورز مورد استفاده قرار گرفته است. پس ابتدا تئوری‌های این روش‌ها بررسی می‌شوند. روش دیگری که در انجام این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفت، روش ایتون مبتنی بر پارامترهای حفاری است. همان‌گونه که قبلاً هم بیان شد، این روش وابسته به پارامترهای حفاری است و رابطه‌ی ریاضی مشخص با پارامتر فشار منفذی دارد.

۵-۲ بررسی مکانیسم ایجاد فشار بالا در سازند مورد مطالعه

به‌منظور تشخیص مکانیسم ایجاد فشار بالا از نمودارهای چاه پیمایی در ارتباط با تخلخل شامل نمودارهای صوتی، مقاومت، نوترون و چگالی استفاده می‌شود. نمودارهای چگالی و نوترون بیانگر خواص توده‌ای سنگ و نمودارهای صوتی و مقاومت بیانگر خواص انتقالی سنگ هستند. کتساب و همکارانش، ساختار تخلخل سنگ را ترکیبی از منافذ ارتباطی (گلوگاه‌های هدایت جریان) و منافذ ذخیره می‌دانند (شکل ۵-۱) [۶۰]. میزان اثربخشی خواص توده‌ای سنگ در پاسخ به نمودارهای چگالی و نوترون برای هر دو نوع تخلخل یکسان است؛ اما میزان اثربخشی خواص انتقالی در پاسخ به نمودارهای صوتی و مقاومت برای منافذ ارتباطی بیشتر است.



شکل ۵-۱: مدل ساختار منافذ ذخیره و منافذ ارتباطی [۹].

باورز و کتساب^۱، از اختلاف بین خواص عبوری^۲ و خواص توده‌ای^۳ سنگ به‌منظور توصیف فشار بالا استفاده کردند. در سنگ‌های با تحکیم متوازن و فشار منفذی نرمال (فشار هیدرواستاتیک)، کاهش تخلخل برحسب عمق در طول خط روند تراکم‌پذیری نرمال رخ می‌دهد؛ اما زمانی که فشار بالا در اثر تحکیم نامتوازن ایجاد شده باشد، باعث کاهش یا توقف روند تراکم‌پذیری می‌شود؛ ولی تنش مؤثر (نیروی وارده به ماتریکس سنگ) کاهش نمی‌یابد [۶۱].

نمودارهای پتروفیزیکی و داده‌هایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، مربوط به یکی از میدان‌های هیدروکربنی جنوب ایران است. به‌منظور تشخیص مکانیسم ایجاد فشار بالا، از نمودارهای سرعت امواج صوتی و چگالی استفاده شده است. باورز از نمودار سرعت در مقابل چگالی به‌منظور تشخیص فشار بالا ناشی از تحکیم نامتوازن و مکانیسم باربرداری استفاده کرد. در شرایط تحکیم نامتوازن، روند افزایش نمودار سرعت در مقابل چگالی بر روی روند تحکیم نرمال متوقف‌شده ولی در

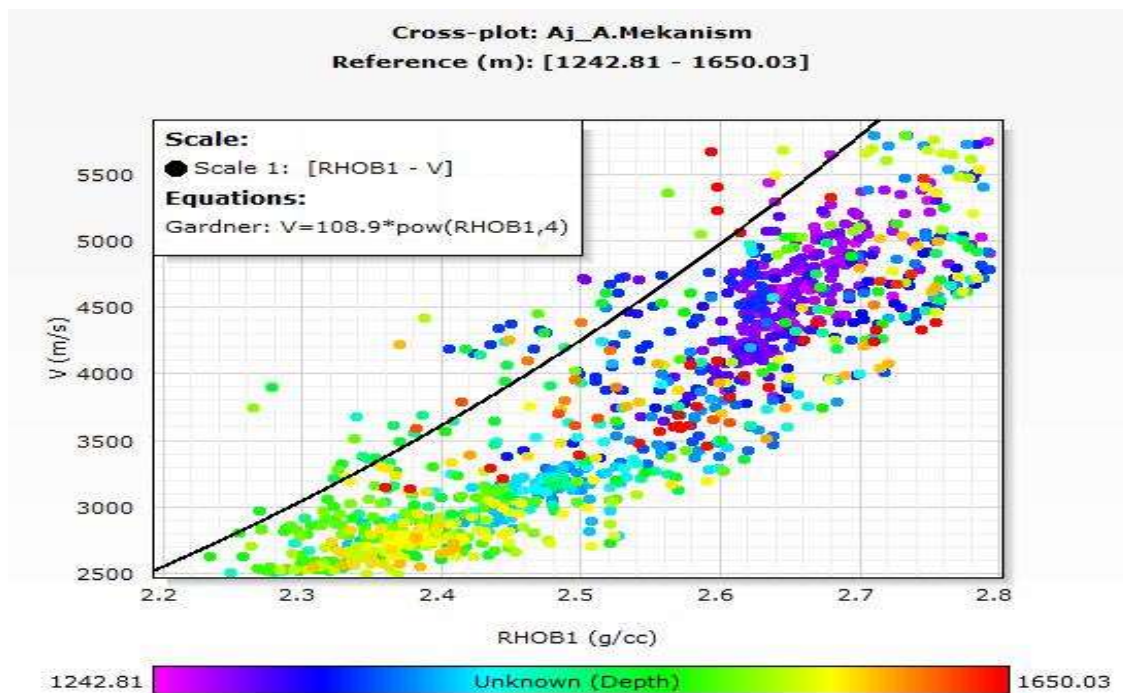
^۱ Katsab

^۲ Transport

^۳ Bulk

شرایط باربرداری یک روند برگشتی در زیر نمودار ایجاد می‌شود (شکل ۲-۴).

نمودار سرعت در مقابل چگالی بر اساس اطلاعات حاصل از چاه‌های A، B و C، در شکل‌های زیر نشان داده شده است. مطابق شکل‌های زیر با افزایش عمق، چگالی و سرعت افزایش می‌یابد؛ که این بیانگر کاهش تخلخل با افزایش عمق است.

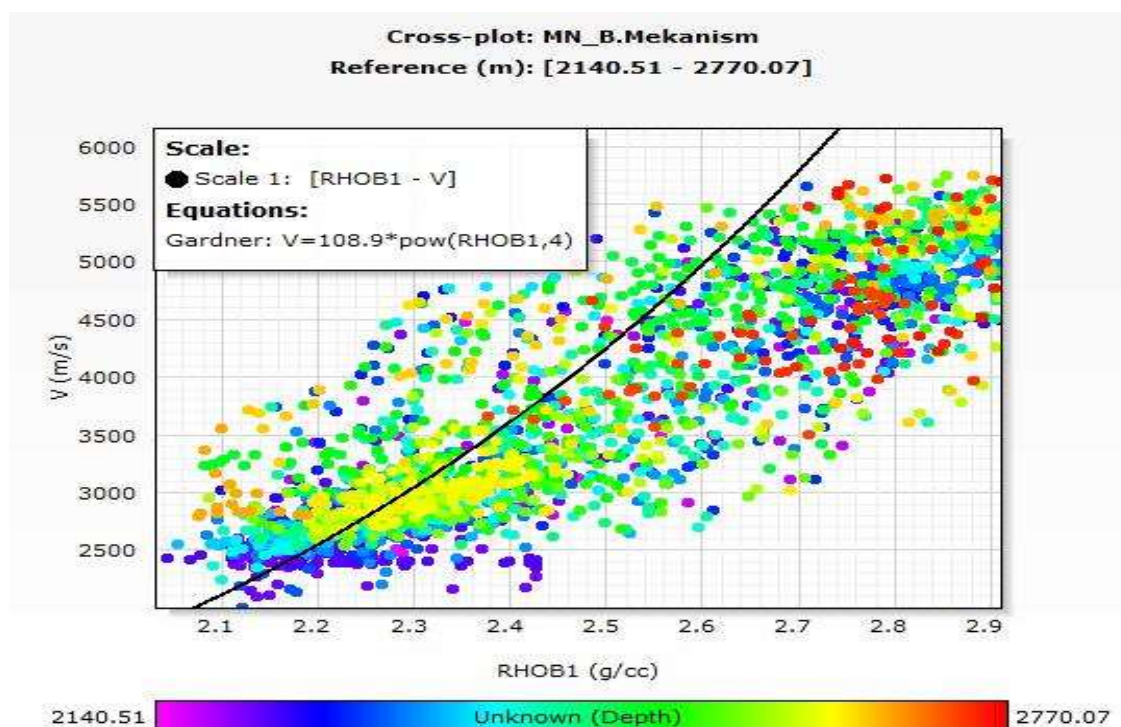


شکل ۲-۵: نمودار سرعت در مقابل چگالی با رنگ‌بندی برحسب عمق در چاه A

همان‌طور که در (شکل ۲-۵) مشاهده می‌شود، نمودار سرعت در مقابل چگالی بر اساس اطلاعات حاصل از چاه A واقع در میدان آغاچاری می‌باشد و نمونه‌ها بر اساس عمق رنگ‌بندی شده‌اند؛ که در راهنمای زیر نمودار آمده است. با توجه به (شکل ۲-۴) هیچ‌گونه انحرافی در زیر نمودار مبنی بر مکانیسم باربرداری مشاهده نمی‌شود ولی قرارگیری نقاط عمق‌های پایین بر روی نقاط قبلی، به‌نوعی روند افزایش خط روند نرمال و کاهش تخلخل را متوقف کرده؛ که این می‌تواند بیانگر مکانیسم تحکیم نامتوازن باشد. هرچند باید در نظر داشت کربنات‌ها در برابر تحکیم مقاوم هستند. همچنین روند نمودار دارای تطابق نسبتاً

خوبی با روند گاردنر^۱ (روند تراکم نرمال) است. دور بودن روند نمودار از روند گاردنر بستگی به حجم بالای شیل در سازند دارد [۶۲].

(شکل ۳-۵) نمودار سرعت در مقابل چگالی بر اساس اطلاعات حاصل از چاه B میدان مارون می‌باشد.

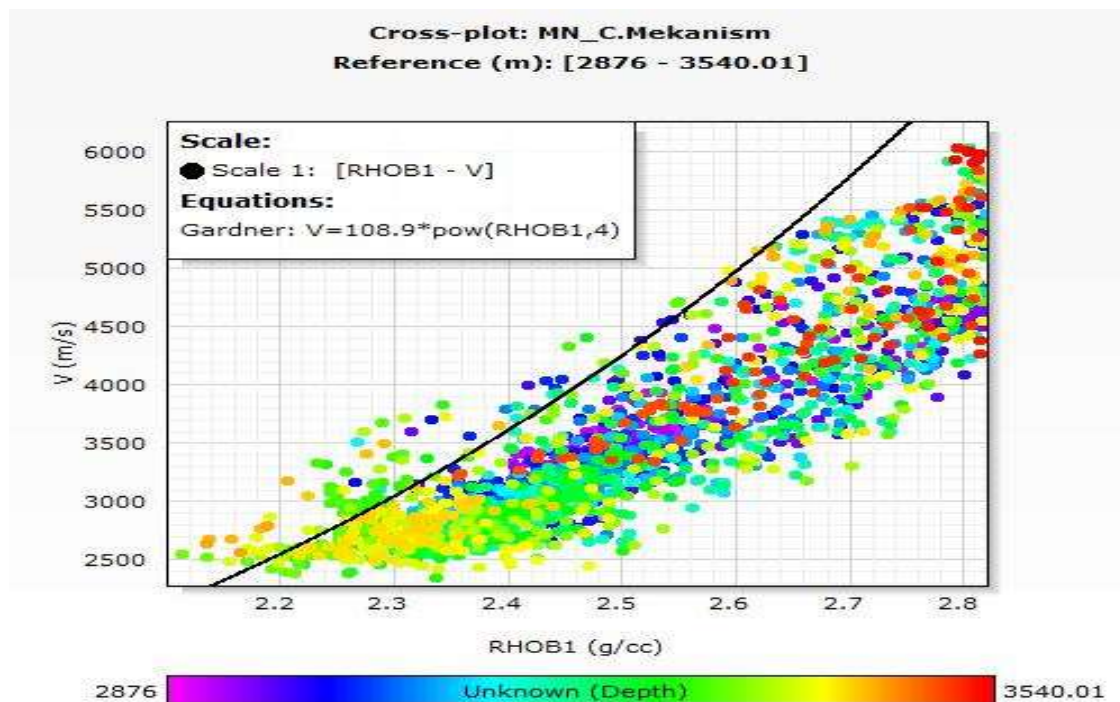


شکل ۳-۵: نمودار سرعت در مقابل چگالی با رنگ‌بندی برحسب عمق در چاه B

همان‌طور که در (شکل ۳-۵) مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه انحرافی در زیر نمودار مبنی بر مکانیسم باربرداری مشاهده نمی‌شود؛ ولی قرارگیری نقاط عمق‌های پایین بر روی نقاط قبلی، به نوعی روند افزایش خط روند نرمال و کاهش تخلخل را متوقف کرده؛ که این می‌تواند بیانگر مکانیسم تحکیم نامتوازن باشد. هرچند باید در نظر داشت کرنات‌ها در برابر تحکیم مقاوم هستند. همچنین روند نمودار دارای تطابق نسبتاً خوبی با روند گاردنر (روند تراکم نرمال) است.

(شکل ۴-۵) نمودار سرعت در مقابل چگالی بر اساس اطلاعات حاصل از چاه C میدان مارون می‌باشد.

^۱ Anselmati and Gardner



شکل ۴-۵: نمودار سرعت در مقابل چگالی با رنگ‌بندی برحسب عمق در چاه C

همان‌طور که در (شکل ۴-۵) مشاهده می‌شود، هیچ‌گونه انحرافی در زیر نمودار مبنی بر مکانیسم باربرداری مشاهده نمی‌شود؛ ولی قرارگیری نقاط عمق‌های پایین بر روی نقاط قبلی، به نوعی روند افزایش خط روند نرمال و کاهش تخلخل را متوقف کرده؛ که این می‌تواند بیانگر مکانیسم تحکیم نامتوازن باشد. هرچند باید در نظر داشت کرنات‌ها در برابر تحکیم مقاوم هستند. همچنین روند نمودار دارای تطابق نسبتاً خوبی با روند و گاردنر (روند تراکم نرمال) است.

طبق مشاهدات مراحل قبل شواهد کافی مبنی بر ایجاد باربرداری در منطقه دیده نمی‌شود و مکانیسم غالب ایجاد فشار بالا در میدان‌های مذکور، بیشتر بیانگر تحکیم نامتوازن است. از این رو، در تعیین فشار منفذی روش ایتون و فرم ساده روش باورز که تحکیم نامتوازن را به‌عنوان اصلی‌ترین مکانیسم فشار غیرطبیعی در نظر می‌گیرند؛ می‌توانند در تعیین فشار منافذ استفاده شوند. درواقع روش ایتون و باورز جزء رایج‌ترین روش‌ها در تعیین مقدار فشار منفذی هستند؛ که تحکیم نامتوازن را به‌عنوان عامل اصلی ایجاد فشار بالا در نظر می‌گیرند.

۵-۳ مدل‌های فشار منفذی مورد استفاده

تاکنون روش‌ها و مدل‌های زیادی برای تخمین فشار منفذی ارائه شده که صرف‌نظر از دقت آن‌ها، میزان اهمیت دستیابی به فشار منفذی را نشان می‌دهد. از جمله روابطی که در این فصل بکار گرفته شده می‌توان به روابط ایتون و باورز اشاره کرد که در بخش‌های زیر به صورت جداگانه و کامل معرفی شده‌اند.

- روش ایتون با استفاده از زمان سیر موج فشاری
- روش ایتون با استفاده از پارامترهای حفاری
- روش باورز

۵-۳-۱ روش ایتون

روش ایتون یکی از رایج‌ترین روش‌ها در تعیین فشار منفذی است؛ که تحکیم نامتوازن را به عنوان عامل اصلی ایجاد فشار بالا در نظر می‌گیرد. بر اساس روش ایتون ابتدا تغییرات پارامترهای مختلف پتروفیزیکی وابسته به تخلخل مانند زمان انتقال موج صوتی در شیل یا لایه‌های شیلی (مانند آهک‌های آرژیلیتی دارای فشار طبیعی)، بررسی و سپس روند طبیعی بر اساس این لایه‌ها تعیین می‌شود [۶، ۲۹].

الف- با استفاده از زمان عبور موج صوتی

ایتون یک معادله تجربی برای کمی سازی فشار منفذی با استفاده از نگارهای چاهی زمان انتقال موج صوتی پیشنهاد کرد. وی تحکیم نامتوازن را به عنوان مکانیسم اصلی تولید مناطق پرفشار در نظر گرفت و انحراف در روند طبیعی فشردگی شیل را به کمک نگار صوتی واسنجی کرد؛ که بیشتر بر پایه روش ارائه شده اولیه توسط هاتمن و جانسون است [۶].

روش تخمین فشار منفذی ایتون براساس زمان عبور موج در بعضی از حوضه‌های نفتی کاربرد دارد و در آن تأثیرات باربرداری در نظر گرفته نمی‌شود. این عامل کارایی این روش را در مناطق پیچیده از نظر زمین‌شناسی همانند سازندهای دارای بالآمدگی، محدود می‌کند.

ایتون در سال ۱۹۷۵ رابطه‌ی تجربی (۵-۱) برای تخمین گرادیان فشار منفذی با استفاده از زمان

انتقال موج فشاری ارائه کرد.

$$P_{pg} = OBG - (OBG - P_{ng}) \left(\frac{\Delta t_n}{\Delta t} \right)^3 \quad (۱-۵)$$

در رابطه‌ی بالا P_{pg} گرادیان فشار منفذی سازند؛ OBG گرادیان تنش روباره؛ P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک (به‌صورت نرمال برابر است با ۰.۴۵ psi/ft یا ۱.۰۳ Mpa/Km که این مقدار به میزان شوری آب وابسته است)؛ Δt_n زمان انتقال موج در شیل‌ها با فشار نرمال است؛ Δt زمان انتقال موج در شیل‌ها است که از نگارهای چاه‌پیمایی و همچنین از سرعت لرزه‌ای مقطعی به‌دست می‌آید [۳۰]. در روش ایتون تعیین خط روند نرمال اهمیت بسزایی دارد. شکل کلی معادله خط روند نرمال زمان انتقال موج صوتی نسبت به عمق را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد [۲].

$$\Delta t_n = \Delta t_m + (\Delta t_{ml} - \Delta t_m) e^{-cz} \quad (۲-۵)$$

Δt_m زمان انتقال موج صوتی در ماتریکس شیل (شیل با تخلخل صفر) است؛ Δt_{ml} زمان انتقال موج صوتی در سطح؛ z عمق متناظر و c ضریب ثابت تجربی می‌باشد.

ب- با استفاده از پارامترهای حفاری

عدد بدون بعد حفاری (d_{exponent}) برای تجزیه و تحلیل فشار منفذی سازند ارائه شده است. این تلاش برای نرمال کردن سرعت نفوذ حفاری در مدل بینگهام، با توجه به پارامترهای وزن روی مته، سرعت چرخشی رشته حفاری و قطر مته اتفاق افتاد. هدف بررسی رابطه بین نرخ نفوذ حفاری و دیفرانسیل فشار موجود بین فشار منفذی سازند و ستون فشار هیدرواستاتیک در دیواره چاه است. به‌دست آوردن این رابطه می‌تواند به پیش‌بینی تغییرات فشار منفذی با توجه به داده‌های حفاری منجر شود.

جوردن و شرلی (۱۹۶۶) معادله بینگهام را برای d حل کردند [۴۵].

$$d = \frac{\log\left(\frac{ROP}{60 * RPM}\right)}{\log\left(\frac{12 * WOB}{10^3 * d_{bit}}\right)} \quad (۳-۵)$$

که در معادله بالا d عدد بدون بعد حفاری؛ ROP نرخ نفوذ حفاری برحسب ft/h ؛ RPM سرعت چرخش رشته حفاری برحسب rpm ؛ WOB وزن روی مته برحسب Klb و d_{bit} قطر مته برحسب inch می باشد. این روش با در نظر گرفتن اثر فشار دیفرانسیل در نرمال سازی سرعت نفوذ پیشنهاد شده است. رحم و مکلدون در سال ۱۹۷۱ معادله (۳-۵) را با وزن گل اصلاح کردند و آن را با d_c نشان دادند و معادله آن به صورت (۴-۵) می باشد [۴۷].

$$d_c = \frac{\log\left(\frac{\text{ROP}}{60 * \text{RPM}}\right)}{\log\left(\frac{12 * \text{WOB}}{10^3 * d_{\text{bit}}}\right)} * \left(\frac{\rho_{\text{normal}}}{\rho_{\text{actual}}}\right) \quad (4-5)$$

که در معادله بالا ρ_{normal} گرادیان هیدرواستاتیک نرمال برحسب PPG و ρ_{actual} وزن گل اندازه گیری شده برحسب PPG می باشد.

ایتون در سال ۱۹۷۲ با استفاده از روابط (۳-۵) و (۴-۵) به منظور تخمین گرادیان فشار منفذی در سواحل خلیج مکزیک با استفاده از عدد بدون بعد حفاری، رابطه ی (۵-۵) را ارائه کرد.

$$P_{\text{pg}} = \text{OBG} - (\text{OBG} - P_{\text{ng}}) * \left(\frac{dc}{dc_n}\right)^b \quad (5-5)$$

در رابطه ی بالا P_{pg} گرادیان فشار منفذی سازند؛ OBG گرادیان تنش روباره؛ P_{ng} گرادیان فشار منفذی هیدرواستاتیک؛ dc عدد بدون بعد حفاری؛ dc_n خط روند نرمال عدد بدون بعد حفاری و توان b در معادله بالا به محیط زمین شناسی منطقه ای بستگی دارد و بین $1/5$ - $1/2$ متغیر است [۶،۲۹].

۵-۳-۲ روش باورز

باورز در سال ۱۹۹۵ معادله ترزاقی (۱-۳) را برای پیش بینی فشار منفذی به کار گرفت. روش وی نیز مبتنی بر تنش مؤثر بوده است و هر دو عامل تراکم نامتوازن و مکانیسم باربرداری حاصل از انبساط سیال را به عنوان مکانیسم های اصلی ایجاد فشارهای غیرعادی در نظر می گیرد. با توجه به اینکه عامل تراکم موجب کاهش مقدار تخلخل و در نتیجه باعث افزایش سرعت صوت می شود، بنابراین نمودار بارگذاری در سنگ های با تراکم نرمال، دارای روند نرمال افزایش سرعت و تنش مؤثر خواهد بود. به هر حال

وقتی که سیال منفذی محبوس شود، فشارهای بالا ایجاد خواهد شد. در این شرایط، در رسوبات با تخلخل پایین، عمل تراکم مهار شده و تنش مؤثر با افزایش ضخامت رسوب ثابت می ماند [۳۱].

باورز (۱۹۹۵) تنش های مؤثر را از داده های فشار منفذی اندازه گیری شده شیلی و تنش روباره محاسبه کرد و سرعت سیر صوتی مربوط به داده ها چاه پیمایی در شیب خلیج مکزیک را مطابقت داد. او رابطه ای بین سرعت موج و تنش مؤثر ارائه کرد؛ که به صورت معادله (۶-۵) می باشد.

$$V_p = V_{ml} + A \cdot \sigma_e^B \quad (6-5)$$

در رابطه ای بالا V_p سرعت موج فشاری در عمق مورد نظر، V_{ml} سرعت موج فشاری در سطح زمین است و به طور معمول برابر با $V_{ml} = 5000 \text{ ft/s}$ یا 1250 m/s است. A و B پارامترهای ثابت هستند؛ که از برازش سرعت در مقابل داده های تنش مؤثر بدست می آیند [۳۱].

در نهایت باورز با استفاده از روابط (۱-۳) و (۶-۵) رابطه ای (۷-۵) را برای به دست آوردن فشار منفذی ارائه کرد.

$$P = \sigma_v - \left(\frac{V_p - V_{ml}}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (7-5)$$

برای چاه های خلیج مکزیک مقادیر $A = 10-20$ و $B = 0.7-0.75$ در واحد انگلیسی (P و σ_v در واحد psi، V_p و V_{ml} به صورت ft/s) استفاده شده است [۶].

تنش مؤثر و سرعت موج فشاری در صورتی که سازند دارای بالآمدگی یا باربرداری باشد، از منحنی دست نخورده پیروی نمی کند. باورز همچنین برای در نظر گرفتن اثر بالآمدگی و باربرداری، معادله ای زیر را ارائه داد:

$$V_p = V_{ml} + A \left[\sigma_{\max} \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{\max}} \right)^{\frac{1}{U}} \right]^B \quad (8-5)$$

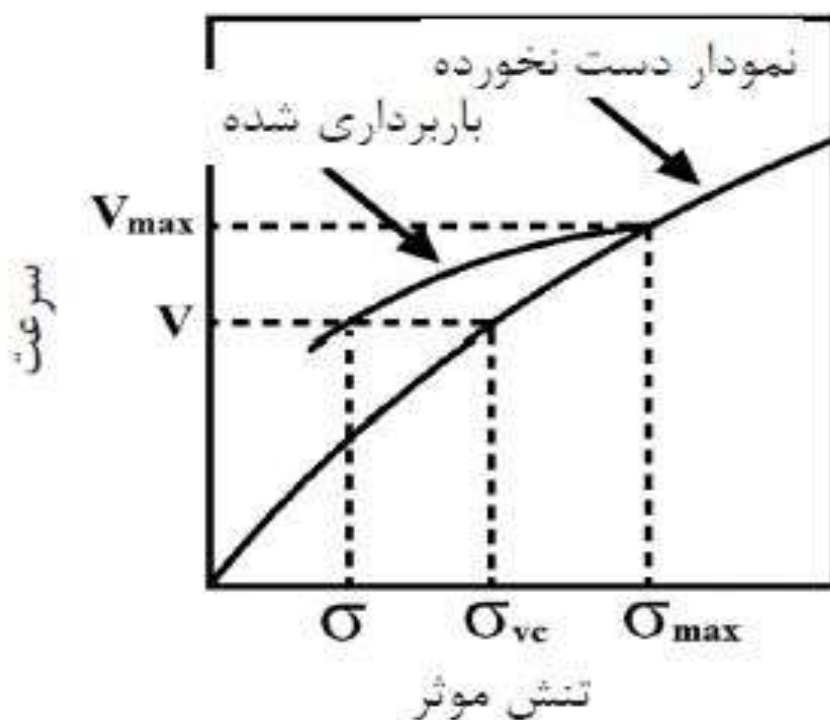
$$\sigma_{\max} = \left(\frac{V_{\max} - V_{ml}}{A} \right)^{\frac{1}{B}} \quad (9-5)$$

در اینجا $\sigma_{\max}$ و $V_{\max}$ به ترتیب تخمین‌هایی از تنش مؤثر و سرعت در شروع باربرداری می‌باشند. در صورتی که لیتولوژی تغییر فاحشی نداشته باشد، $V_{\max}$ حداکثر سرعت در محل معکوس شدن نمودار دست نخورده با توجه به (شکل ۵-۵) می‌باشد [۳].

با جابه‌جایی متغیرهای فوق در معادله (۵-۸) و در نهایت با استفاده از معادله (۳-۱)، مقدار فشار منفذی در صورت باربرداری به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{ulo} = \sigma_v - \left(\frac{V_p - V_{ml}}{A} \right)^{\frac{U}{B}} * (\sigma_{\max})^{1-U} \quad (۵-۱۰)$$

P_{ulo} فشار منفذی در هنگامی که سازند دچار باربرداری یا بالآمدگی است و U پارامتر بالآمدگی است. سایر پارامترها نیز در روابط قبل معرفی شده‌اند. روش باورز در بسیاری از میدان‌های نفتی رابطه‌ای کاربردی است؛ اما این روش در رسوبات سطحی تحکیم نشده به دلیل سرعت کم سازند، مقدار فشار منفذی را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد [۶، ۳۱].



شکل ۵-۵: نمودار رفتار پلاستیک رسوبات در حالت دست‌نخورده و حالت باربرداری [۳]

۵-۴ روش‌های ترکیب اطلاعات مورد استفاده

به زبان ساده، روش تلفیق داده‌ها به ترکیب داده‌های حاصل از حسگرهای مختلف برای پیش‌بینی دقیق‌تر خواص و حالات یک سیستم می‌پردازد. این تکنیک به ترکیب داده‌های جمع‌آوری شده از منابع مختلف پرداخته و با ربط دادن اطلاعات حاصل شده به شرایط سامانه مورد تحلیل، به سمت بهترین تصمیم‌گیری حرکت می‌کند. هدف این روش ایجاد یک مدل پیشرفته و پیشگو از یک سیستم بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از تعدادی حسگر مستقل است [۵۰].

در این تحقیق بعد از به‌دست آوردن فشار منفذی با روش‌های فوق‌الذکر، به‌وسیله‌ی روش ترکیب اطلاعات^۱ OWA و انتگرال‌های فازی (سوگنو و چوکویت) برای ترکیب نتایج تخمین‌های مختلف، به‌منظور رسیدن به پاسخی مطلوب و قابل‌تعمیم، استفاده می‌شود.

- روش میانگین وزنی مرتب‌شده
- روش سوگنو
- روش چوکویت

۵-۴-۱ روش میانگین وزنی مرتب‌شده

روش میانگین وزنی مرتب‌شده (OWA) به‌عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری که قابلیت در نظر گرفتن اولویت‌ها و ارزیابی‌های ذهنی تصمیم‌گیر را داراست؛ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این روش توانایی در نظر گرفتن ریسک‌پذیری و ریسک‌گریزی تصمیم‌گیر را در فرآیند تصمیم‌گیری دارا بوده و قادر است تصمیم‌نهایی را بر اساس ریسک‌پذیری / ریسک‌گریزی تصمیم‌گیر اتخاذ نماید.

روش میانگین وزنی مرتب‌شده، در واقع تصمیم‌یافته‌ی میانگین حسابی است. میانگین وزنی مرتب‌شده اولین بار توسط یاگر به‌عنوان یک عملگر برای ترکیب اطلاعات در سال ۱۹۸۸ معرفی شد و با گذشت کمتر از دو دهه از اولین ظهور این عملگر، استفاده وسیعی از آن صورت گرفته است [۶۳].

^۱ ordinary Weighted average

در این روش یک نگاشت از فضای n بعدی ورودی به فضای تک بعدی خروجی طراحی می شود؛ به نحوی که به هر درایه ورودی، عددی بین صفر و یک ضرب می شود و حاصل جمع مضارب باید یک باشد. سپس حاصل ضرب ها با هم جمع می شوند و مقدار خروجی بدست می آید. عملگر OWA به صورت کلی از سه مرحله تشکیل شده است:

مرحله اول: بازآرایی آرگومان های ورودی به صورت نزولی

مرحله دوم: تعریف وزن های متناسب با عملگر OWA با استفاده از یک روش مناسب

مرحله سوم: استفاده از وزن های OWA برای ترکیب این آرگومان های بازآرایی شده

یک عملگر OWA از مرتبه n دارای یک نگاشت $OWA: R^n \rightarrow R$ است؛ که یک بردار n بعدی مرتبط $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)^T$ دارد؛ به نحوی که در آن $W_j \in [0,1]$ و $\sum_{j=1}^n W_j = 1$ است. علاوه بر این رابطه (۱۱-۵) وجود دارد:

$$OWA_w(a_1, a_2, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n W_j * b_j \quad (11-5)$$

که در آن b_j ، j امین عنصر بزرگ از مجموعه ی ترکیب شده $a_1, a_2, \dots, a_n$ است.

اولین نکته در عملگر OWA تعیین وزن های مرتبط با آن است. روش های مختلفی برای به دست آوردن وزن های توسعه یافته وجود دارد. به عنوان مثال در روش اهاگان وزن ها با حل مسئله بهینه سازی قید دار طبق روابط (۱۲-۵) تا (۱۴-۵) تعیین و در تعیین وزن های مرتبط استفاده می شوند.

$$\text{Maximize: } -\sum_{i=1}^n W_i * \ln W_i \quad (12-5)$$

$$\text{subject to: } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (n-i) * W_i = \alpha \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (13-5)$$

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad 0 \leq w_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14-5)$$

در روابط بالا W مجموعه اوزان است [۵۵، ۶۴].

برای مثال، اگر مقادیر خروجی نظیر چهار سنجنده C_1, C_2, C_3 و C_4 صفر و یک را طبق (جدول

۱-۵) نمایش دهند و داده واقعی d باشد، برای تعیین وزن هر کدام از سنجنده ها، مقادیر خروجی هر

سنجنده با روش OWA با استفاده از مقدار واقعی ترکیب خواهد شد.

جدول ۱-۵: مقادیر خروجی چهار سنجنده

C_4	C_3	C_2	C_1
۱	۰	۱	۱
۰	۰	۱	۱
۱	۱	۱	۰
۱	۰	۰	۰

سپس برای هر پارامتر b از مقادیر بزرگ به کوچک به ترتیب (جدول ۲-۵) چیده می‌شود.

جدول ۲-۵: چینش مقادیر خروجی سنجنده‌ها به صورت نزولی

d	b_4	b_3	b_2	b_1
۱	۰	۱	۱	۱
۱	۰	۰	۱	۱
۱	۰	۱	۱	۱
۱	۰	۰	۰	۱
	w_4	w_3	w_2	w_1

آنگاه توابع اوزان بر اساس مقادیر پارامتر جدید b محاسبه شده و تابع هزینه طبق رابطه (۱۵-۵) تعریف می‌شود.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (d^n - W_i * b_i^n)^2 \quad (15-5)$$

SSE تابع هزینه و تابعی از W_i است و مسئله موجود یک مسئله بهینه‌سازی است، در واقع با قرار دادن

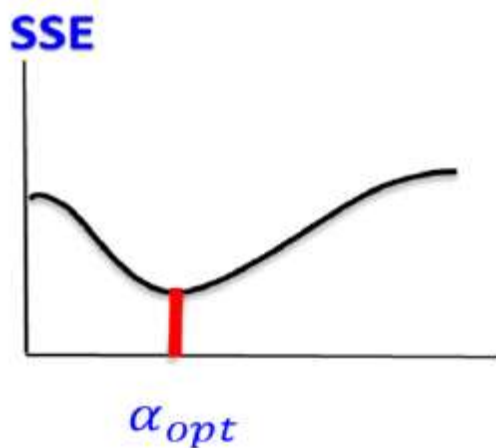
مقدار α طبق روش خوش‌بینانه با W_i های مختلف تابع هزینه تابعی از α به دست می‌آید:

$$W_1 = \alpha, W_2 = \alpha(1-\alpha), W_3 = \alpha(1-\alpha)^2, \dots, W_{n-1} = \alpha(1-\alpha)^{n-2}, W_n = \alpha(1-\alpha)^{n-1}$$

که α بهینه به صورت نمودار (شکل ۶-۵) می‌باشد و پس از حل مسئله و به دست آوردن α بهینه و

جایگزینی آن‌ها، مقادیر W_i ها به دست می‌آید. به این ترتیب میزان وزن هر معیار مشخص خواهد شد و

می‌توان برای سایر داده‌ها پیش‌بینی نتایج را انجام داد [۵۵].



شکل ۵-۶: نمودار α نسبت به SSE و محل قرارگیری α بهینه [۵۵]

۵-۴-۲ روش‌های انتگرال فازی

انسان‌ها معمولاً با مفاهیمی سروکار دارند که غیردقیق هستند. واژه فازی در فرهنگ لغت آکسفورد مبهم، گنگ، نادقیق، مغشوش، درهم و نامشخص تعریف شده است. مجموعه فازی در حقیقت بیان ریاضی این عدم دقت به صورت تعمیمی از نظریه مجموعه‌هاست. در نظریه مجموعه‌های فازی، درجه عضویت می‌تواند مقادیری بین صفر و یک اختیار کند و به این صورت می‌توان عدم قطعیت را مدل کرد. در این منطق مسئله‌ای به نام تجمیع وجود دارد؛ که در مبحث ترکیب اطلاعات بسیار سودمند است. عملگر تجمیع یک زیرمجموعه از اشیاء مربوط به یک مجموعه خاص را به عضوی از آن مجموعه نسبت می‌دهد [۶۵]. ترکیب اطلاعات در بستر منطق فازی به سه صورت انجام می‌پذیرد:

- الف. ترکیب اطلاعات با استفاده از متغیرهای زبانی فازی و عملگرهای فازی
- ب. ترکیب اطلاعات بر پایه‌ی پایگاه قواعد اگر - آنگاه فازی
- ج. ترکیب اطلاعات بر پایه‌ی انتگرال فازی

بر اساس عملگرهای انتگرال فازی، می‌توان به روشی برای ترکیب شواهد گوناگون توسعه یافت، که شواهد گوناگون را به صورت خطی یا غیرخطی ترکیب می‌کند. عمل ترکیب روی توابع عضویت و با توجه به اهمیت نسبی منابع اطلاعاتی در تصمیم‌گیری اعمال می‌گردد. در استفاده از نظریه‌ی فازی در ترکیب اطلاعات، دو هدف اصلی بیشینه‌سازی دقت و کمینه‌سازی پیچیدگی مدنظر است [۵۵].

توانایی زیرمجموعه‌ای از طبقه بندها توسط اندازه لاند- فازی^۱، g مشخص می‌شود؛ که آن را یک اندازه لاند- فازی می‌خوانند [۵۰].

روش‌های ترکیب لایه‌های اطلاعاتی مختلفی توسعه یافته و هر یک دارای مزایا و معایبی می‌باشند و ممکن است برای یک حیطة علمی مناسب بوده و برای حیطة/حیطه‌های دیگر نامناسب باشند. در حوزه فیزیک سنگ مخازن نفتی، روش‌های انتگرال فازی از جمله روش‌های ترکیبی است، که می‌تواند به صورت وسیع استفاده شود.

انتگرال‌های فازی ترکیب کننده‌های مناسبی برای تلفیق کردن خروجی طبقه‌بندی کننده‌های دیگر هستند. فلسفه‌ی ترکیب کننده‌های فازی این است که نه تنها قدرت تأثیرگذاری هر یک از طبقه‌بندی کننده‌ها را به تنهایی بررسی می‌کنند؛ بلکه قدرت تأثیرگذاری هر زیرمجموعه از طبقه‌بندی کننده‌ها را نیز جداگانه بررسی می‌کنند. این قدرت تأثیرگذارترین را اندازه فازی می‌نامند [۵۵]. در ادامه الگوریتم‌های استفاده شده در این تحقیق، یعنی انتگرال سوگنو که یک ترکیب کننده غیرخطی و انتگرال چوکویت که یک ترکیب کننده خطی است، آمده است [۵۵].

به منظور ترکیب داده‌های مختلف به روش‌های انتگرال فازی، ابتدا، مجموعه‌ای از داده‌های اطلاعاتی ارزش گذاری شده است. ارزش ترکیبی این مجموعه داده‌ها با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g(a,b)= g(a)+ g(b)+ \lambda * g(a)* g(b) \quad (۱۶-۵)$$

که در رابطه فوق g میزان ارزش داده، a و b داده‌های اطلاعاتی و λ ضریب اندازه فازی است که مقدار این ضریب از طریق حل معادله زیر به دست می‌آید:

$$\lambda+1=\prod_{i=1}^n (1+\lambda * g(i)) \quad (۱۷-۵)$$

طبق قضیه اساسی در مورد اندازه گیری λ ضریب اندازه فازی، مقدار λ دارای سه حالت زیر می‌باشد که در این تحقیق از حالت دوم استفاده شده است [۶۶،۶۷].

^۱ y - fuzzy measure

$$(i) \text{ If } \sum_{i=1}^n g_i > g(X) \quad \text{then } -1 < \lambda < 0.$$

$$(ii) \text{ If } \sum_{i=1}^n g_i = g(X) \quad \text{then } \lambda = 0.$$

$$(iii) \text{ If } \sum_{i=1}^n g_i < g(X) \quad \text{then } \lambda > 0.$$

اگر مجموع ارزش داده‌ها برابر یک باشد، میزان ارزش‌های داده‌ها مستقل از یکدیگر است و این میزان با احتمال اندازه‌گیری برابری می‌کند.

در این روش برای هر بردار ورودی X که مؤلفه‌های آن خروجی طبقه‌بندی کننده‌های دیگر است، بردار جدیدی ساخته می‌شود؛ که مؤلفه‌های آن به ترتیب از کوچک به بزرگ مرتب‌شده باشد. بردار جدید طبق رابطه (۱۸-۵) تعریف می‌شود.

$$[d_{i_1,k}(x), d_{i_2,k}(x), d_{i_3,k}(x), \dots, d_{i_l,k}(x)]^T \quad (18-5)$$

که در آن شرایط (۱۹-۵) برقرار است:

$$d_{i_1,k}(x) < d_{i_2,k}(x) < d_{i_3,k}(x) < \dots < d_{i_l,k}(x) \quad (19-5)$$

جایگشت مقادیر اولیه‌ی اندازه فازی متناظر با بردار مرتب‌شده‌ی بالا انتخاب می‌شود:

$$g^{i_1}, g^{i_2}, g^{i_3}, \dots, g^{i_L} \quad (20-5)$$

برای $t=2$ تا L ، به‌صورت بازگشتی، مقادیر نهایی اندازه فازی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$g(t) = g^{i_t} + g(t-1) + \lambda * g^{i_t} * g(t-1) \quad (21-5)$$

بنابراین برای محاسبه مقدار عملگر انتگرال به ازای هر بردار ورودی به طریق زیر عمل می‌شود [۵۵].

عملگر انتگرال سوگنو S_μ طبق رابطه زیر عمل می‌کند:

$$S_\mu(a_1, a_2, \dots, a_n) = \max_{i=1:L} [\min(d_{i_t,k}(x), g(t))] \quad (22-5)$$

و عملگر انتگرال چوکویت طبق رابطه زیر است.

$$C_\mu(x) = d_{i_1,k}(x) + \sum_{k=2}^L [d_{i_{k-1},j}(x) - d_{i_k,j}(x)] * g(k-1) \quad (23-5)$$

به عنوان مثال، مجموعه $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ را در نظر بگیرید که مقادیر آن به صورت زیر است [۶۷].

جدول ۳-۵: مقادیر متناظر برای مجموعه X

x_3	x_2	x_1	
۰٫۲	۰٫۳	۰٫۵	$f(x)$
۰٫۳۵	۰٫۴	۰٫۲۵	$g(x)$

ابتدا مجموعه مقادیر جدول فوق، به ترتیب از کوچک به بزرگ به صورت زیر مرتب می شوند و همچنین مقادیر اندازه فازی در (جدول ۵-۵) آمده است.

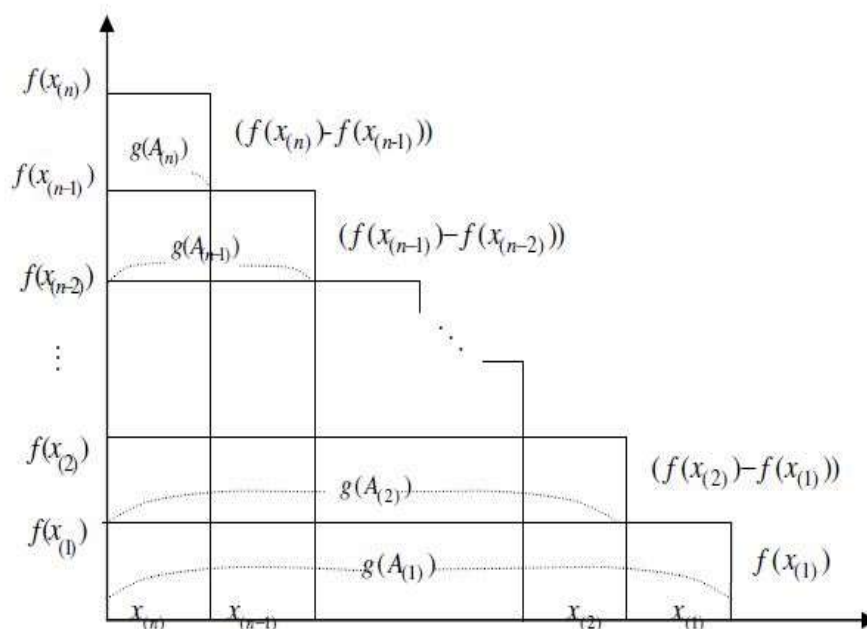
جدول ۴-۵: چینش مقادیر به صورت صعودی برای مجموعه X

x_3	x_2	x_1	
۰٫۵	۰٫۳	۰٫۲	$f(x)$

جدول ۵-۵: مقادیر اندازه فازی

$g(A_3)$	$g(A_2)$	$g(A_1)$	
۰٫۳۵	۰٫۷۵	۱	$g(A)$

انتگرال چوکویت مطابق (شکل ۷-۵) به صورت زیر عمل می کند:



شکل ۷-۵: مفهوم پایه انتگرال چوکویت [۶۷]

$$\int f(x) * du = \sum_{i=1}^3 [f(x_i) - f(x_{i-1})] * g(A_i)$$

$$= f(x_1) * g(\{x_1, x_2, x_3\}) + [f(x_2) - f(x_1)] * g(\{x_2, x_3\}) + [f(x_3) - f(x_2)] * g(\{x_3\})$$

$$= [0.2 * 1] + [(0.3 - 0.2) * 0.75] + [(0.5 - 0.3) * 0.35]$$

$$\int f(x) * du = 0.345$$

انتگرال سوگنو به صورت زیر عمل می کند [۶۷]:

$$\int f(x) * du = \max_{i=1:n} [\min (f(x_i), g(A_i))]$$

$$= \max [\min(0.2, 1), \min(0.3, 0.75), \min(0.5, 0.35)]$$

$$= \max(0.2, 0.3, 0.35)$$

$$\int f(x) * du = 0.35$$

همان طور که در روابط بالا انتگرال های فازی شرح داده شد، در تعریف سوگنو و چوکویت با هم تفاوت دارند. انتگرال فازی سوگنو بر پایه اپراتورهای غیرخطی Min و Max بنا نهاده شده اند. در صورتی که انتگرال فازی چوکویت با اپراتورهای خطی پیاده سازی می شود. در واقع انتگرال چوکویت یک ترکیب کننده خطی است. لازم به ذکر است انتگرال سوگنو پرکاربردترین ترکیب کننده طبقه بندی کننده ها در بین روش های فازی ترکیب اطلاعات است [۵۵].

۵-۵ جمع بندی

در این فصل ابتدا با استفاده از داده های سرعت در مقابل چگالی به بررسی مکانیسم های غالب میدان پرداخته شد و طبق مشاهدات، شواهد کافی مبنی بر ایجاد باربرداری در منطقه دیده نمی شود و مکانیسم غالب ایجاد فشار بالا در میدان های مورد مطالعه، بیشتر بیانگر تحکیم نامتوازن است. در مرحله بعد با توجه به مکانیسم غالب میدان به معرفی روش های ایتون و باورز و همچنین روش پارامترهای حفاری ایتون به صورت مفصل پرداخته شد. در نهایت به معرفی تئوری روش های ترکیب اطلاعات که در این

تحقیق جهت ترکیب نتایج تخمین‌های مختلف، برای رسیدن به پاسخی مطلوب و قابل‌تعمیم استفاده می‌گردند، پرداخته شد.

فصل ۶ : یافته‌های تحقیق

۶-۱ مقدمه

در بررسی فشار منفذی می‌توان از روش‌های کمی و روش‌های کیفی بهره برد. روش‌های کمی مقدار عددی برای فشار منفذی در هر عمق، در اختیار کاربر قرار می‌دهند و روش‌های کیفی محدوده‌ی مناطق دارای فشار غیرعادی را مشخص می‌کنند. در روش‌های کمی می‌توان از داده‌های لرزه‌ای یا نمودارگیری چاه بهره گرفت. به‌طور کلی روش‌های محاسبه‌ی فشار منفذی به روش‌های پیش از حفاری، در حین حفاری و پس از حفاری تقسیم می‌شوند [۷].

در این فصل با استفاده از روش‌های وابسته به نگارهای چاه پیمایی و پارامترهای حفاری و با استفاده از تئوری‌های ارائه‌شده در فصل‌های قبل، به تخمین فشار منفذی در سازند گچساران، در یکی از میدان‌های نفتی جنوب غرب ایران پرداخته می‌شود.

روش‌های چاه پیمایی مورد استفاده برای تخمین فشار منفذی در این فصل روش‌های ایتون، باورز و شاخص بدون بعد حفاری می‌باشند. هرچند که کلیاتی از نحوه‌ی کارکرد این روش‌ها تاکنون بیان شده است، اما تخمین فشار منفذی و اعتبار سنجی آن در میدان چالش‌هایی به دنبال دارد. از جمله پیش‌بینی فشار با اندازه‌ی مناسب، برازش پارامترهای موجود، تخمین‌های غیرمستقیم چگالی و تعیین روندهای نرمال مختلف؛ که مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در ادامه مقادیر به‌دست‌آمده و تصحیح‌شده فشار منفذی با روش‌های فوق‌الذکر، به‌صورت مرتب و هم عمق در کنار هم قرار گرفته و به‌عنوان داده‌های ورودی روش‌های ترکیب اطلاعات مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس با کمک اطلاعات به‌دست‌آمده در بخش قبل و روش‌های ترکیب اطلاعات، جهت ترکیب نتایج تخمین‌های مختلف، برای رسیدن به پاسخی مطلوب و قابل تعمیم، تلفیق می‌شوند. در نهایت بر اساس معیارهای ریشه میانگین مجذور خطا^۱ و میانگین مطلق خطا^۲، روش‌های انجام‌شده با هم مقایسه می‌شوند.

^۱ Root Mean Squared Error (RMSE).

^۲ Mean Absolute Error (MAE).

۲-۶ تعیین پارامترهای موردنیاز برای تخمین مدل‌های تجربی

در این مطالعه با توجه به داده‌های خام موجود، اقدام به تعیین پارامترهایی کرده که در نهایت از این مقادیر در تخمین مدل‌های تجربی و صحت سنجی محدوده فشار منفذی می‌توان بهره گرفت.

۱-۲-۶ محاسبه فشار هیدرواستاتیک

فشار هیدرواستاتیک نرمال با توجه به درصد شوری و نوع سیال سازند متفاوت است. ایتون بازه مقدار گرادیان فشار هیدرواستاتیک را بین ۰/۴۳۳-۰/۴۶۵ psi/ft در نظر گرفت. با توجه به مطالعات انجام‌شده در خاورمیانه و شوری آب منطقه، مقدار گرادیان فشار هیدرواستاتیک نرمال ۰/۴۶۴ psi/ft در نظر گرفته شد.

فشار ناشی از وزن ستون سیال در هر عمق را فشار هیدرواستاتیک می‌گویند. این فشار همان فشار اندازه‌گیری شده در یک ظرف پر از سیال است. در محیط‌های متخلخل مخازن، در صورتیکه در حین دفن حفرات ارتباط خود را با محیط بیرون حفظ کنند و با بیشتر شدن فشار و کاهش حجم حفرات سیال از درون آن‌ها خارج شود، فشار منفذی برابر با فشار هیدرواستاتیک خواهد بود. در واقع مقدار این فشار، حداقل فشاری است که می‌توان در شرایط عادی برای فشار منفذی در نظر گرفت. به فشار هیدرواستاتیک فشار عادی نیز گفته می‌شود. برای محاسبه فشار هیدرواستاتیک از معادله (۱-۶) استفاده می‌شود:

$$P_{HY} = \rho \cdot g \cdot h \quad (1-6)$$

که در این رابطه، P_{HY} فشار هیدرواستاتیک برحسب پاسکال، ρ چگالی سیال در عمق Z برحسب Kg/m^3 ، g شتاب جاذبه برحسب m/s^2 و h ارتفاع ستون سیال برحسب m است [۲].

در صورتی که عمق برحسب فوت باشد، از حاصل ضرب عمق در عدد ۰/۴۶۴ فشار هیدرواستاتیک

برحسب psi محاسبه می‌شود.

۲-۲-۶ محاسبه فشار روباره

از آنجایی که در بیشتر موارد مقدار فشار منفذی در یک عمق خاص بین مقدار فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره قرار می‌گیرد، فشار روباره را گاهی اوقات فشار دربرگیرنده و فشار لیتواستاتیک نیز می‌نامند. لازم به ذکر است میزان فشار روباره به چگالی سنگ‌ها و شتاب گرانش زمین بستگی دارد و به کمک نمودارهای چگالی چاه‌ها قابل محاسبه است. مقدار فشار روباره را در هر عمق می‌توان بر اساس رابطه‌ی (۲-۶) تعیین نمود [۲]:

$$S_v = \int_0^z \rho(z) \cdot g \cdot dz \cong \rho_b \cdot g \cdot z \quad (2-6)$$

که در این رابطه S_v فشار روباره برحسب کیلو پاسکال، ρ_b چگالی میانگین برحسب gr/cm^3 ، $\rho(z)$ چگالی در عمق z برحسب gr/cm^3 و g شتاب جاذبه برحسب m/s^2 است.

در صورتی که فشار روباره را برحسب psi بخواهیم باید داده‌های ورودی را به سیستم انگلیسی تبدیل واحد کنیم، یا از همین واحدها استفاده کنیم و جواب را در ضریب تبدیل واحد Kpa به psi یعنی ۰/۱۴۵۰۳۷ ضرب کنیم.

$$S_v = \int_0^z \rho(z) \cdot g \cdot dz * (0.145037) \quad (3-6)$$

در صورتی که چگالی برحسب gr^3/cm و عمق برحسب فوت باشد، از رابطه‌ی (۴-۶) فشار روباره برحسب psi محاسبه می‌شود [۳].

$$S_v = 0.433 \int_0^z \rho(z) dz \quad (4-6)$$

۳-۶ مدل تجربی ایتون براساس مؤلفه زمان انتقال موج صوتی

در تخمین فشار منفذی، از ویژگی‌های سازند مانند فشردگی، تخلخل و حرکت سیال استفاده می‌شود. هرگونه تغییر در فشار منفذی طبیعی در یک ناحیه زمین‌شناسی منجر به تغییر در برخی از این ویژگی‌ها می‌شود. بنابراین، هر نوع پارامتر قابل اندازه‌گیری به‌نحوی که بتواند این تغییرات را نشان دهد، می‌تواند به‌منظور ارزیابی کمی فشار منفذی سازند مورد استفاده قرار گیرد [۴].

به منظور تخمین فشار منفذی بر اساس روش ایتون با استفاده از نگار صوتی، با توجه به رابطه (۵-۱) نیاز به پارامترهای ورودی از جمله فشار هیدرواستاتیک، فشار روباره و تعیین خط روند نرمال بر روی داده‌های نگار صوتی می‌باشد.

ابتدا مقادیر فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره با توجه به روابط (۶-۱) و (۶-۳) محاسبه شده است. از آنجایی که محاسبه‌ی فشار روباره نیازمند به تعیین مقادیر چگالی در هر مقطع عمقی می‌باشد؛ بنابراین در مقاطعی که نمودار چگالی رانده شده از مقادیر اندازه‌گیری شده چگالی استفاده شده است و در مقاطع عمق بالاتر تا سطح زمین چگالی معادل لایه‌ها با توجه به گرافیک ول لاگ‌های در دسترس و استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد.

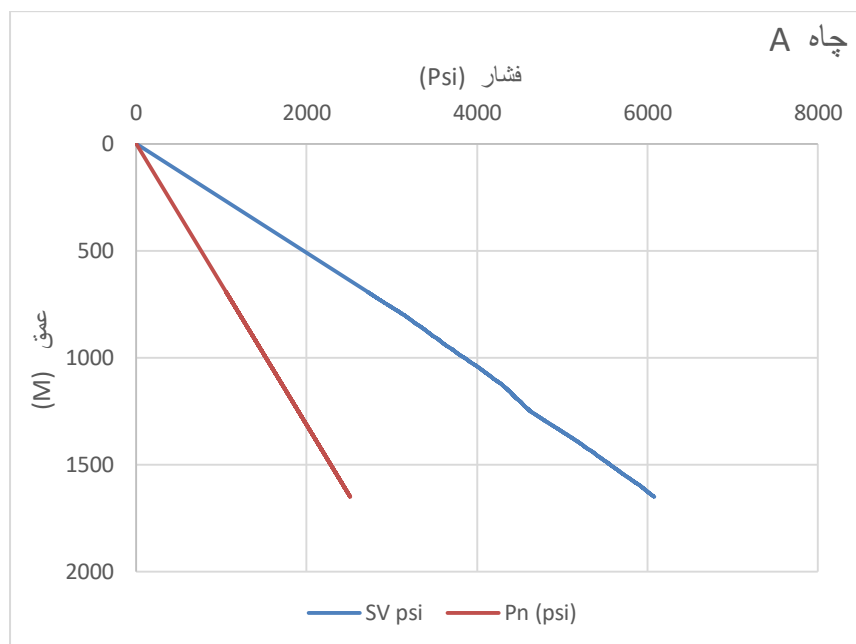
$$R_{hob} = (0.015 * DT) + 3.8 \quad \text{انیدریت} \quad (6-5)$$

$$R_{hob} = (0.0132 * DT) + 3.386 \quad \text{آهک} \quad (6-6)$$

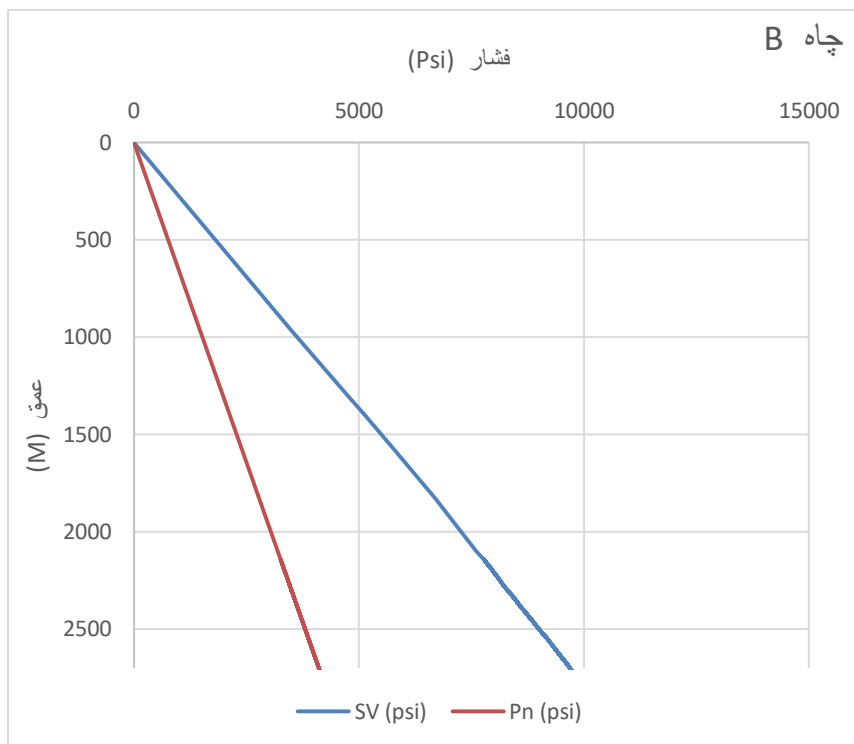
$$R_{hob} = (0.008 * DT) + 3.22 \quad \text{شیل} \quad (6-7)$$

$$R_{hob} = (0.004 * DT) + 2.42 \quad \text{نمک} \quad (6-8)$$

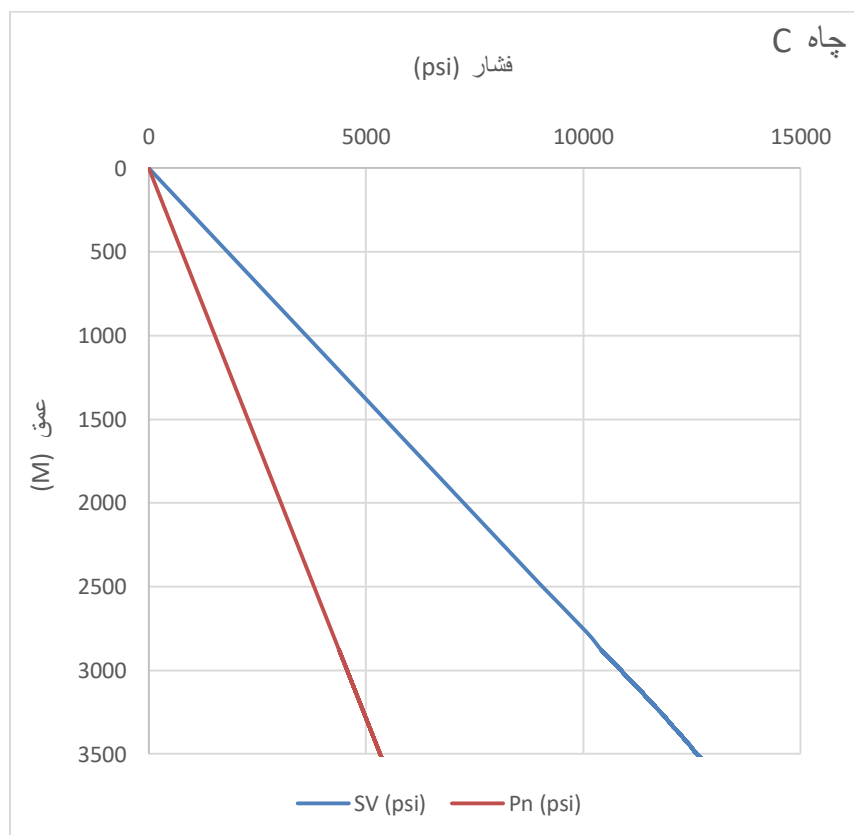
(شکل‌های ۶-۱ تا ۶-۳) نمایی از فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره در مقابل عمق را نشان می‌دهند.



شکل ۶-۱: شماتیک کلی فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره مقابل عمق در چاه A



شکل ۲-۶: شماتیک کلی فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره مقابل عمق در چاه B



شکل ۳-۶: شماتیک کلی فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره مقابل عمق در چاه C

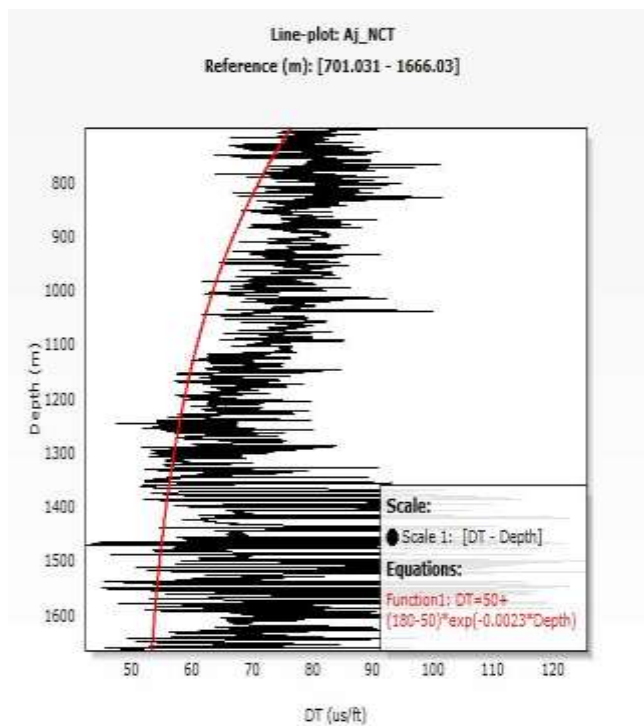
در مرحله بعد به منظور تعیین خط روند نرمال NCT بر روی نگار صوتی، از رابطه (۵-۲) استفاده می‌شود. بر اساس اطلاعات حفاری، فشار گل مورد استفاده تا عمق حدود ۱۲۵۰ متر در میدان آگاجاری و در عمق ۲۷۰۰ متری در چاه C میدان مارون در شرایط نزدیک به فشار هیدرواستاتیک نرمال است (شکل‌های ۶-۶ تا ۸-۶). از این رو می‌توان گفت که لایه‌های شیلی بالاتر از این عمق‌ها دارای فشار نرمال هستند و می‌توانند جهت برازش نمودار روند نرمال در رابطه ایتون مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین لایه‌های شیلی با فشار نرمال در بازه ۷۰۰ تا ۱۲۵۰ متر در میدان آگاجاری و از سطح زمین تا ۲۷۰۰ متر در چاه C میدان مارون که دارای اطلاعات چاه پیمایی نیز می‌باشند؛ در روابط ایتون و برازش نمودار خط روند نرمال انتخاب شده است.

خط روند نرمال با توجه به رابطه (۵-۲)، منطبق بر نقاط شیلی دارای فشار نرمال در بالای عمق‌های مذکور رسم شده و به وسیله داده‌های وزن گل و مقادیر نگار صوتی در ناحیه شیلی کالیبره می‌شود. مقادیر پارامترهای رابطه (۵-۲) در میدان‌های مورد مطالعه به شرح زیر است.

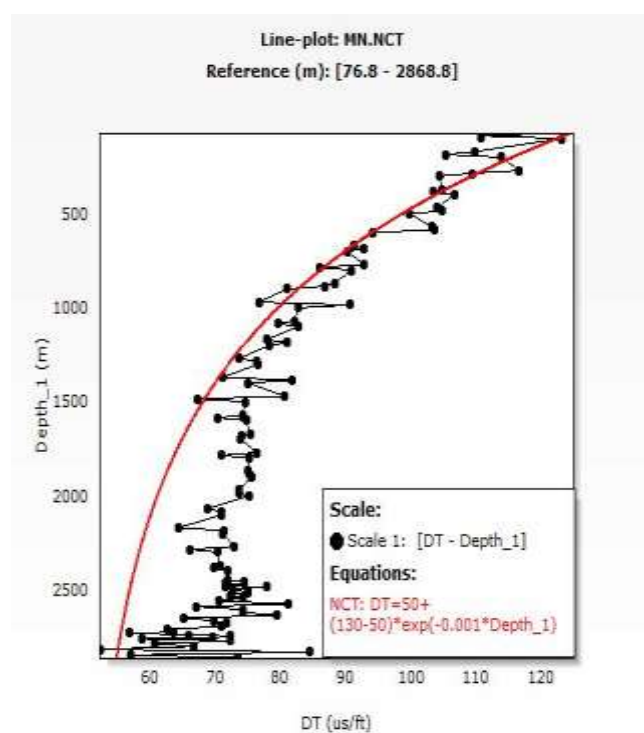
$$\Delta t_n = 50 + (180 - 50) e^{-0.0023z} \quad (۹-۶)$$

$$\Delta t_n = 50 + (130 - 50) e^{-0.001z} \quad (۱۰-۶)$$

پارامترهای بهینه در میدان آگاجاری $\Delta t_m = 50 \text{ } \mu\text{s/ft}$ ، $\Delta t_{ml} = 180 \text{ } \mu\text{s/ft}$ و $C = 0.0023$ همچنین در میدان مارون $\Delta t_m = 50 \text{ } \mu\text{s/ft}$ ، $\Delta t_{ml} = 130 \text{ } \mu\text{s/ft}$ و $C = 0.001$ می‌باشد. از آنجایی که میدان آگاجاری و مارون اختلاف عمقی زیادی با هم دارند پارامترهای بهینه معادله ژانگ (۵-۲) در دو میدان یکسان به دست نمی‌آید. (شکل ۶-۴) و (شکل ۵-۶) نمایی از خط روند نرمال در میدان‌های مورد مطالعه می‌باشند. تنها مجهول باقی مانده برای محاسبه فشار منفذی طبق رابطه (۵-۱)، ثابت نمایی x است. ایتون در مطالعه خود مقدار ضریب نمایی را ۳ در نظر گرفت؛ ولی این مقدار با توجه به سنگ‌شناسی و نوع پیچیدگی لایه‌ها نیاز به تصحیح دارد. با تصحیح نمودار فشار منفذی به دست آمده براساس وزن گل، مقدار بهینه ثابت نمایی x حدود ۱/۵ در میدان آگاجاری و حدود ۲/۲ در میدان مارون تعیین شد.

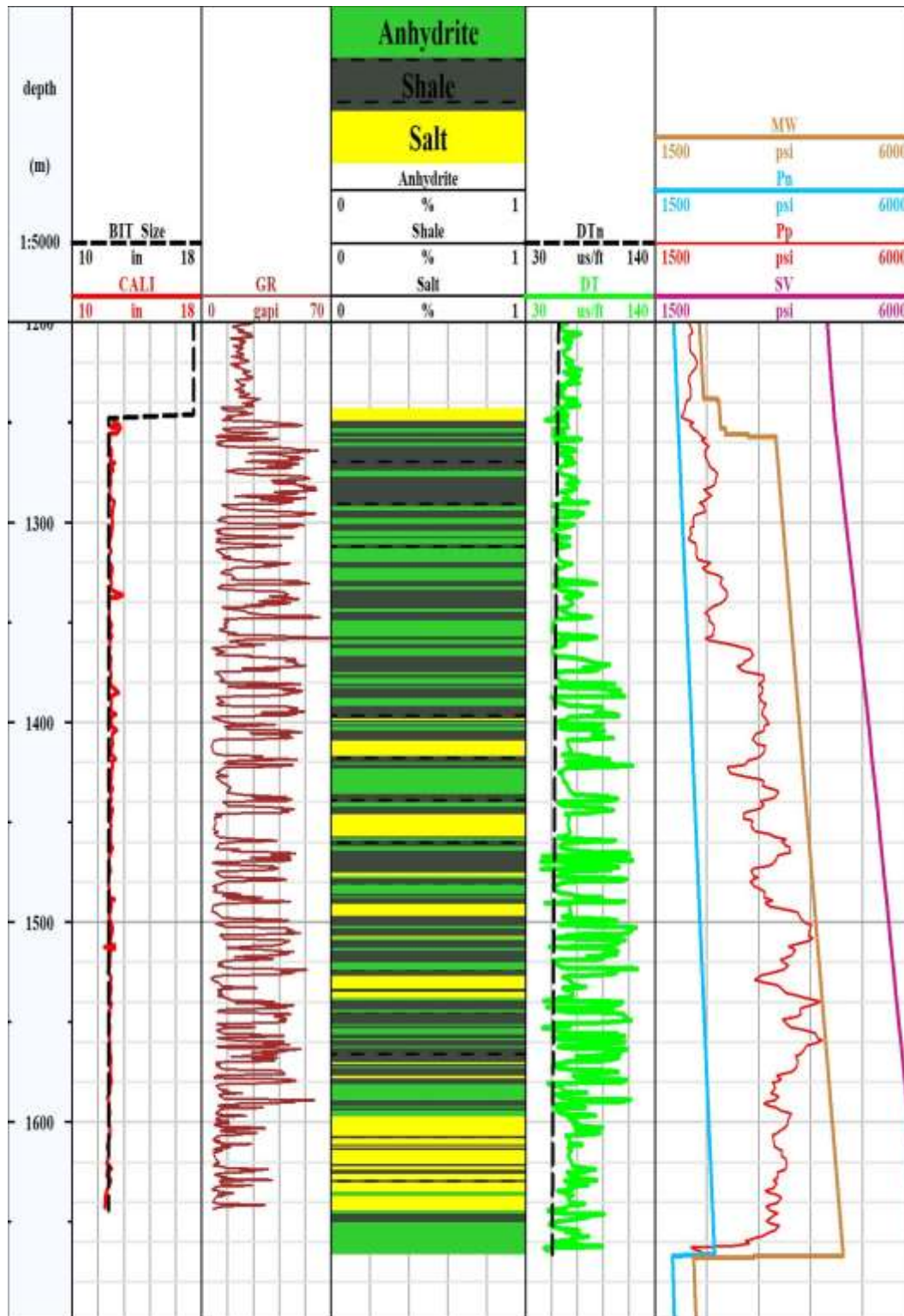


شکل ۴-۶: خط روند نرمال بر روی نگاره صوتی در میدان آغاچاری

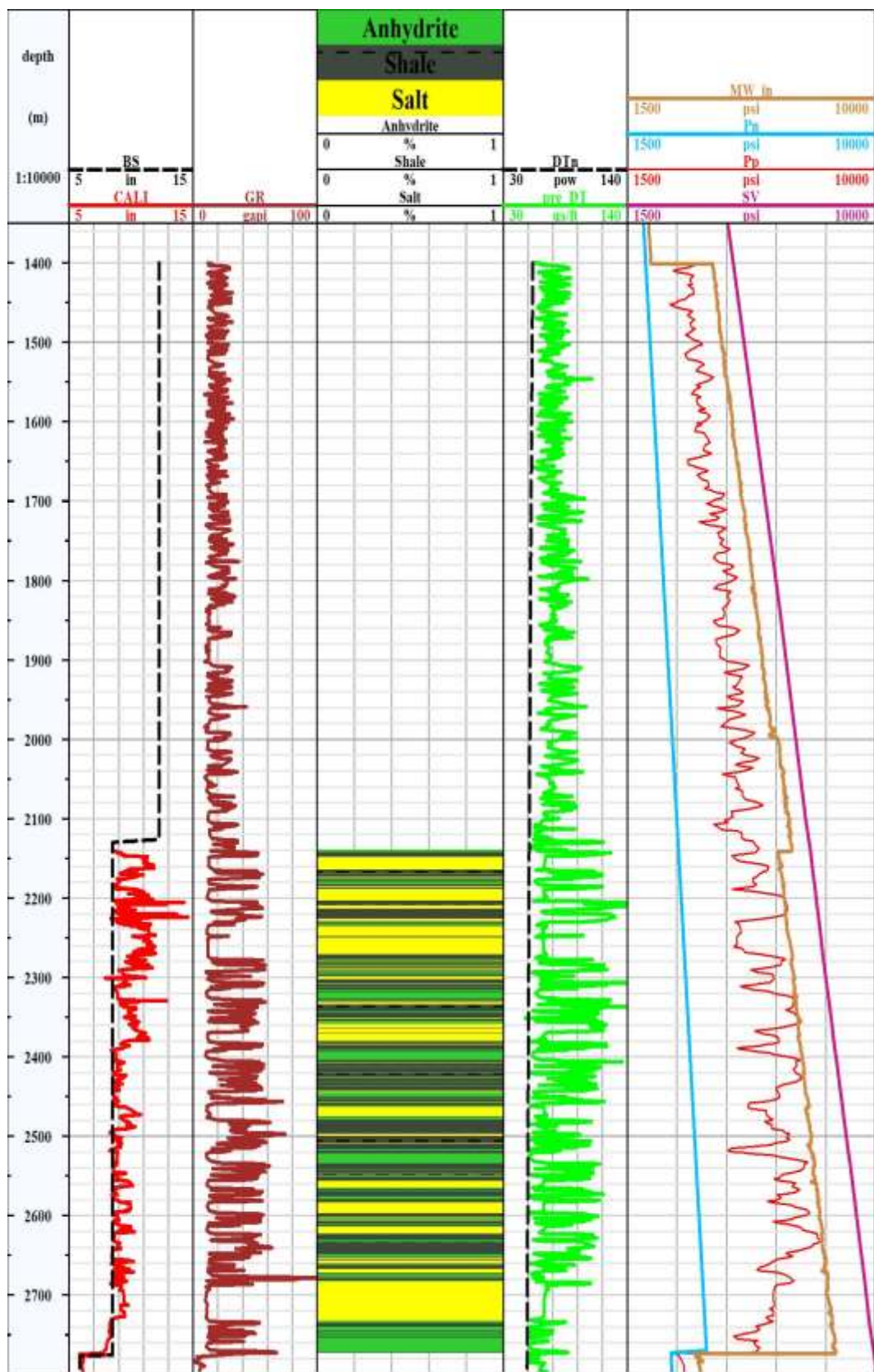


شکل ۵-۶: خط روند نرمال بر روی داده‌های VSP در میدان مارون

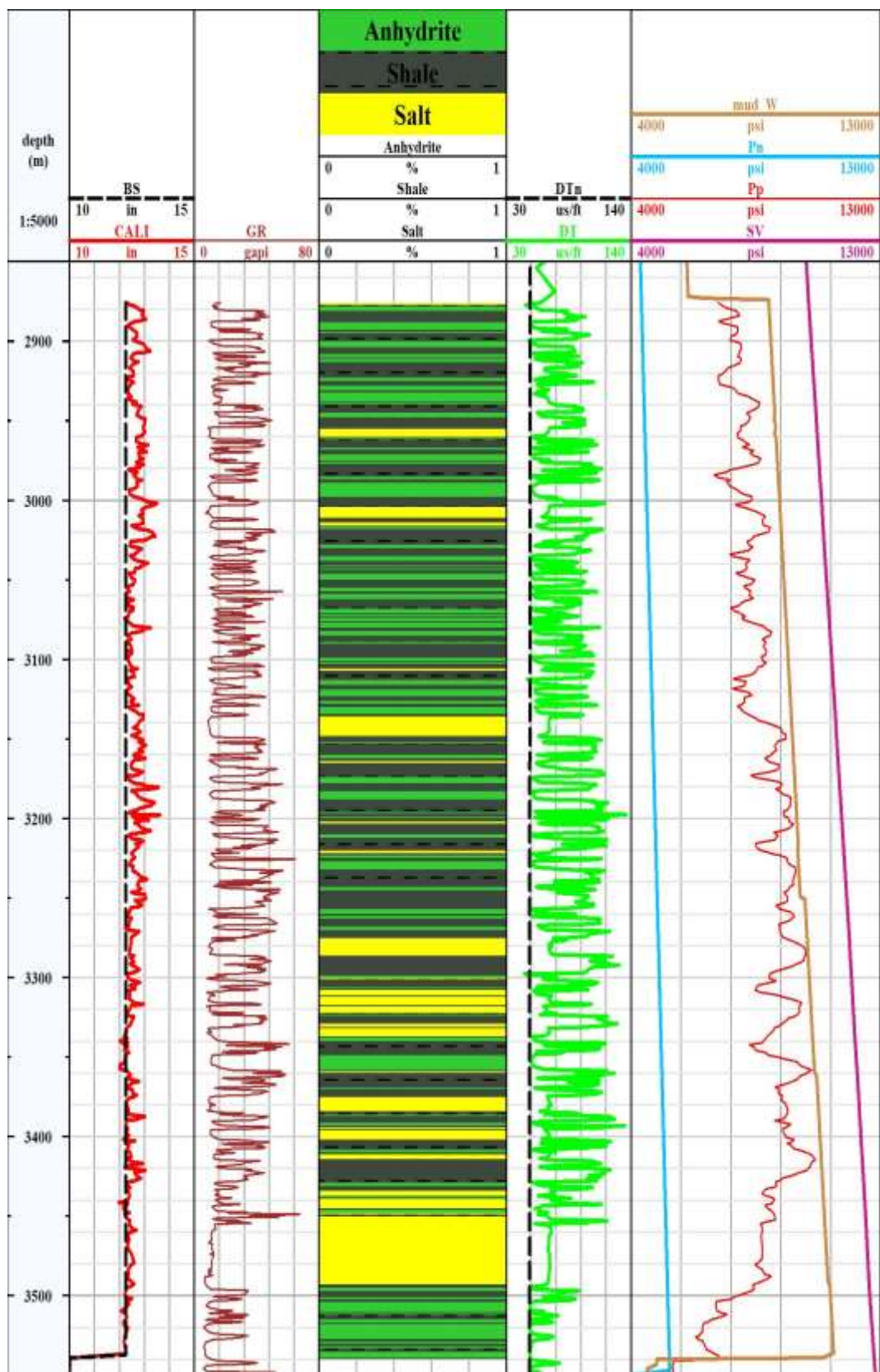
در نهایت مقدار فشار منفذی با توجه به رابطه ایتون (۵-۱) و روابط (۶-۹)، (۶-۱۰) و پارامترهای به دست آمده فوق الذکر، محاسبه شده و نتایج آن در چاه‌های مورد مطالعه به صورت شکل‌های زیر می‌باشد.



شکل ۶-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش ایتون در چاه A



شکل ۶-۷: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش ایتون در چاه B



شکل ۸-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش ایتون در چاه C

از آنجایی که داده‌های فشار منفذی مستقیم چاه‌های این مطالعه در دسترس نیست؛ معیار اعتبار سنجی فشار منفذی تخمین زده شده بر اساس رابطه ایتون، محدوده وزن گل قرار داده شده و با توجه به این که اطلاعات VSP در چاه C میدان مارون موجود است؛ از آن اطلاعات برای تعیین خط روند سرعت استفاده شده و براساس این اطلاعات و معادله (۵-۲)، ضرایب مجهول این معادله کالیبره شده است. پارامتر مجهول دیگر معادله ایتون (۵-۱) که باید محاسبه شود، ضریب نمایی معادله ایتون است؛ که توسط وزن گل کالیبره شده و مقدار آن حدوداً ۲/۲ می‌باشد. در نهایت چاه C با همین ضرایب و روند منطبق شد و سپس با استفاده از پارامترهای کالیبره شده چاه مذکور، فشار منفذی در چاه B مارون تخمین زده شد؛ که نتایج نسبتاً خوبی با وزن گل داشت.

در میدان آغاجاری از پارامترهای کالیبره شده میدان مارون استفاده شد؛ ولی (به دلیل این که این میدان‌ها اختلاف ارتفاعی زیادی با هم دارند و از لحاظ تکتونیکی متفاوت هستند؛ بنابراین فشار در این میدان‌ها یکسان نیست) نتایج مناسبی حاصل نشد. از این رو ضرایب جدیدی برای پارامترهای معادله (۵-۲) و ضریب نمایی معادله ایتون مختص میدان آغاجاری با استفاده از محدوده وزن گل کالیبره و تعیین شد؛ که مقدار ضریب نمایی معادله ایتون حدوداً ۱/۵ می‌باشد.

با توجه به (شکل ۶-۷) از عمق ۲۷۲۰ الی ۲۷۵۰ در چاه B، اختلاف بین فشار وزن گل و فشار منفذی سازند زیاد است؛ که بعد از بررسی گزارش پایانی چاه مشاهده شد در آن فواصل هرز روی گل اتفاق افتاده است.

برای تمام چاه‌های این مطالعه، از آنجایی که روش ایتون وابسته به سرعت می‌باشد؛ الگوی فشاری که تخمین می‌زند معادل همان پترن سرعت می‌باشد و با توجه به شکل‌های بالا جاهایی که نزدیک یا مماس به فشار وزن گل می‌شوند؛ لایه‌هایی با کندی سرعت بالاتر می‌باشد، که این لایه‌ها نشانگر مارن‌های پرفشار هستند. زیرا لایه‌های نمک و انیدریت (به خاطر تخلخل ناچیز) دارای کندی سرعت کم یا ثابت می‌باشند. در واقع با توجه به فرض روش ایتون، نقاط تخمین فشار بالا در نمودارهای فوق مبتنی بر لایه‌های مارنی می‌باشند.

۴-۶ مدل تجربی باورز

همان‌طور که در فصل‌های گذشته بررسی شد؛ مکانیسم غالب ایجاد فشار بالا در میدان‌های مورد مطالعه، بیشتر بیانگر تحکیم نامتوازن است. از این‌رو، در تعیین فشار منفذی از رابطه معمولی باورز (۷-۵) برای تخمین فشار منفذی استفاده می‌شود. به منظور تخمین فشار منفذی بر اساس روش سرعت باورز با توجه به رابطه (۷-۵)، نیاز به پارامترهای ورودی از جمله سرعت، فشار روباره، تنش مؤثر و ضرایب ثابت A و B می‌باشد. فشار روباره قبلاً محاسبه شده و شماتیک کلی فشار روباره و فشار هیدرواستاتیک در (شکل‌های ۱-۶ تا ۳-۶) به ترتیب برای چاه‌های A ، B و C آمده است.

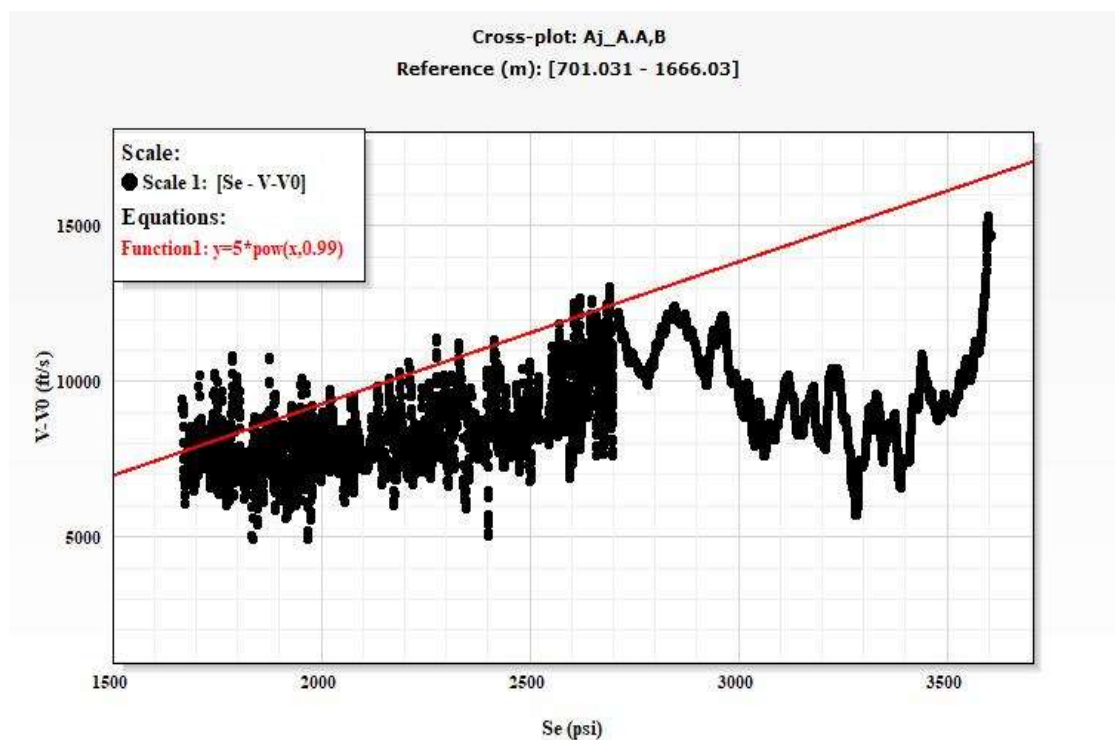
در مرحله بعد محاسبه‌ی سرعت بر اساس داده‌های نگار صوتی موجود، در چاه‌های مورد مطالعه انجام می‌شود. با توجه به رابطه (۱۱-۶) سرعت براساس نگار صوتی محاسبه می‌گردد.

$$V = (1/DT) * 304800 \quad (11-6)$$

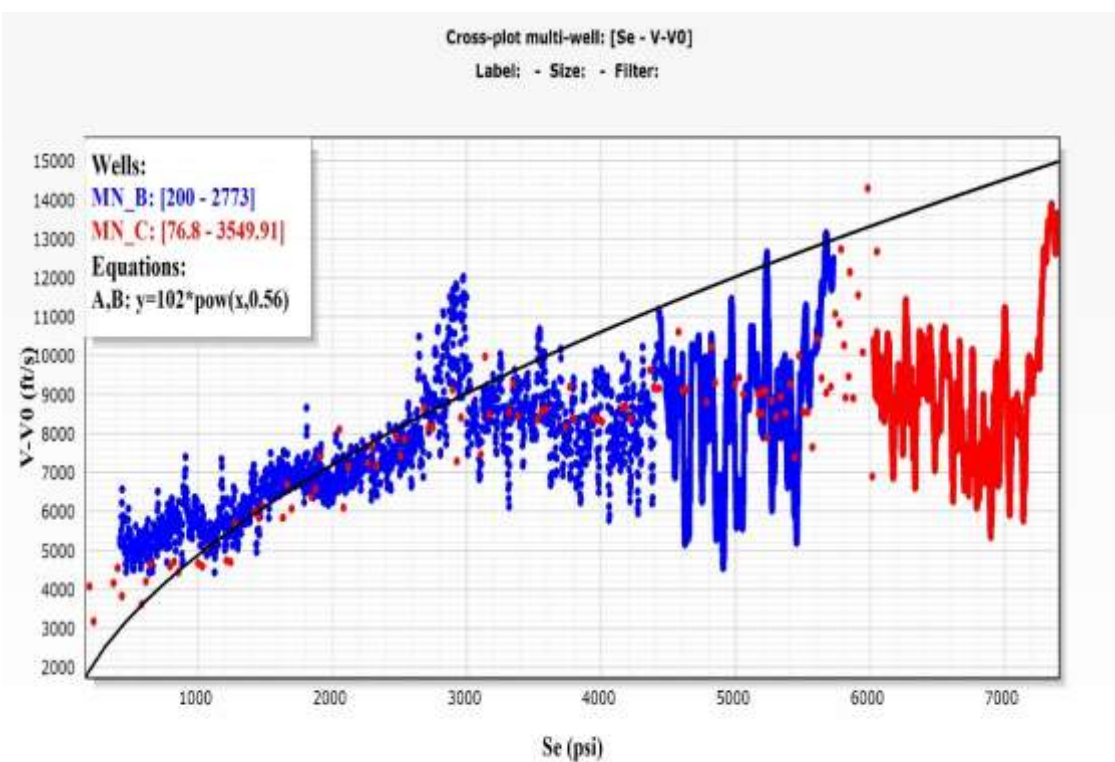
در گام بعدی محاسبه تنش مؤثر انجام می‌شود و همان‌طور که در فصل‌های پیش مطرح شد، باورز تنش‌های مؤثر را از اختلاف داده‌های فشار منفذی اندازه‌گیری شده شیلی و فشار روباره محاسبه کرد. از آنجایی که داده‌های فشار منفذی اندازه‌گیری شده در این تحقیق در دسترس نیست؛ باید در مناطق فشار نرمال تنش مؤثر را از اختلاف فشار روباره و فشار هیدرواستاتیک محاسبه کرد.

در نهایت پارامترهای A و B که مقادیر ثابتی هستند، با کالیبره کردن داده‌های سرعت در مقابل تنش مؤثر قابل محاسبه‌اند. رابطه (۶-۵) به نمودار دست‌نخورده معروف است. از این‌رو داده‌های سرعت در مقابل تنش مؤثر در منطقه فشار نرمال برای هر چاه به صورت جداگانه در یک نمودار رسم می‌شوند و با استفاده از برازش خط روند توانی به داده‌های نمودار، ضرایب بهینه A و B تعیین می‌شوند.

(شکل ۹-۶) و (شکل ۱۰-۶) نمایی از برازش خط روند توانی برای تعیین ضرایب ثابت A و B در میدان‌های مورد مطالعه است. لازم به ذکر است که در محور عمودی نمودار اختلاف سرعت صوتی هر نقطه با سرعت سطح قرار داده شده است.



شکل ۶-۹: نمودار سرعت در مقابل تنش مؤثر در میدان آغاچاری



شکل ۶-۱۰: نمودار سرعت در مقابل تنش مؤثر در میدان مارون

(شکل ۶-۱۰) داده‌های سرعت در برابر تنش مؤثر میدان مارون می‌باشد؛ به‌نحوی که داده‌های آبی در نمودار مربوط به چاه B و داده‌های قرمز مربوط به چاه C می‌باشند.

با توجه به (شکل ۶-۹) و رابطه (۵-۶)، رابطه (۶-۱۲) را می‌توان به‌عنوان مبنای برازش ضرایب نمایی A و B برای تخمین فشار منفذی باورز در چاه‌های دیگر میدان آجاجاری در نظر گرفت.

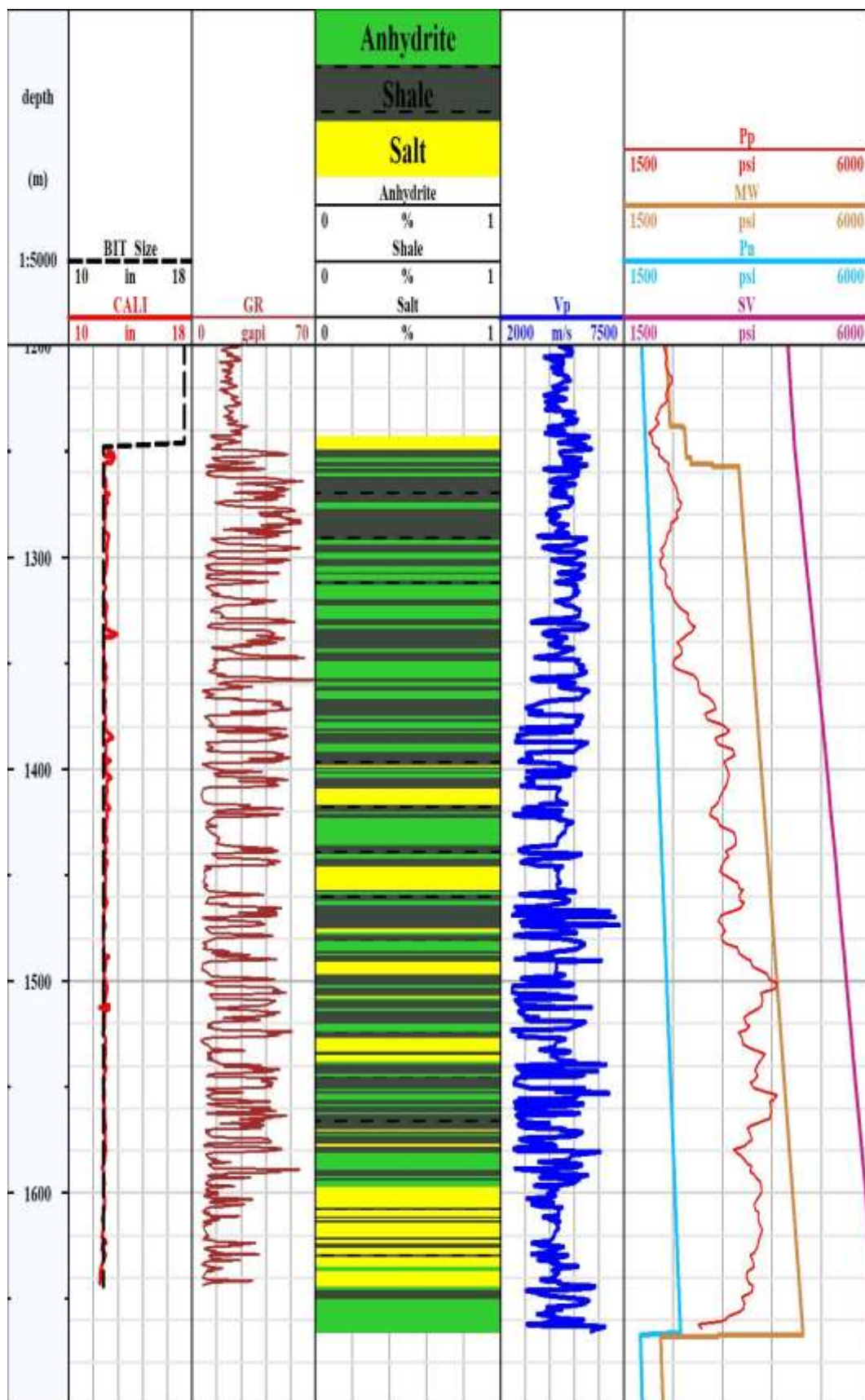
$$V-V_{\infty} = (\Delta \cdot Se)^{0.99} \quad (۶-۱۲)$$

همچنین با توجه به (شکل ۶-۱۰) و رابطه (۵-۶)، رابطه (۶-۱۳) را می‌توان به‌عنوان مبنای برازش ضرایب نمایی A و B برای تخمین فشار منفذی باورز در چاه‌های دیگر میدان مارون در نظر گرفت.

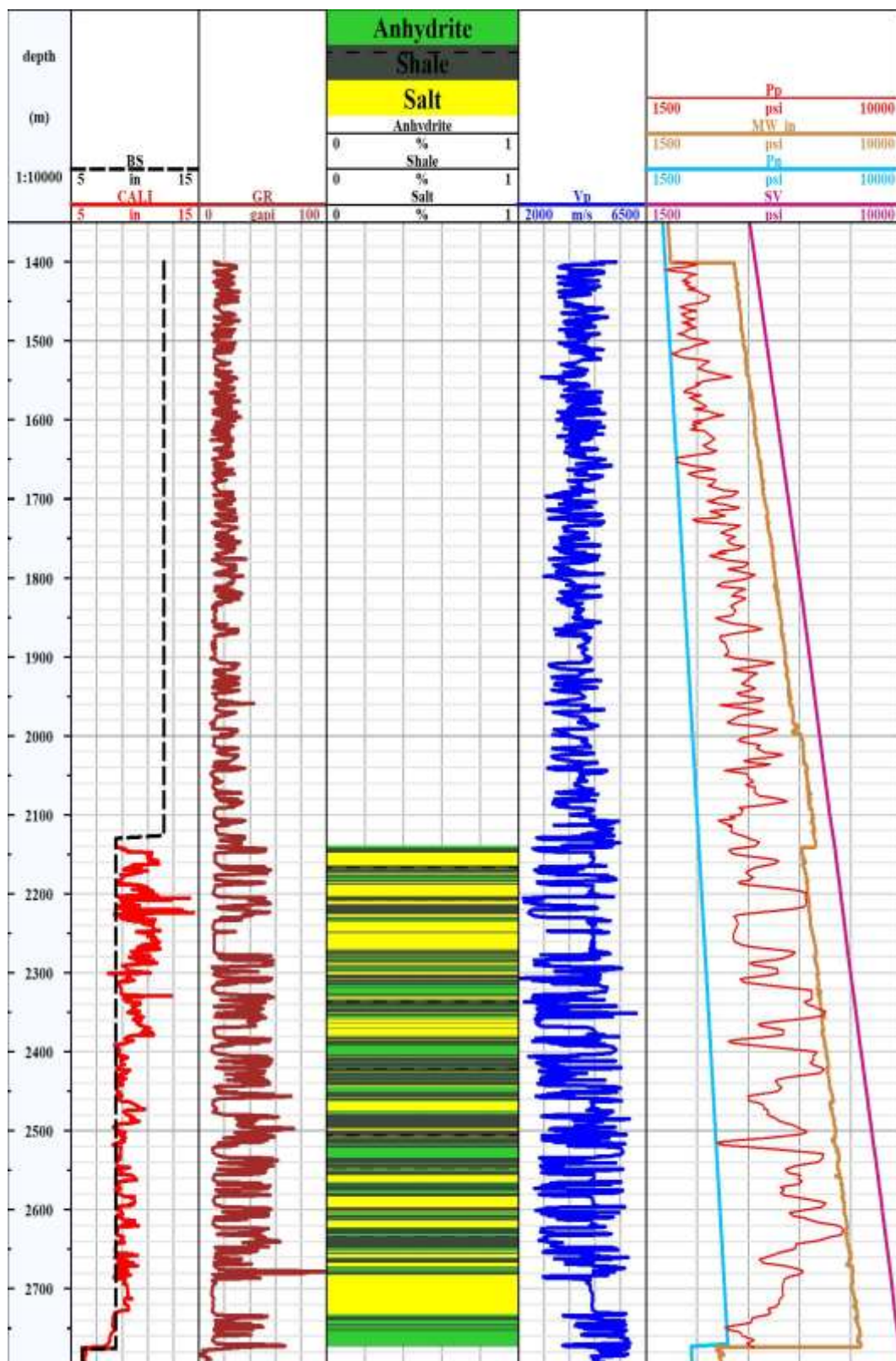
$$V-V_{\infty} = (1.02 \cdot Se)^{0.56} \quad (۶-۱۳)$$

از آنجایی که میدان آجاجاری و مارون اختلاف ارتفاعی زیادی با هم دارند؛ ضرایب بهینه A و B در دو میدان یکسان محاسبه نمی‌شوند و همان‌طور که در رابطه (۶-۱۲) مشاهده می‌گردد، ضرایب بهینه A و B در میدان آجاجاری به‌ترتیب ۵ و ۰/۹۹ تعیین شده است. همچنین با توجه به رابطه (۶-۱۳) ضرایب بهینه A و B در میدان مارون به‌ترتیب ۱۰۲ و ۰/۵۶ تعیین شده‌اند.

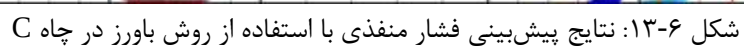
درنهایت، مقدار فشار منفذی با توجه به رابطه (۵-۷) و پارامترهای به‌دست‌آمده فوق‌الذکر، محاسبه شده و (شکل‌های ۶-۱۱ تا ۶-۱۳) مقایسه بین فشار منفذی به‌دست‌آمده از روش باورز با وزن گل برای چاه‌های مورد مطالعه را به‌صورت نمودار نشان می‌دهند.



شکل ۶-۱۱: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش باورز در چاه A



شکل ۶-۱۲: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی با استفاده از روش باورز در چاه B



روش باورز در بسیاری از میدان‌های نفتی کاربردی است؛ اما این روش در رسوبات سطحی تحکیم نشده به دلیل سرعت کم سازند، مقدار فشار منفذی را بیشتر از مقدار واقعی نشان می‌دهد [۳]. به همین دلیل در میدان آغاچاری چون چاه A با مابقی چاه‌های در دسترس تفاوت عمقی دارد و عمق سازند در نزدیکی سطح است و همان‌طور که در (شکل ۶-۹) نمایش داده شده، برازش خط روند توانی به گونه‌ای است که تخمین فشار منفذی در محدوده‌ی وزن گل قرار می‌گیرد. همچنین ضرایب بهینه A و B این میدان نسبت به میدان مارون متفاوت انتخاب شده است.

در میدان مارون از آنجایی که داده‌های اندازه‌گیری فشار منفذی در این مطالعه در دسترس نیست؛ معیار اعتبار سنجی فشار منفذی تخمین زده شده بر اساس رابطه باورز، محدوده وزن گل قرار داده شده است و با توجه به این موضوع ابتدا در چاه B مارون پارامترهای مربوط به فشار منفذی با استفاده از داده‌های وزن گل کالیبره شده و مقدار فشار منفذی در این چاه تخمین زده می‌شود و سپس با استفاده از همین پارامترهای کالیبره شده چاه مذکور، فشار منفذی در چاه C مارون تخمین زده شد.

با توجه به (شکل ۶-۱۲) از عمق ۲۷۲۰ الی ۲۷۵۰ در چاه B، اختلاف بین فشار وزن گل و فشار منفذی سازند زیاد است؛ که بعد از بررسی گزارش پایانی چاه مشاهده می‌شود که در آن فواصل هرز روی گل اتفاق افتاده است. هرز روی گل در این روش نسبت به روش ایتون بهتر قابل مشاهده می‌باشد.

۶-۵ مدل تجربی ایتون براساس پارامترهای حفاری

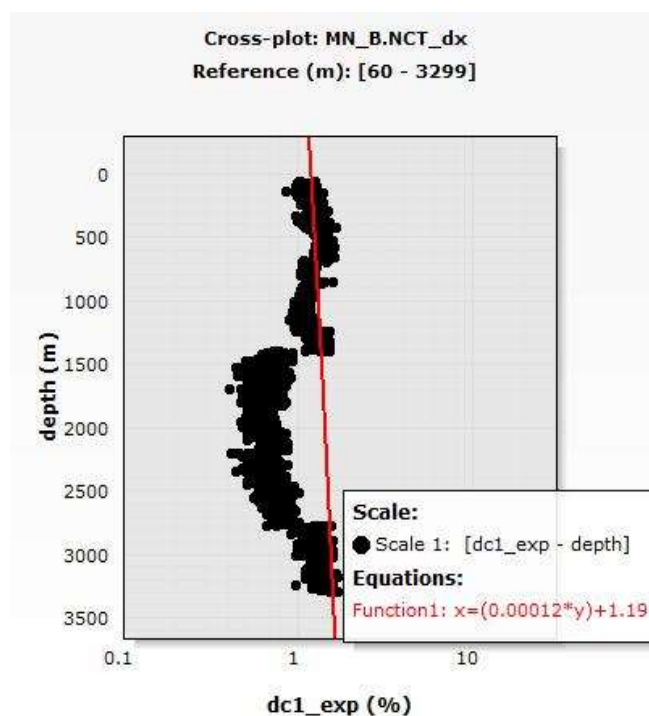
به منظور تخمین فشار منفذی بر اساس روش ایتون با استفاده از پارامترهای حفاری با توجه به رابطه (۵-۵) نیاز به پارامترهای ورودی از جمله فشار هیدرواستاتیک، فشار روباره، پارامتر بدون بعد d ، dc و تعیین خط روند نرمال بر روی پارامتر بدون بعد حفاری dc می‌باشد.

مقادیر فشار هیدرواستاتیک و فشار روباره در بخش‌های قبلی محاسبه گردیده است. برای محاسبه پارامتر بدون بعد d ابتدا طبق معادله بینگهام (۵-۳) تعیین شده و سپس برای محاسبه dc ، پارامتر بدون بعد d را طبق رابطه (۵-۴) به وسیله وزن گل اصلاح می‌شود.

در مرحله بعد با استفاده از رابطه خطی، خط روند نرمال بر روی پارامتر حفاری اصلاح شده بدون بعد dc در چاه B میدان مارون تعیین شده است و از آنجائیکه روند پارامتر d در چاه های موجود تقریباً یکسان بوده از همین خط روند نرمال در مابقی چاه های موجود مورد مطالعه استفاده شده است.

خط روند نرمال براساس منطقه با فشار طبیعی در بخش های بالایی چاه مشخص می شود. در چاه B، منطقه با فشار طبیعی از سطح زمین تا عمق ۱۴۰۰ متری فرض شده است. لذا می توان بهترین خط را برای این فاصله به عنوان خط روند نرمال رسم و با همان شیب تا پایان سازند گچساران ادامه داد. با انتخاب دو نقطه از این خط می توان یک معادله خطی برای آن تعیین نمود و مقادیر آن را به عنوان عدد بدون بعد حفاری در حالت نرمال نام گذاری کرد.

(شکل ۶-۱۴) نمایی از خط روند نرمال در چاه B میدان مارون است.

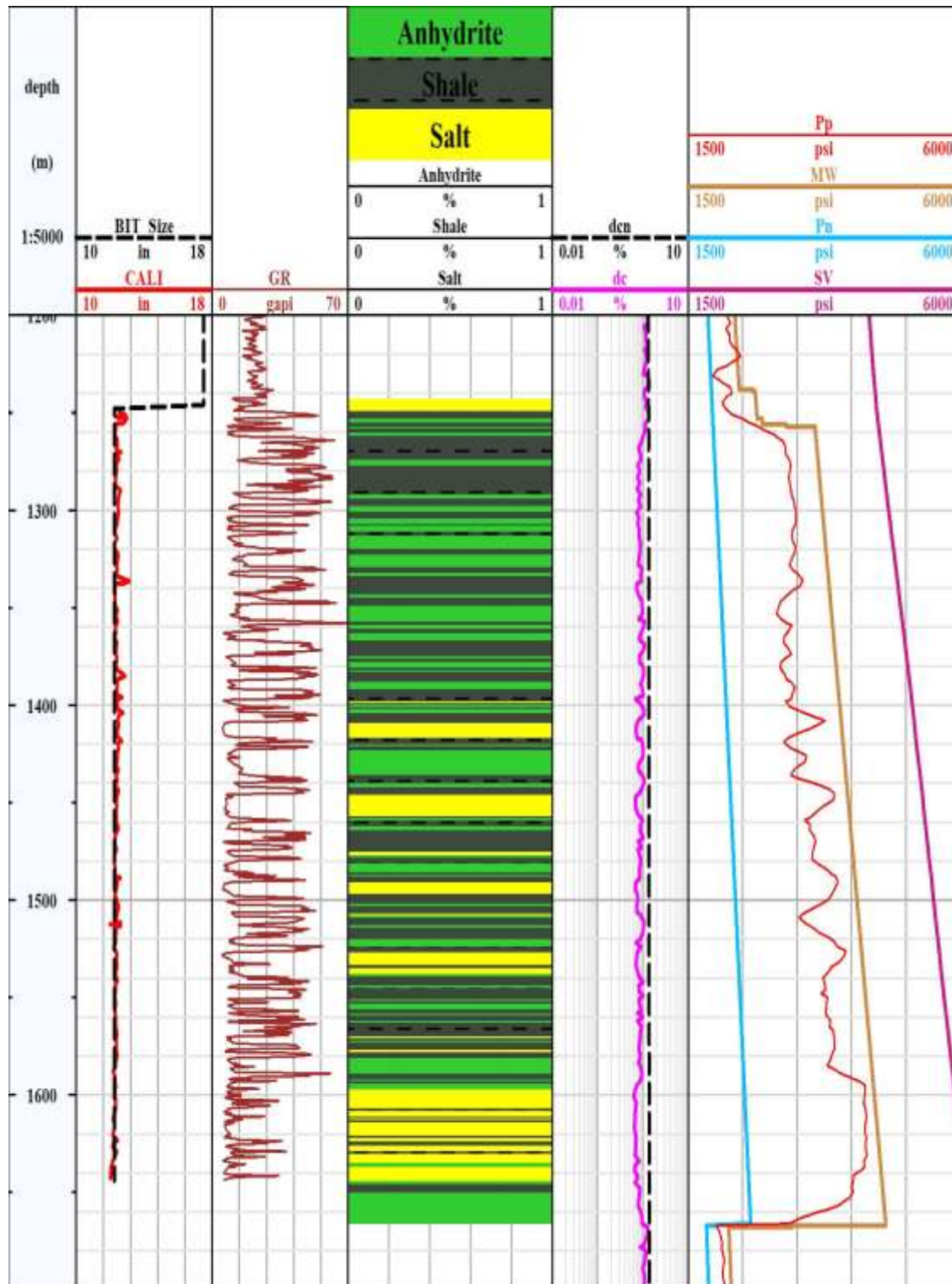


شکل ۶-۱۴: خط روند نرمال بر روی پارامتر بدون بعد dc در میدان مارون

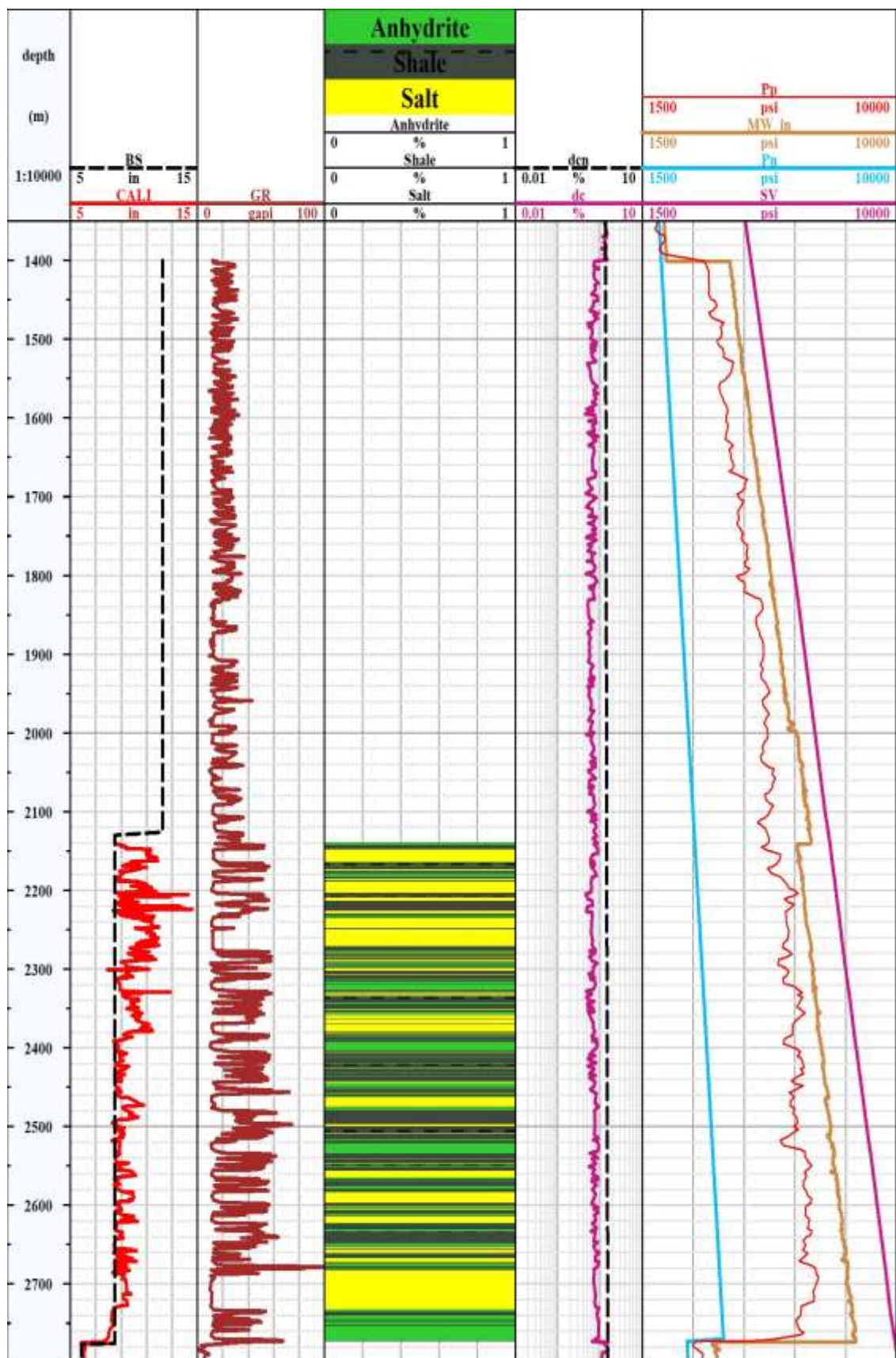
با توجه به شکل بالا رابطه (۶-۱۴) را می توان به عنوان مبنای خط روند نرمال برای تخمین فشار منفذی در حین حفاری در چاه های دیگر این میدان ها در نظر گرفت.

$$dc_n = (0.00012 * x) + 1.19 \quad (۶-۱۴)$$

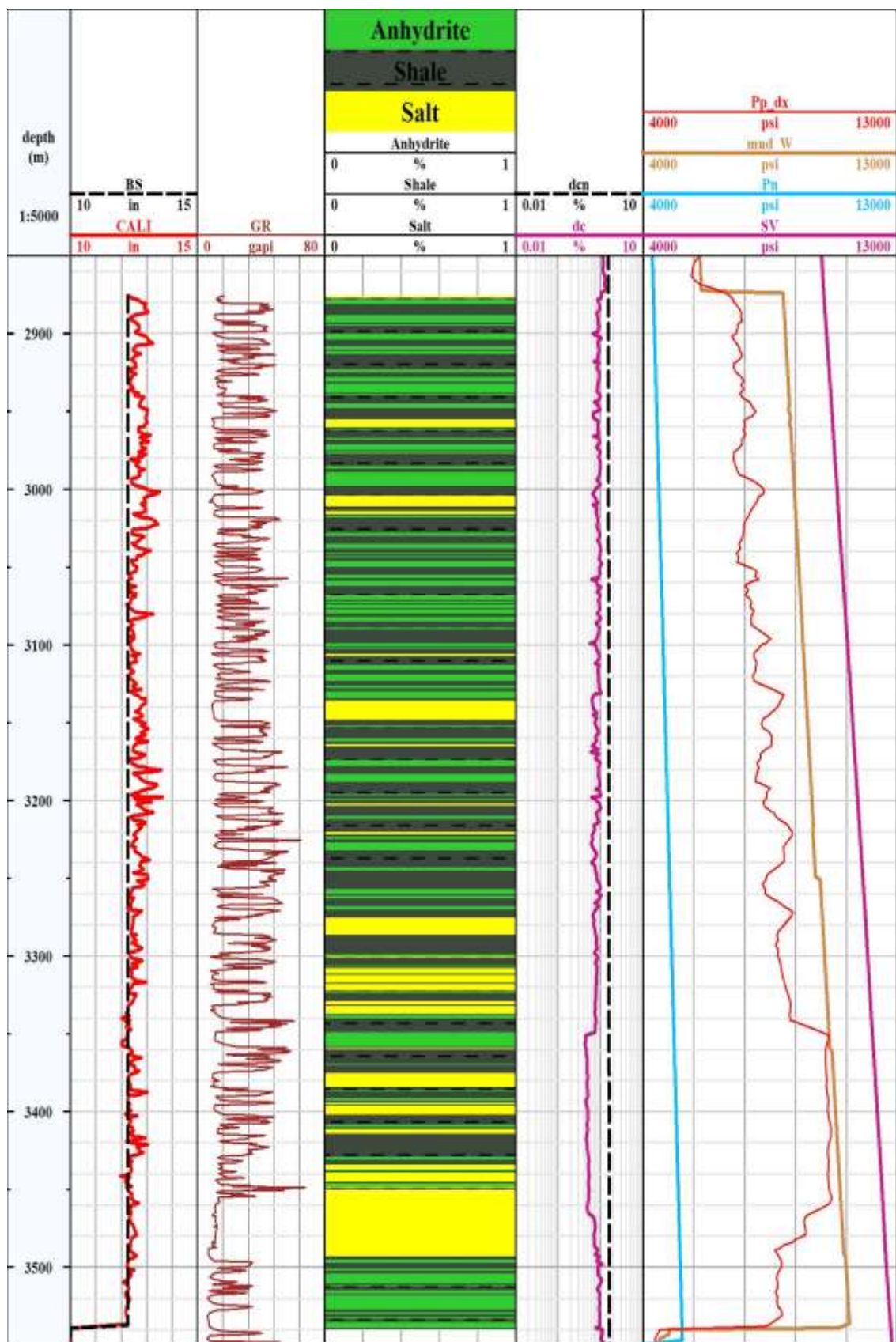
در نهایت پس از تعیین خط روند نرمال (۶-۱۴) و به کار بردن ضریب نمایی $x=1/2$ ، مقدار فشار منفذی محاسبه شده و نتایج آن در بخش گچساران چاه‌های مورد مطالعه به صورت شکل‌های زیر می‌باشد.



شکل ۶-۱۵: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در محدوده گچساران چاه A

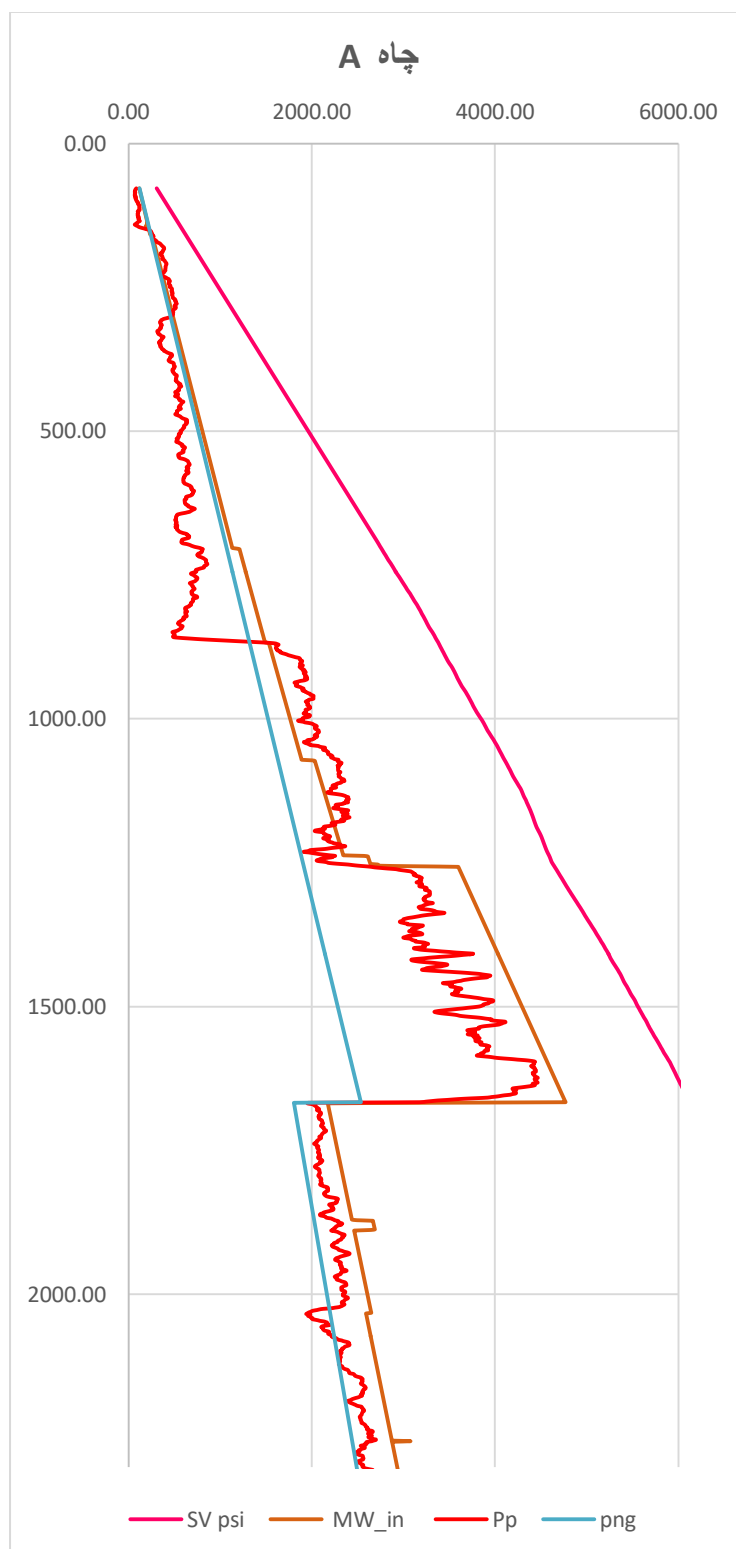


شکل ۶-۱۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در محدوده گچساران چاه B

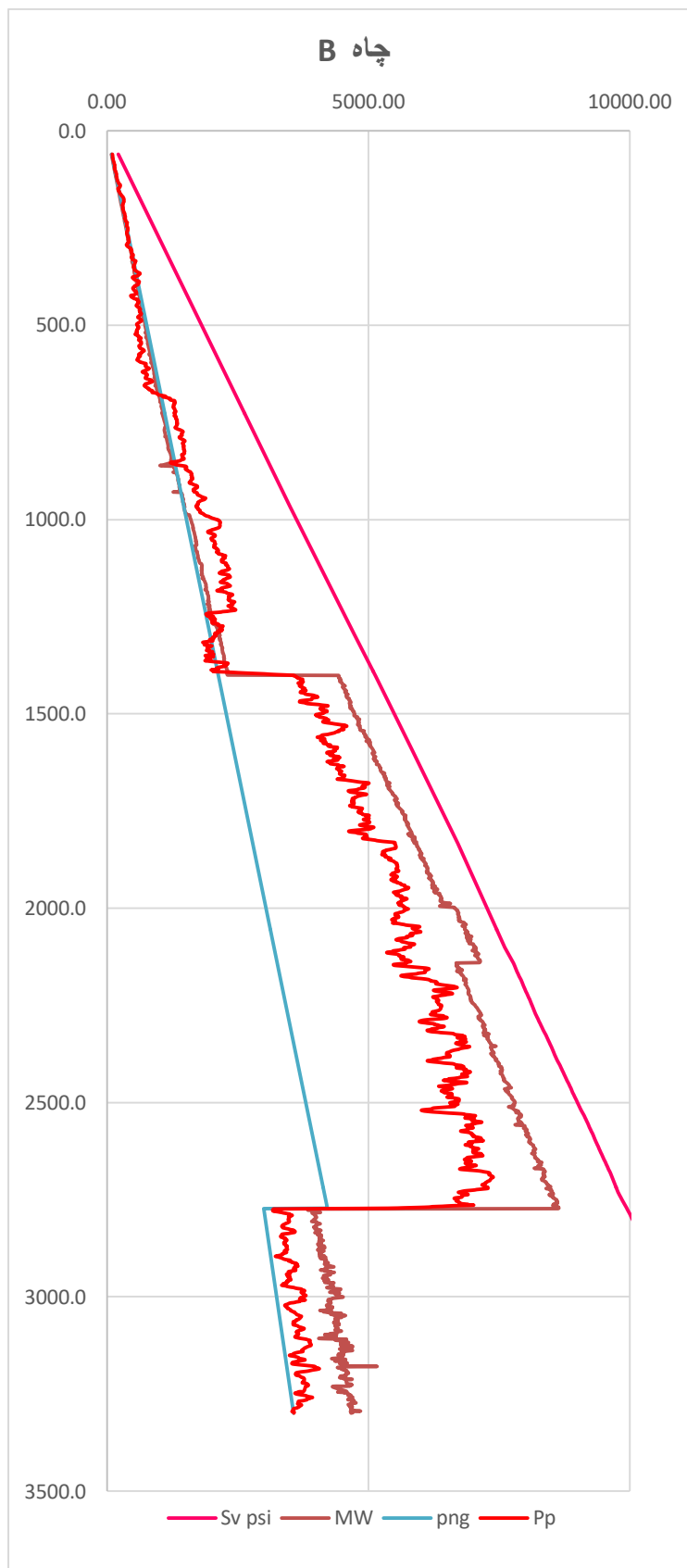


شکل ۶-۱۷: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در محدوده گچساران چاه C

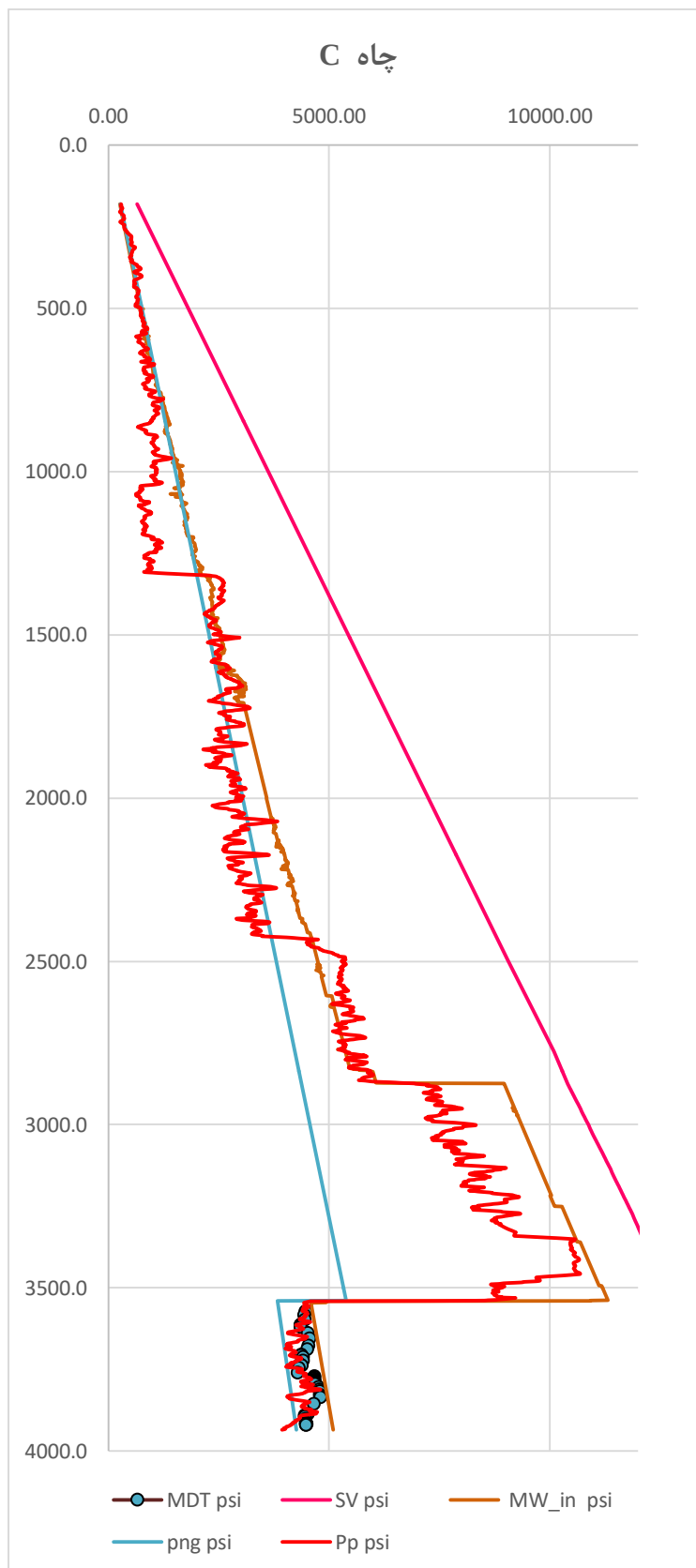
(شکل‌های ۱۸-۶ تا ۲۰-۶) شماتیک کلی تخمین فشار منفذی با استفاده از روش ایتون براساس پارامترهای حفاری در چاه‌های مورد مطالعه می‌باشد.



شکل ۱۸-۶: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در چاه A



شکل ۶-۱۹: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در چاه B



شکل ۶-۲۰: نتایج پیش‌بینی فشار منفذی براساس پارامترهای حفاری در چاه C

مزیت این روش نسبت به دیگر روش‌های ارزیابی فشار منفذی در این است که می‌توان فشار منفذی را در حین عملیات حفاری تعیین نمود و از هزینه‌های حفاری کم کرد.

در برخی از فواصل چاه‌ها، اختلاف بین فشار وزن گل و فشار منفذی سازند زیاد است؛ که بعد از بررسی گزارش پایانی چاه مشاهده شد که در آن فواصل هرز روی گل اتفاق افتاده است.

همچنین در برخی فواصل، افزایش مقادیر فشار منفذی مشاهده می‌شود که نزدیک یا مماس وزن گل می‌باشد. با بررسی نمودارهای وزن روی مته و نرخ نفوذ حفاری، می‌توان حضور یک لایه با فشار غیرطبیعی را در این فواصل حدس زد. زیرا در این فواصل وزن روی مته کم، نرخ نفوذ حفاری زیاد و عدد بدون بعد حفاری هم کاهش یافته است.

با توجه به (شکل ۶-۱۷)، در عمق ۳۳۵۶ به بعد در چاه C، تخمین فشار بیشتر از وزن گل و نامناسب شده؛ که بعد از بررسی گزارش پایانی چاه مشاهده شد که در آن فواصل برق دکل حفاری قطع شده و در نتیجه تخمین فشار در این فواصل نامعتبر است.

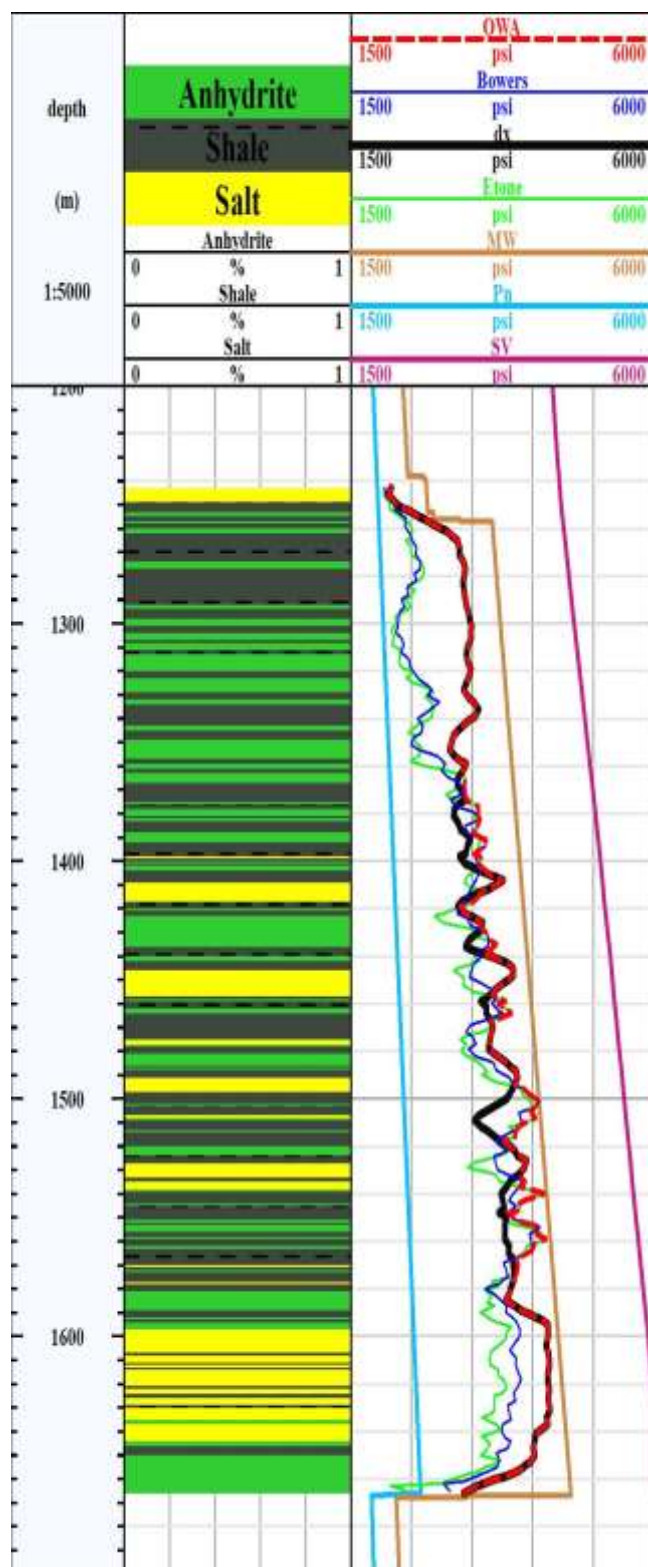
۶-۶: مقایسه روش‌های تحلیلی با روش‌های عددی

بعد از تعیین فشار منفذی با استفاده از روش‌های تحلیلی، در این بخش به وسیله‌ی روش‌های عددی برای ترکیب نتایج تخمین‌های مختلف، به منظور رسیدن به پاسخی مطلوب و قابل تعمیم، صورت می‌پذیرد.

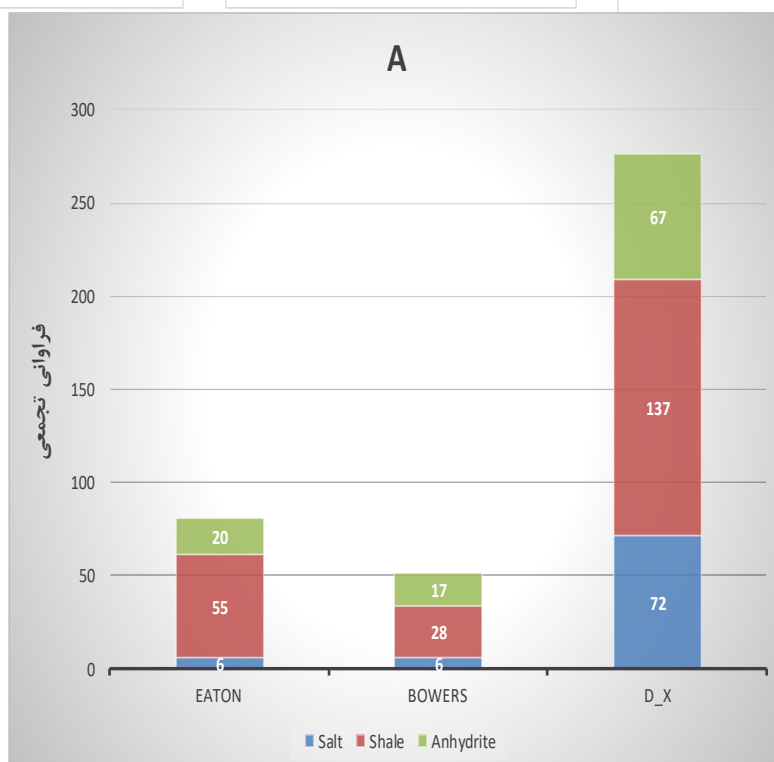
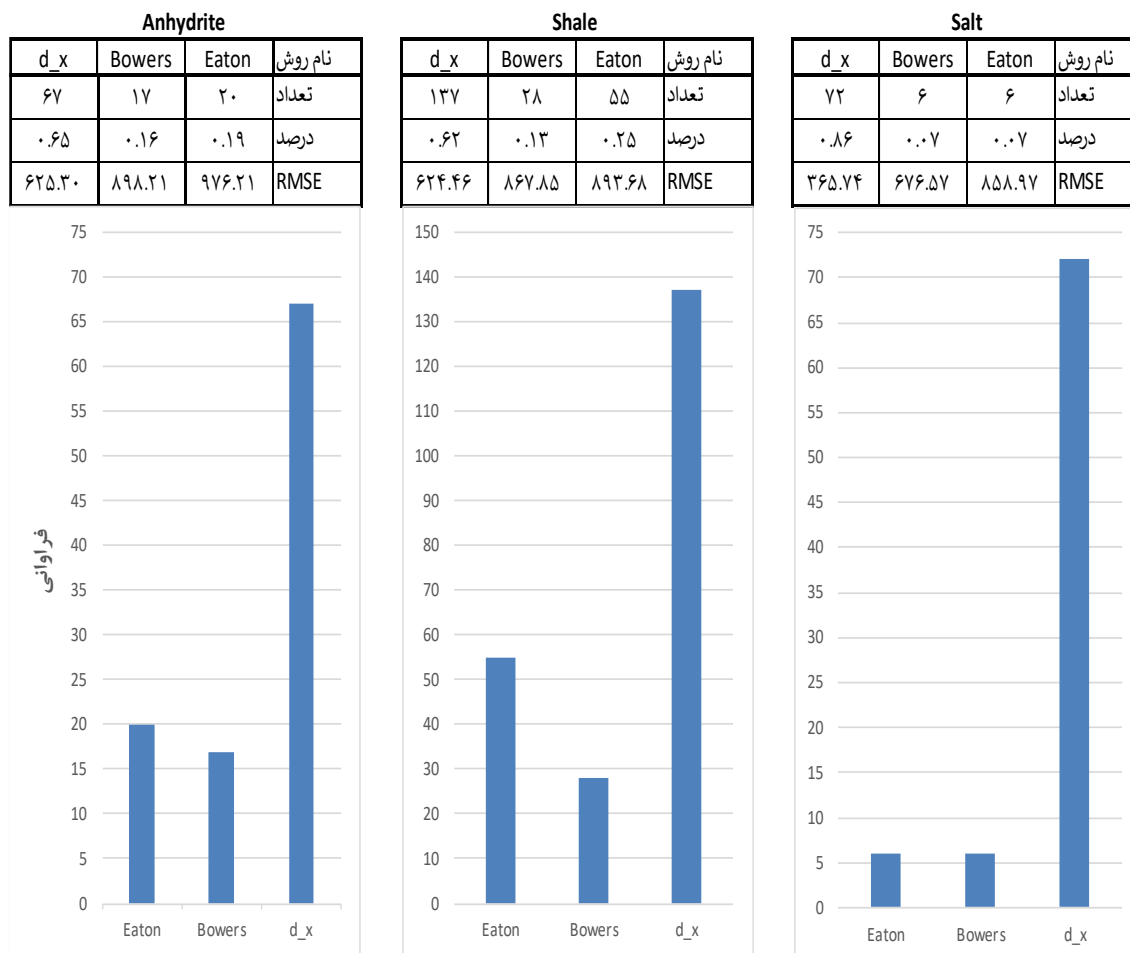
برای ترکیب نتایج حاصل از تخمین‌های تحلیلی، ابتدا تمام نتایج به صورت مرتب و منظم داخل نرم‌افزار Techlog وارد می‌شود؛ تا از آن خروجی تمام روش‌های تحلیلی به صورت یک متر حاصل شود و از آن به عنوان ورودی روش‌های ترکیب اطلاعات استفاده می‌شود.

در مرحله بعد با استفاده از تئوری روش‌های عددی که در فصل گذشته به صورت مفصل به آن پرداخته شد و به کمک کدهای مربوط به هر روش، به تلفیق و ترکیب نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی با استفاده از نرم‌افزار Matlab پرداخته شد؛ که خروجی این روش‌ها به صورت نمودار در شکل‌های (۶-۶)

(۲۱) و (۲۲-۶) آمده است.



شکل ۲۱-۶: خروجی روش OWA در چاه A



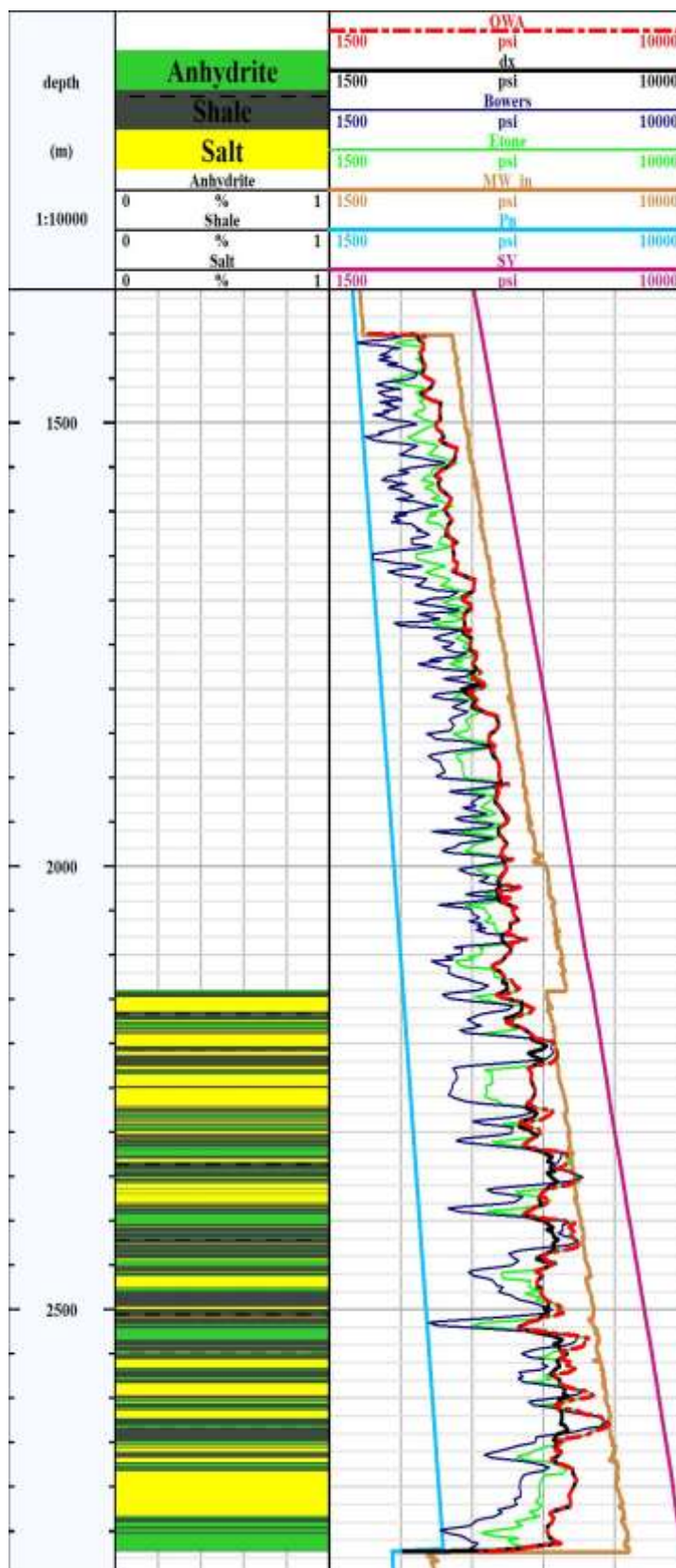
شکل ۶-۲۲: مقایسه روش‌های تحلیلی با استفاده از OWA براساس لایه‌های مختلف چاه A

با توجه به (شکل ۶-۲۱) روش‌های تحلیلی (ایتون، باورز و پارامترهای حفاری ایتون) از عمق ۱۲۵۰ تا ۱۶۶۰ متری در چاه A میدان آگاجاری تخمین زده شد و به‌عنوان ورودی روش‌های عددی وارد نرم‌افزار Matlab گردید.

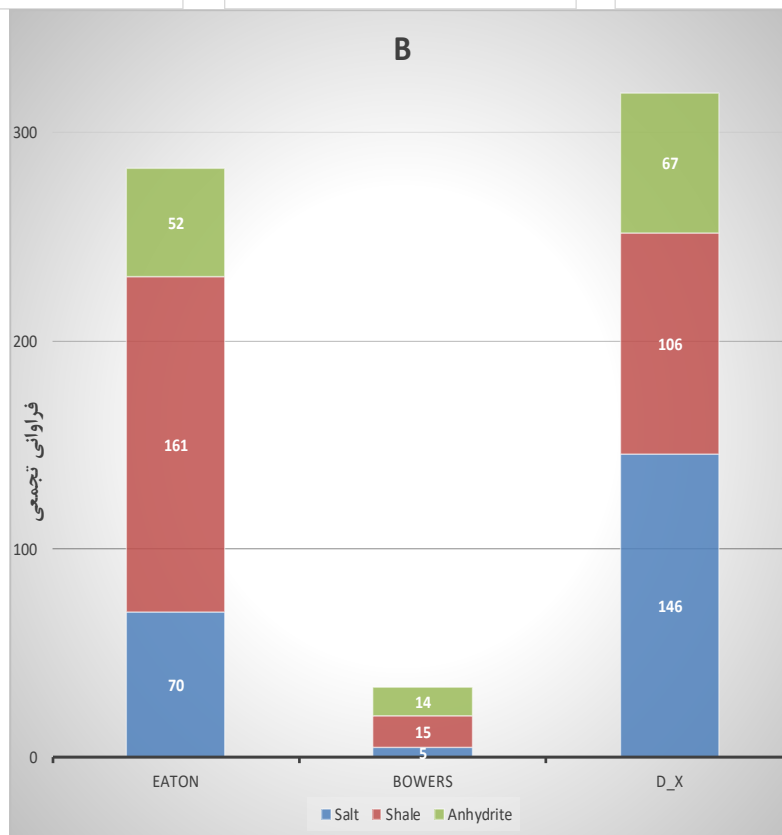
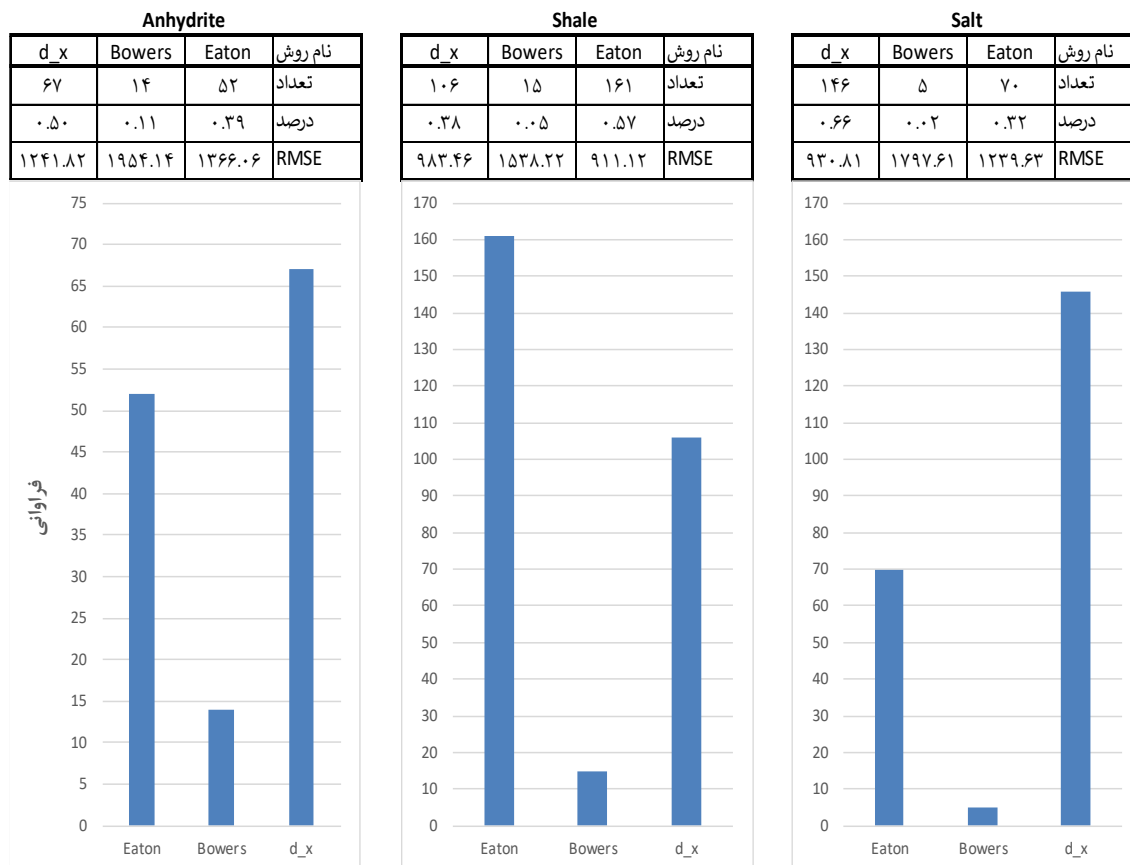
خروجی روش OWA، برای مقایسه روش‌های تحلیلی فوق وارد نرم‌افزار Techlog شد و سپس بر اساس سنگ‌شناسی‌های غالب گچساران (نمک، شیل و انیدریت) تفکیک گردید؛ که نتایج حاصل به‌صورت نمودار فراوانی در (شکل ۶-۲۲) نمایش داده شده است.

مطابق شکل، روش OWA با توجه به نمودار فراوانی در سنگ‌شناسی مختلف به‌ترتیب: روش پارامترهای حفاری ایتون، ایتون و باورز را در میدان آگاجاری بهتر تشخیص داده است و همچنین میزان RMSE مطابق جدول بالای (شکل ۶-۲۲)، بیانگر این است که در لایه‌های نمک، شیل و انیدریت؛ روش پارامترهای حفاری ایتون دارای خطای کمتری می‌باشند و همچنین مزیت روش پارامترهای حفاری ایتون نسبت به دیگر روش‌های ارزیابی فشار منفذی این تحقیق در این است که می‌توان فشار منفذی را در حین عملیات حفاری تعیین نمود. بنابراین می‌توان ضمن تشخیص مناطقی که فشار منفذی غیرعادی دارند، ریسک حفاری و هزینه‌های مربوطه در این مناطق را کاهش داد.

بین روش‌های ایتون و باورز که وابسته به‌سرعت هستند مطابق (شکل ۶-۲۲)؛ روش OWA با توجه به نمودار فراوانی شیل‌ها روش ایتون را بهتر تشخیص داده است.



شکل ۶-۲۳: خروجی روش OWA در چاه B



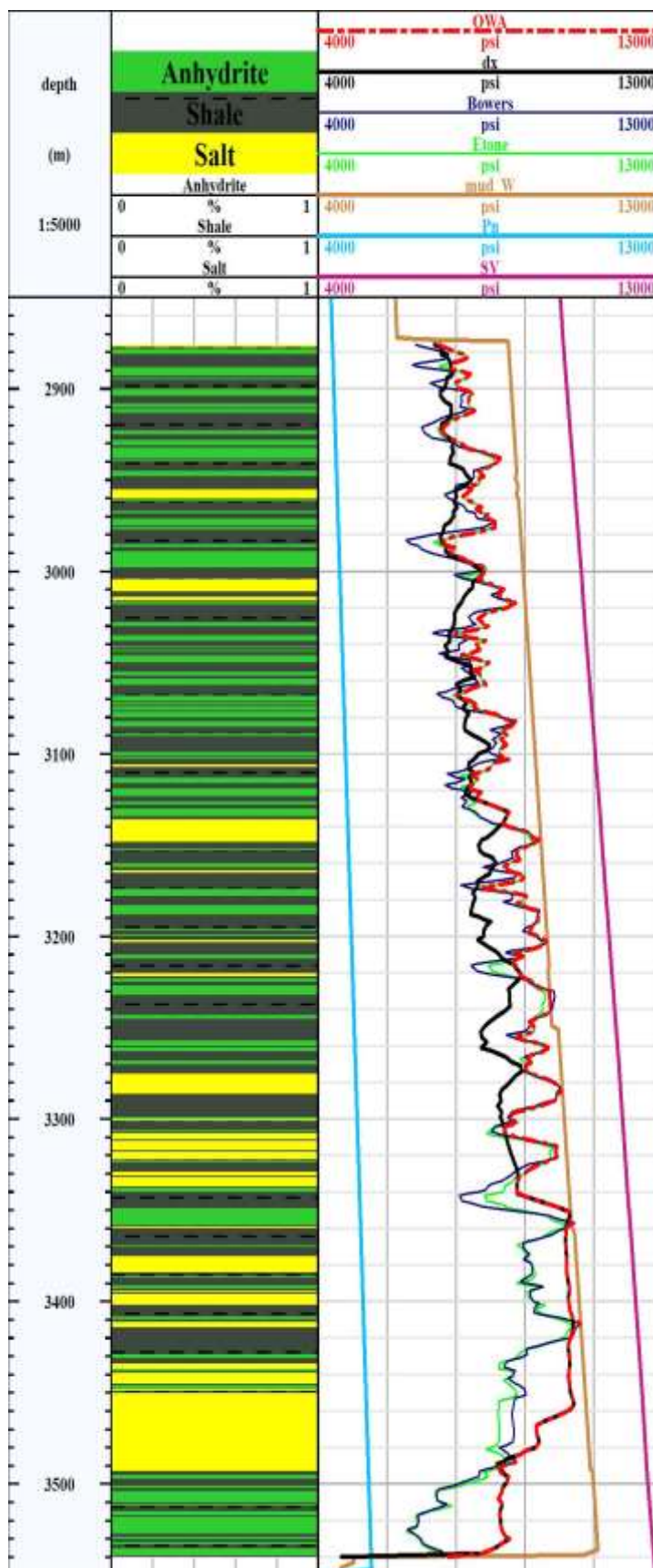
شکل ۶-۲۴: مقایسه روش‌های تحلیلی با استفاده از OWA براساس لایه‌های مختلف چاه B

با توجه به (شکل ۶-۲۳) روش‌های تحلیلی (ایتون، باورز و پارامترهای حفاری ایتون) از عمق ۱۴۰۰ تا ۲۷۷۷ متری در چاه B میدان مارون تخمین زده شد و به‌عنوان ورودی روش‌های عددی وارد نرم‌افزار Matlab گردید؛ ولی بعد از طبقه‌بندی خروجی روش OWA براساس سنگ‌شناسی در نرم‌افزار Techlog مشاهده گردید که از عمق ۱۴۰۰ تا ۲۱۴۰ به علت نبود مقادیر اندازه‌گیری چگالی، در این عمق‌ها، خروجی روش مطلوب نیست. لذا در قسمت بعد عمق‌های ذکرشده کنار گذاشته شد و خروجی روش OWA از عمق ۲۱۴۰ تا ۲۷۷۷ متری، برای مقایسه روش‌های تحلیلی فوق وارد نرم‌افزار Techlog شد و سپس بر اساس سنگ‌شناسی‌های گچساران (نمک، شیل و انیدریت) تفکیک گردید؛ که نتایج حاصل به‌صورت نمودار فراوانی در (شکل ۶-۲۴) نمایش داده شده است.

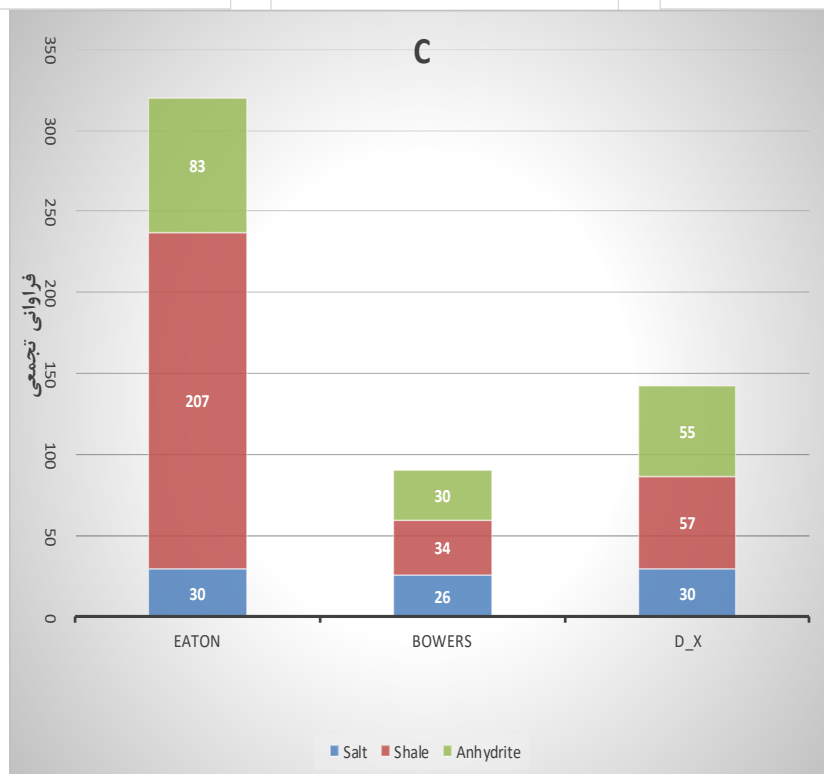
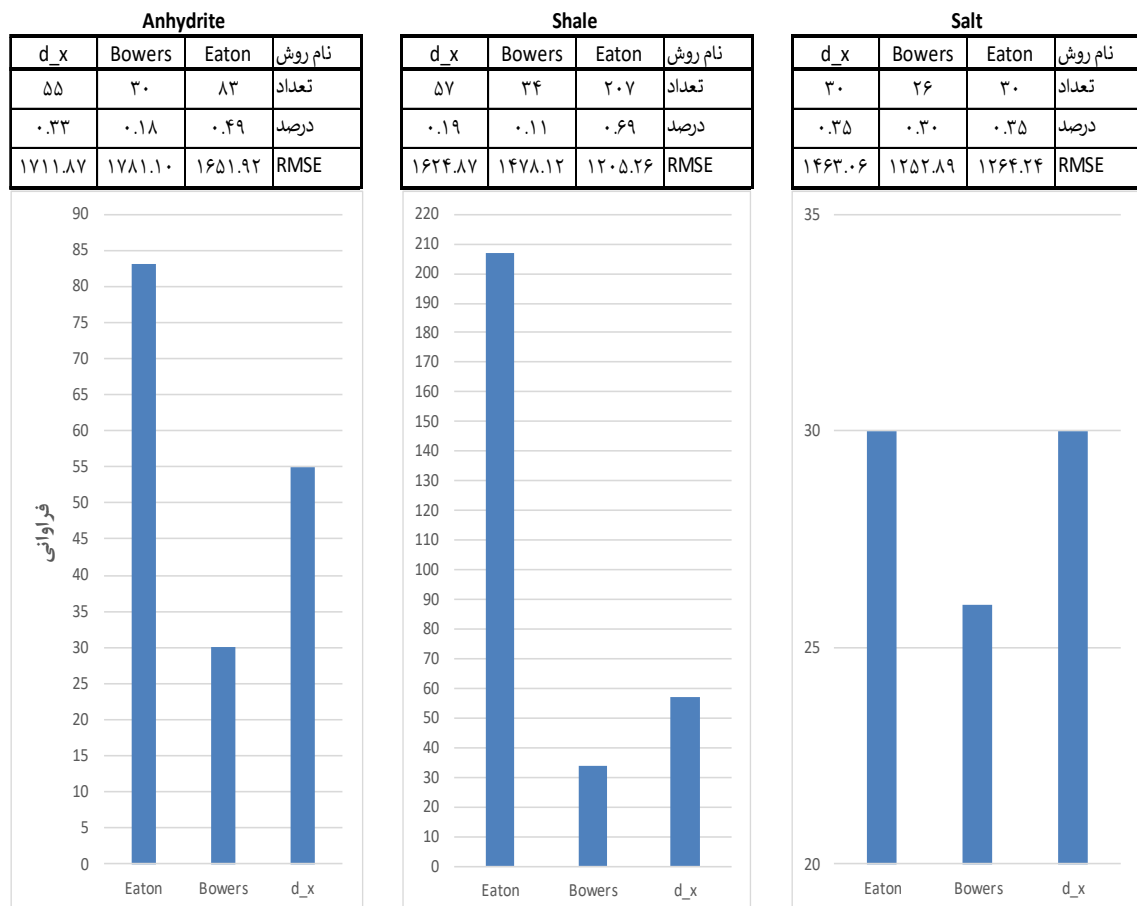
مطابق شکل، روش OWA با توجه به نمودار فراوانی در سنگ‌شناسی‌های نمک و انیدریت به‌ترتیب: روش پارامترهای حفاری ایتون، ایتون و باورز را بهتر تشخیص داده است و همچنین میزان RMSE مطابق جدول، بیانگر این است که در سنگ‌شناسی‌های نمک و انیدریت روش پارامترهای حفاری ایتون و سپس روش ایتون و در آخر روش باورز دارای میزان خطای کمتری می‌باشند. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و مقایسه صورت گرفته روش پارامترهای حفاری ایتون، ایتون و باورز در سنگ‌شناسی نمک و انیدریت برگزیده شده‌اند؛ اما در قسمت شیلی که بحث اصلی این تحقیق است و احتمال آن هست که فشار غیرعادی موجود در سازند گچساران مربوط به همین سنگ‌شناسی باشد؛ روش OWA با توجه به نمودار فراوانی شیل‌ها به‌ترتیب: روش ایتون، پارامترهای حفاری ایتون و باورز را بهتر تشخیص داده است و همچنین میزان RMSE مطابق جدول، بیانگر این است که در سنگ‌شناسی شیل روش ایتون و سپس روش پارامترهای حفاری ایتون و در آخر روش باورز دارای میزان خطای کمتری می‌باشند. از آنجایی که روش ایتون وابسته به سرعت است و پیک‌های سرعت در واقع نقاط کالیبراسیون این نمودارها به‌وسیله وزن گل هستند؛ پترن فشاری که تخمین می‌زند معادل همان پترن سرعت می‌باشد و همچنین چون لایه‌های شیلی‌کندی سرعت بالایی دارند؛ این پیک‌ها مؤید لایه‌های شیلی می‌باشند. در واقع با توجه به فرض روش ایتون، نقاط تخمین فشار بالا در نمودارهای فوق در لایه‌های شیلی رخ

می‌دهد. درنهایت با توجه به فرضیات و نتایج بالا انتظار می‌رود که در لایه‌های شیلی روش ایتون، روش برگزیده باشد.

مطابق (شکل ۶-۲۴)، با توجه به نمودار فراوانی و جدول RMSE در سنگ‌های مختلف در تمام روش‌ها روش باورز از همه ضعیف‌تر عمل کرده؛ به این دلیل که در این روش کنترل کاربر نسبت به روش ایتون کمتر است و همچنین وجود سنگ‌های مختلف باعث تغییرات فشاری زیادی می‌شود.



شکل ۶-۲۵: خروجی روش OWA در چاه C



شکل ۶-۲۶: مقایسه روش‌های تحلیلی با استفاده از OWA براساس لایه‌های مختلف چاه C

با توجه به (شکل ۶-۲۵) روش‌های تحلیلی (ایتون، باورز و پارامترهای حفاری ایتون) از عمق ۲۸۸۰ تا ۳۵۴۰ متری در چاه C میدان مارون تخمین زده شد و به‌عنوان ورودی روش‌های عددی وارد نرم‌افزار Matlab گردید. لازم به ذکر است که اطلاعات عمق ۳۳۵۶ تا ۳۴۷۰ به دلیل قطع شدن برق دکل حفاری (گزارش پایانی چاه) و مناسب نبودن پارامترهای حفاری در این بازه، از مقایسه و نمودارهای فراوانی حذف شده‌اند.

در ادامه عمق‌های ذکرشده کنار گذاشته شد و خروجی روش OWA، برای مقایسه روش‌های تحلیلی فوق وارد نرم‌افزار Techlog شد و سپس بر اساس سنگ‌شناسی‌های گچساران (نمک، شیل و انیدریت) تفکیک گردید که نتایج حاصل به‌صورت نمودار فراوانی در (شکل ۶-۲۶) نمایش داده شده است.

مطابق شکل، روش OWA با توجه به نمودار فراوانی در سنگ‌شناسی نمک به‌ترتیب: ایتون و روش پارامترهای حفاری ایتون را به تعداد مساوی و سپس روش باورز را بهتر تشخیص داده است؛ ولی براساس جدول RMSE، در سنگ‌شناسی نمک روش ایتون دارای میزان خطای کمتری نسبت به روش پارامترهای حفاری می‌باشد و همچنین در سنگ‌شناسی انیدریت روش OWA با توجه به نمودار فراوانی مربوطه به‌ترتیب: روش ایتون، پارامترهای حفاری ایتون و باورز را بهتر تشخیص داده است و همچنین میزان RMSE مطابق جدول، مؤید آن است که در سنگ‌شناسی انیدریت روش ایتون و سپس روش پارامترهای حفاری ایتون و در آخر روش باورز دارای میزان خطای کمتری می‌باشند.

در قسمت شیلی که بحث اصلی این تحقیق است؛ روش OWA با توجه به نمودار فراوانی شیل‌ها به‌ترتیب: روش ایتون، پارامترهای حفاری ایتون و باورز را بهتر تشخیص داده است و همچنین میزان RMSE مطابق جدول، بیانگر این است که در سنگ‌شناسی شیل، روش ایتون دارای خطای کمتر و در جایگاه‌های بعدی روش باورز و روش پارامترهای حفاری ایتون دارای میزان خطای کمتری می‌باشند.

در این چاه با توجه به نتایج و مقایسه‌های بالا ملاحظه می‌گردد؛ روش OWA همانند چاه B روش ایتون را در لایه‌های شیلی انتخاب کرده است؛ زیرا روش ایتون وابسته به‌سرعت است و همچنین لایه‌های شیلی دارای کندی سرعت بالایی هستند؛ درنتیجه با توجه به فرض روش ایتون، نقاط تخمین فشار بالا

در نمودارهای فوق در لایه‌های شیلی رخ می‌دهد. در نهایت با توجه به این فرضیات و نتایج حاصله انتظار می‌رود که در لایه‌های شیلی ابتدا روش ایتون برگزیده شود.

علاوه بر روش OWA از روش‌های انتگرال فازی هم برای مقایسه نتایج روش‌های تحلیلی استفاده گردید؛ لذا با توجه به ماهیت داده‌ها و در دسترس نبودن فشار مستقیم سازند، نتایج روش‌های انتگرال فازی هم دقیقاً مشابه روش OWA به دست آمد. لذا از آوردن نتایج روش‌های فازی به خاطر خروجی مشابه صرف نظر شد.

فصل ۷ : نتیجه گیری و پیشنهاد

۷-۱ نتیجه‌گیری

فشار منفذی یکی از مهم‌ترین پارامترهای ژئومکانیک است. تخمین فشار منفذی، در انجام بسیاری از عملیات مرتبط با حفاری، برداشت، تزریق و ایجاد شکست هیدرولیک، لازم و ضروری است. به‌منظور تعیین فشار منفذی سازند، در این تحقیق از داده‌های متداول چاه استفاده شده است. با توجه به نتایج این مطالعه می‌توان نتیجه‌گیری زیر را انجام داد:

۱. در این مطالعه به‌منظور تعیین نوع مکانیسم، روند سرعت در مقابل چگالی به کار گرفته شد؛ که این روند در میدان‌های مورد مطالعه با توجه به نشانگرهای ایجادکننده برای مکانیسم‌های مختلف، بیشتر نشان‌دهنده تحکیم نامتوازن بود و شواهد کافی دال بر انبساط سیال و باربرداری و یا اثر تغییرات دیاژنز در این روند مشاهده نشد. از این‌رو، در تعیین فشار منفذی روش ایتون و فرم ساده روش باورز برای تعیین فشار منافذ استفاده گردید.
۲. برای بیشتر روش‌های تخمین نیاز به فشار روباره است. برای مدل‌سازی این فشارها در جاهایی که فاقد نگارهای چگالی باشند؛ می‌توان با کمک روابط (۵-۶) تا (۸-۶) و از روی سرعت‌های بازه‌ای، چگالی معادل لایه‌ها را تعیین کرد و به دنبال آن فشار روباره را تعیین نمود. در این صورت بهتر است سازندها و لایه‌های مختلف تفسیر شده و در هر کدام با توجه به گرافیک ول لاگ‌های موجود، چگالی معادل متناسب با سازند تعیین شود.
۳. پارامترهای بهینه خط روند نرمال منطبق بر نقاط شیلی دارای فشار عادی، در روش ایتون برای میدان آغاجاری $\Delta t_m = 50 \text{ } \mu\text{s/ft}$ ، $\Delta t_{ml} = 180 \text{ } \mu\text{s/ft}$ و $C = 0.0023$ و همچنین برای میدان مارون $\Delta t_m = 50 \text{ } \mu\text{s/ft}$ ، $\Delta t_{ml} = 130 \text{ } \mu\text{s/ft}$ و $C = 0.001$ تعیین شده است.
۴. معادله ایتون با ثابت نمایی (x) حدود ۱/۵ در میدان آغاجاری و حدود ۲/۲ در میدان مارون، بهترین ارتباط را با مقادیر فشار وزن گل دارد.
۵. ضرایب بهینه A و B در میدان آغاجاری به ترتیب ۵ و ۰/۹۹ تعیین شده‌اند و همچنین ضرایب بهینه A و B در میدان مارون به ترتیب ۱۰۲ و ۰/۵۶ محاسبه شده‌اند.

۶. با توجه به خروجی روش‌های ایتون و باورز، نقاط تخمین فشار بالا در لایه‌های مارنی اتفاق افتاده است. زیرا لایه‌های نمک و انیدریت (به خاطر تخلخل ناچیز) دارای کندی سرعت کم یا ثابت می‌باشند. در واقع عمده فشار سازند گچساران به دلیل وجود لایه‌های مارنی است.
۷. رابطه (۶-۱۴) را می‌توان به‌عنوان مبنای خط روند نرمال برای تخمین فشار منفذی در حین حفاری در چاه‌های دیگر این میدان‌ها استفاده کرد و همچنین معادله روش پارامترهای حفاری ایتون با ثابت نمایی (x) حدود $1/2$ ، بهترین ارتباط را با مقادیر فشار وزن گل دارد.
۸. با توجه به نتایج حاصل از روش OWA در میدان آغاجاری، روش پارامترهای حفاری ایتون نسبت به روش‌های ایتون و باورز در این میدان عملکرد بهتری از خود نشان داده و همچنین میزان RMSE کمتری نسبت به روش‌های مبتنی بر سرعت داشته است.
۹. با توجه به نتایج حاصل از روش OWA در لایه‌های مارنی میدان مارون، روش ایتون نسبت به روش‌های دیگر عملکرد بهتری از خود نشان داده و همچنین میزان RMSE کمتری نسبت به روش پارامترهای حفاری ایتون و در نهایت باورز داشته است.

۲-۷ پیشنهادها

۱. عوامل متعددی می‌توانند سبب انحراف فشار منفذی از روند نرمال آن شده و باعث ایجاد حالت‌های غیرعادی شوند. از جمله عوامل ساختمانی، رسوب‌شناسی و دیاژنزی، زایش هیدروکربور و غیره. داشتن آگاهی درباره‌ی عوامل به وجود آورنده‌ی فشار منفذی، به‌ویژه در سازند مورد مطالعه در تخمین آن، اهمیت ویژه‌ای دارد. به‌عنوان مثال در بخش‌های نمکی، روش‌های چاه‌نگاری معمول (ایتون و باورز) پاسخ‌های مناسبی ایجاد نمی‌کنند و استفاده از روش‌های مبتنی بر نشانگرهای لرزه‌ای توصیه می‌شود. همچنین در شیل‌ها، عموماً تحکیم نامتوازن دلیل اصلی فشار غیرعادی است و روش‌های مبتنی بر نگارهای چاه معقول‌تر است.
۲. با توجه به هدف این تحقیق که تخمین فشار منفذی با روش‌های مختلف است؛ به دلیل وجود محدودیت در اندازه‌گیری پارامترهای پتروفیزیکی سازند گچساران، داده‌ها به‌صورت پراکنده می‌باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی تنها از روش پارامترهای حفاری به علت وجود داده‌های حفاری در تمام چاه‌های موجود برای تخمین فشار منفذی در چاه‌های نزدیک به هم استفاده گردد؛ تا نتایج مطلوب مختص همین روش بدست آید.
۳. در روش پارامترهای حفاری با استفاده از گزارش نهایی چاه مبنی بر تعویض سرمته، پیشنهاد می‌گردد تصحیحات لازم مربوط به سرمته در روش پارامترهای حفاری ایتون گنجانده شود.
۴. حسب این که منطقه مورد مطالعه در گروه پوش سنگ قرار می‌گیرد و پرفشار محسوب می‌شوند، شرکت‌های نفت ریسک یا خطر انجام نمودارهای مستقیم فشار (RFT, MDT, XPT) را نمی‌پذیرند؛ لذا تفسیرهای این تحقیق در حالتی انجام‌شده که امکان دسترسی به این نوع داده‌ها وجود نداشته است. بنابراین پیشنهاد می‌گردد در آینده، اگر اطلاعات مربوطه به این پایان‌نامه اضافه شود، تفسیرها و نتایج به مراتب بهتر می‌گردد.
۵. با توجه به نتایج روش‌های عددی پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات بعدی پارامترهای پتروفیزیکی و لیتولوژی مخازن به وسیله روش‌های مناسب طبقه‌بندی نظیر بیزین، پارزن و غیره؛ زون‌بندی

و کلاسه‌بندی گردد؛ سپس به وسیله روش‌های عددی وزن مناسب برای هر زون تعیین گردد و در نهایت وزن‌های مربوط به هر زون در سایر مخازن چاه‌های مطالعه نشده، استفاده گردد.

مراجعه

- [۱] Zoback M. D., (۲۰۰۷), "**Reservoir Geomechanics**", Reservoir Geomechanics.
- [۲] Zhang J., (۲۰۱۳), "Effective stress, porosity, velocity and abnormal pore pressure prediction accounting for compaction disequilibrium and unloading", **Mar. Pet. Geol.**, ۴۵, , pp. ۲-۱۱.
- [۳] عرب عامری ف., (۱۳۹۳), "مدل سازی فشار منفذی با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای و نگارهای پتروفیزیکی در یکی از مخازن نفتی جنوب غربی ایران" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده فنی مهندسی معدن.
- [۴] Azadpour M., Manaman N. S., Kadkhodaie-Ilkhchi A., Sedghipour M.-R., (۲۰۱۵), "Pore pressure prediction and modeling using well-logging data in one of the gas fields in south of Iran", **J. Pet. Sci. Eng.**, ۱۲۸, , pp. ۱۵-۲۳.
- [۵] Terzaghi K., (۱۹۴۳), "**Theoretical soil mechanics. johnwiley & sons**".
- [۶] Zhang J., (۲۰۱۱), "Pore pressure prediction from well logs: Methods, modifications, and new approaches", **Earth-Science Rev.**, ۱۰۸, ۱-۲, pp. ۵۰-۶۳.
- [۷] نوری م., ریاحی م., (۱۳۹۲), "بررسی روش‌های تخمین فشار منفذی و تخمین فشار منفذی میدان سفید زاخو با استفاده از داده‌های لرزه نگاری", **ماهنامه علمی - ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز**.
- [۸] امیری بختیار ح., نورائی نژاد خ., (۱۳۹۳), "بازنگری چینه شناسی زاگرس: سازندهای گچساران", **ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز**, ۱۳۹۳, ۱۱۱-۴۵-۴۰, pp.
- [۹] آزادپور م., شادمنامن ن., (۱۳۹۳), "بررسی مکانیزم‌های ایجاد فشار منفذی بالا در یکی از میادین هیدروکربنی جنوب ایران", **پژوهش نفت**, ۸۸, ,
- [۱۰] Carcione J. M., Helle H. B., Pham N. H., Toverud T., (۲۰۰۳), "Pore pressure estimation in reservoir rocks from seismic reflection data", **GEOPHYSICS**, ۶۸, ۵, pp. ۱۵۶۹-۱۵۷۹.
- [۱۱] آزادپور م., محمدی ی., (۱۳۹۲), "تعیین فشار منفذی در حین حفاری به کمک اطلاعات حفاری", **سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین**.
- [۱۲] نویری ع., سجادیان د. و ا., (۲۰۰۹), "مطالعه موردی برداشت نفت از مخازن هفتگل و چند مخزن موفق جهان جهت بررسی تولید صیانتی از مخازن شکاف دار ایران", **ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز**, ۱۳۸۸, ۵۸-۶۲-۵۶, pp.
- [۱۳] Atashbari V., (۲۰۱۶), "**Origin of overpressure and pore pressure prediction in carbonate reservoirs of the Abadan Plain Basin**", Thesis, Australian School of Petroleum.
- [۱۴] Swarbrick R. E., Osborne M. J., (۱۹۹۸), "Mechanisms that Generate Abnormal Pressures: an Overview", **AAPG Spec. Vol.**, pp. ۱۳-۳۴.
- [۱۵] Mackenzie A. S., Quigley T. M., (۱۹۸۸), "Principles of geochemical prospect appraisal", **Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.**, ۷۲, ۴, pp. ۳۹۹-۴۱۵.
- [۱۶] Yardley G. S., Swarbrick R. E., (۲۰۰۰), "Lateral transfer: A source of additional overpressure?", **Mar. Pet. Geol.**, ۱۷, ۴, pp. ۵۲۳-۵۳۷.
- [۱۷] شیدایی مهر م., دولتی س., پاسدار م., (۱۳۹۴), "بررسی تست‌های نمونه‌گیری سیال درون چاهی (RFT, MDT, XPT) و تحلیل نتایج آنها در یکی از مخازن جنوب ایران", **مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی**.
- [۱۸] Lee W. J., (۱۹۸۲), "Well Testing: Dallas", **TX, Soc. Pet. Eng. AIME**.

- [۱۹] Glover P., (۲۰۱۳), "Petrophysics MSc Course Notes on Formation Density Log".
- [۲۰] Chopra S., Huffman A. R., (۲۰۰۶), "Velocity determination for pore-pressure prediction", **Lead. Edge**, ۲۵, ۱۲, pp. ۱۵۰۲-۱۵۱۵.
- [۲۱] Fooshee J. S., (۲۰۰۹), "The development of a pore pressure and fracture gradient prediction model for the Ewing Banks ۹۱۰ area in the Gulf of Mexico".
- [۲۲] Van Ruth P. J., Hillis R. R., Swarbrick R. E., (۲۰۰۲), "Detecting overpressure using porosity-based techniques in the Carnarvon basin, Australia", **APPEA J.**, ۴۲, ۱, pp. ۵۵۹-۵۶۹.
- [۲۳] Badri M., Gazet S., de Tonnac G., (۲۰۰۵), "Effective use of high density VSP measurements to predict pore pressure and estimate mud weight ahead of drilling in the mahakam delta, Indonesia".
- [۲۴] Musgrave A. W., Hicks W. G., (۱۹۶۶), "Outlining of shale masses by geophysical methods", **Geophysics**, ۳۱, ۴, pp. ۷۱۱-۷۲۵.
- [۲۵] Badri M. A., Sayers C. M., Awad R., Graziano A., (۲۰۰۰), "A feasibility study for pore-pressure prediction using seismic velocities in the offshore Nile Delta, Egypt", **Lead. Edge**, ۱۹, ۱۰, pp. ۱۱۰۳-۱۱۰۸.

[۲۶] پورصیامی ح. (۱۳۹۲). "مدل سازی فشار منفذی مخزن هیدروکربنی در جنوب غرب ایران با استفاده از داده های چاه پیمایی", پژوهش نفت, ۲۳, ۷۴-۷۲, pp.

- [۲۷] Hottmann C. E., Johnson R. K., (۱۹۶۵), "Estimation of formation pressures from log-derived shale properties", **J. Pet. Technol.**, ۱۷, ۰۶, pp. ۷۱۷-۷۲۲.
- [۲۸] Gardner G. H. F., Gardner L. W., Gregory A. R., (۱۹۷۴), "Formation velocity and density—The diagnostic basics for stratigraphic traps", **Geophysics**, ۳۹, ۶, pp. ۷۷۰-۷۸۰.
- [۲۹] Eaton B. A., (۱۹۷۲), "The effect of overburden stress on geopressure prediction from well logs", **J. Pet. Technol.**, ۲۴, ۰۸, pp. ۹۲۹-۹۳۴.
- [۳۰] Eaton B. A., (۱۹۷۵), "The equation for geopressure prediction from well logs", Fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME.
- [۳۱] Bowers G. L., (۱۹۹۵), "Pore pressure estimation from velocity data: Accounting for overpressure mechanisms besides undercompaction", **SPE Drill. Complet.**, ۱۰, ۰۲, pp. ۸۹-۹۵.
- [۳۲] Bowers G. L., (۲۰۰۱), "Determining an appropriate pore-pressure estimation strategy", Offshore technology conference.
- [۳۳] Sayers C. M., Johnson G. M., Denyer G., (۲۰۰۲), "Predrill pore-pressure prediction using seismic data", **Geophysics**, ۶۷, ۴, pp. ۱۲۸۶-۱۲۹۲.
- [۳۴] Gutierrez M. A., Braunsdor N. R., Couzens B. A., (۲۰۰۶), "Calibration and ranking of pore-pressure prediction models", **Lead. Edge**, ۲۵, ۱۲, pp. ۱۵۱۶-۱۵۲۳.
- [۳۵] Deng S., Fan H., Liu Y., He Y., *et al.*, (۲۰۱۷), "Two innovative pore pressure calculation methods for shallow deep-water formations", **J. Appl. Geophys.**, ۱۴۶, pp. ۲۰۸-۲۱۳.

[۳۶] سلیمانی، سکوتی، ریاحی م. (۲۰۱۳). "پیش بینی فشار منفذی با استفاده از وارون سازی و تحلیل سرعت لرزه ای", فیزیک زمین و فضا, ۳۸, ۷۰.۴-۵۷, pp.

- [۳۷] Ugwu G. Z., (۲۰۱۵), "An overview of pore pressure prediction using seismically derived velocities", **J. Geol. Min. Res.**, ۷, ۴, pp. ۳۱-۴۰.
- [۳۸] Hoskin E., O'Connor S. A., (۲۰۱۶), "The Influence of Rock Properties on Velocity Data with Respect to Pressure Prediction—with Particular Focus on Seismic Velocity Data", **J. Earth Sci.**, ۲, , pp. ۱۹-۳۴.

[۳۹] محمدی، سلیمانی، محمودیان، (۲۰۱۸). "پیش بینی فشار غیرعادی سازند با استفاده از داده های سرعت لرزه ای

- سه بعدی، میدان کوپال"، پژوهش نفت، ۲۷، ۶-۱۱۵.۹۶-۱۰۳، pp.
- [۴۰] آدیم، ریاحی م.، باقری، (۱۳۹۷)، "تخمین فشار منفذی به روش های ایتون و باورز با استفاده از داده های لرزه نگاری و چاه پیمایی"، پژوهشهای ژئوفیزیک کاربردی، ۴، ۲۶۷-۲۷۵.۲، pp.
- [۴۱] Heppard P. D., Cander H. S., Eggertson E. B., (۱۹۹۸), "Abnormal Pressure and the Occurrence of Hydrocarbons in Offshore Eastern Trinidad, West Indies", **AAPG Mem.** ۷۰, pp. ۲۱۵-۲۴۶.
- [۴۲] Holbrook P. W., Maggiori D. A., Hensley R., (۱۹۹۵), "Real-time pore pressure and fracture gradient evaluation in all sedimentary lithologies", **SPE Form. Eval.**, ۱۰, ۰۴, pp. ۲۱۵-۲۲۲.
- [۴۳] Zhang J., Standifird W. B., Lenamond C., (۲۰۰۸), "Casing ultradeep, ultralong salt sections in deep water: A case study for failure diagnosis and risk mitigation in record-depth well", SPE annual technical conference and exhibition.
- [۴۴] Atashbari V., Tingay M. R., (۲۰۱۲), "Pore pressure prediction in carbonate reservoirs", SPE Latin America and Caribbean petroleum engineering conference.
- [۴۵] Jorden J. R., Shirley O. J., (۱۹۶۶), "Application of drilling performance data to overpressure detection", **J. Pet. Technol.**, ۱۸, ۱۱, pp. ۱-۳۸۷.
- [۴۶] Bingham M. G., (۱۹۶۵), "A new approach to interpreting rock drillability", **Tech. Man. Repr. OIL GAS JOURNAL**, ۹۳ P.
- [۴۷] Rehm B., McClendon R., (۱۹۷۱), "Measurement of formation pressure from drilling data", Fall Meeting of the Society of Petroleum Engineers of AIME.
- [۴۸] کردونی ا.، میرزایی پیامن ا.، (۱۳۹۵)، "تخمین فشار منفذی سازند گچساران با استفاده از داده های نمودارگیری گل حفاری در یکی از میادین جنوب غرب ایران"، دومین همایش ملی مهندسی نفت ایران.
- [۴۹] تخم چی ب.، لطفی م.، صیفی ح.، سادات حسینی م.، (۲۰۱۶)، "ترکیب اطلاعات رویکردی نوین جهت تصمیم گیری در زمین شناسی مهندسی معدن و نفت"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
- [۵۰] نبوی کریزی س. ح.، اله کبیر ا.، (۱۳۸۴)، "ترکیب طبقه بندها: ایجاد گوناگونی و قواعد ترکیب"، نشریه علمی پژوهشی انجمن کامپیوتر ایران، ۳، ۳-۱۰۷.۳، pp. ۹۵-۱۰۷.
- [۵۱] Jain A., Nandakumar K., Ross A., (۲۰۰۵), "Score normalization in multimodal biometric systems", **Pattern Recognit.**, ۳۸, ۱۲, pp. ۲۲۷۰-۲۲۸۵.
- [۵۲] Verikas A., Lipnickas A., (۲۰۰۲), "Fusing neural networks through space partitioning and fuzzy integration", **Neural Process. Lett.**, ۱۶, ۱, pp. ۵۳-۶۵.
- [۵۳] Sugeno M., (۱۹۷۴), "Theory of fuzzy integrals and its applications", **Doct. Thesis, Tokyo Inst. Technol.**
- [۵۴] Yager R. R., Filev D. P., (۱۹۹۴), "Essentials of fuzzy modeling and control", **New York**, ۳۸۸, , pp. ۲۲-۲۳.
- [۵۵] صیفی ح.، تخم چی ب.، مرادزاده ع.، (۲۰۲۰)، "ارائه مدل ترکیبی حاصل از دو مدل فیزیک سنگ با روش انتگرال فازی سوگنو در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران"، روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۱۰، ۳۱-۵۲.۲۳، pp.
- [۵۶] رحیمی لرکی ا.، عادل زاده م. ر.، (۱۳۸۸)، "بررسی نتایج اسید کاری چاه های نفتی آسماری میدان مارون با استفاده از آنالیز داده های چاه آزمایشی"، ماهنامه اکتشاف و تولید، ۶۶، .
- [۵۷] قلی پور ع. م.، حق ع.، (۱۳۶۹)، "مطالعه زمین شناسی میدان نفتی مارون"، اداره کل زمین شناسی گسترشی، شرکت ملی مناطق نفت خیز.
- [۵۸] نفت خیز جنوب م.، (۱۳۹۷)، "گزارش نهایی شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب".

[۵۹] مطیعی ه.، (۱۳۷۴)، "زمین شناسی ایران: زمین شناسی نفت زاگرس-۱"، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

- [۶۰] Katsube T. J., Williamson M., Best M. E., (۱۹۹۲), "Shale pore structure evolution and its effect on permeability", ۳۳th Annual Symposium of the Society of Professional Well Log Analysts (SPWLA), Symposium.
- [۶۱] Bowers G. L., Katsube T. J., (۲۰۰۱), "The Role of Shale Pore Structure on the Sensitivity of Wire-Line Logs to Overpressure", **AAPG Mem.** ۷۶.
- [۶۲] Anselmetti F. S., Eberli G. P., (۱۹۹۳), "Controls on sonic velocity in carbonates", **Pure Appl. Geophys.**, ۱۴۱, ۲-۴, pp. ۲۸۷-۳۲۳.
- [۶۳] Emrouznejad A., Marra M., (۲۰۱۴), "Ordered weighted averaging operators ۱۹۸۸-۲۰۱۴: A citation-based literature survey", **Int. J. Intell. Syst.**, ۲۹, ۱۱, pp. ۹۹۴-۱۰۱۴.
- [۶۴] Yager R. R., Kacprzyk J., Beliakov G., (۲۰۱۱), "**Recent developments in the ordered weighted averaging operators: theory and practice**", ۲۶۵, , Springer.
- [۶۵] Ginot I., Michel M., (۱۹۹۸), "**La danse au XXème siècle**", Larousse-Bordas.
- [۶۶] Leszczyński K., Penczek P., Grochulski W., (۱۹۸۵), "Sugeno's fuzzy measure and fuzzy clustering", **Fuzzy Sets Syst.**, ۱۵, ۲, pp. ۱۴۷-۱۵۸.
- [۶۷] Ayub M., (۲۰۰۹), "**Choquet and Sugeno Integrals**", Thesis for the degree Master of Science in Mathematical Modelling and Simulation, Blekinge Institute of Technology, Department of Mathematics and Science.

Abstract

Pore pressure is known as the fluid pressure inside porous rock, which is an important parameter in geomechanical modeling. The accuracy in predicting the pore pressure causes the optimal mud weight and heel points of the casing pipes picked up appropriately. Therefore, correct estimation of pore pressure while increasing safety in preventing the collapse of the borehole, has an effective role in cost optimization and economic drilling.

Gachsaran Formation is one of the most important formations in the oil-rich regions of southern Iran, which acts as a caprock for the Asmari Formation. Due to the special geomechanical and lithological conditions, estimation and preparation of the compression model in the formation has always been challenging.

In this research, by using petrophysical logs, geological information, VSP and drilling parameters in ۳ wells of Aghajari and Maroon oil fields, a compression model by various relationships for Gachsaran Formation is presented. Initially, the mechanism of high-pressure induction was investigated using velocity vs. density data, which indicates the existence of unbalanced consolidation as the main mechanism of high-pressure induction in the studied fields. According to the identified mechanism, the pore pressure was calculated from Eaton analytical methods and the simple form of Bowers method as well as the estimation method based on Eaton drilling parameters and the results of the mentioned methods were validated by mud weight and evidences and drilling reports. Finally, MATLAB programming language and related codes of the data fusion methods were used to combine the results of pressure estimation in different ways to achieve a desirable and extended respond. The results showed that the Eaton method can be used in Maroon field with an exponential constant of ۲,۲ and in Aghajari field with an exponential constant of ۱,۵. Also, the results of the data fusion methods show the priority of Eaton method, then Eaton drilling parameters method and finally Bowers method in Maroon field.

Keywords (۵ to ۷ keywords): pore pressure, Aghajari field, Maroon field, Gachsaran Formation, Eaton method, Bowers method, Eaton drilling parameters method, OWA, Sugeno and Choquet



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
M.Sc. Thesis in Petroleum Engineering - Exploration

**Presentation of a Numerical-Analytical method for estimating por
pressure in the Gachsaran Formation**

Ali Asghar Heydari

Supervisor:

Dr. Behzad Tokhmechi
Dr. Seyed Reza Ghavami Riabi

Advisor:

Dr. Ahmad Ramezanzadeh
Dr. Morteza Azadpour

February ۲۰۲۱