

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه اکتشاف معدن

رساله دکتری

تخمین اشباع شدگی مخازن هیدروکربوری با استفاده از داده‌های

مگنتوتلوریک

سمیه طبسی

استاد راهنما:

دکتر کامکار روحانی

شهریور ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۱

باسمه تعالی

شماره: ۲۶۹۴/۵۷۰

تاریخ: ۹۴/۷/۲۵

ویرایش:

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود خانم سمیه طیبی دانشجوی دکتری رشته مهندسی معدن به شماره دانشجویی ۸۹۱۷۹۲۵ ورودی اول ماه مهر سال ۸۹ در تاریخ ۹۴/۶/۲۵ از رساله خود با عنوان: تخمین اشباع شدگی مخازن هیدروکربوری با استفاده از داده های مگنتوتلوریک دفاع و با اخذ نمره ۱۵ به درجه: دکتری نائل گردید.

☐ الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹	☐ ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	☐ د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
☐ ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی	استاد راهنما	دانشیار	
	دکتر	مشاور / مشاورین		
۲	دکتر علی مرادزاده	استاد مدعو خارجی	استاد	
۳	دکتر علی نجاتی کلاته	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۴	دکتر علیرضا عرب امیری	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر مهرداد سلیمانی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

دکتر علیرضا عرب امیری رئیس دانشکده و رئیس هیأت داوران:

تاریخ و امضاء:



تقدیم به همسر

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس یکتای بی همتا را که لطفش بر ما عیان است، ادای شکرش را هیچ زبان و دریای فضلش را هیچ کران نیست و اگر در این وادی هستیم، همه محبت اوست. ضمن سپاس و ستایش به درگاه ایزد منان، از زحمات استاد گرانقدر جناب آقای دکتر کامکار روحانی که راهنمایی این رساله را بر عهده داشتند کمال تشکر و امتنان را دارم. از آقای مهندس محمدو خراسانی که مشاوره این رساله را پذیرفتند تشکر می‌نمایم. همچنین از کارکنان بخش ژئوفیزیک مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران که همکاری صمیمانه داشتند کمال تشکر را دارم. از مسئولین دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود و جناب آقای شاه‌حسینی کمال تشکر را دارم. از صبر و تحمل مادرم، دریای بیکران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر، تشکر می‌کنم. در پایان از زحمات بی‌دریغ، صبر و بردباری و همیاری و همدلی همسر عزیزم، ایمان، تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب **سمیه طبسی** دانشجوی دوره دکتری رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه **تخمین اشباع شدگی مخازن هیدروکربوری با استفاده از داده های مگنتوتلوریک تحت راهنمایی دکتر کامکار روحانی متعهد می شوم.**

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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.

چکیده

از جمله اهداف اساسی در بررسی مخازن هیدروکربوری دست یافتن به اطلاعاتی درباره حضور آن در زیر سطح زمین است. پارامتری که مقدار هیدروکربور موجود در مخزن را مشخص می‌کند، اشباع‌شدگی است. روش‌های مختلفی نظیر مطالعه مغزه‌ها و نگارهای چاه‌پیمایی به منظور تعیین مقدار اشباع‌شدگی مخزن وجود دارند؛ که با وجود دقت بالا، بسیار پرهزینه و وقت‌گیر می‌باشند.

استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی که در مراحل مقدماتی اکتشاف مخازن هیدروکربوری به صورت گسترده و با حجم زیاد در دسترس هستند، در مطالعات توسعه مخازن هیدروکربوری، منجر به کاهش ریسک عملیات حفاری می‌شود. داده‌های مقاومت‌ویژه روش مگنتوتلوریک (MT) نسبت به تغییرات نوع و میزان سیالات مخازن هیدروکربوری حساس می‌باشند. بنابراین دستیابی به روشی که بتواند اشباع‌شدگی مخزن را با استفاده از داده‌های مقاومت‌ویژه MT به صورت سریع و ارزان تخمین بزند، اهمیت بسیار دارد.

در گام اول، عوامل کنترل‌کننده اشباع‌شدگی در مخزن کربناته آسماری مورد بررسی و تحلیل کمی و کیفی قرار گرفت و سپس با توجه به این پارامترها، مدل فیزیک سنگ محیط مؤثر تفاضلی جهت بررسی ارتباط مقادیر مقاومت ویژه واقعی سازند (R_t) و اشباع‌شدگی از آب انتخاب شد. به دلیل عدم حضور شیل در مخزن مورد مطالعه، شکل ساده‌تر این مدل که به رابطه آرچی معروف است، حاصل گردید. جهت محاسبه هم‌زمان پارامترهای مدل آرچی از روش هوشمند الگوریتم ژنتیک کمک گرفته شد. مقایسه بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب محاسبه شده با استفاده از رابطه آرچی و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در چاه A، همبستگی ۰/۶۲ را نشان می‌دهد.

ستون هیدروکربوری چاه اکتشافی A در مخزن آسماری از سه زون A1، A2 و B1 تشکیل شده است؛ که هر کدام با تغییرات مقاومت‌ویژه R_t مشخص می‌شوند. با به کار بردن الگوریتم ژنتیک در هر کدام از این زون‌ها، ضرایب مدل آرچی که به نقطه اندازه‌گیری و سنگ‌شناسی محیط وابسته‌اند؛ با خطای کم تعیین

شدند. نتایج حاصل از این مرحله و بررسی همبستگی بین تغییرات اشباع‌شدگی با تغییرات ارتفاع مخزن نشان داد که پارامتر ارتفاع مخزن می‌تواند در تعیین اشباع‌شدگی آب مخزن تأثیرگذار باشد.

پارامتر ارتفاع مخزن به عنوان یک متغیر در معادله آرچی وارد گردید. نتایج حاصل از تعیین پارامترهای مدل اصلاح شده آرچی به کمک الگوریتم ژنتیک، همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب محاسبه شده با استفاده از این روش و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در چاه A را در مرحله آموزش و آزمون مدل به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۸۸ نشان می‌دهد.

در مرحله بعد با استفاده از داده‌های مقاومت‌ویژه MT و پارامترهای تخلخل و ارتفاع مخزن چاه شماره ۱۱۵ که در مجاورت پروفیل برداشت MT قرار دارد، به مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب با کمک روش‌های هوشمند شبکه عصبی مصنوعی و عصبی-فازی پرداخته شد. نتایج حاصل، بیانگر عملکرد خوب هر دو روش در تخمین اشباع‌شدگی مخزن می‌باشد. به طوری که ضریب همبستگی بین داده‌های واقعی اشباع‌شدگی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش‌های شبکه عصبی و عصبی-فازی به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۵ می‌باشد. روش عصبی-فازی با ترکیب ویژگی‌های روش‌های فازی که مبتنی بر استنتاج هستند و روش‌های شبکه عصبی که بر پایه یادگیری هستند و پوشش ضعف‌های این دو روش، نتایج بهتری در تخمین اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های مقاومت‌ویژه MT حاصل شد.

لغات کلیدی: اشباع‌شدگی، مخزن کربناته، مگنتوتلوریک، مدل آرچی، الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی،

عصبی-فازی

لیست مقالات مستخرج از رساله:

- ۱- بررسی اثر لیتولوژی در تعیین ضرایب آرچی در زون‌های سنگی مختلف افق آسماری یک مخزن کربناته در جنوب باختر ایران، سمیه طبسی، ابوالقاسم کامکار روحانی، مجتبی محمدو خراسانی، فصلنامه علوم زمین، ۱۳۹۴.
- ۲- بهینه‌سازی تخمین پارامترهای رابطه آرچی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک در یک مخزن کربناته در جنوب غرب ایران، سمیه طبسی، ابوالقاسم کامکار روحانی، مجتبی محمدو خراسانی، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن، پذیرفته شده جهت چاپ.
- ۳- مدل محیط مؤثر تفاضلی در پیش‌بینی اشباع‌شدگی هیدروکربور با استفاده از داده‌های ژئوالکتریکی، سمیه طبسی، ابوالقاسم کامکار روحانی، مجتبی محمدو خراسانی، نخستین سمینار ژئوفیزیک اکتشافی نفت، ۱۳۹۲.
- ۴- کاربرد مدل فیزیک سنگ محیط مؤثر تفاضلی در بررسی تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی یک مخزن کربناته در جنوب غرب ایران، سمیه طبسی، ابوالقاسم کامکار روحانی، مجتبی محمدو خراسانی، دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم شیمی، زیست‌شناسی، زمین‌شناسی، ۱۳۹۳.
- ۵- بررسی عوامل کنترل‌کننده توزیع مقاومت‌ویژه الکتریکی و تعیین مدل فیزیک سنگ جهت تخمین اشباع‌شدگی با استفاده از داده‌های مگنتوتلوریک، سمیه طبسی، ابوالقاسم کامکار روحانی، مجتبی محمدو خراسانی، دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در علوم شیمی، زیست‌شناسی، زمین‌شناسی، ۱۳۹۳.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۲-۱- اشباع‌شدگی
۵	۳-۱- استخراج پارامترهای پتروفیزیکی مخزن با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی
۹	۴-۱- مدل فیزیک سنگ
۱۱	۵-۱- روش‌های تعیین اشباع‌شدگی
۱۱	۱-۵-۱- رابطه آرچی
۱۴	۲-۵-۱- تعیین اشباع‌شدگی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی
۱۷	۶-۱- هدف و ضرورت انجام تحقیق
۱۷	۷-۱- سؤالات اساسی تحقیق
۱۸	۸-۱- فرض‌های تحقیق
۱۹	۹-۱- روش انجام تحقیق
۲۰	۱۰-۱- ساختار رساله
	فصل دوم: اصول و کلیات روش MT
۲۲	۱-۲- مقدمه
۲۲	۲-۲- تئوری اساسی EM
۲۶	۳-۲- مدل‌های القای میدان EM در زمین
۲۷	۴-۲- انتشار امواج EM
۲۹	۵-۲- میدان MT
۳۰	۱-۵-۲- منشأ میدان‌های MT
۳۲	۶-۲- تانسور امپدانس
۳۴	۷-۲- توابع تیپر
۳۵	۸-۲- بررسی پاسخ الکتریکی ساختارهای یک بعدی (1-D)
۳۶	۹-۲- بررسی پاسخ الکتریکی ساختارهای دو بعدی (2-D)
۳۸	۱۰-۲- برداشت داده‌های MT
۳۹	۱۱-۲- پردازش داده‌های MT
۴۰	۱۲-۲- تفسیر داده‌های MT

فصل سوم: مخزن مورد مطالعه

۴۲	۳-۱- مقدمه
۴۲	۳-۲- میدان گچساران
۴۴	۳-۳- زمین‌شناسی میدان گچساران
۴۸	۳-۴- چینه‌شناسی میدان گچساران
۴۸	۳-۴-۱- سازند کژدمی
۴۸	۳-۴-۲- سازند سروک
۴۸	۳-۴-۳- سازند ایلام
۴۸	۳-۴-۴- سازند گورپی
۴۹	۳-۴-۵- سازند پابده
۴۹	۳-۴-۶- سازند آسماری
۴۹	۳-۴-۷- سازند گچساران
۴۹	۳-۴-۸- سازند میشان
۴۹	۳-۴-۹- سازند آغا جاری
۵۰	۳-۴-۱۰- سازند بختیاری
۵۰	۳-۵- مطالعات ژئوفیزیک منطقه مورد مطالعه
۵۱	۳-۶- مخزن آسماری
۵۵	۳-۷- بررسی عوامل کنترل کننده تغییرات اشباع‌شدگی در چاه A
۵۵	۳-۷-۱- چگالی و ویسکوزیته نفت
۵۶	۳-۷-۲- کیفیت مخزن
۵۸	۳-۷-۳- موقعیت مخزن نسبت به زون انتقال

فصل چهارم: مدل فیزیک سنگ

۶۰	۴-۱- مقدمه
۶۰	۴-۲- مدل فیزیک سنگ الکتریکی
۶۴	۴-۳- توصیف پارامترهای آرچی
۶۴	۴-۳-۱- پارامتر سیمان‌شدگی (m)
۶۵	۴-۳-۲- توان اشباع (n)
۶۶	۴-۳-۳- پارامتر پیچاپیچی (a)
۶۷	۴-۴- روش‌های تعیین پارامترهای آرچی
۶۹	۴-۵- الگوریتم ژنتیک

۷۱	۴-۶- تعیین پارامترهای رابطه آرچی در مخزن مورد مطالعه
۸۱	۴-۷- روش جداسازی فرکتال
۸۲	۴-۸- بررسی تغییرات بعد فرکتال در داده‌های مقاومت ویژه چاه A
۸۸	۴-۹- اصلاح مدل آرچی برای مخزن کربناته مورد بررسی
	فصل پنجم: مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب با روش‌های هوشمند
۹۶	۵-۱- مقدمه
۹۶	۵-۲- مبانی شبکه عصبی
۱۰۰	۵-۳- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها
۱۰۶	۵-۴- تعیین نوع و ساختار شبکه مورد استفاده
۱۰۸	۵-۵- تعیین نحوه آموزش شبکه
۱۰۹	۵-۶- ارزیابی و اجرای شبکه
۱۱۲	۵-۷- سیستم‌های فازی
۱۱۳	۵-۷-۱- ساختار سامانه فازی
۱۱۶	۵-۸- ترکیب شبکه عصبی با منطق فازی
۱۱۷	۵-۹- سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)
۱۱۹	۵-۱۰- آموزش ANFIS
۱۱۹	۵-۱۱- تنظیم پارامترهای مدل ANFIS
۱۲۰	۵-۱۱-۱- بررسی نوع و تعداد توابع عضویت
۱۲۲	۵-۱۱-۲- بررسی تأثیر روش‌های بهینه‌سازی
۱۲۳	۵-۱۲- مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب با استفاده از ANFIS
	فصل ششم: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۳۴	۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۱۳۹	۵-۲- پیشنهادات
۱۴۱	پیوست یک
۱۴۵	مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱: یک واحد حجمی از سنگی که حفرات آن از آب و هیدروکربور پر شده‌اند.
۸	شکل ۲-۱: آلتراسیون‌های مربوط به مهاجرت هیدروکربورها
۱۰	شکل ۳-۱: نمودار شماتیکی که فیزیک سنگ را به عنوان ابزاری که ویژگی‌های ژئوفیزیکی سنگ‌ها را به ویژگی‌های مخزنی مربوط می‌سازد، نشان می‌دهد.
۱۴	شکل ۴-۱: تغییرات هدایت الکتریکی سازند شیلی اشباع از آب (C_0) که در مقادیر پایین هدایت الکتریکی آب (C_w)، رفتار غیر خطی داشته و در مقادیر بالا انحراف نشان می‌دهد.
۲۸	شکل ۱-۲: مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی یک موج EM
۳۲	شکل ۲-۲: توان طیفی امواج MT
۳۷	شکل ۳-۲: مدل یک بعدی مقاومت-عمق
۳۷	شکل ۴-۲: پاسخ یک مدل دو بعدی با ناپیوستگی جانبی به میدان EM طبیعی
۳۸	شکل ۵-۲: نمای عمومی سنجنده‌های میدان MT در یک ایستگاه برداشت
۳۹	شکل ۶-۲: سری‌های زمانی مؤلفه‌های میدان MT اندازه‌گیری شده در بازه زمانی ۳۰ دقیقه
۴۳	شکل ۱-۳: موقعیت قرارگیری میدان گچساران
۴۵	شکل ۲-۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه همراه با موقعیت برش‌های ساختاری CC' و DD' (با خطوط زرد)
۴۶	شکل ۳-۳: برش ساختاری CC' که بر پروفیل ۸۸۰۷ برداشت MT منطبق است.
۴۷	شکل ۴-۳: برش ساختاری DD' که منطبق بر قسمت میانی پروفیل ۸۸۰۸ برداشت MT می‌باشد.
۵۲	شکل ۵-۳: موقعیت پروفیل‌های MT و خطوط لرزه‌نگاری دو بعدی پروژه سراب
۵۳	شکل ۶-۳: موقعیت چاه شماره ۱۱۵ نسبت به خط ۸۸۰۵ برداشت MT
۵۷	شکل ۷-۳: نمودار متقاطع تراوایی - تخلخل و کلاس‌بندی سه گانه
۶۱	شکل ۱-۴: یک مدل شماتیک ناهمگن چند فاز از سنگ مخزن (چپ) و مدل محیط مؤثر مربوط به آن (راست) را نشان می‌دهد.
۷۱	شکل ۲-۴: چرخه عملکرد الگوریتم ژنتیک
۷۴	شکل ۳-۴: نمودار تعیین مقاومت ویژه آب بر اساس میزان شوری آن و دمای مخزن

- شکل ۴-۴: الف- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه اول پاسخ‌ها، ۷۶
- ب- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه دوم پاسخ، ج- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه سوم پاسخ
- شکل ۴-۵: نمودار مقایسه اشباع‌شدگی آب حاصل از لاگ چاه‌پیمایی و اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده در چاه مورد مطالعه ۷۷
- شکل ۴-۶: نمودار متقاطع اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده نسبت به اشباع‌شدگی حاصل از لاگ چاه‌پیمایی در چاه مورد مطالعه ۷۸
- شکل ۴-۷: میزان حساسیت اشباع‌شدگی نسبت به تغییرات پارامتر m ۷۹
- شکل ۴-۸: میزان حساسیت اشباع‌شدگی نسبت به تغییرات پارامتر n ۷۹
- شکل ۴-۹: تفکیک زیر جوامع موجود در داده‌های برداشت شده با الگوی متغیر- تعداد ۸۱
- شکل ۴-۱۰: مدل فرکتالی لگاریتمی مقاومت ویژه - فراوانی تعداد داده‌های R_f در چاه A مخزن مورد مطالعه ۸۴
- شکل ۴-۱۱: لاگ مقاومت ویژه نگار چاه‌پیمایی LLD در چاه A مخزن مورد مطالعه ۸۵
- شکل ۴-۱۲: الف سیر تکاملی تابع برازش مربوط به زون A1، ب- سیر تکاملی تابع برازش مربوط به زون A2، ج- سیر تکاملی تابع برازش مربوط به زون B1 ۸۷
- شکل ۴-۱۳: نمودارهای متقاطع داده‌های نگارهای مقاومت ویژه LLD و نگار محاسباتی تخلخل (Φ) و ارتفاع مخزن (H) با مقادیر اشباع‌شدگی در چاه A ۸۹
- شکل ۴-۱۴: سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل داده‌های آزمون انتخاب شده در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه ۹۱
- شکل ۴-۱۵: همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه اصلاح شده (۴-۱۰) و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در مرحله آزمون ۹۲
- شکل ۴-۱۶: سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل داده‌های انتخاب شده جهت اعتبار سنجی مدل در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه ۹۳
- شکل ۴-۱۷: همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه اصلاح شده (۴-۱۰) و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در مرحله اعتبارسنجی مدل ۹۳
- شکل ۵-۱: مدل یک نرون ۹۸
- شکل ۵-۲: نمایی از ساختار لایه‌ای شبکه‌های عصبی مصنوعی ۹۹
- شکل ۵-۳: نقشه کنتوری شیب لایه‌های منطقه مورد مطالعه ۱۰۲
- شکل ۵-۴: نقشه شماتیک از چاه انتقال یافته روی مقطع مقاومت ویژه MT خط ۸۸۰۵ ۱۰۳

- شکل ۵-۵: نگار مقاومت ویژه MT برداشت شده در چاه انتقال یافته روی مقطع مقاومت ویژه
MT خط ۵۸۸۰
- شکل ۵-۶: نگار مقاومت ویژه MT در مقابل نگار مقاومت ویژه چاه‌پیمایی LLD در چاه
انتقال یافته
- شکل ۵-۷: نمودار رگرسیون خطی مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر
واقعی در مرحله آموزش
- شکل ۵-۸: نمودار رگرسیون خطی مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر
واقعی در مرحله آزمون
- شکل ۵-۹: مقایسه مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی
- شکل ۵-۱۰: تعدادی از نمودارهای توابع عضویت مجموعه‌های فازی
- شکل ۵-۱۱: ساختار کلی یک سامانه استنتاج فازی
- شکل ۵-۱۲: نحوه عملکرد روش‌های استنتاج الف-ممدانی و ب-سوگنو
- شکل ۵-۱۳: سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)
- شکل ۵-۱۴: نمایش داده‌های ورودی و خروجی مدل ANFIS جهت پیش‌بینی اشباع‌شدگی
آب
- شکل ۵-۱۵: ساختار سیستم ANFIS برای ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی
- شکل ۵-۱۶: توابع عضویت استخراج شده توسط ANFIS برای پارامترهای ورودی تخلخل،
مقاومت ویژه حاصل از روش MT و ارتفاع مخزن
- شکل ۵-۱۷: منحنی مقدار خطای آموزش در ۲۰ تکرار داده‌های آموزش ANFIS
- شکل ۵-۱۸: طرح شماتیک قوانین استنتاج فازی سوگنو که توسط مدل ANFIS ساخته
شده است.
- شکل ۵-۱۹: نتایج مدل ANFIS برای داده‌های آموزش
- شکل ۵-۲۰: سطح منحنی بین توابع عضویت ورودی و خروجی
- شکل ۵-۲۱: همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده به وسیله مدل
ANFIS و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی از آب در مرحله آزمون
- شکل ۵-۲۲: مقایسه بین مقادیر اشباع‌شدگی واقعی و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل
ANFIS در مرحله آزمون

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۴-۱: روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف جهت توصیف پارامتر سیمان‌شدگی در کربنات‌ها	۶۵
جدول ۴-۲: پارامترهای آرچی در سه بار اجرای الگوریتم ژنتیک	۷۵
جدول ۴-۳: مشخصات آماری داده‌های مربوط به مقاومت ویژه واقعی سازند در چاه مورد مطالعه	۸۲
جدول ۴-۴: نتایج حاصل از کلاس‌بندی و تعیین فراوانی هر دسته از داده‌های مقاومت ویژه R_t در چاه A مخزن مورد مطالعه	۸۳
جدول ۴-۵: پارامترهای بهینه بدست آمده در هر زون مخزن مورد مطالعه	۸۵
جدول ۴-۶: مقادیر بهینه پارامترهای رابطه (۴-۱۰) در مرحله آزمون	۹۱
جدول ۴-۷: مقادیر بهینه پارامترهای رابطه (۴-۱۰) در مرحله اعتبار سنجی مدل	۹۲
جدول ۵-۱: پارامترهای ورودی و خروجی شبکه عصبی و محدوده تغییرات آن‌ها	۱۰۵
جدول ۵-۲: نتایج حاصل از اجرای شبکه با لایه‌های میانی مختلف	۱۰۷
جدول ۵-۳: روش‌های آموزش شبکه عصبی	۱۰۸
جدول ۵-۴: مشخصات شبکه طراحی شده	۱۰۹
جدول ۵-۵: نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای توابع عضویت مختلف	۱۲۱
جدول ۵-۶: نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای توابع عضویت مختلف خروجی	۱۲۲
جدول ۵-۷: نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای روش‌های بهینه‌سازی هیبرید و پس انتشار	۱۲۲

فصل اول: کلیات

مدیریت درست مراحل اکتشاف، حفاری و بهره‌برداری از مخازن هیدروکربوری باعث کاهش هزینه‌ها، تولید بیشتر و افزایش طول عمر این مخازن می‌گردد. در اکتشافات هیدروکربوری، شناخت پارامترهای مخزن و سیال نظیر لیتولوژی، تخلخل، تراوایی، نوع سیال و میزان اشباع‌شدگی^۱ سیالات جهت کمی سازی پتانسیل اقتصادی مخزن و طراحی برنامه ریزی تولید ضروری است. اقتصادی بودن عملیات حفاری به تخمین قابل قبولی از میزان ذخیره و شرایط منطقه بستگی دارد.

یکی از اهداف اصلی در توصیف مخازن هیدروکربوری تعیین مقدار هیدروکربور موجود در مخزن می‌باشد. پارامتری که مقدار هیدروکربور موجود در مخزن را مشخص می‌کند، اشباع‌شدگی است. پارامتر اشباع‌شدگی از جمله مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری به شمار می‌آید. تحقیقات بسیاری در زمینه به کارگیری روش‌های مختلف چاه‌نگاری، بررسی و آنالیز مغزه‌ها، به منظور به دست آوردن اشباع‌شدگی هیدروکربور انجام شده است.

برداشت داده‌های نگارهای چاه‌پیمایی و مغزه‌های حفاری با هزینه بسیار همراه است. مقادیر پارامترهای برداشت شده توسط نگارهای چاه‌پیمایی و مغزه‌های حفاری متعلق به یک چاه است و استفاده از آن‌ها در کل منطقه محدودیت دارد. داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی مگنتوتلوریک (MT)^۲ با حجم زیاد و در اوایل عملیات اکتشاف مخازن^۳ هیدروکربوری برداشت می‌شوند. به دلیل اختلاف مقاومت ویژه الکتریکی سیالات درون مخزن، داده‌های مقاومت ویژه توانایی تشخیص نوع و میزان سیال را دارند. با توجه به این موضوع، ایده استفاده از داده‌های مقاومت ویژه MT و تخمین اشباع‌شدگی از آب مخازن هیدروکربوری مطرح

1-Saturation

2- Magnetotelluric (MT)

3- Reservoir rock

می‌شود. رسیدن به این هدف می‌تواند از هزینه‌های بالای حفر چاه‌های اکتشافی کاسته و در اولین مراحل اکتشاف مخازن هیدروکربوری دید کلی از میزان سیالات مخزن در اختیار قرار دهد.

۱-۲- اشباع‌شدگی

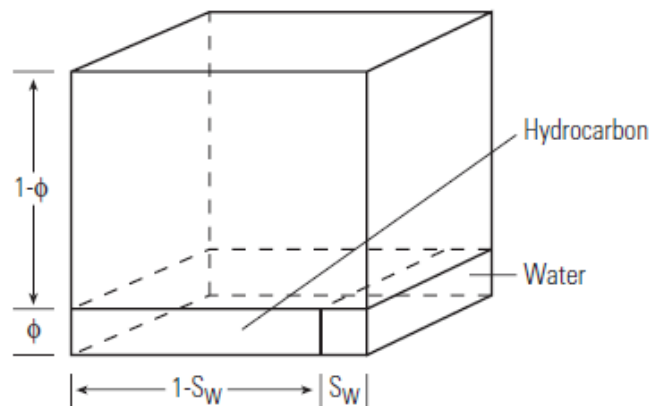
تجمع اقتصادی مواد هیدروکربوری در زیر سطح زمین در سنگ‌هایی صورت می‌گیرد که هم دارای ظرفیت ذخیره‌سازی بوده (متخلخل) و هم توانایی عبور سیالات از میان خود را داشته باشند (تراوا باشند). این سنگ‌ها، به نام سنگ مخزن خوانده می‌شوند. بررسی ساختاری مخازن هیدروکربوری اطلاعاتی درباره حضور و یا عدم حضور هیدروکربور و تعیین نوع آن، تعیین محل تجمع هیدروکربور، حجم هیدروکربور موجود در سازند و حجم هیدروکربور قابل دست‌یابی ارائه می‌دهد.

اشباع‌شدگی از هیدروکربور عبارت است از نسبت حجمی فضا‌های خالی موجود در مخزن که توسط هیدروکربور پر شده است [Schlumberger, 2009]:

$$S_h = \frac{V_h}{V_v} \times 100 \quad (1-1)$$

در این رابطه V_h حجم هیدروکربور، V_v حجم فضای خالی و S_h اشباع‌شدگی از هیدروکربور می‌باشد. همان‌طور که شکل ۱-۱ نشان می‌دهد، بخشی از تخلخل که حاوی آب است، اشباع‌شدگی از آب (S_w) می‌باشد و باقی‌مانده آن اشباع‌شدگی هیدروکربور می‌باشد. بنابراین می‌توان ابتدا مقدار اشباع‌شدگی از آب سازند را تعیین کرد و سپس با استفاده از رابطه (۱-۲) میزان اشباع‌شدگی از هیدروکربور را مشخص نمود [Ellis and Singer, 2007]:

$$S_h = 1 - S_w \quad (2-1)$$



شکل ۱-۱: یک واحد حجمی از سنگ را نشان می‌دهد که حجمی که حفرات اشغال نموده‌اند ϕ و حجمی که ماتریکس

سنگ اشغال کرده $1 - \phi$ می‌باشد [Ellis and Singer, 2007].

برای تعیین اشباع‌شدگی از آب به طور عمده دو روش وجود دارد: ۱- اندازه‌گیری از طریق مغزه‌ها

۲- محاسبه با استفاده از نگارها و روابط تجربی [Bhatt, 2002].

مغزه‌های حاصل از چاه‌ها اطلاعات کامل زمین‌شناسی از مخزن مورد مطالعه ارائه می‌دهند. اما مغزه‌گیری کامل از چاه همیشه امکان‌پذیر نمی‌باشد و حجم مغزه جهت انجام آزمایشات مختلف کامل نیست. اطلاعات حاصل از خرده‌های حفاری به دلیل خرد شدن زیاد سنگ‌ها توسط مته حفاری و ریزش دیواره‌های چاه و مخلوط شدن سازندها با یکدیگر، زیاد قابل اعتماد نیستند. از آنجا که مغزه از محیط با فشار و دمای زیاد مخزن به محیط آزمایشگاهی منتقل می‌شوند، پارامترهای پتروفیزیکی اندازه‌گیری شده به صورت مستقیم از مغزه‌های حفاری با مقادیر برجای این پارامترها اختلاف دارند [Ellis and Singer, 2007].

نگارهای چاه‌پیمایی که بلافاصله پس از حفاری یا در حین حفاری تهیه می‌شوند حاوی اطلاعات با ارزشی از ویژگی‌های مخازن می‌باشند. حفر چاه‌های اکتشافی، تهیه مغزه‌ها و نگارهای چاه‌پیمایی، اطلاعات برجای زمین‌شناسی و پتروفیزیکی دقیق و ارزشمندی از مخزن مورد مطالعه در محل چاه‌ها و با

تفکیک‌پذیری یک بعدی و قائم، ارائه می‌دهند. تعمیم این اطلاعات که همیشه در دسترس نمی‌باشند به سرتاسر گستره مخزن ممکن و معتبر نیست. به منظور شناخت کافی از گستره مخزن، لازم است که چاه‌های متعددی در این محدوده حفاری گردد که این موضوع به هیچ عنوان توجیه اقتصادی ندارد [Ellis and Singer, 2007].

۱-۳- استخراج پارامترهای پتروفیزیکی مخزن با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی

در گذشته، نقش ژئوفیزیک عمدتاً محدود به اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری بوده و کمتر از آن در مطالعات توسعه مخزن استفاده شده است. امروزه استفاده از مطالعات ژئوفیزیکی در اکتشاف نفت تنها محدود به اکتشاف ساختارهای هیدروکربوری نیست. استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی در مطالعات توسعه مخازن، منجر به کاهش ریسک عملیات حفاری می‌شود. امروزه روش‌های ژئوفیزیکی، به خصوص روش‌های شناخت رفتار الکتریکی سنگ‌ها، پیشرفت‌های زیادی نموده و به شدت مورد توجه شرکت‌های نفتی قرار گرفته است.

مهم‌ترین عامل در توصیف مخازن هیدروکربوری، استفاده و ترکیب تمام داده‌های موجود و به دست آوردن یک مدل با کیفیت بالاست که در آن پارامترهای زمین‌شناسی و پتروفیزیکی کنترل‌کننده سیالات مشخص هستند. روش‌های ژئوفیزیکی در مراحل مقدماتی اکتشاف مخازن هیدروکربوری به صورت گسترده و با پوشش زیاد چند کیلومتری اجرا می‌شوند و حجم زیادی از داده‌های مربوط به مخزن را در اختیار قرار می‌دهند. بنابراین می‌توان مسئله تعیین خصوصیات مخزن هیدروکربوری را با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی مطرح نمود.

ژئوفیزیک مخزن، مفهومی کاملاً جدید است که در مطالعات مخزن قادر به تمایز مدل‌های مختلف مخزنی با استفاده از مدل‌سازی ژئوفیزیکی می‌باشد. هدف نهایی متخصصین ژئوفیزیک مخزن، تعیین خصوصیات

مخزنی، نظیر لیتولوژی، تخلخل و اشباع‌شدگی و شرایط آن، نظیر فشار و نحوه توزیع سیال با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی است [سردار و همکاران، ۱۳۸۸].

از جمله روش‌هایی که جهت توصیف مخازن هیدروکربوری با استفاده از داده‌های ژئوفیزیک مطرح شده، معکوس‌سازی داده‌های لرزه‌ای می‌باشد؛ که داده‌های لرزه‌ای بازتابی را به خصوصیات سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی مخزن مرتبط می‌سازد. پروفیل‌های بازتاب لرزه‌ای، تصاویری از تغییرات زیرسطحی امپدانس صوتی تولید می‌کنند که توزیع لایه‌های زیرسطحی با ویژگی‌های صوتی مختلف را نشان می‌دهند. تغییرات در امپدانس صوتی می‌تواند در اثر عوامل مختلفی مانند تغییرات سنگ‌شناسی، درجه شوری سیال، تخلخل و اشباع‌شدگی باشد. مطالعات بسیاری در زمینه پیش‌بینی پارامترهای پتروفیزیکی از روی نشانگرهای لرزه‌ای و انتخاب الگوریتم‌های بهینه جهت انتخاب و ترکیب نشانگرهای لرزه‌ای و مدل‌سازی آن‌ها انجام شده است [علیمرادی، ۱۳۹۰؛ Kadkhodaie-Ilkhchi et al., 2009; Leite and Vidal, 2011; Iturrarán-Viveros, 2012].

در مدل‌سازی معکوس^۱ داده‌های لرزه‌ای، نتایج حاصل از مرحله پردازش داده‌های لرزه‌ای اهمیت بسیاری دارد. به طور کلی عواملی نظیر نویزها، بازتاب‌های تکراری و تضعیف دامنه که باعث آشفته شدن داده‌های لرزه‌ای شده و بین مدل واقعی زمین و مدل حاصل از داده‌های لرزه‌ای ایجاد اختلاف می‌کنند، باید حذف یا تضعیف شوند [Yilmaz, 2001]. در سال‌های گذشته با برداشت‌های دو و سه بعدی، کیفیت این داده‌ها بسیار افزایش یافته است. اما کسب اطلاعات مفید از این داده‌ها بستگی به مهارت و تخصص مفسر دارد و استخراج نشانگرهای لرزه‌ای مختلف موجب افزایش حجم محاسبات و صرف زمان بیشتر می‌شود. انجام عملیات لرزه‌ای در مناطقی که ساختارهای با سرعت بالا پراکنده‌اند، انرژی را منعکس نموده و شناسایی ساختارهای زیرسطحی را با مشکل مواجه می‌نماید. داده‌های لرزه‌ای در به تصویر کشیدن ساختارهای

1- Inverse modelling

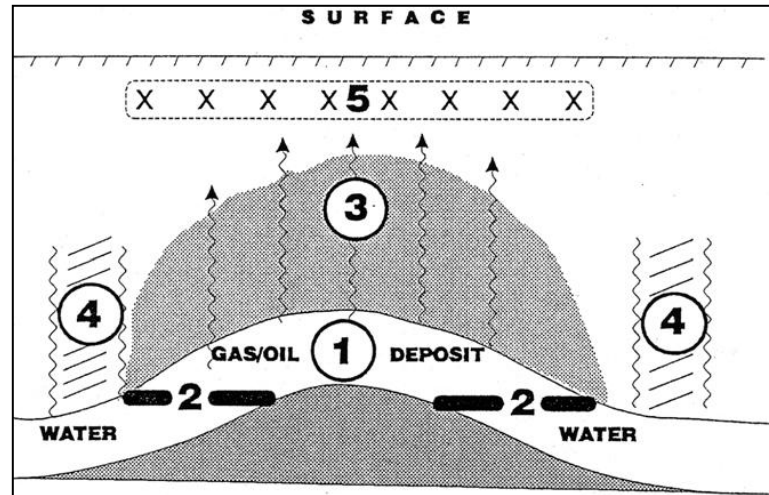
زمین‌شناسی خوب عمل نموده و شامل اطلاعات مفیدی از ویژگی‌های الاستیک سنگ‌ها می‌باشند. اما از آنجا که سرعت لرزه‌ای اغلب به ویژگی‌های ماتریکس سنگ وابسته است، در تشخیص نوع سیال موجود در حفرات ضعیف عمل نموده و در واقع نسبت به پارامتر اشباع‌شدگی حساسیت پایینی نشان می‌دهد و در کمی کردن اشباع‌شدگی هیدروکربور با مشکل مواجه می‌گردد [Han, 2010]. به همین دلیل، استفاده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی که به حضور سیال موجود در مخازن، حساس می‌باشند در شناسایی و تخمین پارامتر اشباع‌شدگی مخازن هیدروکربوری به صورت سریع و ارزان اهمیت پیدا می‌کند.

ویژگی‌های الکتریکی و هیدرولیکی، مربوط به فضای حفرات و ناهمگن بودن محیط می‌باشند. مکانیسم‌هایی که بر جریان سیال (قانون داری) و جریان الکتریکی (قانون اهم) حاکم می‌باشند توسط پارامترهای فیزیکی و زمین‌شناسی محیط کنترل می‌شوند. بنابراین این ویژگی‌ها با یکدیگر در ارتباط بوده و روش‌های تعیین ویژگی‌های الکتریکی جهت تعیین پارامترهای هیدرولیکی قابل کاربرد می‌باشند [Niwas et al., 2006].

به دلیل اختلاف مقاومت‌ویژه الکتریکی آب و هیدروکربور موجود در مخازن هیدروکربوری، روش‌های الکتریکی این قابلیت را دارند تا در طول دوره تولید نفت از طریق تحلیل اطلاعات مقاومت ویژه مخزن، توزیع نفت و آب داخل مخزن را تعیین نمایند. طی سال‌های اخیر روش‌های الکترومغناطیسی در اکتشافات هیدروکربوری مورد توجه قرار گرفته‌اند. این روش‌ها نسبت به ویژگی‌های الکتریکی سنگ‌های با میزان مختلف از اشباع‌شدگی و تغییر نوع سیال حساس می‌باشند [Han, 2010].

با حرکت هیدروکربورها به سمت بالا، یک زون احیاء در جهت قائم تولید می‌شود. در اثر واکنش هیدروکربورها با سنگ میزبان، هاله‌هایی در اطراف این زون احیاء تشکیل می‌شوند. همان طور که در شکل ۱-۲ دیده می‌شود مجموعه اثرات مربوط به آلتراسیون‌های مختلف با مقاومت ویژه و پلاریزاسیون الکتریکی مختلف، تشکیل زون‌های مجزای فیزیکوشیمیایی را می‌دهند و مرز بین آنها اهداف اکتشافی

مناسبی برای روش‌های الکترومغناطیس می‌باشند [Spies, 1983; Wightman et al., 1983; Nekut and Spies, 1989].



شکل ۱-۲: آلتراسیون‌های مربوط به مهاجرت هیدروکربورها (۱- زون تجمع هیدروکربور ۲- مرز بین هیدروکربور و آب ۳- مسیر نفوذ هیدروکربور ۴- مرز مربوط به تجمع هیدروکربور ۵- لایه های سطحی) [Meju, 2002]

در محیط‌هایی با شکستگی فراوان که امواج لرزه‌ای دچار پراکندگی می‌شوند، سیگنال‌های MT نفوذ نموده و تخمین قابل قبولی از رسانندگی الکتریکی کلی^۱ محیط ارائه می‌دهند [Unsworth, 2005]. توانایی اکتشاف اعماق بسیار پایین تا اعماق بسیار بالا بدون نیاز به چشمه‌های مصنوعی میدان و بدون تأثیرات زیست محیطی مخرب از مزایای روش MT به حساب می‌آید [Vozoff, 1991]. علاوه بر این، نفوذ امواج MT به اعماق زیاد اکتشافی که روش‌های لرزه‌نگاری انعکاسی در آن کارایی ندارند موجب کاربرد گسترده روش MT در اکتشافات نفت شده است [Dobrin and Savit, 1988].

روش MT با پوشش و تفکیک‌پذیری جانبی مناسب با توجه به اهداف اکتشافی در این روش، از جمله محدود تکنیک‌های اکتشافی ژئوفیزیکی است که اطلاعات ساختاری و چینه‌ای قابل قبولی از اعماق نسبتاً زیاد را در اختیار قرار می‌دهد. با ترسیم مقاطع مقاومت ویژه حاصل از روش MT عمیق برای بررسی

1- Bulk conductivity

نواحی مختلف پوسته و گوشته بالایی زمین به منظور مطالعات ژئودینامیکی در آن نواحی، می‌توان اطلاعاتی از رژیم جریان سیالات، زون‌های تبدیل فاز و حالت ترمودینامیک مواد، میزان و نوع تخلخل سنگ‌ها در مقیاس ناحیه‌ای از اعماق زمین کسب نمود [Bataleva et al., 2005].

با توجه به حساسیت روش MT نسبت به ویژگی‌های الکتریکی سنگ‌های با مقادیر مختلف از اشباع‌شدگی و تغییرات نوع سیال و اهمیت ویژه پارامتر اشباع‌شدگی در مخازن هیدروکربوری که منجر به تعیین حجم هیدروکربور مخزن می‌گردد، بررسی چگونگی تخمین پارامتر اشباع‌شدگی از هیدروکربور توسط داده‌های MT و رفع احتمالی نیاز به داده‌های چاه‌پیمایی و مغزه‌های حفاری یک مزیت مهم محسوب می‌شود.

۱-۴- مدل فیزیک سنگ^۱

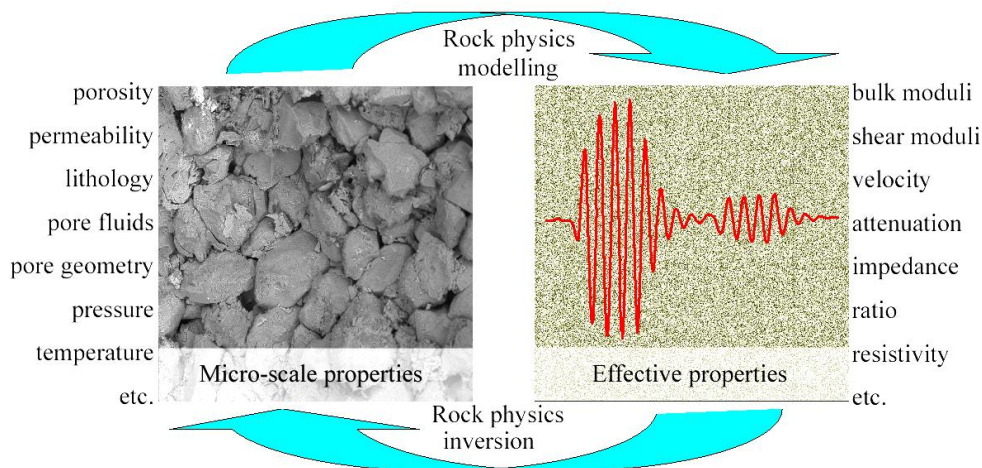
فیزیک سنگ رابطه بین داده‌های ژئوفیزیکی (سرعت الاستیک و مقاومت ویژه الکتریکی) و ویژگی‌های مخزنی زیرسطحی سنگ‌ها (لیتولوژی، تخلخل، فشار منفذی^۲، تنش محصور، نوع سیالات و اشباع‌شدگی، ناهمسانگردی و میزان شکستگی‌ها و دما) را بیان می‌کند. متخصصین فیزیک سنگ با تعیین مدل‌های فیزیک سنگ برای انواع مخازن هیدروکربوری به پیش‌بینی خصوصیات مخزن و وضعیت آن پرداخته و شرایط سازندها را در حفاری پیش‌بینی می‌نمایند. مدل‌های سنگ مختلفی که می‌توان در نظر گرفت، به سه دسته تقسیم می‌شوند [Schon, 2011]:

- مدل‌های مربوط به سنگ‌های تمیز که تنها آب/آب شور در حفرات و شکستگی‌ها جریان الکتریکی را هدایت می‌کنند و ماتریکس آن‌ها از نظر الکتریکی نارسا می‌باشند.
- مدل‌های مربوط به سنگ‌های دارای شکستگی با ماتریکس متخلخل در کربنات‌ها

1- Rock physics model
2- Pore pressure

- مدل‌های سنگ‌های شیلی که علاوه بر هدایت الکتریکی حفرات پیوسته، یک مؤلفه هدایت ثانویه مربوط به شیل نیز در آن‌ها وجود دارد.

این روابط امکان تخمین ویژگی‌های ژئوفیزیکی از داده‌های زمین‌شناسی با استفاده از مدل‌سازی پیشرو^۱ فیزیک سنگ یا تخمین ویژگی‌های زمین‌شناسی از مشاهدات ژئوفیزیکی به کمک معکوس‌سازی فیزیک سنگ را مطابق شکل ۱-۳ امکان پذیر می‌سازند [Han, 2010]. بنابراین در علم فیزیک سنگ، مسئله عمده تعیین کردن رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی سنگ و فرآیندهای فیزیکی رخ دهنده در سنگ از طریق تأثیر میدان‌های فیزیکی طبیعی و مصنوعی می‌باشد [ارژفسکی و نوویک، ۱۳۷۱].



شکل ۱-۳: نمودار شماتیکی که فیزیک سنگ را به عنوان ابزاری که ویژگی‌های ژئوفیزیکی سنگ‌ها را به ویژگی‌های مخزنی مربوط می‌سازد، نشان می‌دهد [Han, 2010].

مقاومت ویژه و یا عکس آن یعنی رسانندگی الکتریکی مخازن هیدروکربوری حاصل حضور سیالاتی است که سنگ‌ها را اشباع نموده‌اند. افزایش مقاومت ویژه الکتریکی، نشان دهنده حضور هیدروکربور است که در مقایسه با آب شور موجود در مخزن مانند یک نارسانای الکتریکی عمل می‌نماید. اما این مسئله به دلیل تأثیر عواملی نظیر تخلخل، حضور آب شور، تغییرات شوری آب، دما و فشار بر مقاومت ویژه الکتریکی

1 - Forward modelling

مخزن، پیچیده است [Han, 2010]. بنابراین یک درک کامل از رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی و پارامترهای دیگر به منظور تفسیر رابطه بین داده‌های مقاومت ویژه و اشباع‌شدگی لازم است.

۱-۵- روش‌های تعیین اشباع‌شدگی

۱-۵-۱- رابطه آرچی^۱

اولین بار در سال ۱۹۴۲، آرچی نشان داد که در سنگ‌های با درجه اشباع صد درصد از آب، مقاومت ویژه سنگ به تخلخل (ϕ)، مقاومت ویژه آب (R_w) و ساختار منافذ بستگی دارد. آرچی، ارتباط ضریب مقاومت ویژه سازند با تخلخل را به صورت رابطه تجربی (۱-۵)، نشان داد:

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (۳-۱)$$

در این رابطه، R_0 مقاومت ویژه کل سازند با اشباع از آب صد درصد، R_w مقاومت ویژه آب سازند، a ضریب ثابتی که تابع جنس سازند و پیچاپیچی^۲ مسیر حرکت سیال است. ϕ تخلخل و m ضریب سیمان‌شدگی است [Archie, 1942].

آرچی افزایش مقاومت ویژه سازند در حضور هیدروکربورها را توسط رابطه زیر محاسبه نمود [Lucia, 2007]:

$$I = \frac{R_t}{R_0} = S_w^{-n} \quad (۴-۱)$$

در این رابطه I شاخص یا اندیس مقاومت ویژه، R_t مقاومت ویژه واقعی سازند، R_0 مقاومت ویژه سنگ صد درصد اشباع از آب و n توان اشباعی سازند است [Lucia, 2007].

از ترکیب دو رابطه (۳-۱) و (۴-۱) رابطه معروف آرچی حاصل می‌شود [Ellis and Singer, 2007]:

1- Archie

2- Tortuosity

$$R_t = aR_w \varphi^{-m} S_w^{-n} \quad (5-1)$$

یا

$$S_w = \left(\frac{aR_w}{R_t \varphi^m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6-1)$$

همان طور که مشخص است، دقت این رابطه به دقت پارامترهای ورودی بستگی دارد. ضریب a اغلب برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. R_w به میزان شوری و دما بستگی دارد [Lucia, 2007; Ellis and Singer, 2007].

شکل‌های مختلفی از رابطه آرچی برای ماسه‌سنگ‌های شیلی ارائه شده‌اند؛ که همگی شکل عمومی رابطه (۷-۱) را دارند [Schlumberger, 2009]:

$$\frac{1}{R_t} = \theta_0 S_w^2 + \theta_1 S_w \quad (7-1)$$

θ_0 عبارت یا ضریب مربوط به ماسه سنگ غالب در سازند است که به مقدار ماسه‌سنگ و مقاومت ویژه آب اشباع شده بستگی دارد. θ_1 عبارت مربوط به شیل سازند است و به مقاومت ویژه شیل در سازند بستگی دارد. این رابطه در ماسه‌سنگ‌های تمیز به رابطه آرچی تبدیل می‌شود.

معادله اصلاح شده آرچی که در رابطه (۸-۱) ارائه شده است، رابطه بین مقاومت ویژه واقعی و پارامترهای ساختاری را بیان می‌کند [Bhatt, 2002].

$$\frac{1}{R_t} = \left(\frac{C^{(1-\frac{c}{2})}}{\sqrt{R_c}} + \frac{\varphi_e^{\frac{m}{2}}}{\sqrt{aR_w}} \right) S_w^{\frac{n}{2}} \quad (8-1)$$

در این رابطه، R_c مقاومت ویژه شیل و C حجم شیل موجود در سازند است که توسط نگارهای حساس به شیل نظیر گاما و یا ترکیبی از نگارهای نوترون و چگالی حاصل می‌شود. φ_e تخلخل مؤثر است. تمام مدل‌هایی که اشباع‌شدگی از آب را تعیین می‌نمایند، تجربی هستند.

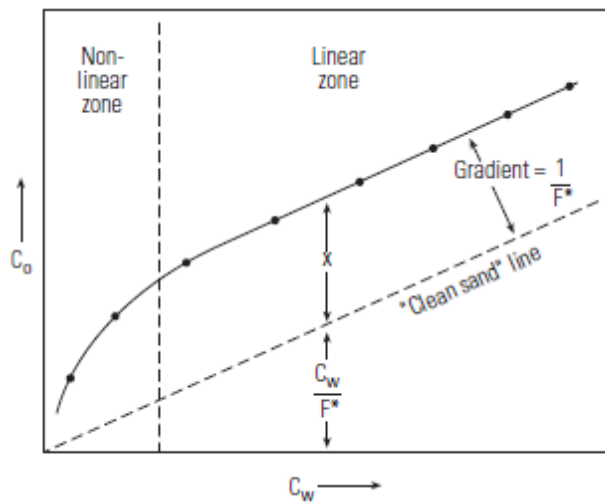
در کاربرد عملی رابطه آرچی اولین مسئله، تعیین مقدار R_w است در شرایطی که مقدار R_w از آزمایش‌های تولید^۱ و حتی نگارهای SP در دسترس نباشد. علاوه بر این چنانچه مقدار ماتریکس سازند مشخص نباشد، مقدار تخلخل محاسبه شده از نگارهای چگالی، دقت کافی را ندارد. در نهایت اطمینانی در مورد توان اشباعی و ضریب سیمان‌شدگی سازند وجود نخواهد داشت [Ellis and Singer, 2007].

دو روش گرافیکی جهت تعیین اشباع‌شدگی از آب در شرایطی که R_w ثابت اما مشخص نیست، توسعه یافته‌اند. برای کاربرد این روش‌ها مقدار R_t و نگار تخلخل باید در دسترس باشند. در ضمن، این روش‌ها برای سازندهای تمیز فاقد شیل کاربرد دارند. این دو روش شامل روش‌های استفاده از نمودارهای هینگل^۲ و پیکت^۳ می‌باشند [Hingle, 1959; Pickett, 1963].

هدایت الکتریکی ماسه سنگ تمیز مطابق بخش خط‌چین شکل ۱-۴ از رابطه آرچی پیروی می‌کند و شیب آن عکس فاکتور سازندی F است. در مقادیر بالای هدایت‌های الکتریکی آب، پاسخ سازند شیلی نیز از رابطه آرچی تبعیت می‌کند. روابط متعددی برای تعیین اشباع‌شدگی از آب در سازندهای شیلی ارائه شده‌اند که بیشتر منطبق بر مشاهدات تجربی و بر اساس مفهوم ظرفیت تبادل کاتیونی در سطح کانی‌های رسی و تعیین هدایت الکتریکی اضافی ناشی از حضور شیل بوده و اعتبار محدودی دارند [Ellis and Singer, 2007].

مدل‌های حجم شیل (V_{sh})^۴ فرض می‌کنند که هدایت الکتریکی اضافی شیل، به طور مستقیم مربوط به حجم شیل می‌باشد [Simandoux, 1963; Poupon and Leveaux, 1971]. در این مدل‌ها تعیین مقدار دقیق حجم شیل امکان‌پذیر نیست و نقش هدایت الکتریکی کانی‌های رسی در نظر گرفته نمی‌شود [Al-Ruwaili and Al-Waheed, 2004].

1- Production tests
1- Hingle plot
3- Pickett plot
4- Volume of shale



شکل ۴-۱: تغییرات هدایت الکتریکی سازند شیلی اشباع از آب (C_o) که در مقادیر پایین هدایت الکتریکی آب (C_w)، رفتار غیر خطی داشته و در مقادیر بالا انحراف نشان می‌دهد [Ellis and Singer, 2007].

مدل‌های ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)^۱، هدایت الکتریکی کانی‌های رسی را در نظر می‌گیرند [Worthington, 1985]. محاسبه پارامترهای ورودی این مدل‌ها وقت‌گیر می‌باشد.

مطالعات گسترده نشان می‌دهد که تعیین اشباع‌شدگی ماسه سنگ‌های شیلی بسیار مشکل می‌باشد. اما در سازندهای کربناته به دلیل توزیع پراکنده و نامنظم حفرات و تغییرات اندازه و شکل آن‌ها و همچنین احتمال حضور رس نیز تعیین اشباع‌شدگی به اندازه ماسه سنگ‌های شیلی قابل بحث می‌باشد [Ellis and Singer, 2007].

۱-۵-۲- تعیین اشباع‌شدگی با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی

در زمینه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی غیر لرزه‌ای جهت تخمین پارامتر اشباع‌شدگی مخازن هیدروکربوری، عملاً تحقیقات محدودی صورت گرفته است. از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعه

1- Cation exchange capacity

هستامر^۱ و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد که کاربردهای مناسب و موفقی از روش الکترومغناطیس با چشمه کنترل شده (CSEM)^۲ در تخمین پارامترهای عمدتاً کیفی مخازن هیدروکربوری از جمله پارامتر اشباع‌شدگی و تأثیر این پارامتر(ها) بر مقاومت ویژه حاصل از برداشت CSEM ارائه دادند [Hesthammer et al., 2010a; Hesthammer et al., 2010b].

یکی از نتایج یا کمیت‌های حاصل از پردازش و تحلیل داده‌ها در این برداشت‌ها، به دست آوردن پاسخ آنومال نرمالایز شده (NAR)^۳ است که در واقع پاسخ مقاومت ویژه یک آنومالی (منطقه آنومال) را نسبت به مقاومت ویژه زمینه نشان می‌دهد. با استفاده از کمیت NAR می‌توان مناطق آنومال یا حاوی آنومالی الکتریکی را تشخیص داد. جهت تعیین مقاومت ویژه زمینه، یک گیرنده مبنا خارج از محدوده هدف قرار می‌گیرد و برای هر خط برداشت، فاصله^۴ افقی بین چشمه جریان و گیرنده مبنا مشخص می‌شود سپس برای این فاصله و فرکانس مشخص شده، تمام گیرنده‌ها نسبت به گیرنده مبنا نرمالایز می‌شوند. پاسخ نرمالایز شده در نمودارهای (NMVO)^۵ نشان داده می‌شود، که می‌توان مناطق با پاسخ آنومال را نسبت به زمینه مشخص نمود. مقدار NAR برابر با ۱ نشان می‌دهد که بزرگی میدان الکتریکی گیرنده مورد نظر با بزرگی میدان الکتریکی گیرنده مبنا برابر است. مقدار NAR برابر با ۱/۵ نشان می‌دهد که پاسخ نرمال شده گیرنده مورد نظر ۵۰٪ بزرگ‌تر از پاسخ گیرنده مبنا می‌باشد. نتایج تجربی نشان می‌دهد زمانی که NAR کمتر از مقدار حد ۱۵٪ بزرگ‌تر از پاسخ گیرنده مبنا باشد (به عبارت دیگر مقدار NAR کمتر از ۱/۱۵ باشد)، به دلیل تغییرات جانبی و عمودی مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی که حاوی هیدروکربور نیستند، تشخیص آنومالی‌های زیرسطحی با مشکل مواجه می‌شود. این مقدار حد برای تشخیص چاه‌های خشک (فاقد هیدروکربور) و اکتشافی (دارای هیدروکربور) مورد استفاده قرار گرفته و نتایج خوب و موفقی

1- Hesthammer

2- Controlled-source electromagnetic

3- Normalized anomalous amplitude response (NAR)

4- Offset

5- Normalized Magnitude Versus Offset

در بر داشته به طوری که چاه‌های اکتشافی حفر شده که به هیدروکربور برخورد کرده‌اند، عمدتاً در محدوده‌های دارای آنومالی الکتریکی CSEM یعنی محدوده‌هایی که مقدار NAR بیش از ۱/۱۵ بوده، قرار گرفته‌اند [Hesthammer et al., 2010a].

در یک مطالعه موردی، ولد^۱ و همکاران (۲۰۱۲) داده‌های ۱۵ چاه اکتشافی در دریای نروژ را به منظور بررسی اثر عوامل کنترل کننده اشباع‌شدگی و نقش آن بر تغییرات مقاومت ویژه از طریق سنجش رابطه بین مقاومت ویژه و پارامترهای مخزن مورد تحلیل قرار دادند [Vold et al., 2012]. اختلاف در میزان اشباع‌شدگی از هیدروکربور حاصل اختلاف در پارامترهای مخزن می‌باشد [Vold et al., 2012]. سپس با انجام مدل‌سازی پیشرو داده‌های CSEM به بررسی میزان تأثیر تغییرات پارامتر اشباع‌شدگی مخازن هیدروکربوری بر مقاومت ویژه حاصل از برداشت در آن مخازن پرداختند [Vold et al., 2012]. بر اساس نتایج مدل‌سازی پیشرو داده‌های CSEM، اختلاف مقاومت ویژه در مخازن مورد مطالعه، در نتیجه اختلاف در میزان اشباع‌شدگی از هیدروکربور آنها تشخیص داده شد.

بر اساس نتایج مطالعات هستامر و همکاران (۲۰۱۰) و ولد و همکاران (۲۰۱۲)، روش CSEM به عنوان روشی کارآمد جهت اکتشاف و تخمین پارامترهای مخازن هیدروکربوری قرار گرفته در عمق کم و کاهش ریسک حفر چاه‌های خشک (بدون هیدروکربور) معرفی شده است. مدل‌سازی پیشرو داده‌های CSEM جهت سنجش پاسخ روش‌های الکتریکی و تغییرات مقاومت ویژه در نتیجه تغییرات اشباع‌شدگی هیدروکربور، نتایج مطلوبی را ارائه می‌نماید [Vold et al., 2012]. در این مرحله، داشتن اطلاعات کامل از عوامل کنترل کننده اشباع‌شدگی هیدروکربور جهت پیش‌بینی دقیق پاسخ مقاومت ویژه ضروری می‌باشد.

1- Vold

۱-۶- هدف و ضرورت انجام تحقیق

داده‌های MT با گستره وسیع فرکانس ۰/۰۰۱ تا ۵۰۰ هرتز در اکتشافات نفتی و در محیط‌هایی که اطلاعات لرزه‌ای کیفیت لازم را ندارند، برداشت می‌شوند. داده‌های مقاومت ویژه روش MT حاوی اطلاعاتی می‌باشند که منعکس کننده ویژگی‌های الکتریکی سنگ مخزن و سیال درون آن می‌باشند. بنابراین تخمین اشباع‌شدگی از هیدروکربور با استفاده از داده‌های MT می‌تواند یک مسئله مهم و قابل تأمل از نظر کاهش هزینه‌های زیاد مرحله اکتشاف باشد.

پیچیدگی در رفتار و ویژگی‌های الکتریکی مخازن کربناته در مقایسه با مخازن ماسه سنگی، باعث شده است که استفاده از اکثر تئوری‌های ارائه شده توسط متخصصین فیزیک سنگ برای مخازن کربناته، دارای عدم قطعیت باشد. از طرفی، با توجه به این‌که بخش عظیمی از ذخایر هیدروکربوری ایران در مخازن کربناته قرار دارند، لزوم بررسی امکان‌سنجی استفاده از مدل‌های فیزیک سنگ ارائه شده در مخازن کربناته و یا ارائه مدل جدید، مختص به این مخازن را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

با توجه به مسئله مطرح شده، بررسی مدل فیزیک سنگ مناسب که ارتباط بین ویژگی‌های سنگ و سیال (از جمله اشباع‌شدگی) با مقاومت ویژه الکتریکی در مخزن هیدروکربوری کربناته را بیان نماید هدف کلی این تحقیق می‌باشد. در این راستا، تخمین اشباع‌شدگی مخزن هیدروکربوری مورد مطالعه با استفاده از داده‌های MT برداشت شده در مخزن، هدف اصلی است.

بر اساس این اهداف، سؤالات اساسی، فرضیات و ساختار تحقیق به صورت زیر بیان می‌شود.

۱-۷- سؤالات اساسی تحقیق

به منظور توسعه الگوریتم ارائه شده جهت تخمین پارامتر اشباع‌شدگی با استفاده از داده‌های MT، یک سری سؤالات اساسی به شرح زیر می‌تواند مطرح گردد:

۱- در صورت ایجاد ارتباط بین داده‌های نگارهای مقاومت ویژه و کمیت اشباع‌شدگی توسط مدل فیزیک سنگ، آیا مدل ارائه شده نتایج قابل قبول دارد و این نتایج قابل تعمیم به کل مخزن و سایر مخازن کربناته می‌باشند؟

۲- از آنجا که داده‌های MT در اوایل مرحله اکتشاف بسیاری از مخازن هیدروکربوری برداشت می‌شوند و قابل دسترس می‌باشند، آیا می‌توان از آن‌ها جهت پیش‌بینی طبیعت سیال و درجه اشباع‌شدگی از آن در سنگ مخزن استفاده نمود؟

۳- در صورت وجود روش‌های مختلف جهت تخمین اشباع‌شدگی از هیدروکربور با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه MT، مقایسه بین نتایج و انتخاب روش بهینه (در صورت امکان) چگونه انجام می‌شود؟

۱-۸- فرض‌های تحقیق

در راستای رسیدن به پاسخ مناسب برای سؤالات ذکر شده در خصوص مسئله مورد تحقیق، فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- نقش هر کدام از عوامل تأثیرگذار بر اشباع‌شدگی مخزن نظیر تخلخل، تراوایی، فشار مویینگی و توزیع ابعاد حفرات و ... قابل تشخیص و یا قابل ارائه در یک مدل فیزیک سنگ مخزن است.
- از آنجا که تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی به ترکیبی از ویژگی‌های مختلف سنگ از جمله سیالات مخزن بستگی دارد، فرض می‌شود که در محدوده مورد بررسی از مخزن، نوع سنگ یا لیتولوژی و (تا حدی) خصوصیات لیتولوژی و زمین‌شناسی مخزن تغییر نکند تا بتوان تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی در محدوده مورد بررسی را تنها به طبیعت و نوع سیالات (از جمله تغییرات اشباع‌شدگی) نسبت داد.

۹-۱- روش انجام تحقیق

به منظور نیل به اهداف تعیین شده در این تحقیق، ابتدا به بررسی دقیق زمین‌شناسی، جنس یا لیتولوژی سنگ مخزن مورد مطالعه و سایر ویژگی‌های آن پرداخته می‌شود. عوامل مختلف مانند حضور شیل در مخزن مورد مطالعه می‌تواند تأثیر به سزایی در پاسخ مقاومت ویژه داشته باشند. در این مورد از همه اطلاعات موجود در محدوده مخزن اعم از اطلاعات به دست آمده از نگارهای چاه‌پیمایی و مغزه‌های حفاری استفاده می‌شود؛ تا عوامل زمین‌شناسی و پتروفیزیکی کنترل کننده توزیع مقاومت ویژه در محدوده مورد مطالعه به صورت کیفی و کمی تعیین گردند.

پس از تعیین پارامترهای تأثیرگذار بر تغییر رفتار داده‌های مقاومت ویژه باید یک مدل فیزیکی یا رابطه‌ای انتخاب شود که قادر باشد تغییرات این پارامترها را با مقاومت ویژه الکتریکی مخزن مرتبط سازد. در این راستا، مدل‌های فیزیکی مختلفی تعریف شده‌اند که با توجه به جنس سنگ و نوع مخزن، ویژگی‌های زمین‌شناسی مخزن و ویژگی‌های سیال موجود در آن را به ویژگی‌های الکتریکی مرتبط نموده و این ارتباط را به صورت مدل‌های ریاضی بیان می‌کنند. اما به صورت کلی برای مخزن مورد بررسی باید مدلی را انتخاب نمود و در صورت امکان بهبود بخشید که با توجه به لیتولوژی و جنس سنگ‌ها و ویژگی‌های پتروفیزیکی آن، قادر به توصیف کمی مقاومت ویژه الکتریکی سیستم سنگ و سیال داخل آن باشد.

در مرحله بعد جهت تخمین اشباع‌شدگی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه MT، به کار بردن روش‌های هوش مصنوعی که قابلیت‌های بسیاری در مسائل پیچیده و مبهم زمین‌شناسی دارند؛ می‌تواند نتایج مفیدی داشته باشد. در انتها مقایسه نتایج حاصل با مقادیر واقعی اشباع‌شدگی موجود، اعتبار روش پیشنهاد شده را نشان می‌دهد.

۱-۱۰- ساختار رساله

به منظور انجام این مطالعه، یک میدان هیدروکربوری که در آن داده‌های MT، نگارهای چاه‌پیمایی و آنالیز مغزه‌ها با کیفیت مناسب موجود است انتخاب شده است. فصل دوم به بررسی کلیات و تئوری روش الکترومغناطیس، چگونگی برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های MT پرداخته است.

در فصل سوم، زمین‌شناسی، موقعیت جغرافیایی و چینه‌شناسی مخزن مورد مطالعه بررسی شده و فاکتورهای پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی تأثیرگذار بر تغییرات اشباع‌شدگی مخزن تعیین می‌شوند.

در فصل چهارم، تئوری فیزیک سنگ محیط مؤثر تفاضلی^۱ که قادر به تعیین مقادیر مقاومت ویژه مخزن در سنگ‌های اشباع بر اساس پارامترهای سیال و سنگ می‌باشد، در مخزن مورد مطالعه بررسی شده است و سپس بر اساس داده‌های یک چاه اکتشافی، مقادیر پارامترهای مدل فیزیک سنگ با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک^۲ محاسبه شده است. در ادامه، از الگوریتم ژنتیک برای تعیین یک مدل فیزیک سنگ برای مخزن کربناته مورد مطالعه استفاده شده است.

در فصل پنجم، با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی^۳ و عصبی-فازی^۴، مدل اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه مگنتوتلوریک حاصل شده است.

در نهایت فصل ششم به جمع‌بندی مطالب رساله، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای ادامه کار می‌پردازد.

1- Differential effective-medium (DEM) model

2- Genetic algorithm

3- Artificial neural network

4- Neuro- fuzzy

فصل دوم: اصول و کلیات

روش MT

۲-۱- مقدمه

روش‌های EM پاسخ زمین به جریان یا میدان الکترومغناطیس تولید شده به صورت طبیعی یا مصنوعی است که از دو مؤلفه عمود بر هم میدان الکتریکی (E) و میدان مغناطیسی (H) در صفحه‌ای عمود بر جهت حرکت تشکیل شده است. در روش‌های EM فعال^۱، تولید جریان به کمک یک فرستنده انجام می‌شود اما در روش‌های EM غیر فعال^۲ مثل روش‌های MT از سیگنال‌های طبیعی زمین استفاده می‌شود [Reynolds, 1997]. روش MT با توانایی بررسی توزیع مقاومت ویژه زمین در اعماق زیاد به همراه روش لرزه‌ای به منظور تکمیل اطلاعات در اکتشاف نفت به کار برده می‌شود [Jegen et al., 2009].

روش MT با استفاده از اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین بر پایه اختلاف فاز موجود بین موج الکترومغناطیس (EM)^۳ وارد شونده به یک توده رسانای زیرسطحی و موج ثانویه ایجاد شده به علت تولید جریانات القایی در توده هادی عمل می‌نماید [Dobrin and Savit, 1988]. این روش که توزیع مقاومت ویژه زمین را در اعماق مختلف مشخص می‌کند از دهه ۱۹۵۰ در اکتشافات نفت، منابع معدنی و منابع ژئوترمال مورد استفاده قرار می‌گیرد [Dobrin and Savit, 1988].

۲-۲- تئوری اساسی EM

تئوری EM به منظور توصیف انتشار و تضعیف موج MT مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادلات ماکسول^۴ که بردارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی را به هم ارتباط می‌دهند، رفتار میدان‌های EM را در یک محیط توصیف می‌نمایند [Dobrin and Savit, 1988; Telford et al., 1990; Zhdanov, 2009]. این

1- Active
2- Passive
3- Electromagnetic (EM)
4- Maxwell's equations

معادلات که شامل دو معادله برداری و دو معادله اسکالر هستند به صورت زیر بیان می‌شوند [Zhdanov, 2009; Telford et al., 1990]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-2-a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-2-b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-2-c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (1-2-d)$$

در این معادلات $\mathbf{H}$ میدان برداری مغناطیسی، $\mathbf{B}$ القای مغناطیسی، $\mathbf{E}$ میدان برداری الکتریکی و $\mathbf{D}$ جابجایی الکتریکی می‌باشند. $\mathbf{J}$ چگالی جریان، q چگالی بار الکتریکی و t زمان است. معادلات (1-2-a) و (1-2-b) به ترتیب بیان ریاضی قوانین فارادی^۱ و آمپر^۲ می‌باشند. مطابق قانون فارادی هر جا میدان مغناطیسی متغیر با زمان موجود باشد میدان الکتریکی متناسب با آهنگ تغییر شار مغناطیسی با علامت منفی به وجود می‌آید. عبور جریان الکتریکی در فضا تولید میدان مغناطیسی می‌کند که بر اساس قانون آمپر این میدان متناسب با کل جریان رسانش و جابجایی موجود در محیط می‌باشد [Telford et al., 1990].

در یک محیط همسانگرد و همگن روابط خطی (2-2) و (3-2) و قانون اهم^۳ (رابطه 2-4) ارتباط بین جفت میدان‌های الکتریکی و جابجایی الکتریکی، میدان مغناطیسی و القای مغناطیسی و چگالی جریان رسانش با میدان الکتریکی را بیان می‌کنند. در این روابط ϵ ، μ و σ به ترتیب ضریب گذردهی دی الکتریک^۴، تراوایی مغناطیسی^۵ و رسانندگی الکتریکی^۱ محیط می‌باشند.

1 - Faraday's law

2 - Ampere's law

3 - Ohm's law

4 - Dielectric constant (permittivity)

5 - Magnetic permeability

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2-2)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3-2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (4-2)$$

بنابراین با توجه به روابط (2-2)، (3-2) و (4-2) در یک محیط همگن که ε ، μ و σ نسبت به زمان و مکان ثابت هستند و از آنجا که در یک محیط همگن تجمع بار الکتریکی آزاد وجود ندارد ($q=0$)، معادلات ماکسول به صورت زیر ساده می‌شوند [Telford et al., 1990; Zhdanov, 2009]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (5-2-a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5-2-b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (5-2-c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (5-2-d)$$

جهت تفکیک متغیرها در معادلات ماکسول می‌توان این معادلات را برای میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی به صورت جداگانه نوشت. برای این منظور اپراتور $\nabla \times$ در طرفین رابطه (5-2-a) اعمال شده و در رابطه (5-2-b) تلفیق می‌شود سپس با اعمال این اپراتور در رابطه (5-2-b) و جای‌گذاری در رابطه (5-2-a) روابط زیر به ترتیب حاصل می‌شوند [Zhdanov, 2009]:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (6-2)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (7-2)$$

با استفاده از اتحاد برداری $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ داریم:

1 - Electrical conductivity

2- Curl operation

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (۸-۲)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (۹-۲)$$

معادلات (۸-۲) و (۹-۲) نفوذ بردار میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را در یک محیط همگن به طور کامل توصیف می‌نمایند و به معادلات تلگرافر^۱ یا معادلات هلمهولتز^۲ معروف هستند [Telford et al., 1990; Zhdanov, 2009]. با هارمونیک ($e^{i\omega t}$) در نظر گرفتن تغییرات زمانی میدان‌های EM متغیر با زمان، معادلات ماکسول در حوزه فرکانس به صورت زیر در می‌آیند [Zhdanov, 2009]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + i\omega\epsilon \mathbf{E} \quad (۱۰-۲-a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu \mathbf{H} \quad (۱۰-۲-b)$$

$$\nabla \cdot (\mu \mathbf{H}) = 0 \quad (۱۰-۲-c)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = q \quad (۱۰-۲-d)$$

در این معادلات $\omega = 2\pi f$ ، فرکانس زاویه‌ای میدان می‌باشد. معادلات تلگرافر در حوزه فرکانس به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = (i\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) \mathbf{E} \quad (۱۱-۲)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = (i\omega\mu\sigma - \mu\epsilon\omega^2) \mathbf{H} \quad (۱۲-۲)$$

$$\mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma = K^2 \quad (۱۳-۲)$$

در این معادلات K عدد موج، عبارت $\mu\epsilon\omega^2$ مربوط به جریان‌های جابجایی و عبارت $i\omega\mu\sigma$ مربوط به جریان‌های رسانش می‌باشند [Telford et al., 1990; Zhdanov, 2009].

1- Telegrapher's equations

2- Helmholtz equations

۲-۳- مدل‌های القای میدان EM در زمین

مدل‌های ساده رفتار میدان‌های EM را می‌توان به انواع زیر تقسیم کرد:

۱- مدل معادله موج^۱: این مدل در مطالعه انتشار میدان‌های EM در محیط‌های با رسانندگی ضعیف

(یا نارسانا) مثل هوا به کار می‌رود. زمانی که جمله حاوی رسانندگی در معادلات تلگراف حذف

شود، معادلات (۲-۱۴) و (۲-۱۵) رفتار موج را در محیط‌های نارسانا توصیف می‌نمایند

[Simpson and Bahr, 2005; Zhdanov, 2009]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2-14)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (2-15)$$

۲- مدل شبه ایستا^۲: زمانی که میدان‌های EM به آهستگی با زمان تغییر می‌کنند می‌توان از عبارت

مشتقات درجه دوم نسبت به زمان معادلات تلگراف در مقایسه با مشتقات درجه اول صرف نظر

کرد [Simpson and Bahr, 2005; Zhdanov, 2009]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (2-16)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2-17)$$

معادلات (۲-۱۶) و (۲-۱۷) به معادلات پخش^۳ معروف می‌باشند و انتشار میدان‌های EM را در محیط

رسانا به صورت پخش EM یا شبه ایستا توصیف می‌کنند. معادلات مدل شبه ایستا از میدانی که

اثرات مربوط به جریان‌های جابجایی معادلات ماکسول آن حذف شده‌اند حاصل می‌شود [Telford et

al., 1990; Simpson and Bahr, 2005; Zhdanov, 2009].

1 - Wave equation model

2- Quasi static

3- Diffusion equation

۳- مدل ایستا: یک میدان EM ایستا، از زمان مستقل است. در این حالت تمام مشتقات نسبت به زمان در معادلات ماکسول برابر صفر در نظر گرفته می‌شوند [Zhdanov, 2009]. بنابراین در محیط‌های همگن و عدم حضور جریان خارجی، میدان‌های الکتریک و مغناطیس ایستا از معادله لاپلاس پیروی می‌کنند [Telford et al., 1990; Zhdanov, 2009]:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = 0 \quad (18-2)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = 0 \quad (19-2)$$

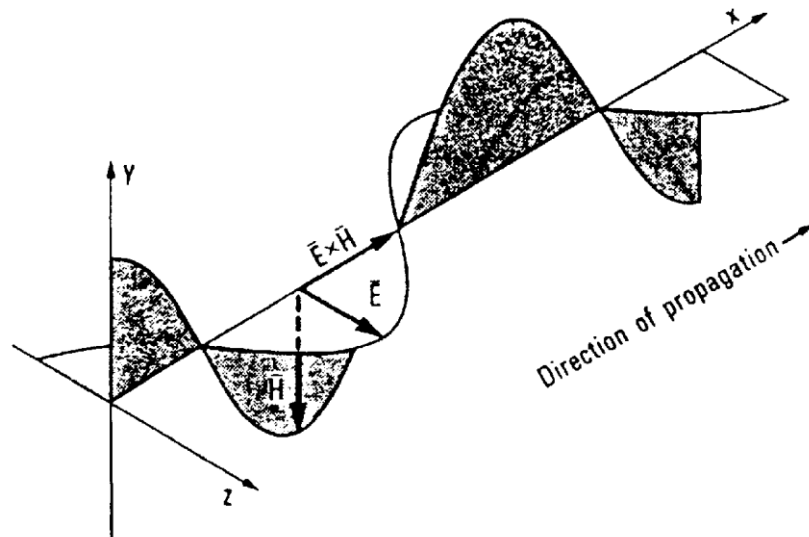
۲-۴- انتشار امواج EM

مطابق شکل ۱-۲ انتشار میدان‌های EM در یک محیط همگن و همسانگرد از معادله پخش پیروی می‌کند. پاسخ این معادله در حالتی که موج را قطبیده تخت در نظر بگیریم که در آن موج در جهت z (به طور عمقی) منتشر شده و صفحه xy صفحه قطبش باشد و بردارهای الکتریکی و مغناطیسی این میدان‌ها روی هر صفحه افقی در محیط انتشار ثابت هستند ($H = H_y(z, t)$ و $E = E_x(z, t)$) به صورت زیر می‌باشد [Vozoff, 1991]:

$$\mathbf{A} = A_0 e^{-i(kz - \omega t)} = A_0 e^{i\omega t} e^{-i\alpha z} e^{-\alpha z} \quad (20-2)$$

$$\alpha = \left(\frac{\omega \mu \sigma}{2} \right)^{1/2} = \frac{1}{\delta}, \quad k = (1-i)\alpha \quad (21-2)$$

A_0 بزرگی میدان‌های E و H در سطح زمین می‌باشد. ملاحظه می‌شود که دامنه موج به طور نمایی نسبت به عمق کاهش می‌یابد و قدرت امواج با افزایش عمق تضعیف می‌شود [Zhdanov, 2009; Dobrin, 1991]. Savit, 1988; Vozoff, 1991.



شکل ۱-۲: مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی یک موج EM [Reynolds, 1997]

عمق پوست^۱ به عنوان معیاری برای نفوذ امواج EM و یا تضعیف قدرت این امواج تعریف می‌شود. عمق پوست در یک زمین همگن و همسانگرد، عمقی است که در آن دامنه موج صفحه‌ای به مقدار e^{-1} یا ۳۷٪ مقدار اولیه‌اش در سطح زمین یا سطح محیط انتشار کاهش می‌یابد [Sheriff, 1991].

$$A_z = A_0 e^{-1} \quad (22-2)$$

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega \mu \sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (23-2)$$

در این رابطه δ ، عمق پوست بر حسب متر، ρ مقاومت ویژه بر حسب اهم متر و f فرکانس بر حسب هرتز است. در شرایط یکسان مقاومت ویژه، هر چه فرکانس پایین‌تر باشد عمق نفوذ بیشتر است. در نتیجه از فرکانس برای کنترل عمقی که در آن مقاومت ویژه اندازه‌گیری می‌شود می‌توان استفاده نمود [Dobrin and Savit, 1988; Vozoff, 1991].

1- Skin depth

۲-۵- میدان MT

جهت اعمال معادلات ماکسول بر داده‌های MT یک‌سری فرضیات و ساده‌سازی‌ها باید در نظر گرفته شوند. در فرکانس‌های پایین از جریان‌های جابجایی می‌توان صرف نظر کرد و در موج صفحه‌ای، تغییرات افقی میدان‌های الکتریک و مغناطیس در مقایسه با تغییرات عمودی اندک بوده و صفحه xy به عنوان صفحه پلاریزاسیون و z جهت انتشار موج در نظر گرفته می‌شود. ساده‌ترین مدلی که برای این حالت می‌توان در نظر گرفت یک زمین یکنواخت با لایه‌بندی افقی است که هدایت الکتریکی تنها به صورت عمقی تغییر می‌نماید. حل معادلات ماکسول و بررسی رفتار میدان الکترومغناطیس برای چنین مدلی در سال ۱۹۵۰ توسط تیخونوف [Tikhonov, 1950] و سال ۱۹۵۳ توسط کانیار [Cagniard, 1953] به صورت جداگانه انجام شده است.

جهت تخمین مقاومت ویژه سطح زمین، ارتباط بین بردارهای الکتریکی و مغناطیسی و مقاومت ویژه در سطح زمین باید مشخص شود. در هر فرکانس زاویه‌ای ω روی سطح یک نیم فضای یکنواخت با رسانندگی σ :

$$\mathbf{H} = \frac{k}{\mu\omega} \mathbf{n} \times \mathbf{E} \quad (2-24)$$

در این رابطه، $k = (1-i)\alpha$ ، $\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \frac{l}{\delta}$ ، δ عمق پوست بر حسب متر، k ثابت نفوذ و $\mathbf{n}$ بردار

یکه یا واحدی است که گسترش عمودی به سمت پایین را نشان می‌دهد. در سطح زمین داریم:

$$\frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = \frac{\omega\mu}{K} = (1+i)\sqrt{\frac{\rho\omega\mu}{2}} \quad (2-25)$$

با حل این رابطه نسبت به ρ_{xy} داریم:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\mu \omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (26-2)$$

از این رابطه مقاومت ویژه زمین همگن و یکنواخت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن واحد میلی ولت بر کیلومتر برای E_x و واحد گاما یا نانوتسلا برای H_y رابطه‌ای بین مقاومت ویژه الکتریکی و فرکانس موج EM به صورت زیر حاصل می‌شود [Vozoff, 1991]:

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (27-2)$$

با توجه به اینکه دوره تناوب T برابر با عکس فرکانس f است [Telford et al., 1990]:

$$\rho_{xy} = 0.2T \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (28-2)$$

با اندازه‌گیری دامنه مؤلفه‌های افقی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین برای فرکانس‌های مختلف، تغییرات عمقی مقاومت ویژه را به صورت سونداژ MT^۱ می‌توان تعیین نمود.

۲-۵-۱- منشأ میدان‌های MT

تغییرات پیوسته بزرگی و جهت میدان مغناطیسی زمین نسبت به زمان را تغییرات ژئومغناطیس^۲ می‌نامند. تغییرات ژئومغناطیس توسط فرآیندهای پیچیده‌ای که در هسته زمین و فرآیندهای فیزیکی که در فضا و خورشید رخ می‌دهند، ایجاد می‌شوند. مطابق قوانین القای EM، تغییرات ژئومغناطیس، یک میدان EM را در زمین رسانا القا می‌نمایند [Zhdanov, 2009].

1- MT sounding

2- Geomagnetic variations

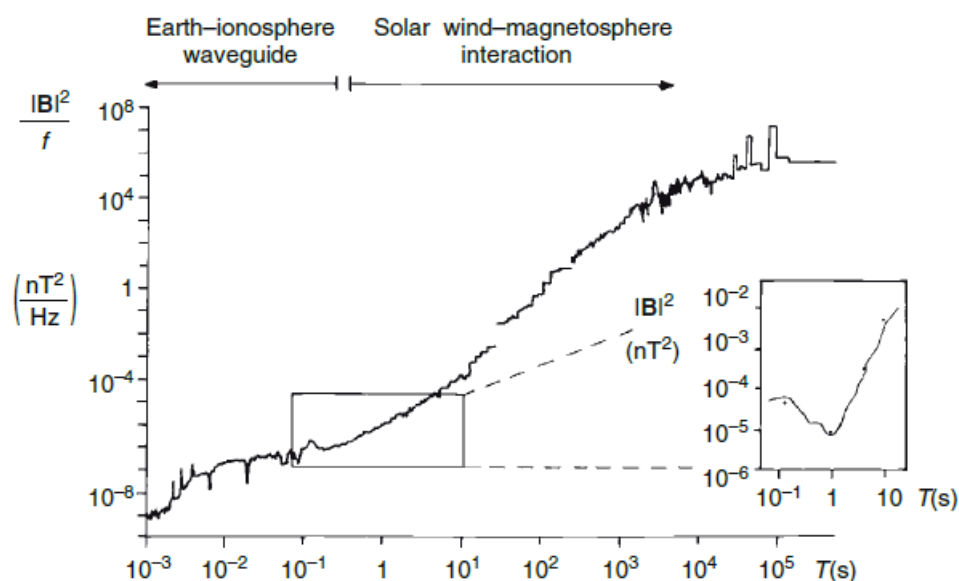
در روش MT، میدان EM طبیعی زمین که طیف فرکانسی گسترده‌ای دارد به عنوان منبع انرژی جهت اکتشاف زمین به کار می‌رود. فرکانس‌های پایین میدان EM طبیعی زمین توسط جریانات یونسفریک و مگنتوسفریک (حاصل برخورد پلاسما خورشید و میدان مغناطیس زمین) تولید می‌شوند. این جریانات، میدان‌های مغناطیس متغیری را تولید می‌کنند که این میدان‌ها به نوبه خود در محیط‌های رسانا یا نسبتاً رسانای زمین، جریانات پیچشی^۱ را القا می‌نمایند [Dobrin and Savit, 1988]. در فرکانس‌های بالا، بخش زیادی از انرژی از طوفان‌های خورشیدی حاصل می‌شود. همچنین آذرخش‌ها (رعد و برق) می‌توانند منشأ بخش دیگری از فرکانس‌های بالای میدان‌های EM طبیعی زمین باشند. به دلیل اختلاف مقاومت الکتریکی زیاد بین زمین و هوا، امواج EM صفحه‌ای به صورت عمودی به داخل زمین نفوذ می‌کنند. بر اساس قانون فارادی، میدان مغناطیسی افقی متغیر یک میدان الکتریکی افقی متغیر با زمان تولید می‌کند. میدان الکتریکی متغیر با زمان در زمین رسانا جریانات تلوریک را تولید می‌نماید [Vozoff, 1991].

مجموع تغییرات میدان ژئومغناطیس و جریانات تلوریک، میدان MT نامیده می‌شود.

میزان اختلاف فاز و دامنه دو میدان اولیه و ثانویه، اطلاعات مهمی درباره هندسه، اندازه و ویژگی‌های الکتریکی توده‌های رسانای زیر سطحی ارائه می‌دهد [Reynolds, 1997]. در فواصل دور از منبع، میدان EM حاصل به صورت موج صفحه‌ای با فرکانس متغیر می‌باشد. با اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیس و مؤلفه میدان الکتریکی، ساختارهای زیر سطحی شناسایی می‌شوند [Telford et al., 1990].

طیف دامنه امواج MT در شکل ۲-۲ دیده می‌شود. اما فرکانس‌های مورد استفاده در روش MT غالباً در بازه ۰/۰۰۰۱ تا ۱۰۰۰۰ هرتز هستند. میدان MT در فرکانس‌های کمتر از یک هرتز به دلیل استفاده در اکتشافات اعماق بالا اهمیت ویژه‌ای دارند [Telford et al., 1990].

1- Eddy currents



شکل ۲-۲ توان طیفی امواج MT [Simpson and Bahr, 2005]

۲-۶- تانسور امپدانس

نفوذ میدان مغناطیسی القایی به داخل زمین، میدان الکتریکی را القا می‌نماید. میدان منبع و میدان القایی از طریق یک تابع انتقال که شامل تابع امپدانس Z است، با یکدیگر ارتباط دارند:

$$\mathbf{E} = Z\mathbf{H} \quad (2-29)$$

میدان منبع، میدان القایی و Z تابع فرکانس می‌باشند. تابع Z ارتباط خطی بین بردارهای مختلط میدان منبع و میدان القایی را در حوزه فرکانس نشان می‌دهد [Dobrin and Savit, 1988].

مؤلفه‌های میدان الکتریکی نه تنها به مؤلفه میدان مغناطیسی عمود بر آن بلکه به مؤلفه موازی با آن نیز وابسته است. بنابراین در هر فرکانسی یک سیستم خطی به صورت زیر تعریف می‌شود [Vozoff, 1991]:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \end{aligned} \quad (2-30)$$

که معمولاً به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (31-2)$$

در یک زمین یکنواخت یا با لایه‌بندی افقی داریم: $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ و $Z_{xy} = -Z_{yx}$ و در نتیجه معادلات به صورت زیر بیان می‌شوند [Vozoff, 1991]:

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xy} H_y \\ E_y &= Z_{yx} H_x = -Z_{xy} H_x \end{aligned} \quad (32-2)$$

در ساختارهای دو بعدی چنانچه یکی از محورها به موازات امتداد ساختار باشد $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ و $Z_{xy} \neq -Z_{yx}$ چنانچه هیچ‌کدام از محورها به موازات امتداد نباشد داریم: $Z_{xx} = -Z_{yy} \neq 0$ [Vozoff, 1991].

از آنجا که امتداد آنومالی‌ها در زمان برداشت ندرتاً مشخص هستند. با چرخش بردار میدان الکتریکی تحت زاویه θ در جهت ساعتگرد داریم [Vozoff, 1991]:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (33-2)$$

$$\dot{\mathbf{E}} = \mathbf{R} \mathbf{E}$$

به طریق دیگر:

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{R} \mathbf{H} \quad (34-2)$$

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{R} \mathbf{Z} \mathbf{R}^T \quad (35-2)$$

که در این رابطه $\mathbf{R}^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$ ترانپاده R است [Vozoff, 1991]. محوره‌ای برداشت نسبت

به امتداد آنومالی با زوایای مختلف در نظر گرفته می‌شوند و سپس جهت تعیین امتداد ساختار، عناصر قطری تانسور امپدانس با دوران تا حد ممکن حذف می‌شوند. در حالت بهینه، زاویه دوران باید طوری انتخاب شود که عناصر قطری تانسور Z' صفر و یا حداقل شود [Zhdanov, 2009].

دترمینان تانسور امپدانس که امپدانس مؤثر^۱ نامیده می‌شود با دوران محور مختصات تغییر نمی‌کند [Zhdanov, 2009]:

$$Z_{ef} = Z_{det} = (Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx})^{1/2} \quad (۳۶-۲)$$

کمیت چولگی^۲ که به صورت رابطه (۳۷-۲) بیان می‌شود، نسبت به چرخش تانسور امپدانس در راستاهای مختلف، مستقل می‌باشد و در یافتن جهت امتداد اصلی کمک می‌نماید [Vozoff, 1991].

$$skew = \frac{|Z_{xx} - Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} \quad (۳۷-۲)$$

در صورتی که پارامتر چولگی مقداری نزدیک صفر داشته باشد، مدل یک یا دو بعدی برای منطقه مورد مطالعه مناسب می‌باشد [Telford et al., 1990].

۲-۷- توابع تیپر^۳

در اغلب موارد به جز در محدوده تغییرات جانبی رسانندگی الکتریکی، مؤلفه قائم میدان مغناطیسی H تقریباً برابر صفر است. وابستگی خطی مؤلفه قائم میدان مغناطیسی به مؤلفه افقی آن در هر فرکانس به صورت زیر بیان می‌شود [Zhdanov, 2009; Telford et al., 1990]:

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y \quad (۳۸-۲)$$

مؤلفه‌های T_i به دلیل اینکه جابجایی فاز دارند، مختلط می‌باشند. در یک ساختار دو بعدی که امتداد آن در جهت X است رابطه (۳۸-۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود [Vozoff, 1991]:

$$H_z = T'_y H'_y \quad (۳۹-۲)$$

1- Effective impedance

2- Skew

3- Tipper

$\hat{T}$ که افزایش بردار $\mathbf{H}$ در خارج از صفحه افقی را بیان می‌کند، تیپر نامیده می‌شود.

۲-۸- بررسی پاسخ الکتریکی ساختارهای یک بعدی (1-D)

یک ساختار ژئوالکتریکی یک بعدی ساختاری است که مقاومت ویژه الکتریکی آن به صورت جانبی تغییر نمی‌کند. همان طور که شکل ۲-۳ نشان می‌دهد، این ساختار شامل لایه‌های افقی است که هر لایه مقاومت ویژه و ضخامت مجزا دارد. مقاومت ویژه به صورت پیوسته تنها به تغییرات عمق وابسته است. در این زمین لایه‌ای یک بعدی با $N-1$ لایه که مقاومت ویژه و ضخامت لایه‌ها به ترتیب با ρ_i و h_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$) مشخص شده، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین عمود بر یکدیگر بوده و از جهت اندازه‌گیری مستقل می‌باشند.

$$Z(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = -\frac{E_y(\omega)}{H_x(\omega)} \quad (40-2)$$

$$\rho_{xy} = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \varphi_{xy} = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(Z_{xy})}{\text{Re}(Z_{xy})} \right] \quad (41-2)$$

امپدانس یک بعدی برابر با نسبت مؤلفه‌های عمود بر هم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشد. مقاومت ویژه ظاهری نیز به صورت تابعی از فرکانس بیان شده است. مقادیر فرکانس بالا، مقاومت ویژه لایه بالایی و مقادیر فرکانس پایین، مقاومت ویژه نیم فضای تحتانی مدل یک بعدی را نشان می‌دهد [Dobrin and Savit, 1988]. φ_{xy} فاز تابع امپدانس مختلط را نشان می‌دهد. در این رابطه، $\text{Im}(Z_{xy})$ و $\text{Im}(Z_{yx})$ بخش موهومی و $\text{Re}(Z_{xy})$ و $\text{Re}(Z_{yx})$ بخش حقیقی امپدانس‌های الکتریکی می‌باشند. در این مدل، مقاومت ویژه ظاهری و فاز تابع امپدانس از یکدیگر مستقل نبوده و با استفاده از رابطه تبدیل هیلبرت^۱ (۲-۴۲) می‌توان رابطه بین آنها را تقریب زد [Dobrin and Savit, 1988; Vozoff, 1991].

1- Hilbert- transform

$$\varphi(f) \approx \frac{\pi}{4} \left[1 + \frac{\partial \log \rho_a(f)}{\partial \log f} \right] \quad (2-42)$$

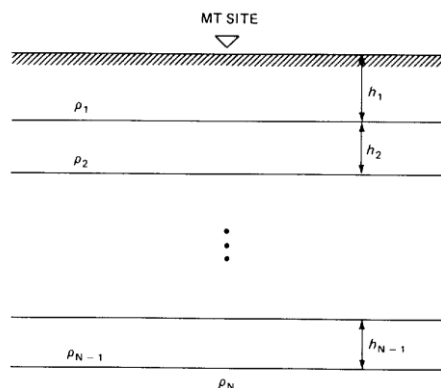
۲-۹- بررسی پاسخ الکتریکی ساختارهای دو بعدی (2-D)

در ساختارهای ژئوالکتریکی دو بعدی، مقاومت ویژه الکتریکی به صورت تابعی از عمق و یک جهت افقی دیگر تغییر می‌کند. جهتی که ویژگی‌های الکتریکی در آن جهت تغییر نمی‌کند را امتداد^۱ و جهت عمود بر آن را شیب^۲ می‌نامند. در یک مدل دو بعدی، معادلاتی که به توصیف پخش میدان‌های EM می‌پردازند به دو وضعیت تقسیم می‌شوند. مد^۳ اول حالتی است که مؤلفه میدان الکتریکی موازی امتداد بوده و مؤلفه میدان مغناطیسی عمود بر آن است. این مد را قطبش E (مد TE) یا حالت الکتریکی عرضی^۴ (E موازی E_{||}) می‌نامند. معادلات دسته دیگر، حالتی که مؤلفه میدان الکتریکی عمود بر امتداد بوده و مؤلفه میدان مغناطیسی در جهت امتداد است را توصیف می‌نمایند. به این وضعیت قطبش H، حالت مغناطیسی عرضی (مد TM) یا H موازی (E_⊥) گفته می‌شود [Dobrin and Savit, 1988].

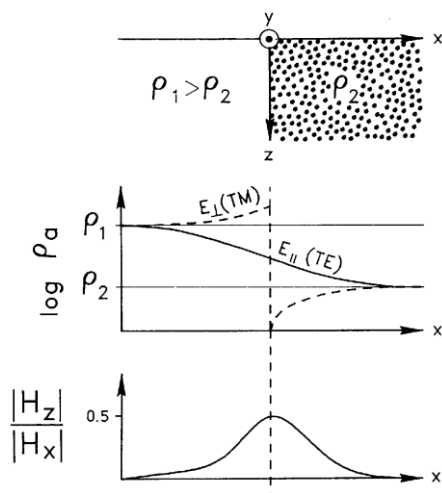
این دو مد در محیط دو بعدی رفتارهای متفاوتی دارند. ساده‌ترین مدل در شکل ۲-۴ نشان داده شده است که شامل دو بلوک چهارگوش است که تا سطح گسترش یافته‌اند و یک ناپیوستگی قائم بین آنها وجود دارد. بلوک سمت چپ مقاومت ویژه بیشتری دارد و امتداد آن در جهت محور y است. تغییرات مقاومت ویژه برای دو مد TE و TM در یک فرکانس مشخص رسم شده است. مد TE با نزدیک شدن به مرز بین دو بلوک کاهش مقاومت ویژه را نشان می‌دهد. منحنی مربوط به مد TM با شروع از مقدار مقاومت ویژه بلوک سمت چپ با رسیدن به مرز بین دو بلوک افزایش نشان می‌دهد. با گذر از محل مرز،

1- Strike direction
2- Dip direction
3- Mode
4- Transverse Electric

منحنی ناپیوسته شده و کاهش می‌یابد و در ادامه مقاومت ویژه افزایش یافته تا به مقدار مقاومت ویژه بلوک سمت راست نزدیک می‌شود [Dobrin and Savit, 1988].



شکل ۲-۳: مدل یک بعدی مقاومت- عمق [Dobrin and Savit, 1988]



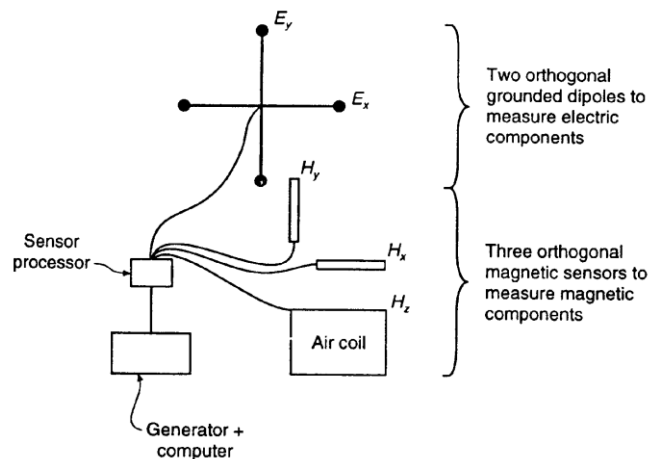
شکل ۲-۴: پاسخ یک مدل دو بعدی با ناپیوستگی جانبی به میدان EM طبیعی [Dobrin and Savit, 1988]

در مد TE میدان الکتریکی در جهت امتداد است. جریان‌ات الکتریکی در جهت مؤلفه میدان الکتریکی و موازی امتداد حرکت کرده و به آرامی از ناپیوستگی عبور می‌کند و این وضعیت به ناپیوستگی جانبی حساسیت کمتری نشان می‌دهد. از طرف دیگر، مد TM یک مؤلفه میدان الکتریکی در جهت x دارد که موجب حرکت جریان‌های الکتریکی عمود بر ناپیوستگی مذکور می‌شود و القا یک میدان الکتریکی

می‌شود. افزایش میدان الکتریکی در نزدیک ناپیوستگی باعث افزایش مقاومت ویژه می‌شود. معمولاً از وضعیت TE برای بررسی ساختارهای عمیق و از وضعیت TM برای بررسی ساختارهای کم عمق استفاده می‌شود [Dobrin and Savit, 1988].

۲-۱۰- برداشت داده‌های MT

از آنجا که جهت قطبش میدان مغناطیسی القایی متغیر است در هر ایستگاه، حداقل دو مؤلفه میدان الکتریکی و سه مؤلفه از میدان مغناطیسی اندازه‌گیری می‌شود. شمای کلی برداشت داده‌های MT در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. دو جفت الکتروود عمود بر هم برای اندازه‌گیری دو مؤلفه الکتریکی افقی و دو گیرنده مغناطیسی به صورت موازی الکتروودها برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های مغناطیسی به کار می‌روند. سنسور سوم مؤلفه عمودی مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین در هر ایستگاه پنج پارامتر به صورت پیوسته و تابعی از فرکانس ثبت می‌شوند.



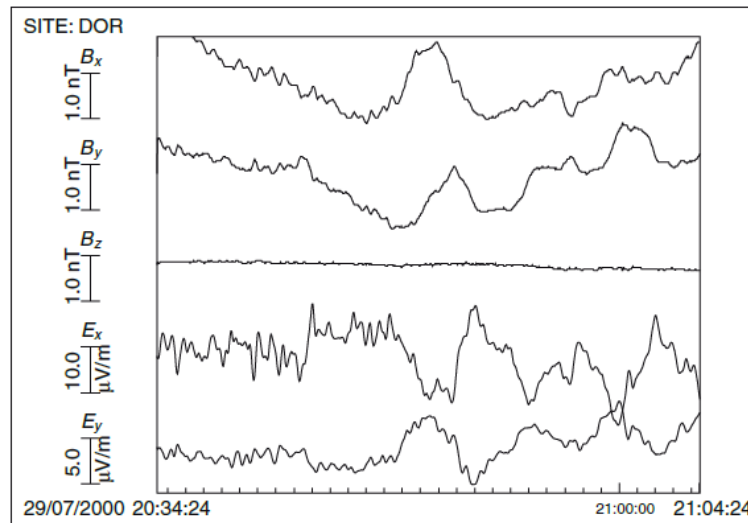
شکل ۲-۵: نمای عمومی سنجنده‌های میدان MT در یک ایستگاه برداشت [Reynolds, 1997]

اندازه‌گیری داده‌های MT به صورت ایستگاه به ایستگاه انجام می‌شود. مؤلفه عمودی میدان الکتریکی تنها برای زیر سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود [Dobrin and Savit, 1988; Reynolds, 1997]. میدان الکتریکی بر حسب میلی ولت بر کیلومتر یا میکرو ولت بر متر و میدان مغناطیسی معمولاً بر حسب

نانوتسلا یا گاما اندازه‌گیری می‌شوند [Zhdanov, 2009]. در شکل ۲-۶ سری‌های زمانی ثبت پنج مؤلفه میدان MT در یک فرکانس مشخص نشان داده شده است.

۲-۱۱- پردازش داده‌های MT

هدف از پردازش داده‌های MT، استخراج مجموعه‌ای از داده‌های خام حاوی نوفه است؛ که پاسخ زمین را نشان می‌دهند و به وسیله آنها می‌توان هدایت الکتریکی ساختارها را توصیف نمود. این توابع شامل امپدانس، تیپر، فاز، جهت و امتداد ساختار، چولگی و غیره می‌باشند [Vozoff, 1991]. در این مرحله، سری‌های زمانی مؤلفه‌های میدان MT اندازه‌گیری شده برای پنج مؤلفه میدان به طیف‌های چگالی توان^۱ در حوزه فرکانس به وسیله تبدیلات فوریه سریع (FFT)^۲ برگردانده شده و توابع مورد نظر محاسبه می‌شوند [Zhdanov, 2009].



شکل ۲-۶: سری‌های زمانی مؤلفه‌های میدان MT اندازه‌گیری شده در بازه زمانی ۳۰ دقیقه [Simpson and Bahr,

2005]

-
- 1- Power density spectrums
 - 2- Fast Fourier Transformations (FFT)

۲-۱۲- تفسیر داده‌های MT

فرآیند تفسیر داده‌های MT شامل تهیه مدل‌های زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های برداشت شده است. مؤلفه‌های تانسور امپدانس MT نشان دهنده اطلاعات برداشت شده می‌باشند. منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری، شکل استاندارد نمایش داده‌های سونداژ MT می‌باشند:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} |Z|^2 \quad (۲-۴۳)$$

در تفسیرهای عملی از دو نوع منحنی‌های مقاومت ویژه ظاهری استفاده می‌شود:

۱- منحنی‌های سونداژ MT حداکثر و حداقل بر پایه مقادیر مؤلفه‌های اصلی تانسور امپدانس MT

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 \quad (۲-۴۴)$$

$$\rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2 \quad (۲-۴۵)$$

ρ_{xy} مقاومت ویژه ظاهری در جهت محور x و ρ_{yx} مقاومت ویژه ظاهری در جهت محور y را

مشخص می‌کنند [Zhdanov, 2009].

۲- منحنی‌های سونداژ MT مؤثر بر اساس امپدانس مؤثر MT [Zhdanov, 2009]:

$$\rho_{ef} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{ef}|^2 \quad (۲-۴۶)$$

فصل سوم:

مخزن مورد مطالعه

۳-۱- مقدمه

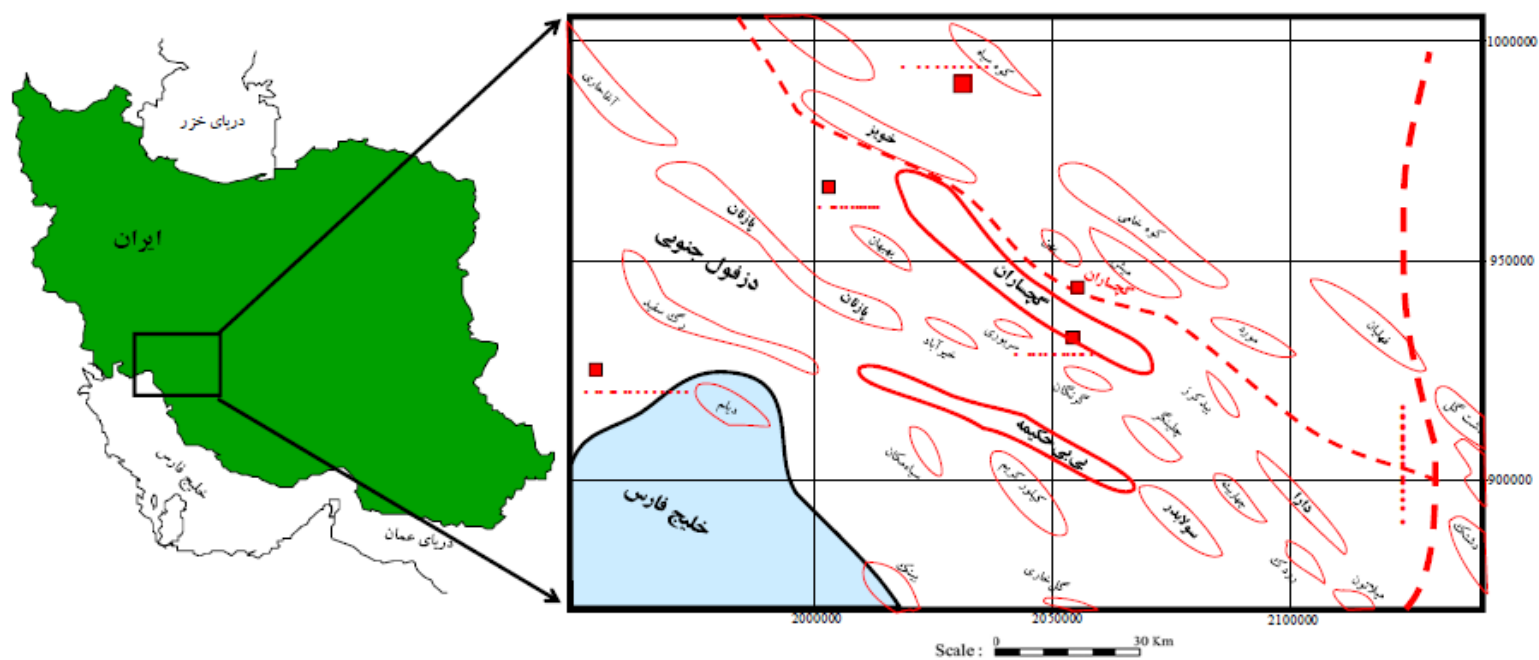
در این فصل به شرح موقعیت جغرافیایی و بررسی زمین‌شناسی و چینه‌شناسی میدان گچساران پرداخته می‌شود. در ادامه عملیات ژئوفیزیک برداشت داده‌های MT مخزن آسماری توضیح داده خواهد شد و در نهایت عوامل کنترل‌کننده تغییرات اشباع‌شدگی در این مخزن بررسی می‌شوند.

۳-۲- میدان گچساران

تشکیل تاکدیس‌های عظیم و نامتقارن زاگرس در نتیجه کوهزایی‌های میوسن-پالئوسن باعث ایجاد دو بالآمدگی شامل زون‌های لرستان و فارس شده است. فروافتادگی دزفول با مساحت ۵۰ هزار کیلومتر مربع در بین این دو زون، قرار گرفته است [Bordenave, 2002]. در ناحیه فروافتادگی دزفول حدود ۴۵ میدان عظیم نفتی وجود دارد. برخی از این میادین از جمله اهواز، آغاچاری، بی‌بی حکیمه، گچساران و مارون جزء میادین خیلی بزرگ با ذخیره نفت درجای بیش از ۵۰-۱۰ میلیون بشکه می‌باشند [Bordenave, 2002].

میدان گچساران یکی از بزرگترین و پیچیده‌ترین میادین کرنااته جنوب غرب ایران است. ویژگی‌های ساختاری از قبیل تنوع شیب ساختمان از ۴ تا ۸۰ درجه در بخش‌های مختلف میدان، وجود گسل‌های متعدد و متنوع، تأثیر بالآمدگی قدیمی خارک-میش در دماغه شرقی آن و فرسایش یا عدم رسوب‌گذاری بخش عمده‌ای از مخزن بنگستان، میدان گچساران را به ساختمانی ویژه مبدل کرده است.

میدان گچساران در بخش جنوبی فروافتادگی دزفول و در ۵ کیلومتری جنوب غربی شهرستان گچساران و ۲۰۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اهواز قرار دارد. این میدان در سازندهای آسماری، بنگستان و خامی حاوی هیدروکربور است. ساختمان میدان گچساران بر روی افق آسماری، تاکدیدی کشیده و نامتقارن با محور شمال غرب- جنوب شرق به طول ۶۳ کیلومتر و عرض ۶ تا ۱۲ کیلومتر است. شکل ۱-۳



شکل ۳-۱: موقعیت قرارگیری میدان گچساران [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

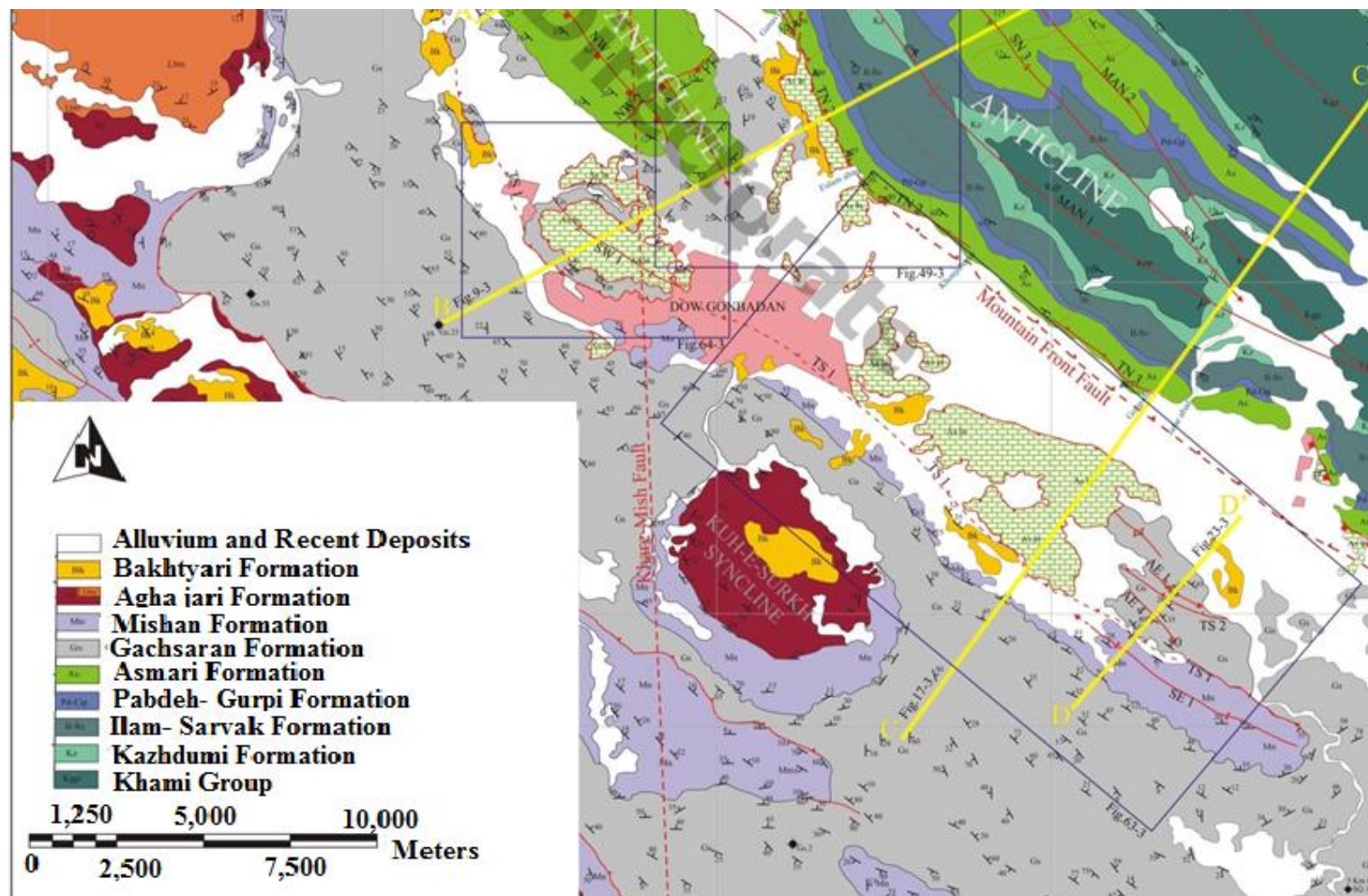
موقعیت قرارگیری میدان گچساران را در فروافتادگی دزفول و در مجاورت سایر میادین نفتی نشان می‌دهد.

۳-۳- زمین‌شناسی میدان گچساران

منطقه مورد مطالعه در زاگرس مرکزی در شمال پهنه فروافتادگی دزفول و جنوب پهنه ایذه قرار دارد. شکل ۲-۳ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این نقشه رخنمون سازندهای گچساران، میشان، آغاچاری و بختیاری مشخص است. سازند گچساران در این ناحیه دارای چین‌خوردگی و راندگی بسیار زیاد است که عموماً به صورت ناهماهنگ بوده و رابطه واضحی بین ساختارها وجود ندارد. بخش‌های دیگر گروه فارس شامل سازندهای میشان و آغاچاری، در این ناحیه باعث ایجاد ناودیس‌های سطحی شده‌اند. سازند بختیاری با سن پلیوستوسن در این ناحیه رخنمون کمی دارد. در این نقشه، دو مقطع عرضی CC' و DD' دیده می‌شوند که به ترتیب منطبق بر پروفیل ۸۸۰۷ برداشت MT و قسمت میانی پروفیل ۸۸۰۸ و عمود بر ساختارهای منطقه می‌باشند [نریمانی، ۱۳۸۸]

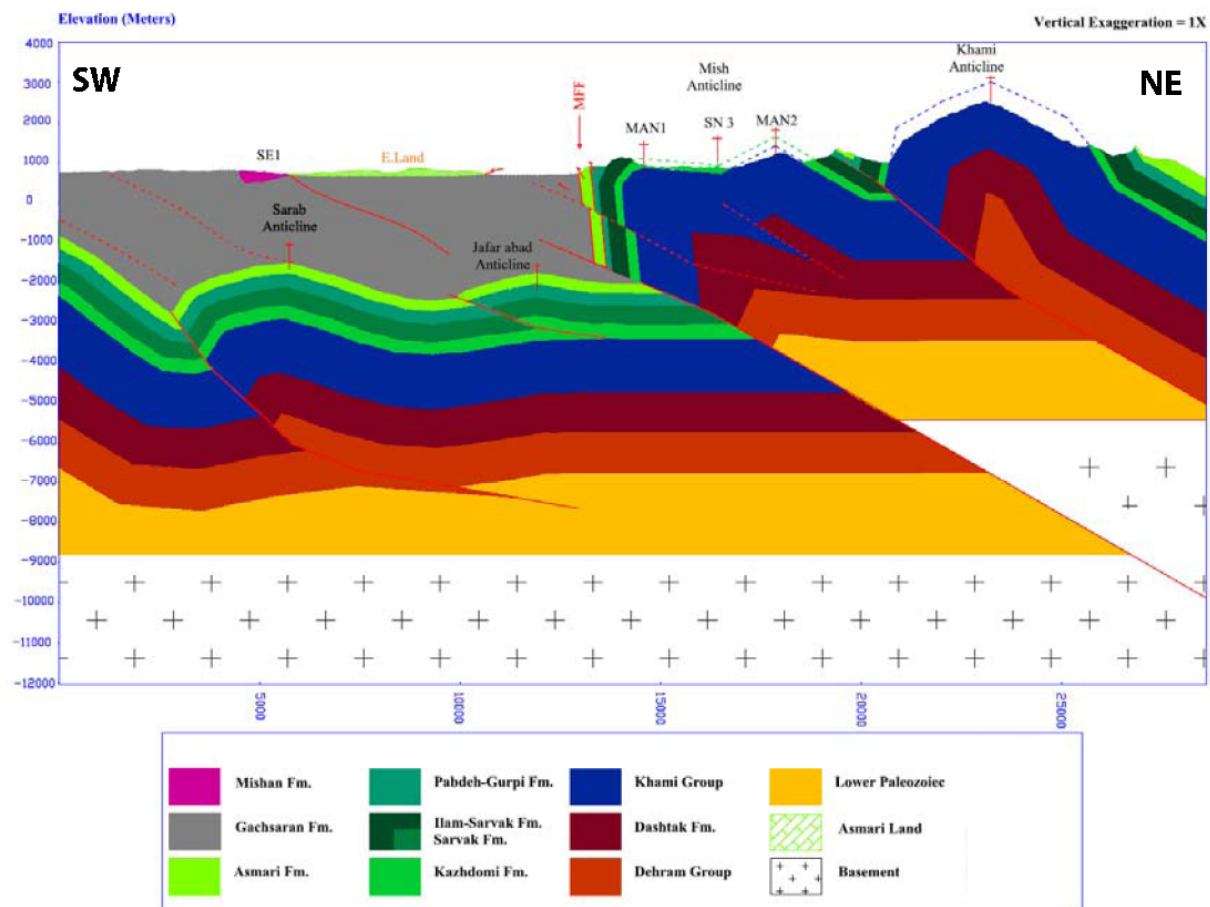
همان‌طور که شکل ۳-۳ نشان می‌دهد، در مقطع عرضی CC' ، تاکدیس‌های خامی و میش، تاکدیس‌های زیرسطحی جعفرآباد و سراب قابل مشاهده هستند [نریمانی، ۱۳۸۸].

مقطع عرضی DD' به صورت مکمل مقطع عرضی CC' ترسیم شده است و بخش فوقانی سازند آسماری یعنی سازندهای گچساران، میشان و بختیاری و ساختارهای در ارتباط با آن‌ها را در بر می‌گیرد. شکل ۳-۴ حضور سازند گچساران با گسترش وسیع در ناحیه و تمرکز چین و راندگی‌های بسیار فراوان در این سازند را نشان می‌دهد [نریمانی، ۱۳۸۸].

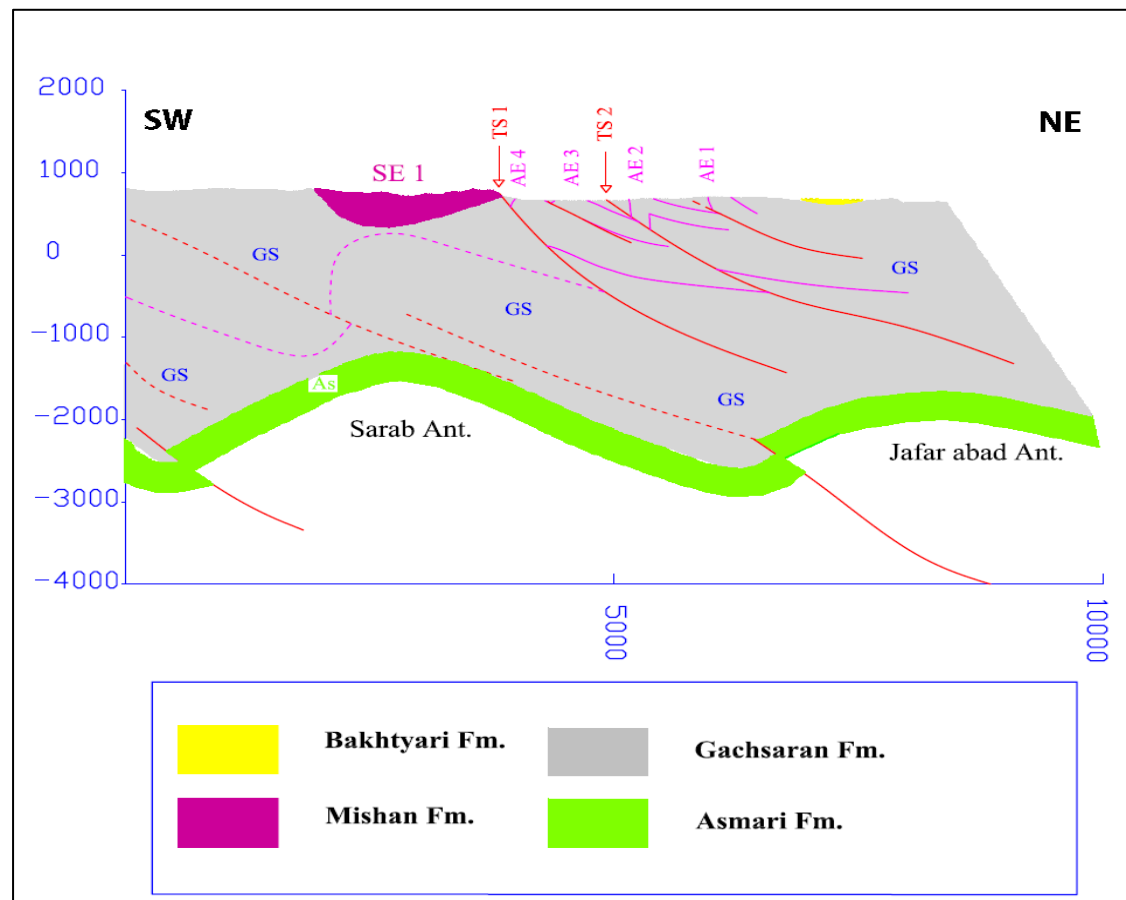


شکل ۳-۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه همراه با موقعیت برش‌های ساختاری CC' و DD' (با خطوط زرد) [نریمانی، ۱۳۸۸]

Section CC'



شکل ۳-۳: برش ساختاری CC' که بر پروفیل ۸۸۰۷ برداشت MT منطبق است. [نریمانی، ۱۳۸۸].



شکل ۳-۴: برش ساختاری DD' که منطبق بر قسمت میانی پروفیل ۸۸۰۸ برداشت MT می باشد [انریمانی، ۱۳۸۸].

۳-۴- چینه‌شناسی میدان گچساران

تغییر ضخامت و رخساره رسوبی در کمربند زاگرس، رخنمون‌های سازندی مختلف را در منطقه به وجود آورده است. تغییرات ضخامت و رخساره در توزیع سنگ‌های منشأ، مخزن و پوش در بخش‌های مختلف تأثیر گذاشته و مناطقی با توزیع هیدروکربن متفاوت را ایجاد کرده است. مطالعات چینه‌شناسی، توزیع رخنمون‌های سازندی از قدیم به جدید را به شرح زیر توصیف می‌کند:

۳-۴-۱- سازند کژدمی

این سازند با شیل‌های خاکستری تیره و گاهی سیاه رنگ و گاهی بیتومین‌دار مشخص می‌شود. حد پائینی آن سازند داریان و حد بالایی آن تناوبی از شیل و آهک‌های بنگستان است [Motiei, 1994].

۳-۴-۲- سازند سروک

این سازند با سنگ‌شناسی آهک خاکستری تیره، آهک توده‌ای قهوه‌ای روشن و آهک‌های ضخیم لایه در مشاهده شده است. حد پائینی این سازند با سازند کژدمی و حد بالایی آن با مارن و شیل‌های سازند گورپی مشخص می‌گردد [Motiei, 1994].

۳-۴-۳- سازند ایلام

این سازند شامل آهک‌های رسی ریزدانه خاکستری روشن تا تیره با میان لایه‌های نازک شیلی است. حد پائینی این سازند با سازند سورگاه و حد بالایی آن با سازند گورپی مشخص شده است [Motiei, 1994]. در ناحیه گچساران این سازند به همراه سازند سروک مشاهده می‌شود که شامل آهک‌های نازک لایه کرم رنگ با میان لایه‌های شیلی است.

۳-۴-۴- سازند گورپی

سازند گورپی با مارن و شیل‌های خاکستری مایل به آبی و میان لایه‌های نازک آهک رسی مشاهده می‌شود. سازند گورپی به روی سازند ایلام قرار دارد و به سازند پابده ختم می‌شود [Motiei, 1994].

۳-۴-۵- سازند پابده

این سازند شامل شیل و مارن‌های آبی با میان لایه‌هایی از آهک نازک لایه رسی است. حد پائینی آن سازند گورپی و حد بالایی آن سازند آسماری است [Motiei, 1994].

۳-۴-۶- سازند آسماری

سازند آهکی آسماری یکی از مهم‌ترین مخازن نفتی در داخل فروافتادگی دزفول در ناحیه زاگرس می‌باشد. این سازند به طور عمده دربرگیرنده سنگ‌های آهکی و دولومیت است و نهشته‌های مارن، شیل، ماسه سنگ و تبخیری نیز در بخش‌هایی از آن دیده می‌شود. به طوری که در جنوب غربی لرستان و میداین نفتی شمال فروافتادگی دزفول دربردارنده نهشته های تبخیری (بخش کلهر) و در جنوب فروافتادگی دزفول دارای نهشته های ماسه سنگ (بخش اهواز) است [مطیعی، ۱۳۷۴].

۳-۴-۷- سازند گچساران

این سازند با ضخامت زیاد بیشترین گسترش را در ناحیه دارد. سازند گچساران با هفت بخش شناسایی شده است و شامل تناوبی از نمک، انیدرید، مارن خاکستری و قرمز و باندهای نازک آهکی می‌باشد [Motiei, 1994].

۳-۴-۸- سازند میشان

این سازند شامل مارن خاکستری و آهک‌های فسیل‌دار زرد تا کرم‌رنگ است. حد پائینی این سازند به سازند گچساران و حد بالایی آن به سازند آغاچاری ختم می‌شود [Motiei, 1994].

۳-۴-۹- سازند آغاچاری

این سازند شامل ماسه‌سنگ آهکی قهوه‌ای و مارن و ماسه‌سنگ قرمز رنگ است. حد پائینی این سازند به سازند میشان و حد بالایی آن به سازند کنگلومرای بختیاری ختم می‌شود [Motiei, 1994].

۳-۴-۱۰- سازند بختیاری

این سازند شامل کنگلومرا و ماسه‌سنگ‌های چرتی است. این سازند در ناحیه مورد مطالعه به صورت تقریباً هم‌شیب به روی سازند گچساران قرار دارد [نریمانی، ۱۳۸۸].

۳-۵- مطالعات ژئوفیزیک منطقه مورد مطالعه

سازند گچساران از سنگ‌های تبخیری فشرده تشکیل شده و سرعت بالای انتشار امواج لرزه‌ای در این نوع سنگ‌ها باعث تضعیف انرژی این امواج شده و در نتیجه اطلاعات حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری در این منطقه، بسیار ضعیف و غیر قابل استفاده است.

ماهیت کربناته سازند آسماری که حاوی آهک و دولومیت است، باعث شده که به لحاظ مقاومت ویژه الکتریکی دارای مقادیر به مراتب بالاتری نسبت به رو لایه گچساران باشد. همین امر نشان می‌دهد که روش MT می‌تواند با مشخص کردن نحوه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی، راه حل مناسبی جهت بررسی وضعیت ساختمانی این ناحیه باشد [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

جهت به نقشه درآوردن ساختمان زیرسطحی سراب در استان کهگیلویه و بویر احمد، یک پروژه عظیم MT به روش 'EMAP' از استان خوزستان شروع و به استان فارس ختم شده است. داده‌های MT، توسط پیمانکاران چینی در سال ۱۳۹۰ در طول پروفیل‌های متعدد با فاصله عرضی ۳ کیلومتر برداشت شده است. فاصله دو ایستگاه متوالی روی خطوط برداشت، ۲۰۰ متر است. برداشت در هر ایستگاه به صورت پنج مؤلفه‌ای (E_x , E_y , H_x , H_y , H_z) می‌باشد. ایستگاه‌های TEM نیز با فاصله ۴۰۰ متر از یکدیگر و به صورت یک‌درمیان در فاصله بین ایستگاه‌های MT برداشت شده‌اند، که این داده‌ها جهت بررسی ناهمگنی‌های سطحی و تصحیح جابجایی ایستای داده‌های MT مورد استفاده قرار می‌گیرند. جهت تأیید، تست و تطبیق خطوط عرضی، تعدادی پروفیل امتدادی نیز طراحی شده‌اند. موقیت پروفیل‌های MT و خطوط لرزه‌نگاری

1- Electromagnetic Array Profiling

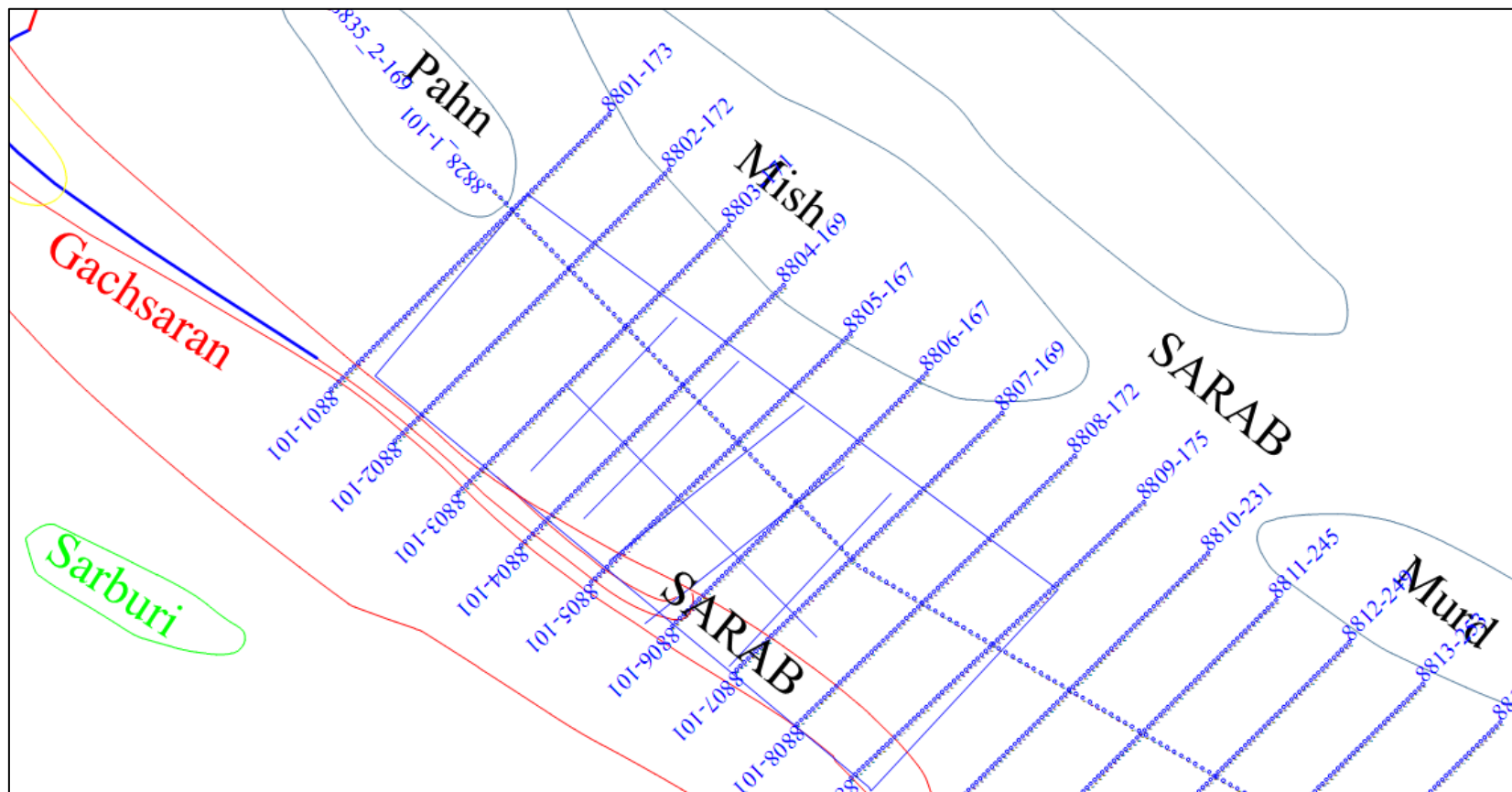
دو بعدی در این منطقه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

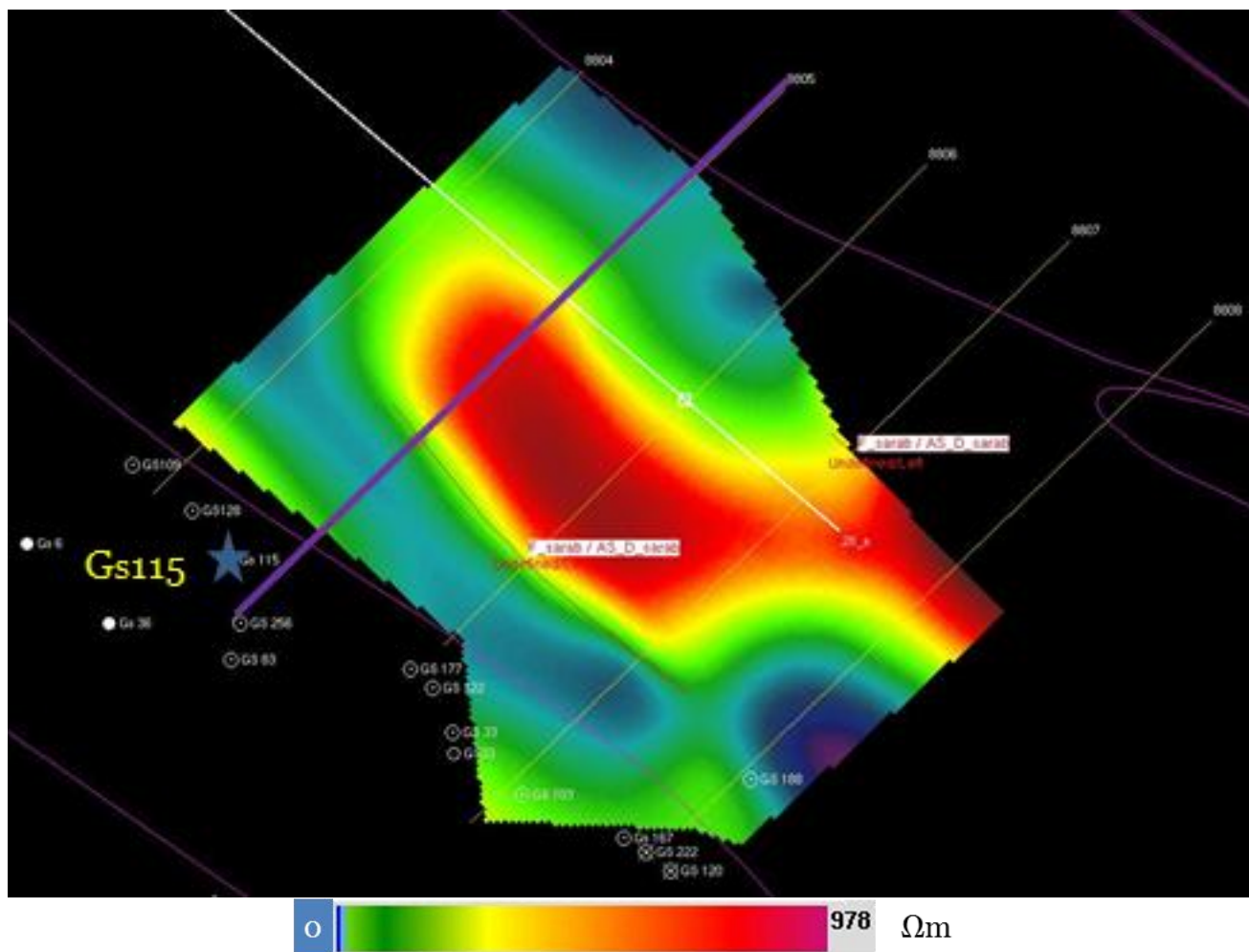
از آنجا که هدف کلی این رساله بررسی مدل فیزیک سنگی است که ارتباط بین مقادیر اشباع‌شدگی و مقاومت ویژه الکتریکی را در مخزن هیدروکربوری بیان نماید و در این راستا بتوان اشباع‌شدگی هیدروکربور را با استفاده از داده‌های MT تخمین زد، مخزن هیدروکربوری آسماری واقع در میدان نفتی گچساران برای مطالعات بیشتر انتخاب شده است. جهت دستیابی به اهداف این رساله و تخمین اشباع‌شدگی با استفاده از داده‌های MT به پیشنهاد مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران از مجموعه داده‌های MT برداشت شده در پروژه اکتشافی سراب، پروفیل ۸۸۰۵ که به صورت داده‌های پردازش‌شده (EDI^۱) هستند و در بازه فرکانسی ۰/۰۰۰۶ Hz تا ۳۲۰ Hz برداشت شده‌اند و اطلاعات چاه اکتشافی شماره ۱۱۵ که در مجاورت این پروفیل قرار دارد و چاه اکتشافی A با موقعیت نامشخص استفاده شده است. شکل ۳-۶ موقعیت پروفیل ۸۸۰۵ برداشت MT و چاه اکتشافی شماره ۱۱۵ را نشان می‌دهد.

۳-۶- مخزن آسماری

مخزن آسماری میدان گچساران که دارای نفت است، در سال ۱۳۰۷ کشف شد. بستگی ساختمانی این مخزن با توجه به آخرین کنطور بسته، ۲۴۰۰- و بلندترین نقطه ستیغ حدود ۲۴۳۱ متر محاسبه شده است. متوسط ضخامت مخزن مورد مطالعه ۵۲۰ متر است که از طرف شمال غرب به سمت جنوب شرق روندی کاهشی دارد و حداقل به ۲۸۰ متر می‌رسد [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

¹ - Electrical data interchange





شکل ۳-۶: موقعیت چاه شماره ۱۱۵ نسبت به خط ۸۸۰۵ برداشت MT [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱]

این مخزن در سازند آسماری به عنوان کم عمق ترین افق تولید نفت در جنوب غربی ایران واقع شده و با سازند گچساران پوشیده شده است. در مخزن آسماری، ماسه سنگ حضوری بسیار ضعیف و قابل اغماض دارد و شیل که معمولاً به صورت لایه های نازک در بخش بالایی و بخش انتهایی مخزن وجود دارد، غالباً گسترش چندانی نداشته و فاقد تداوم لایه ها در مخزن می باشد. مقدار درصد تخلخل در بخش پایینی سنگ های کربناته نسبت به بخش بالایی این سنگ ها کمتر است و به عبارت دیگر بخش زیرین سنگ های کربناته متراکم تر است [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

بر مبنای تغییرات سنگ شناسی و خواص سنگ مخزن، نظیر تخلخل و وجود هیدروکربور، مخزن آسماری به ۱۱ زون (زون های A1, A2, B1, B2, B3, B4, B5, C1, C2, D1 و D2) تقسیم بندی شده است. این زون ها از غرب به شرق میدان دارای تغییرات کمی و کیفی می باشند [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

ستون هیدروکربور در چاه اکتشافی A شامل زون های A1, A2 و B1 می باشد که در زیر مشخصات هر کدام از این زون ها بیان شده است:

زون A1 که عمدتاً از دولومیت و سنگ آهک های دولومیتی تشکیل شده است در فاصله عمقی ۲۷۲۹-۲۷۷۳ متری قرار گرفته است. میانگین ضخامت آن در کل میدان ۴۵ متر است. میانگین تخلخل و اشباع شدگی آب در این زون به ترتیب ۸ و ۵۷ درصد می باشد.

زون A2، از سنگ آهک های نسبتاً متراکم و دولومیت های همراه با درصد کم انیدریت و شیل تشکیل شده است. این زون در فاصله عمقی ۲۷۷۳-۲۸۱۸ متری با میانگین ضخامت ۴۷ متر قرار گرفته است. میانگین تخلخل و اشباع شدگی آب در این زون به ترتیب ۴/۴ و ۷۳ درصد می باشد. جنس غالب سنگ و ویژگی های پتروفیزیکی این زون، بیانگر پتانسیل کمتر این زون نسبت به زون A1 می باشد.

زون B1، مانند سایر زون‌های مخزن که روند کاهش ضخامت از غرب به سمت شرق میدان دارد با میانگین ضخامت ۲۰ متر یکی از لایه‌های کم ضخامت می‌باشد. این زون از فاصله عمقی ۲۸۱۸ تا ۲۸۳۷ متری قرار گرفته است. میانگین تخلخل این زون ۵/۶ و میانگین اشباع آب آن ۷۲ درصد می‌باشد. سنگ آهک با درصد کم شیل لیتولوژی غالب این زون می‌باشد. این زون به دلیل ضخامت کم، لیتولوژی و حجم کم سنگ‌های مفید پتانسیل هیدروکربوری ضعیف دارد [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

۳-۷- بررسی عوامل کنترل کننده تغییرات اشباع‌شدگی در چاه A

اشباع‌شدگی هیدروکربور که مقاومت ویژه مخازن هیدروکربوری را تحت تأثیر قرار می‌دهد در فواصل کوچک تغییر می‌کند. عوامل کنترل کننده این تغییرات شامل چگالی و ویسکوزیته نفت، کیفیت مخزن و موقعیت مخزن نسبت به زون انتقال^۱ می‌باشند [Vold et al., 2012].

۳-۷-۱- چگالی و ویسکوزیته نفت

ویسکوزیته نفت بسته به نوع، ترکیب، ناحیه و اجزای شیمیایی آن متفاوت است. چگالی نفت به فشار و دمای مخزن بستگی دارد. با افزایش چگالی نفت، مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که نفت‌های با چگالی و ویسکوزیته بالا به دلیل عدم اثرگذاری در جابجایی آب موجب کاهش اشباع‌شدگی هیدروکربور و در نتیجه کاهش مقاومت ویژه می‌شوند [Vold et al., 2012]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد در چاه A، چگالی و ویسکوزیته نفت پایین می‌باشد که موجب افزایش اشباع‌شدگی هیدروکربور می‌شود.

1- Transition zone

۳-۷-۲- کیفیت مخزن

کیفیت یک مخزن هیدروکربوری به ویژگی‌هایی شامل تخلخل، تراوایی، فشار مویینگی و توزیع ابعاد حفرات بستگی دارد [Archie, 1950].

فرآیندهای انحلال، دولومیتی شدن و شکستگی باعث افزایش کیفیت مخزن و سیمانی شدن، تراکم و انیدریتی شدن باعث کاهش کیفیت مخزن می‌شوند. با افزایش تخلخل، توان تولیدی سنگ مخزن افزایش می‌یابد.

ناهمگن بودن محیط ممکن است موانع بیشتری در جهت جریان سیال ایجاد کند در نتیجه تراوایی مخزن کاهش می‌یابد. بررسی‌های کیفی نشان می‌دهند که با کاهش تراوایی مخزن، نسبت به شرایط مشابه و یکسان آب بیشتری در مخزن نگه داشته می‌شود.

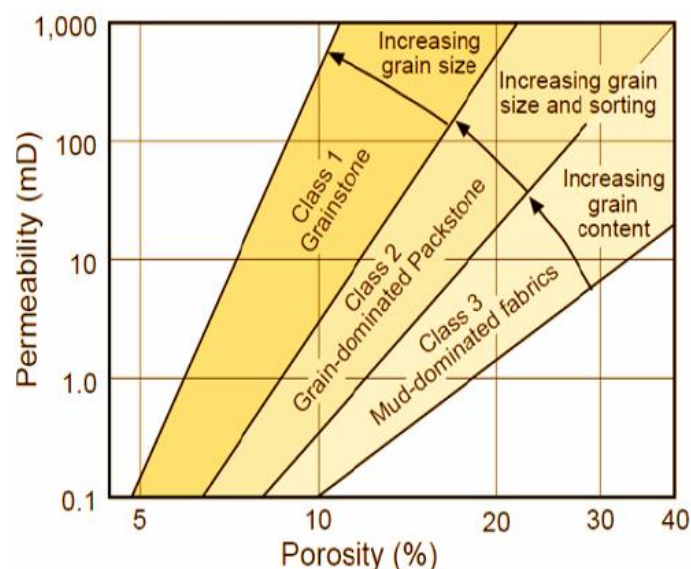
اشباع‌شدگی از سیالات، در مخازن کربناته وابسته به ابعاد حفرات و فشار مویینگی است. با افزایش فشار مویینگی، اشباع‌شدگی از نفت افزایش یافته و مقاومت ویژه افزایش می‌یابد [Lucia, 2007]

به طور کلی، بافت سنگ به واحدهای سنگی گفته می‌شود که در یک شرایط مشابه نهشته شده‌اند و فرآیندهای دیاژنزی مشابهی را تحمل کرده‌اند. در مخازن کربناته، بافت سنگ ترکیبی از عوارض دیاژنزی و بافت اولیه سنگ می‌باشد و برآیند اثرات ریز رخساره، محیط رسوبی، دیاژنز و خصوصیات مخزنی در بافت سنگ منعکس می‌شود. بافت‌های سنگی بر اساس ترکیب کانی شناسی، بافت و اندازه ذرات سنگ‌ها تقسیم بندی می‌شوند. توزیع اندازه فضاهای خالی رابط بین خصوصیات مخزنی می‌باشد. با کاهش اندازه دانه‌ها و جورشدگی، اندازه فضاهای خالی کاهش می‌یابد. با رسوب سیمان در فضاهای خالی و ایجاد آرایش نزدیک‌تر دانه‌ها در نتیجه تراکم، اندازه فضاهای بین دانه‌ای به طور منظم کاهش می‌یابد [Lucia, 2007].

جنینگز و لوسیا^۱ (۲۰۰۳) از طریق تقسیم‌بندی نمونه‌های کربناته به سه گروه بافت سنگی، سه کلاس را معرفی کردند (شکل ۷-۳):

کلاس یک: شامل گرینستون‌های آهکی و دولومیتی است که دارای تخلخل پایین اما تراوایی بالا هستند.
کلاس دو: شامل پکستون‌های دانه غالب (سنگ آهک و دولومیت ریز و متوسط بلور) که میزان تخلخل و تراوایی در آن‌ها متوسط است.

کلاس سه: شامل سنگ‌های آهکی گل غالب و دولومیت‌های گل غالب ریز بلور می‌باشد که دارای تخلخل بالا ولی تراوایی پایین هستند [Jennings and Lucia, 2003].



شکل ۷-۳: نمودار متقاطع تراوایی - تخلخل و کلاس‌بندی سه گانه [Jennings and Lucia, 2003]

به طور کلی، طبقه‌بندی بافت‌های سنگی در مخازن آسماری نشان داده است که:

- زون A مخزن آسماری در کلاس ۲ و ۳ و در محدوده تراوایی کمتر از ۱۰۰ میلی داریسی قرار می‌گیرد.

- زون B در کلاس ۲ (پکستون دانه غالب) با محدوده تراوایی ۲۰ تا ۱۰۰ میلی داری و کلاس ۱ (گرینستون آهکی و دولومیتی) با محدوده تراوایی بیش از ۱۰۰ میلی داری قرار می‌گیرد [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

نتایج طبقه‌بندی دانه‌ها [Dunham, 1962] نشان می‌دهد که بافت مغزه‌ها در ستون نفت در چاه A از بالا به پایین به ترتیب از وکستون تا پکستون و گرینستون متغیر است [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

۳-۷-۳- موقعیت مخزن نسبت به زون انتقال

زون انتقال، بخش یا مقطعی از مخزن است که در آن با افزایش ارتفاع (کاهش عمق)، اشباع‌شدگی آب کاهش و اشباع‌شدگی هیدروکربور افزایش می‌یابد. در مخازن با گستردگی سطحی زیاد و توپوگرافی ملایم سطح مخزن، زون انتقالی بخش بیشتری از ارتفاع ستون ساختاری مخزن را اشغال می‌نماید و تأثیر عمده‌ای بر حجم هیدروکربور مخزن و مقاومت ویژه آن دارد [Harrison and Jing, 2001; Vold et al., 2012]. بررسی‌های انجام شده توسط بخش مخزن مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در چاه مورد مطالعه نشان می‌دهند که موقعیت مقطع مخزن دقیقاً بالای زون انتقال اشباع قرار دارد که موجب افزایش اشباع‌شدگی از هیدروکربور و افزایش مقاومت ویژه می‌شود.

پس از تعیین عوامل زمین‌شناسی و پتروفیزیکی کنترل‌کننده توزیع مقاومت ویژه الکتریکی، یک مدل فیزیک سنگ مناسب می‌تواند ارتباط بین مقاومت ویژه الکتریکی برداشت شده را با پارامترهای کنترل‌کننده آن برقرار نماید.

فصل چہارم:

مدل فیزیک سنگ

۴-۱- مقدمه

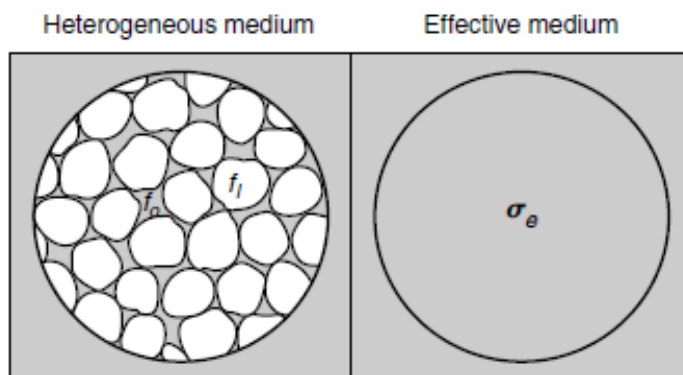
روابط توسعه یافته فیزیک سنگ، به عنوان روشی مناسب برای دسترسی به رفتار الکتریکی سنگ‌ها شناخته شده‌اند. اولین مرحله از شناخت رفتار الکتریکی سنگ‌ها، تعیین مدل فیزیک سنگ است. در این فصل ابتدا مدل فیزیک سنگ جهت ایجاد ارتباط بین پارامتر مقاومت ویژه الکتریکی و خصوصیات مخزنی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. پس از انتخاب مدل فیزیک سنگ مناسب، پارامترهای این مدل با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند. در ادامه به منظور تعیین دقیق مقادیر اشباع‌شدگی از آب، مدل فیزیک سنگ اصلاح شده آرچی، برای مخزن مورد مطالعه معرفی می‌شود.

۴-۲- مدل فیزیک سنگ الکتریکی

در بررسی سنگ‌ها، برقراری رابطه‌ای بین ویژگی‌های آن‌ها و عوامل درونی و بیرونی تعیین کننده این ویژگی‌ها امری مهم می‌باشد. عوامل درونی به ماهیت سنگ و ترکیب آن بستگی دارند. عوامل بیرونی، آثار حاصل از محیط سنگ نظیر وجود میدان‌های مختلف را شامل می‌شوند [ارژفسکی و نوویک، ۱۳۷۱]. فیزیک سنگ به عنوان روشی جدید در کنار روش‌های دیگر در مطالعات نفت و گاز به کار گرفته شده است. فیزیک سنگ بدون انجام آزمایش بر روی مغزه‌ها و با استفاده از روابط ریاضی به خصوصیات مخزنی دست پیدا می‌کند. متخصصین فیزیک سنگ با تعیین مدل‌های فیزیک سنگ برای انواع مخازن هیدروکربوری به پیش‌بینی خصوصیات مخزن و وضعیت آن پرداخته و شرایط سازندها را در حفاری پیش‌بینی می‌نمایند.

مهم‌ترین مسئله در ارائه مدل فیزیک سنگ الکتریکی این است که این رابطه کمی بتواند هدایت یا رسانندگی الکتریکی کلی یک سنگ متشکل از کانی‌های رسانا و خمیره را محاسبه نماید. در این راستا تئوری محیط مؤثر راه حل مناسبی را ارائه می‌دهد [Zhdanov, 2009].

شکل ۴-۱ نشان می‌دهد که می‌توان یک سنگ ناهمگن را به صورت یک مدل که ترکیبی است از محیط میزبان همگن با حجم V و تانسور مختلط رسانندگی الکتریکی $\sigma_0(r)$ که با دانه‌های با شکل‌های نامنظم و رسانندگی الکتریکی متفاوت پر شده است، در نظر گرفت [Zhdanov, 2009].



شکل ۴-۱: یک مدل شماتیک ناهمگن چند فاز از سنگ مخزن (چپ) و مدل محیط مؤثر مربوط به آن (راست) را نشان می‌دهد [Zhdanov, 2009].

سنگ از مجموعه‌ای از N نوع مختلف ذره تشکیل شده است و L -مین نوع ذره هدایت الکتریکی σ_l دارد. ذرات نوع L -م جزء حجمی f_l در محیط داشته و شکل و جهت یافتگی خاص خود را دارند. بنابراین تانسور هدایت الکتریکی کل مدل $\sigma(r)$ ، به ترتیب توزیع زیر برای اجزاء حجمی f_l و $f_0 = (1 - \sum_{i=1}^N f_i)$ دارد [Zhdanov, 2009]:

$$\sigma(r) = \begin{cases} \sigma_0 & f_0 = 1 - \sum_{l=1}^N f_l \\ \sigma_l & f_l \end{cases} \quad (1-4)$$

مدل فیزیک سنگ الکتریکی محیط مؤثر، توزیع تانسور هدایت الکتریکی را به ازای تغییرات هر کدام از اجزاء محیط تعیین می‌کند. این مدل، سنگ ناهمگن را به صورت ترکیبی از محیط میزبان همگن که با

ادخال‌هایی^۱ به شکل‌های نامنظم و هدایت الکتریکی متفاوت پر شده است، در نظر می‌گیرد [Zhdanov, 2009]. با در نظر گرفتن نسبت بین سهم میدان الکتریکی هر کدام از ادخال‌ها می‌توان مدل محیط مؤثر را به صورت تغییرات $d\sigma$ در اثر افزایش غلظت df_i هر کدام از ادخال‌ها توسط رابطه (۲-۴) تعریف نمود:

$$d\sigma \cong \sum_{i=2}^N df_i (\sigma_i - \sigma) k_i \quad (2-4)$$

برای توزیع مشخصی از ادخال‌ها، انتگرال‌گیری از رابطه (۲-۴) می‌تواند محیط مؤثر را نشان دهد [Gelius and Wang, 2008].

با فرض اینکه حجم آب شور مخزن ثابت است و ادخال‌های هیدروکربور کروی شکل باشند، رابطه (۲-۴) پس از مرتب‌سازی به صورت رابطه (۳-۴) بیان می‌شود [Wang, 2009]:

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = - \frac{m_m dv_m}{(v_m + v_w + v_{hc} + v_c)} - \frac{3dv_{hc}}{2(v_m + v_w + v_{hc} + v_c)} + \frac{m_c dv_c (\sigma_c - \sigma)}{(v_m + v_w + v_{hc} + v_c)(\sigma_c + (m_c - 1)\sigma)} \quad (3-4)$$

در این رابطه v_m ، v_{hc} ، v_c و v_w به ترتیب حجم ذرات سنگ، هیدروکربور، ادخال‌های رسانا و آب شور می‌باشند. کمیت m_m مربوط به جهت یافتگی ذرات سنگ و کمیت m_c نشان دهنده میزان پراکندگی رس می‌باشد. با انتگرال‌گیری از این رابطه، معادله محیط مؤثر تفاضلی (DEM) حاصل می‌شود [Wang, 2009]:

$$\sigma = \sigma_w (S_w \varphi)^m \left(\frac{\sigma}{\sigma_w} \right)^n \frac{1 + l \frac{\sigma_c}{\sigma_w}}{1 + l \frac{\sigma_c}{\sigma}} \quad (4-4)$$

1- Inclusions

در این رابطه m, l و n پارامترهایی هستند که به میزان تخلخل و درصد حضور شیل و آب بستگی دارند. هدایت آب شور، σ_w ، با دما و شوری آب تغییر می‌کند.

این رابطه، شکل عمومی معادله محیط مؤثر تفاضلی را نشان می‌دهد. در این مدل، پارامترهایی نظیر توزیع ذرات و شکل آن‌ها، جهت‌گیری ذرات، شیلی بودن محیط، شوری، اشباع‌شدگی، دما و فشار در نظر گرفته شده‌اند. این مدل برای درجات مختلف اشباع‌شدگی از سیالات کاربرد دارد [Gelius and Wang, 2008]. مدل محیط مؤثر تفاضلی اغلب برای حالت‌های ۲ یا ۳ فاز به کار می‌رود. در حالت ۲ فاز، محیط مؤثر تفاضلی ترکیبی از ذرات رسانی سنگ و سیال را نشان می‌دهد. در مدل ۳ فاز، ترکیبی از ذرات کروی و نارسای سنگ، سیال و تداخل‌های کروی رس رسانی در نظر گرفته می‌شوند [Lima and Sharma, 1990].

در حالتی که محیط تمیز و عاری از شیل باشد، حالت ساده‌تری از معادله محیط مؤثر تفاضلی حاصل می‌شود. در این حالت، توان اشباع‌شدگی n ، منعکس‌کننده مقدار میانگین فاکتورهای شکل دو فاز رسانی می‌باشد. بنابراین در یک مدل دو فاز که مخلوطی از ذرات سنگ رسانی و سیال است (فاقد شیل) برای درجات مختلف اشباع‌شدگی، این مدل به مدل آرچی با رابطه (۱-۵) تبدیل می‌شود [Gelius and Wang, 2008].

با توجه به معادله آرچی برای تعیین اشباع‌شدگی به پارامترهای مختلفی نیاز می‌باشد. سه پارامتر سیمان‌شدگی (m)، توان اشباع (n) و پیچاپیچی (a)، ضرایب یا پارامترهای آرچی نامیده می‌شوند. رابطه آرچی حساسیت زیادی نسبت به تغییرات این پارامترها دارد به طوری که تغییر اندکی در هر یک از این ضرایب موجب ایجاد خطای قابل ملاحظه در محاسبه اشباع‌شدگی آب می‌شود [Lucia, 2007].

۴-۳- توصیف پارامترهای آرچی

۴-۳-۱- پارامتر سیمان‌شدگی (m)

پارامتر سیمان‌شدگی پارامتر پیچیده‌ای است که به شکل هندسی خلل و فرج بستگی دارد. عواملی چون مقدار تخلخل کل و ثانویه، هندسه فضای متخلخل و چگونگی توزیع تخلخل و حضور رس می‌توانند در تعیین این پارامتر تأثیرگذار باشند [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹].

در مطالعات آزمایشگاهی، از طریق تهیه نمونه‌های مغزه در طول سازند با تخلخل‌های متفاوت کاملاً اشباع از آب و با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازندی (F) در برابر تخلخل ($\log F - \log \phi$) مقدار m از شیب خط حاصل مطابق رابطه (۳-۵) به دست می‌آید [Joseph et al., 1999].

$$\log F = \log a - m \log \phi \quad (۴-۵)$$

روابط تجربی متفاوتی جهت توصیف ارتباط پارامتر پیچیده سیمان‌شدگی با چند پارامتر و در بیشتر موارد تنها با تخلخل در کربنات‌ها و در شرایط مختلف ارائه شده‌اند. جدول ۴-۱ فهرستی از روابط تجربی که جهت توصیف پارامتر سیمان‌شدگی در کربنات‌ها معرفی شده‌اند را ارائه می‌دهد.

آرچی، با توجه به این که مقدار پارامتر سیمان‌شدگی به میزان استحکام و تراکم ماسه‌سنگ بستگی داشت، مقدار این پارامتر را برابر $1/3$ برای ماسه سنگ‌های سست و بدون شیل و برای ماسه سنگ‌های متراکم مقدار $1/8$ تا 2 قرار داد [Archie, 1942]. محدوده تغییرات مقدار پارامتر m به نوع تخلخل و رخساره سنگی در کربنات‌ها بستگی دارد. در یک مطالعه توسط فوک و مان^۱ در سال ۱۹۸۷، با فرض این که در نمونه‌های مغزه، مواد جامد از نوع نارسا باشند، پارامتر a برابر ۱ قرار گرفت و دامنه m بین ۲ تا

1- Focke and Munn

بیش از ۵/۵ به دست آمد [Focke and Munn, 1987]. دوبویز^۱ و همکاران برای سنگ‌های آهکی آلیتی مقدار m را برابر ۱/۳۶ پیش‌بینی کردند [Dubois et al., 2001].

جدول ۴-۱: روابط تجربی ارائه شده توسط محققین مختلف جهت توصیف پارامتر سیمان‌شدگی در کربنات‌ها

منبع	رابطه	کاربرد
[Shlumberger, 2009]	$m = 0.019\phi^{-1} + 1.87$	کربنات‌های با تخلخل کم
[Borai, 1987]	$m = 2.02 - \frac{0.035}{\phi + 0.042}$	سنگ‌های کربناته با تخلخل بین ذره‌ای
[Ragland, 2002]	$m = 2.29 - 0.44\phi_{int}$ $m = e^{\phi_{moldic}} + 0.7$	(ϕ_{int}) و تخلخل قالبی (ϕ_{moldic})
[Rasmus, 1983]	$m = \frac{\log[\phi_s^3 + \phi_s^2(1 - \phi_t) + (\phi_t - \phi_s)]}{\log(\phi_t)}$	سنگ‌های کربناته شکسته
[Nugent et al., 1978]	$m = \frac{(2\log\phi_s)}{(\log\phi_t)}$	کربنات‌های با تخلخل حفره‌ای (ϕ_s) تخلخل صوتی و ϕ_t تخلخل کل
[Lucia, 2007]	$m = 2.14(\frac{\phi_{sv}}{\phi_t}) + 1.76$	سنگ‌های کربناته با تخلخل حفره‌ای (ϕ_{sv}) تخلخل ثانویه و ϕ_t تخلخل کل

۴-۳-۲- توان اشباع (n)

توان اشباع، میزان تقابل و واکنش بین سیال و سطح جامد داخل سیستم فضای متخلخل سنگ را اندازه‌گیری می‌کند [Ransom, 1984]. به همین دلیل عواملی نظیر قابلیت ترشوندگی^۲ یا توزیع سیال، حضور رس و جذب آب در مسیر منافذ توسط آن، کشش سطحی بین آب و نفت و فشار و دما بر تغییرات

1- Dubois

2- Wettability

توان اشباع تأثیر دارند [Sondena et al., 1991; Anderson, 1986; Rasmus, 1986; Mahamood et al., 1991].

در آزمایشگاه، توان اشباع یک نمونه تمیز و خشک به کمک اندازه‌گیری آزمایشگاهی اشباع از آب (S_w) و اندیس مقاومت ویژه الکتریکی ($I_R = \frac{R_t}{R_0} = \frac{I}{S_w^n}$) که در آن R_t مقاومت ویژه واقعی سازند، R_0 مقاومت ویژه سنگ صد در صد اشباع از آب است) و رسم آن روی یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی بر اساس رابطه (۴-۶) به دست می‌آید.

$$\log I_R = \log 1 - n \log S_w \Rightarrow \log I_R = -n \log S_w \quad (۴-۶)$$

مطالعات نشان می‌دهد که محدوده تغییرات توان اشباع بین ۱ تا ۳ می‌باشد. به طوری که برای اشباع از آب کم ($S_w < 30\%$) مقدار آن بین ۱/۵-۲/۵ و برای اشباع از آب بالا ($S_w > 30\%$) مقدار ۲/۵-۴ در نظر گرفته شده است [Wyllie, 1953]. بنابراین حفظ شرایط مخزن برای اندازه‌گیری مقدار واقعی n الزامی است [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹].

۴-۳-۳- پارامتر پیچاپیچی (a)

تأثیر هندسه و پیچاپیچی منافذ بر روی مقاومت ویژه سنگ توسط این پارامتر مشخص می‌شود. فاکتور پیچاپیچی مقدار مستقل و ثابتی ندارد و با پارامترهای زیادی از قبیل تخلخل، هندسه اتصالات منافذ، میزان دانه‌بندی نرم و ریز، میزان فشردگی و فاکتور سازندگی تغییر می‌کند [Attia, 2005].

آرچی مقدار پارامتر پیچاپیچی را در ماسه‌سنگ‌های تمیز فاقد شیل برابر ۰/۶۲ در نظر گرفت [Archie, 1942]. برای سنگ آهک‌های آلیتی مقدار فاکتور پیچاپیچی توسط دوبیز و همکاران برابر ۹/۵ محاسبه گردید [Dubois et al., 2001].

۴-۴- روش‌های تعیین پارامترهای آرچی

تنها راه مطمئن برای اندازه‌گیری پارامترهای آرچی، از طریق اندازه‌گیری آزمایشگاهی است. اگرچه تا به امروز روش‌های زیادی برای تخمین این پارامترها ارائه شده است اما روش دقیق و قابل اعتمادی برای تعیین این پارامترها در همه شرایط وجود ندارد. استفاده از روابط تجربی یکی از قدیمی‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های محاسبه پارامترهای آرچی است که هنوز هم در برخی موارد مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما چون این روابط مربوط به مخزن خاصی می‌باشند، پاسخ حاصل در شرایط سایر مخازن با ابهامات زیادی همراه می‌باشد [Lucia, 2007].

ممکن است که روش‌های آماری توانایی محاسبه تک تک هر کدام از پارامترهای آرچی را با دقت بالایی داشته باشند، ولی به دلیل محاسبه این پارامترها به صورت مجزا، خطای تخمین در محاسبه اشباع‌شدگی از آب که هدف اصلی در به دست آوردن پارامترهای آرچی است؛ مقدار نسبتاً بالایی به دست می‌آید. اغلب این روش‌ها، مبتنی بر روش‌های گرادیان هستند که برای مسائل پیچیده، غیرخطی و دارای عوامل نامشخص و تا حدودی مبهم، مناسب نمی‌باشند. روش‌هایی که به طور معمول برای تعیین پارامترهای آرچی ارائه شده است شامل فرض‌ها و شرایطی (مانند تمیز بودن و غیر شیلی بودن سازندهای مورد مطالعه) هستند که در صورت اقناع آن‌ها، نتایج حاصل صحیح بوده و در غیر این صورت دارای خطای قابل توجهی است و نیاز به تصحیح دارند. همچنین روش‌ها و معادلاتی که از آن‌ها در این رابطه استفاده می‌شود، شامل ضرایب و عباراتی هستند که به نقطه اندازه‌گیری و سنگ‌شناسی آن وابسته است و به طور کلی ناشناخته‌اند و باید با تحلیل نمونه‌های سنگی تعیین شوند [Hamada and Al-Awad, 2001].

سنگ‌های کربناته برخلاف ماسه سنگ‌ها، دارای تنوع زیادی با توجه به نوع بافت و شکل منافذ و نحوه توزیع حفرات هستند و چون ضرایب آرچی نیز تحت تاثیر عوامل لیتولوژیکی به ویژه نوع منافذند، در نتیجه

این ضرایب بایستی برای هر کدام از مخازن کربناته محاسبه شوند. عدم قطعیت در این ضرایب منجر به خطای زیادی در تعیین اشباع سیالات، به ویژه میزان نفت در جا می‌شود.

تغییرات رفتار پارامترهای آرچی به عوامل زیادی بستگی داشته و از روند خاصی پیروی نمی‌کند و در واقع رفتار هر یک از ضرایب و روابط میان آن‌ها یک مسئله پیچیده و مبهم می‌باشد. به دلیل حساسیت رابطه آرچی به تغییرات هر کدام از پارامترها و با توجه به گسترش روز افزون روش‌های هوشمند، لازم است کاربرد و توانایی این روش‌های نوین در تعیین ضرایب آرچی مورد ارزیابی قرار داد و نتایج حاصل از این روش‌ها، با نتایج آزمایشگاهی موجود و روش‌های متداول دیگر مقایسه شود.

در مسائل مهندسی، بهینه‌سازی عبارت است از اکسترمم سازی یک تابع هدف به وسیله یک الگوریتم خاص که تحت قیود محدود کننده جواب‌های مسئله مورد بررسی انجام می‌گیرد. در اکتشافات هیدروکربوری به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی، تأثیر پارامترهای مختلف پتروفیزیکی و عدم قطعیت آن‌ها از یک سو و محدودیت‌های اقتصادی و زمانی از سوی دیگر، استفاده از روش‌های محاسباتی و عددی هوشمند به عنوان ابزاری قدرتمند جهت حل مسائل توصیه می‌شود. به دلیل پیچیدگی‌های زمین‌شناسی و طبیعت غیر خطی این مسائل، الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده باید در انجام محاسبات، توانایی جلوگیری از رسیدن به جواب محلی به جای جواب بهینه مورد نظر را داشته باشد. استفاده از الگوریتم‌های تصادفی^۱ نظیر الگوریتم ژنتیک می‌تواند از رسیدن و توقف الگوریتم در یک مقدار محلی جلوگیری نماید.

الگوریتم ژنتیک که یکی از زیر شاخه‌های الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد، روش بهینه‌سازی است که بر پایه تکامل بیولوژیک و انتخاب بهترین‌ها در طبیعت، به حل مسائل ساده تا پیچیده می‌پردازد [Holland, 1975]. در این روش، الگوریتم با مجموعه‌هایی از جواب‌های تصادفی (کروموزوم‌ها) که به آن‌ها جمعیت تصادفی گفته می‌شود آغاز می‌گردد. از این جواب‌ها برای ساخت جمعیت جدید بعدی استفاده می‌شود به

1- Stochastic algorithms

امید آن که جمعیت‌های جدید بهتر از جمعیت‌های قبل باشند. این فرآیند آن قدر تکرار می‌شود تا شرایط خاتمه برای دستیابی به بهترین راه حل محقق شود [Parker, 1999].

۴-۵- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش ارزشمند برای حل مسائل بهینه‌سازی براساس سیر تکامل تدریجی بیولوژیکی است. در این روش که در سال ۱۹۷۰ توسط جان هلند^۱ معرفی گردید، جمعیتی از افراد برای رسیدن به جواب بهینه در مراحل تکرار مختلف تصحیح می‌شوند. هر فرد آرایه‌ای از متغیرهای مسئله بوده و تابعی از این متغیرها به عنوان تابع هدف برای می‌نیم شدن تعریف می‌شود. جمعیت اولیه با یک تابع تصادفی تولید می‌شود و توابع دیگری فرزندان نسل‌های بعدی را تولید می‌کنند. به طور کلی سه روش عمده برای تولید فرزندان نسل بعدی وجود دارد [Parker, 1999]:

۱- **ترکیب ژنتیکی والدین:** اکثر فرزندان با انتخاب مناسب دو فرد از جامعه و ترکیب ژنتیکی آن‌ها تحت قوانین مشخص، تولید می‌شوند. مجموعه قوانین انتخاب والدین و ترکیب ژنتیکی آن‌ها با توابع تصادفی ویژه‌ای مشخص می‌شود. این توابع تأثیر شگرفی در میزان انتقال ویژگی‌های وراثتی و در نتیجه سرعت همگرایی مسئله دارند.

۲- **فرزندان نمونه:** در هر مرحله از تولید نسل، درصد مشخصی از افراد جامعه که بیشترین تطابق با تابع هدف را دارند، به عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و مستقیماً به مرحله بعد وارد می‌شوند. این کار به همگرایی مسئله کمک می‌کند.

۳- **جهش ژنتیکی:** درصدی از فرزندان با تغییرات تصادفی در کروموزوم‌های یکی از والدین تولید می‌شوند. این مدل از تولید نسل باعث تنوع گونه‌های ژنتیکی شده و امکان جستجوی برخی پاسخ‌های

1- John Holland

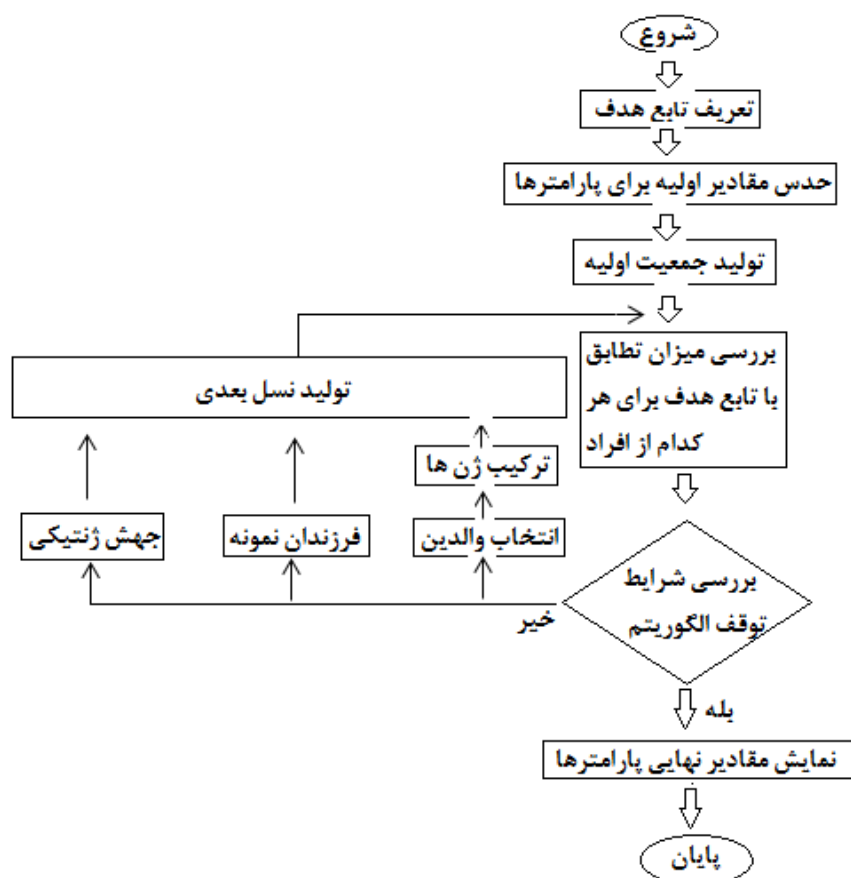
احتمالی مسئله را در طیف وسیع تری فراهم می‌سازد [Mitchell, 1999].

شرایط ویژه‌ای برای توقف این الگوریتم مشخص می‌شود که در مسائل مختلف، متفاوت است. معمولی‌ترین مبنا برای پایان یافتن الگوریتم‌ها، مشخص کردن ماکزیمم تعداد نسل‌هاست. یک استراتژی دیگر، توقف برنامه هنگام رسیدن به مبنای همگرایی جمعیت می‌باشد. یعنی وقتی مجموع انحراف معیارهای اعضا جمعیت پس از طی تعداد مشخصی از مراحل از یک مقدار معلوم کمتر شود، الگوریتم می‌تواند پایان یابد. عدم بهبود انحراف معیار در طی چند نسل نیز یک مبنای دیگر برای پایان دادن به برنامه است. بسته به نوع تابع هدف، هر یک از موارد بالا می‌توانند به عنوان شرط پایان یافتن الگوریتم استفاده شوند.

شکل ۴-۲ خلاصه‌ای از مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد. مطابق این نمودار، الگوریتم ژنتیک حرکت خود را از نسلی به نسل دیگر طی می‌کند. والدین را انتخاب و فرزندان را تولید می‌نماید تا آن که به یک شرط پایان دهنده برسد.

الگوریتم ژنتیک برای حل یک مسئله، مجموعه بزرگی از پاسخ‌های ممکن را تولید می‌کند. هر یک از این پاسخ‌ها با استفاده از یک تابع برازش^۱، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس تعدادی از بهترین پاسخ‌ها باعث تولید و تکامل پاسخ‌های جدید می‌شوند. بدین ترتیب فضای جستجو در جهتی تکامل پیدا می‌کند که به پاسخ مطلوب برسد. مقدار تابع هدف برای هر نسل محاسبه شده و در صورت احقاق یکی از معیارهای توقف الگوریتم، مقدار نهایی تابع هدف تعیین می‌شود [Matlab, 2012].

1- Fitness Function



شکل ۴-۲: چرخه عملکرد الگوریتم ژنتیک [MATLAB, 2012]

۴-۶- تعیین پارامترهای رابطه آرچی در مخزن مورد مطالعه

از آنجا که در مخازن کربناته به دلیل بافت، شکل و نحوه توزیع حفرات برای ضرایب آرچی نمی‌توان مقادیر ثابت در نظر گرفت در اینجا الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه کردن مقدار پارامترهای رابطه آرچی در کل ستون نفت چاه A که در فاصله عمقی ۲۷۲۹ تا ۲۸۳۷ متر قرار دارد، به کار گرفته شد. با استفاده از کد نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB, 2012 (پیوست ۱) تابع برازش با توجه به معادله آرچی، به صورت زیر نوشته شد:

$$\text{Fit} = S_w - \left(\frac{a R_w}{R_t \phi^m} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7-4)$$

تابع هدف یک تابع خطاست که با این ایده تعریف شده است که تابع برازش را به حداقل میزان ممکن برساند. این تابع به صورت مجموع مجذور تفاضل بین اختلاف مقادیر اشباع‌شدگی از آب ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و مقادیر اشباع‌شدگی از آب نمونه برداری شده (SSE)¹ که به صورت جمعیت ورودی به الگوریتم است، تعریف می‌شود. هر چه میزان تابع هدف به صفر نزدیک‌تر باشد نسل ایجاد شده مرغوب‌تر بوده و به جواب مسئله نزدیک‌تر خواهد بود. در این صورت پارامترهای تولید شده، بهترین جواب برای رابطه آرچی خواهند بود. الگوریتم ژنتیک در ابتدا یک جمعیت تصادفی تولید می‌کند. بدیهی است که مقادیر اختصاص داده شده برای افراد به وسیله تعریف حدود معقول برای آن‌ها کنترل می‌شود تا از بازه اصلی خود خیلی دور نشوند.

به طور معمول، اندازه جمعیت در الگوریتم ژنتیک، بیش از ۱۰ برابر تعداد متغیرهای مسئله انتخاب می‌شود. در اینجا این جمعیت برابر ۱۰۰ فرض شده است. جمعیت اولیه نیز با یک توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود. انتخاب والدین نیز به صورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انجام می‌شود. ژن‌های فرزندان از ژن‌های هر یک از والدین به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. در هر مرحله ۵ درصد از افرادی که بیشترین میزان تطابق با تابع هدف را داشته باشند، به عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و مستقیماً به مرحله بعد می‌روند. جهش ژنتیکی نیز بر روی ۳ درصد از افراد و با یک تابع توزیع نرمال استاندارد محقق می‌گردد. برای رسیدن به پاسخ دقیق‌تر، مقدار دامنه تغییرات مجاز در تغییرات تجمعی تابع هدف برابر 10^{-10} انتخاب شده که عدد بسیار کوچکی برای این کمیت می‌باشد. انتخاب این مقدار کوچک برای دامنه تغییرات مجاز، باعث توقف دیرتر الگوریتم و طولانی شدن مراحل اجرای آن شده اما به جواب دقیق‌تری می‌انجامد.

1- Sum of Squares of Errors

بر اساس مطالعات زمین‌شناسی، سنگ مخزن در این چاه از سنگ آهک بدون شکستگی تشکیل شده است. مقادیر R_t ، S_w و ϕ از نگارهای محاسباتی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران در چاه A از مخزن مورد مطالعه در طول ستون نفت در دسترس می‌باشند و به صورت بردارهایی به الگوریتم تعریف شده، معرفی می‌شوند.

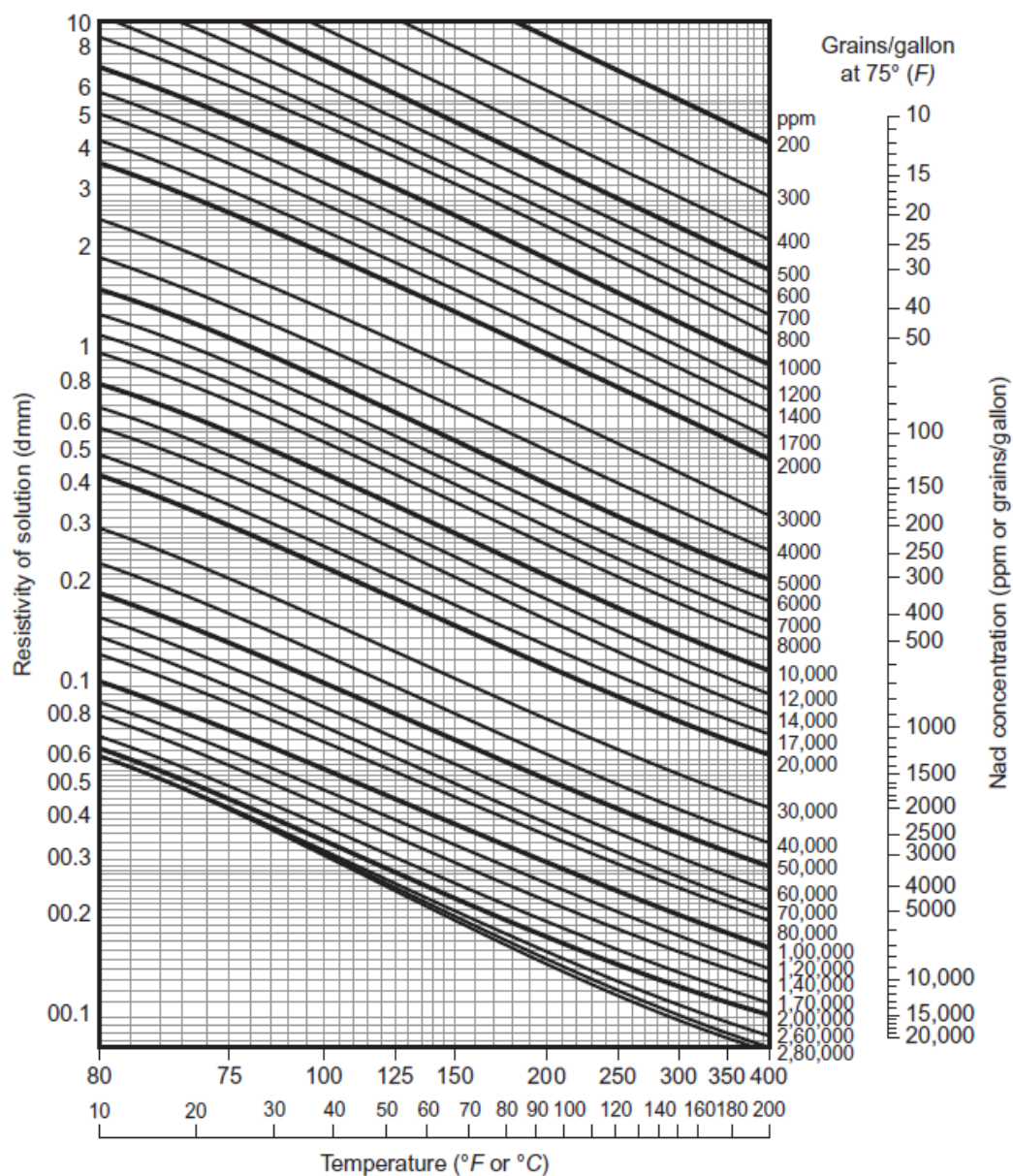
R_w به میزان شوری و دما بستگی دارد. میزان شوری آب و دمای مخزن بر اساس گزارش ارزیابی پتروفیزیکی چاه A به ترتیب برابر با 200000 ppm (معادل ۲۰ درصد) و $155^\circ F$ می‌باشد. با استفاده از نمودارهای تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی شرکت شلومبرژه [Schlumberger, 2009] (شکل ۳-۴) با مشخص کردن نقطه تقاطع شوری آب مغزه در محور عمودی سمت راست و دمای مخزن در محور افقی، روی محور عمودی سمت چپ مقدار مقاومت ویژه الکتریکی آب مخزن محاسبه گردید.

پس از تعیین برازش تمام افراد، عملگرهای انتخاب، ادغام و جهش انجام گرفته و ساختار جدید ایجاد می‌شود. با تکرار این مراحل، پاسخ بهینه به دست می‌آید. به طور کلی الگوریتم ژنتیک دارای ماهیت تصادفی است. اغلب مراحل این روش مانند تولید جمعیت اولیه، انتخاب والدین، تولید فرزندان و... بر اساس توابع تصادفی هستند. در اینجا برای رسیدن به جواب دقیق‌تر، این الگوریتم سه بار اجرا شده و پارامترهای آرچی حاصل شده اند. جدول ۲-۴ پارامترهای بدست آمده در هر بار اجرا را نشان می‌دهد. مقدار خطا (SSE)، نشان دهنده بهترین مقدار تابع برازش است که از رابطه (۸-۴) حاصل می‌شود:

$$SSE = \sum_{i=1}^n (x_{real(i)} - x_{calculated(i)})^2 \quad (8-4)$$

$x_{calculated(i)}$ و $x_{real(i)}$ به ترتیب i-مین مقدار اندازه‌گیری شده و محاسبه شده توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشند.

Conversion approximated by $R_2 = R_1 [(T_1 + 6.77)/(T_2 + 6.77)]^+$
 for $R_2 = R_1 [(T_1 + 21.5)/(T_2 + 21.5)]^+$

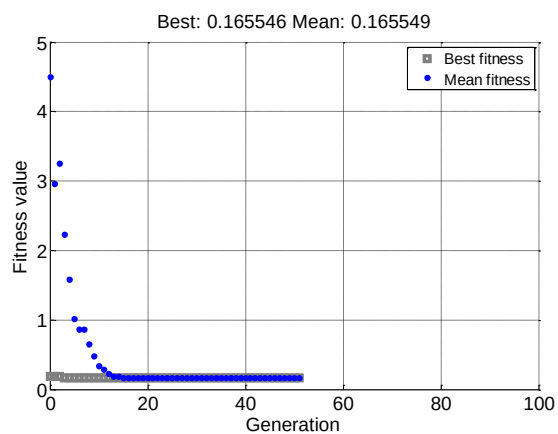


شکل ۴-۳: نمودار تعیین مقاومت ویژه آب بر اساس میزان شوری آن و دمای مخزن [Schlumberger, 2009]

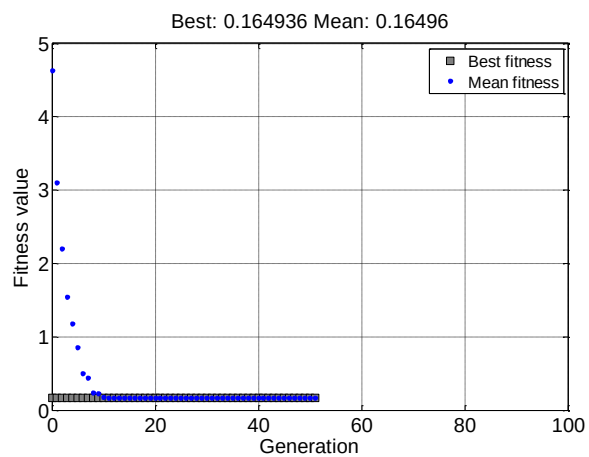
بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده در گزارش ارزیابی پتروفیزیکی چاه A در مخزن مورد مطالعه، مقادیر واقعی مربوط به پارامتر m بین ۱/۶ تا ۲/۴۶ و پارامتر n بین ۱/۶ تا ۲/۶ تغییر می‌کنند. مقدار خطا، نشان دهنده اختلاف مقدار اشباع‌شدگی از آب محاسبه شده با استفاده از مقادیر پارامترهای آرچی تخمین زده شده توسط الگوریتم ژنتیک، با اشباع‌شدگی از آب واقعی مخزن است.

جدول ۴-۲: پارامترهای آرچی در سه بار اجرای الگوریتم ژنتیک			
پارامترهای آرچی	I	II	III
m	۲/۷۸۵	۲/۵۸۲	۲/۳۵۴
n	۲/۶۲	۲/۴۴۹	۲/۲۵۷
a	۰/۹۹۱	۰/۹۴۹	۰/۹۰۲
خطا	۰/۱۶۵۵	۰/۱۶۴۹	۰/۱۶۴۱

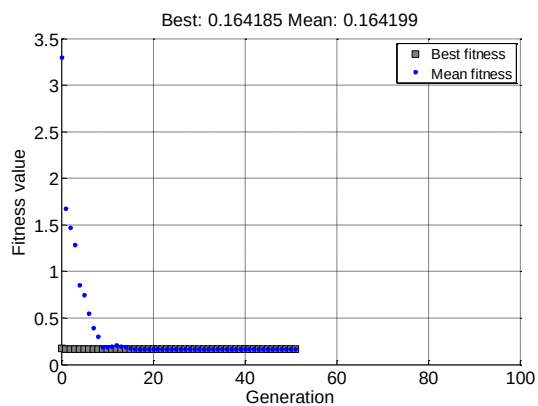
شکل‌های ۴-۴ الف، ب و ج سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل به ترتیب برای اولین، دومین و سومین مرتبه اجرای الگوریتم و مجموعه پاسخ‌های حاصل از آن‌ها نشان می‌دهند. همان‌طور که نمودارهای سیر تکاملی تابع برازش نشان می‌دهند، بهترین مقدار تابع برازش در اولین مرتبه اجرا برابر ۰/۱۶۵۵، در دومین مرتبه اجرای همان الگوریتم برابر ۰/۱۶۴۹ و در سومین مرتبه اجرای الگوریتم مذکور برابر ۰/۱۶۴۱ است. با در دست داشتن مقادیر بهینه برای پارامترهای آرچی، می‌توان مقدار اشباع‌شدگی از آب را در طول ستون هیدروکربور چاه A محاسبه نمود. مقدار خطای الگوریتم ژنتیک در سه مرتبه اجرای این الگوریتم روی داده‌های ورودی، از ۰/۱۶۵۵ در اولین مرتبه‌ی اجرا به مقدار ۰/۱۶۴۱ در سومین مرتبه‌ی اجرا کاهش یافته است.



الف



ب

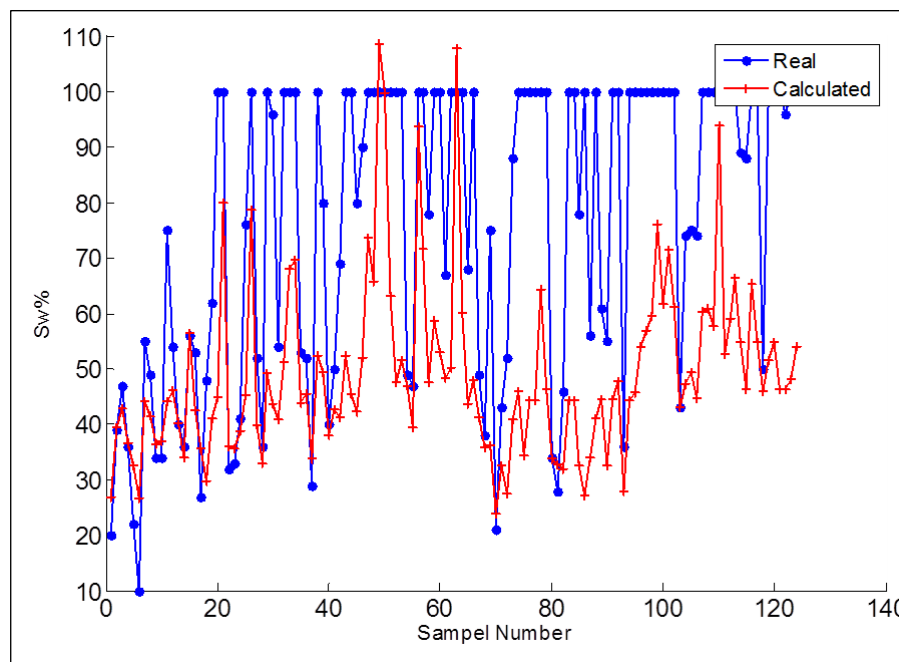


ج

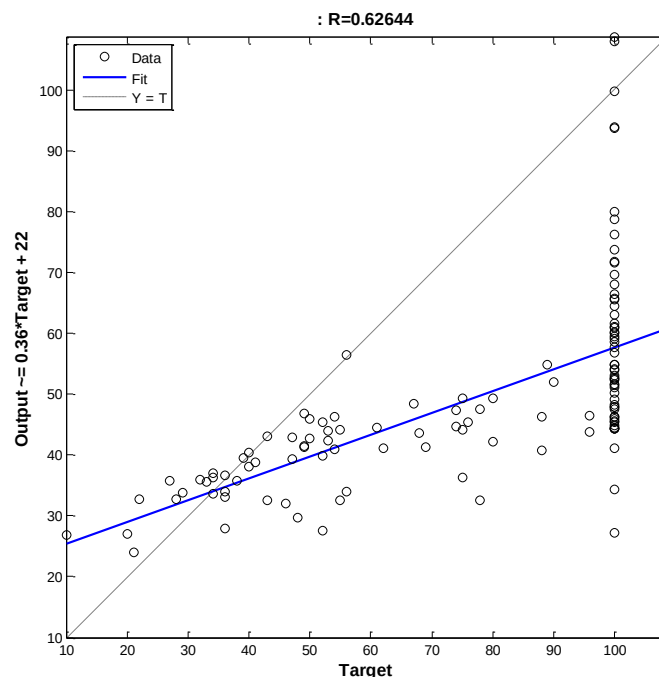
شکل ۴-۴: الف- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه اول پاسخ‌ها، ب- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه دوم پاسخ، ج- سیر تکاملی تابع برازندگی در فرآیند تولید نسل در مجموعه سوم پاسخ.

همان‌طور که در نمودارهای سیر تکاملی تابع برازندگی در شکل ۴-۴ مشخص است، در نسل‌های ابتدایی به علت دور بودن از جواب بهینه، روند کاهش مقدار خطا بسیار سریع‌تر است. حال آنکه در نسل‌های انتهایی به سبب نزدیک شدن به جواب بهینه، روند کاهش خطا کندتر می‌شود.

شکل ۴-۵ مقادیر اشباع‌شدگی از آب حاصل از تخمین پارامترهای آرچی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقایسه با مقادیر اشباع‌شدگی از آب حاصل از اطلاعات نگار اشباع‌شدگی در چاه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. شکل ۴-۶ میزان همبستگی این دو سری داده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب حاصل از تخمین پارامترهای آرچی با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مقایسه با مقادیر اشباع‌شدگی از آب حاصل از اطلاعات نگار اشباع‌شدگی در چاه مورد مطالعه برابر ۰/۶۲ است.



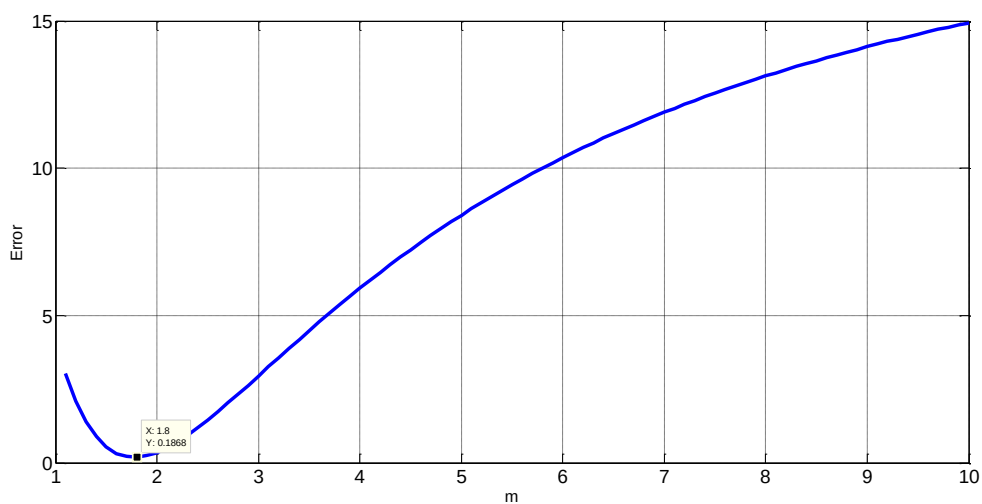
شکل ۴-۵: نمودار مقایسه اشباع‌شدگی آب حاصل از لاگ چاه‌پیمایی و اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده در چاه مورد مطالعه



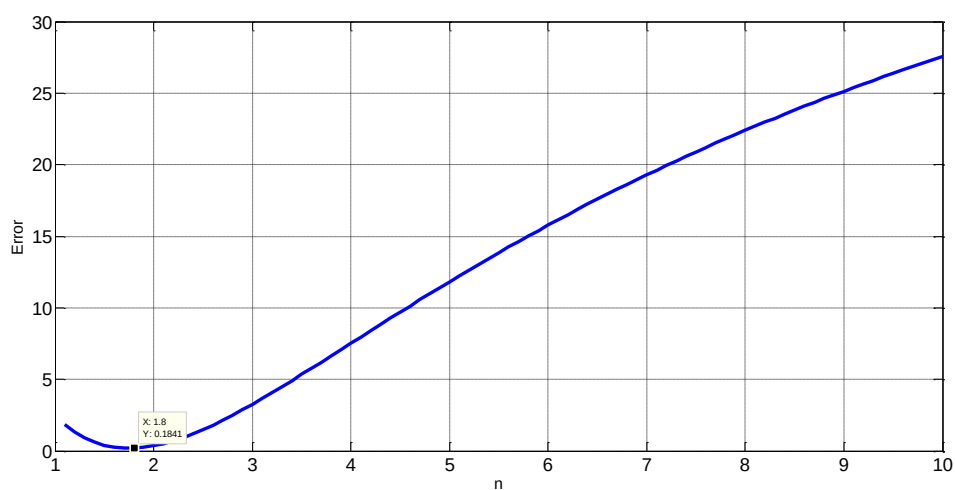
شکل ۴-۶: نمودار متقاطع اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده نسبت به اشباع‌شدگی حاصل از لاگ چاه‌پیمایی در چاه مورد مطالعه

شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ به ترتیب میزان حساسیت اشباع‌شدگی از آب را به تغییرات پارامترهای m و n نشان می‌دهند. با ترسیم مقادیر خطا در محاسبه اشباع‌شدگی از آب در مقابل مقادیر پارامترهای m و n مشاهده می‌شود که با تغییر مقدار ضرایب سیمان‌شدگی و توان اشباع، مقدار اشباع‌شدگی از آب به دست آمده با مقدار واقعی فاصله زیادی گرفته و موجب افزایش خطا می‌شود. با افزایش مقدار ضریب سیمان‌شدگی و توان اشباع، مقدار خطا در محاسبه اشباع آب به سرعت افزایش می‌یابد. بنابراین باید در تعیین این پارامترها، نهایت دقت را به کار برد.

در فرآیند اجرای الگوریتم معرفی شده، مشاهده شد که مجموعه پاسخ‌های حاصل از الگوریتم ژنتیک برای مقادیر پارامترهای آرچی یکتا نمی‌باشند و پاسخ‌های الگوریتم ژنتیک در هر بار اجرا، اندکی متفاوت خواهند بود. با ادامه اجرای الگوریتم امکان پیدا شدن مجموعه پاسخ‌های دیگر برای این پارامترها وجود



شکل ۴-۷: میزان حساسیت اشباع‌شدگی نسبت به تغییرات پارامتر m



شکل ۴-۸: میزان حساسیت اشباع‌شدگی نسبت به تغییرات پارامتر n

دارد که نشان می‌دهد برای انطباق نتایج حاصل از رابطه آرچی بر داده‌های حاصل از نگارهای به دست آمده از مخزن هیدروکربوری مورد مطالعه، پاسخ‌های متعددی حاصل می‌شود که منجر به محاسبه مقدار اشباع‌شدگی از آب بیشتر یا کمتر و کاهش یا افزایش مقدار کل ذخیره نفت در مخزن می‌گردد.

از مزایای روش الگوریتم ژنتیک، محاسبه هم‌زمان پارامترهای آرچی می‌باشد که این موضوع در افزایش دقت، سرعت و صحت تخمین این پارامترها نقش مهمی دارد. استفاده از الگوریتم ژنتیک در تعیین ضرایب آرچی به کمک چاه نمودارهای پتروفیزیکی، محاسبه این پارامترها به ازای فواصل کم در چاه را امکان‌پذیر می‌سازد. در واقع در هر قسمتی از یک چاه که چاه نمودارهای مناسب برای ورودی الگوریتم موجود باشد می‌توان مقادیر پارامترهای آرچی را محاسبه کرد. این ویژگی باعث محاسبه بهتر و دقیق‌تر اشباع‌شدگی از آب در عمق‌های مختلف چاه می‌شود. با کاربرد این روش و طراحی مناسب الگوریتم، در مرحله اجرا و کاربرد از فرمول‌ها و روابطی که نیاز به تعیین عباراتی خاص دارند و همچنین تصحیحات ناشی از عدم تحقق فرض‌ها و شرایط حاکم بر روش مورد استفاده بی‌نیاز می‌شویم.

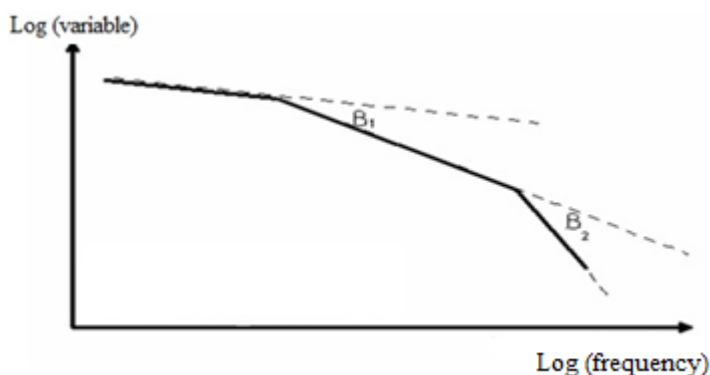
علاوه بر این، برخلاف روش‌های آماری، الگوریتم ژنتیک قادر است پاسخ‌های بسیاری برای مسائل بهینه‌سازی را در محدوده بسیار وسیع‌تری جستجو کند. بررسی‌های بیشتر رابطه آرچی با الگوریتم ژنتیک نشان می‌دهد که مجموعه پارامترهای ممکن برای انطباق نتایج حاصل از رابطه آرچی بر داده‌های مخزن مورد مطالعه، یکتا نبوده و پاسخ‌های متعددی برای این مسئله وجود دارد. این نتایج ممکن است به دلیل اینکه فرض شده است قانون آرچی برای نمونه‌های مغزه مخزن کربناته قابل کاربرد است، حاصل شده باشد. در صورتی که قانون آرچی تنها برای ماسه سنگ‌های تمیز قابل استفاده می‌باشد و ماسه سنگ‌های غیر تمیز یا شیلی و سازندهای حفره‌ای مانند کربنات‌ها ممکن است از قانون آرچی پیروی نکنند. بنابراین باید اصلاحاتی در رابطه آرچی صورت گیرد و مدل کامل‌تری برای تخمین میزان اشباع‌شدگی از آب در مخزن کربناته مورد مطالعه ارائه گردد که قادر باشد با توجه به خصوصیات سنگ‌های کربناته رابطه بین تغییرات اشباع‌شدگی از آب و پارامترهای مخزن را به خوبی بیان کند. بدین منظور در مرحله بعد به بررسی تغییرپذیری رفتار داده‌ها در فواصل عمقی مختلف و پس از آن بررسی اثر لیتولوژی بر مقادیر پارامترهای مدل آرچی در هر کدام از زون‌های سنگی مخزن مورد مطالعه پرداخته شده است.

۷-۴- روش جداسازی فرکتال

در نگارهای چاه‌پیمایی، داده‌ها در فواصل کم و به صورت پیوسته برداشت می‌شوند. در این فواصل تغییرات مختلف خواص سازندها ثبت می‌شوند [Schlumberger, 2009]. با استفاده از روش‌هایی که به تجزیه و تحلیل داده‌های حاصل از نگارهای چاه‌پیمایی و بررسی تغییرپذیری رفتار آن‌ها می‌پردازد، می‌توان روندهای تغییرات موجود در داده‌ها را مشخص نمود. در نتیجه می‌توان تعیین کرد که هر کدام از روندها مربوط به چه تغییر رفتار در داده‌ها می‌باشد و منشأ ایجاد این تغییر رفتار را مشخص نمود.

روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها، ضمن بررسی آماری داده‌ها، روندهای تغییرات موجود در بین داده‌ها را مشخص می‌کنند. روش فرکتال از جمله روش‌هایی است که علاوه بر توزیع فراوانی داده‌ها، ارتباط فضایی نقاط برداشت را با تغییرات رفتار داده‌ها در نظر می‌گیرد [Cheng, 1999].

ماهیت فرکتالی توسط ابعاد فرکتال مشخص می‌شود [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴]. همان‌طور که شکل ۹-۴ نشان می‌دهد، با تغییر امتداد هر کدام از معادلات درجه یک حاکم بر اجزاء معادله کلی تغییر رفتار داده‌ها، تغییر بعد فرکتال رخ می‌دهد. به این ترتیب زیرجوامع موجود در داده‌ها تفکیک می‌شوند. روند تغییرات هر کدام از زیرجوامع، بیانگر وضعیت تغییر شکل کمیت اندازه‌گیری شده با موقعیت فضایی برداشت داده‌ها می‌باشد [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴].



شکل ۹-۴: تفکیک زیر جوامع موجود در داده‌های برداشت شده با الگوی متغیر-تعداد

روش‌های مختلفی جهت به دست آوردن ابعاد فرکتالی داده‌های اکتشافی به کار می‌روند [Li et al., 1994; Bolviken et al., 1992; Cheng et al., 2003]. از جمله این مدل‌ها، مدلی است که مقدار کمیت مورد اندازه‌گیری را در مقابل فراوانی (Freq)^۱ آن به صورت

$$\text{LOG}(\text{Freq}) = D \cdot \text{LOG}(\text{Var}) \quad (۹-۴)$$

نشان می‌دهد [Mao et al., 2004]. در این رابطه، D بعد فرکتال است.

۴-۸- بررسی تغییرات بعد فرکتال در داده‌های مقاومت ویژه چاه A

با رسم مقادیر حاصل از مقاومت ویژه واقعی سازند، R_t ، در مقابل متغیر فراوانی تعداد داده‌ها در یک نمودار تمام لگاریتمی، می‌توان بعد D هر زیرجامعه را از طریق شیب خط برازش شده و تغییرات آن مانند شکل ۴-۹ به دست آورد. تغییر بعد فرکتالی هر بخش با انحراف شیب خط راست برازش شده مشخص خواهد شد و نقطه تلاقی دو بخش نیز به عنوان حد آستانه‌ای^۲ تفکیک هر زیرجامعه از داده‌ها معرفی می‌شود. جدول ۴-۳ پارامترهای آماری میانگین، ماکزیمم، مینیمم و انحراف معیار مرتبط با توزیع داده‌های R_t برداشت شده در چاه اکتشافی A در مخزن مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳: مشخصات آماری داده‌های مربوط به مقاومت ویژه واقعی سازند در چاه مورد مطالعه

Mean(Hz)	Max(Hz)	Min(Hz)	Std(Hz)
۸/۷۸	۱۵/۱۲	۵/۳۲	۲/۶۲

1- Frequency

2-Threshold

به منظور کاربرد مدل فرکتالی مقاومت ویژه - فراوانی تعداد داده‌ها، ابتدا داده‌های R_t در چاه اکتشافی A، دسته بندی و سپس فراوانی تعداد داده‌های مقاومت ویژه در هر یک از دسته‌ها مشخص گردید. برای هر دسته از داده‌ها، مقدار میانگین مقاومت ویژه مطابق جدول ۴-۴ محاسبه می‌شود.

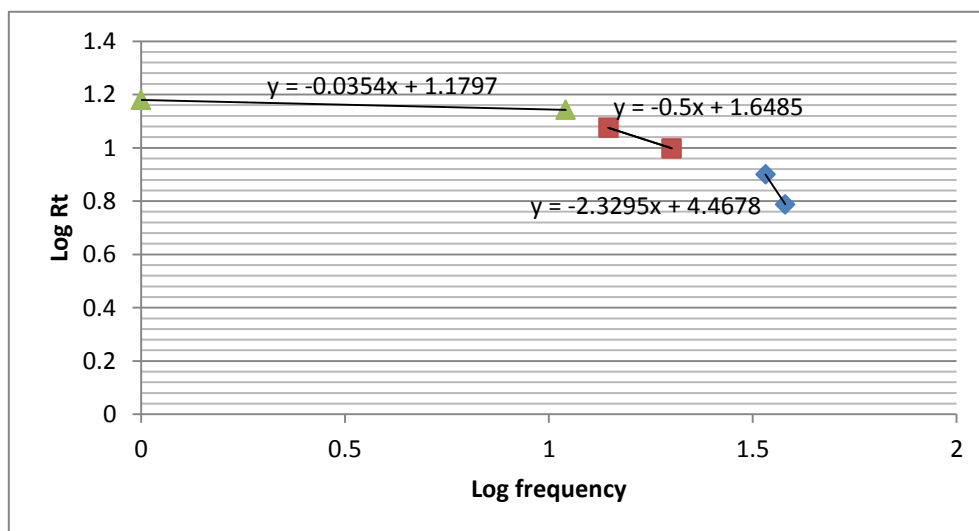
جدول ۴-۴: نتایج حاصل از کلاس‌بندی و تعیین فراوانی هر دسته از داده‌های مقاومت ویژه R_t در چاه A مخزن مورد مطالعه

حدود دسته‌ها	فراوانی تعداد داده‌ها در هر دسته	میانگین مقاومت ویژه هر دسته	Log (فراوانی دسته‌ها)	(میانگین مقاومت ویژه هر دسته) Log
۵-۷	۳۸	۶/۱۳	۱/۵۷	۰/۷۸
۷-۹	۳۴	۷/۹۴	۱/۵۳	۰/۹
۹-۱۱	۲۰	۹/۹۵	۱/۳	۰/۹۹
۱۱-۱۳	۱۴	۱۱/۸۹	۱/۱۴	۱/۰۷
۱۳-۱۵	۱۱	۱۳/۸۹	۱/۰۴	۱/۱۴
۱۵-۱۷	۱	۱۵/۱۲	۰	۱/۱۷

پس از محاسبه فراوانی تعداد داده‌ها و تعیین میانگین مقاومت ویژه هر دسته، نمودار تمام لگاریتمی تغییرات مقاومت ویژه نسبت به فراوانی تعداد داده‌ها رسم و بر اساس داده‌های موجود سه روند با ابعاد فرکتالی مختلف بر داده‌ها برازش گردید. شکل ۴-۱۰، توزیع فراوانی مربوط به داده‌های R_t و مشخصات توزیع داده‌ها را در هر کدام از بخش‌ها نشان می‌دهد.

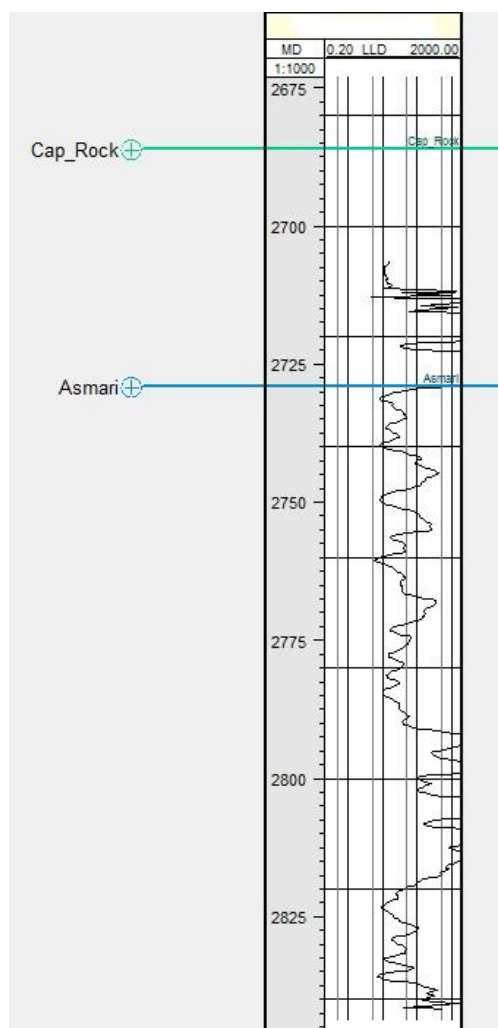
در این شکل، سه روند خطی با ابعاد فرکتالی را می‌توان به زون‌های قطع شده توسط چاه مورد مطالعه نسبت داد که توسط نگار چاه‌پیمایی LLD برداشت شده‌اند. نقطه عطف بین قطعات روی نمودار، نشان‌دهنده حد جدایش زون‌های مختلف از یکدیگر است. این تغییرات کاملاً روی نگار مقاومت ویژه LLD

برداشت شده در چاه A در شکل ۴-۱۱ قابل مشاهده است. این سه زون به نام‌های A1، A2 و B1 نامیده شده‌اند که در بخش ۳-۵ توضیح کامل مشخصات آن‌ها آمده است.



شکل ۴-۱۰: مدل فرکتالی لگاریتمی مقاومت ویژه - فراوانی تعداد داده‌های R_t در چاه A مخزن مورد مطالعه

در اینجا الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه کردن مقدار پارامترهای مدل آرچی در کل ستون نفت چاه A برای هر سه زون A1، A2 و B1 به کار گرفته شد. برای تعریف تابع برازش، معادله آرچی در هر کدام از زون‌ها به صورت رابطه (۴-۷) نوشته شد. تابع هدف که به صورت مجموع مجذور تفاضل بین اختلاف مقادیر اشباع آب ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک و مقادیر اشباع آب نمونه برداری شده که به صورت جمعیت ورودی به الگوریتم است، تعریف می‌شود، تابع برازش را به حداقل میزان ممکن می‌رساند. جدول ۴-۵ پارامترهای بهینه به دست آمده در هر زون از مخزن مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مقدار خطا، نشان دهنده اختلاف مقدار اشباع‌شدگی از آب محاسبه شده با استفاده از مقادیر پارامترهای آرچی تخمین زده شده توسط الگوریتم ژنتیک در هر زون، با اشباع‌شدگی از آب واقعی مخزن است.



شکل ۴-۱۱: لاگ مقاومت ویژه نگار چاه پیمایی LLD در چاه A مخزن مورد مطالعه [مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۱].

جدول ۴-۵: پارامترهای بهینه بدست آمده در هر زون مخزن مورد مطالعه

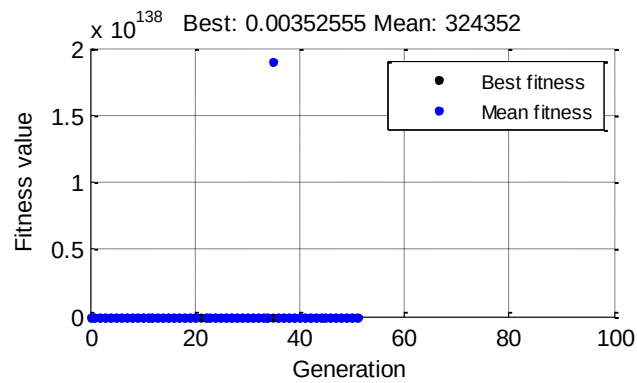
Zone	Interval (m)	m	n	a	خطا
A1	۲۷۲۹-۲۷۷۳	۱/۱۴	۱	۰/۹	۰/۰۰۳۵
A2	۲۷۷۳-۲۸۱۸	۲/۰۲	۱/۸۴	۰/۹	۰/۰۰۴۵
B1	۲۸۱۸-۲۸۳۷	۱/۸۴	۱/۲۸	۱/۱	۰/۰۰۰۵

شکل‌های ۱۲-۴- الف، ب و ج سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل به ترتیب برای اولین، دومین و سومین زون زمین‌شناسی در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه و مجموعه پاسخ‌های حاصل از آن‌ها نشان می‌دهند.

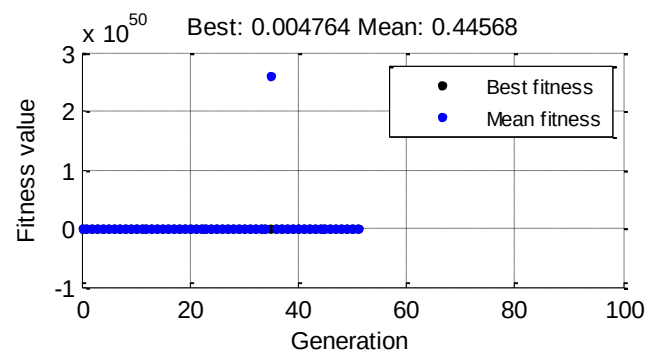
همان‌طور که نمودارهای سیر تکاملی تابع برازش نشان می‌دهند، بهترین مقدار تابع برازش در شکل ۱۲-۴- الف که مربوط به زون A1 است، برابر $0/0035$ ، در شکل ۱۲-۴- ب مربوط به زون A2 برابر $0/0045$ و در شکل ۱۲-۴- ج مربوط به زون B1 برابر $0/0005$ است. با در دست داشتن مقادیر بهینه برای پارامترهای آرچی، می‌توان مقدار اشباع‌شدگی را در طول ستون هیدروکربور چاه A محاسبه نمود.

روندهای فرکتالی موجود در مدل تمام لگاریتمی مقاومت ویژه- فراوانی تعداد داده‌های مقاومت ویژه LLD وجود زیرجوامع مختلف موجود در داده‌ها را نشان می‌دهد. نقطه عطف تغییر بعد فرکتالی جوامع مختلف،

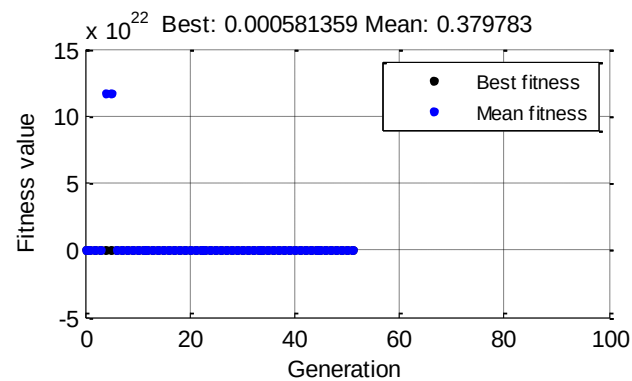
حد آستانه‌ای شروع این جوامع است. با تعیین حد آستانه‌ای شروع هر زیر جامعه قادر به تشخیص مرز شروع داده‌های زیر جامعه مورد نظر خواهیم بود. این زیر جوامع نشان دهنده زون‌های مختلف زمین‌شناسی در چاه مورد بررسی می‌باشند که هر کدام ویژگی‌های سنگ‌شناسی منحصر به خود را دارند. بنابراین در طول ستون هیدروکربور مورد بررسی سه زون زمین‌شناسی مختلف وجود دارد که در هر کدام از این زون‌ها، پارامترهای مدل آرچی مقادیر مختلف دارند. این روش، ضرایب مدل آرچی را که به نقطه اندازه‌گیری و سنگ‌شناسی محیط وابسته است و به طور کلی ناشناخته‌اند را بدون تحلیل نمونه‌های سنگی با خطای کم نشان می‌دهد. بنابراین جهت بررسی چگونگی تأثیر نحوه قرارگیری منافذ و شکل آن‌ها روی خواص پتروفیزیکی در نظر گرفتن فاکتور عمق بررسی داده‌ها می‌تواند از لحاظ زمین‌شناسی و لیتولوژی مهم باشد.



الف



ب.



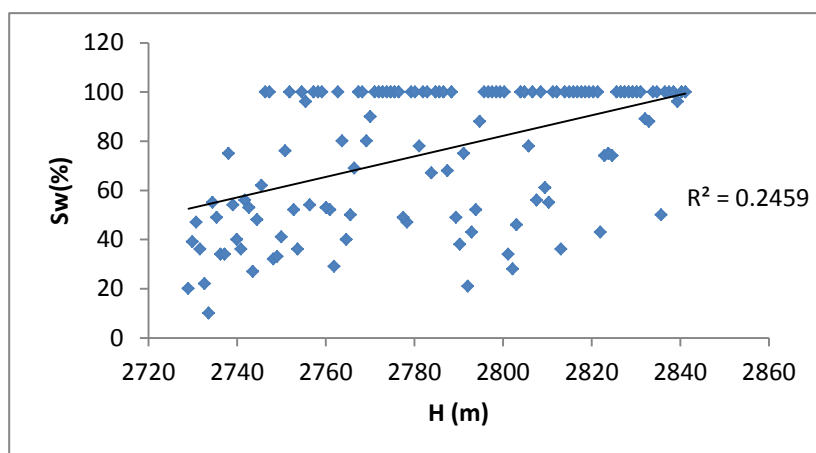
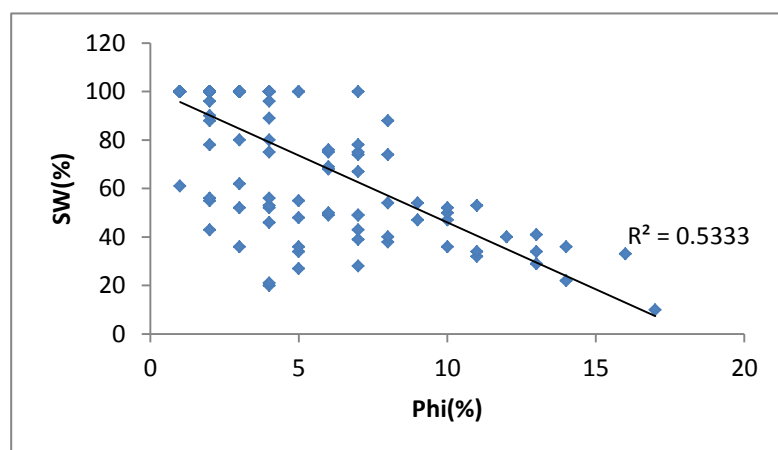
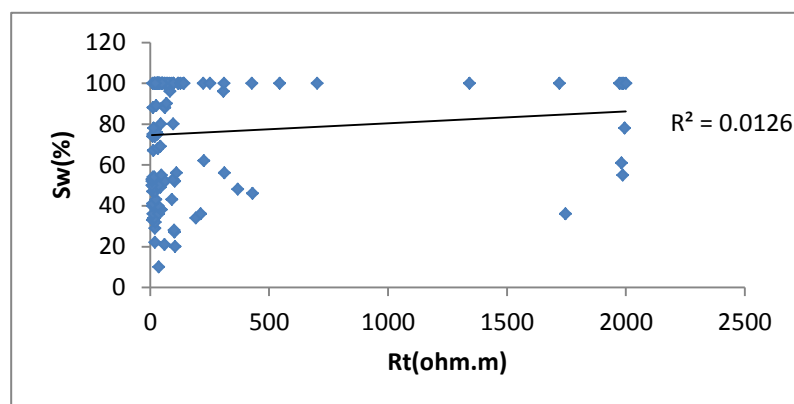
ج

شکل ۴-۱۲- الف سیر تکاملی تابع برازش مربوط به زون A1، ب- سیر تکاملی تابع برازش مربوط به زون A2، ج- سیر تکاملی تابع برازش مربوط به زون B1

۹-۴- اصلاح مدل آرچی برای مخزن کربناته مورد بررسی

حضور شیل و توزیع نامنظم ابعاد حفرات، رسانندگی یا هدایت الکتریکی اضافه در کربنات‌ها ایجاد می‌کند که باعث ایجاد اشتباه در تخمین صحیح میزان اشباع‌شدگی از آب مخزن می‌شود. مطالعات زیادی در جهت مرتبط کردن پارامتر ابعاد حفرات با پارامترهایی نظیر اشباع‌شدگی آب، تراوایی و تخلخل انجام شده است [Alger et al., 1989; Obeida et al., 2005]. اما مطالعات محدودی در ارتباط با پیش‌بینی اشباع‌شدگی از آب در مخازن کربناته انجام گرفته است. یکی از این مطالعات نشان می‌دهد که تغییرات در اندازه حفرات کربناته‌ها می‌تواند باعث تغییر مقدار اشباع‌شدگی از آب مخزن و در نتیجه تغییر مقدار هدایت الکتریکی آن شود [Van Golf-Rocht, 1982]. ابعاد حفرات به اندازه و جورشدگی ذراتی که بافت سنگ را می‌سازند، بستگی دارد. لوسیا (۲۰۰۷) نشان داد که اشباع‌شدگی سیالات در مخازن کربناته به ابعاد حفرات بستگی دارد و اشباع‌شدگی از آب به ارتفاع مخزن (H)، تخلخل (ϕ) و بافت سنگ بستگی دارد [Lucia, 2007].

جهت تعیین میزان وابستگی داده‌های نگارهای مقاومت ویژه LLD و نگار محاسباتی تخلخل (Φ) و همین‌طور ارتفاع مخزن با مقادیر اشباع‌شدگی در چاه A، نمودارهای متقاطع این مقادیر با مقادیر اشباع‌شدگی در شکل ۴-۱۳ رسم شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است علاوه بر پارامترهای مقاومت ویژه و تخلخل، اشباع‌شدگی از آب با پارامتر ارتفاع مخزن نیز ارتباط دارد. همان‌طور که در بخش ۳-۶ ملاحظه شد زون‌های زمین‌شناسی مخزن مورد مطالعه که هر کدام در ارتفاع خاصی قرار گرفته‌اند، در محدوده‌های بافتی مختلف قرار می‌گیرند. بنابراین فاکتور ارتفاع مخزن می‌تواند در تعیین اشباع‌شدگی آب مخزن تأثیرگذار باشد.



شکل ۴-۱۳: نمودارهای متقاطع داده‌های نگارهای مقاومت ویژه LLD و نگار محاسباتی تخلخل (Phi) و ارتفاع مخزن (H) با مقادیر اشباع‌شدگی در چاه A

با بررسی معادله آرچی، رابطه (۷-۱)، مشخص می‌شود که تمام پارامترها غیر از پارامتر ارتفاع مخزن در این معادله ظاهر شده‌اند. در اینجا پارامتر ارتفاع مخزن به عنوان یک پارامتر ورودی در رابطه (۵-۱) جایگذاری می‌شود. از آنجا که چگونگی تأثیر پارامتر ارتفاع مخزن بر اشباع‌شدگی از آب مشخص نیست، بنابراین این پارامتر به صورت یک چندجمله‌ای با درجات مختلف به صورت رابطه (۴-۱۰) به رابطه (۵-۱) افزوده می‌شود [Hatampour et al., 2013]:

$$\left(\frac{aR_w}{R_t \phi^m}\right)^{\frac{1}{n}} + k_1 H^{k_2} + k_3 H^{k_4} + k_5 H^{k_6} + \dots \quad (۴-۱۰)$$

این رابطه، فرم عمومی معادله آرچی را نشان می‌دهد که پارامتر ارتفاع مخزن به صورت غیر خطی به آن اضافه شده است تا بتواند مقدار صحیح اشباع‌شدگی از آب را در مخزن کربناته مورد مطالعه با استفاده از داده‌های نگارهای چاه‌پیمایی در هر عمقی تخمین بزند.

برای یافتن مقادیر پارامترها رابطه (۴-۱۰) از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. تابع هدف الگوریتم ژنتیک به صورت رابطه (۴-۱۱) تعریف می‌شود:

$$Fit = s_w - \left(\frac{aR_w}{R_t \phi^m}\right)^{\frac{1}{n}} + k_1 H^{k_2} + k_3 H^{k_4} + k_5 H^{k_6} + \dots \quad (۴-۱۱)$$

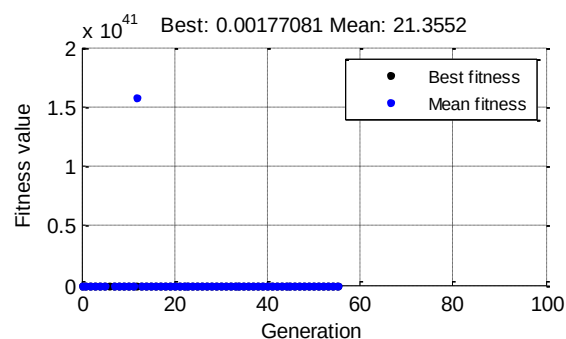
اندازه جمعیت الگوریتم ژنتیک برابر ۱۰۰ فرض شده است. انتخاب جمعیت اولیه با توزیع یکنواخت و انتخاب والدین نیز بصورت تصادفی و با توزیع یکنواخت انجام می‌شود. ژن‌های فرزندان از ژن‌های هر یک از والدین بطور تصادفی انتخاب می‌شوند. در هر مرحله ۵ درصد از افرادی که بیشترین میزان تطابق با تابع هدف را داشته باشند، به عنوان فرزندان نمونه انتخاب شده و مستقیماً به مرحله بعد می‌روند. جهش ژنتیکی نیز بر روی ۳ درصد از افراد و با یک تابع توزیع نرمال استاندارد محقق می‌گردد. برای رسیدن به پاسخ دقیق‌تر، مقدار دامنه تغییرات مجاز در تغییرات تجمعی تابع هدف برابر 10^{-10} انتخاب شده است. از مجموع کل داده‌های R_t ، تخلخل و اشباع‌شدگی (۱۲۴ نقطه)، ۷۰ درصد داده‌ها به صورت تصادفی، جهت

تعیین پارامترهای رابطه (۴-۱۰) در مرحله آزمون انتخاب گردید و ۳۰ درصد باقی مانده جهت تعیین اعتبار پاسخ الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته شد. در نهایت، الگوریتم ژنتیک، پارامترهای رابطه (۴-۱۰) را در مرحله آزمون به صورت مقادیر ذکر شده در جدول ۴-۶ برآورد نمود.

جدول ۴-۶: مقادیر بهینه پارامترهای رابطه (۴-۱۰) در مرحله آزمون

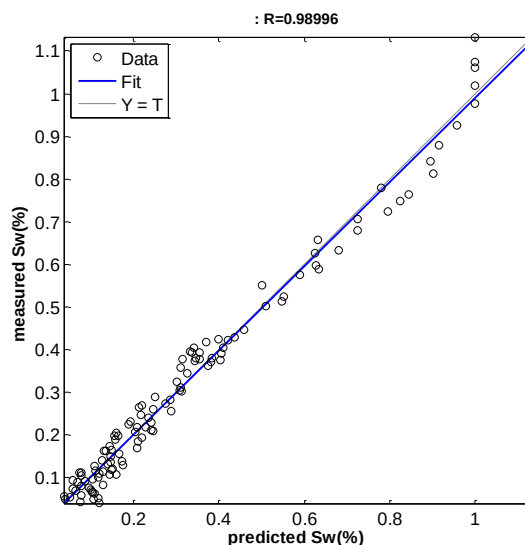
خطا	k_2	k_1	a	n	m
۰/۰۰۱۷	-۰/۳۵	۰/۸۵	۱/۰۳	۱/۵۸	۲/۱۷۲

شکل ۴-۱۴ سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل داده‌های انتخاب شده جهت تعیین پارامترهای رابطه (۴-۱۰) در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بهترین مقدار تابع برازش برابر ۰/۰۰۱۷ است.



شکل ۴-۱۴ سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل داده‌های آزمون انتخاب شده در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه

شکل ۴-۱۵ ضریب همبستگی ۰/۹۸ را بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه اصلاح شده (۴-۱۰) و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵: همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه اصلاح شده (۴-۱۰) و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در مرحله آزمون

جدول ۴-۷ مقادیر پارامترهای رابطه (۴-۱۰) را در مرحله تعیین اعتبار مدل نشان می‌دهد.

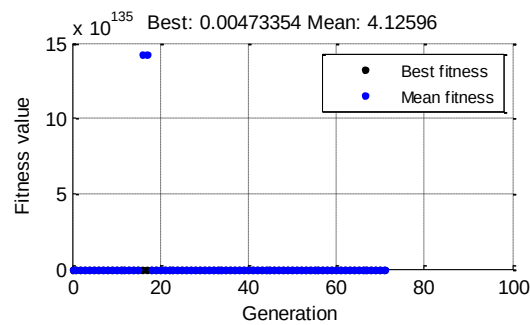
جدول ۴-۷: مقادیر بهینه پارامترهای رابطه (۴-۱۰) در مرحله اعتبار سنجی مدل

خطا	k_2	k_1	a	n	m
۰/۰۰۴۷	-۱/۴۸	۰/۴۴	۰/۹۸	۲/۷	۲/۸

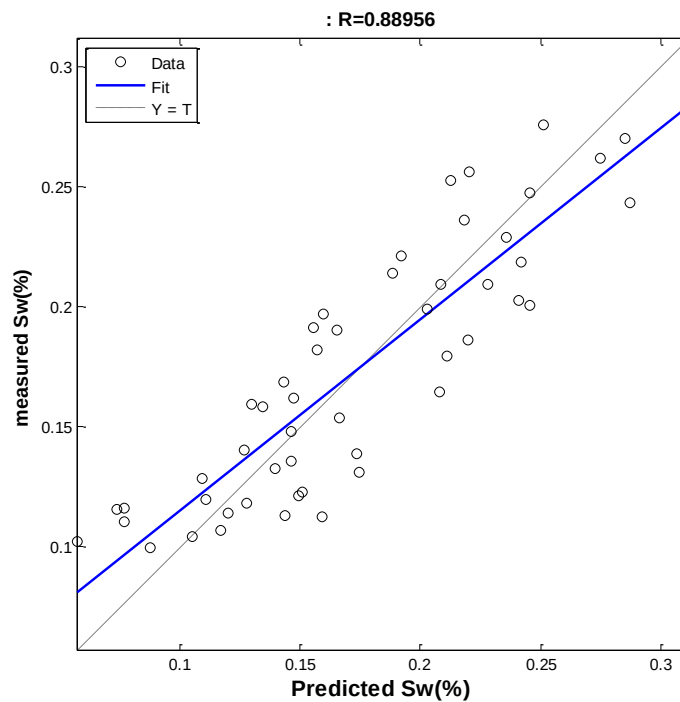
شکل ۴-۱۶ سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل داده‌های انتخاب شده جهت اعتبار سنجی مدل در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد. بهترین مقدار تابع برازش برابر ۰/۰۰۴۷ است.

شکل ۴-۱۷ ضریب همبستگی ۰/۸۸ را بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه اصلاح شده (۴-۱۰) و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در مرحله اعتبار سنجی مدل نشان می‌دهد. به این

ترتیب می‌توان رابطه (۴-۱۰) را به عنوان رابطه اصلاح شده آرچی در مخزن کربناته مورد مطالعه معرفی نمود.



شکل ۴-۱۶: سیر تکاملی تابع برازش را در فرآیند تولید نسل داده‌های انتخاب شده جهت اعتبار سنجی مدل در ستون هیدروکربوری چاه مورد مطالعه



شکل ۴-۱۷: همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده با استفاده از رابطه اصلاح شده (۴-۱۰) و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی در مرحله اعتبارسنجی مدل

فصل پنجم:

مدل سازی اشباع شدگی از آب با

روش های هوشمند

۵-۱- مقدمه

پس از تعیین پارامترهای مرتبط با تغییرات اشباع‌شدگی از آب مخزن مورد مطالعه در این مرحله نوبت به مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه حاصل از روش MT می‌رسد. در این فصل با استفاده از روش‌های هوشمند نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش عصبی- فازی به مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب مخزن پرداخته شده است.

۵-۲- مبانی شبکه عصبی

یک شبکه عصبی را می‌توان به شکل یک پردازنده قوی در نظر گرفت که از واحدهای ساختاری به نام نرون تشکیل شده است و این توانایی را دارد تا دانش تجربی را به خوبی برای کاربردهای بعدی ذخیره کند. این شبکه‌ها از دو جهت یادگیری و قدرت ارتباطی بین نرون‌ها به عملکرد مغز انسان شبیه‌اند [Bhatt, 2002]. شبکه‌های عصبی بر خلاف کامپیوتر، به مدل‌های ریاضی محض نیاز ندارند بلکه مانند انسان، تجربه کسب نموده و نتیجه این تجربیات را تعمیم می‌دهند. شبکه‌های عصبی به عنوان ابزاری قدرتمند برای حل مسائل پیچیده زمین‌شناسی از قبیل تخمین، تشخیص الگو، طبقه‌بندی و خوشه‌بندی به کار می‌روند [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴].

شبکه عصبی برای حل هر مسئله، سه مرحله را طی می‌کند: آموزش، تعمیم و اجرا. در طی فرآیند آموزش، وزن‌های ورودی‌های شبکه تغییر می‌کنند تا الگوی حاکم بر تغییر رفتار ورودی‌ها و خروجی‌های مسئله شناخته شود و خروجی شبکه در نزدیک‌ترین حالت نسبت به خروجی مطلوب قرار گیرد. الگوریتم‌های آموزش در دو دسته اصلی قرار می‌گیرند [منهاج، ۱۳۷۹]:

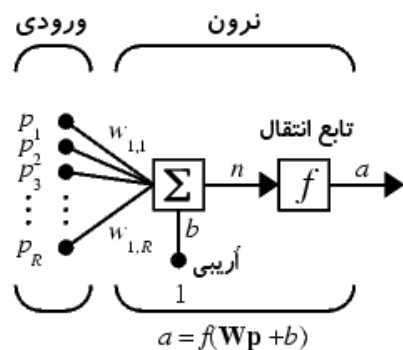
۱- آموزش با ناظر^۱: در این نوع آموزش، از طریق حداقل کردن اختلاف بین نتایج حاصل از شبکه و خروجی‌های مطلوب، بین ورودی‌ها و خروجی‌های مجموعه آموزشی ارتباط برقرار می‌شود. رایج‌ترین روش آموزش با ناظر، الگوریتم پس انتشار^۲ خطاست. این الگوریتم شامل دو مسیر رفت و برگشت می‌باشد. در مسیر رفت، بردار ورودی به شبکه اعمال شده و تأثیراتش از طریق لایه‌های میانی به لایه‌های خروجی انتشار می‌یابد. در مسیر برگشت، پارامترهای شبکه بر عکس مسیر رفت و بر اساس قانون تصحیح خطا به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که پاسخ شبکه به پاسخ مطلوب نزدیک‌تر شود.

۲- آموزش بدون ناظر^۳: در این نوع آموزش، خروجی داده‌های آموزشی به شبکه عرضه نمی‌شود. هدف این نوع آموزش یافتن الگوی بین ورودی‌ها و گروه‌بندی آنهاست. تعمیم، عبارت است از توانایی شبکه برای ارائه جواب قابل قبول در قبال ورودی‌هایی که در مجموعه آموزشی نبوده‌اند. استفاده از شبکه برای انجام عملکردی که به آن منظور طراحی شده است را اجرا گویند [احسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴].

شبکه‌های عصبی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های داده‌کاوی^۴ می‌باشند. شبکه عصبی در صنعت نفت کاربردهای فراوان و گسترده‌ای از مراحل اولیه شناسایی و اکتشاف تا استحصال دارد. شبکه‌های عصبی مصنوعی با توجه به قابلیت بالایی که برای تخمین داده‌ها دارند و استفاده از آن‌ها به اطلاعات زمین‌شناسی و تصحیحات نیازی ندارد، جهت تخمین پارامترهای مختلف پتروفیزیکی مخزن از جمله تخلخل، تراوایی و اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های نگارهای چاه‌پیمایی کاربرد گسترده‌ای دارند [Olson, 1998; Helle et al., 2001; Lim and Kim, 2004].

1- Supervised learning
2- Back propagation
3- Unsupervised learning
56- Data Mining

نرون کوچک‌ترین واحد پردازشگر اطلاعات است، که اساس عملکرد شبکه‌های عصبی را تشکیل می‌دهد. شکل ۱-۵ مدل یک نرون را نشان می‌دهد که اسکالرهایی p و a به ترتیب ورودی و خروجی آن می‌باشند.



شکل ۱-۵: مدل یک نرون [Beale, 2012]

میزان تأثیر p روی a به وسیله مقدار اسکالر W تعیین می‌شود. ورودی دیگر که مقدار ثابت ۱ می‌باشد، در جمله بایاس b ضرب شده و سپس با $W \times P$ جمع می‌شود. این حاصل جمع، برای تابع محرک f که تابع انتقال یا فعال‌ساز^۱ نامیده می‌شود، به عنوان ورودی خواهد بود. بدین ترتیب خروجی نرون با معادله زیر تعریف می‌شود [منهاج، ۱۳۷۹]:

$$a = f(w \times p + b) = f(n) \quad (۱-۵)$$

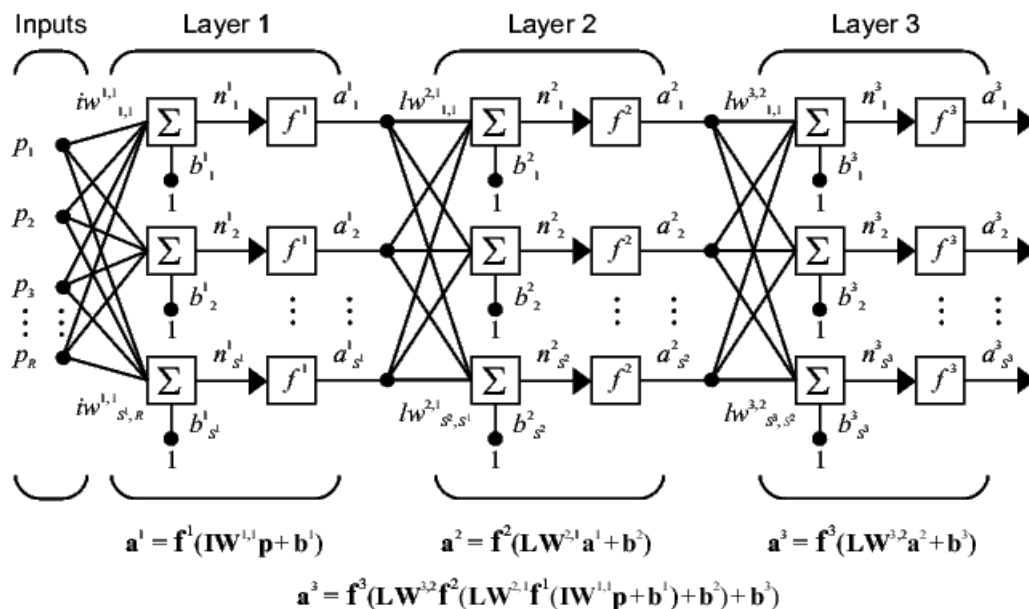
بر اساس انتخاب تابع f و نوع الگوریتم یادگیری، پارامترهای w و b تنظیم می‌شوند. در فرآیند یادگیری w و b طوری تغییر می‌کنند که رابطه ورودی و خروجی نرون با یکدیگر مطابقت نماید.

شبکه‌های عصبی مصنوعی ساختار لایه‌ای دارند و نرون‌ها در این لایه‌ها تعبیه شده‌اند. اولین لایه، لایه ورودی است که صرفاً ورودی‌ها را در قسمت خروجی کپی می‌کند. لایه آخر لایه خروجی است و لایه‌های بین لایه ورودی و خروجی را لایه‌های میانی یا پنهان می‌نامند [منهاج، ۱۳۷۹]. در شکل ۲-۵ نمایی از یک شبکه‌ی پیش‌خور^۲ با سه لایه پنهان نشان داده شده است.

1- Activation function

2- Feed Forward

تابع محرک f می‌تواند خطی یا غیرخطی باشد. تابع محرک بر اساس مسئله‌ای که قرار است به وسیله شبکه عصبی حل شود، انتخاب می‌شود. در عمل تعداد محدودی از توابع محرک از جمله تابع محرک



شکل ۵-۲: نمایی از ساختار لایه‌ای شبکه‌های عصبی مصنوعی [Beale, 2012].

خطی^۱، تابع دو مقداره حدی^۲، تابع محرک سیگموئید^۳ و تابع محرک تانژانت هیپربولیک مورد استفاده قرار می‌گیرند.

بر اساس نحوه‌ی اتصال گره‌ها به یکدیگر، شبکه‌های عصبی به دو گروه بزرگ تقسیم می‌شوند [Bhatt, 2002]:

۱- شبکه‌های عصبی پیشخور که در آن‌ها جریان یک طرفه از لایه ورودی به سمت لایه خروجی وجود دارد. این نوع شبکه که هیچ مسیر برگشتی ندارد برای مقاصد پیش‌بینی مناسب است.

-
- 1- Linear function
 - 2- Hardlimmit function
 - 3- Sigmoid function

۲- شبکه‌های با تغذیه برگشتی^۱ که حداقل یک حلقه برگشتی فعال دارد. وجود حلقه برگشتی اثر زیادی بر قابلیت یادگیری شبکه دارد.

ویژگی‌های شبکه‌های عصبی نظیر توانایی انجام محاسبات به صورت موازی، قابلیت یادگیری در صورت تغییر شرایط شبکه، قابلیت ادامه عملکرد شبکه در صورت آسیب دیدن قسمتی از آن و قابلیت تعمیم شبکه باعث شده است تا در اینجا جهت تخمین پارامتر اشباع‌شدگی مخزن هیدروکربوری مورد مطالعه از این شبکه‌ها استفاده شود. استفاده از این شبکه‌ها شامل مراحل زیر می‌باشد [منهاج، ۱۳۷۹]:

۱- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

۲- تعیین نوع و ساختار شبکه مورد استفاده

۳- تعیین نحوه آموزش شبکه

۴- ارزیابی و اجرای شبکه

۵-۳- جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها

جهت استفاده از شبکه عصبی، نیاز به دو دسته داده می‌باشد: داده‌های ورودی و داده‌های خروجی. کیفیت عملکرد نهایی شبکه عصبی مستقیماً تابع داده‌های آموزشی شبکه و الگوهای موجود در آن‌ها می‌باشد. شرط لازم برای مجموعه آموزشی آن است که تمام دامنه مقادیر ورودی‌ها و خروجی‌ها را پوشش دهد. بنابراین انتخاب یک مجموعه آموزشی مناسب که دامنه وسیعی از الگوهای موجود در داده‌ها را در بر گیرد اهمیت زیادی دارد. اگر شبکه، جهت پیش‌بینی مواردی با فراوانی کم طراحی می‌شود باید از وجود الگوهایی از موارد نادر به تعداد کافی مطمئن شد و از الگوهای نادر، نمونه‌های اضافی جهت آموزش شبکه برداشت کرد. به طور کلی، مجموعه آموزشی باید به گونه‌ای انتخاب شود که الگویی صحیح را در اختیار شبکه بگذارد [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴].

1- Feed backward network

پیش پردازش داده‌های ورودی و خروجی به آموزش شبکه و شناخت الگوها کمک زیادی می‌نماید. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

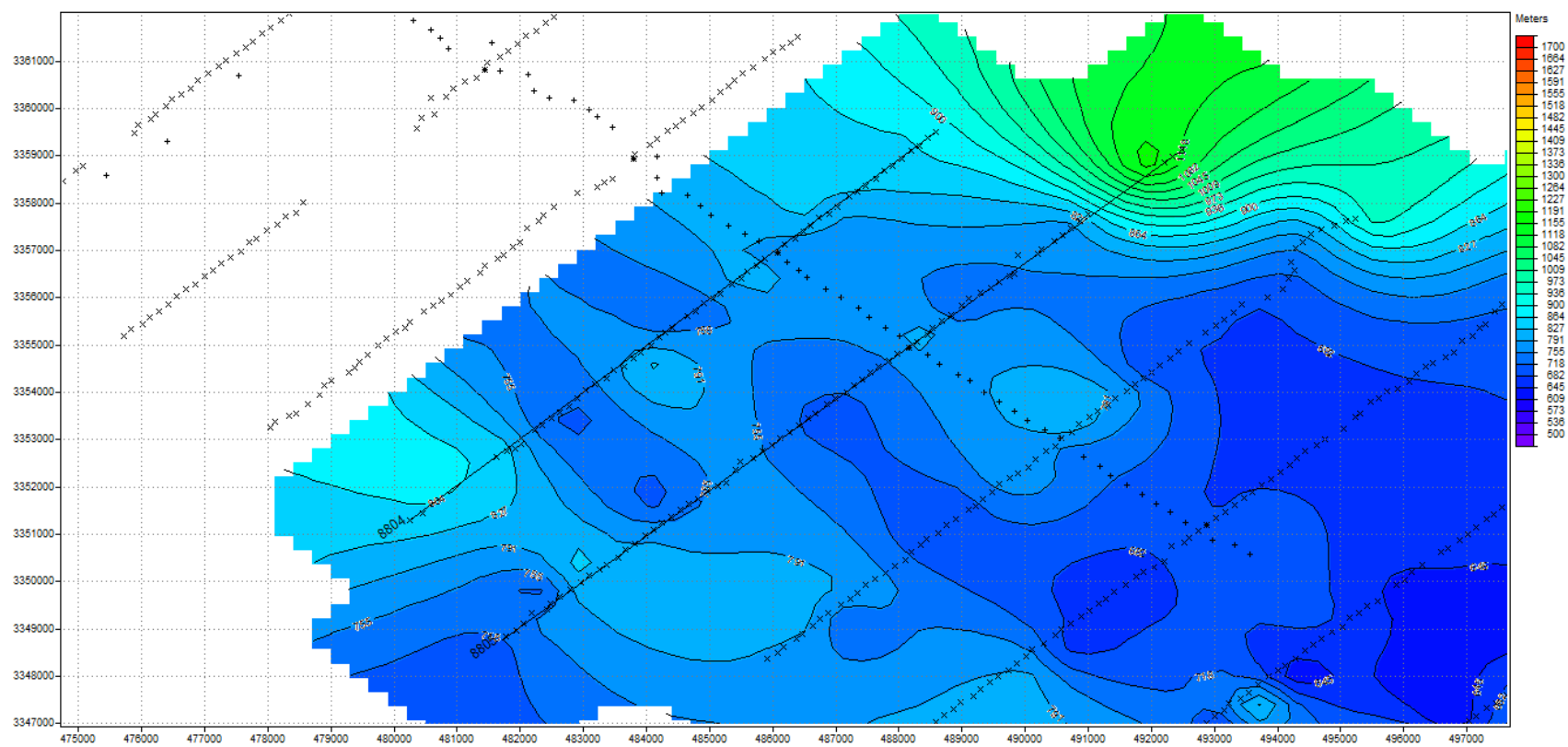
- ۱- تغییر مقیاس داده‌ها به گونه‌ای که تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها بین صفر و یک قرار گیرند.
 - ۲- تبدیل داده‌های ورودی و خروجی به توزیع گوسی که در آن میانگین توزیع، صفر و انحراف معیار ۱ است [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴].
- هر چه تعداد متغیرهای ورودی شبکه بیشتر باشد، نرون‌های میانی و مدت زمان بیشتری لازم است تا شبکه آموزش ببیند. لذا حذف متغیرهایی که اثر مثبت و معنی‌داری در افزایش قدرت پیش‌بینی و تخمین ندارند موجب افزایش قدرت شبکه می‌شود [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴].

داده‌های ورودی به شبکه عصبی به دو دسته تقسیم می‌شوند. بخشی از آن‌ها جهت آموزش شبکه و بخشی دیگر جهت آزمون و کنترل قابلیت شبکه در تخمین، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این قسمت برای استفاده از شبکه عصبی جهت تخمین اشباع‌شدگی از داده‌های چاه اکتشافی شماره ۱۱۵ که مطابق شکل ۳-۶ نزدیک خط ۸۸۰۵ برداشت داده‌های MT قرار گرفته است، استفاده می‌شود.

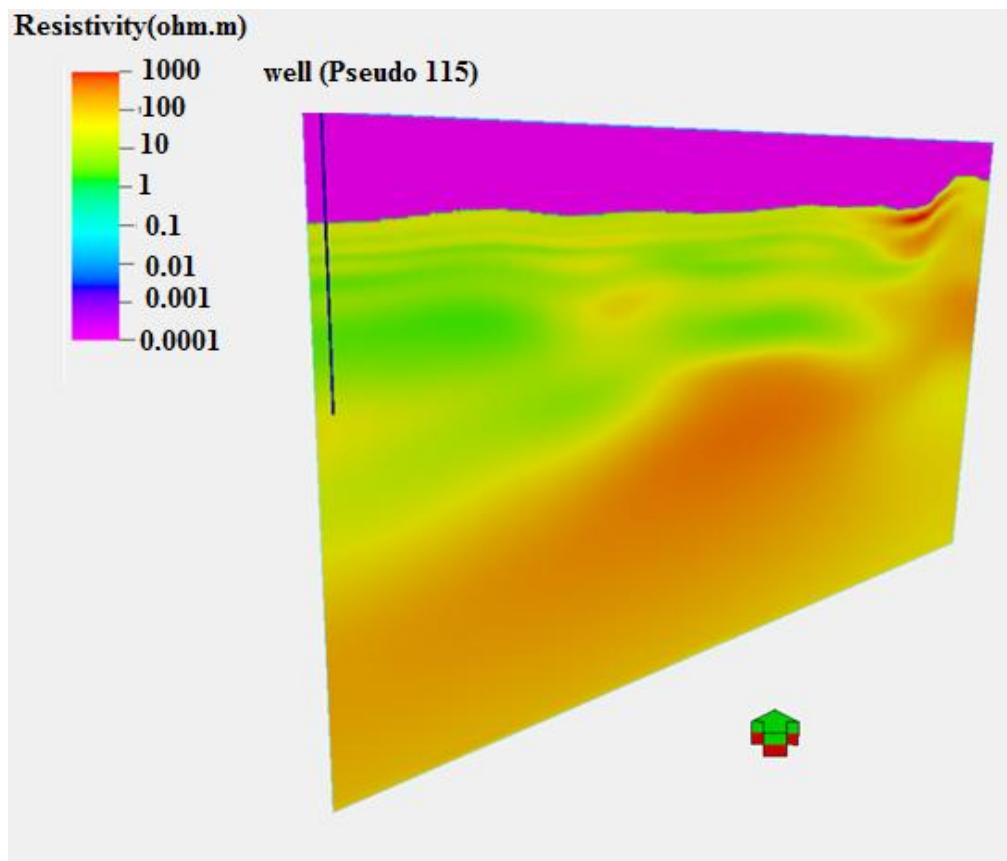
جهت استفاده از داده‌های MT در تخمین اشباع‌شدگی، ابتدا مقاطع مقاومت ویژه ظاهری با فرمت SEG-Y به نرم افزار پترل^۱ وارد شد. سپس چاه اکتشافی شماره ۱۱۵ به صورت عمودی روی مقطع مقاومت ویژه خط ۸۸۰۵ برداشت MT منتقل گردید. مطابق نقشه نشان داده شده شکل ۵-۳ در فاصله کم بین چاه و خط برداشت MT می‌توان از مسئله جابجایی شیب لایه‌ها^۲ صرف‌نظر نمود. شکل ۵-۴ چاه انتقال یافته روی خط برداشت MT را نشان می‌دهد.

1- Petrel

2- Dip displacement



شکل ۵-۳: نقشه کنتوری شیب لایه‌های منطقه مورد مطالعه

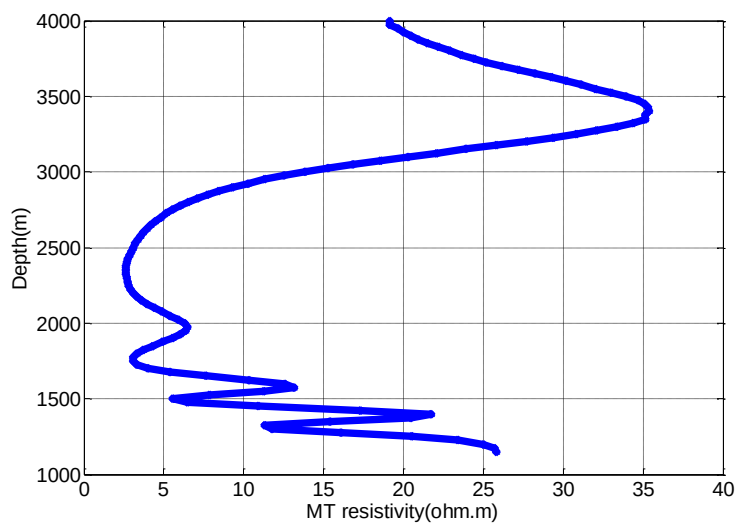


شکل ۵-۴: نقشه شماتیک از چاه انتقال یافته روی مقطع مقاومت ویژه MT خط ۸۸۰۵

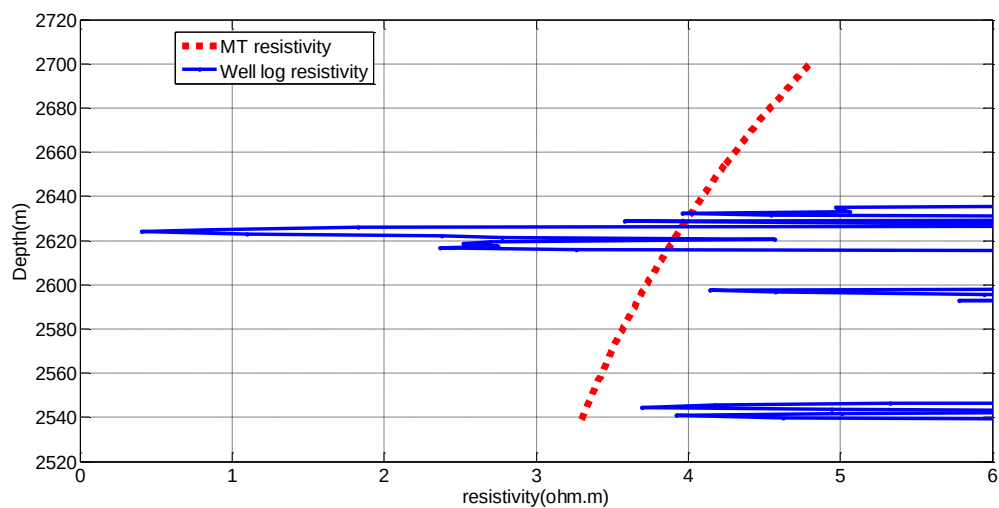
در نقطه برخورد چاه انتقال یافته با مقطع مقاومت ویژه خط ۸۸۰۵، با استفاده از نرم‌افزار پترل، یک چاه فرضی ثبت گردید و نگار مقاومت ویژه MT آن برداشت شد. شکل ۵-۵ نگار مقاومت ویژه MT برداشت شده در چاه انتقال یافته روی مقطع مقاومت ویژه MT خط ۸۸۰۵ را نشان می‌دهد.

شکل ۵-۵ تغییرات مقاومت ویژه MT را با افزایش عمق نشان می‌دهد. با توجه به قدرت تفکیک روش MT، که در اینجا در هر ۲۵ متر عمق یک نقطه ثبت شده است، در فاصله عمقی مخزن مورد مطالعه (۲۵۳۹-۲۷۰۰ متر) تعداد ۷ نقطه‌ای ثبت شده وجود دارد. جهت گرفتن خروجی از مقادیر نگار مقاومت ویژه MT، با استفاده از نرم‌افزار پترل و در اعماقی که نگار اشباع‌شدگی ثبت شده است، از مقادیر مقاومت

ویژه MT خروجی گرفته شد. در شکل ۵-۶ نگار مقاومت ویژه MT چاه انتقال یافته روی خط ۸۸۰۵ در مقابل نگار مقاومت ویژه چاه پیمایی LLD نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: نگار مقاومت ویژه MT برداشت شده در چاه انتقال یافته روی مقطع مقاومت ویژه MT خط ۸۸۰۵



شکل ۵-۶: نگار مقاومت ویژه MT در مقابل نگار مقاومت ویژه چاه پیمایی LLD در چاه انتقال یافته

همان‌طور که شکل ۵-۶ نشان می‌دهد نگار مقاومت ویژه MT نسبت به داده‌های نگار مقاومت ویژه چاه‌پیمایی LLD هموارتر می‌باشد. این مسئله به این دلیل است که در روش MT از سیگنال‌های با طول موج بلند استفاده می‌شود و در نتیجه این روش، میانگینی از مقاومت ویژه لایه‌ها را نشان می‌دهد.

از آنجا که هدف این رساله، تعیین اشباع‌شدگی با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه حاصل از روش MT می‌باشد، خروجی شبکه عصبی، اشباع‌شدگی از آب و ورودی‌های شبکه، پارامترهای مقاومت ویژه حاصل از روش MT، ارتفاع مخزن و تخلخل در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای اشباع‌شدگی و تخلخل از نگارهای محاسباتی چاه مورد مطالعه و پارامتر مقاومت ویژه MT پروفیل برون‌یابی شده در عمقی که مخزن مورد مطالعه قرار دارد، می‌باشند.

در سیستم‌های هوشمند، توابع انتقال (مانند توابع سیگموئید) نمی‌توانند تفاوت بین مقادیر خیلی بزرگ را تشخیص دهند بنابراین بهترین وضعیت برای تصمیم‌گیری زمانی اتفاق می‌افتد که داده‌ها نرمالیزه شده باشند. در اینجا برای نرمالیزه کردن داده‌های ارتفاع مخزن که مقادیر خیلی بزرگی دارند، از رابطه (۵-۲) استفاده شده است [حسنی پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۴]:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (۵-۲)$$

که در آن x داده‌ای است که باید نرمالیزه شود، x_{min} و x_{max} کمترین و بیشترین مقدار در دامنه ورودی می‌باشند. جدول ۵-۱ پارامترهای ورودی و خروجی شبکه عصبی و محدوده تغییرات آن‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱: پارامترهای ورودی و خروجی شبکه عصبی و محدوده تغییرات آن‌ها

پارامتر	نماد	توصیف	مینیمم	ماکزیمم
ورودی	ϕ	تخلخل (%)	۱	۱۳
ورودی	R	مقاومت ویژه MT (اهم.متر)	۳/۳	۴/۸
ورودی	α	ارتفاع مخزن نرمالایز شده	۰/۰۰۵۴	۱
خروجی	Sw	اشباع‌شدگی از آب (%)	۳	۱۰۰

از بین این داده‌ها، ۷۰ درصد جهت آموزش و ۳۰ درصد جهت آزمون شبکه عصبی استفاده گردید. انتخاب داده‌ها جهت آموزش و آزمون از دو راه صورت می‌گیرد. در روش اول می‌توان بخشی از داده‌ها را به عنوان آموزش و باقی‌مانده را به عنوان آزمون انتخاب نمود. با انجام این روش مشاهده گردید که خطای مرحله آموزش به شدت افزایش می‌یابد. بنابراین از روش تصادفی جهت انتخاب ۷۰ درصد داده‌ها به عنوان آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها به عنوان آزمون استفاده شد. در این حالت چون داده‌ها از قسمت‌های مختلف انتخاب شده‌اند، تمام ویژگی‌های داده‌ها را دارند و خصوصیات داده‌های انتخابی به سمت خاصی میل نمی‌کند.

۵-۴- تعیین نوع و ساختار شبکه مورد استفاده

پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها باید نوع شبکه عصبی مورد استفاده را انتخاب نمود. در اینجا از بین شبکه‌های عصبی معمول، شبکه پرسپترون چند لایه (MLP) با الگوریتم پس انتشار خطا (BP) انتخاب شد. الگوریتم پس انتشار خطا در مسائلی که هدف، تخمین یک پارامتر است به خوبی عمل می‌نماید. از طرف دیگر، یادگیری این شبکه با ناظر است و با توجه به داده‌های این پایان‌نامه که شامل ورودی و خروجی می‌باشند، این شبکه مناسب است. پس از تعیین نوع شبکه، در مرحله بعد باید تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در هر کدام از لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی و نوع روش آموزش مشخص گردد. از آنجا که الگوریتم پس انتشار خطا، از کمینه کردن مشتق اول برای تعیین وزن‌های ارتباطی شبکه استفاده می‌کند، اگر حدس‌های اولیه برای وزن‌ها مناسب نباشند، امکان دارد روند بهینه یابی در کمینه موضعی گرفتار شود [Shahin et al., 2000]. به همین دلیل در این مطالعه، مرحله آموزش به منظور پیدا کردن بهینه‌ترین شبکه، به دفعات با مشخصات متفاوتی برای لایه و یا لایه‌های پنهان تکرار شده است. در مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی تعداد لایه‌های میانی، تعداد نرون‌های هر لایه و همچنین نوع الگوریتم آموزشی و توابع محرک در یادگیری شبکه تاثیر بسزایی دارند، در ادامه به بررسی تاثیر تغییر این پارامترها

بر پاسخ شبکه عصبی می‌پردازیم.

با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که با افزایش تعداد لایه‌های میانی از یک لایه به پنج لایه، ضریب همبستگی شبکه در مرحله آموزش کاهش می‌یابد و شبکه قادر به پیش‌بینی صحیح اشباع‌شدگی نمی‌باشد. بنابراین شبکه با یک لایه پنهان به عنوان بهترین شبکه در پیش‌بینی اشباع‌شدگی در نظر گرفته شد. جدول ۲-۵ نتایج حاصل از انتخاب حالات مختلف تعداد لایه‌های میانی شبکه را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۵: نتایج حاصل از اجرای شبکه با لایه‌های میانی مختلف

تعداد لایه‌های میانی	R^2 مرحله آموزش	R^2 مرحله آزمون
۱	۰/۹۱	۰/۷۹
۲	۰/۸۸	۰/۷۳
۳	۰/۷۶	۰/۶۸
۴	۰/۹	۰/۵۸
۵	۰/۵۱	۰/۳۷

پس از تعیین تعداد لایه‌های پنهان، به تعیین تعداد نرون‌های هر لایه می‌پردازیم. تعداد نرون‌ها در لایه‌های ورودی و خروجی برابر با بعد یا تعداد پارامترهای ورودی یا خروجی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تعداد نرون‌های لایه ورودی ۳ و لایه خروجی ۱ انتخاب شد. برای لایه میانی، تعداد نرون‌های مختلفی آزمایش گردید. شبکه عصبی با توجه به الگوریتم آموزشی انتخاب شده و تعداد نرون‌های متغیر بین ۱ تا ۲۰ نرون طی یک مرحله طولانی آزمون و خطا مورد آموزش قرار گرفت و برای هر ساختار بهترین نتیجه ثبت شد. در نهایت شبکه با تعداد ۵ نرون در لایه میانی، به عنوان بهترین شبکه انتخاب گردید. بعد از مراحل سعی و خطای طولانی تابع انتقال یا فعال‌ساز نرون‌های لایه‌های میانی، از نوع سیگموئید و تابع انتقال نرون‌های لایه خروجی از نوع تابع خطی انتخاب شد.

۵-۵- تعیین نحوه آموزش شبکه

در محیط نرم افزار MATLAB برای آموزش شبکه ها با استفاده از الگوریتم پس انتشار خطا، ۱۳ روش مختلف طراحی شده است که در جدول ۵-۳ ارائه شده اند. در همه این توابع سعی می شود با استفاده از تصحیح پارامترها، میانگین مربعات خطای تابع هدف کمینه شود.

جدول ۵-۳: روش های آموزش شبکه عصبی [Demuth and Beale, 2008]

روش آموزش	تابع	خصوصیات
کاهش گرادیان	Traingd	بسیار کند عمل می کند
کاهش گرادیان با تکانه	Traingdm	از روش Traingd سریع تر است
سرعت یادگیری متغیر	Traingda	از سرعت متغیر استفاده می کند و کند است.
سرعت یادگیری متغیر با تکانه	Traingdx	از روش Traingd سریع تر است و در آموزش دسته ای استفاده می شود.
ارتجاعی	Trainrp	بیشترین سرعت در مسائل تشخیص الگو را دارد و کمترین حافظه را نیاز دارد.
شیب مزدوج فلچر-ریوز	Traincgf	کمترین حافظه را در بین الگوریتم های گرادیان توام نیاز دارد.
شیب مزدوج پولاک-ریبیرر	Traincgp	حافظه بیشتری نسبت به روش Traincgf نیاز دارد و سریع همگرا می شود.
شیب مزدوج پاول-بیل	Traincgb	حافظه بیشتری نسبت به روش Traincgp نیاز دارد و سریع همگرا می شود.
شیب مزدوج مقیاس شده	Trainscg	برای حل گسترده وسیعی از مسائل به خصوص مسائلی که تعداد پارامترهای زیادی دارند کاربرد دارد. حافظه متوسطی به کار می گیرد.
لونبرگ-مارکوارت	Trainlm	سریع ترین الگوریتم آموزشی برای شبکه های معمولی است. در مسائل تخمین، کارایی بالایی دارد.
شبه نیوتنی بی اف جی اس	Trainbfg	شبه Trainlm است ولی نیاز به حافظه کمتری دارد. حجم محاسبات با افزایش اندازه شبکه افزایش می یابد.
شبه نیوتنی متقاطع یک مرحله ای	Trainoss	حد واسط Trainbfg و Trainscg است.
مرتب ساز بیزین	Trainbr	در آموزش شبکه ها به روش منظم سازی استفاده می شود.

برای هر کدام از الگوریتم‌های آموزش ذکر شده در جدول ۵-۳، حالات مختلف شبکه از نظر تعداد لایه‌های میانی و تعداد نرون‌های هر لایه با تکرارهای مختلف مورد بررسی و در نهایت برای آموزش شبکه، الگوریتم لونبرگ-مارکوارت (Trainlm) انتخاب گردید که در مسائل تخمین، کارایی بالایی دارد و همگرایی آن در آموزش شبکه‌های با اندازه متوسط سریع‌تر است.

الگوریتم لونبرگ - مارکوارت، الگوریتمی با کارایی بالا است که می‌تواند وزن‌های شبکه را در جهتی تغییر دهد که تا صد مرتبه سریع‌تر از سایر الگوریتم‌ها عمل نماید. الگوریتم لونبرگ - مارکوارت برای آموزش شبکه‌هایی است که هدف آن‌ها حداقل کردن متوسط مربع خطا است، مناسب است [Yu and Wilamowski, 2011].

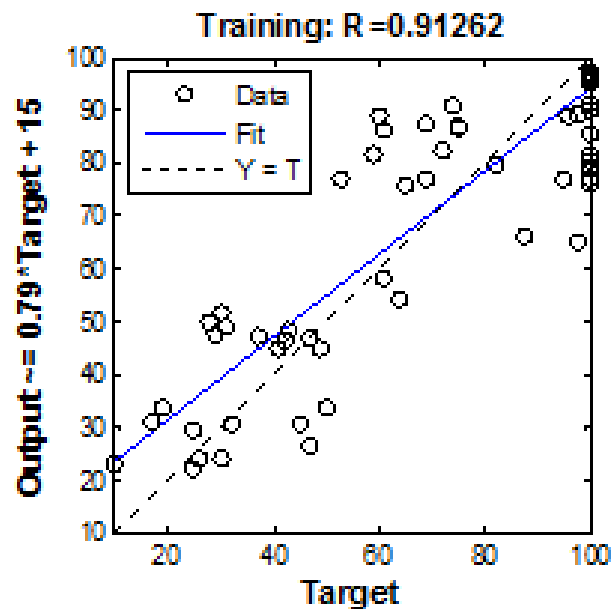
۵-۶- ارزیابی و اجرای شبکه

با توجه به مطالب بالا، مشخصات شبکه عصبی طراحی شده جهت تخمین اشباع‌شدگی را می‌توان به صورت جدول ۵-۴ خلاصه نمود:

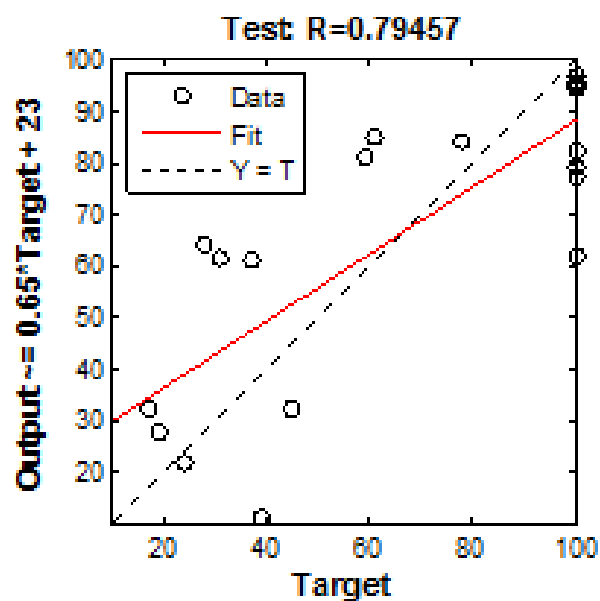
جدول ۵-۴: مشخصات شبکه طراحی شده	
پارامتر	مقدار
نوع شبکه	پس انتشار خطا
الگوریتم آموزش	لونبرگ-مارکوارت
تعداد لایه‌های پنهان	۱
تعداد نرون‌های لایه ورودی	۳
تعداد نرون‌های لایه پنهان	۵
تعداد نرون‌های لایه خروجی	۱
تعداد تکرار	۱۰۰
خطای هدف	صفر

نتیجه آموزش شبکه طراحی شده، در شکل ۵-۷ نشان داده شده است. در این شکل R ضریب همبستگی مقادیر پیش‌بینی شده اشباع‌شدگی توسط شبکه و مقادیر واقعی آن می‌باشد. ضریب همبستگی نزدیک ۱ بیانگر عملکرد خوب شبکه در مرحله آموزش می‌باشد.

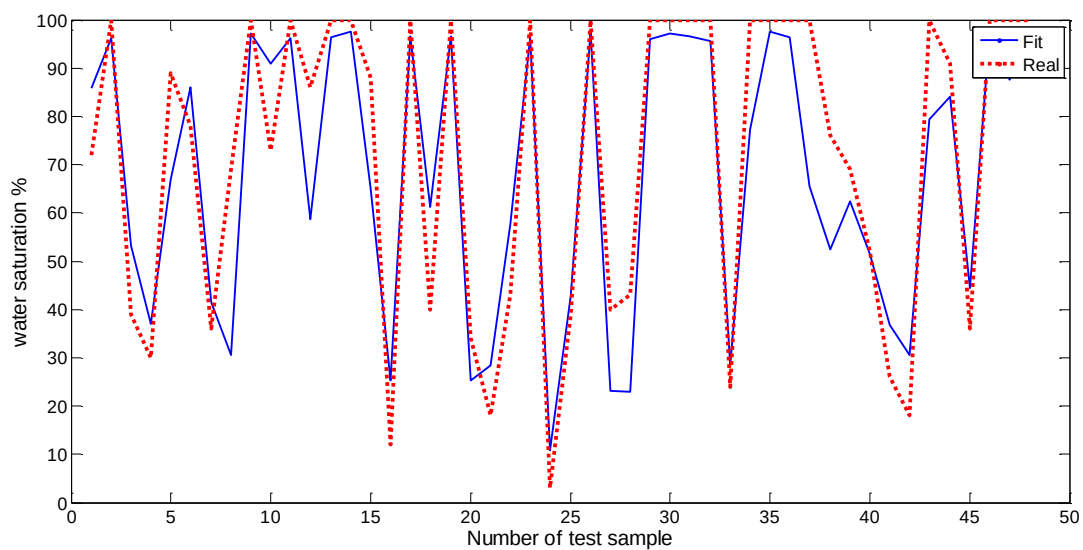
در مرحله بعد، شبکه آموزش داده شده برای پیش‌بینی داده‌های آزمون به کار رفت. همان‌طور که شکل ۵-۸ نشان می‌دهد ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی برابر ۰/۷۹ می‌باشد. این مقدار ضریب همبستگی بیانگر این است که همبستگی قابل قبول یا نسبتاً خوبی بین مقادیر اشباع‌شدگی واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی طراحی شده وجود دارد. شکل ۵-۹ مقایسه‌ای بین مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۷: نمودار رگرسیون خطی مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی در مرحله آموزش



شکل ۵-۸: نمودار رگرسیون خطی مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی در مرحله آزمون



شکل ۵-۹: مقایسه مقادیر اشباع‌شدگی پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی

با توجه به نتایج حاصل می‌توان نتیجه گرفت که شبکه عصبی طراحی شده با تقریب خوبی قادر به تخمین اشباع‌شدگی از آب مخزن هیدروکربوری مورد مطالعه با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه حاصل از

روش MT می‌باشد. علاوه بر مزایای ذکر شده برای شبکه‌های عصبی مصنوعی، این روش نقاط ضعفی از قبیل نیاز به تعیین پارامترهای شبکه به صورت آزمون و خطا، احتمال یافتن نقطه بهینه محلی به جای یافتن نقطه بهینه جامع را دارد. به همین منظور در ادامه جهت کاهش خطای تخمین، از روش مدل‌سازی فازی-عصبی که قادر به تشخیص دقیق‌تر روابط بین داده‌های موجود است، استفاده شده است.

۵-۷- سیستم‌های فازی

اصول منطق فازی در سال ۱۹۶۵ توسط دکتر لطفی‌زاده برای از بین بردن محدودیت‌های مجموعه‌های کلاسیک ارائه شد [Zadeh, 1965]. در مجموعه‌های کلاسیک، یک مقدار یا به مجموعه تعلق دارد یا ندارد. این نوع مجموعه‌ها در کار با مسائل علمی و کاربردهای صنعتی ناتوان بوده و قابلیت پایینی دارند. در منطق فازی، عضویت، تعریف بخشی^۱ دارد. در این مجموعه‌ها، یک عنصر با یک مقدار عضویت در بازه $[0, 1]$ ، عضو مجموعه فازی می‌باشد. در یک مجموعه کلاسیک همانند رابطه (۵-۳)، به هر عضو مجموعه عدد ۱ و به هر عضو خارج از مجموعه عدد ۰ نسبت داده می‌شود [Zadeh, 1965]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in A \\ 0 & \text{if } x \notin A \end{cases} \quad (5-3)$$

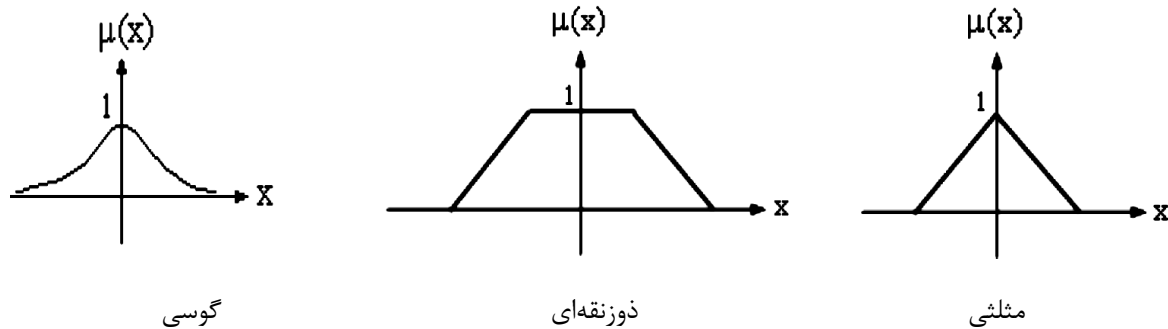
مجموعه‌های فازی تعمیم یافته مجموعه‌های کلاسیک هستند و تابع عضویت^۲ در این مجموعه‌ها، نگاشتی از اعضای مجموعه به فاصله ۰ و ۱ می‌باشد. تابع عضویت، اساس مجموعه‌های فازی است و هر مجموعه فازی را می‌توان توسط مجموعه‌ای از زوج‌های مرتب به صورت زیر نشان داد [Zadeh, 1965]:

$$A = \{(u, \mu_A(u)) | u \in U\} \quad (5-4)$$

1- Partial

2- Membership function

که در آن u عضو مجموعه فازی A و $\mu_A(u)$ درجه عضویت u در مجموعه فازی A می‌باشد. انتخاب نوع تابع عضویت برای مجموعه‌های فازی بر اساس تجربه شخصی انجام می‌پذیرد. شکل ۵-۱۰ تعدادی از توابع عضویت که برای مجموعه‌های فازی به کار می‌روند را نشان می‌دهد.

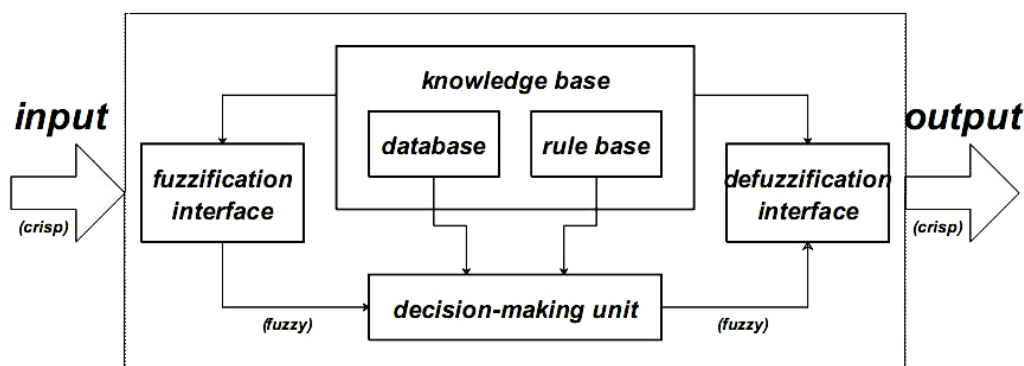


شکل ۵-۱۰: تعدادی از نمودارهای توابع عضویت مجموعه‌های فازی [Jang and Sun, 1995]

۵-۷-۱- ساختار سامانه فازی

سامانه‌های فازی، مجموعه‌ای از قواعد شرطی فازی هستند که توسط شخص خبره طراحی می‌شوند. کیفیت نهایی سامانه طراحی شده وابسته به نحوه طراحی آن توسط شخص خبره می‌باشد. برای کاهش خطای طراحی، غالباً از روش‌هایی مانند آزمون و خطا، روش‌های بهینه‌سازی نظیر الگوریتم ژنتیک و یا تکنیک‌های یادگیری استفاده می‌شود [Mikut et al., 2005; Cintra et al., 2009]. شکل (۵-۱۱) ساختار کلی یک سامانه استنتاج فازی^۱ را نمایش می‌دهد.

1- Fuzzy inference system (FIS)



شکل ۵-۱۱: ساختار کلی یک سامانه استنتاج فازی [Jang, 1993]

به طور کلی سیستم استنتاج فازی از واحدهای زیر تشکیل شده است [Jang, 1993]:

۱- **واحد فازی‌ساز**^۱: فازی‌سازها یک نقطه ورودی را گرفته و آن را به یک مجموعه فازی نگاشت

می‌دهند. اگر ورودی‌های سامانه فازی از انواع مطلق باشند، وظیفه این قسمت تبدیل این کمیت ورودی به درجه تعلق به توابع عضویت فازی می‌باشد. در حالتی که ورودی، یک کمیت فازی باشد این واحد میزان شباهت آن را به مجموعه‌های فازی ورودی تعیین می‌کند.

۲- **واحد پایگاه دانش**^۲: این قسمت هسته اصلی هر سامانه فازی بوده و در آن قواعد مربوط به استنتاج و تصمیم‌گیری نگهداری می‌شوند که شامل قواعد شرطی فازی به صورت اگر... آن‌گاه ... می‌باشد. یعنی در این قسمت اطلاعات موجود برای استنتاج توسط سامانه وجود دارد و واحد تصمیم‌گیری با مراجعه به این بخش تصمیم لازم را اتخاذ می‌نماید.

۳- **موتور استنتاج فازی**^۳: نحوه استنتاج و استخراج خروجی از روی ورودی‌ها و قواعد پایگاه دانش در این قسمت تعیین می‌شود. پس از استنتاج، نتیجه حاصل یک کمیت فازی است که باید روی آن پردازش نهایی صورت گیرد تا به صورت غیر فازی تبدیل شود.

1- fuzzification component
2- knowledge-based unit
3- decision-making unit

۴- واحد فازی‌زدایی^۱: نتیجه استنتاج از سامانه، یک کمیت فازی است که به تنهایی قابل استفاده

نمی‌باشد. وظیفه تبدیل کمیت فازی خروجی به یک کمیت غیر فازی بر عهده قسمت فازی‌زدا

است. در واقع، غیر فازی‌ساز خروجی موتور استنتاج را به یک نقطه قطعی نگاشت می‌دهد. این

نقطه، نماینده مجموعه فازی خروجی است.

دو روش استنتاج که معمولاً استفاده می‌شوند، روش‌های ممدانی^۲ و سوگنو^۳ می‌باشند. تفاوت بین این دو

روش استنتاجی در مشخصات بخش آنگاه^۴ (تابع عضویت خروجی) است. در روش ممدانی،

تابع عضویت خروجی‌ها، به صورت مجموعه فازی هستند [Mamdani, 1975; Mamdani and Assilian, 1975].

[Sugeno, 1985]. در روش سوگنو، توابع عضویت خروجی به صورت خطی یا ثابت است [1976, 1977].

همان‌طور که شکل ۵-۱۲ نشان می‌دهد، به طور خلاصه می‌توان گفت که در روش ممدانی:

"اگر X برابر با A و Y برابر با B باشند، آنگاه Z برابر با C خواهد بود."

که در آن X و Y ورودی‌های اول و دوم، و Z خروجی سامانه بوده و A و B و C مجموعه‌های فازی

هستند و در روش سوگنو:

"اگر X برابر با A و Y برابر با B باشند، آنگاه $Z = aX + bY + c$ است."

از جمله مزایای روش سوگنو می‌توان به کارآمدی این روش در انجام محاسبات، سازگاری با روش‌های

خطی و تضمین پیوستگی سطح خروجی اشاره نمود. بنابراین معمولاً برای استفاده از روش‌های تطبیقی

که برای سفارشی کردن توابع عضویت استفاده می‌شوند، در ساخت مدل‌های فازی از این روش استفاده

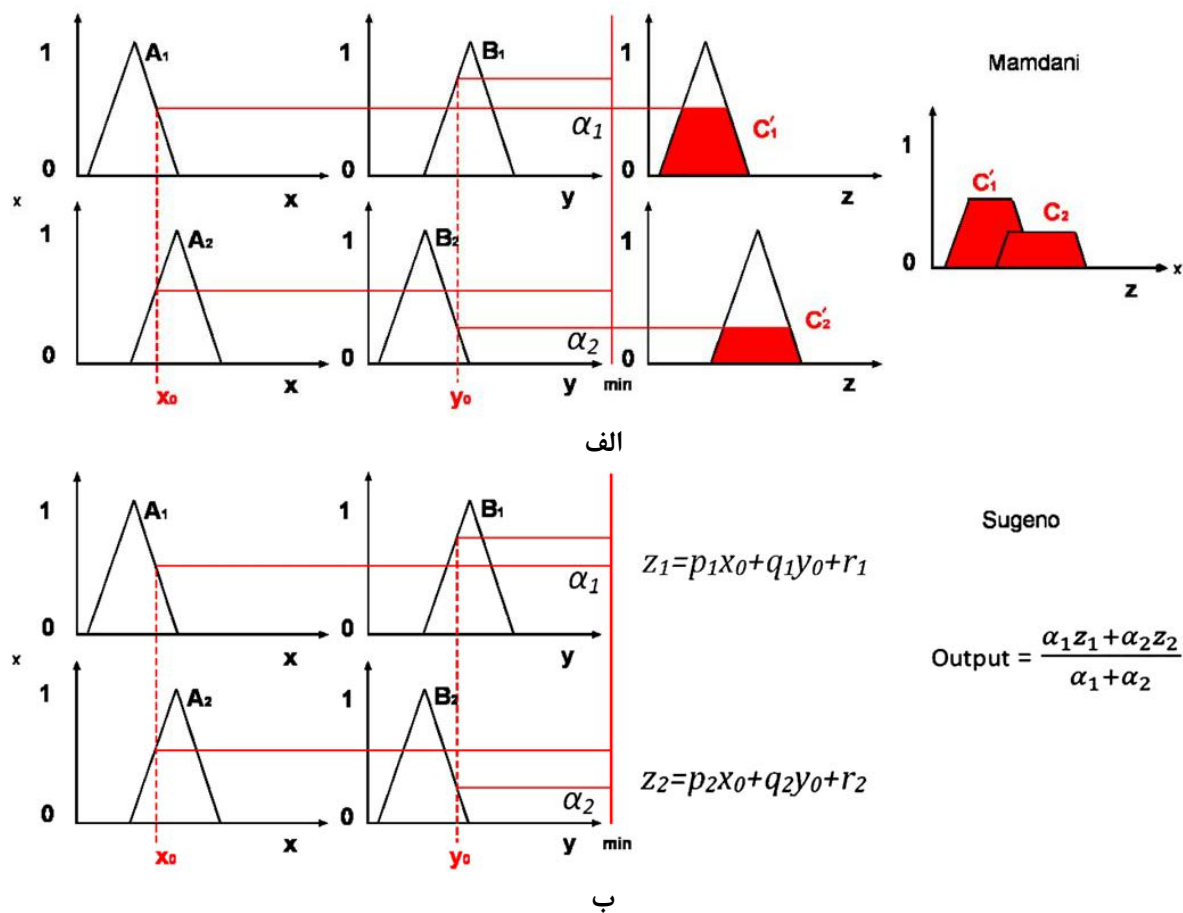
می‌کنند.

1- defuzzification unit

2- Mamdani method

3- Sugeno method

4- consequent part



شکل ۵-۱۲: نحوه عملکرد روش‌های استنتاج الف-ممدانی و ب-سوگنو [Kadkhodaie-Ilkhchi et al., 2009]

۵-۸- ترکیب شبکه عصبی با منطق فازی

یکی از بزرگ‌ترین معایب سیستم‌های استنتاج فازی، دشواری و عدم دقت در انتخاب توابع عضویت و ایجاد قوانین فازی است به ویژه زمانی که دانش خبره و مهارت لازم وجود ندارد. شبکه‌های عصبی با تکیه بر قابلیت یادگیری و توانایی پردازش موازی، قادر به حل مسائل پیچیده می‌باشند. اما این شبکه‌ها، توانایی استنتاج ندارند. در سامانه‌های فازی، مدل‌سازی کمیت‌ها به صورت کیفی و شهودی است. از مزایای سامانه‌های فازی، سادگی و قابلیت فهم و نیز توانایی استنتاج آن‌ها می‌باشد. اما این سامانه‌ها توانایی یادگیری ندارند. ترکیب سامانه‌های فازی و شبکه‌های عصبی منجر به ایجاد سامانه‌های ترکیبی عصبی-فازی شده که دارای قابلیت سامانه‌های فازی و شبکه‌های عصبی می‌باشد و ضعف‌های این دو

روش را پوشش می‌دهد [Jang, 1993]. سیستم‌های عصبی-فازی یکی از توانمندترین ابزارها برای تعیین قوانین فازی و تنظیم خودکار پارامترهای توابع است. بر خلاف سیستم‌های فازی که می‌توانند چندین خروجی داشته باشند، سیستم‌های عصبی-فازی تنها با یک خروجی اجرا می‌شوند.

سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)^۱ از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور طراحی نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند. این سیستم با توجه به توانایی در ترکیب قدرت زبانی یک سیستم فازی با قدرت عددی یک شبکه عصبی در مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده زمین‌شناسی بسیار قدرتمند عمل می‌کند.

۵-۹- سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS)

شکل ۵-۱۳ ساختار یک مدل ANFIS را که شامل ۵ لایه است نشان می‌دهد. در این شکل نرون‌های دایره‌ای، ثابت و نرون‌های مربعی، نرون‌های تطبیقی شبکه می‌باشند. پارامترهای نرون‌های تطبیقی از طریق آموزش تعیین می‌شوند.

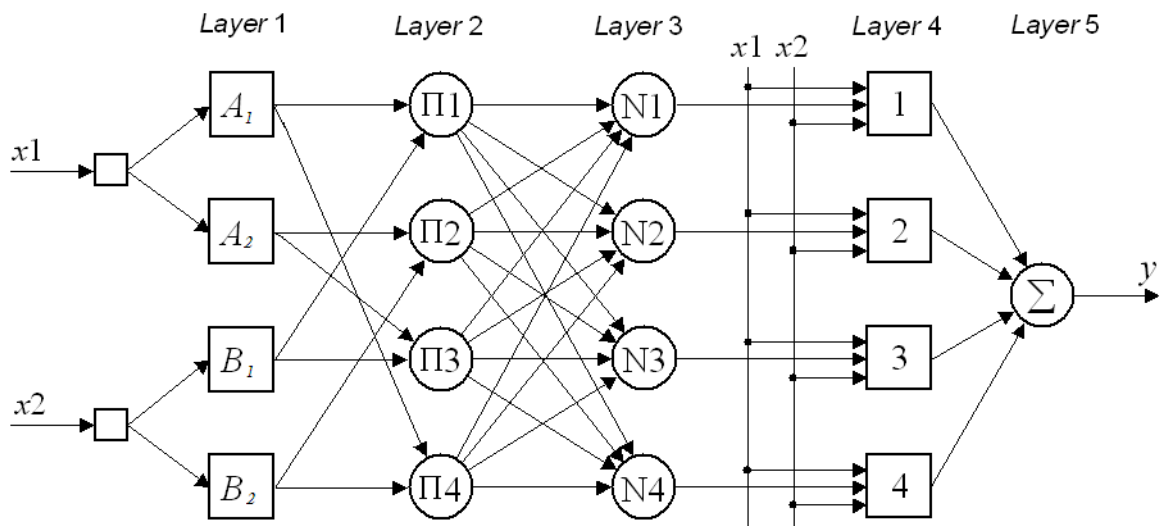
ساختار لایه‌های مختلف شبکه به صورت زیر توصیف می‌شوند:

لایه ۱: این لایه عمل فازی‌سازی را انجام می‌دهد. هر گره در این لایه، درجه عضویت یک متغیر ورودی را تولید می‌کند. خروجی نرون به صورت زیر تعیین می‌شود [Jang, 1993]:

$$OP_i^1 = \mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^{2b_i}} \quad (5-5)$$

در اینجا x ورودی گره i ، A_i مجموعه فازی این گره است که توسط شکل توابع عضویت این گره مشخص می‌شود. (a_i, b_i, c_i) مجموعه پارامترهایی هستند که تغییر شکل تابع عضویت را تنظیم می‌کنند.

1- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)



شکل ۵-۱۳: سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی (ANFIS) [Jang, 1993]

لایه ۲: هر نرون در این لایه، سیگنال‌های ورودی را به صورت رابطه (۵-۶) در هم ادغام کرده و خروجی آن، قدرت آتش^۱ هر قانون را نشان می‌دهد [Jang, 1993].

$$OP_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y) \quad (۵-۶)$$

لایه ۳: در این لایه با استفاده از رابطه (۵-۷) قدرت آتش هر قانون نرمالایز می‌شود [Jang, 1993]:

$$OP_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \quad (۵-۷)$$

لایه ۴: هر نرون i در این لایه، مطابق رابطه (۵-۸) سهم i -مین قانون را در خروجی مدل مشخص می‌سازد [Jang, 1993]:

$$OP_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (۵-۸)$$

1- firing strength

لایه ۵: این لایه شامل یک نرون است که توسط رابطه (۹-۵) خروجی کل سیستم را تعیین می‌کند. خروجی نرون این لایه یک عدد قطعی است [Jang, 1993].

$$OP_l^5 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (9-5)$$

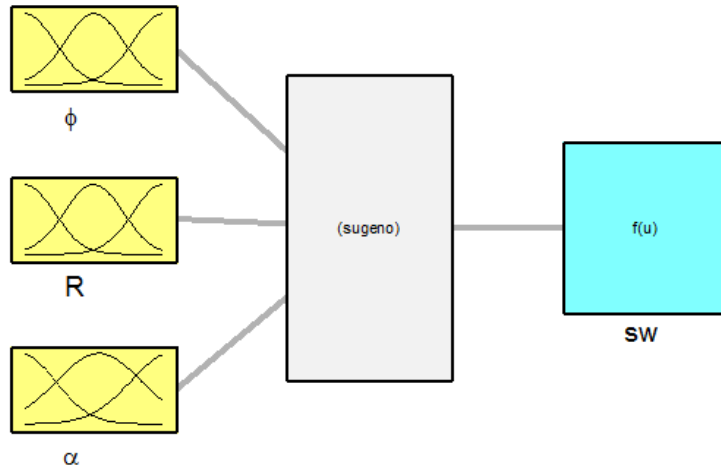
۵-۱۰- آموزش ANFIS

ANFIS، برای تنظیم پارامترهای خود از ترکیب الگوریتم کمترین مربعات^۱ و گرادیان کاهشی^۲ استفاده می‌کند. فرآیند تنظیم پارامترها شامل دو مسیر آموزشی است. در مسیر رفت، خروجی نرون‌ها به صورت لایه به لایه محاسبه شده و پارامترهای حاصل با استفاده از الگوریتم کمترین مربعات تعیین می‌شوند تا خروجی نهایی مشخص گردد. در مسیر برگشت، سیگنال‌های خطا انتشار می‌یابند و پارامترهای پیشین تنظیم می‌شوند [Jang, 1993].

۵-۱۱- تنظیم پارامترهای مدل ANFIS

ANFIS، در حقیقت یک شبکه‌ی عصبی پیش‌خور می‌باشد که از الگوریتم شبکه‌ی عصبی برای یادگیری و از منطق فازی برای نگاشتن پارامترهای ورودی بر خروجی استفاده می‌کند. به عبارت دیگر از طریق منطق فازی ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی را پیدا می‌کند. برای انجام مدل‌سازی اشباع‌شدگی آب توسط ANFIS، از نرم‌افزار MATLAB, 2012 استفاده شده است. پارامترهای ورودی و خروجی همانند روش شبکه عصبی انتخاب شدند. در اینجا نیز ۷۰٪ داده‌ها به عنوان داده‌های آموزشی و ۳۰٪ باقی‌مانده به عنوان داده‌های آزمون به نرم‌افزار معرفی شدند. در شکل ۵-۱۴ نمایشی از داده‌های ورودی و خروجی مدل سوگنو در روش ANFIS نشان داده شده است.

1- least squares estimator (LSE)
2- gradient descent



شکل ۵-۱۴: نمایش داده‌های ورودی و خروجی مدل ANFIS جهت پیش‌بینی اشباع‌شدگی آب

از آنجا که در مدل ANFIS، تعداد توابع عضویت، نوع توابع عضویت ورودی و خروجی و روش‌های بهینه‌سازی در یادگیری شبکه تأثیر بسزایی دارند، در این قسمت به بررسی میزان تأثیر این پارامترها در پاسخ نهایی مدل می‌پردازیم:

۵-۱۱-۱- بررسی نوع و تعداد توابع عضویت

پس از فراخوانی داده‌های آموزش به مدل، سیستم استنتاج فازی (FIS) را از نوع سوگنو انتخاب می‌کنیم. برای مقداردهی اولیه به FIS از روش طبقه‌بندی تورانه‌ای یا گرید^۱ استفاده کرده و سپس نوع و تعداد توابع عضویت را مشخص می‌کنیم. چون تعیین بهترین تعداد توابع عضویت ورودی و نوع توابع عضویت ورودی و خروجی بر اساس سعی و خطا انجام می‌شود، جهت بررسی میزان تأثیر نوع و تعداد توابع عضویت ورودی‌های مدل، چندین مدل ANFIS مختلف ساخته شد. نتایج این مدل‌ها در جدول ۵-۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل، اجرای مدل با تعداد ۷ تابع عضویت برای ورودی‌ها و از نوع گوسی، کمترین خطا (RMSE) را در مرحله آموزش نشان می‌دهد.

1- Grid partitioning

جدول ۵-۵: نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای توابع عضویت مختلف

ردیف	نوع تابع عضویت	تعداد توابع عضویت	RMSE
۱	TRi	۳	۱۰/۴
		۵	۶/۹۲
		۷	۶/۸۲
		۹	۹/۳۴
۲	Trap	۳	۸/۸۷
		۵	۶/۹۳
		۷	۶/۷۱
		۹	۱۳/۲۳
۳	Gbell	۳	۷/۵۱
		۵	۶/۶۶
		۷	۶/۴۳
		۹	۱۵/۱۳
۴	Gauss	۳	۹/۴۰۹
		۵	۶/۷
		۷	۶/۱۰۱
		۹	۲۳/۷۵
۵	Gauss2	۳	۸/۷
		۵	۶/۷
		۷	۶/۶
		۹	۱۲/۱
۶	Pi	۳	۸/۸۱
		۵	۶/۹۵
		۷	۶/۴
		۹	۱۲/۲۳
۷	Dsig	۳	۷/۷۶
		۵	۶/۱۹
		۷	۶/۲
		۹	۱۰/۰۸
۸	Psig	۳	۷/۴
		۵	۶/۱۹
		۷	۹/۸
		۹	۱۹/۰۱

پس از تعیین نوع و تعداد توابع عضویت ورودی‌های مدل، نوبت به تعیین نوع تابع عضویت خروجی مدل می‌رسد. مدل ANFIS انتخاب شده با تعداد ۷ تابع عضویت از نوع گوسی برای تعیین بهترین نوع تابع عضویت خروجی با دو نوع خطی و ثابت مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج جدول ۵-۶ نشان می‌دهد که مدل ANFIS معرفی شده در حالتی که تابع عضویت خروجی از نوع خطی باشد کمترین خطا را در مرحله آموزش دارد.

جدول ۵-۶: نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای توابع عضویت مختلف خروجی

ردیف	نوع تابع عضویت	RMSE
۱	ثابت	۱۱/۶۳
۲	خطی	۶/۱۰۱

۵-۱۱-۲- بررسی تأثیر روش‌های بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی برای آموزش پارامترهای تابع عضویت استفاده می‌شوند. برای تعیین بهترین روش بهینه‌سازی مدل ANFIS انتخاب شده با تعداد ۷ تابع عضویت از نوع گوسی برای ورودی‌ها و تابع عضویت خطی برای خروجی، برای دو روش بهینه‌سازی پس انتشار و روش هیبرید^۱ که ترکیبی از روش کاهش شیب پس انتشار برای توابع عضویت ورودی و روش حداقل مربعات برای توابع عضویت خروجی است، مورد آزمایش قرار گرفت. جدول ۵-۷ نتایج مدل پیشنهاد شده با استفاده از دو روش بهینه‌سازی هیبرید و

جدول ۵-۷: نتایج حاصل از اجرای مدل ANFIS برای روش‌های بهینه‌سازی هیبرید و پس انتشار

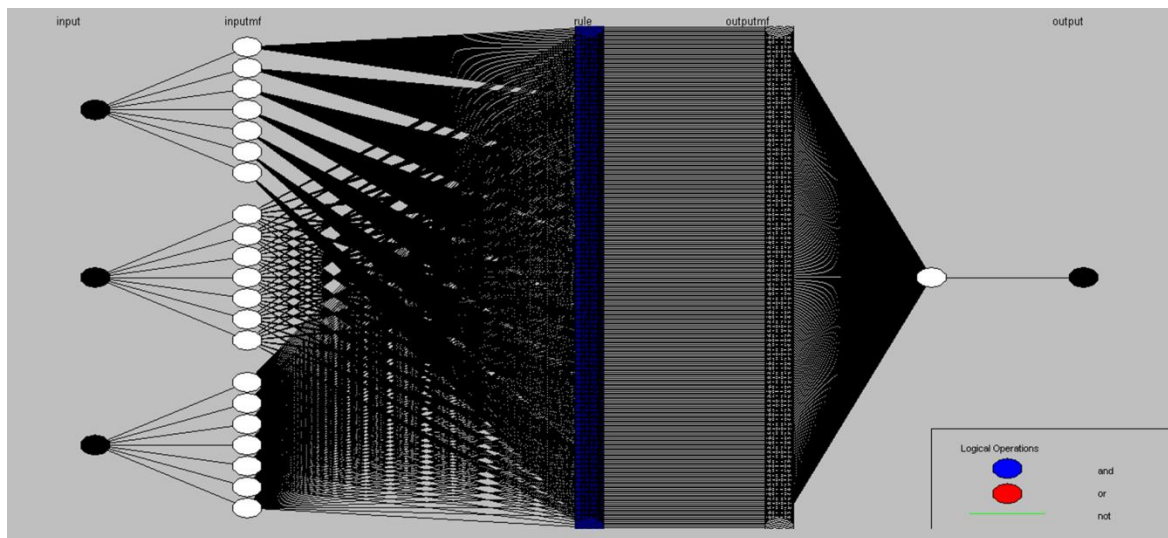
ردیف	نوع روش بهینه‌سازی	RMSE
۱	هیبرید	۶/۱۰۱
۲	پس انتشار	۱۹/۶۳

1- hybrid

پس انتشار را در مرحله آموزش نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از مقایسه دو روش هیبرید و پس انتشار، روش بهینه‌سازی هیبرید جهت مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب انتخاب شد.

۵-۱۲- مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب با استفاده از ANFIS

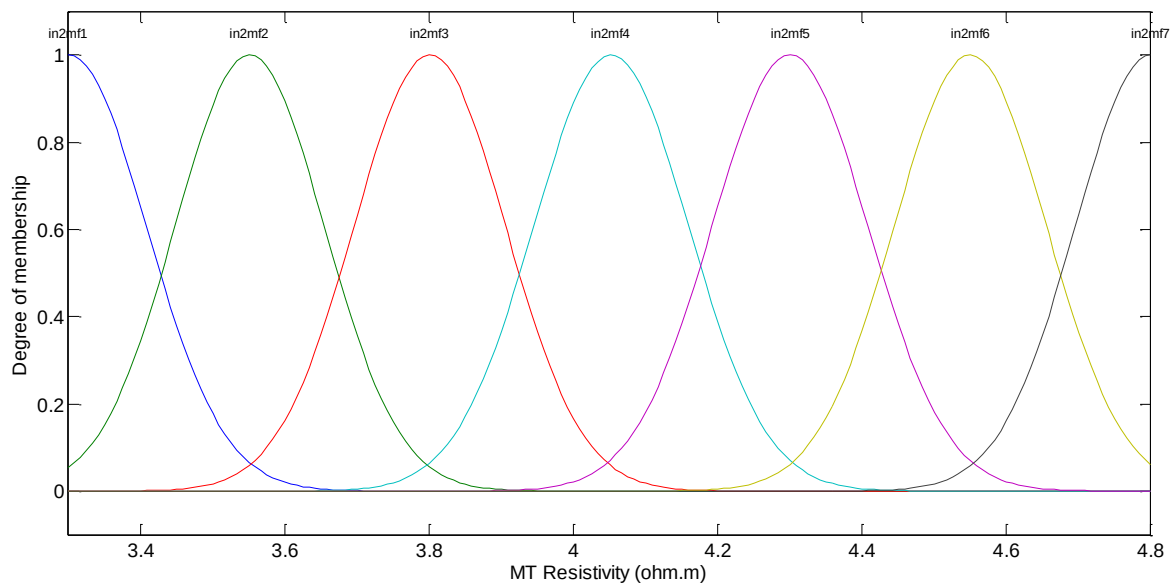
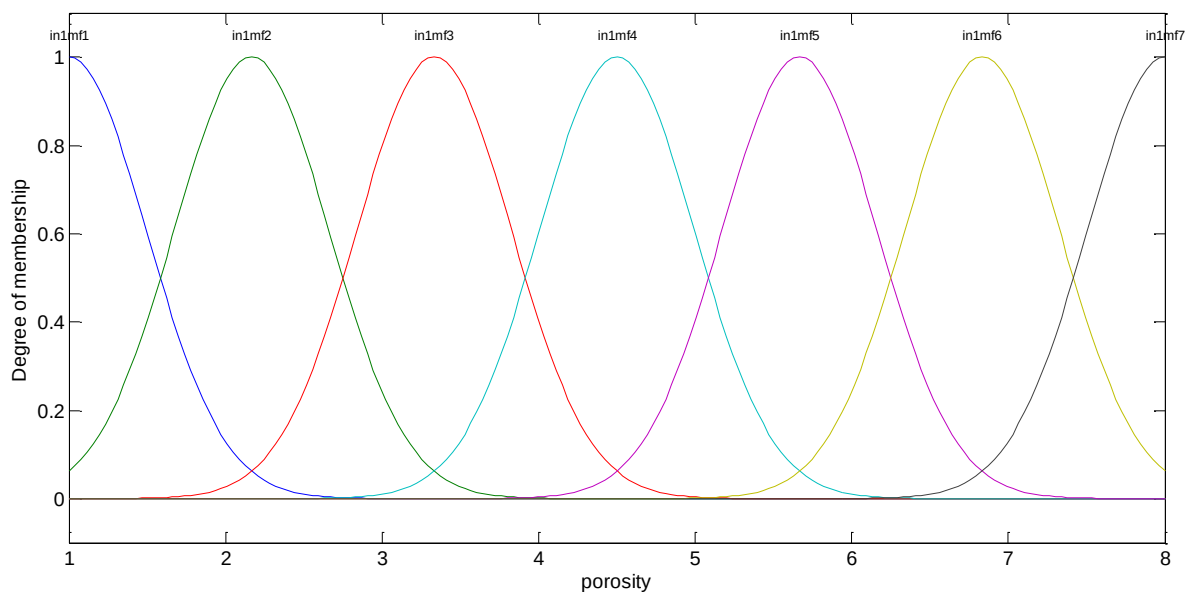
بررسی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر آموزش مدل ANFIS منجر به انتخاب شبکه بهترین مدل جهت تخمین اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه حاصل از روش MT گردید. مدل انتخاب شده شامل تعداد ۷ تابع عضویت از نوع گوسی برای داده‌های ورودی و تابع عضویت خطی برای داده‌های خروجی می‌باشد. شکل ۵-۱۵ ساختار سیستم ANFIS پیشنهاد شده را نشان می‌دهد که شامل ۳ ورودی، یک خروجی و قواعد فازی می‌باشد.

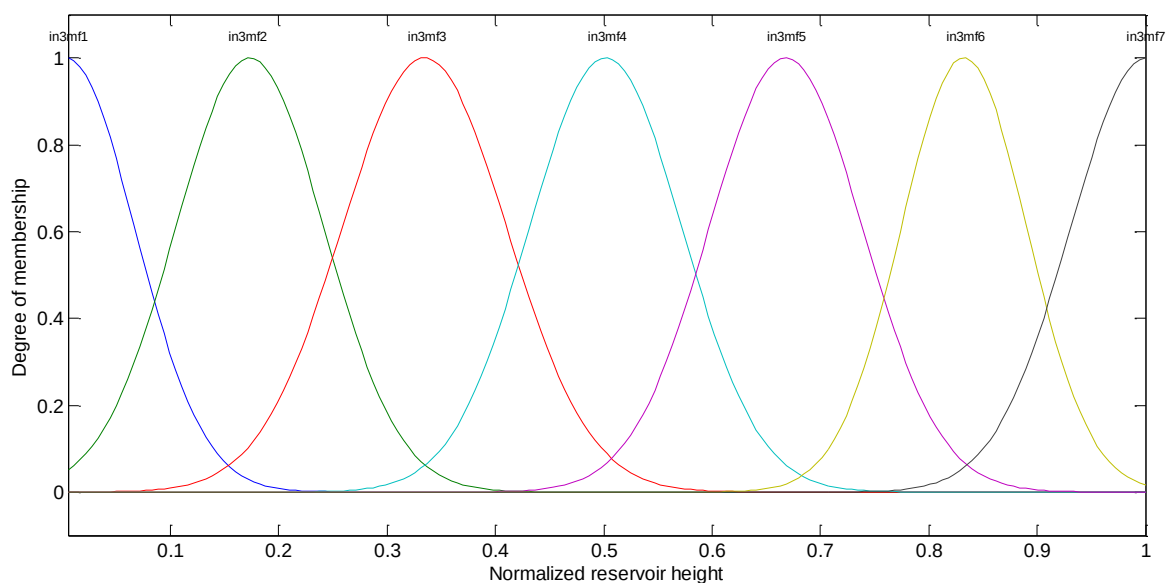


شکل ۵-۱۵: ساختار سیستم ANFIS برای ارتباط بین داده‌های ورودی و خروجی

بعد از تولید FIS می‌توان شکل توابع عضویت مربوط به هر کدام از ورودی‌ها را مشاهده نمود. شکل ۵-۱۶ توابع عضویت استخراج شده توسط ANFIS برای پارامترهای ورودی تخلخل، مقاومت ویژه حاصل از روش MT و ارتفاع مخزن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر متغیر ورودی توسط ۷

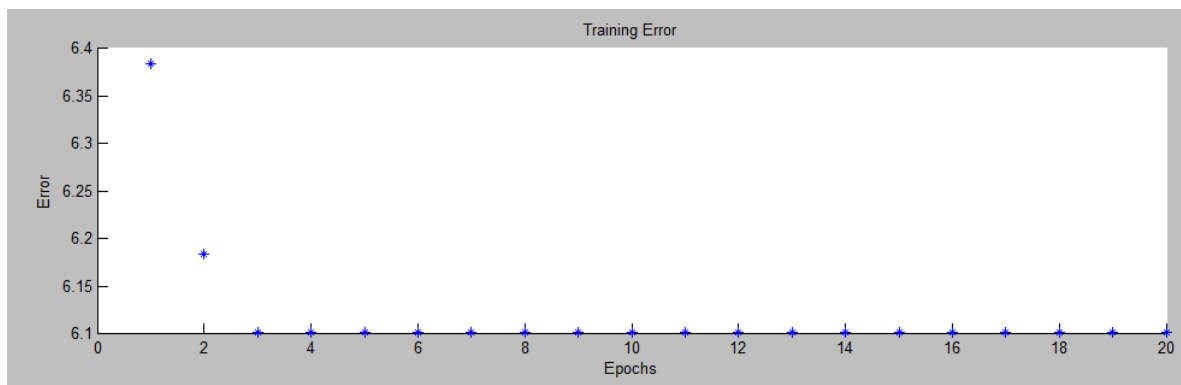
تابع عضویت به سیستم معرفی شده است. تابع عضویت پارامتر خروجی (اشباع‌شدگی از آب) به صورت خطی انتخاب گردید.





شکل ۵-۱۶: توابع عضویت استخراج شده توسط ANFIS برای پارامترهای ورودی تخلخل، مقاومت ویژه حاصل از روش MT و ارتفاع مخزن

به منظور بهینه‌سازی پارامترهای ANFIS برای آموزش FIS از روش هیبرید که ترکیبی از روش پس انتشار و حداقل مربعات است، استفاده شده است. دامنه تغییرات خطا^۱ به صورت پیش فرض برابر صفر انتخاب شده است. این مقدار، ملاکی برای توقف فرآیند آموزش می‌باشد. به طوری که زمانی که خطای داده‌های آموزش در این محدوده قرار گیرد، فرآیند آموزش متوقف می‌شود. شکل ۵-۱۷ مقدار خطای آموزش را در مقابل تعداد تکرار داده‌های آموزش نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۵-۱۷ مشخص است خطای آموزش مدل (RMSE) در پایان ۲۰ دوره تکرار آموزش به کمترین میزان، ۶/۱، رسید.

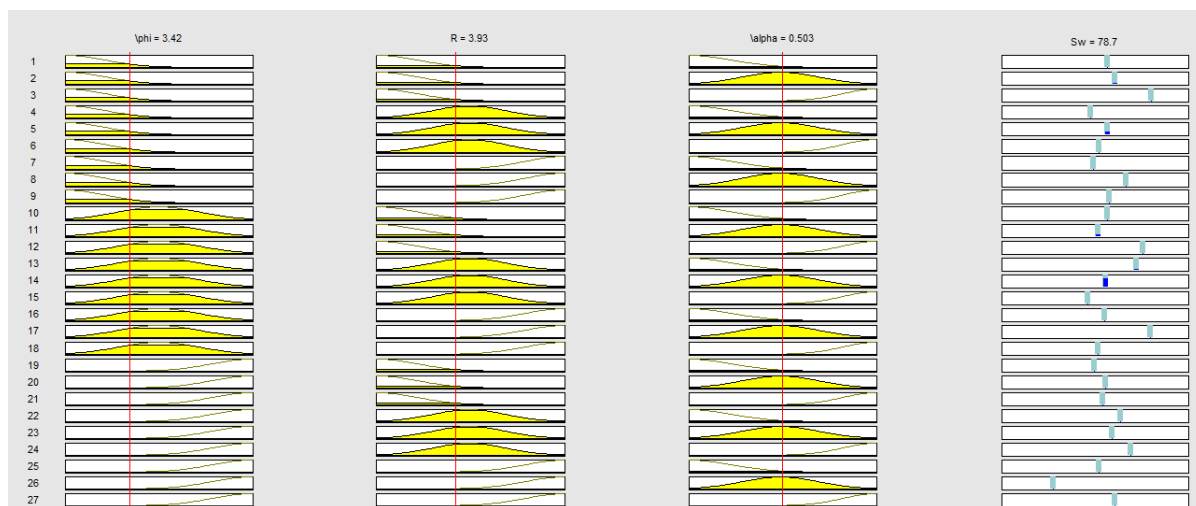


شکل ۵-۱۷: منحنی مقدار خطای آموزش در ۲۰ تکرار داده‌های آموزش ANFIS

شکل ۵-۱۸ طرح شماتیکی^۱ از قوانین استنتاج فازی سوگنو ساخته شده توسط مدل ANFIS را نشان می‌دهد که ورودی‌ها و خروجی که FIS را توصیف می‌کنند. این شکل، قوانین مورد استفاده در نحوه ترکیب ورودی‌ها و محاسبه خروجی مدل ANFIS را نشان می‌دهد. هر سطر شکل، نشان دهنده یک قانون است که از سه تابع عضویت مربوط به هر کدام از سه ورودی (تخلخل، مقاومت ویژه حاصل از روش MT و ارتفاع مخزن) تشکیل شده است. ستون آخر، خروجی مدل (اشباع‌شدگی از آب) می‌باشد. برای هر تابع عضویت، محدوده مقادیر ورودی روی محور X و مقدار تابع عضویت روی محور Y مشخص شده است. شکل ۵-۱۹ نتایج مدل ANFIS را برای داده‌های آموزش نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، مدل ANFIS طراحی شده به خوبی آموزش دیده و قادر به پیش‌بینی مقادیر اشباع‌شدگی از آب می‌باشد.

شکل ۵-۲۰ سطح منحنی به وجود آمده بین توابع عضویت ورودی‌ها و خروجی مدل ANFIS را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، خروجی مدل، رفتاری پیچیده و غیر خطی بر اساس رابطه بین ورودی‌های مدل دارد. این منحنی، نحوه ترکیب ورودی‌های مدل با یکدیگر را نشان می‌دهد.

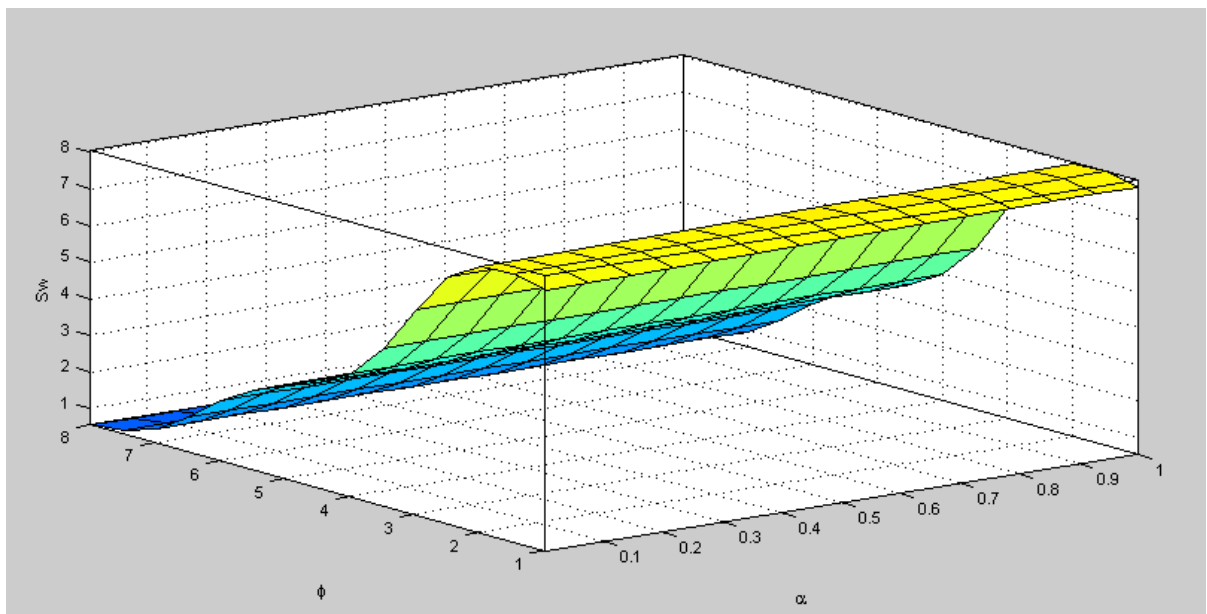
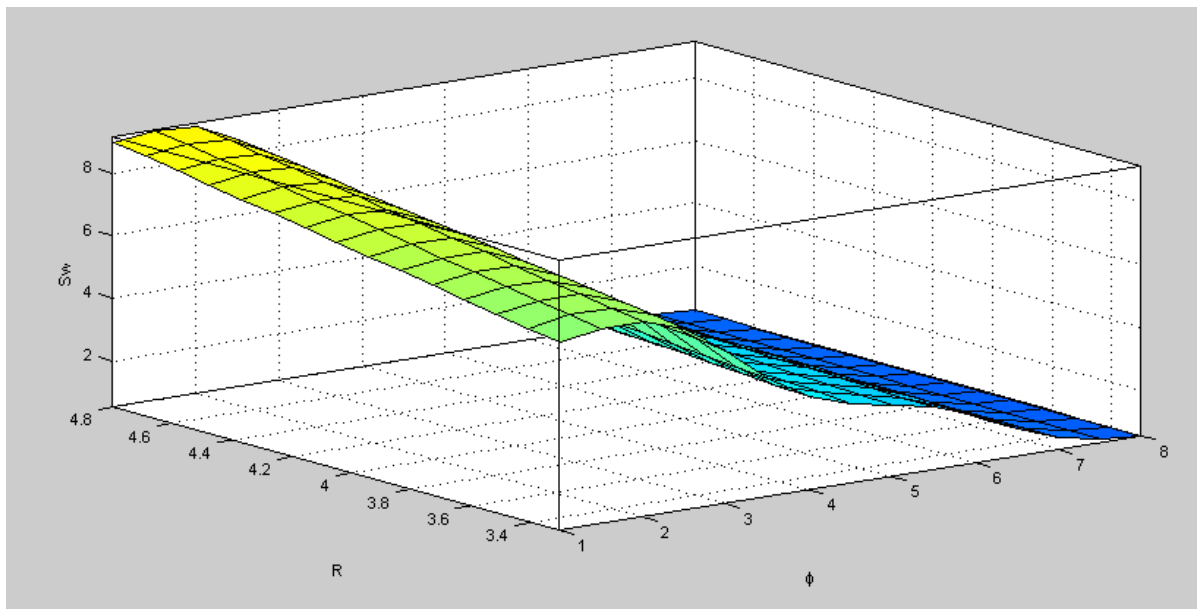
1- rule viewer

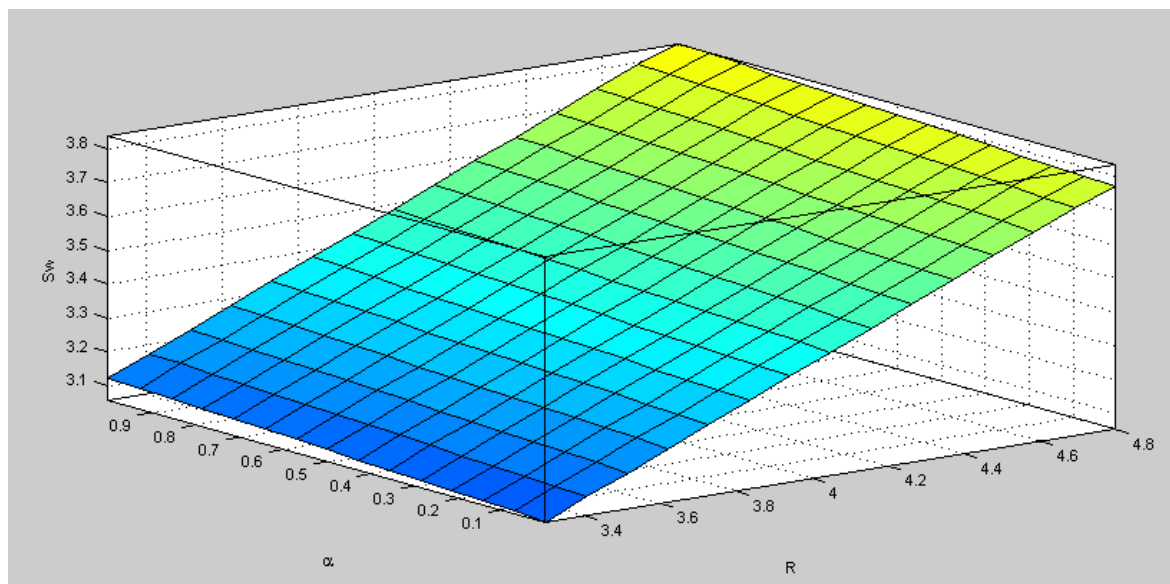


شکل ۵-۱۸: طرح شماتیک قوانین استنتاج فازی سوگنو که توسط مدل ANFIS ساخته شده است.



شکل ۵-۱۹: نتایج مدل ANFIS برای داده‌های آموزش

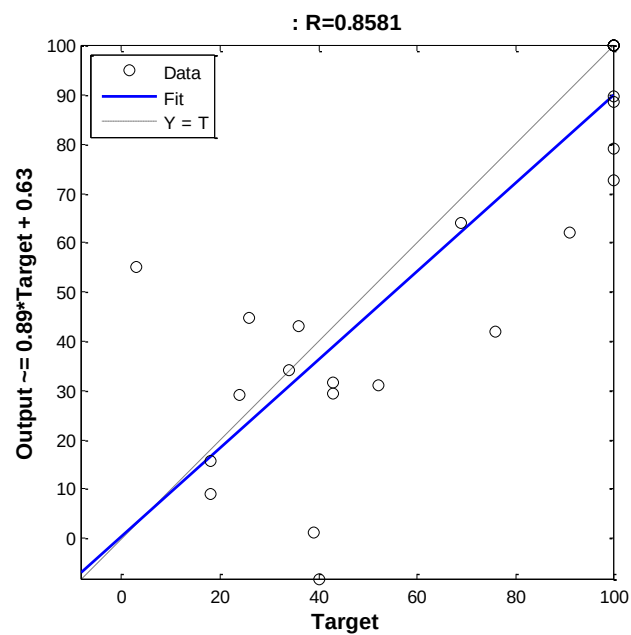




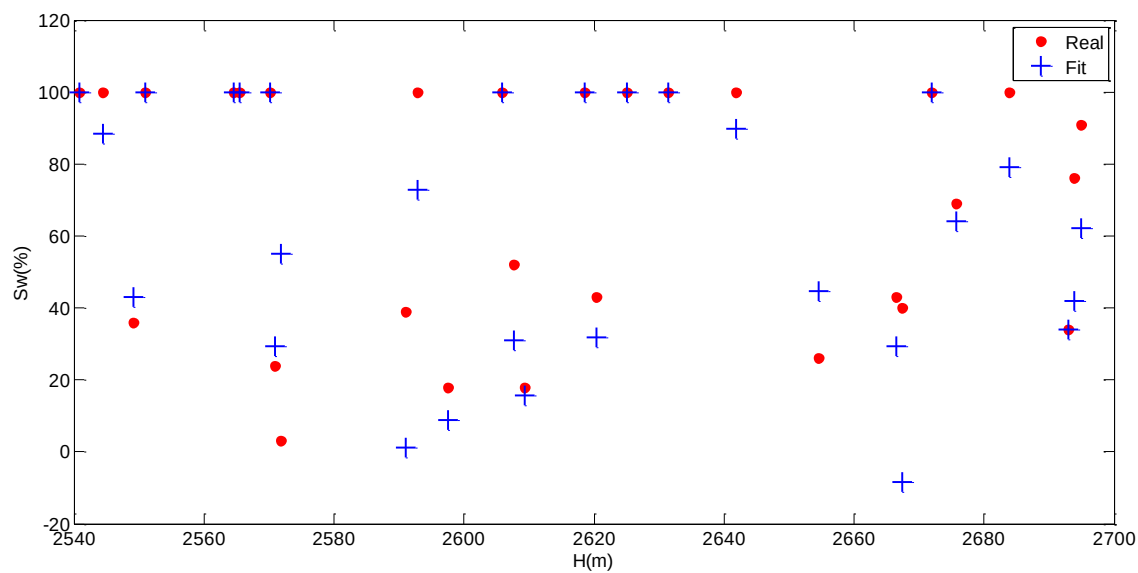
شکل ۵-۲۰: سطح منحنی بین توابع عضویت ورودی و خروجی

پس از ایجاد مدل ANFIS و آموزش آن در این مرحله نوبت به سنجش مدل با داده‌های آزمون می‌رسد. داده‌های آزمون که ۳۰ درصد کل داده‌ها را تشکیل می‌دهند به مدل ANFIS فراخوانی و مدل اجرا گردید. شکل ۵-۲۱ همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده به وسیله مدل ANFIS و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی ۰/۸۵ بین دو سری داده واقعی و تخمین زده شده جود دارد. این بدان معناست که روش ANFIS قادر است با دقت خوبی مقادیر اشباع‌شدگی از آب را با استفاده از مقاومت ویژه حاصل از روش MT، تخلخل و ارتفاع مخزن تخمین بزند.

شکل ۵-۲۲ مقایسه بین مقادیر اشباع‌شدگی واقعی و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل ANFIS را در مرحله آزمون نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر اشباع‌شدگی واقعی با علامت دایره و مقادیر تخمین زده شده با علامت به علاوه در مقابل عمق مخزن مشخص شده‌اند.



شکل ۵-۲۱: همبستگی بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده به وسیله مدل ANFIS و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی از آب در مرحله آزمون



شکل ۵-۲۲: مقایسه بین مقادیر اشباع‌شدگی واقعی و مقادیر تخمین زده شده توسط مدل ANFIS در مرحله آزمون

همان‌طور که در شکل ۵-۲۲ مشخص است انطباق قابل قبولی بین دو سری داده وجود دارد و با اطمینان می‌توان گفت که مدل ANFIS قادر به پیش‌بینی مقادیر اشباع‌شدگی از آب در مخزن مورد مطالعه بوده است. بنابراین می‌توان گفت که با در دست داشتن تعداد کافی از مقادیر تخلخل، ارتفاع مخزن و مقاومت ویژه حاصل از روش MT در یک مخزن با شرایط مشابه می‌توان به تخمین قابل قبولی از پارامتر اشباع‌شدگی از آب دست یافت. بنابراین نیاز به داده‌های مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی تا حد زیادی کاهش می‌یابد و با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه سطحی می‌توان پارامتر اشباع‌شدگی از آب مخزن را تا حدودی تخمین زد.

فصل ششم: جمع‌بندی،

نتیجه‌گیری و

پیشنهادهات

۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این رساله، تخمین اشباع‌شدگی از آب مخزن هیدروکربوری با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه برداشت شده توسط روش MT و تا حدودی رفع نیاز به داده‌های مغزه و نگارهای چاه‌پیمایی که با هزینه زیاد حاصل می‌شوند، می‌باشد. از آن‌جا که بیش از نیمی از ذخایر هیدروکربوری در مخازن کربناته قرار دارند و بخش عظیمی از مخازن هیدروکربوری ایران کربناته می‌باشند، مخزن کربناته آسماری واقع در میدان گچساران جهت انجام مطالعه و بررسی انتخاب گردید. داده‌های MT در این مخزن کربناته در قالب پروژه کلی تعیین و شناسایی ساختمان زمین‌شناسی سراب توسط مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران برداشت و پردازش شده است. اطلاعات چاه‌نگاری دو چاه اکتشافی A با موقعیت نامعلوم و چاه شماره ۱۱۵ نزدیک به خط ۸۸۰۵ برداشت MT نیز در اختیار قرار گرفت.

فیزیک سنگ الکتریکی، با استفاده از مدل‌های ریاضی به برقراری ارتباط بین ویژگی‌های الکتریکی و مخزنی سنگ‌ها می‌پردازد و بدون انجام آزمایشات مغزه شرایط سازندها را پیش‌بینی می‌نماید. جهت دستیابی به هدف کلی این رساله که تعیین مدل فیزیک سنگ الکتریکی مناسب برای مخزن کربناته مورد مطالعه می‌باشد، از داده‌های چاه اکتشافی A استفاده شد.

اطلاعات چاه‌نگاری، زمین‌شناسی و پتروفیزیکی چاه اکتشافی A در مخزن مورد مطالعه به منظور بررسی اثر عوامل کنترل‌کننده اشباع‌شدگی و نقش آن بر تغییرات مقاومت ویژه از طریق سنجش رابطه بین مقاومت ویژه الکتریکی واقعی سازند، R_t ، حاصل از نگار LLD و پارامترهای مخزن، مورد تحلیل کیفی و کمی قرار گرفت.

در ادامه، مدل فیزیک سنگ محیط مؤثر تفاضلی که تغییرات هدایت الکتریکی سنگ را به ازای تغییرات تمام اجزاء سنگ در نظر می‌گیرد، جهت توصیف رابطه بین مقادیر R_t و پارامترهای مخزن انتخاب گردید.

در مخزن کربناته مورد مطالعه که تقریباً عاری از شیل است و به صورت مخلوطی از سنگ رسانی میزبان و سیال داخل آن می باشد، مدل فیزیک سنگ محیط مؤثر تفاضلی به مدل آرچی تبدیل شد.

سه پارامتر سیمان شدگی (m)، توان اشباع (n) و پیچاپیچی (a)، ضرایب یا پارامترهای آرچی نامیده می شوند. رابطه آرچی حساسیت زیادی نسبت به تغییرات این پارامترها دارد به طوری که تغییر اندکی در هر یک از این ضرایب موجب ایجاد خطای قابل ملاحظه در محاسبه اشباع شدگی از آب می شود. بنابراین این پارامترها باید به صورت دقیق تعیین شوند. جهت تعیین پارامترهای آرچی از روش الگوریتم ژنتیک که توانایی محاسبه هم زمان این پارامترها را با دقت و سرعت زیاد دارد، استفاده گردید.

از آنجا که در مخازن کربناته به دلیل بافت، شکل و نحوه توزیع حفرات، ضرایب آرچی نمی توانند مقادیر ثابتی داشته باشند. بدین منظور، در مرحله بعد به بررسی تغییرپذیری رفتار داده ها در فواصل عمقی مختلف و پس از آن اثر لیتولوژی بر مقادیر پارامترهای مدل آرچی در هر کدام از سه زون سنگی افق آسماری پرداخته شد.

جهت شناسایی عمق قرارگیری هر کدام از این سه زون زمین شناسی با استفاده از داده های R_f ، از روش تجزیه و تحلیل فرکتال استفاده شد. با بررسی تغییرات امتداد داده های R_f ، روندهای تغییرات موجود در این داده ها مشخص گردید و منشأ ایجاد این تغییرات که مربوط به تغییر عمق زون های زمین شناسی در ستون هیدروکربوری مورد مطالعه است، شناخته شد.

در ادامه روش ژنتیک الگوریتم جهت تعیین پارامترهای آرچی برای هر کدام از سه زون شناخته شده به صورت جداگانه اجرا گردید. در هر کدام از این زون ها، پارامترهای مدل آرچی مقادیر مختلف دارند. با استفاده از روش فرکتال و کاربرد روش ژنتیک الگوریتم برای تعیین پارامترهای آرچی در هر کدام از زون های شناخته شده، ضرایب مدل آرچی که به نقطه اندازه گیری و سنگ شناسی محیط وابسته اند و به

طور کلی ناشناخته‌اند بدون تحلیل نمونه‌های سنگی با خطای کم تعیین شدند. نتایج حاصل در این مرحله نشان می‌دهد که پارامتر ارتفاع مخزن می‌تواند در تعیین اشباع‌شدگی آب مخزن تأثیرگذار باشد. در مرحله بعد، پارامتر ارتفاع مخزن را به عنوان یک پارامتر متغیر در معادله آرچی وارد شد و با انتخاب این معادله به عنوان تابع برازش الگوریتم ژنتیک به حل معادله جدید و تعیین پارامترهای آن پرداخته شد. نتایج حاصل از تعیین پارامترهای معادله اصلاح شده حاصل آرچی نشان می‌دهد که این مدل به خوبی قادر به تعیین مقادیر اشباع‌شدگی از آب مخزن می‌باشد.

پس از تعیین پارامترهای مرتبط با تغییرات اشباع‌شدگی از آب مخزن مورد مطالعه در این مرحله نوبت به مدل‌سازی اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه MT می‌رسد. برای رسیدن به این هدف از شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده شد. شبکه عصبی انتخاب شده، پرسپترون چند لایه (MLP) با الگوریتم پس انتشار خطا (BP) می‌باشد. خروجی شبکه عصبی را اشباع‌شدگی از آب و ورودی‌های شبکه را پارامترهای مقاومت ویژه MT، ارتفاع مخزن و تخلخل در نظر می‌گیریم.

جهت استفاده از داده‌های MT در تخمین اشباع‌شدگی، با استفاده از نرم افزار پترل، چاه ۱۱۵ روی خط ۸۸۰۵ برداشت MT منتقل گردید. در این چاه فرضی در اعماقی که اشباع‌شدگی ثبت شده است، مقادیر مقاومت ویژه MT نیز ثبت شد. از بین این داده‌ها، ۷۰ درصد جهت آموزش و ۳۰ درصد جهت تست شبکه عصبی به صورت تصادفی انتخاب شدند.

پس از تعیین نوع شبکه، در مرحله بعد تعداد لایه‌های پنهان، تعداد نرون‌ها در هر کدام از لایه‌های ورودی، پنهان و خروجی و نوع روش آموزش مشخص گردید. شبکه با یک لایه پنهان به عنوان بهترین شبکه در پیش‌بینی اشباع‌شدگی در نظر گرفته شد. تعداد نرون‌های لایه ورودی ۳ و لایه خروجی ۱ انتخاب شد. برای لایه میانی، تعداد نرون‌های مختلفی آزمایش گردید. در نهایت شبکه با تعداد ۵ نرون در لایه میانی، به عنوان بهترین شبکه انتخاب گردید. بعد از مراحل سعی و خطا، تابع انتقال یا فعال‌ساز

نرون‌های لایه‌های میانی، از نوع زیگموئید و تابع انتقال نرون‌های لایه خروجی از نوع تابع خطی انتخاب شد. برای آموزش شبکه، الگوریتم لونیگ-مارکوارت (Trainlm) انتخاب گردید که در مسائل تخمین، کارایی بالایی دارد.

ضریب همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر واقعی در مرحله آموزش و آزمون به ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۰/۷۹ می‌باشد. که بیانگر این است که همبستگی نسبتاً خوبی بین مقادیر اشباع‌شدگی واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی طراحی شده وجود دارد.

به دلیل این که شبکه عصبی پرسپترون چند لایه مقادیر وزن خود را به صورت تصادفی در نظر می‌گیرد ممکن است در طی فرآیند آموزش در حداقل محلی گرفتار شود که در نهایت باعث می‌شود شبکه خوب آموزش ندیده و کارایی لازم را نداشته باشد. در ادامه جهت تخمین اشباع‌شدگی از آب از روش ANFIS استفاده شد.

پارامترهای ورودی و خروجی به مدل همانند روش شبکه عصبی انتخاب شدند. در مدل ANFIS، تعداد توابع عضویت، نوع توابع عضویت ورودی و خروجی و روش‌های بهینه‌سازی در یادگیری شبکه تاثیر بسزایی دارند. سیستم استنتاج فازی (FIS) از نوع سوگنو انتخاب شد. اجرای مدل با تعداد ۷ تابع عضویت برای ورودی‌ها و از نوع گوسی، کمترین خطا (RMSE) را در مرحله آموزش نشان می‌دهد. تابع عضویت خروجی از نوع خطی انتخاب شد. روش بهینه‌سازی هیبرید که ترکیبی از روش کاهش شیب پس انتشار برای توابع عضویت ورودی و روش حداقل مربعات برای توابع عضویت خروجی است برای آموزش FIS انتخاب گردید. بین مقادیر اشباع‌شدگی از آب پیش‌بینی شده به وسیله مدل ANFIS و مقادیر واقعی اشباع‌شدگی ضریب همبستگی ۰/۸۵ وجود دارد. این بدان معناست که روش ANFIS قادر است با دقت خوبی مقادیر اشباع‌شدگی از آب را با استفاده از مقاومت ویژه MT تخمین بزند.

از آن چه به صورت خلاصه گفت شد می توان نتیجه گرفت که در مخزن کربناته مورد مطالعه، عوامل کیفی و کمی کنترل کننده اشباع شدگی شامل چگالی و ویسکوزیته نفت، کیفیت مخزن از نظر پارامترهای تخلخل، تراوایی، فشار مویینگی و توزیع ابعاد حفرات و موقعیت قرارگیری مخزن نسبت به زون انتقال می باشد. بنابراین زون A1 مخزن آسماری که کیفیت مخزن در آن بالاتر است از نظر پتانسیل هیدروکربوری توان بیشتری نسبت به زون های A2 و B1 دارد.

مدل فیزیک سنگ محیط مؤثر تفاضلی قادر است که تغییرات اشباع شدگی که در اثر تغییرات توزیع ذرات و جهت گیری آن ها، میزان شیل موجود در محیط و دما و فشار محیط است را توصیف نماید. این مدل در مخزن کربناته مورد مطالعه که فاقد شیل می باشد و مخزن ترکیبی از ذرات سنگ و سیال درون آن است، به مدل آرچی تبدیل می شود.

روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک قادر است به صورت هم زمان و با دقت مناسب، پارامترهای مدل آرچی را تخمین بزند. روش فرکتال، با تجزیه و تحلیل داده های مقاومت ویژه واقعی سازند، R_f ، حد آستانه ای شروع هر کدام از سه زون مخزن آسماری را که در ستون هیدروکربور چاه A واقع شده اند، روی نگار چاه پیمایی LLD تعیین نمود. کاربرد الگوریتم ژنتیک در تعیین پارامترهای آرچی در هر کدام از این زون های سه گانه مخزن مورد مطالعه و بررسی تغییرات پارامتر اشباع شدگی نسبت به تغییرات عمق مخزن نشان داد که پارامتر عمق مخزن می تواند در دقت تعیین اشباع شدگی تأثیرگذار باشد. با اصلاح مدل آرچی برای مخزن کربناته مورد مطالعه و دخالت دادن پارامتر عمق مخزن در این رابطه، مقادیر اشباع شدگی از آب محاسبه شده توسط این مدل با مقادیر واقعی اشباع شدگی همبستگی بالایی را نشان می دهد.

روش های شبکه عصبی مصنوعی و ANFIS قادرند که مقادیر اشباع شدگی از آب را با استفاده از داده های مقاومت ویژه MT به خوبی تخمین بزنند. روش ANFIS با ترکیب روش های فازی که مبتنی بر استنتاج

هستند و روش‌های شبکه عصبی که بر پایه یادگیری هستند و پوشش ضعف‌های این دو روش، نتایج بهتری در تخمین اشباع‌شدگی از آب با استفاده از داده‌های مقاومت ویژه MT ارائه داد.

۵-۲- پیشنهادات

با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، توصیه‌ها و پیشنهاداتی جهت انجام کار بیشتر در زمینه این تحقیق می‌توان ارائه داد که مهم‌ترین آن‌ها به شرح زیر است.

۱- در صورت امکان تعداد کافی از داده‌های سایر چاه‌های موجود در مخزن مورد مطالعه اخذ شود و اعتبار مدل فیزیک سنگ اصلاح شده در این مخزن با داده‌های تعدادی چاه دیگر تعیین گردد و از این نتایج، جهت تعمیم مدل فیزیک سنگ اصلاح شده به کل مخزن استفاده گردد.

۲- استفاده از داده‌های مقاومت ویژه MT سایر بخش‌های مخزن به منظور تخمین پارامتر اشباع‌شدگی دقیق‌تر مخزن و اعتبارسنجی نتایج توصیه می‌گردد تا بتوان توانایی این روش را در تعیین پارامتر اشباع‌شدگی مخزن سنجید.

۳- پیشنهاد می‌شود نتایج حاصل از این تحقیق برای سایر مخازن کربناته در میدان گچساران به کار گرفته شود. به طوری که بتوان با برداشت نگار تخلخل در اعماق مختلف مخزن و با در دست داشتن مقادیر مقاومت ویژه MT، مدل اشباع‌شدگی مخزن را تولید کرد و یک بانک اطلاعاتی برای ارزیابی کلیه مخازن کشور تهیه نمود.

۴- با مطالعه جامع پارامترهای کیفی و کمی زمین‌شناسی، پتروفیزیک و مخزنی در کل مخزن و تعیین پارامترهای تأثیرگذار در تغییر مقاومت ویژه مخزن، استفاده از روش به کار رفته در این تحقیق جهت تخمین سایر پارامترهای مخزن پیشنهاد می‌شود.

پیوست یک

۲-الف: Fitness

```
function F=fitns(x)

load data.mat

n=x(1);
m=x(2);
a=x(3);

Rw=0.024;
H=data(:,4);
RT=data(:,3);
Phi=data(:,2);
Sw=data(:,1);

Sw_fit=(Rw.*a./ (RT.*Phi.^m)).^(1/n);

F=sum( (Sw_fit-Sw).^2 );
```

۲-ب: main

```
clc
clear
close all

data=xlsread('data.xls');
save data data

Lb=[1 1 0.9];
Ub=[5 5 1.1];
options =
gaoptimset('CrossoverFcn',@crossoverheuristic
,'Generations',100,'PopulationSize',100,'StallGenLim
it',100,'StallTimeLimit',100,'MutationFcn',@mutation
adaptfeasible)
[paramtrs,error]=ga(@fitns,3,[],[],[],[],Lb,Ub,[],op
tions);
```

```

n=paramtrs(1)
m=paramtrs(2)
a=paramtrs(3)

Rw=0.024;
H=data(:,4);
RT=data(:,3);
Phi=data(:,2);
Sw=data(:,1);

Sw_fit=(Rw.*a./(RT.*Phi.^m)).^(1/n);

plot(Sw);
hold on
plot(Sw_fit,'red');

```


مراجع

- حسینی پاک، ع.ا و شرف الدین، م.، (۱۳۸۴)، "تحلیل داده های اکتشافی"، انتشارات دانشگاه تهران.
- رضایی، م. ر.، چهارزی، ع.، (۱۳۸۹)، "اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه پیمایی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- رژفسکی، و.، نوویک، گ.، (۱۳۷۱)، "فیزیک سنگ"، محمد دانش، مرکز انتشارات صنعت فولاد.
- سردار، ه.، معماریان، ح.، اسدیان، ف.، میرزائی، س. و زمانزاده، س. م. (۱۳۸۸)، "مدل سازی فیزیک سنگ در بخش ماسه سنگی مخزن آسماری (مطالعه موردی در میدان نفتی منصوری)"، فصلنامه زمین شناسی ایران، ۳(۹)، ۲۷-۳۷.
- شرکت ملی نفت ایران، (۱۳۹۱)، گزارش ارزیابی پتروفیزیکی چاه A گچساران.
- شرکت ملی نفت ایران، (۱۳۹۱)، گزارش مطالعه جامع مخازن آسماری و بنگستان میدان گچساران.
- مطیعی، ه.، (۱۳۷۴)، "زمین شناسی نفت زاگرس ۱ و ۲"، سازمان زمین شناسی ایران، ۱۰۰۹ ص.
- منهاج، م. ب.، (۱۳۷۹)، "مبانی شبکه های عصبی"، جلد اول، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.
- نریمانی، ح.، (۱۳۸۸)، "تحلیل هندسی جنبشی چین های ناحیه دوگنبدان، زاگرس چین خورده-رانده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- علیمرادی، ا.، (۱۳۹۰)، "ارائه روشی برای تخمین اشباع هیدروکربور مخازن کربناته به کمک نشانگرهای لرزه ای و داده های چاه"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- Alger, R.P., Luffel, D.L. and Truman, R.B. (1989) "New unified method of integrating core capillary pressure data with well logs" **Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation**, 4 (2), 145–152.
- Al-Ruwaili, S.B. and Al-Waheed, H.H. (2004) "Improved petrophysical methods and techniques for shaly sands evaluation" Proceeding of SPE International Petroleum Conference, Mexico. Paper SPE, 89735.
- Anderson, W.G. (1986) "Wettability Literature Survey – Part 3: Effect of Wettability on the Electrical Properties of Porous Media" **Journal of Petroleum Technology**, 38,

1125-1144.

Archie G.E. (1942) “The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics” **Trans. Americ. Mineral.Met.**, 146, 54-62.

Archie, G.E. (1950) “Introduction to petrophysics of reservoir rocks” **Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists**, 34, 943- 961.

Attia, M.A. (2005) “Effects of petrophysical rock properties on tortuosity factor” **J. Pet. Sci. Eng.** 48, 185–198.

Bataleva, E.A., Rybin, A.K., Batalev, V.Yu. and Safronov I.V. (2005) “Use of magnetotelluric sounding to study tectonic disturbances in rock masses” **Journal of mining science**, 41(3), 225- 231.

Beale M.H., Hagan M.T., Demuth H.B. (2012) Neural Network Toolbox™ User’s Guide of MATLAB, version 8.

Bhatt, A. (2002) “Reservoir properties from well logs using neural networks” PhD. thesis, Norwegian University of Science and Technology, 157 pp.

Bolviken, B., Stokke, P.R., Feder, J. and Josany, T. (1992) “The fractal nature of geochemical landscapes” **Journal of Geochemical Exploration**, 43, 91-109.

Borai, A.M. (1987) “A new correlation for the cementation factor in low-porosity carbonates” **SPE Form. Eval.** 2, 495–499.

Bordenave M.L. (2002) “The middle cretaceous to early Miocene petroleum system in the Zagros domain of Iran and its prospect evaluation” AAPG Annual Meeting March 10-13, 2002 Houston, Texas.

Cagniard, L. (1953) “Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting” **Geophysics**, 18, 605–653.

Cheng, Q. (1999) “Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation” **Journal of Geochemical Exploration** 63 (3), 175–194.

Cheng, Q., Agterberg, F.P. and Ballantyne, S.B. (1994) “The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods” **Journal of Geochemical Exploration** 51, 109–130.

Cintra, M.E., Camargo, H.A. and Martin, T.P. (2009) “Optimising the fuzzy granulation of attribute domains” In IFSA-EUSFLAT 2009, 742–747.

Demuth, H. and Beale, M. (2008) Neural network toolbox user’s guide of MATLAB, version 6, online in www.mathwork.com

- Dobrin, M.B. and Savit, C.H. (1988) “**Introduction geophysical prospecting**” McGraw-Hill, 867 pp.
- Dubois, M.K., Byrnes, A.P. and Watney, W.L. (2001) “Field development and renewed reservoir characterization for CO₂ flooding of the Hall-Gurney Field, Central Kansa” AAPG Annual Convention in Denver, Colorado.
- Dunham, R.J. (1962) “Classification of carbonate rocks according to their depositional texture classification of carbonate rocks” **Am. Assoc. Pet. Geol. Mem.** 1, 108–121.
- Ellis, D.V. and Singer, J.M. (2007) “**Well logging for earth scientists**” 2nd Edition, Springer, 692 pp.
- Focke, J.W. and Munn, D. (1987) “Cementation exponents in middle eastern carbonate reservoirs” **SPE Form. Eval.** 2, 155–167.
- Gelius, L.J. and Wang, Z. (2008) “Modelling production caused changes in conductivity for a siliciclastic reservoir: A differential effective medium approach” **Geophysical Prospecting**, 56, 677–691.
- Hamada, G.M. and Al-Awad, M.N. (2001) “Evaluating Uncertainty in Archie’s Water Saturation Equation Parameters Determination Methods”, Paper SPE 68083, SPE Middle East Oil Show held in Bahrain, March 17-20.
- Han, T. (2010) “Joint Elastic-Electrical Properties of Reservoir Sandstones” PhD Thesis, University of Southampton, 190 pp.
- Harrison, B. and Jing, X.D. (2001) “Saturation height methods and their impact on volumetric hydrocarbon in place estimates” SPE Annual Technical Conference, New Orleans, Louisiana, 1-12.
- Hatampour, A., Ghiasi-Freez, J. and Soleimanpour, I. (2013) “Prediction of Flow Units in Heterogeneous Carbonate Reservoirs Using Intelligently Derived Formula: Case Study in an Iranian Reservoir” **Arab J Sci Eng**, DOI 10.1007/s13369-013-0825-5.
- Helle, H. B., Bhatt, A. and Ursin B. (2001) “Porosity and permeability prediction from wireline logs using artificial neural networks: A North Sea case study” **Geophysical Prospecting**, 49, 431-444.
- Hesthammer, J., Stefatos, A., Boulaenko, M., Fanavoll, S. and Danielsen, J. (2010a), “CSEM performance in light of well results” **The Leading Edge**, 29, 34-41.
- Hesthammer, J., Stefatos, A., Boulaenko, M., Vereshagin, A., Gelting, P., Wedberg, T. and Maxwell, G. (2010b) “CSEM technology as a value driver for hydrocarbon exploration” **Marine and Petroleum Geology**, 27, 1872-1884.

- Hingle, A.T. (1959) "The use of logs in exploration problems" Presented at the 29th SEG Annual International Meeting of SEG, Los Angeles.
- Holland, J. H. (1975) "**Adaption in natural and artificial systems**" University of Michigan Press, Ann Arbor, USA, 183 pp.
- Iturrarán-Viveros, U. (2012) "Smooth regression to estimate effective porosity using seismic attributes" **Journal of Applied Geophysics**, 76, 1–12.
- Jang, J.S.R. (1993) "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system" **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**. 23, 665–685.
- Jang, J.S.R. and Sun, C.T. (1995) "Neuro-fuzzy modeling and control" In The Proceeding of the IEEE, 83, 378–406.
- Jang, J. S. R., Sun, C. T. and Mizutani, E. (1997) "**Neuro-Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**" Prentice Hall, 640p.
- Jegen, M.D., Hobbs, R.W., Tarits, P. and Chave, A. (2009) "Joint inversion of marine magnetotelluric and gravity data incorporating seismic constraints Preliminary results of sub-basalt imaging of the Faroe Shelf" **Earth and Planetary Science Letters**, 282, 47–55.
- Jennings, J. W. Jr. and Lucia, F. J. (2003) "Predicting permeability from well logs in carbonates with a link to geology for interwell permeability mapping" **Society of Petroleum Engineers Reservoir Evaluation & Engineering**, 6(4), 215–225.
- Joseph, R., Hrarst, P., Nelson, H. and Paillet, F. L. (1999) "**Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists, geologists and enjeenes**" 2nd ed., Wiley, 423–428.
- Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Rezaee, M.R., Rahimpour-Bonab, H. and Chehrazi, A. (2009) "Petrophysical data prediction from seismic attributes using committee fuzzy inference system" **Computers & Geosciences**, 35, 2314–2330.
- Leite, E.P. and Vidal, A.C. (2011) "3D porosity prediction from seismic inversion and neural networks" **Computers & Geosciences**, 37, 1174–1180.
- Li, C., Ma, T. and Shi, J. (2003) "Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from background" **Journal of Geochemical Exploration** 77, 167–175.
- Lima de O.A.L. and Sharma M.M. (1990) "A grain conductivity approach to shaly sandstones" **Geophysics** 55, 1347–1356.
- Lim, J.-S. and Kim, J. (2004) "Reservoir porosity and permeability estimation from well logs using fuzzy logic and neural networks" In: Proceedings of the Society of Petroleum

- Engineers of the Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Perth, Australia, Paper SPE 88476, doi:10.2118/88476-MS.
- Lucia, F.J. (2007) “**Carbonate Reservoir Characterization, An Integrated Approach**” Second Edition, Springer, 336 pp.
- Mahamood, S.M., Maerefat, N.L. and Chang, M.M. (1991) “Laboratory Measurement of Electrical Resistivity at Reservoir Conditions” **SPEFE**, 291-300, Sep.
- Mamdani, E.H. (1976) “Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers” **International Journal of Man-Machine Studies** 8, 669–678.
- Mamdani, E.H. (1977) “Applications of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis” **IEEE Transactions on Computers** 26, 1182–1191.
- Mamdani, E.H. and Assilian, S. (1975) “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller” **International Journal of Man-Machine Studies** 7 (1), 1–13.
- Mao, Z., Peng, S., Lai, J., Shao, Y. and Yang, B. (2004) “Fractal study of geochemical prospecting data in south area of Fenghuanshan copper deposit, Tongling Anhui” **Journal of Earth Sciences and Environment**, 26 (4), 11–14.
- Matlab user’s Guide, 2012, Matlab CD- ROM, by the Mathworks, Inc.
- Meju, M.A. (2002) “Geoelectromagnetic exploration for natural resources: models, case studies and challenges, **Surv. Geophys.**, 23, 99–273.
- Mikut, R., Jakel, J. & Groll, L. (2005) “Interpretability issues in data-based learning of fuzzy systems” **Fuzzy Sets and Systems**, 150, 179 – 197.
- Mitchell, M. (1999) “**An Introduction to Genetic Algorithms**” A Bradford Book The MIT Press, Fifth printing, 158 pp.
- Motiei, H. (1994) “Stratigraphy of Zagros” Geological survey of Iran publications (In Farsi).
- Nugent, W.H., Coates, G.R. and Peebler, R.P. (1978) “A new approach to carbonate analysis” 19th SPWLA Symposium.
- Nekut, A.G. and Spies, B.R. (1989) “Petroleum exploration using controlled-source electromagnetic methods” **Proc. Inst. Electr. Electron. Eng.**, 77, 338–362.
- Niwas, S., Gupta, P.K., de Lima, O.A.L. (2006) “Nonlinear electrical response of saturated shaley sand reservoir and its asymptotic approximations” **Geophysics**, 71 (3), 129–133.

- Obeida, T. A., Al-Mehairi, Y. S., and Suryanarayana, K. (2005) "Calculations of Fluid Saturations from Log-Derived J-Functions in Giant Complex Middle-East Carbonate Reservoir" **E-Journal of Petrophysics**, 1(1), 1-9.
- Olson, T.M. (1998) "Porosity and permeability prediction in low- permeability gas reservoirs from well logs using neural networks" Proceeding of the SPE Rocky Mountain Regional Symposium and Exhibition, Colorado. Paper SPE, 39964, 10.
- Parker, P.B. (1999) "Genetic Algorithms and Their Use in Geophysical Problems" Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, 202 pp.
- Pickett, G.R. (1963) "Acoustic character logs and their application" **J Pet Tech**, June, 659–667.
- Poupon, A., Leveaux, J. (1971) "Evaluation of water saturation in shaly formation" Proceeding of SPWLA 12th Annual Logging Symposium.
- Ragland D.A. (2002) "Trends in cementation exponents (m) for carbonate pore systems" **Petrophysics**. 43, 434-446.
- Ransom, R.C. (1984) "A Contribution Toward a Better Understanding Of The Modified Archie Formation Resistivity Factor Relationship" **The Log Analysis**; 7-12, March-April.
- Rasmus, J.C. (1983) "A variable cementation exponent, m, for fractured carbonates" **Log Anal.** 24, 13–23.
- Rasmus, J.C. (1986) "A Summary of the Effects of Various Pore Geometries and Their Wettabilities on Measured and In-Situ values of Cementation and Saturation Exponents" Trans. SPWLA Section PP.
- Reynolds, J.M. (1997) "**An introduction to applied and environmental geophysics**" John Wiley & Sons, 796 pp.
- Salem, H. S. and Chilingarian, G. V. (1999) "The cementation factor of Archies equation for shaly sandstone reservoirs" **J. Petrol. Sci. Eng.** 23, 83-93.
- Schön, J.H. (2011) Physical Properties of Rocks, in: Cubitt, J., "**Handbook of Petroleum Exploration and Production**" Elsevier B.V., 494 pp.
- Shahin, M. A., Maier, H. R., and Jaksa, M. B. (2000) "Predicting the settlement of shallow foundations on cohesionless soils using back-propagation neural networks" Department of Civil and Environmental Engineering, University of Adelaide.
- Shlumberger, (2009), "**Log Interpretation Charts**" 151 pp.

- Sheriff, R.E. (1991) “**Encyclopedic dictionary of exploration geophysics**” 3rd edition, Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 376 pp.
- Simpson, F., and Bahr, K. (2005) “**Practical Magnetotellurics**” Cambridge University Press, Cambridge, 254 pp.
- Simandoux P. (1963) “Dielectric measurements in porous media and application to shaly formation” **Revue de l’institut Francais du Pétrole**, 18, 193–215.
- Sondena, E., Brattell, F., Kolltvelt, K., and Normann, H.P. (1991) “The Effect of Reservoir Conditions and Wettability on Electrical Resistivity” Paper SPE 22991, SPE Asia Pacific, Nov. 4-7.
- Spies, B.R. (1983) “Recent developments in the use of surface electrical methods for oil and gas exploration in the Soviet Union” **Geophysics**, 48, 1102–1112.
- Sugeno, M. (1985) “**Industrial Application of Fuzzy Control**” North-Holland, New York 269 pp.
- Telford W.M., Geldart L.P. and Sheriff R.E. (1990) “**Applied Geophysics**” Cambridge University press, 770 p.
- Unsworth, M.J. (2005) “New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods” CSEG RECORDER, 35-39.
- Van Golf–Rach, T.D. (1982) “**Fundamentals of fractured Reservoir Engineering**” Elsevier.
- Vold, I.E., Rotevatn, A., and Hesthammer, J. (2012) “The effect of hydrocarbon saturation on resistivity distribution and CSEM response’ **Marine and Petroleum Geology**, 38 (1), 117-127.
- Vozoff, K. (1991) The magnetotelluric method. In: Nabighian, M.N. (Ed.) “**Electromagnetic methods in applied geophysics, Applications**” SEG, 2, 641–711.
- Wang, Z. (2009) “Investigating the electric properties of a siliciclastic reservoir based on rock-physics modeling and laboratory experiments” PhD Thesis, University of Oslo, 55 pp.
- Wightman, W.E., Kaufman, A.A., and Hoeskra, P. (1983) “Mapping gas-water contacts in shallow producing formations with transient EM” 52nd Annual Internat. SEG Meeting and Exposition, Expanded Abstracts, 59–60.
- Worthington, P.F. (1985) “The evolution of shaly-sand concepts in reservoir evaluation” *The Log Analyst*, 26 (1), 23–40.

Wyllie, M. R. J. and Gregory, G. R. (1953) “Reservoir Engineering - General - Formation factor of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation” **Petrol. Trans. AIME**, 198, 103-110.

Yilmaz, O. (2001) “**Seismic Data Analysis: Processing, Inversion and Interpretation of Seismic Data**” Society of Exploration Geophysicists, Tulsa Oklahoma, 2027 pp.

Yu, H. and Wilamowski, B. M. (2011) Levenberg Marquardt Training, “**Industrial Electronics Handbook**” vol. 5 “Intelligent Systems” 2nd Edition, chapter 12, 12-1 to 12-15, CRC Press.

Zadeh, L.A. (1965) “Fuzzy sets” **Information and Control**, 8, 338–353.

Zhdanov, M. S. (2009) “**Geophysical electromagnetic theory and methods**” First Edition, Elsevier, 848 pp.

Abstract:

One of the challenging subjects in every carbonate reservoir study is the characterization of reservoir fluids. Water saturation (S_w) is one of the most significant petrophysical parameters required for reservoir management. Water Saturation can be measured directly from core analyses or can be estimated from well logs evaluation.

Use of geophysical techniques to characterize reservoirs is becoming increasingly important in the development and production strategies of oil fields. Resistivity values obtained from magnetotelluric (MT) data is sensitive to the electrical properties of rocks with varying fluids and saturations. Hence, achieving a method for water saturation prediction from the resistivity values obtained the MT data is a challenging task.

In this research, first, geologic and petrophysical factors controlling the hydrocarbon saturation in the Asmari carbonate reservoir were analyzed, and then, differential effective medium (DEM) was selected to link the electrical properties of the reservoir with its water saturation. This special case of studied reservoir ($V_{sh}=0$) led to a simplified version of model based on the Archie's law. The method of genetic algorithm was used to calculate the Archie's coefficients in the exploration well named A. A relatively acceptable regression coefficient (0.62) was obtained between the predicted and experimental water saturation.

The formation resistivity values of the exploration well A were classified based on the fractal method. The results showed three different zones based on the type of porosity and texture of the rocks. Then, the genetic algorithm was used for calculating the Archie's coefficients in each of the zones separately. The results indicated that water saturation was dependent on the differences in the reservoir height (H). The reservoir height (H), as a parameter, was introduced in the Archie's equation, and thus, we obtained a modified Archie's equation. Using the genetic algorithm for calculating the coefficients of the modified Archie's equation showed that the regression coefficients of 0.92 and 0.88 were obtained between the predicted and experimental water saturation in the train and test stages, respectively.

Artificial neural networks (ANNs) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) were also applied on the MT resistivity data to estimate water saturation in well No. 115 near the MT line 8805. The regression coefficients of 0.79 and 0.85 were obtained between the predicted and experimental water saturation using ANNs and ANFIS, respectively. It was also concluded that the ANFIS model in comparison with ANN method had more accurate prediction capability for water saturation prediction using the MT resistivity data. The better performance of the ANFIS than the other intelligent methods is easily justified because it is a combination of FIS and ANN methods, and thus, contains the advantages of both methods.

Keywords: water saturation, carbonate reservoir, magnetotelluric, Archie's law, algorithm genetic, artificial neural networks (ANNs), adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)



University of Shahrood

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics engineering

**Estimation of hydrocarbon reservoir saturation using
magnetotelluric data**

Somayeh Tabasi

Supervisor:

A. Kamkar Rouhani

September 2015