





دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گروه مهندسی اکتشاف نفت

ارزیابی پتروفیزیکی شیل های گازی جهت تعیین محتوای ماده آلی و گاز برجا با رویکرد ترکیب
اطلاعات شبکه عصبی

سعید واعظیان

اساتید راهنما :

دکتر بهزاد تخمچی

دکتر محمدرضا رضایی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه : اکتشاف معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سعید واعظیان

تحت عنوان: ارزیابی پتروفیزیکی شیل های گازی جهت تعیین محتوای ماده آلی و گاز برجا با رویکرد

ترکیب اطلاعات شبکه عصبی

در تاریخ ۱۳۹۲ / ۴ / ۱۶ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
			دکتر بهزاد تخم چی
			دکتر محمدرضا رضایی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی		دکتر رضا قوامی ریایی
			دکتر رضا خالوکاکی

تشکر و قدردانی

خدای متعال را سپاسگزارم از این که توانستم این پایان‌نامه را به اتمام برسانم. هم‌چنین خدا را شاکرم که در حین انجام این پایان‌نامه افراد شایسته‌ای را بر سر راهم قرار داد تا با راهنمایی و مشاوره آنها این پروژه به مقصود خود برسد. به مصداق " **من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق** "، در ابتدای این پایان‌نامه باید از زحمات بزرگوارانی که بنده را در انجام این پایان‌نامه یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم.

از جناب آقای **دکتر بهزاد تخم‌چی** که در تمام مدت انجام این پایان‌نامه همچون پدری مهربان و دلسوز پشتیبان من بوده و با سعه صدر و رهنمودهای دلسوزانه خود در تهیه این پایان‌نامه مرا مورد لطف خود قرار دادند، آقای **دکتر محمدرضا رضایی** که در بخش داده‌ها مورد نیاز جهت انجام پروژه مرا یاری رساندند، آقای **مهندس احمد واعظیان** که در بخش آنالیزهای ژئوشیمیایی مرا یاری نموده و **مهندس علی رجبی** که در بخش ارزیابی پتروفیزیکی مرا هدایت کردند، کمال تشکر را دارم و موفقیت همه دانش‌پژوهان این مرز و بوم عزیز را از درگاه خداوند مهربان خواهانم.

همیشه توسن اندیشه‌ات مظفر باد

معلما مقامت ز عرش برتر باد

صحیفه‌های سخن از تو علم‌پرور باد

به نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند

با آرزوی موفقیت

سعید واعظیان

تقدیم به

روح پرفتح امام خمینی (ره)

وشهدای هشت سال دفاع مقدس

وتقدیم به

دست‌های زحمت‌کش پدر

ومحبت‌های بی‌دریغ مادر

وصبوری، همسر مهربانم

تعهد نامه

اینجانب سعید واعظیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته اکتشاف نفت دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی پتروفیزیکی شیل های گازی جهت تعیین محتوای ماده آلی و گاز برجا با رویکرد ترکیب اطلاعات شبکه عصبی تحت راهنمایی دکتر بهزاد تخمچی و دکتر محمدرضا رضایی متعهد می شوم

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

در برآوردهای اولیه‌ای که در مورد مخازن شیل‌های گازی به کار می‌رود، میزان گاز برجا تخمین زده می‌شود که این تخمین با شروع حفاری شیل‌های گازی و جمع‌آوری داده‌ها و تفسیر آن‌ها، جامعیت و دقت بیشتری پیدا می‌کند. در این پروژه، با استفاده از روش حجمی میزان گاز برجا که شامل گاز آزاد و گاز چسبیده می‌باشد، در سازند کوکاتیاشیل^۱ در حوضه پرت^۲ واقع در استرالیا غربی تخمین زده شده است.

در شیل‌های گازی مقدار محتوای ماده آلی (TOC)^۳ یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی مخزن می‌باشد. در این پروژه با استفاده از دو روش مختلف که شامل شبکه عصبی و $\Delta \log R$ می‌باشد، مقدار TOC در سازند کوکاتیاشیل با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی تخمین زده شده است. در آموزش شبکه عصبی نیز از دو روش هوشمند که شامل الگوریتم ازدحام ذرات و کلونی زنبورهای عسل می‌شود، استفاده گردیده است. از مقایسه بین روش‌های به کار گرفته شده برای تخمین محتوای ماده آلی، استفاده از روش‌های هوشمند به نسبت روش‌های قدیمی جواب‌های بهتری را در پی داشت، به گونه‌ای که ضریب R^2 در روش $\Delta \log R$ برابر $0/7$ ، در روش بهینه‌سازی PSO برابر $0/93$ و در روش بهینه‌سازی ABC برابر $0/8$ است.

کلمات کلیدی: گاز برجا، محتوای ماده آلی، شبکه عصبی، الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم کلونی زنبورهای

عسل

¹ - Kockatea Shale

² - Perth

³ - Total Organic Carbon

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تاریخچه اکتشاف و تولید شیل‌های گازی	۳
۳-۱ مروری بر تخمین TOC با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی	۶
۴-۱ مروری بر تخمین گاز برجا	۸
۵-۱ ساختار پایان نامه	۹
فصل دوم: روش‌شناسی پروژه	۱۰
۱-۲ مقدمه	۱۱
۲-۲ تعیین محتوای ماده آلی با استفاده از روش $\Delta\log R$	۱۱
۲-۳ تفسیر برهم‌اندازی $\Delta\log R$	۱۶
۴-۲ جداسازی آنومالی وار $\Delta\log R$	۱۷
۵-۲ تعیین محتوای ماده آلی با استفاده از سیستم‌های هوشمند	۱۸
۱-۵-۲ ماشین کمیته با سیستم‌های هوشمند	۱۹
۲-۵-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی	۲۲
۱-۲-۵-۲ پرسپترون چندلایه	۲۴
۲-۲-۵-۲ آموزش شبکه عصبی مصنوعی	۲۵
۳-۵-۲ الگوریتم اجتماع ذرات	۲۶
۱-۳-۵-۲ رابطه به روز رسانی سرعت	۲۷
۲-۳-۵-۲ پارامتر شخصی C1 و پارامتر جمعی C2 و رابطه به روز رسانی موقعیت	۲۹
۳-۳-۵-۲ گام‌های الگوریتم PSO استاندارد (پایه)	۳۰

- ۳۰..... ۲-۵-۳-۴ به کارگیری الگوریتم PSO در آموزش شبکه عصبی
- ۳۲..... ۲-۵-۴ الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی
- ۳۷..... ۲-۶-۶ تخمین گاز برجا
- ۳۷..... ۲-۶-۱ روش‌های موازنه مواد
- ۳۸..... ۲-۶-۲ روش آنالیز نمودار کاهش تولید
- ۳۹..... ۳-۶-۲ روش‌های حجمی
- ۳۹..... ۴-۶-۲ تخمین میزان گاز برجا
- ۴۰..... ۲-۶-۴-۱ گاز جذب شده
- ۴۳..... ۲-۶-۴-۲ تخمین گاز بر جای جذب شده
- ۴۵..... ۲-۶-۴-۳ تخمین گاز بر جای آزاد
- ۵۴..... فصل سوم: توصیف میدان و داده‌های مورد مطالعه
- ۵۵..... ۳-۱ مقدمه
- ۵۵..... ۳-۲ آشنایی با حوضه پرت
- ۵۶..... ۳-۳ شیل گازی در استرالیای غربی
- ۵۸..... ۴-۳ ستون چینه‌شناسی حوضه پرت
- ۶۱..... ۳-۵ سازندهای مستعد برای شیل‌های گازی
- ۶۱..... ۳-۵-۱ سازند ایروین ریور
- ۶۱..... ۳-۵-۲ سازند کرینجینیا
- ۶۲..... ۳-۵-۳ سازند کوکاتیا شیل
- ۶۲..... ۳-۶ میدان و چاه مورد مطالعه
- ۶۳..... ۳-۷ داده‌های مورد مطالعه
- ۶۳..... ۳-۷-۱ داده‌های مغزه

۶۴	۲-۷-۳ داده‌های ژئوشیمی
۶۴	۳-۷-۳ نگارهای پتروفیزیکی
۶۴	۱-۳-۷-۳ نمودارگیری در حین حفاری
۶۴	۲-۳-۷-۳ نمودارگیری با وایرلاین
۶۶	فصل چهارم: تخمین گاز برجا و میزان محتوای ماده آلی
۶۷	۱-۴ مقدمه
۶۷	۲-۴ تخمین محتوای ماده آلی
۶۹	۱-۲-۴ تخمین TOC با استفاده از شبکه عصبی
۶۹	۱-۱-۲-۴ الگوریتم PSO
۷۴	۲-۱-۲-۴ الگوریتم ABC
۷۹	۲-۲-۴ تخمین محتوای ماده آلی با استفاده از روش $\Delta \log R$
۸۱	۳-۴ تخمین مقدار گاز برجا
۸۲	۱-۳-۴ تخمین مقدار گاز چسبیده به سطح ذرات
۸۴	۲-۳-۴ تخمین مقدار گاز آزاد
۹۳	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۹۴	۱-۵ نتیجه‌گیری
۹۵	۲-۵ پیشنهادات
۹۶	منابع و مآخذ

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: مناطق مورد بهره‌برداری شیل‌های گازی در ایالات متحده آمریکا ۵
- شکل ۱-۲: تولید سالانه گاز از شیل‌های گازی در آمریکا ۵
- شکل ۱-۲: برهماندازی سونیک-مقاومت ویژه که نشانگر جدایی $\Delta \log R$ است ۱۲
- شکل ۲-۲: به دست آوردن TOC از روی $\Delta \log R$ و مقادیر LOM ۱۳
- شکل ۲-۳: شکل شماتیک برای راهنمایی در استفاده از روش $\Delta \log R$ ۱۶
- شکل ۲-۴: دیاگرام نروفازی با چهار نگار شامل مقاومت، نوترون، صوتی و چگالی ۱۸
- شکل ۲-۵: دیاگرام شماتیک از کمیته با سیستم‌های هوشمند ۱۹
- شکل ۲-۶: دیاگرام ماشین کمیته طراحی شده ۲۲
- شکل ۲-۷: سه نوع روند کاهشی برای نرخ تولید ۳۹
- شکل ۲-۸: نمونه محفظه برای نگهداری نمونه مغزه ۴۱
- شکل ۳-۱: حوضه‌های پرت و کنینگ در استرالیا غربی ۵۷
- شکل ۳-۲: ستون چینه‌شناسی در شمال حوضه پرت واقع در بخش خشکی ۵۹
- شکل ۳-۳: ستون چینه‌شناسی در ایالات متحده و استرالیا غربی ۶۰
- شکل ۳-۴: موقعیت چاه ردبک-۲ در میدان بهارا اسپرینگ ۶۳
- شکل ۴-۱: داده‌های ژئوشیمی سه چاه ردبک-۲، هووا-۳ و جینگمیا-۱ ۶۸
- شکل ۴-۲: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم PSO ۷۰
- شکل ۴-۳: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم PSO ۷۱
- شکل ۴-۴: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم PSO ۷۲

- شکل ۴-۵: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم PSO. ۷۳.....
- شکل ۴-۶: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم ABC. ۷۵.....
- شکل ۴-۷: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم ABC. ۷۶.....
- شکل ۴-۸: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم ABC. ۷۷.....
- شکل ۴-۹: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم ABC. ۷۸.....
- شکل ۴-۱۰: رابطه بین ضریب انعکاس و تیرینایت و میزان درجه بلوغ. ۷۹.....
- شکل ۴-۱۱: تخمین TOC با استفاده از روش $\Delta \log R$. ۸۰.....
- شکل ۴-۱۲: رابطه بین مقادیر TOC واقعی و تخمین‌زده شده با استفاده از روش $\Delta \log R$. ۸۱.....
- شکل ۴-۱۳: نمونه مغزه از قاعده سازند کوکاتیا شیل. ۸۲.....
- شکل ۴-۱۴: نمودار میزان گاز در برابر فشار در حین اندازه‌گیریهای لانگمویر ایزوترم. ۸۳.....
- شکل ۴-۱۵: رابطه بین TOC و حجم لانگمویر. ۸۴.....
- شکل ۴-۱۶: جابجایی عمق از طریق مقایسه مقادیر مغزه و نگار. ۸۷.....
- شکل ۴-۱۷: نگارهای پتروفیزیکی سازند کوکاتیا شیل. ۸۸.....
- شکل ۴-۱۸: تفسیر پتروفیزیکی سازند کوکاتیا شیل. ۹۰.....

فهرست جداول

- جدول ۱-۴ : مدل پتروفیزیکی برای سنگ بدون شکستگی ۸۵
- جدول ۲-۴: پاسخ کروژن بر نگارهای پتروفیزیکی ۸۵
- جدول ۳-۴: مقادیر مورد استفاده جهت ساختن مدل پتروفیزیکی ۸۹
- جدول ۴-۴: مقادیر میانگین جهت تعیین میزان گاز آزاد ۹۱
- جدول ۱-۵: مقایسه روشهای به کارگرفته شده ۹۴

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

انتظار می‌رود که گاز طبیعی، دارای سریع‌ترین رشد از نظر مصرف انرژی باشد. پیش‌بینی کارشناسان این است که مصرف گاز طبیعی در سال ۲۰۲۰ به ۱۶۲ تریلیون فوت‌مکعب که در مقایسه با سال ۱۹۹۹ که میزان مصرف ۸۴ تریلیون فوت‌مکعب بود، دو برابر می‌باشد.

انتظار می‌رود که غالب این افزایش در کشورهای در حال توسعه باشد. به‌طور کلی، دریافت‌های متفاوتی از تعریف سیستم‌های گازی غیر متداول وجود دارد. در ایالات‌متحده، اولین تمایزات بین منابع متداول و غیرمتداول بر اساس مسائل اقتصادی بود، زمانی که در اوایل نیمه‌های دهه ۱۹۷۰، منابع گازی مانند متان‌های موجود در لایه‌های زغال (CBM)^۴ و شیل‌های گازی و نیز گازهای موجود در مخازن با تراوایی پایین، که از نظر اقتصادی در سطح پایین و یا متوسط رو به پایین بودند، توسط اغلب زمین‌شناسان اکتشافی به عنوان غیرمتداول در نظر گرفته می‌شد.

اگرچه با آغاز اواخر دهه ۱۹۸۰ که مصادف با پژوهش‌های تأمین‌شده از نظر بودجه توسط فدرال‌ها بود و نیز با به وجود آمدن هزینه‌های مربوط به تحریک^۵ چاه، اکنون این سیستم‌های گازی به عنوان منابع اقتصادی قابل دوام می‌باشند.

شیل‌های گازی به عنوان منابع عظیم گازهای غیرمتداول مورد توجه بسیاری از کشورها قرار گرفته اند. در منابع گازی متداول، رسوبات تحت نیروی شناوری^۶ می‌باشند و به عنوان تجمعات مجزایی در نفت‌گیرهای ساختاری و یا ساختمانی اتفاق می‌افتند. این در حالی است که در منابع گازی غیرمتداول، به‌طور کلی، تجمعات تحت نیروی شناوری نمی‌باشند. آن‌ها تجمعاتی هستند که اغلب مستقل از نفت‌گیرهای ساختاری و یا

⁴ - Coal-Bed Methane

⁵ - Stimulation

⁶ - Buoyancy

ساختمانی به صورت منطقه‌ای پخش می‌شوند. وجود ذخایر عظیم از این منابع و درخواست روزافزون بازارهای جهانی، تمرکز مراکز علمی و صنعتی را به این بخش سوق داده است. در این میان محققان ارزیابی‌های مختلفی را جهت دستیابی بیشتر به اطلاعات مخزنی شیل‌های گازی انجام داده‌اند که این مطالعات با ظهور زمینه‌هایی همچون شکست هیدرولیکی، حفاری افقی، میکرو لرزه‌نگاری^۷ و ... وارد عرصه‌های جدیدی از تکنولوژی شده است (Law, 2002).

۱-۲ تاریخچه اکتشاف و تولید شیل‌های گازی

استخراج از شیل‌ها برای اولین بار در سال ۱۸۲۵ در فردونیا^۸ (نیویورک) انجام شد. تا سال ۱۹۷۰ فعالیت خاصی برای تولید صنعتی از شیل‌های گازی انجام نشد. در این سال کاهش پتانسیل تولید از ذخایر متداول گاز، باعث شد که دولت فدرال آمریکا در پروژه‌های تحقیقاتی و توسعه‌ای سرمایه‌گذاری نموده که در نهایت منجر به ایجاد حفاری انحرافی و افقی، تصویربرداری میکرو لرزه‌نگاری و شکست هیدرولیکی گردید. تا این زمان حفاری شیل-های گازی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبود.

سرمایه‌گذاری اولیه دولت فدرال بر روی شیل‌های گازی، باعث شروع پروژه شیل‌های گازی غربی در سال ۱۹۷۶ شد و کمیسیون انرژی دولت فدرال بودجه‌ای را برای انستیتوی تحقیقاتی گاز (GRI)^۹ تصویب نمود. بعدها دپارتمان انرژی (DOE)^{۱۰} با شرکت‌های خصوصی گاز شریک شده تا اولین تجربه موفق حفاری افقی با هوا در شیل‌های گازی در سال ۱۹۸۶ به دست آید. سپس دولت فدرال بین سال‌های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۰ برای ایجاد انگیزه و تشویق شرکت‌های حفاری در شیل‌های گازی، به آن‌ها تخفیف‌های مالیاتی داد.

⁷ - Micro-Seismic Imaging

⁸ - Fredonia

⁹ - Gas Research Institute

¹⁰ - Department Of Energy

در این سال‌ها تصویربرداری میکرولرزه‌نگاری به عنوان یک ابزار مهم، هم در شکست هیدرولیکی و هم در حفاری‌های دریایی معرفی گردید. در سال ۱۹۹۱ دپارتمان انرژی با اعطای کمک هزینه‌های قابل توجه به شرکت میچل انرژی^{۱۱} نقش به‌سزایی در اولین حفاری شیل بارت در شمال تگزاس ایفا کرد. این شرکت در سال ۱۹۹۸ با استفاده از همهٔ تکنولوژی‌های موجود موفق به انجام اقتصادی اولین شکست هیدرولیکی در شیل شد. از آن به بعد، رشد قابل توجهی در سهم گاز طبیعی از شیل‌ها در منابع انرژی ایالات متحده به وجود آمد و باعث شد تا کشورهای دیگر نیز به دنبال این منابع روند.

در سال ۱۹۹۶ چاه‌های شیل گازی در ایالات متحده ۰/۳ تریلیون فوت مکعب معادل ۱/۶ درصد تولید گاز ایالات متحده، گاز تولید کردند. در سال ۲۰۰۶ تولید به بیش از ۳ برابر یعنی ۱/۱ تریلیون فوت مکعب در سال که معادل ۵/۶ درصد تولید کل گاز ایالت متحده بود، رسید. تا سال ۲۰۰۵، تعداد ۱۴۹۹۰ چاه شیل گازی در امریکا وجود داشت (Kuuskraa et al, 2011)

در سال ۲۰۰۵ اکتشاف و توسعهٔ حوضه‌های اصلی شیل آغاز گردید. در این سال، با استفاده از انواع تکنولوژی‌های جدید، اکتشاف گاز در شیل بارت^{۱۲} و به موازات آن روی شیل فایتویل^{۱۳} در آرکانزاس و شیل هاینسویل^{۱۴} در لوئیزیانا انجام گرفت. در سال ۲۰۱۰ نیز عملیات توسعهٔ شیل مارسلوس^{۱۵} آغاز گردید.

شکل ۱-۱ نمای کلی مناطق مختلف در امریکا که مورد بهره‌برداری از شیل قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است.

¹¹ - Mitchell Energy

¹² - Barnett

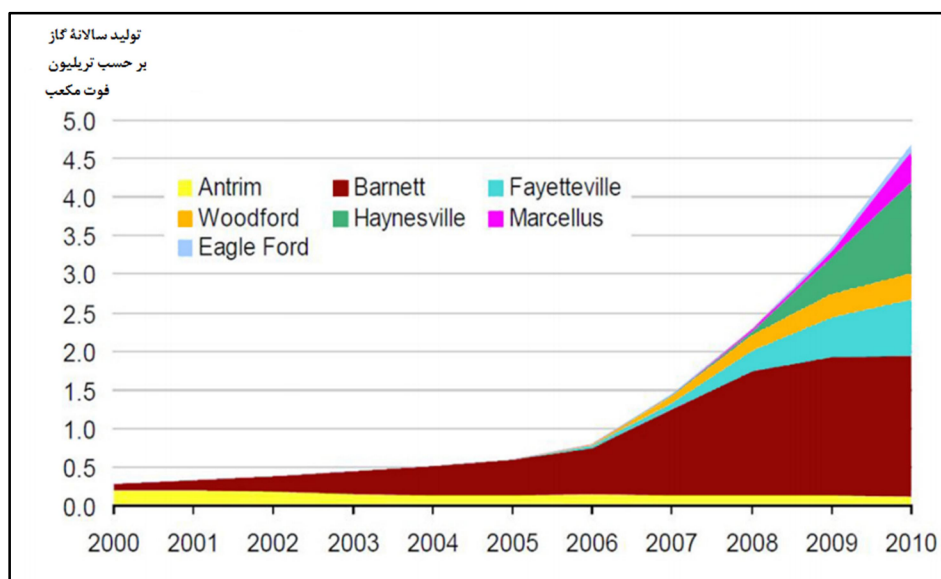
¹³ - Fayetteville

¹⁴ - Haynesville

¹⁵ - Marcellus



شکل ۱-۱: مناطق مورد بهره‌برداری شیل‌های گازی در ایالات متحده آمریکا (Kuuskraa et al, 2011)
هم‌چنین در شکل ۱-۲ بر اساس اطلاعات سازمان انرژی آمریکا تولید سالانه گاز نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: تولید سالانه گاز از شیل‌های گازی در آمریکا (Kauuskraa et al, 2011)

۱-۳ مروری بر تخمین TOC با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی

مقالات بسیار زیادی در مورد ارزیابی سنگ منشأ با استفاده از نگار گاما ارائه شده است. در بسیاری از موارد ویژگی فیزیکی مورد استفاده در سنگ‌های غنی از مواد آلی، مقادیر بالای نگار گاما می‌باشد. به دلیل کمتر بودن چگالی ماده آلی جامد نسبت به ماتریکس سازنده سنگ، شموکر در سال ۱۹۷۹ استفاده از نگار چگالی برای برآورد محتوای کربن آلی را پیشنهاد کرده است. وی بیان کرده که کاربرد نگار چگالی وسیع‌تر و دقت آن نسبت به نگار گامای کل بیشتر است. در استفاده از نگار چگالی برای تعیین محتوای کربن آلی در شیل باکن^{۱۶}، شموکر و هستر در سال ۱۹۸۳ ابراز داشتند که چون نگار چگالی به شدت تحت تأثیر کانی‌های سنگین مانند پیریت قرار می‌گیرد، تصحیح پیریت قبل از ارزیابی ماده آلی الزامی است (Passey et al, 1990).

دلنباخ و همکاران (۱۹۸۳) روشی را با استفاده از GR و Δt ابداع کردند که پارامتری به نام I-X را به صورت خطی با محتوای ماده آلی سازند مرتبط می‌کند. در این روش، یک سنگ منشأ، با Δt به نسبت زیاد و گامای بالا تعریف می‌شود. اگر چه در بعضی چاه‌ها پارامتر I-X به صورت خطی با غنای مواد آلی مرتبط است، اما کالیبراسیون آن با بعضی از داده‌های اندازه‌گیری شده، برای تعیین درصد کمی ماده آلی الزامی است.

روش دیگری که از GR و Δt برای تعیین درصد ماده آلی استفاده می‌کند، به وسیله اوتریک و دومنسیل (۱۹۸۴، ۱۹۸۵) معرفی شده است. در این روش پارامتر مقاومت ویژه نیز به I-X در روش دلنباخ افزوده شده است. این روش شامل انتخاب متغیری است که به مقاومت ویژه در شیل‌های غیرمنشأ مرتبط می‌شود. منحنی مقاومت ویژه فقط به صورت کیفی برای جداکردن سنگ‌های منشأ و غیرمنشأ استفاده می‌شود. بعد از تفکیک شدن این لایه‌ها، از روش I-X برای تعیین محتوای ماده آلی استفاده می‌شود (بعد از کالیبراسیون با داده‌های اندازه‌گیری شده). میر و ندروف (۱۹۸۴) روشی که شامل ترکیب نمودارهای مقاومت، چگالی و صوتی می‌باشد

¹⁶ - Bakken

را معرفی نموده اند. این روش بین سنگهای منشأ و غیر منشأ تمایز قائل می‌شود، بدون اینکه نیاز به کمی نمودن غنی‌شدگی آلی با استفاده از ترکیب نمودارهای مختلف داشته باشد. روش این دو نفر از کراس پلات نگارهای مقاومت ویژه - چگالی یا مقاومت ویژه - صوتی استفاده می‌کند. داده‌هایی که دارای مقاومت ویژه بالا و چگالی اندک، یا سرعت صوت اندک‌اند، به عنوان سنگ‌های غنی از مواد آلی تلقی می‌شود، و آلا شیل مورد مطالعه (یا هر سازند دیگر) از ماده آلی کمی برخوردار است.

در سال ۱۹۸۹ پسی^{۱۷} و همکارانش روشی را در چاه‌های مختلفی در سراسر جهان به کار رفته و نتایج قابل قبولی را در تخمین TOC به دست آوردند. عملکرد این روش هم در سنگ منشأهای کربناته و هم در سنگ منشأهای تخریبی مطلوب بوده است. جداسدگی بین دو منحنی را که به نام $\Delta \log R$ خوانده می‌شود، می‌توان در هر عمقی اندازه‌گیری کرد.

در سال ۲۰۰۴ دکتر محمدرضا کمالی و احدالله میرشادی با استفاده از تکنیک $\Delta \log R$ و نروفازی به تخمین محتوای ماده آلی در چاه‌های A و B در سازندهای پایده و گورپی پرداختند که نتایج خوبی را در پی داشت. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۰۹، دکتر کدخدایی و همکاران با استفاده از یک ماشین کمیته به تخمین محتوای ماده آلی در میدان گازی پارس جنوبی پرداختند. استفاده از این ماشین به نوبه خود، روشی جدید برای تخمین محتوای ماده آلی به حساب می‌آید. یک ماشین کمیته با سیستم‌های هوشمند از گروهی از سیستم‌های هوشمند تشکیل شده است که خروجی هر کدام از سیستم‌ها را ترکیب کرده و بنابراین فواید همان کارها را با اندکی محاسبات اضافی جمع‌آوری می‌کند. بنابراین عملکرد مدل می‌تواند بهتر از بهترین شبکه منفرد باشد.

در سال ۲۰۱۱ در مطالعه‌ای دیگر آقای خشنودکیا و همکاران به تعیین TOC در میدان گازی پارس جنوبی و سازند گدوان پرداختند. آن‌ها نیز از شبکه عصبی پسانتشار خطا و منطق فازی استفاده نمودند.

¹⁷ - Passey

۴-۱ مروری بر تخمین گاز برجا

لی و گاتین^{۱۸} (۱۹۸۵) و هزلت^{۱۹} (۱۹۸۶) با استفاده از حل مسائل فشار ثابت، یک سری نمودارهای معیار^{۲۰} در شیل‌های دونین^{۲۱} ساختند. لویز و هیوز^{۲۲} (۲۰۰۸) پیشنهاد استفاده از روش موازنه مواد^{۲۳} در شیل‌های گازی را داده و با استفاده از آن به آنالیز داده‌های تولید پرداختند. اساس کار آن‌ها جریان شعاعی بود. مَتِر^{۲۴} (۲۰۰۸) نشان داد که برای آنالیز شیل‌های گازی، استفاده از تکنیک‌های متداول نمودارهای معیار، هنگامی که هدایت شکستگی‌ها محدود است، ممکن است موجب به وجود آمدن جواب‌های اشتباه گردد.

بر اساس مطالعات بایلی^{۲۵} (۲۰۱۰) بهترین انطباق با کاهش تولید به طریق هذلولوی، موجب مقادیر ثابت (b) بزرگتر از ۱ می‌شود که نتیجه مطالعات لی و سیدل^{۲۶} (۲۰۱۰) نشان داد این امر باعث می‌شد خواص غیرمنطقی از نظر پتروفیزیکی به دست آید.

در نتیجه والکو و لی^{۲۷} (۲۰۱۰) یک مدل نمایی کاهش تولید ارائه دادند. دونگ^{۲۸} (۲۰۱۰) نیز یک مدل کاهش تولید ارائه داد که مبنای آن جریان خطی دراز مدت بود و این مدل را در تعداد زیادی از چاه‌های شیل گازی استفاده نمود (Johnson et al, 2009).

18 - Lee & Gatin

19 - Hazlet

20 - Type Curve

21 - Devonian

22 - Lewis & Hughes

23 - Material Balance

24 - Matter

25 - Baihly

26 - Lee & Sidle

27 - Walco & Lee

28 - Duong

اخیراً بسیاری از محققین به توسعه نمودارهای معیار بر اساس مدل‌های گذرای تخریل دوگانه پرداخته و داده‌های تولید را تفسیر و آنالیز کرده‌اند. از میان این محققین می‌توان به واتنبرگر^{۲۹} (۲۰۱۰، ۲۰۰۹، ۲۰۰۸)، مقدم (۲۰۱۰)، نوبخت (۲۰۱۰)، الاحمدی (۲۰۱۰) و اندرسون^{۳۰} (۲۰۱۰) اشاره کرد.

۱-۵ ساختار پایان نامه

در فصل اول مروری بر تاریخچه اکتشاف و استخراج از شیل‌های گازی و روند توسعه آن‌ها شده است. همچنین در ادامه فصل اول به روند پیشرفت روش‌های به کار گرفته شده در تخمین گاز برجا و TOC پرداخته شده است. در فصل دوم راجع به مفاهیم پایه روش‌های موجود جهت تخمین TOC که شامل $\Delta \log R$ و شبکه عصبی است، توضیح داده شده است. اصول الگوریتم‌های آموزشی مورد استفاده در شبکه عصبی که شامل الگوریتم‌های ازدحام ذرات و کلونی زنبورهای عسل می‌شود، نیز در همین فصل ارائه گردیده است. در ادامه فصل دوم توضیحی مختصر در مورد روش‌های موجود برای تعیین گاز برجا داده شده است و به طور مفصل به روش مورد استفاده در این پروژه که روش حجمی است، پرداخته شده است. در فصل سوم منطقه مورد مطالعه به همراه اطلاعات و داده‌های مورد استفاده معرفی گردیده‌اند و در فصل چهارم روش‌های مورد استفاده که در فصل دوم شرح داده شده‌اند، بر روی داده‌های موجود اعمال گردیده و نتایج آن ارائه شده است. همچنین در فصل پنجم نتایج به دست آمده جمع‌آوری شده و پیشنهادهای جهت پژوهش‌های بعدی ارائه گردیده است.

²⁹ - Wattenberger

³⁰ - Anderson

فصل دوم

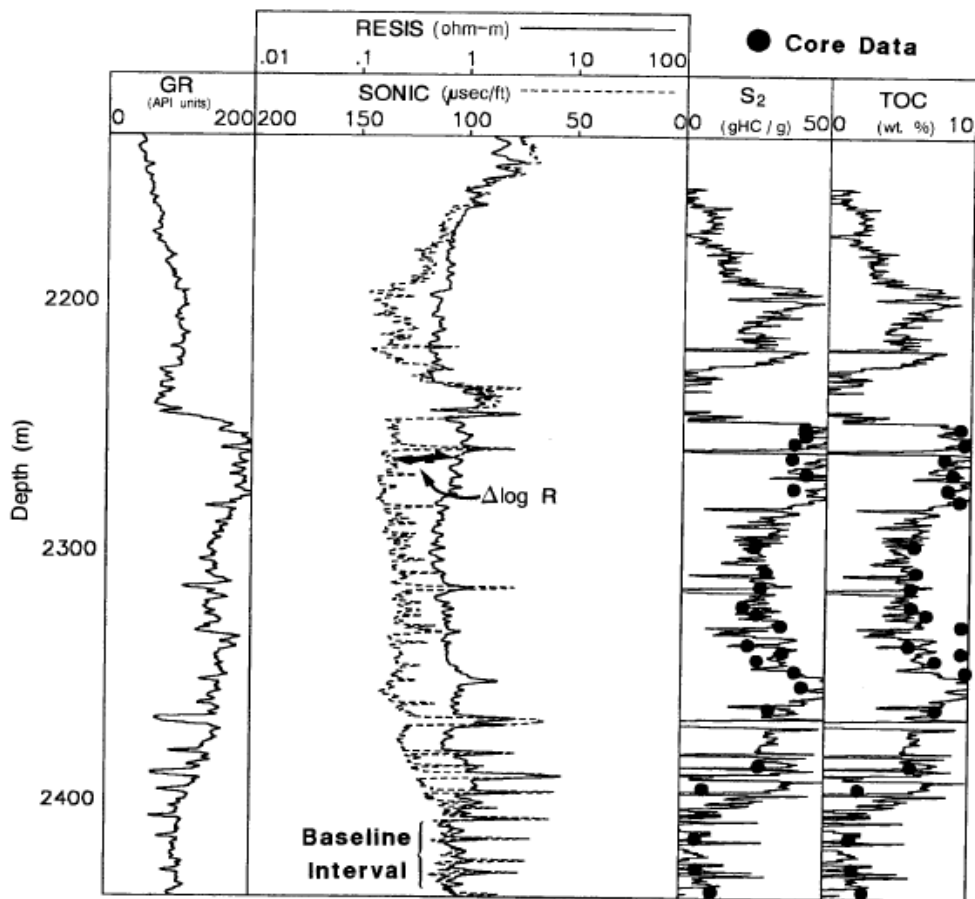
روش شناسی پروژه

۲-۱ مقدمه

در این فصل در مورد مفاهیم و اصول روش‌های تخمین محتوای ماده آلی با استفاده از روش‌های متداول از قبیل $\Delta\log R$ و نیز روشی که آموزش شبکه عصبی از طریق الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم کلونی زنبورهای عسل است، توضیحات لازم ارائه گردیده است. همچنین در ادامه این فصل روش‌های معمول در تخمین گاز برجا معرفی شده و از میان آن‌ها به واکاوی روش حجمی به عنوان روشی قابل قبول پرداخته شده است.

۲-۲ تعیین محتوای ماده آلی با استفاده از روش $\Delta\log R$

همان‌طور که در فصل قبل نیز گفته شد، روش $\Delta\log R$ در چاه‌های مختلفی در سراسر جهان به کار رفته و نتایج قابل قبولی را حاصل کرده است. در این روش از نگارهای مقاومت ویژه و یکی از نگارهای تخلخل استفاده می‌شود. هنگام استفاده از نگارهای مقاومت ویژه و سونیک ابتدا لازم است تا این نگارها روی هم انداخته شوند. برای این کار باید مقیاس نگارها تغییر کند (حداقل مقیاس یکی از نگارها تغییر کند. در عمل مقیاس‌بندی به گونه‌ای انجام می‌گیرد که ۱۰۰ میکروثانیه بر فوت بر دو دهه از نگار مقاومت ویژه انطباق داده شود. هر دهه در نگار مقاومت ویژه در مقیاس لگاریتمی نشان‌گر تغییر از ۰/۱ تا ۰/۱، ۰/۱ تا ۱، ۱ تا ۱۰، ۱۰ تا ۱۰۰ و ... است. بعد از تغییر مقیاس نگارها، دو منحنی بر روی یک مسیر پلات می‌شوند و خط مبنا در اینتروال دانه‌ریز و غیر منشأ تعیین می‌شود. شرایط خط مبنا زمانی مهیا می‌شود که دو منحنی در اینتروالی با ضخامت قابل قبول، به طور کامل هم‌پوشانی داشته باشند. زمانی که خط مبنا ترسیم و مشخص شد، می‌توان اینتروال‌های غنی از ماده آلی را در محل‌هایی که دو منحنی از هم جدا شده‌اند، تشخیص داد. جداسازی بین دو منحنی را که به نام $\Delta\log R$ خوانده می‌شود، می‌توان در هر عمقی اندازه‌گیری کرد. شکل ۳-۴ به طور خلاصه مقیاس‌بندی و اصطلاحات مورد استفاده در این روش را نشان می‌دهد.



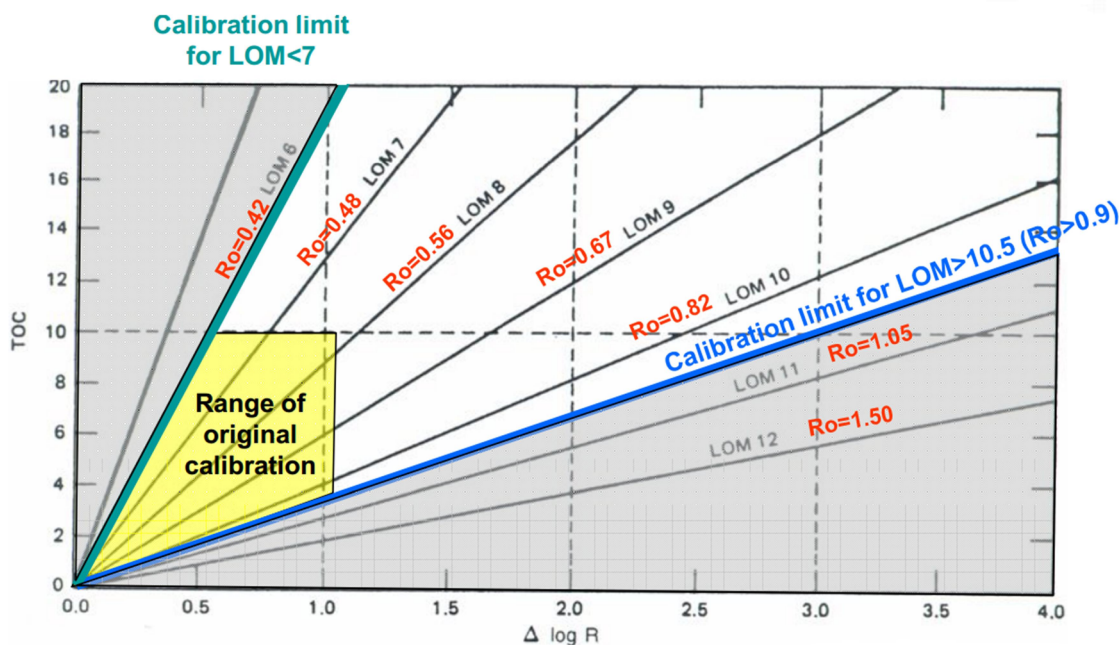
شکل ۱-۲: برهم‌اندازی سونیک-مقاومت‌ویژه که نشان‌گر جدایی $\Delta \log R$ است. $R_{\text{baseline}} = 1$ و $\Delta t_{\text{baseline}} = 100$.
و این بازه دارای LOM بین ۶ و ۷ و کروژن تپ II است (Passey et al, 1990)

جداشدگی $\Delta \log R$ به صورت خطی با TOC مرتبط شده و تابعی از درجه بلوغ ماده آلی است. با استفاده از دیاگرام $\Delta \log R$ می‌توان جداشدگی بین دو منحنی را مستقیماً به TOC تبدیل کرد. برای این کار لازم است که درجه بلوغ ماده آلی (LOM)^{۳۱} را به طریقی اندازه‌گیری و یا برآورد کنیم.

در عمل LOM از روش‌های مختلف آنالیز نمونه‌ها (برای مثال انعکاس ویترنیت، اندیس دگرسانی حرارتی، T_{max}) به دست می‌آید و یا با استفاده از تاریخچه تدفین و حرارتی حوضه برآورد می‌شود. در صورتی

³¹ - Level of Organic Maturation

که درجه بلوغ (LOM) اشتباه برآورد شود، مقادیر مطلق TOC با خطا همراه خواهد بود، ولی مقادیر نسبی TOC در مقایسه با بازه‌های بالا و پائین صحیح هستند. به بیان دیگر، مقدار عددی TOC غلط، ولی نسبت TOC در زون‌های مختلف صحیح خواهد بود. در صورتی که نوع ماده آلی مشخص باشد، مقادیر S_2 پیرولیز که از آزمایش راک-اول به دست آمده‌اند را می‌توان با تبدیل TOC به S_2 پیش‌بینی کرد (Passey et al, 1990).



شکل ۲-۲: به دست آوردن TOC از روی $\Delta \log R$ و مقادیر LOM (Passey et al, 2010)

در مورد مثالی که در شکل ۲-۱ آمده است، حداکثر جداسدگی بین $\Delta \log R$ در حدود ۰/۷ (این مقدار از روی مقیاس مقاومت ویژه قرائت می‌شود)، مقدار LOM بین ۶ تا ۷ و تیپ ماده آلی در درجه اول از نوع کروژن تیپ II است. با استفاده از مقادیر $\Delta \log R$ و LOM در دیاگرام شکل ۲-۲ مقدار TOC قابل محاسبه است. مقادیر محاسبه شده در ستون چهارم شکل ۲-۱ نشان داده شده‌اند.

بیان ریاضی برای به دست آوردن $\Delta \log R$ از نگارهای سونیک و مقاومت ویژه به صورت زیر است:

$$\Delta \log R = \log_{10}(R/R_{\text{baseline}}) + 0.02 \times (\Delta t - \Delta t_{\text{baseline}}) \quad (1-2)$$

در این رابطه $\Delta \log R$ جدادگی منحنی‌های مقاومت ویژه و سونیک در مقیاس لگاریتمی، R مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر، Δt زمان اینتروال بر حسب $\mu\text{sec}/\text{ft}$ و $\Delta t_{\text{baseline}}$ و R_{baseline} مقادیر اندازه‌گیری شده مقاومت ویژه و Δt در مقابل خط مبنا هستند (Passey et al, 1990).

اغلب مقدار $\Delta t_{\text{baseline}}$ در تمام طول چاه ثابت است و فقط R_{baseline} برای انطباق بر منحنی Δt تغییر می‌کند. در مورد اینتروالی که در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، $\Delta t_{\text{baseline}} = 100$ و $R_{\text{baseline}} = 1$ هستند. رابطه تجربی برای محاسبه TOC با استفاده از $\Delta \log R$ در سنگ‌های غنی از رس به صورت زیر است:

$$\text{TOC} = (\Delta \log R) \times 10^{(2.297 - 0.1688 \times \text{LOM})} \quad (2-2)$$

در این رابطه TOC درصد وزنی کربن آلی در سازند و LOM درجه بلوغ ماده آلی هستند (Passey et al, 1990). مقدار LOM برابر ۷ مربوط به کروژنی است که تولید نفت خواهد کرد و LOM برابر ۱۲ نشان‌گر این است که ماده آلی در گذشته تولید هیدروکربن کرده و دیگر نمی‌تواند هیدروکربن تولید کند. تقریباً تمام شیل‌ها دارای مقدارگیری از کربن آلی هستند. مقدار متوسط TOC در شیل‌های سراسر جهان بین ۰/۲ تا ۱/۶۵ درصد وزنی متغیر است. غالب شیل‌ها TOC بیشتر از ۰/۸ درصد وزنی دارند.

جدادگی $\Delta \log R$ هم در سنگ‌های منشأ غنی از مواد آلی و هم در سنگ‌های مخزن حاوی هیدروکربور دیده می‌شود. در این شرایط می‌توان از نگارهای GR یا SP برای تفکیک زون‌های تمیز و شیلی استفاده کرد. اولین مزیت تعیین خط مبنا با استفاده از یک نگار تخلخل مانند صوتی با نگار مقاومت ویژه این است که هر دو منحنی به تغییرات تخلخل حساس‌اند و زمانی که خط مبنا در یک لیتولوژی خاص بنا شد، تغییرات تخلخل بر هر دو منحنی تأثیر می‌گذارد و این تأثیر به گونه‌ای است که بزرگی تغییرات در هر دو منحنی قابل مقایسه است. برای مثال افزایش تخلخل باعث افزایش ΔT می‌شود، ولی این یعنی حجم بیشتری از سنگ حاوی سیال

رسانا می‌شود و بنابراین مقاومت ویژه نیز کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات متناسب هستند و بنابراین اگر نگارهای مقاومت ویژه و تخلخل به شکل صحیح مقیاس بندی شوند، مقدار افزایش تخلخل تأثیر یکسانی بر هر دو نگار تخلخل و مقاومت ویژه خواهد داشت و به این ترتیب حساسیت به تخلخل برطرف می‌شود. به این وسیله می‌توان مقدار TOC را در چاه‌هایی که هیچ راه مستقیم برای نمونه‌گیری وجود ندارد، به دست آورد.

اگر چه مقادیر تعیین‌شده TOC با استفاده از نگارهای مقاومت ویژه به همراه چگالی و نوترون و مقادیر اندازه‌گیری شده در توافق کامل‌اند، اما دیده شده است که دقت روش مقاومت ویژه - صوتی بر هر دو روش مقاومت ویژه - نوترون و مقاومت ویژه - چگالی برتری دارد. این امر شاید ناشی از تأثیر شدید محیط چاه بر نگارهای نوترون و چگالی و عدم حساسیت نگار صوتی به محیط نامساعد چاه باشد.

روابط تجربی برای محاسبه مقدار جدادشدگی بین نگار مقاومت ویژه و نگارهای نوترون یا چگالی، یعنی

$\Delta \log R_{\text{Den}}$ و $\Delta \log R_{\text{Neu}}$ به صورت زیر است:

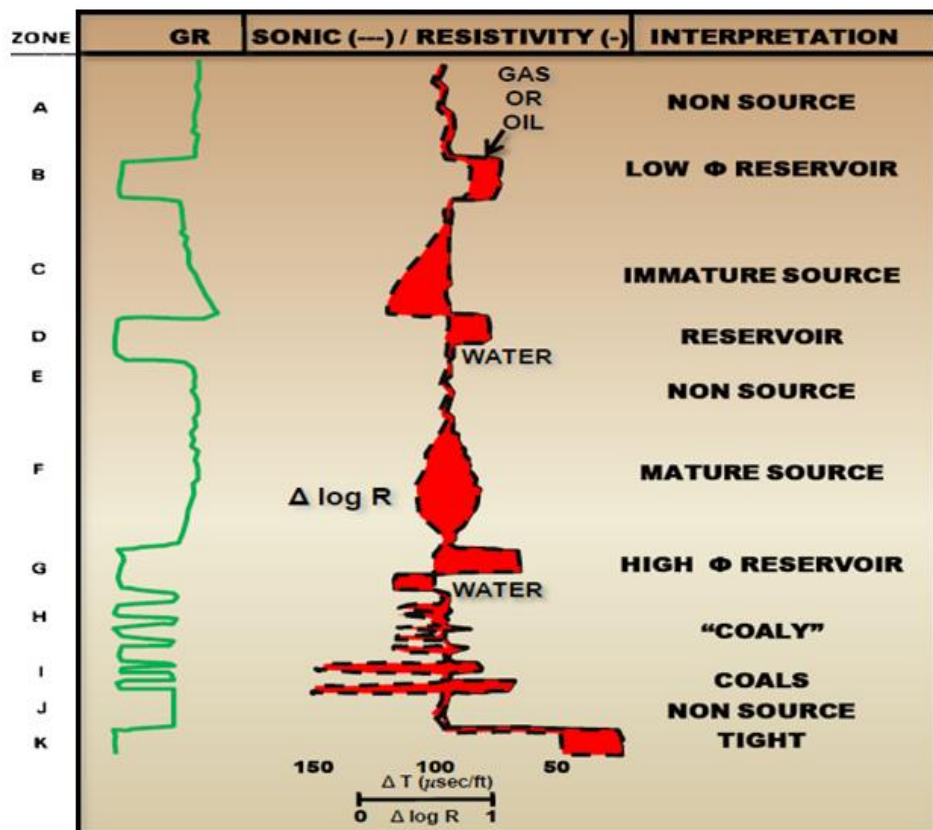
$$\Delta \log R_{\text{Neutron}} = \log_{10}(R/R_{\text{baseline}}) + 4 \times (\varphi_N - \varphi_{N\text{baseline}}) \quad (3-2)$$

$$\Delta \log R_{\text{Density}} = \log_{10}(R/R_{\text{baseline}}) - 2.5 \times (\rho_b - \rho_{\text{baseline}}) \quad (4-2)$$

در این روابط φ_N تخلخل نوترون مورد نظر، $\varphi_{N\text{baseline}}$ مقدار تخلخل نوترون در خط مبنا، ρ_b چگالی زون مورد نظر و ρ_{baseline} چگالی زون واقع در خط مبنا هستند. همانند نگار صوتی مقادیر $\varphi_{N\text{baseline}}$ و ρ_{baseline} در تمام طول چاه ثابت بوده و فقط مقدار R_{baseline} متغیر است (Passey et al, 1990).

۲-۳ تفسیر برهم اندازی $\Delta \log R$

اساس شناسایی سنگ‌های غنی از مواد آلی با استفاده از نگارهای تخلخل و مقاومت ویژه، در شکل ۲-۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: شکل شماتیک برای راهنمایی در استفاده از روش $\Delta \log R$ و تفسیر ویژگی‌های مختلفی که در این روش دیده می‌شود (Passey et al, 1990)

ویژگی بازه‌های غنی از مواد آلی در زون‌های C، F، H، I دیده می‌شود. جداسدگی $\Delta \log R$ در زون‌های نابالغ C به طور کامل از پاسخ و انحراف نگار صوتی ناشی می‌شود. در حالی که در زون بالغ F این جداسدگی از انحراف هر دو منحنی صوتی و مقاومت ویژه حاصل می‌شود. توجه کنید که در مقاطع زغالی (زون‌های H و I) مقدار GR پایین است. زمانی که زغال و یا لایه‌های زغالی وجود داشته باشد، احتمال نازک لایه بودن آن‌ها

نسبت به بازه‌های غنی از مواد آلی دریایی بیشتر است. مخازن هیدروکربوری، جداسدگی $\Delta \log R$ را در درجه اول به خاطر افزایش در مقاومت ویژه (به دلیل وجود نفت یا گاز غیر رسانی) نشان می‌دهند. پاسخ زون‌های مخزنی به این جداسدگی در زون‌های B و D و G نشان داده شده است. محل تماس نفت - آب یا گاز - آب به سادگی قابل تشخیص است (زون G).

زون‌های کم‌تخلخل به دلیل عدم وجود سیالات رسانی، دارای مقاومت ویژه بالایی‌اند (زون K). این‌گونه بازه‌ها را می‌توان از مقدار اندک ΔT (معمولاً کمتر از ۵۰ میکروثانیه بر فوت) شناسایی کرد. در بازه‌هایی که نه سنگ مخزن و نه سنگ منشأ هستند، معمولاً منحنی‌های صوتی و مقاومت ویژه بر هم منطبق می‌شوند، مانند زون‌های A، E و J که هم‌چنین نشان‌گر خط مبنا هستند (Passey et al, 1990).

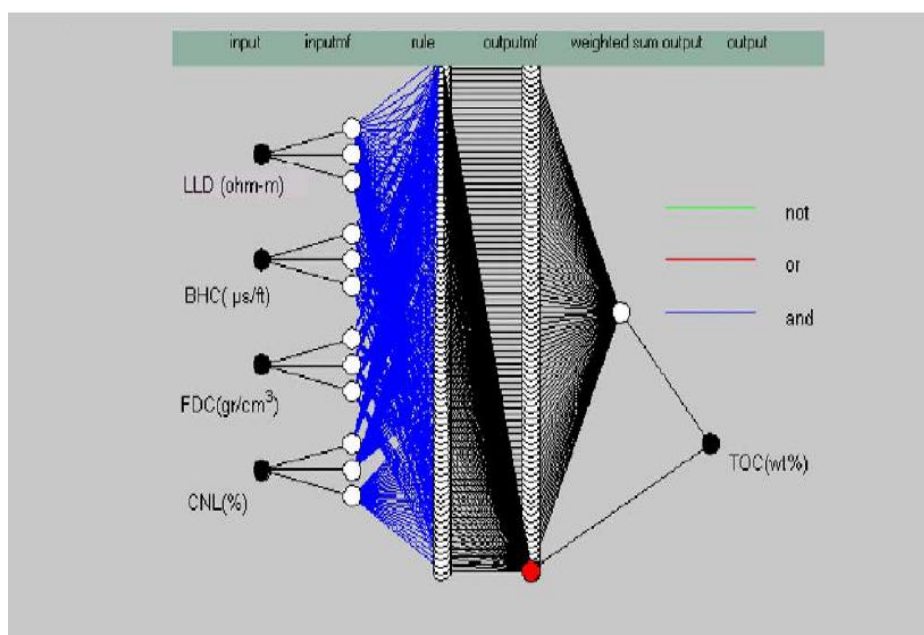
۲-۴ جداسدگی آنومالی وار $\Delta \log R$

جداسدگی آنومالی وار $\Delta \log R$ که به سنگ‌های غنی از مواد آلی مرتبط نیست، می‌تواند به یکی از موارد زیر مرتبط باشد:

مخازن هیدروکربوری، شرایط نامساعد چاه، رسوبات فشرده نشده، اینتروال‌های کم‌تخلخل، ولکانیزم و تبخیری‌ها

۲-۵ تعیین محتوای ماده آلی با استفاده از سیستم‌های هوشمند

امروزه استفاده از سیستم‌های هوشمند در صنایع نفت و گاز کاربردهای فراوانی یافته است. از میان آن‌ها می‌توان به شبکه‌های عصبی، فازی، نروفازی اشاره کرد. شکل ۲-۴ شبکه نروفازی‌ای را نشان می‌دهد که توسط آقای کمالی و همکارانش برای تخمین TOC مورد استفاده قرار گرفته است. چهار نگار شامل مقاومت، نوترون، صوتی و چگالی می‌تواند به عنوان داده‌های ورودی و TOC به عنوان خروجی شبکه نروفازی در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۴: دیاگرام نروفازی با چهار نگار شامل مقاومت، نوترون، صوتی و چگالی به عنوان داده‌های ورودی و TOC به عنوان خروجی (Kamali et al, 2004)

این امر منطقی به نظر می‌رسد که تکنیک نروفازی را برای بازه‌های غنی در چاه‌های مشابه و یا چاه‌ها و میادین نزدیک به هم، یعنی در جایی که گرادیان زمین‌گرمایی با تغییرات کم و یا بدون تغییر باقی می‌ماند، به کار گیریم (Kamali et al, 2004).

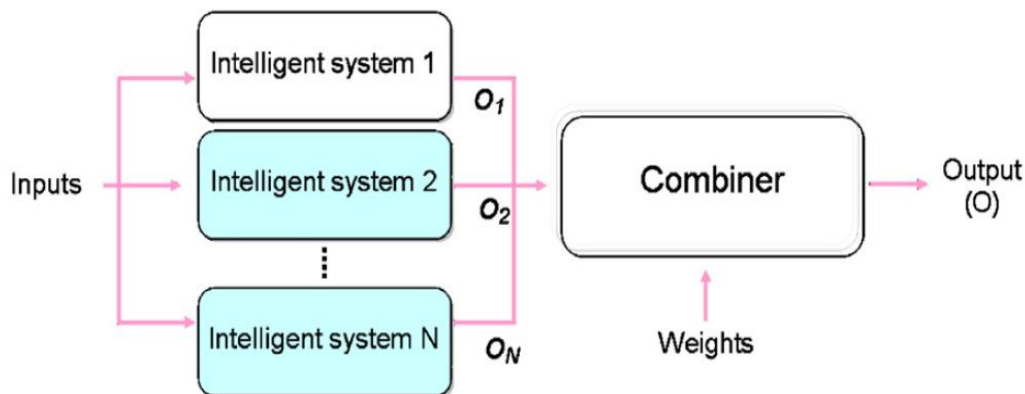
همانطور که در بخش قبل اشاره گردید، دکتر کدخدایی و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از یک ماشین کمپیته به تخمین محتوای ماده آلی در میدان گازی پارس جنوبی پرداختند. استفاده از این ماشین به

نوبه خود، روشی جدید برای تخمین محتوای ماده آلی به حساب می‌آید. در این بخش قصد داریم مروری بر روند انجام این پژوهش و نتایج به دست آمده از آن بنمائیم.

۲-۵-۱ ماشین کمیته با سیستم‌های هوشمند (CMIS)^{۳۲}

یک ماشین کمیته با سیستم‌های هوشمند از گروهی از سیستم‌های هوشمند تشکیل شده است که خروجی هر کدام از سیستم‌ها را ترکیب کرده و بنابراین فواید هم‌کارها را با اندکی محاسبات اضافی جمع‌آوری می‌کند. بنابراین عملکرد مدل می‌تواند بهتر از بهترین شبکه منفرد باشد. یک دیاگرام شماتیک در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. راه‌های مختلفی برای ترکیب خروجی سیستم‌های هوشمند در یک ترکیب‌کننده وجود دارد. میانگین‌گیری کلی رایج‌ترین آن‌هاست.

ترکیب درست سهم (وزن) سیستم‌های هوشمند در ماشین کمیته با سیستم‌های هوشمند می‌تواند توسط الگوریتم ژنتیک صورت پذیرد.



شکل ۲-۵: دیاگرام شماتیک از کمیته با سیستم‌های هوشمند (Kadkhodaei et al, 2009)

³² - Committee Machine with Intelligent Systems

فرض بر این است که تعداد N سیستم هوشمند آموزش‌دیده با بردار خروجی O_i برای پیش‌بینی بردار هدف T وجود دارد. خطای پیش‌بینی‌شده به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$e_i = O_i - T \quad i = 1, \dots, N \quad (5-2)$$

انتظار مربع خطا برای i امین سیستم هوشمند O_i عبارتست از:

$$E_i = \xi[(O_i - T)^2] = \xi[e_i^2] \quad (6-2)$$

که $\xi[\]$ ، انتظار است. میانگین خطا برای هر سیستمی که به تنهایی رفتار می‌کند، عبارتست از:

$$E_{avg} = 1/N \sum_{i=1}^N E_i = (1/N) \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (7-2)$$

با اعمال روش میانگین‌گیری، بردار خروجی O_i از CMIS عبارتست از:

$$CMI \approx 1/N \sum_{i=1}^N O_i \quad (8-2)$$

بنابراین CMIS مربع خطای پیش‌بینی‌شده به صورت زیر دارد:

$$E_{CMIS} = \xi[(O_{CMIS} - T)^2] = \xi[(1/N \sum_{i=1}^N O_i - T)^2] = \xi[(1/N \sum_{i=1}^N e_i)^2] \quad (9-2)$$

با در نظر گرفتن نامساوی کوشی:

$$(a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n) \leq (a_1^2 + a_2^2 + \dots + a_n^2) + (b_1^2 + b_2^2 + \dots + b_n^2) \quad (10-2)$$

و اعمال آن بر E_{CMIS} داریم

$$E_{CMIS} = \xi[(1/N \sum_{i=1}^N e_i)^2] \leq 1/N \sum_{i=1}^N e_i^2 = E_{avg} \quad (11-2)$$

که نشان می‌دهد که CMIS خطای کمتری از همه سیستم‌های هوشمند دارد (Kadkhodaie et al, 2009).

روش پیشنهادی، ماشین کمیته مبتنی بر سیستم هوشمند (CMIS) از دو قسمت اصلی تشکیل شده است:

الف) در مرحله اول پارامتر TOC با استفاده از سیستم‌های هوشمند که شامل منطق فازی، نروفازی و شبکه عصبی هستند، از داده‌های پتروفیزیکی پیش‌بینی می‌شود.

ب) در مرحله بعد، یک ماشین کمیته مبتنی بر سیستم هوشمند با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای پیش‌بینی TOC ساخته خواهد شد.

ورودی‌های این ماشین کمیته، خروجی‌های سیستم‌های هوشمند ذکر شده در مرحله قبل هستند. روش توصیف‌شده در این مطالعه از دو جهت، یک مدل جدید و بهبودیافته برای پیش‌بینی TOC از داده‌های پتروفیزیکی است:

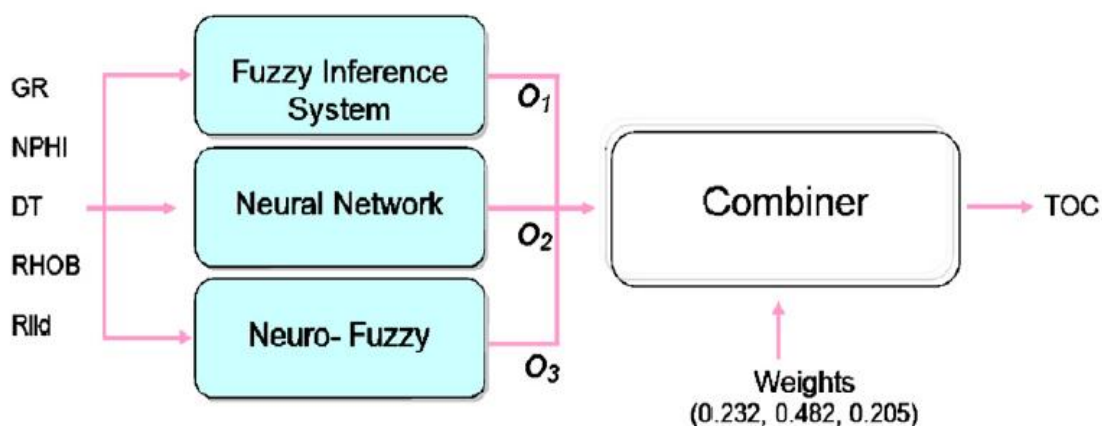
الف) در این روش از مفهوم ماشین کمیته برای پیش‌بینی پارامتر TOC استفاده می‌شود و بنابراین جمع‌آوری فواید همه کارها را دارا می‌باشد.

ب) الگوریتم ژنتیک برای تعیین سهم (وزن) هر کدام از الگوریتم‌ها برای ساختن ماشین کمیته مبتنی بر سیستم هوشمند به کار گرفته می‌شود.

این امر بسیار واضح است که بسیاری از مؤلفه‌های روش توصیف‌شده در این مطالعه بر اساس کار محققان بنا شده است که هر کدام از آنها به نوبه خود، جدید نمی‌باشند. برای مثال منطق فازی و شبکه عصبی تکنیک‌هایی هستند که به خوبی شناخته شده می‌باشند (Kadkhodaie et al, 2009).

در مطالعه‌ای که دکتر کدخدایی در سال ۲۰۰۹ انجام دادند، از سیستم‌های هوشمندی که شامل منطق فازی، نروفازی و شبکه عصبی می‌شود و یک ماشین کمیته با سیستم‌های هوشمند برای پیش‌بینی TOC از داده‌های پتروفیزیکی (نگارهای GR، NPFI، DT، RHOB، R_{LLD}) استفاده شده است.

CMIS نتایج تخمین زده شده از $TS-FIS^{33}$ ، NN و NF^{34} را به صورت یک‌جا جمع‌آوری می‌شود که هر کدام از این‌ها فاکتور وزنی مخصوص به خودشان که نشان دهنده سهم هر کدام در پیش‌بینی نهایی است را نشان می‌دهد (شکل ۲-۶).



شکل ۲-۶: دیاگرامی که نشان‌دهنده CMIS طراحی شده می‌باشد (Kadkhodaei et al, 2009).

۲-۵-۲ شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی، الگوریتم‌های غیرخطی محاسباتی برای پردازش تصاویر، سیگنال و داده‌های عددی هستند. در طول چند دهه گذشته، از شبکه‌های عصبی مصنوعی به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف استفاده شده است. چندین مشخصه شبکه‌های عصبی مانند دینامیک درونی شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی، تغییرات خطای

33 -Takagi Sugeno-fuzzy Inference system

34 - Neuro Fuzzy

اطلاعات و عدم نیاز به اطلاعات اضافی بر داده‌های ورودی، استفاده از شبکه عصبی را در بسیاری از مسائل مهندسی جذاب می‌کند.

یکی از ساختارهای شبکه عصبی، پرسپترون چندلایه^{۳۵} است. می‌توان یک پرسپترون چندلایه را به وسیله توابع غیرخطی به گونه‌ای آموزش داد که بتواند هر تابع قابل اندازه‌گیری را تقریب زده و پیش‌بینی کند. شبکه‌های عصبی با استفاده از مجموعه داده‌های واقعی ورودی و خروجی، الگوریتم‌های آموزشی را به کار می‌گیرند تا ارتباطات پنهانی میان داده‌های ورودی و خروجی را از طریق ضرایب وزنی، بایاس‌ها و توابع اعمالی به خروجی‌های هر لایه شکل بدهند. الگوریتم‌های آموزشی متنوعی برای آموزش شبکه عصبی به کار گرفته شده است. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم پس‌انتشار خطا^{۳۶} اشاره کرد. در الگوریتم پس‌انتشار خطا در هر مرحله مقدار خروجی محاسبه‌شده جدید، با مقدار واقعی مقایسه شده و با توجه به خطای به دست آمده به اصلاح وزن‌ها و بایاس‌های شبکه پرداخته می‌شود؛ به نحوی که در انتهای هر تکرار، خطای حاصله کمتر از میزان به دست آمده در تکرار قبلی باشد. اساس این کمینه‌سازی، حرکت بر روی بردار گرادیان تابع مربعات خطای شبکه می‌باشد که این بردار نیز به نوبه خود به وسیله مشتق‌گیری زنجیره‌ای از تابع خطا نسبت به تک پارامترهای شبکه به دست می‌آید (Haykin et al, 1990).

اگر چه استفاده از الگوریتم پس‌انتشارخطا در این سال‌ها برای آموزش شبکه‌های عصبی بسیار رواج یافته است، اما استفاده از این روش در برخی موارد منجر به بروز مشکلاتی می‌گردد. این موانع شامل سرعت پایین همگرایی در روند آموزش و همگرایی زودرس در مینیمم‌های محلی می‌باشد. هایکین^{۳۷} در کتاب بنیان جامع شبکه‌های عصبی چندین الگوریتم برای بهینه‌سازی آموزش به منظور غلبه بر موارد یاد شده، ارائه داده است (Haykin et al, 1990).

³⁵ - Multi Layer Perceptron

³⁶ - Back Propagation

³⁷ - Haykin

امروزه کاربرد الگوریتم‌های جستجوگر تکاملی برای آموزش شبکه‌های عصبی به جای روش‌های آموزشی مرسوم، مورد توجه محققان قرار گرفته است؛ به طور مثال، روگرز و همکارانش در سال ۱۹۹۵ برای محاسبه ضرایب شبکه عصبی از الگوریتم ژنتیک بهره گرفته و کومار و همکارانش در سال ۲۰۰۴ از روش بی‌زین^{۳۸} برای آموزش شبکه عصبی استفاده نمودند.

از الگوریتم‌های جستجوی تکاملی به الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم زنبور عسل می‌توان اشاره کرد که از آن‌ها به عنوان یک جایگزین برای آموزش شبکه‌های عصبی یاد می‌شود.

۲-۵-۲ پرسپترون چندلایه

پرسپترون یک نوع شبکه عصبی مصنوعی است که در سال ۱۹۵۷ به وسیله فرانک روزنبلات^{۳۹} ابداع گردید. یک پرسپترون چندلایه نشان‌دهنده یک ارتباط غیرخطی بین بردار ورودی‌ها و بردار خروجی‌ها می‌باشد. این کار از طریق اتصال نرون‌های هر گره در لایه‌های قبلی و بعدی انجام می‌شود. خروجی نرون‌ها در ضرایب وزنی ضرب می‌شوند و به تابع غیرخطی فعال‌سازی به عنوان ورودی داده می‌شوند. در مرحله آموزش به پرسپترون اطلاعات آموزش داده می‌شود. سپس وزن‌های شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که خطای بین خروجی پیش‌بینی‌شده و هدف کمینه گردد و یا این‌که تعداد دفعات آموزش به مقدار حداکثر از پیش تعیین‌شده برسد. سپس به منظور صحت آموزش انجام‌شده، یک سری ورودی‌های تجربه‌نشده به شبکه اعمال می‌شوند. این ورودی‌ها باید متفاوت از ورودی‌های به‌کارگرفته‌شده برای آموزش شبکه باشند. عموماً آموزش شبکه‌های عصبی بسیار پیچیده و یک مسئله با تعداد متغیر زیاد است (Haykin et al, 1990).

³⁸ - Bayesian

³⁹ - Frank Rosenblatt

۲-۵-۲ آموزش شبکه عصبی مصنوعی

یک شبکه عصبی مصنوعی از یک سری المان‌های پردازشی تشکیل شده است که به عنوان نرون شناخته می‌شوند و به یکدیگر متصل هستند. خروجی آن نرون به صورت زیر توصیف می‌گردد:

$$Y_i = f_i(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j + \theta_i) \quad (12-2)$$

به طوری که Y_i خروجی نرون، x_j همان z آمین ورودی نرون، w_{ij} وزن ارتباطی بین نرون و ورودی x_j همان آستانه^{۴۰} یا بایاس نرون و f_i تابع انتقال^{۴۱} یا همان تابع تحریک نرون می‌باشد.

به طور کلی، انطباق با حداقل‌سازی تابع خطای شبکه که با E نمایش داده می‌شود، رخ می‌دهد. تابع خطا در معادله ۱۳-۲ نشان داده شده است.

$$E(w(t)) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K (d_k - o_k)^2 \quad (13-2)$$

به گونه‌ای که $E(w(t))$ خطا در t آمین تکرار، $w(t)$ وزن اتصالات در t آمین تکرار، d_k نرون خروجی مطلوب، o_k مقدار واقعی k آمین نرون خروجی، k تعداد نرون‌های خروجی و n تعداد الگو می‌باشد. هدف بهینه‌سازی کمینه‌کردن تابع هدف^{۴۲} به وسیله وزن‌های شبکه می‌باشد (Karaboga et al, 2009).

⁴⁰ - Threshold

⁴¹ - Transfer Function

⁴² - Objective Function

۲-۵-۳ الگوریتم اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات برای نخستین بار توسط راسل ابرهارت^{۴۳} و جیمز کندی^{۴۴} در سال ۱۹۹۵ معرفی گردیده است. آن‌ها این الگوریتم را PSO^{۴۵} نام نهادند. همانند سایر الگوریتم‌های جمعیتی، الگوریتم اجتماع ذرات از مجموعه‌ای از پاسخ‌های ممکن استفاده می‌نمود که این پاسخ‌ها تا زمانی که پاسخ بهینه یافت شود و یا شرایط پایان یافتن الگوریتم محقق گردد، به حرکت خود در فضای جستجو ادامه می‌دهند.

در الگوریتم پایه PSO تعداد زیادی از ذرات در فضای جستجو حرکت کرده و هر ذره تجربه شخصی خود را اعم از بردار موقعیت و نیز بردار سرعت را حفظ می‌کند و کل گروه ذرات نیز در هر لحظه بهترین تجربه جمعی را حفظ می‌نماید. بردار سرعت در هر لحظه بر اساس سه عامل سرعت در گام قبلی، بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه جمعی به روز می‌شود و پس از آن موقعیت هر ذره بر اساس این سرعت جدید به روز می‌شود.

در الگوریتم PSO هر راه‌حل که به آن یک ذره گفته می‌شود، معادل یک پرنده در الگوریتم حرکت جمعی پرندگان است. هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط یک تابع شایستگی محاسبه می‌شود. هر چه ذره در فضای جستجو به هدف - غذا در مدل پرندگان - نزدیک‌تر باشد، شایستگی بیشتری دارد. همچنین هر ذره دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد. هر ذره با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مسئله ادامه می‌دهد (Kennedy, 2009).

آغاز کار PSO به این صورت است که گروهی از ذرات (راه‌حل‌ها) به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به روز کردن نسل‌ها سعی در یافتن راه‌حل بهینه می‌نمایند. در هر گام، هر ذره با استفاده از دو مقدار به روز می‌شود. اولین مورد بهترین موقعیتی است که تا کنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است. موقعیت مذکور با نام

⁴³ - Russel Eberhart

⁴⁴ - James Kenedy

⁴⁵ - Particle Swarm Optimization

$Pbest^{46}$ (بهترین تجربه شخصی) شناخته و نگهداری می‌شود. بهترین مقدار دیگری که توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهترین موقعیتی است که تا کنون توسط جمعیت ذرات به دست آمده است. این موقعیت با نام $Gbest^{47}$ (بهترین تجربه جمعی) نمایش داده می‌شود. در برخی از ویرایش‌های PSO، ذره قسمت‌هایی از جمعیت را که همسایگان توپولوژیکی‌اش هستند، انتخاب می‌کند و تنها آن‌ها را در اعمال خود دخیل می‌کند که در این حالت بهترین راه‌حل محلی که با $Lbest^{48}$ نشان داده می‌شود، به جای $Gbest$ مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده یک سری معادلات به روز می‌شود.

بردار سرعت در هر لحظه بر اساس سه عامل سرعت در گام قبل، بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه جمعی به روز می‌شود و پس از آن موقعیت هر ذره بر اساس این سرعت جدید به روز می‌شود. این الگوریتم با یک گروه از جواب‌های تصادفی (ذره‌ها) شروع به کار می‌کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با به روز کردن هر ذره به کمک دو مقدار سرعت و مکان مطابق روابط معادلات به جستجو می‌پردازد (Kennedy, 2009).

۲-۵-۳-۱ رابطه به روز رسانی سرعت

در الگوریتم حرکت دسته‌جمعی ذرات استاندارد، در محاسبه سرعت ذره در گام بعد، کل سرعت فعلی محاسبه می‌گردد. در واقع سرعت ذره در هر گام از دو قسمت تشکیل می‌شود که قسمت اول سرعت فعلی ذره و قسمت دوم مربوط به دنبال کردن بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروه است. بدون قسمت دوم، الگوریتم حالت یک جستجوی کورکورانه را خواهد داشت و بدون قسمت اول، الگوریتم به جستجوی محلی در نزدیکی بهترین ذره تبدیل خواهد شد که در رسیدن به قسمت‌های زیادی از فضای جستجو ناتوان خواهد بود. الگوریتم حرکت

⁴⁶ - Person Best

⁴⁷ - Global Best

⁴⁸ - Local Best

دسته‌جمعی ذرات با ترکیب این دو قسمت سعی می‌کند که به نوعی تعادل را بین جستجوی سراسری و محلی ایجاد نماید. برای به روز رسانی سرعت از رابطه زیر استفاده می‌شود (Kennedy, 2009):

$$V[t + 1] = V[t] + \text{Rand}(t) + C_1 * (\text{Pbest}[t] - \text{Position}[t]) + \text{Rand}(t) + C_2 * (\text{Gbest}[t] - \text{Position}[t]) \quad (۱۴-۲)$$

$V[t]$ و $\text{Position}[t]$ هر دو آرایه‌هایی به طول تعداد ابعاد مسئله می‌باشند که به ترتیب سرعت ذره و موقعیت فعلی ذره می‌باشند. C_1 و C_2 فاکتورهای یادگیری و t گام حرکت می‌باشد. سمت راست معادله از سه قسمت تشکیل شده است که قسمت اول سرعت فعلی ذره می‌باشد و قسمت‌های دوم و سوم تغییر سرعت ذره و چرخش آن به سمت بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروه را به عهده دارند. اگر قسمت اول را در این معادله در نظر نگیریم، آن‌گاه سرعت ذرات تنها با توجه به موقعیت فعلی و بهترین تجربه ذره و بهترین تجربه جمع تعیین می‌شود. به این ترتیب، بهترین ذره جمع در جای خود ثابت می‌ماند و سایرین به سمت آن ذره حرکت می‌کنند. در واقع حرکت دسته‌جمعی ذرات بدون قسمت اول معادله سرعت، فرآیندی خواهد بود که در حین آن فضای جستجو به تدریج کوچک می‌شود و جستجوی محلی بهترین ذره شکل می‌گیرد. در مقابل اگر فقط قسمت اول معادله سرعت را در نظر بگیریم، ذرات راه عادی خود را می‌روند تا به دیواره محدودده برسند و به نوعی جستجوی سراسری را انجام دهند. در معادله سرعت با ترکیب این دو عامل سعی شده است تا موازنه‌ای بین جستجوی محلی و سراسری برقرار گردد (کاشفی‌پور و همکاران، ۱۳۸۶).

یک پارامتر جدید توسط دکتر شی^{۴۹} و دکتر ابره‌ارت که از ارائه‌دهندگان الگوریتم اولیه PSO بودند، ارائه گردید. این پارامتر جدید وزن میانی نامیده شده و با W نمایش داده می‌شود. هدف از معرفی این پارامتر، برقراری موازنه بهتر و قابل تنظیم بسته به نوع مسئله، بین جستجوی محلی و جستجوی سراسری است. به این منظور در

⁴⁹ - Shi

معادله سرعت، این ضریب در سرعت اولیه ضرب می‌شود و به عبارتی تنها قسمتی از سرعت اولیه به سرعت آینده ذره منتقل می‌شود و به این ترتیب معادله به روز رسانی سرعت به شکل معادله زیر تغییر می‌کند:

$$V[t + 1] = W * V[t] + \text{Rand}(t) + C_1 * (Pbest[t] - \text{Position}[t]) + \text{Rand}(t) + C_2 * (\text{Gbest}[t] - \text{Position}[t]) \quad (15-2)$$

وزن میانی می‌تواند یک ضریب ثابت، یک تابع خطی با زمان و یا حتی یک تابع غیرخطی با زمان نیز باشد. در بسیاری از کاربردها وزن میانی به صورت تابع خطی با زمان در نظر گرفته می‌شود که تابعی نزولی است. به این ترتیب در ابتدا قسمت بیشتری از سرعت فعلی ذره در سرعت آینده‌اش دخالت داده می‌شود و با گذشت زمان این میزان کاهش می‌یابد. به عبارت بهتر، در ابتدا ذرات میل بیشتری به تجربه‌های تازه دارند و با گذشت زمان این میل جای خود را به دنباله‌روی بیشتر از بهترین‌ها می‌دهد. این روش در بسیاری از موارد می‌تواند مشکل گیر افتادن در بهینه‌های محلی را حل کند (Kennedy, 2009).

۲-۳-۵-۲ پارامتر شخصی C_1 و پارامتر جمعی C_2 و رابطه به روز رسانی

موقعیت

ضرایب C_1 و C_2 به همراه بردارهای تصادفی r_1 و r_2 تأثیر اجزای شخصی و جمعی را روی جستجوی تصادفی تعیین می‌کند. این پارامترها به نام پارامترهای اعتماد نیز شناخته می‌شوند، زیرا ضریب C_1 تعیین می‌کند که یک ذره تا چه حد به تجربیات خود وابسته باشد، در حالی که C_2 تعیین‌کننده این امر است که یک ذره تا چه حد به تجربیات همسایگان خود تکیه می‌کند (Kennedy, 2009).

موقعیت جدید ذره در هر بعد مطابق معادله به روز رسانی موقعیت که در زیر ارائه شده است، محاسبه می‌گردد:

$$\text{Position}[t + 1] = \text{Position}[t] + V[t] \quad (16-2)$$

۲-۵-۳ گام‌های الگوریتم PSO استاندارد (پایه)

الف) مقداردهی اولیه

ب) برای هر نمونه در جمعیت جاری، میزان شایستگی هر نمونه محاسبه شود و با مقدار ذخیره‌شده در حافظه (Pbest) مقایسه شده و به عنوان بهترین مقدار Pbest ذخیره شود.

پ) بهترین جواب جمعیت جاری (Gbest) مشخص شود.

ت) برای هر نمونه در جمعیت مراحل زیر تکرار شود:

ت-۱) سرعت نمونه با استفاده از رابطه به روز رسانی سرعت تنظیم شود.

ت-۲) مکان هر نمونه با استفاده از رابطه به روز رسانی موقعیت، به روز رسانی شود.

ث) به مرحله (ب) بروید.

در هر مرحله زمانی، این الگوریتم تکاملی چندین مرتبه (نسل) تکرار می‌شود. شرط خاتمه الگوریتم هم‌گرایی تا حد معین و یا توقف بعد از تعداد معینی تکرار است (Kennedy, 2009).

۲-۵-۳ به کارگیری الگوریتم PSO در آموزش شبکه عصبی

متغیرهای بهینه‌سازی در آموزش یک شبکه عصبی شامل وزن‌ها و بایاس‌های مربوط به شبکه هستند. اگر لایه n ام از یک شبکه فرضی متشکل از R ورودی و M نرون باشد، آن‌گاه ماتریس وزن‌ها و بایاس‌های این لایه را می‌توان با رابطه ۲-۱۷ به صورت زیر نمایش داد:

$$W^n = \begin{bmatrix} (W_1^n)^T \\ (W_2^n)^T \\ \cdot \\ \cdot \\ (W_M^n)^T \end{bmatrix} \quad (17-2)$$

$$b^n = \begin{bmatrix} b_1^n \\ b_2^n \\ \cdot \\ \cdot \\ b_M^n \end{bmatrix} \quad (18-2)$$

در نهایت برای یک شبکه L لایه، بردار متغیرهای X را می‌توان از رابطه ۱۹-۲ به دست آورد:

$$X = \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X^L \end{bmatrix} \quad (19-2)$$

در واقع این بردار همان بردار موقعیت ذکر شده است که مقدار بهینه آرگومان‌های آن با استفاده از الگوریتم

PSO محاسبه خواهد شد (کاشفی‌پور و همکاران، ۱۳۸۶).

۲-۵-۴ الگوریتم کلونی زنبورهای مصنوعی^{۵۰}

این الگوریتم رفتار جستجوی گروه زنبورهای عسل را شبیه‌سازی می‌کند. این الگوریتم، یک الگوریتم شبیه سازی ساده، توانمند^{۵۱} و آماری بر پایه جمعیت^{۵۲} می‌باشد.

کارابوگا و باستارک^{۵۳} عملکرد ABC را با دیگر الگوریتم‌های اکتشافی مانند الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات^{۵۴} و تکامل تفاضلی^{۵۵} بر روی مسائلی نامحدود مقایسه کرده‌اند (Karaboga, 2009).

شبه‌کد این الگوریتم به صورت زیر است:

الف) ایجاد جمعیت اولیه X_i ($i = 1, \dots, SN$)

ب) ارزیابی جمعیت

پ) حلقه = ۱ :

ت) تکرار کن

ث) ایجاد جمعیت جدید V_i برای زنبورهای کارگر^{۵۶} با استفاده از معادله ۲-۲۰ و ارزیابی آن‌ها

$$V_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij} (X_{ij} - X_{kj}) \quad (2-20)$$

ج) اعمال فرآیند انتخاب آزمندانه^{۵۷}

⁵⁰ - Artificial Bee Colony

⁵¹ - Robust

⁵² - Population Base

⁵³ - Karaboga & Bastark

⁵⁴ - Particle Swarm Optimization

⁵⁵ - Differential Evolution

⁵⁶ - Employed Bee

⁵⁷ - Greedy Selection

چ) محاسبه مقادیر احتمال P_i برای راه‌حل‌های X_i با استفاده از معادله ۲-۲۱:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (21-2)$$

ح) ایجاد جمعیت جدید V_i از راه‌حل‌های X_i برای زنبورهای ناظر^{۵۸} با توجه به P_i و ارزیابی آن‌ها

خ) اعمال فرآیند انتخاب آزمندانه

د) تعیین راه‌حل‌های متروک‌سازی برای زنبورهای پیش‌آهنگ^{۵۹} (در صورت وجود) و جایگزین کردن آن‌ها

با یک راه‌حل تصادفی جدید X_i توسط معادله ۲-۲۲:

$$V_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij} (X_{ij} - X_{kj}) \quad (22-2)$$

ذ) به خاطر سپردن بهترین راه‌حلی که تا کنون به دست آمده است.

ر) حلقه = حلقه + ۱

ز) این حلقه تا زمانی ادامه می‌یابد که به حداکثر تعداد حلقه‌ها (MCN^{۶۰}) برسد.

در الگوریتم ABC موقعیت منابع غذا بیانگر تعداد راه‌حل‌های ممکن برای مسئله بهینه‌سازی است و

مقدار نکتار یک منبع غذایی متناظر با کیفیت (شایستگی^{۶۱}) راه‌حل متناظر با آن است. تعداد زنبورهای

کارگر و ناظر برابر تعداد راه‌حل‌های جمعیت می‌باشد. در گام اول، ABC یک توزیع تصادفی از جمعیت P از

موقعیت‌های منابع غذایی (SN) را تولید می‌کند، به گونه‌ای که SN بیانگر اندازه جمعیت می‌باشد. هر راه-

حل X_i یک بردار D بعدی می‌باشد که در این جا D تعداد پارامترهای بهینه‌سازی می‌باشد.

⁵⁸ - Onlooker

⁵⁹ - Scout Bee

⁶⁰ - Maximum Cycle Number

⁶¹ - Fitness

بعد از شروع، تعداد جمعیت موقعیت‌ها (راه‌حل‌ها) در معرض حلقه‌های تکراری فرآیند جستجوی زنبورهای کارگر، ناظر و پیش‌آهنگ قرار می‌گیرند ($C=1,2,\dots,MCN$). زنبورهای کارگر بر اساس اطلاعات محلی ۶۲ در ذهن خود یک اصلاح در موقعیت یا همان راه‌حل ایجاد می‌کنند و میزان نکتار (که معادل همان شایستگی است) منبع جدید را اندازه‌گیری می‌کنند. اگر مقدار نکتار منبع جدید بیشتر از منبع قبلی باشد، زنبور موقعیت جدید را در حافظه خود نگه می‌دارد و قبلی را در فراموش می‌کند. بعد از آن که زنبورهای کارگر فرآیند جستجو را تکمیل کردند، اطلاعات میزان نکتار و منابع غذایی و اطلاعات موقعیت آن‌ها را در منطقه‌ای به نام منطقه رقص ۶۳ با زنبورهای ناظر به اشتراک می‌گذارند. زنبور ناظر با استفاده از اطلاعات همه زنبورهای کارگر، اطلاعات نکتار را ارزیابی کرده و یک منبع غذایی با احتمال متناسب با میزان نکتار آن را انتخاب می‌کند. همانند زنبورهای کارگر، این زنبور در حافظه خود یک اصلاح در موقعیت ایجاد کرده و میزان نکتار منبع جدید را بررسی می‌کند. به مانند قبل، اگر میزان نکتار بیشتر از موقعیت قبلی باشد، موقعیت جدید را در حافظه خود نگه می‌دارد و موقعیت قبلی را فراموش می‌کند (Karaboga, 2009).

در الگوریتم ABC تابع برازش به صورت زیر تعریف می‌گردد (Karaboga, 2009):

$$\text{fit}_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & f_i \geq 0 \\ 1 + |f_i| & f_i < 0 \end{cases} \quad (2-23)$$

که در آن مقدار تابع هدف جواب A و fit_i برازندگی جواب A پس از تولید جواب‌های جدید است. انتخاب یک منبع غذایی توسط یک زنبور دیده‌بان مصنوعی بستگی به مقدار احتمال مرتبط با آن منبع غذایی (P_i) دارد که بر اساس فرمول زیر محاسبه می‌گردد (Karaboga, 2009):

⁶² - Local

⁶³ - Dance Area

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{j=1}^{SN} fit_j} \quad (24-2)$$

در جایی که fit_i مقدار شایستگی راه‌حل i می‌باشد که متناسب با میزان نکتار منبع غذایی در موقعیت i می‌باشد و SN تعداد منابع غذایی می‌باشد که برابر با تعداد زنبورهای کارگر می‌باشد.

جهت ایجاد یک موقعیت غذایی جدید با استفاده از موقعیت قبلی موجود در حافظه، ABC از

عبارت زیر استفاده می‌کند:

$$V_{ij} = X_{ij} + \emptyset_{ij} (X_{ij} - X_{kj}) \quad (25-2)$$

$k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ و $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ اندیس‌هایی هستند که به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. البته

مقدار k بایستی متفاوت از i باشد. \emptyset_{ij} یک عدد تصادفی در بازه $[-1, 1]$ می‌باشد. این پارامتر تولید منابع

غذایی در حوالی X_{ij} را کنترل می‌کند و بیان‌گر مقایسه دو موقعیت غذایی نوسط یک زنبور می‌باشد.

همان‌طور که در معادله ۲-۲۵ دیده می‌شود، هنگامی که اختلاف بین پارامترهای X_{ij} و X_{kj}

کاهش می‌یابد، آشفتگی^{۶۴} موقعیت X_{ij} نیز کاهش می‌یابد. بنابراین زمانی که به راه‌حل بهینه در فضای

جستجو نزدیک می‌شویم، طول گام نیز کاهش می‌یابد.

منبع غذایی‌ای که نکتار آن توسط زنبورها متروک می‌گردد، به وسیله زنبورهای پیش‌آهنگ با

یک منبع غذایی جدید جایگزین می‌شود. در ABC این کار با تولید یک موقعیت جدید تصادفی و

جایگزین کردن آن با موقعیت متروک‌شده، شبیه‌سازی می‌شود. در الگوریتم ABC در شرایطی که یک

موقعیت تحت تعداد مشخصی از سیکل دیگر بهبود نمی‌یابد، آن موقعیت متروک‌شده فرض می‌گردد.

این مقدار از پیش تعیین‌شده تعداد سیکل‌ها یک پارامتر کنترلی مهم در الگوریتم ABC است که حد^{۶۵}

نامیده می‌شود. با فرض آن که منبع متروک‌شده X_i می‌باشد و $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ، زنبورهای دیده‌بان به

دنبال جستجوی منبعی جدید برای جایگزینی X_i هستند. این عملیات به صورت زیر انجام می‌گیرد:

⁶⁴ - Perturbation

⁶⁵ - Limit

$$X_i^j = X_{\min}^j + \text{Rand}(0,1)(X_{\max}^j - X_{\min}^j) \quad (2-26)$$

بعد از آن که هر موقعیت منبع کاندیدشده V_{ij} تولید شده و بعد از آن توسط زنبور مصنوعی ارزیابی شد، عملکرد آن با موقعیت قبلی آن مقایسه می‌گردد. اگر منبع غذایی جدید مقدار نکتار مساوی یا بهتر از منبع قبلی داشته باشد، این موقعیت جدید جایگزین قبلی می‌گردد و گرنه موقعیت قبلی در حافظه باقی می‌ماند. به بیان دیگر، یک مکانیزم انتخاب آزمندانه^{۶۶} بین موقعیت قبلی و جدید اعمال می‌گردد (Karaboga, 2009).

سه پارامتر کنترلی در الگوریتم ABC وجود دارد:

الف) تعداد منابع غذایی که برابر با تعداد زنبورهای کارگر یا زنبورهای ناظر است (SN)

ب) مقدار حد

پ) حداکثر تعداد حلقه‌ها

در یک فرآیند جستجوی توانمند، فرآیندهای اکتشاف^{۶۷} و استخراج^{۶۸} با همدیگر انجام شوند. در الگوریتم ABC در حالی که زنبورهای کارگر و ناظر فرآیند استخراج را در فضای جستجو انجام می‌دهند، زنبورهای پیش‌آهنگ فرآیند اکتشاف را کنترل می‌کنند (Karaboga, 2005).

⁶⁶ - Greedy

⁶⁷ - Exploration

⁶⁸ - Exploitation

۲-۶ تخمین گاز برجا

روش‌هایی که برای پیش‌بینی تولید و تخمین ذخیره بر جای مخزن به کار می‌روند، عبارتند از:

الف) روش‌های حجمی

ب) موازنه مواد^{۶۹}

پ) نمودارهای نرخ کاهشی تولید^{۷۰}

ت) تطبیق تاریخچه‌ای

ث) نمودارهای معیار

۲-۶-۱ روش‌های موازنه مواد

مبنای یکی از روش‌های تحقیق در مورد وضع مخازن زیرزمینی، روش موازنه مواد خروجی، ورودی و موجود در سنگ مخزن می‌باشد. این مدل با وجود قدمتی که دارد، همچنان در بعضی موارد به عنوان مبنای محاسبات در نظر گرفته می‌شود. به عبارت ساده در این حالت سنگ مخزن به صورت یک مخزن متجانس که در سراسر آن سنگ و سیال موجود به صورت همگن قرار دارد فرض می‌شود و بین مواد خروجی از آن (تولید در هر زمان)، مواد ورودی آن (آب ورودی و سیالات تزریقی) و مواد موجود و یا باقیمانده در سنگ مخزن معادله حجمی توازن نوشته می‌شود. در این حالت درجه اشباع و فشار به طور مداوم و یکسان به سراسر مخزن منتقل می‌گردد و لذا تغییر فشار در هر لحظه و در هر نقطه از مخزن قابل تخمین و بررسی است.

با توجه به مطالب فوق و انجام یک سری تعبیر و تبدیل ریاضی می‌توان مجهولات زیر را محاسبه نمود:

الف) مقدار هیدروکربن موجود در سنگ مخزن

⁶⁹ - Material Balance

⁷⁰ - Decline Curves

ب) مقدار آب ورودی به مخزن از طریق فعالیت آبدۀ طبیعی مخزن .

ج) تولید نفت ، گاز و آب در هر لحظه و باقیمانده نفت و گاز قابل بهره برداری با توجه به شرایط موجود .

۲-۶-۲ روش آنالیز نمودار کاهش تولید

روش نرخ کاهش تولید یک ابزار اصولی برای تخمین ذخایر قابل بازیافت می‌باشد. تحلیل کاهش تولید چاه، یک روش گرافیکی است که برای تحلیل و پیش‌بینی عملکرد چاه‌های نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. تحلیل این نمودارها از مشاهدات تجربی عملکرد چاه‌های نفت و گاز حین تولید به دست آمده است و بر خلاف تصور، از تئوری‌های جریان سیال در محیط متخلخل مشتق نشده است (Johnson et al, 2009). تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که سه نوع روند کاهشی برای نرخ تولید قابل مطالعه است که در شکل ۲-۷ نشان داده شده است:

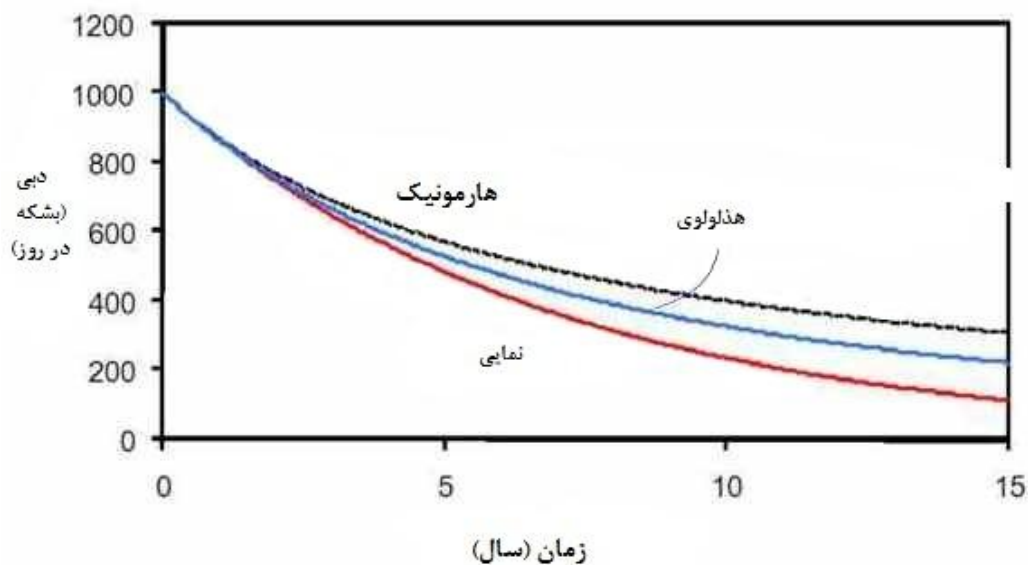
الف) نمایی

ب) هذلولوی

پ) هارمونیک

اصول تئوری نرخ کاهش تولید، از تعریف نرخ کاهش تولید آغاز می‌شود که به صورت زیر است:

$$D = - \frac{\Delta q/q}{\Delta t} \quad (2-27)$$



شکل ۲-۷: سه نوع روند کاهشی برای نرخ تولید (Johnson et al, 2009)

۳-۶-۲ روش‌های حجمی

اغلب بعد از اکتشاف شیل‌های گازی و در مراحل اولیه تولید، این روش مورد استفاده قرار می‌گیرد. در روش‌های حجمی با استفاده از یک مقدار میانگین برای پارامترهای مخزنی، مقدار هیدروکربن برجای مخزن تخمین زده می‌شود که در شیل‌های گازی به خصوص در امریکای شمالی از این روش استفاده می‌شود. جزئیات این روش در تخمین گازبرجای مخزن در ادامه همین فصل توضیح داده شده است.

۴-۶-۲ تخمین میزان گاز برجا

بهترین روش برای تخمین میزان گاز در شیل‌های گازی استفاده از تفسیر نمودارهای کاهشی در چاه‌های تولیدی است. البته بایستی این نکته را مد نظر قرار داد که این منابع در بسیاری از مناطق، جدید می‌باشند و اطلاعات کافی برای تعیین روند عملکرد^{۷۱} آن‌ها وجود ندارد. آنالیزهای حجمی یک روش جایگزین می‌باشند و زمانی که از چاه‌های بیشتری در اطراف محدوده مورد نظر استفاده گردد، حتی بهتر از روش قبل می‌باشد. در

⁷¹ - Performance Trend

میان روش‌های حجمی، آن‌هایی که مستقیم یا غیرمستقیم میزان گاز موجود در سنگ و کانی‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند، به عنوان روشی مناسب برای شیل‌های گازی از صنعت زغال اکتباس شده‌اند و مورد پذیرش روزافزون واقع شده‌اند (Glorioso et al, 2012).

۲-۶-۴-۱ گاز جذب شده

چسبیدن اتم‌ها، یون‌ها، مولکول‌های زیستی یا مولکول‌های گاز، مایع یا مواد جامد محلول را به یک سطح جذب سطحی می‌گویند. جذب سطحی متفاوت از جذب معمولی می‌باشد که در آن سیال توسط یک مایع یا جامد حل شده و یا در آن نفوذ کرده است.

جذب سطحی معمولاً از طریق ایزوترم توصیف می‌گردد که عبارتست از مقدار ماده جذب شونده بر روی ماده جذب کننده به عنوان تابعی از فشار (اگر گاز باشد) یا غلظت (اگر مایع باشد) در دمای ثابت. معمولاً کمیت جذب برای مقایسهٔ مواد مختلف، همیشه از طریق جرم مادهٔ جذب کننده نرمالایز می‌گردد.

در سال ۱۹۱۶ اروینگ لانگمویر مدل ایزوترمی جدیدی برای گازهایی که دچار جذب سطحی با مواد جامد می‌شوند، ارائه داد که با همین نام ثبت شد و باقی ماند. این مورد، ایزوترم نیمه تجربی می‌باشد.

معادلهٔ لانگمویر که ایزوترم لانگمویر نیز نامیده می‌شود، جذب سطحی مولکول‌ها را بر روی مادهٔ جامد به فشار گاز یا غلظت محیط بالای سطح جامد در دمای ثابت مربوط می‌سازند. این معادله این‌گونه بیان می‌شود:

$$\theta = \frac{\alpha \cdot p}{1 + \alpha \cdot p} \quad (2-28)$$

در این معادله θ پوشش بخشی از سطح، p فشار گاز یا غلظت و α یک ثابت می‌باشد (Shtepani et al, 2008).

بخشی از گاز ذخیره‌شده در این مخازن از گازی که به وسیلهٔ مواد آلی دچار جذب سطحی^{۷۲} شده است،

تشکیل شده است. بخش دیگری گاز جذب‌شده^{۷۳} به وسیلهٔ رس‌ها و قسمتی دیگر نیز از گاز آزاد تشکیل شده

⁷² - Adsorbtion

⁷³ - Absorbtion

است. در صنعت برای اندازه‌گیری میزان گاز جذب‌شده به شکل گاز متانی که به سطح کروژن جذب شده است، از ایزوترم لانگمویر استفاده می‌شود.

جذب سطحی یک ویژگی‌ای است که زمانی که یک گاز در دیواره یک جامد تجمع می‌یابد، رخ می‌دهد و باعث ایجاد یک لایه نازک می‌شود. این جذب سطحی نباید با جذب اشتباه گردد، زیرا که در جذب، یک ماده در مایع گسترده شده و باعث ایجاد محلول می‌گردد و یا در داخل جامد به دام می‌افتد. آزادشدن^{۷۴} فرآیند معکوس هر دو فرآیند بالا می‌باشد که در آن گاز آزاد می‌شود (Glorioso et al, 2012).

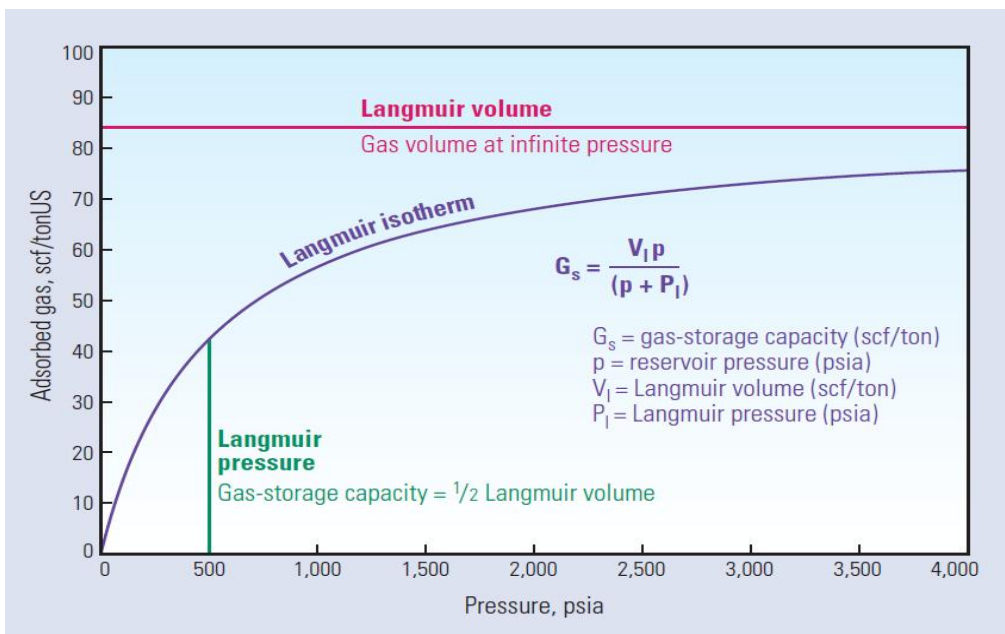


شکل ۲-۸: نمونه محفظه برای نگهداری نمونه مغزه (Juan et al, 2009)

متان جذب شده به سطح کروژن با متان آزاد داخل شیل در حالت تعادل می‌باشد. ایزوترم لانگمویر برای توصیف این تعادل و به طور خاص در دمای ثابت معرفی شد و توسعه یافت. دو پارامتر این تعادل را توصیف می‌نمایند:

(۱) حجم لانگمویر که حجم گاز در فشار بی‌نهایت را مشخص می‌کند.

(۲) فشار لانگمویر که فشاری می‌باشد که در آن میزان گاز برابر نصف حجم لانگمویر می‌باشد.



شکل ۲-۹: معادله لانگمویر (Lewis et al, 2004)

پارامترهای لانگمویر با استفاده از حرارت دادن شیل‌های خرد شده و از طریق آنالیزهای مغزه تعیین می‌شوند. نمونه در یک ظرف دربسته تحت اتمسفر متان و در دمای ثابت در معرض فشار قرار می‌گیرد (شکل ۲-۸). مقادیر گاز جذب‌شده در دمای ثابت و فشار افزایشی، اندازه‌گیری شده و با براندازی^{۷۵} نتایج در فرمول لانگمویر در ساختن ایزوترم به کار می‌رود. لوئیس^{۷۶} در سال ۲۰۰۴ فرمولی کلی برای ایزوترم لانگمویر ارائه داد که به صورت زیر می‌باشد:

$$g_c = \frac{V_l \cdot P}{(P + P_l)} \quad (2-29)$$

در فرمول بالا g_c ظرفیت ذخیره گاز بر حسب scf/ton ، V_l حجم لانگمویر نیز بر حسب scf/ton ، P_l فشار لانگمویر بر حسب psi و P فشار مخزن بر حسب psi می‌باشد.

در شیل‌هایی که از منحنی مشابه شکل ۲-۹ پیروی می‌کنند، جذب سطحی مکانیسم بسیار مهمی برای ذخیره گاز در فشارهای پایین می‌باشد (کمتر از 100psi). در مقابل، در فشارهای بالا یعنی هنگامی که منحنی به

⁷⁵ - Fit

⁷⁶ - Lewis

مجانِب افقی خود نزدیک می‌شود که در شکل ۲-۹ در فشارهای بالاتر از 2000psi رخ داده است، از اهمیت پایینی برخوردار می‌باشد.

ایزوترم لانگمویر میزان گاز نمونه اشباع شده را که دچار جذب سطحی گردیده است، در فشار داده شده نشان می‌دهد. کاهش فشار سبب می‌شود که متان طبق خط آبی نشان داده شده آزاد گردد. با کاهش فشار میزان آزادسازی گاز به صورت غیر خطی افزایش می‌یابد. بنابراین در این مثال، نمونه در فشار 3500psi دارای حدود 74scf/ton متان می‌باشد که جذب سطحی در آن رخ داده است. هنگامی که فشار کاهش می‌یابد، در ابتدا میزان گازی که از سطح آزاد گردیده است، به نسبت اندک می‌باشد. تا زمانی که فشار به مقدار 500psi می‌رسد، نیمی از گاز کل که شیل قادر به جذب آن بوده است، آزاد گردیده است. حجم باقیمانده در 500psi پایانی آزاد می‌گردد.

بعضی اوقات ایزوترم از نمونه‌های با فاصله زمانی کوتاه و گاهی از نمونه‌هایی که شسته و سپس خشک شده‌اند، به دست می‌آید. مورد اول برای تخمین گاز برجای اولیه و نیز شبیه‌سازی شرایط مخزن بر مورد دوم ترجیح دارد، در مقابل نمونه خشک‌شده برای مقایسه جذب انواع شیل‌ها بسیار کارآمد است. شکل نمودار برای یک دمای مشخص یا درجه TOC بستگی به حجم و فشار لانگمویر دارد (Lewis et al, 2004).

۲-۶-۴-۲ تخمین گاز برجای جذب‌شده

اندازه‌گیری دقیق پارامترهایی که قبلاً ذکر شد که شامل درصد حجمی یا وزن کروژن، انعکاس ویترنایت، LOM، TOC و میزان گاز جذب‌شده می‌شوند، جهت تخمین حجم گاز برجای اولیه جذب‌شده به کار می‌روند. این حجم از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$GI_{ad}P = g_c * \rho * A * h * C \quad (۲-۳۰)$$

$$GI = I_{ad}P = \text{غاز بر جای اولیه جذب شده (Bcf)}$$

$$g_c = \text{میزان گاز جذب شده (scf/ton)}$$

$$\rho = \text{میانگین چگالی سازند در (gr/cc) h}$$

$$A = \text{مساحت (acres)}$$

$$h = \text{میانگین ضخامت مفید (ft)}$$

$$C = \text{ضریب ثابت تبدیل (} 1.3597 * 10^{-6} \text{)}$$

این معادلات در ابتدا جهت ارزیابی منابع غیرمتداول دیگری به نام متان‌های موجود در زغال (CBM)^{۷۷} معرفی گردیده و مورد استفاده قرار گرفتند. برای این منابع میانگین چگالی سازند بسته به نمونه‌ای که جهت اندازه‌گیری میزان گاز مورد آنالیز قرار گرفته است، تفاوت می‌کند. ممکن است نمونه همان موقعی که دریافت گردیده است و یا موقعی که نمونه خشک می‌باشد، مورد آزمایش قرار گیرد و این امر با توجه به خلوص کربن باعث تفاوت در چگالی می‌شود. بنابراین یک سری تنظیماتی بایستی صورت گیرد تا چگالی چاه‌پیمایی معادل چگالی آزمایشگاه شود. همین شرایطی که برای CBM ها گفته شد، در مورد شیل‌های گازی نیز صادق است؛ به این معنا که اگر آزمایش بر روی نمونه خشک انجام گیرد، چگالی حاصل از نگار بایستی اصلاح گردد (Glorioso et al, 2012).

در این نوع از مخازن، هم ماتریکس غیرآلی (رس، سیلت، کربناته و ...) و هم مواد آلی در فضای متخلخل می‌توانند وجود داشته باشند و این بدین معناست که در مواد آلی علاوه بر گاز آزاد، گاز جذب شده نیز می‌تواند وجود داشته باشد.

⁷⁷ - Coal-Bed Methane

۲-۶-۴-۳ تخمین گاز برجای آزاد

گاز آزاد می‌تواند از روش‌های حجمی متداول که با استفاده از تخلخل و اشباع توسعه یافته‌اند و توسط مدل‌های آنالیز نگارها از جهت وجود هیدروکربن اصلاح شده‌اند، به دست آید. در مورد روش‌های تفسیر پتروفیزیکی در بخش بعدی بحث خواهد شد، اما ذکر این نکته لازم است که بعد از تفسیر پتروفیزیکی با استفاده از فرمول‌های زیر مقدار گاز برجای آزاد تخمین زده می‌شود (Glorioso et al, 2012):

$$B_g = \frac{P_s * T_f}{P_f * T_s} * Z \quad (۳۱-۲)$$

B_g = ضریب حجمی گاز (کسری)

P_s = فشار سطح (پام)

P_f = فشار سازند (پام)

T_f = دمای سازند (کلوین)

T_s = دمای سطح (کلوین)

Z = ضریب تراکم‌پذیری (کسری)

و در نهایت گاز آزاد نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$GI \ R_{Free} = 43560 * 10^{-9} \frac{\phi_e * (1 - S_w) * h * A}{B_g} \quad (۳۲-۲)$$

$GI \ R_{Free}$ = گاز برجای آزاد (بلیون فوت مکعب)

B_g = ضریب حجمی گاز (کسری)

$$\emptyset_e = \text{تخلخل مؤثر (کسری)}$$

$$S_w = \text{اشباع آب (پام)}$$

$$h = \text{ضخامت لایه (فوت)}$$

$$A = \text{مساحت مخزن (ایگر^{۷۸})}$$

$Z =$ ضریب تراکم‌پذیری : در اینجا به جهت ساده‌سازی، Z برابر یک (معادل گاز ایده‌آل) قرار داده شده است.

در نهایت از جمع میزان گاز جذب‌شده و آزاد میزان کل گازبرجای اولیه به دست می‌آید که در رابطه زیر نشان داده شده است (Glorioso et al, 2012):

$$GI_{Total} = GI_{Free} + GI_{Adsorbed} \quad (۳۳-۲)$$

۲-۶-۴-۴ ارزیابی و تفسیر نمودارها و استخراج خواص پتروفیزیکی

برای ارزیابی شیل‌های گازی می‌توان از روش‌های کانی‌های مختلف^{۷۹} متداول مانند معادلات هم‌زمان، مؤلفه‌های اصلی و دیگر روش‌های آماری استفاده نمود. معادلات هم‌زمان که از نگارهای پتروفیزیکی استفاده می‌کنند، به طور گسترده‌ای در ارزیابی‌های پتروفیزیکی کاربرد دارند. دسته‌ای از معادلات که برای شیل‌های گازی می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند، به صورت زیر است (Paradigm Tutorial, 2009):

$$Den = 2.35 * V_{Sh} + 2.65 * V_{Qtz} + 2.71 * V_{Lim} + 2.87 * V_{Sh} + 1.15 * V_{Ker} + 0.4 * \emptyset_e \quad (۳۴-۲)$$

$$\Delta T = 120 * V_{Sh} + 55 * V_{Qtz} + 47 * V_{Lim} + 43 * V_{Sh} + 200 * V_{Ker} + 250 * \emptyset_e \quad (۳۵-۲)$$

$$\emptyset_N = 0.3 * V_{Sh} - 0.03 * V_{Qtz} + 0 * V_{Lim} + 0.04 * V_{Sh} + 0.95 * V_{Ker} + 0.7 * \emptyset_e \quad (۳۶-۲)$$

⁷⁸ - Acres

⁷⁹ - Multi-Mineral

$$P_e = 3.45 * V_{Sh} + 1.85 * V_{Qtz} + 5.1 * V_{Lim} + 3.1 * V_{Sh} + 0.95 * V_{Ker} - 0.01 * \emptyset_e \quad (37-2)$$

$$1 = V_{Sh} + V_{Qtz} + V_{Lim} + V_{Sh} + V_{Ker} + \emptyset_e \quad (38-2)$$

اساس ارزیابی‌های پتروفیزیکی به روش احتمالی^{۸۰}، مدل کردن مشاهدات معلوم با استفاده از مولفه‌های حجمی و نیز پارامترهای پاسخ آن‌ها می‌باشد. در این بخش، ما نشان می‌دهیم که چگونه معادلات پاسخ برای مدل پاسخ هر کدام از ابزارهای مشاهده‌شده به کار گرفته می‌شوند. در نهایت معادلات پاسخ مختلف با یکدیگر ترکیب گردیده تا یک مدل پتروفیزیکی جامع به دست آید. یکی از مشاهداتی که مورد نظر یک مفسر پتروفیزیکی می‌تواند باشد، نگار چگالی سازند می‌باشد. پاسخ پیش بینی شده ابزار به صورت پارامترهای حجمی کانی‌ها و سیالات و نیز چگالی مرتبط با آن‌ها بیان می‌شود.

بخش اول مدل، تعیین این است که کدامیک از مولفه‌های سازند ممکن است بر روی چگالی اندازه-گیری شده ابزار تاثیر داشته باشند. این‌ها مولفه‌هایی هستند که برای یک مدل واقعی^{۸۱} باید در نظر گرفته شود.

فرض کنید که چاه‌پیمایی در سازندی با مشخصات زیر صورت پذیرفته است :

ماسه سنگ فلدسپات‌دار، فاقد رس و نیز حدس زده می‌شود که در زون نفتی هستیم. این اطلاعات ممکن است از چندین منبع مختلف بدست آمده باشد:

✓ خرده‌های حفاری

✓ اطلاعات مغزه

✓ نگارهای وایرلاین و نگار گل

⁸⁰ - Probabilistic

⁸¹ - Realistic

✓ تست ساق مته (DST)^{۸۲}

✓ ارزیابی سازند در چاه‌های مجاور

در مسئله مفروض، در نظر گرفتن آلبیت و کوارتز به عنوان کانی‌های اصلی و آب و نفت به عنوان سیال موجود در فضاها متخلخل امری منطقی به نظر می‌رسد.

پاسخ اندازه‌گیری شده توسط ابزار چگالی سازند به صورت زیر است :

ρ_b (اندازه‌گیری شده)

که به وسیله معادله پاسخ به صورت زیر مدل می‌گردد :

$$\rho_b \text{ (پیش‌بینی شده)} = \rho_{oil}V_{oil} + \rho_{fw}V_{fw} + \rho_{qtz}V_{qtz} + \rho_{alb}V_{alb} \quad (2-39)$$

سمت چپ معادله بالا، چگالی سازند مدل شده می‌باشد که با نماد ρ_b نمایش داده می‌شود. سمت راست معادله از جمع چهار جمله تشکیل شده است. هر کدام از این جملات، از حجم مجهول یکی از مؤلفه‌ها (آب، نفت، کوارتز، آلبیت) که در مقدار معلوم چگالی آن مؤلفه ضرب می‌شود، تشکیل می‌شود. معادله مذکور شکل خطی^{۸۳} دارد، به این معنا که از جملات با درجه اول نسبت به مجهولات معادله تشکیل شده است. معادله درجه اول از جمع (یا تفریق) تعدادی از مجهولات تشکیل می‌شود (شامل جمله‌ای که در آن مجهولات دارای توان بالاتر از یک باشند و یا یک مجهول در مجهول دیگری ضرب شده باشد، نیست. این گونه جملات غیرخطی هستند. یک مثال از این گونه معادلات، معادله آب دوتایی غیرخطی^{۸۴} می‌باشد). (Paradigm Tutorial, 2009).

⁸² - Drill Stem Test

⁸³ - Linear

⁸⁴ - Dual Water Non-Linear

واضح است که تعداد نامحدودی از ترکیب‌های حجمی برای چهار مؤلفه مجهول می‌تواند وجود داشته باشد. یک انتخاب خوب باید به گونه‌ای باشد که مقدار چگالی پیش‌بینی شده به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک باشد :

$$\rho_b (\text{اندازه‌گیری شده}) = \rho_b (\text{پیش‌بینی شده})$$

۲-۶-۴-۱ مدل معادلات چندگانه^{۸۵}

مدل معادله منفرد دارای بینهایت جواب است که در همه آن‌ها مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نزدیک به یکدیگرند. برای بدست آوردن یک جواب منحصر به فرد، لازم است که به تعداد اندازه‌گیری‌ها از مؤلفه‌ها نیز داشته باشیم.

در مثال مذکور، با توجه به مجهولات، به چهار عدد از مشاهدات اندازه‌گیری شده نیاز داریم. جمع مؤلفه‌های حجمی باید دقیقاً برابر یک باشد (این می‌تواند به عنوان یکی از اندازه‌گیری‌ها باشد). علاوه بر این اندازه‌گیری چگالی سازند می‌تواند دومین جزء به کار گرفته شده باشد. بنابراین به دو اندازه‌گیری دیگر نیاز داریم. برای مؤلفه‌های مذکور در مثال (آب، نفت، کوارتز، آلبیت) اضافه کردن نگار نوترون و مقاومت عمیق می‌تواند مناسب باشد.

اغلب، تعداد اندازه‌گیری‌ها بیشتر از مجهولات می‌باشد که در این حالت جواب منحصر به فردی وجود ندارد و فقط بهترین راه‌حل است که باید انتخاب گردد. برای مثال در عالم واقعیت، مقادیر حجمی منفی غیر قابل قبول می‌باشد (Geolog Tutorial, 2009).

⁸⁵ - Multiple Equation Model

پیچیدگی روش مدل سازی، طراحی ویژگی های معتبری می باشد که بهترین راه حل را تعیین می کند. این کار از طریق تقریب مجذور مربعات برای تابع خطا صورت می پذیرد. برای حالت کلی، چگالی سازند را می توان با رابطه خطی زیر بیان نمود :

$$\rho_b = \rho_{oil}V_{oil} + \rho_{fw}V_{fw} + \rho_{mineral-1}V_{mineral-1} + \rho_{mineral-2}V_{mineral-2} + \dots + \rho_{mineral-n}V_{mineral-n} \quad (40-2)$$

تابع خطا نیز به صورت زیر تعریف می شود :

$$\mathcal{E}_{\rho_b} = \rho_{log} - \rho_b \quad (41-2)$$

برای هر مقدار مشاهده شده، خطای متناظر با آن محاسبه می شود. این خطاها دارای مقادیر متفاوت و در نتیجه بازه های مختلف می باشند. برای این که این خطاها به یک مبنای مشترک برده شوند، آن ها را از طریق عدم قطعیت مرتبط با هر کدام از مشاهدات (U_{ρ}) به صورت زیر نرمالیزه می کنیم :

$$\mathcal{E} = \frac{\rho_{log} - \rho_b}{U_{\rho}} \quad (42-2)$$

مقدار محاسبه شده برای چگالی تابعی از حجم های مجهول ($nvol$) می باشد که در رابطه اخیر جایگذاری شده و با مجذور نمودن آن فرم دلخواه برای روش حداقل مربعات خطا حاصل می گردد :

$$\mathcal{E}^2 = \left[\frac{\rho_{log} - \rho_b}{U_{\rho}} \right]^2 \quad i = 1, nvol \quad (43-2)$$

شکل عمومی رابطه اخیر، که برای تمام نمودارها استفاده می شود، به صورت زیر است :

$$\mathcal{E}_k^2 = \left[\frac{t_k - \rho_b}{U_k} \right]^2 \quad i = 1, nvol \quad (44-2)$$

با گسترش تابع مجذور خطا، عبارت زیر حاصل می گردد :

$$\Delta^2 = \sum_{k=1}^{n_{\text{tool}}} \left[\frac{t_k - f_k(v_i)}{U_k} \right]^2 \quad i = 1, n_{\text{vol}} \quad (45-2)$$

تابع اخیر به نام تابع عدم پیوستگی⁸⁶ نامیده می‌شود و میزان پیوستگی بین داده‌های اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسبه‌شده توسط مدل پتروفیزیکی را اندازه‌گیری می‌کنند و جهت یافتن بهترین جواب‌ها برای مقادیر مجهول کاربرد دارد (Geolog Tutorial, 2009).

۲-۶-۴-۲ معادلات ریاضی MULTIMIN

همان‌طور که توضیح داده شد، تابع عدم پیوستگی به صورت زیر در آمد :

$$\Delta^2 = \sum_{k=1}^{n_{\text{tool}}} \left[\frac{t_k - f_k(v_i)}{U_k} \right]^2 \quad i = 1, n_{\text{vol}} \quad (46-2)$$

با فرض این‌که همه معادلات پاسخ خطی هستند، شکل ماتریس- برداری معادل آن به صورت زیر است :

$$I_{\text{incoherent}}(v) = (t - Pv) U (t - Pv) \quad (47-2)$$

بردار V شامل مقادیر حجم‌های مجهول در فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد که با ماتریس زیر بیان می‌گردد :

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_i \\ V_{\text{nunk}} \end{bmatrix} \quad i = 1, n_{\text{unk}} \quad (48-2)$$

در مثال مورد نظر، چهار مولفه حجمی به شکل زیر در می‌آیند :

$$V = \begin{bmatrix} V_{\text{oil}} \\ V_{\text{fw}} \\ V_{\text{qtz}} \\ V_{\text{alb}} \end{bmatrix} \quad (49-2)$$

⁸⁶- Incoherence Function

در حالت کلی، بردار ابزار^{۸۷} به صورت زیر است:

$$t = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_k \\ \vdots \\ t_{ntool} \end{bmatrix} \quad k = 1, ntool \quad (50-2)$$

برای تعیین چهار مجهول بالا لازم است حداقل چهار اندازه‌گیری داشته باشیم که یکی از معادلات، معادله واحد^{۸۸} می‌باشد:

$$\sum_{i=1}^{nx} v_{xi} = 1 \quad (51-2)$$

اگر نمودارهای C_t ، ρ_b ، ϕ_N و DT موجود باشند، این چهار اندازه‌گیری به همراه معادله واحد، تشکیل بردار ابزار را می‌دهند:

$$t = \begin{bmatrix} 1 \\ C_t \\ \rho_b \\ \phi_N \\ DT \end{bmatrix} \quad (52-2)$$

ماتریس P نیز که شامل پاسخ دستگاه‌ها به اجزاء سازندی می‌باشد، به صورت زیر خواهد بود:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & \dots \\ P_{21} & P_{22} & \dots & \dots \\ \dots & P_{k,i} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & P_{ntool,nvol} \end{bmatrix} \quad k = 1, ntool \quad i = 1, nvol \quad (53-2)$$

⁸⁷ - Tool Response

⁸⁸ - Unity Equation

برای مثال مورد بحث ما، P بیان‌گر یک ماتریکس 5×4 می‌باشد، به این معنا که پنج اندازه‌گیری برای مدل کردن چهار مجهول به کار گرفته شده‌اند.

ماتریس U به صورت قطری است و شامل معکوس مربعات عدم قطعیت‌های مربوط به دستگاه‌های مختلف می‌باشد که به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$U = \begin{bmatrix} \frac{1}{U_1^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{U_2^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{U_3^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{U_4^2} \end{bmatrix} \quad (2-54)$$

مرحله نهایی این فرایند به حداقل رساندن تابع عدم پیوستگی است. این مقدار حداقل با تغییر دادن حجم اجزای سازندی حاصل می‌گردد (Geolog Tutorial, 2009).

بایستی به این نکته اشاره کرد که اگر نمونه‌های سازندی و تست‌های آزمایشگاهی به اندازه کافی وجود داشته باشند، می‌تواند تخمین‌های مختلفی بر روی گاز برجای اولیه صورت گیرد؛ هر چند که این آزمایش‌ها نیز دارای عدم قطعیت هستند. با توجه به این که به طور معمول نمونه‌های مغزه و تست‌های آزمایشگاهی به مقدار کافی وجود ندارند، تفسیر لاگ‌ها می‌تواند جایگزین مناسبی جهت تخمین گاز برجا باشد. اطلاعات نگارهای پتروفیزیکی به دلیل فراوانی زیاد هنگامی که با آنالیزهای آزمایشگاهی مربوط به تخلخل، چگالی، اشباع آب، کانی‌شناسی و مدول‌های الاستیسیته مغزه تلفیق می‌شوند، ابزاری مناسب جهت دسترسی به مخازن غیرمتعارف از قبیل شیل‌های گازی به حساب می‌آیند (Glorioso et al, 2012).

فصل سوم

توصیف میدان و داده‌های مورد مطالعه

۳-۱ مقدمه

داده‌های مورد استفاده در این پایان نامه از چاه ردبک^{۸۹}-۲ در میدان بهارا اسپرینگ^{۹۰} واقع در استرالیای غربی^{۹۱} و در حوضه پرت^{۹۲} می‌باشد. در این فصل، ابتدا در مورد حوضه پرت و تاریخچه اکتشاف آن توضیحات مختصری داده شده و سپس اطلاعاتی راجع به وضعیت شیل‌های گازی در استرالیا، ستون چینه‌شناسی در حوضه پرت و در نهایت میدان و چاه مورد مطالعه ذکر خواهد گردید.

۳-۲ آشنایی با حوضه پرت

حوضه پرت دارای امتداد شمالی- جنوبی بوده و دارای وسعتی در حدود ۱۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد و در غرب استرالیا واقع شده است. تقریباً بیش از نیمی از حوضه در قسمت دریایی و در آب‌های با عمق بیش از ۱۰۰۰ متر واقع شده است.

اکتشاف در حوضه پرت در سال ۱۹۳۵ با انجام عملیات گرانی آغاز گردید. در سال ۱۹۵۲-۱۹۵۱ عملیات گرانی در حوضه پرت توسط BMR^{۹۳} انجام شد. این عملیات نشان داد که یک فروافتادگی ممتد وجود دارد که از رسوبات فانروزوئیک پر شده است.

در سال ۱۹۵۲، WAPET^{۹۴} جواز اکتشاف در حوضه پرت را پیدا کرد و بعد از مطالعات و عملیات اولیه گرانی، در سال ۱۹۵۶ اولین عملیات لرزه‌نگاری در منطقه گینجین انجام شد. در نتیجه تفسیر داده‌های لرزه-

⁸⁹ - Redback

⁹⁰ - Beharra Spring

⁹¹ - Western Australia

⁹² - Perth

⁹³ - Bureau of Marine Resources

⁹⁴ - West Australian Petroleum Pty Ltd

نگاری، ساختار بزرگ تاق‌دیدی گینجین شناسایی گردید. WAPET در سال ۱۹۶۱ با حفاری انیبا^{۹۵}-۱ شروع به ارزیابی ساختارهای کلیدی حوضه نمود.

اولین اکتشاف در حوضه گینجین با حفاری چاه یاردارینو^{۹۶}-۱ به وقوع پیوست. با حفاری این چاه، نفت و گاز از سازند واجینا سنداستون^{۹۷} و گاز از قاعده ماسه‌های تریاس جریان پیدا کرد. اکتشافات بعدی در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰ ادامه یافت که از آن‌ها می‌توان به گینجین^{۹۸}، ارواسمیت^{۹۹}، ام تی هورنر^{۱۰۰}، دونگارا^{۱۰۱}، ویچرنج^{۱۰۲} و والیرینگ^{۱۰۳} اشاره کرد (Dianne et al, 2000).

۳-۳ شیل گازی در استرالیای غربی

اگر چه میزان ذخیره شیل‌های گازی در سراسر دنیا تا حدودی ناشناخته است، اما تخمین زده می‌شود که استرالیای غربی دارای منابع عظیمی از گاز برجا می‌باشد؛ به طوری که بر اساس گزارش سازمان اطلاعات انرژی آمریکا در سال ۲۰۱۱، ششمین کشور از نظر میزان ذخایر شیل‌های گازی بعد از کشورهایمانند چین، آمریکا، آرژانتین، مکزیک و آفریقای جنوبی است. سازمان مذکور در سال ۲۰۱۱، چهار حوضه در استرالیا را که پتانسیل وجود شیل‌های گازی دارند، تعیین کرد. این چهار حوضه عبارتند از:

الف) کوپر^{۱۰۴}

⁹⁵ - Eneabba
⁹⁶ - Yardarino
⁹⁷ - Wagina sandstone
⁹⁸ - Gingin
⁹⁹ - Arrowsmith
¹⁰⁰ - Mt Horner
¹⁰¹ - Dongara
¹⁰² - Witcher Range
¹⁰³ - Walyering
¹⁰⁴ - Cooper

فصل سوم : توصیف میدان و داده‌های مورد مطالعه

(ب) ماری برو^{۱۰۵}

(ج) پرت^{۱۰۶}

(د) کنینگ^{۱۰۷}

تخمین‌ها نشان می‌دهد که حدود ۳۹۶ تریلیون فوت مکعب شیل گازی قابل بازیافت در این کشور وجود دارد. تقریباً ۷۵ درصد از این مقدار در استرالیای غربی وجود دارد. از این مقدار ۵۹ TCF در حوضه پرت و ۲۲۹ TCF در حوضه کنینگ وجود دارد (شکل ۱-۳).



Shale Basins
Basin
Prospective Shales

شکل ۱-۳: حوضه‌های پرت و کنینگ در استرالیای غربی (Jonasson et al, 2009)

¹⁰⁵ - Mayborough

¹⁰⁶ - Perth

¹⁰⁷ - Canning

میزان این منابع سه برابر نسبت به ذخایر به اثبات رسیده گاز در کل این کشور است که برای تأمین ۳۰۰۰ سال انرژی شهر پرت کافی است (Jonasson, 2013).

در حوضه پرت به دلیل ساختار زیربنایی بهتر از قبیل دسترسی به خطوط لوله، امکان تجارت بهتر گاز نسبت به حوضه کینگ، اولین تلاش برای شیل‌های گازی در استرالیای غربی در این قسمت شروع گردید. اکتشاف شیل‌های گازی در حوضه پرت در سال ۲۰۱۰ آغاز گردید. در این سال شرکت AWE چاه وودادپ^{۱۰۸} را برای ارزیابی سازند کرینجینا، کوکاتیا و اروین ریور حفاری کرد. با حفاری این چاه، اطلاعات ارزشمندی شامل مقادیر زیادی از مغزه برای تعیین پتانسیل سازند کرینجینیا به دست آمد. علاوه بر AWE، شرکت‌های Latent و Origin Energy به بررسی منابع غیرمتداول گاز در حوضه پرت می‌پردازند.

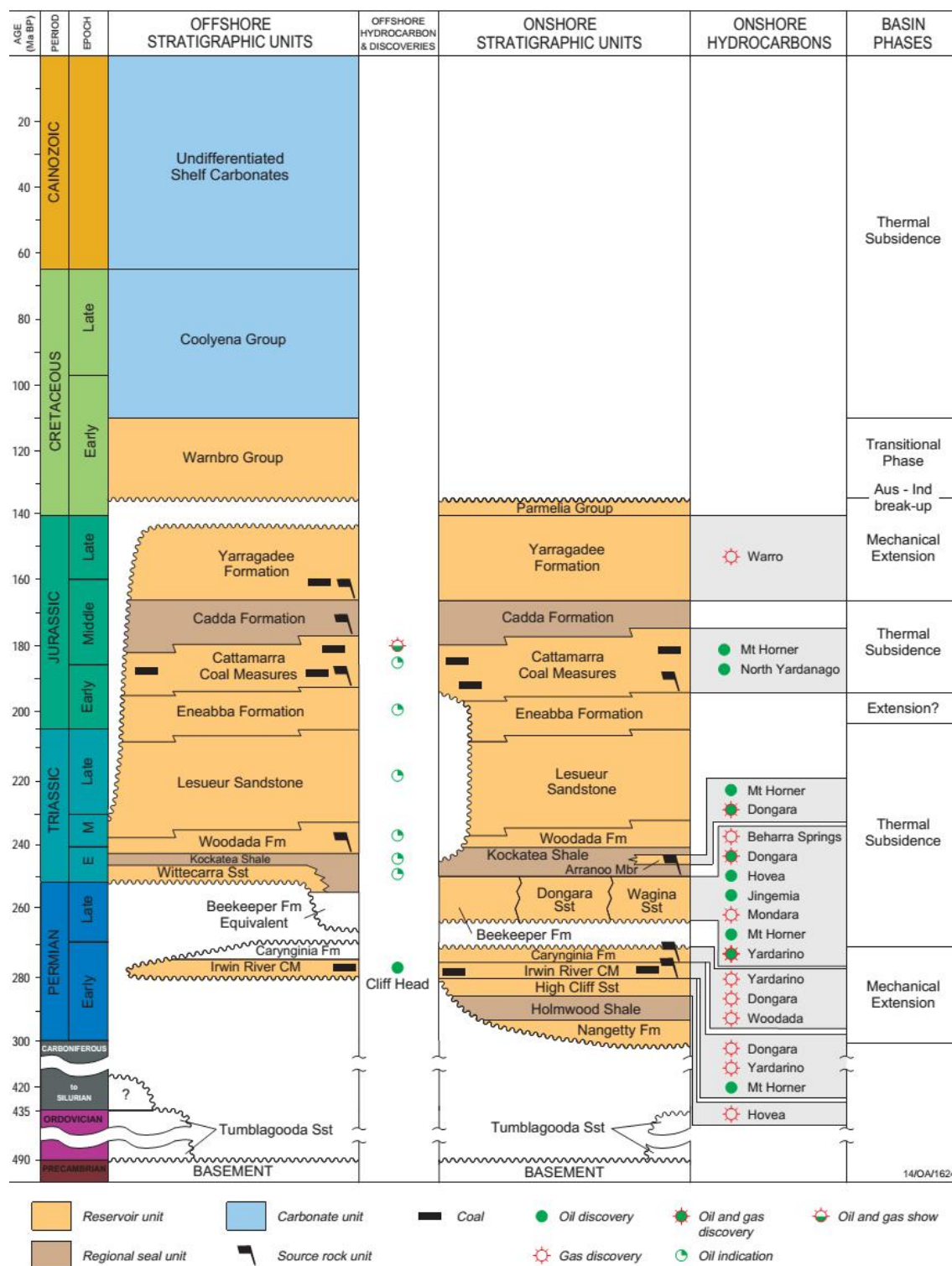
۴-۳ ستون چینه‌شناسی حوضه پرت

در شکل ۳-۲ ستون چینه‌شناسی و سیستم‌های نفتی در قسمت خشکی حوضه پرت دیده می‌شود. بسیاری از سنگ‌های منشأ در استرالیای غربی، علاوه بر این که ویژگی‌هایی مشابه سازندهای شیل‌های گازی در آمریکا دارند، دارای سن زمین‌شناسی مشابه با آن‌ها هستند. به عنوان مثال، زمان مربوط به سازند گوگو^{۱۰۹} در حوضه کینگ، دونین است که هم‌زمان با شیل مارسلوس است و نیز سازند لورال^{۱۱۰} که هم‌زمان با شیل‌های بارنت، فایتویل و وودفورد در آمریکا می‌باشد. در شکل ۳-۳ ستون چینه‌شناسی در استرالیای غربی و آمریکا نشان داده شده است (Jonasson, 2013).

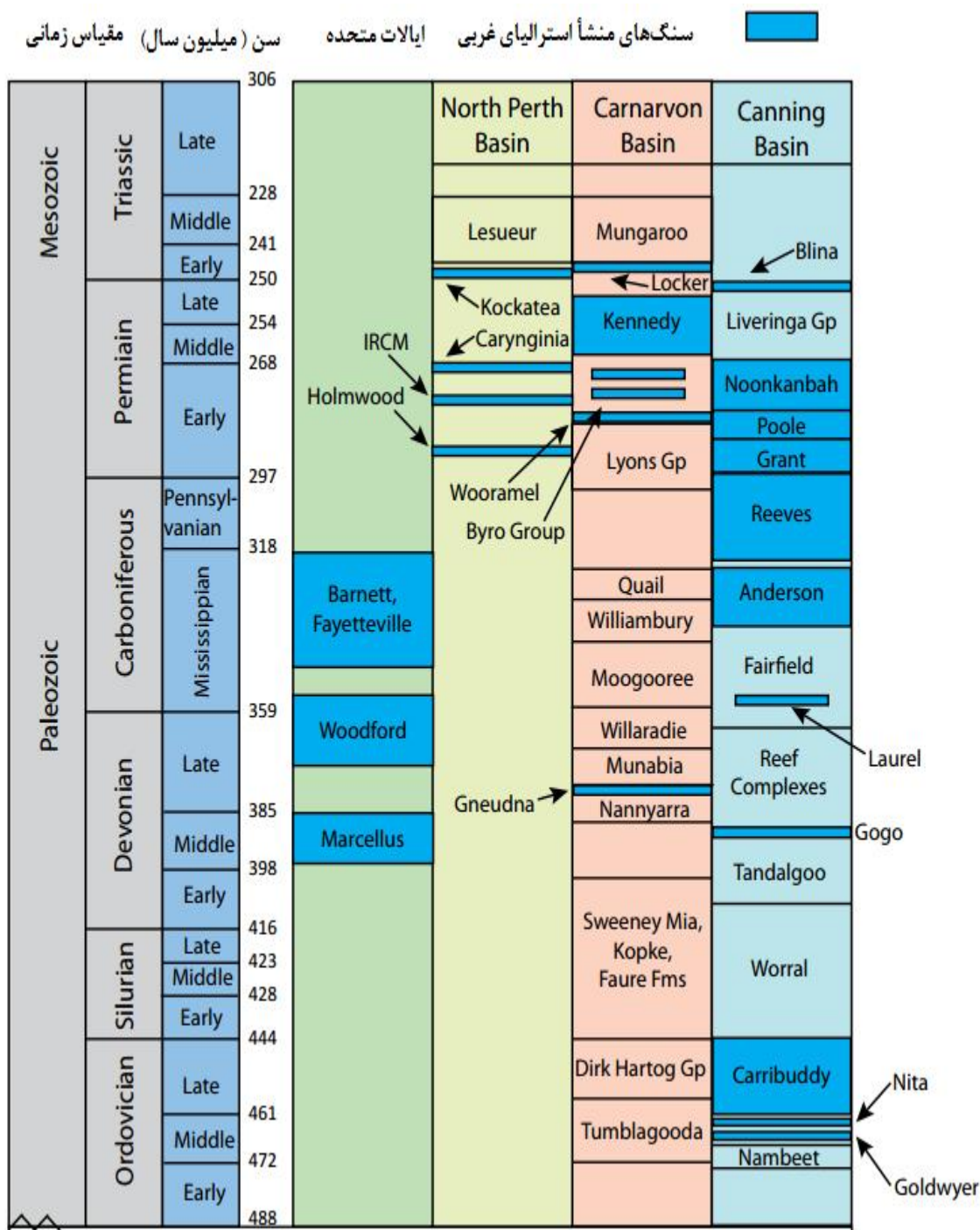
¹⁰⁸ - Woodada Deep

¹⁰⁹ - Gogo

¹¹⁰ - Laural



شکل ۲-۳: ستون چینه شناسی در شمال حوضه پرت واقع در بخش خشکی (Mory et al, 1996)



شکل ۳-۳: ستون چینه‌شناسی در ایالات متحده و استرالیای غربی (سازندهای مستعد شیل‌های گازی با رنگ آبی نشان داده شده اند، Jonasson et al, 2009)

۳-۵ سازندهای مستعد برای شیل‌های گازی

در این حوضه، سه سازند مستعد شیل‌های گازی می‌باشند که عبارتند از :

✓ کوکاتیا شیل^{۱۱۱}

✓ کرینجینیا^{۱۱۲}

✓ ایروین ریور (IRCM)^{۱۱۳}

۳-۵-۱ سازند ایروین ریور

نام این سازند توسط آقای کلارک^{۱۱۴} (۱۹۵۱) معرفی گردید. دلیل این نام وجود واحدهای زغالی است که بالاتر از های کلیف^{۱۱۵} سنداستون و زیر سیلت‌استون کرینجینیا قرار می‌گیرد.

لیتولوژی این سازند شامل تناوب ماسه‌سنگ، سیلت‌استون، شیل کربناته، لنزهای زغال و به ندرت

کنگومرا می‌باشد (Mory et al, 1996).

۳-۵-۲ سازند کرینجینیا

این سازند به طور غالب از تناوب سیلت‌استون و سنداستون تشکیل شده است. البته در بخش پایین کرینجینیا

یعنی بالای IRCM مقداری شیل نیز وجود دارد. این سازند بر روی سازند IRCM قرار گرفته است. بین سازند

کرینجینیا و سازندهای واجینا^{۱۱۶} سنداستون، دونگارا سنداستون و بی‌کیپر^{۱۱۷} ناپیوستگی زاویه‌های وجود دارد.

(Mory et al, 1996).

¹¹¹ - Kockatea Shale

¹¹² - Carynginia

¹¹³ - Irvin River Coal Measure

¹¹⁴ - Clarke

¹¹⁵ - High Cliff

¹¹⁶ - Wagina

¹¹⁷ - Beekeeper

۳-۵-۳ سازند کوکاتیا شیل

سازند کوکاتیا شیل سنگ منشأ و سنگ پوش اصلی حوضه پرت به حساب می‌آید (پلی‌فورد^{۱۱۸} و همکاران، ۱۹۵۸). بخشی از این سازند که قابلیت سنگ منشأ بسیار بالایی دارد، در قاعده این سازند واقع شده است. این بخش غنی از ساپروپیل می‌باشد و TOC آن در حدود ۲٪ است (هال^{۱۱۹}، ۱۹۸۹). دو ممبر ماسه‌ای در کوکاتیا شیل شناخته شده‌اند. این دو شامل ممبرهای بوکارا^{۱۲۰} سنداستون و آرانو^{۱۲۱} می‌باشند. دونگارا سنداستون که پلی‌فورد آن را در قاعده کوکاتیا شیل قرار داده بود، اکنون بنا بر مقاله هال (۱۹۸۹) به صورت سازندی مجزا در قسمت پایینی کوکاتیا شیل می‌باشد. سازند دونگارا با عنوان قاعده تریاسیک سنداستون^{۱۲۲} نیز شناخته می‌شود. سازند کوکاتیا شیل از نظر لیتولوژی شامل شیل‌های سیاه، سیلت‌استون و به مقدار کمی سنداستون و سنگ آهک می‌باشد. این سازند بر روی سازند پرمین کرینجینیا واقع شده است. بر روی آن سازند وودادا^{۱۲۳} وجود دارد، مگر در بخش شمالی حوضه که یکی از سازندهای کاتامارا^{۱۲۴}، انیبا و یا لسوئر^{۱۲۵} بر روی آن قرار می‌گیرد.

۳-۶-۳ میدان و چاه مورد مطالعه

ردبک-۲ در شمال حوضه پرت و در ۳۳ کیلومتری جنوب شرقی شرق دونگارا^{۱۲۶} قرار گرفته است. این چاه در ۳ کیلومتری شرقی تأسیسات گازی بهارا اسپرینگ قرار دارد. موقعیت سطحی این چاه در ۱۰۰ متری شمال چاه ردبک-۱ است (شکل ۳-۴).

118 - Playford

119 - Hall

120 - Bookara

121 - Arranoo

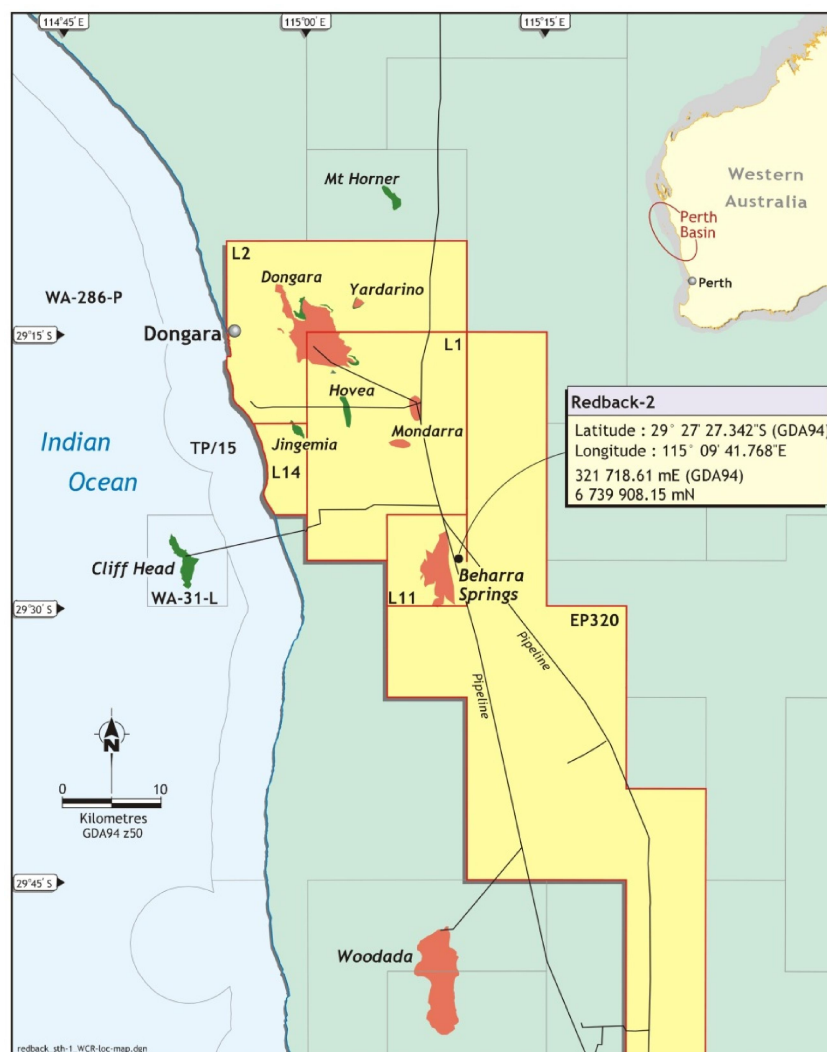
122 - Basal Triassic Sandstone

123 - Woodada

124 - Cattamarra

125 - Lesueur

126 - Dongara



شکل ۳-۴: موقعیت چاه ردبک-۲ در میدان بهارا اسپرینگ (Origin Energy, 2011)

۷-۳ داده‌های مورد مطالعه

۱-۷-۳ داده‌های مغزه

این چاه در سال ۲۰۱۰ تا عمق ۳۹۶۶ متری حفاری گردید. به طور متوالی، سه مغزه از قاعده کواترناری شیل جهت ارزیابی پتانسیل شیل گازی این اینتروال گرفته شده و مورد آنالیز آزمایشگاهی قرار گرفت.

۳-۷-۲ داده‌های ژئوشیمی

برای ارزیابی ژئوشیمیایی سازند کوکاتیا شیل ۴۰ نمونه جهت آنالیز پیرولیز راک-یول جمع‌آوری شده و مورد آنالیزهای ژئوشیمیایی قرار گرفت که نتایج آن در فصل بعد مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۷-۳ نگارهای پتروفیزیکی

۳-۷-۳-۱ نمودارگیری در حین حفاری (LWD)^{۱۲۷}

در این چاه، LWD از نگارهای گاما، دانسیته، نوترون، کالیپر، فوتوالکتریک و مقاومت تشکیل شده است. همچنین عملیات نمودارگیری در ۳۸۴۸ تا ۳۸۹۳ متری مجدداً انجام شد.

۳-۷-۳-۲ نمودارگیری با وایرلاین

در این چاه پنج نمودارگیری انجام شد. سه بار عملیات MDT^{۱۲۸} به دلایل مختلفی نظیر گیر کردن ابزار در عمق ۳۸۵۸ متری و عبور نکردن ابزار از عمق‌های مختلف لغو گردید.

عملیات نمودارگیری ECS^{۱۲۹}-GR نیز که برای ارزیابی پتانسیل شیل گازی رانده شده بود، به دلیل گیر کردن در چاه ناموفق بود.

تنها عملیات موفق نمودارگیری شامل مجموعهٔ FMI^{۱۳۰}، DSI^{۱۳۱}، GR و CAL^{۱۳۲} بود.

¹²⁷ - Logging While Drilling

¹²⁸ - Modular Dynamic Test

¹²⁹ - Elemental Capture Spectroscopy

¹³⁰ - Formation Micro Imager

¹³¹ - Dipole Sonic Imager

¹³² - Caliper

۳-۸ زون مورد مطالعه

سازند مورد مطالعه برای ارزیابی پتاسیل شیل گازی، سازند کوکاتیا شیل می‌باشد. در بخش پایینی این سازند ممبر هووا^{۱۳۳} وجود دارد که اصلی‌ترین سنگ منشأ حوضه پرت می‌باشد. این ممبر در منطقه مورد مطالعه جهت تولید گاز، بالغ می‌باشد.

در چاه ردبک-۲ ضخامت کوکاتیا شیل ۶۷۲/۵ متر- از ۳۱۶۵/۵ تا ۳۸۳۸ متری- می‌باشد. ممبر هووا در بازه عمقی ۳۷۷۲ تا ۳۸۳۸ متری قرار دارد. بخش عمده این سازند از شیل تشکیل شده است و همان‌طور که در بالا آمده است، از این ممبر ۳ عدد مغزه گرفته شده است.

فصل چهارم

تخمین‌گازبرجاو منیران محتوای ماده‌آلی

۴-۱ مقدمه

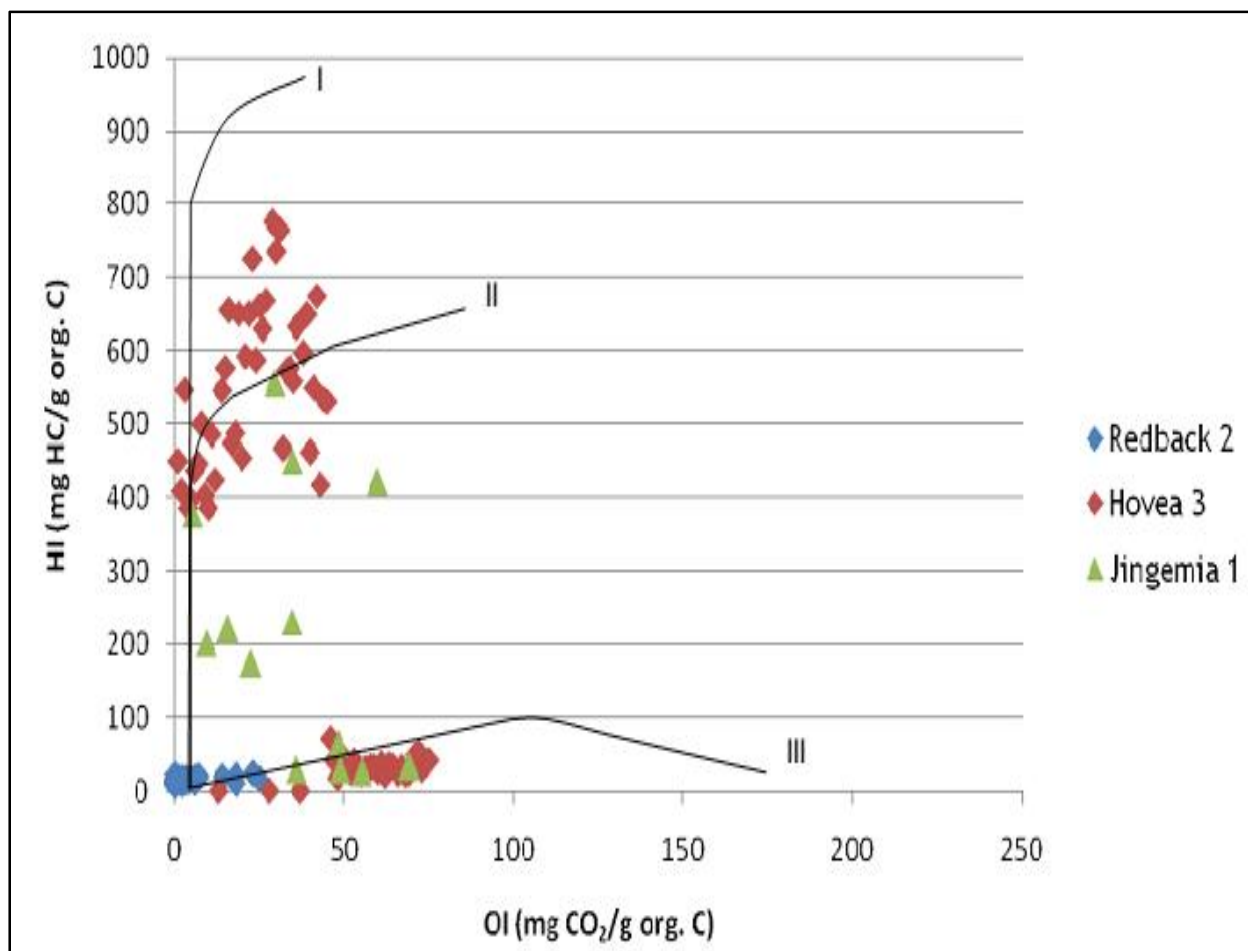
در این فصل در ابتدا با استفاده از شبکه عصبی چند لایه که الگوریتم آموزشی آن کلونی زنبور عسل و الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد، TOC تخمین زده شده است. ورودی این شبکه عصبی نگرهای پتروفیزیکی شامل نگرهای گاما، صوتی، چگالی، نوترون و مقاومت می‌باشند. در ادامه با استفاده از روش $\Delta \log R$ مقدار محتوای ماده آلی در سازند کوکاتیا شیل تخمین زده شده است. سپس به تخمین گاز برجا پرداخته شده است که این گاز شامل گاز آزاد و گاز چسبیده به سطح ذرات می‌باشد و برای این تخمین از روش حجمی استفاده گردیده است.

۴-۲ تخمین محتوای ماده آلی

همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، محتوای ماده آلی یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی شیل‌های گازی می‌باشد. نتایج داده‌های راک-ایول برای سه چاه ردبک-۲، هووا^{۱۳۴}-۳ و جینگمیا^{۱۳۵}-۱ در شکل ۴-۱ نشان داده شده است است که همان‌طور که مشاهده می‌شود، سازند کوکاتیا شیل در چاه ردبک-۲ مستعد تولید گاز بوده و کروژن آن تیپ III می‌باشد.

¹³⁴ - Hovea

¹³⁵ - Jingemia



شکل ۴-۱: داده‌های ژئوشیمی سه چاه ردبک-۲، هوو-۳ و جینگمیا-۱

داده‌های ژئوشیمیایی و پتروفیزیکی سازند کوکاتپاشیل در چند چاه مختلف از حوضه پرت مورد استفاده در شبکه عصبی قرار گرفت. دو الگوریتم مختلف با ساختاری تقریباً مشابه که شامل الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم کلونی زنبورهای عسل می‌باشند، در این بخش برای آموزش شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفت.

۴-۲-۱ تخمین TOC با استفاده از شبکه عصبی

همان‌طور که در فصل دوم توضیح داده شد، برای آموزش شبکه عصبی می‌توان از روش‌های هوشمند نیز استفاده نمود که از جمله آن‌ها می‌توان به PSO و ABC اشاره نمود.

برای کدنویسی در این پروژه از نرم‌افزار متلب ورژن ۲۰۱۲ استفاده گردیده است. داده‌های ورودی نگارهای گاما، صوتی، چگالی، نوترون و مقاومت بوده و داده خروجی محتوای ماده آلی می‌باشد. به طور کلی وجود ماده آلی در سنگ‌های منشأ سبب افزایش مقادیر نگارهای اشعه گاما، صوتی، نوترون و مقاومت شده و مقادیر نگار چگالی را کاهش می‌دهد.

محتوای ماده آلی در ابتدا با استفاده از شبکه عصبی و الگوریتم آموزشی PSO و سپس از طریق الگوریتم آموزشی ABC، در سازند کوکاتیا شیل تخمین زده شد.

۴-۲-۱-۱ الگوریتم PSO

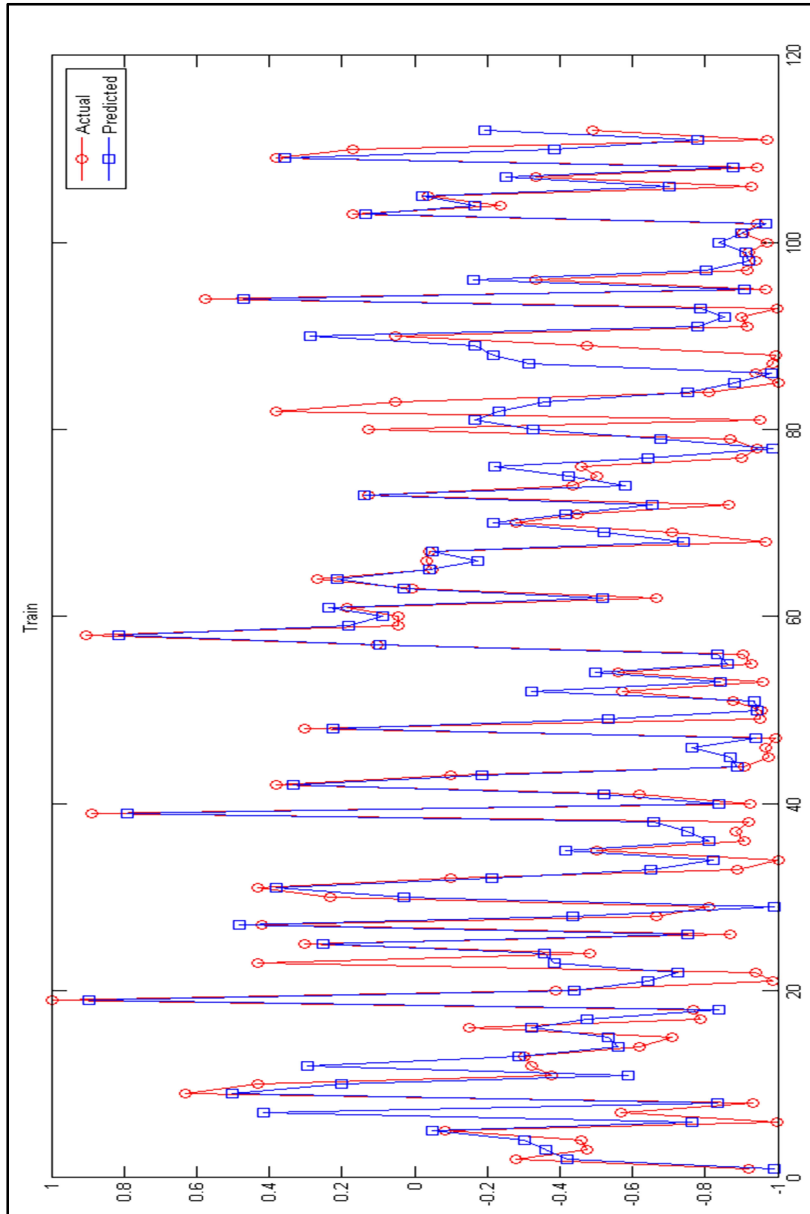
برای به‌کارگیری الگوریتم آموزشی PSO در شبکه عصبی مراحل زیر انجام گردید:

الف) داده‌های مورد نیاز در مرحله پیش‌پردازش نرمالایز شدند. دلیل این کار بازه متفاوت داده‌های ورودی به شبکه عصبی بود. به عنوان مثال بازه نگار چگالی بین ۴۵۰ تا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و بازه تغییرات نگار گاما بین ۲۰-۳۳۰ می‌باشد. بنابراین لازم است که کلیه داده‌های ورودی شامل نگارهای گاما، صوتی، چگالی، نوترون و مقاومت به همراه داده خروجی محتوای ماده آلی نرمالایز شوند که در این قسمت داده‌ها به بازه ۱- تا ۱+ انتقال داده شدند.

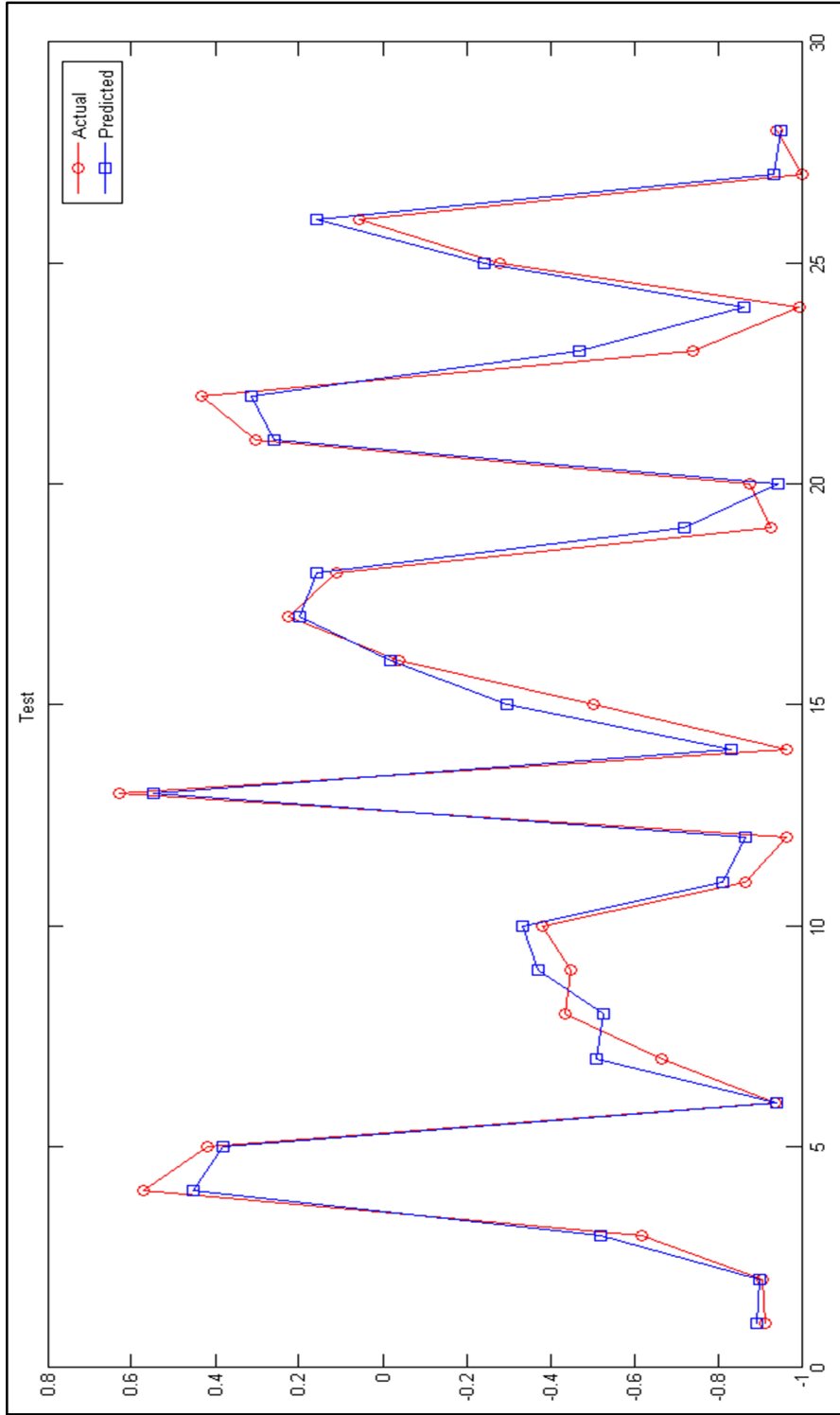
ب) ۸۰ درصد داده‌ها برای آزمایش و ۲۰ درصد داده‌ها برای تست مورد استفاده قرار گرفتند.

ج) حلقه اصلی برنامه به‌کار گرفته شده را حلقه PSO تشکیل می‌دهد که جهت آموزش شبکه عصبی به کار می‌رود. در کد مورد استفاده از الگوریتم پایه PSO استفاده گردیده است که در آن با استفاده از به‌کارگیری ذرات اولیه و یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده یک سری معادلات به روز می‌شود. در شکل‌های

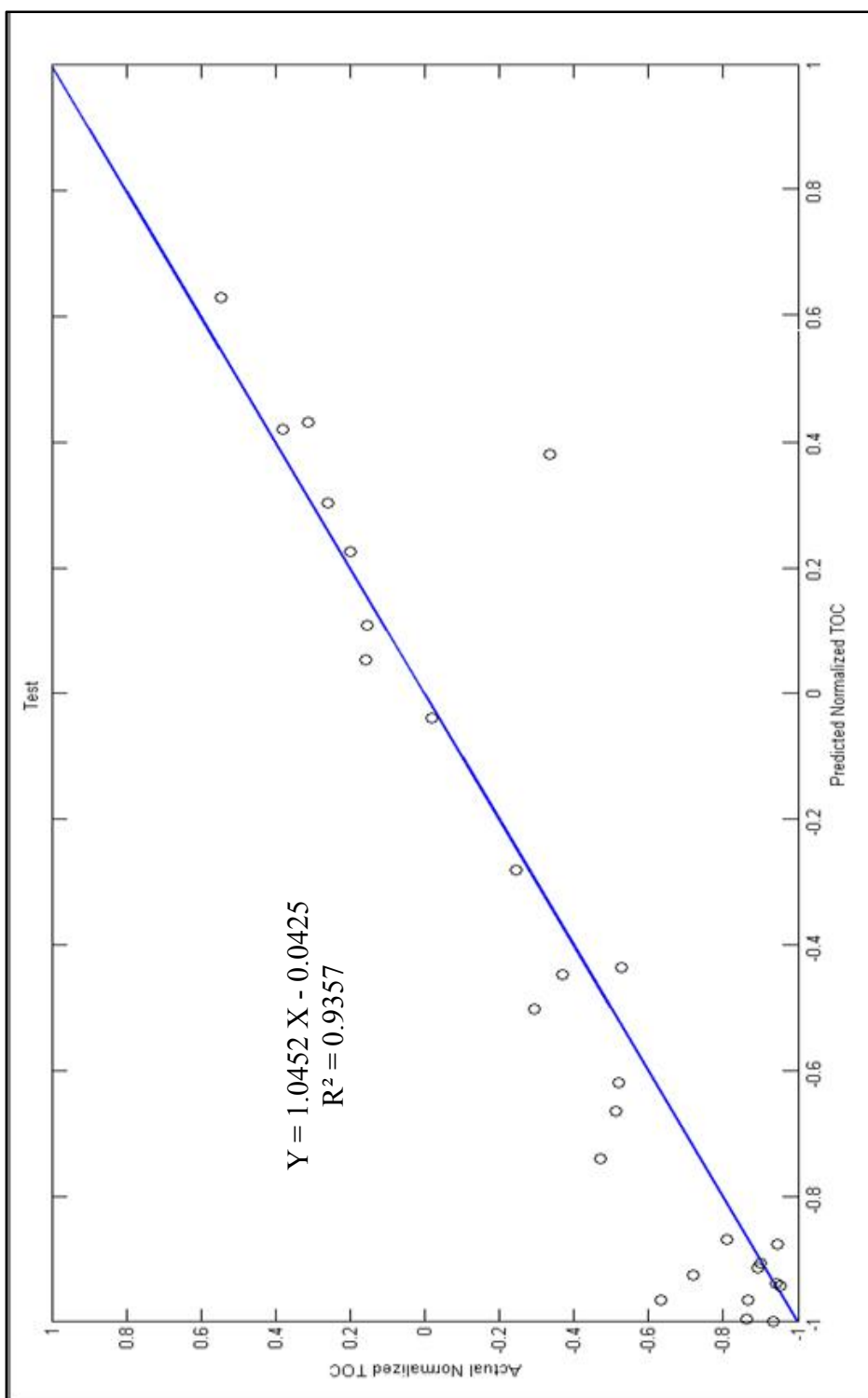
۲-۴ تا ۵-۴ نتایج خروجی شبکه عصبی که در آن از الگوریتم PSO استفاده شده است، نمایش داده شده است. همان طور که در شکل ۴-۴ مشخص شده است، با مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده، مجذور ضریب رگرسیون ۰/۹۳ می باشد که انطباق بسیار مناسبی را نشان می دهد.



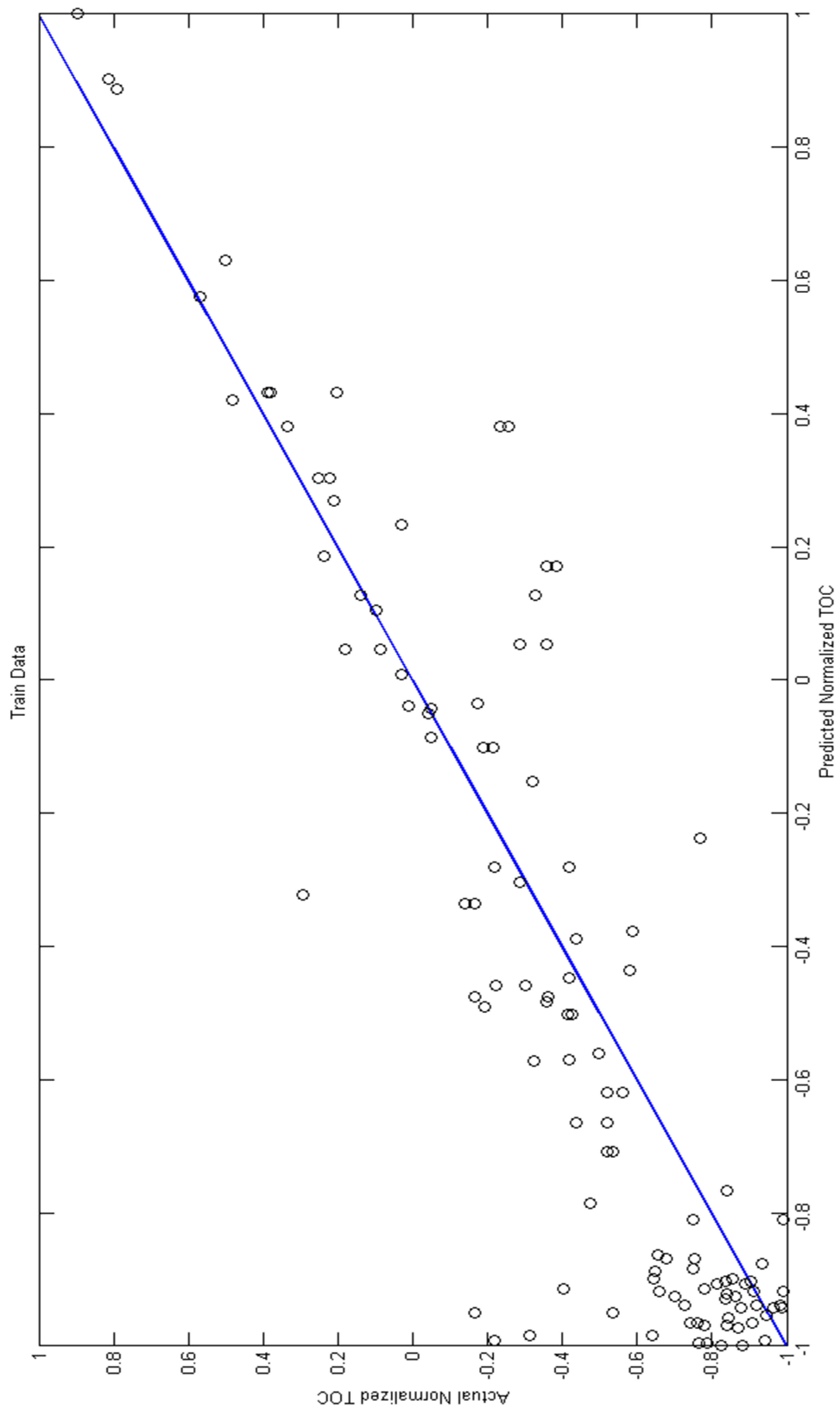
شکل ۴-۳: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده های آموزش با استفاده از الگوریتم PSO



شکل ۴-۳: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم PSO



شکل ۴-۴: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم PSO



شکل ۴-۵: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم PSO

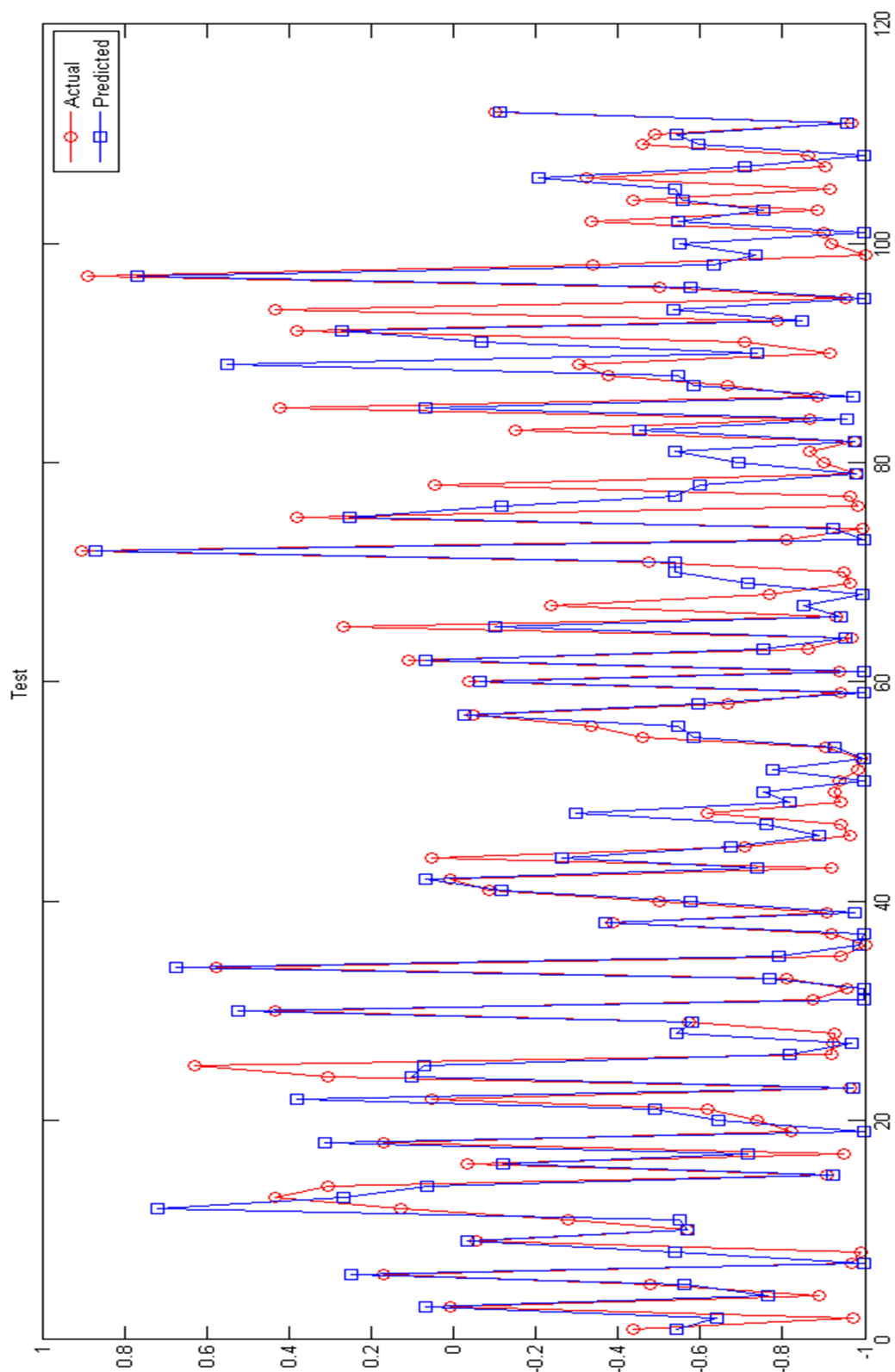
۴-۲-۱-۲ الگوریتم ABC

برای به کارگیری الگوریتم آموزشی ABC در شبکه عصبی مراحل زیر انجام گردید:

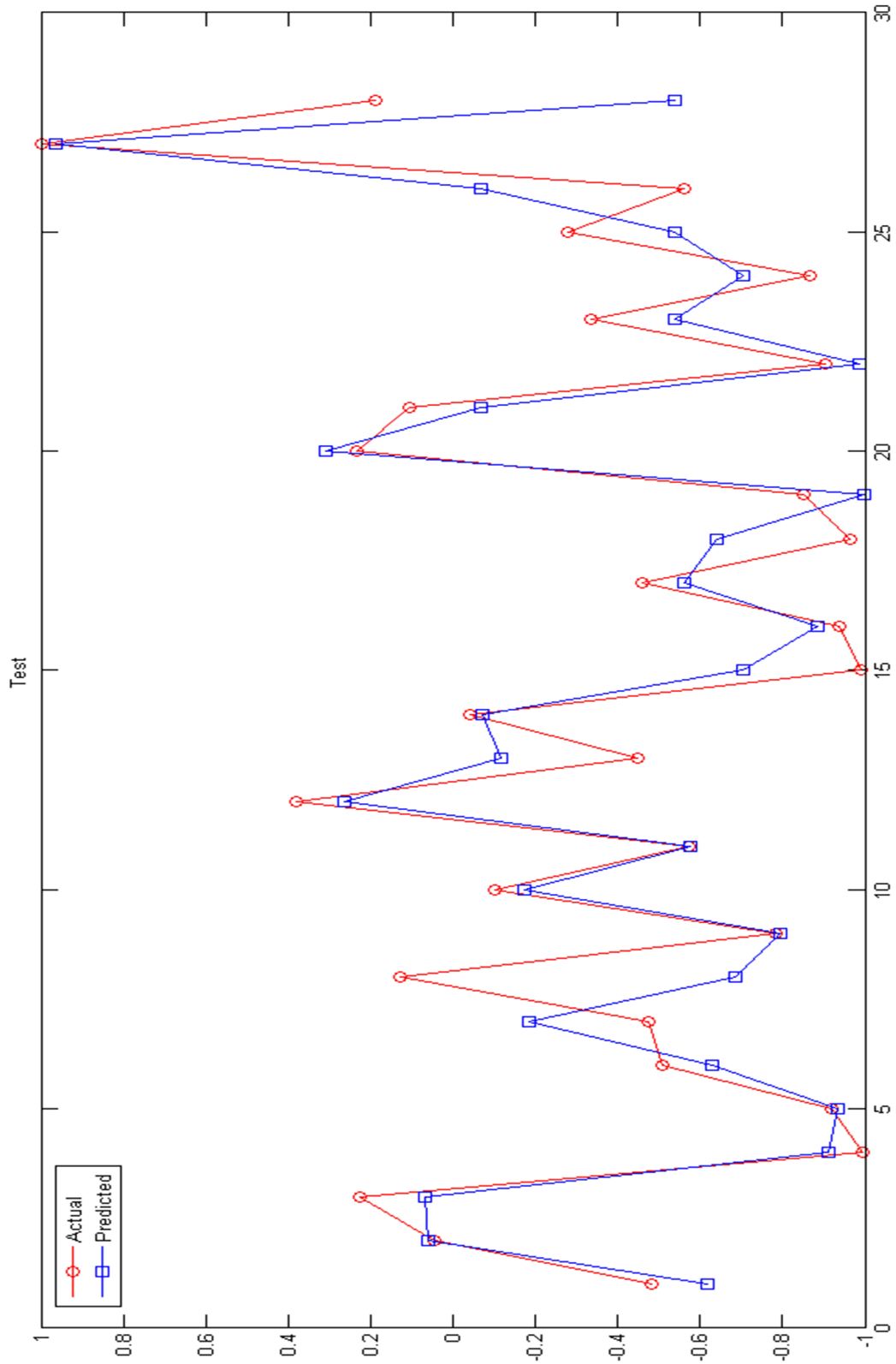
الف) همانند الگوریتم PSO داده‌های مورد نیاز در مرحله پیش‌پردازش به همان دلیلی که در بالا ذکر شد، نرمالایز شدند.

ب) ۸۰ درصد داده‌ها برای آزمایش و ۲۰ درصد داده‌ها برای تست مورد استفاده قرار گرفتند.

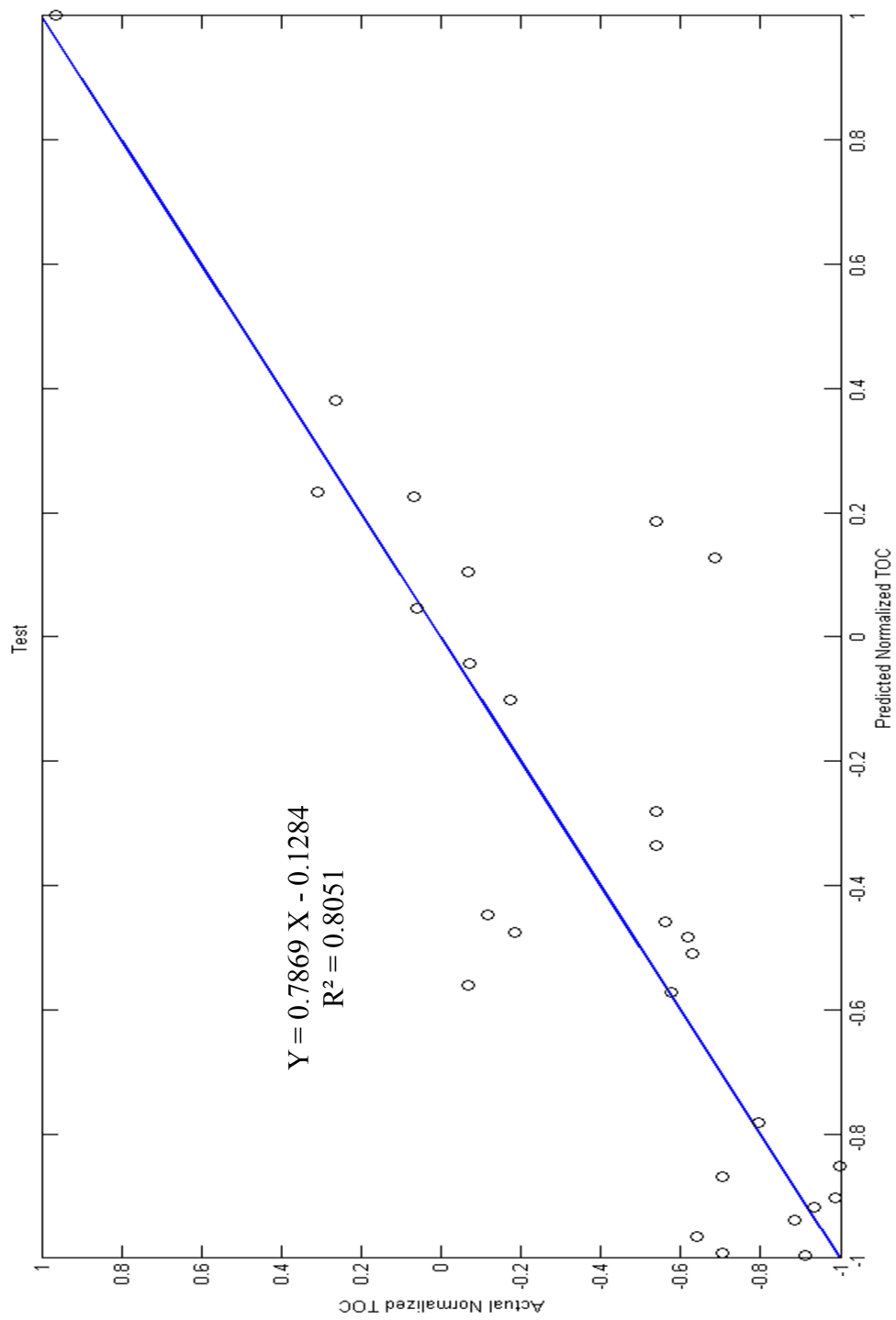
ج) حلقه اصلی برنامه به کار گرفته شده را حلقه ABC تشکیل می‌دهد که جهت آموزش شبکه عصبی به کار می‌رود. در کد مورد استفاده در گام اول، ABC یک توزیع تصادفی از جمعیت P که در کد مورد استفاده ۲۰۰ می‌باشد، از موقعیت‌های منابع غذایی (SN) را تولید می‌کند، به گونه‌ای که SN بیانگر اندازه جمعیت می‌باشد. هر راه حل X_i یک بردار D بعدی می‌باشد که در این جا D تعداد پارامترهای بهینه‌سازی می‌باشد. بعد از شروع، تعداد جمعیت موقعیت‌ها (راه‌حل‌ها) در معرض حلقه‌های تکراری فرآیند جستجوی زنبورهای کارگر، ناظر و پیش-آهنگ قرار می‌گیرند. زنبورهای کارگر بر اساس اطلاعات محلی^{۱۳۶} در ذهن خود یک اصلاح در موقعیت یا همان راه‌حل ایجاد می‌کنند و میزان نکتار (که معادل همان شایستگی است) منبع جدید را اندازه‌گیری می‌کنند. نتایج استفاده از روش ABC در شکل‌های ۴-۶ تا ۴-۹ آمده است. همان‌طور که در شکل ۴-۸ مشخص شده است، با مقایسه بین مقادیر واقعی و تخمین زده شده، مجذور ضریب رگرسیون ۰/۸ می‌باشد.



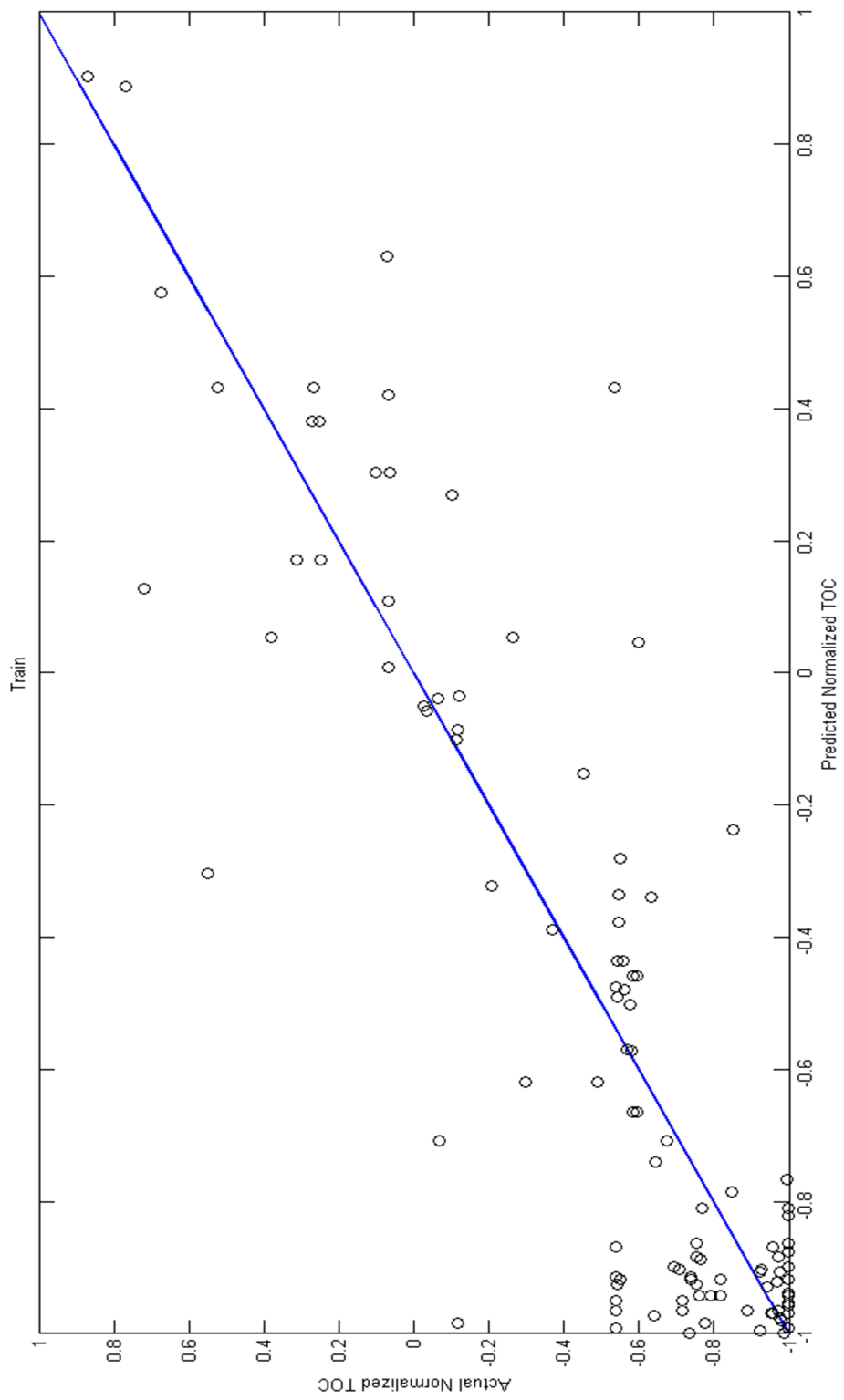
شکل ۴-۶: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم ABC



شکل ۷-۴: مقایسه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم ABC



شکل ۴-۸: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های تست با استفاده از الگوریتم ABC



شکل ۴-۹: رابطه بین محتوای ماده آلی پیش‌بینی شده در مقابل مقادیر واقعی برای داده‌های آموزش با استفاده از الگوریتم ABC

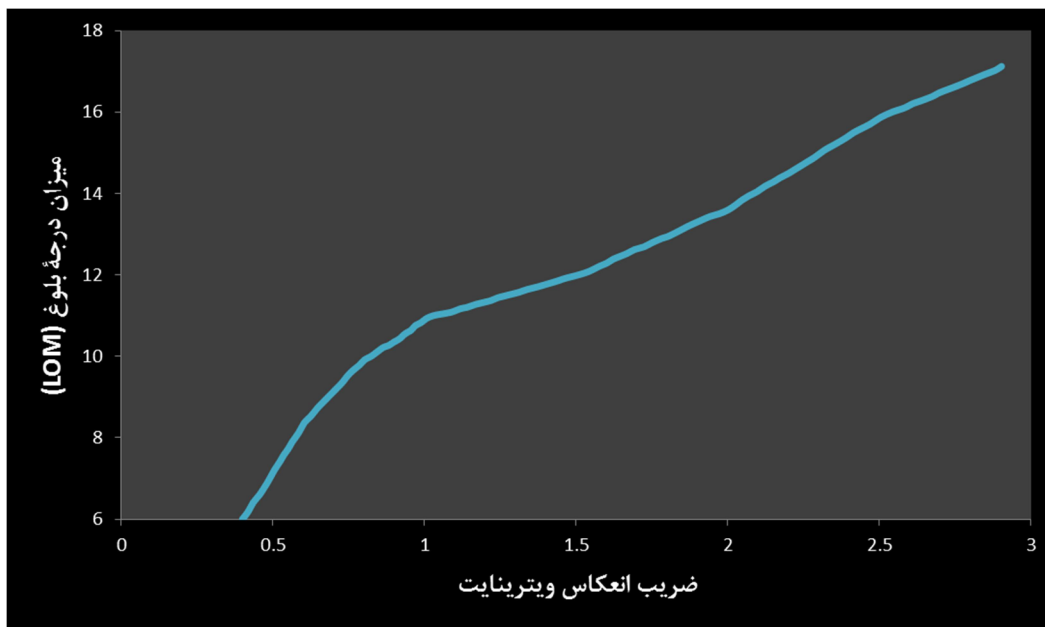
۴-۲-۲ تخمین محتوای ماده آلی با استفاده از روش $\Delta \log R$

همان‌طور که در فصل دوم توضیح داده شد، روش $\Delta \log R$ یکی از روش‌های معمول در تخمین TOC با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی است که در بسیاری از سازندهای مختلف در سراسر دنیا به کار گرفته شده و نتایج مطلوبی را در پی داشته است.

در این قسمت، با استفاده از روش $\Delta \log R$ ، TOC سازند کوکاتیشیل در چاه ردبک-۲ تخمین زده شده است. روند کار به این صورت می‌باشد که در ابتدا نگارهای مقاومت و صوتی بر روی هم انداخته شده و مقدار $\Delta \log R$ از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$\Delta \log R = \log_{10}(R/R_{\text{baseline}}) + 0.02 \times (\Delta t - \Delta t_{\text{baseline}}) \quad (۱-۴)$$

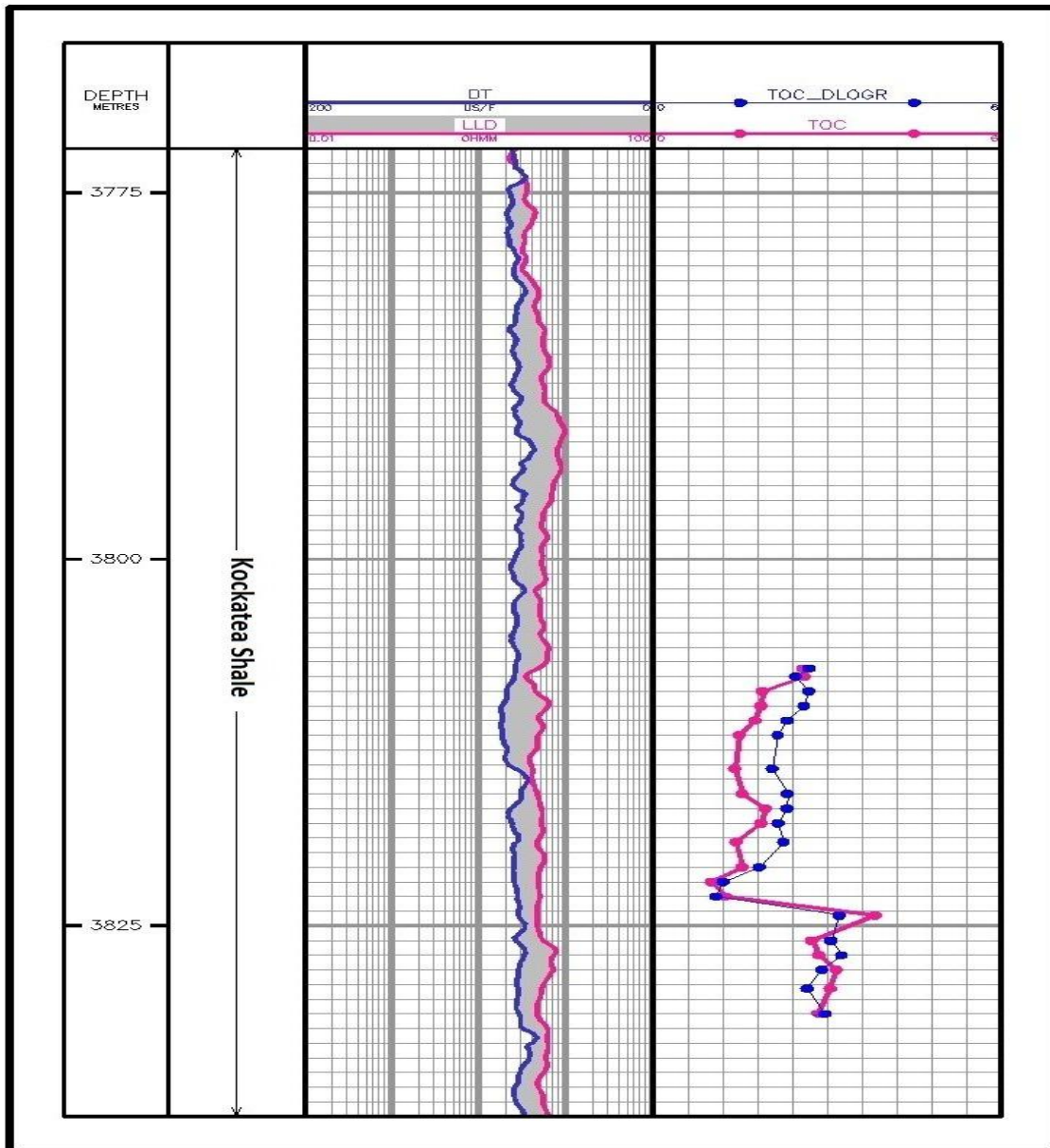
مقدار $\Delta t_{\text{baseline}} = 85 \mu\text{sec}/\text{ft}$ و $R_{\text{baseline}} = 4.7 \text{ Ohmm}$ در نظر گرفته شده است. برای تعیین مقدار LOM از روش همبستگی هندرسون^۱ استفاده شده است.



شکل ۴-۱۰: رابطه بین ضریب انعکاس ویترنایت و میزان درجه بلوغ

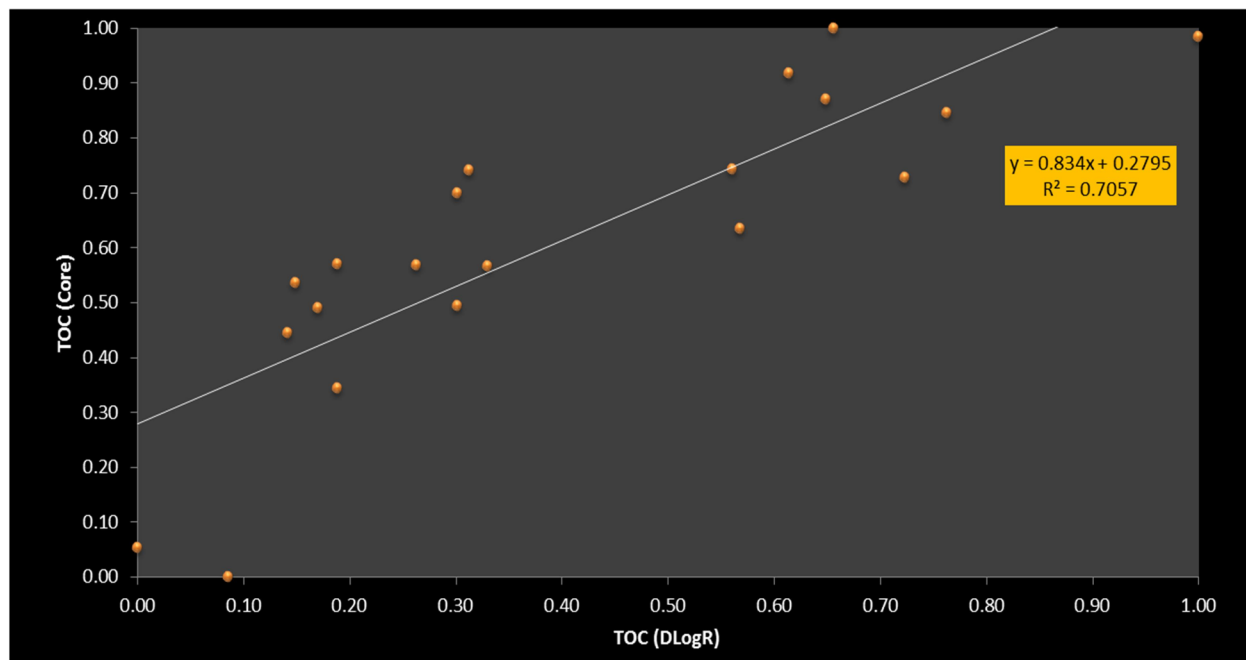
^۱ - Henderson

همان‌طور که در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود، با استفاده از مقدار ضریب انعکاس ویترونیات که از پتروگرافی به دست می‌آید، می‌توان مقدار LOM متناظر با هر نمونه را به دست آورد. سپس با استفاده از LOM و $\Delta \log R$ می‌توان TOC را از رابطه ۲-۲ به دست آورد که این فرآیند بر روی سازند کوکاتیاشیل انجام گرفته است و در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است:



شکل ۴-۱۱: تخمین TOC با استفاده از روش $\Delta \log R$

همچنین مقایسه بین داده‌های واقعی و تخمین‌زده شده در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است که در آن مجذور ضریب رگرسیون برابر ۰/۷ می‌باشد.



شکل ۴-۱۲: رابطه بین مقادیر TOC واقعی و تخمین‌زده شده با استفاده از روش $\Delta \log R$

۴-۳ تخمین مقدار گاز برجا

بر خلاف مخازن متداول در شیل‌های گازی، گاز علاوه بر آن که در فضای متخلخل ذخیره می‌شود، به سطح مواد آلی می‌چسبد. در ابتدا گاز موجود در فضاهای متخلخل (گاز آزاد) تولید شده و سپس گاز چسبیده به ذرات آلی هنگامی که افت فشار حاصل گردید، آزاد می‌شوند. تکنیک‌های مختلفی برای تعیین گاز موجود در فضاهای متخلخل وجود دارد. مجموع گازهای درون فضای متخلخل و گازهایی که دچار جذب سطحی شده‌اند، گاز بر جای کل را تشکیل می‌دهد.

۴-۳-۱ تخمین مقدار گاز چسبیده به سطح ذرات

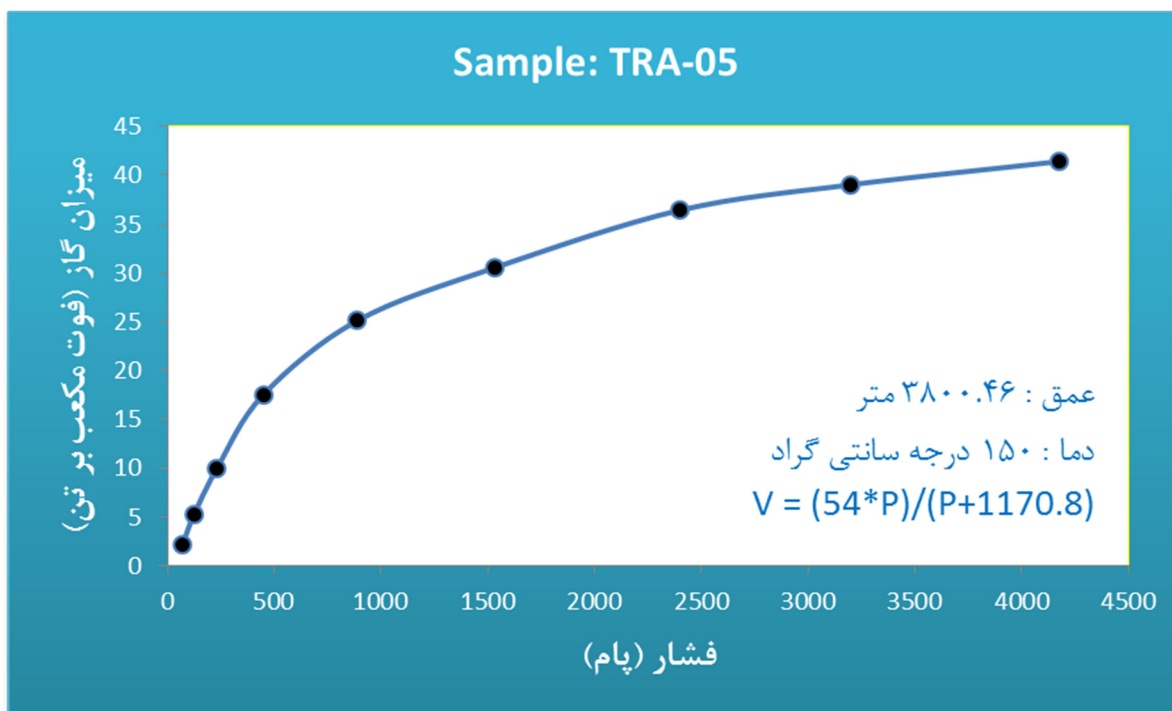
همان‌طور که در فصل قبل توضیح داده شد، بخشی از گاز ذخیره‌شده در این مخازن از گازی که به وسیلهٔ مواد آلی دچار جذب سطحی شده است، تشکیل شده است. برای اندازه‌گیری میزان گاز جذب‌شده به شکل گاز متانی که به سطح کروژن جذب شده است، از ایزوترم لانگمویر استفاده می‌شود. نمونه‌های مغزه‌ای که از سازند کوکاتیا شیل تهیه گردید، برای انجام آزمایش تعیین میزان گاز چسبیده به سطح ذرات در سال ۲۰۱۰ به آزمایشگاه شرکت ودفورد^۲ ارسال گردید. در شکل ۴-۱۲ مغزه شماره ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: نمونه مغزه از قاعده سازند کوکاتیا شیل (Terra Tek, 2012)

برای تعیین میزان این گاز از ایزوترم لانگمویر شده است که در شکل ۴-۱۳ نتایج آن آورده شده است.

² - Weatherford



شکل ۴-۱۴: نمودار میزان گاز در برابر فشار در حین اندازه‌گیری‌های لانگمویر ایزوترم

فرمول کلی میزان گاز جذب شده به صورت معادله ۲-۴ است.

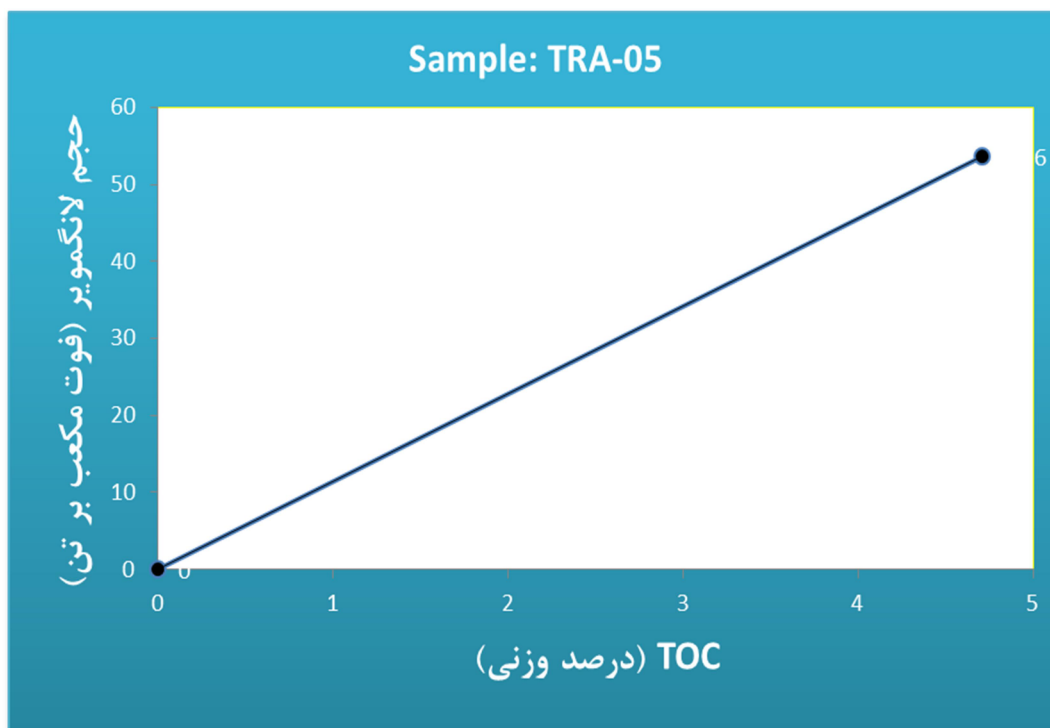
$$G_s = \frac{V_1 \cdot P}{(P + P_1)} \quad (2-4)$$

دو پارامتر مهم در شیل‌های گازی که از آزمایش بالا استخراج می‌گردند، V_1 و P_1 می‌باشند. با توجه به شکل بالا و توضیحات بخش ۲-۴-۶-۱، V_1 برابر $53/6$ scf/ton و P_1 برابر $1170/8$ Psi می‌باشد.

یکی از روابط مهمی که به تخمین گاز جذب‌شده کمک می‌کند، رابطه بین TOC و حجم لانگمویر و در

نتیجه گاز جذب‌شده می‌باشد. در نمونه مورد آزمایش TOC برابر $4/71\%$ می‌باشد.

$$V_1 = 11.38 * TOC \quad (3-4)$$



شکل ۴-۱۵: رابطه بین TOC و حجم لانگمویر

در نتیجه رابطه کلی زیر برای به دست آوردن ظرفیت ذخیره گاز به دست می‌آید:

$$G_s = \frac{11.38 * TOC * P}{(P + 1170.8)} \quad (4-4)$$

۴-۳-۲ تخمین مقدار گاز آزاد

برای ارزیابی پتروفیزیکی شیل‌های گازی از روشی احتمالی^۳ که مبنای آن مدل کردن مشاهدات معلوم با استفاده از مؤلفه‌های حجمی و نیز پارامترهای پاسخ آن‌ها می‌باشد، استفاده شده است. اصول این روش در فصل سوم توضیح داده شد.

جدول ۴-۱ یک مدل پتروفیزیکی را نشان می‌دهد که مبنای محاسبات میزان گاز هم بر اساس اندازه-

گیری‌های مغزه و هم با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی می‌باشد.

³ - Probabilistic

جدول ۱-۴ : مدل پتروفیزیکی برای سنگ بدون شکستگی. واژه ماتریکس غیرآلی برای مجزا کردن کروژن از ترکیبات غیرآلی ماتریکس استفاده می‌گردد		
ماتریکس	سیال	
کروژن	آزاد	گاز
	چسبیده	
ماتریکس غیرآلی (رس خشک + کانی‌های غیر رسی)	آزاد	گاز
	محدودشده به وسیله رس‌ها	آب
	محدودشده به وسیله فشار موئینگی	آب

در این مدل، برای ساختن مدل اولیه با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی موجود از کلسیت، کانی ایلیت و کروژن استفاده گردیده است. کروژن دارای خواص پتروفیزیکی زیر است:

جدول ۲-۴: پاسخ کروژن بر نگرهای پتروفیزیکی	
نوع نگر	پاسخ کروژن بر نگر
چگالی	مقادیر پایین (۱,۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب)
فوتوالکتریک	مقادیر پایین (۰,۲۴)
اشعه گاما	مقادیر بالا (بین ۵۰۰ تا ۴۰۰۰ API)
تخلخل نوترونی	مقادیر بالا (۶۰ واحد تخلخل)

مدل اشباع آب استفاده شده مدل آب دوتایی^۴ است. این روش البته هنگام استفاده از این روش بایستی مراقب بود تا جواب‌های نامعقول در حجم‌های زیاد شیل رخ ندهد. استفاده از روش سیمان‌دوکس^۵ نیز توسط بعضی از محققین از قبیل پروفیسور کرین^۶ پیشنهاد گردیده است.

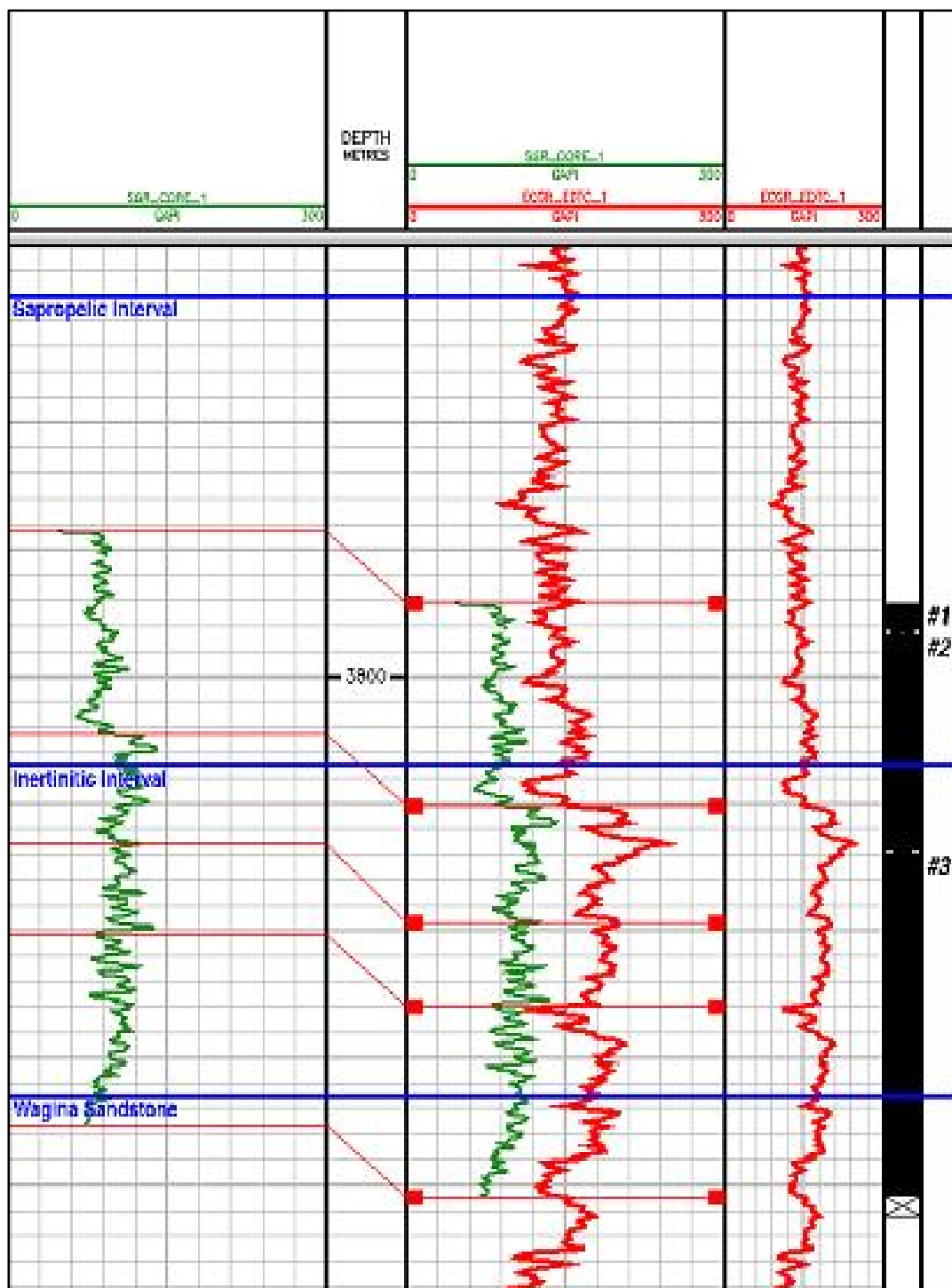
در شکل ۴-۱۶ نگارهای موجود در ممبر هووا که مستعد شیل‌گازی می‌باشد، نمایش داده شده است. نگار محتوای ماده آلی که حاصل آنالیزهای راک-ایول می‌باشد، نیز نشان داده شده است. همچنین با توجه به شکل ۴-۱۵ حدود ۶/۲ متر جابجایی عمق^۷ از طریق مقایسه بین گامای مغزه و نگار گاما انجام شد.

4 - Dual Water

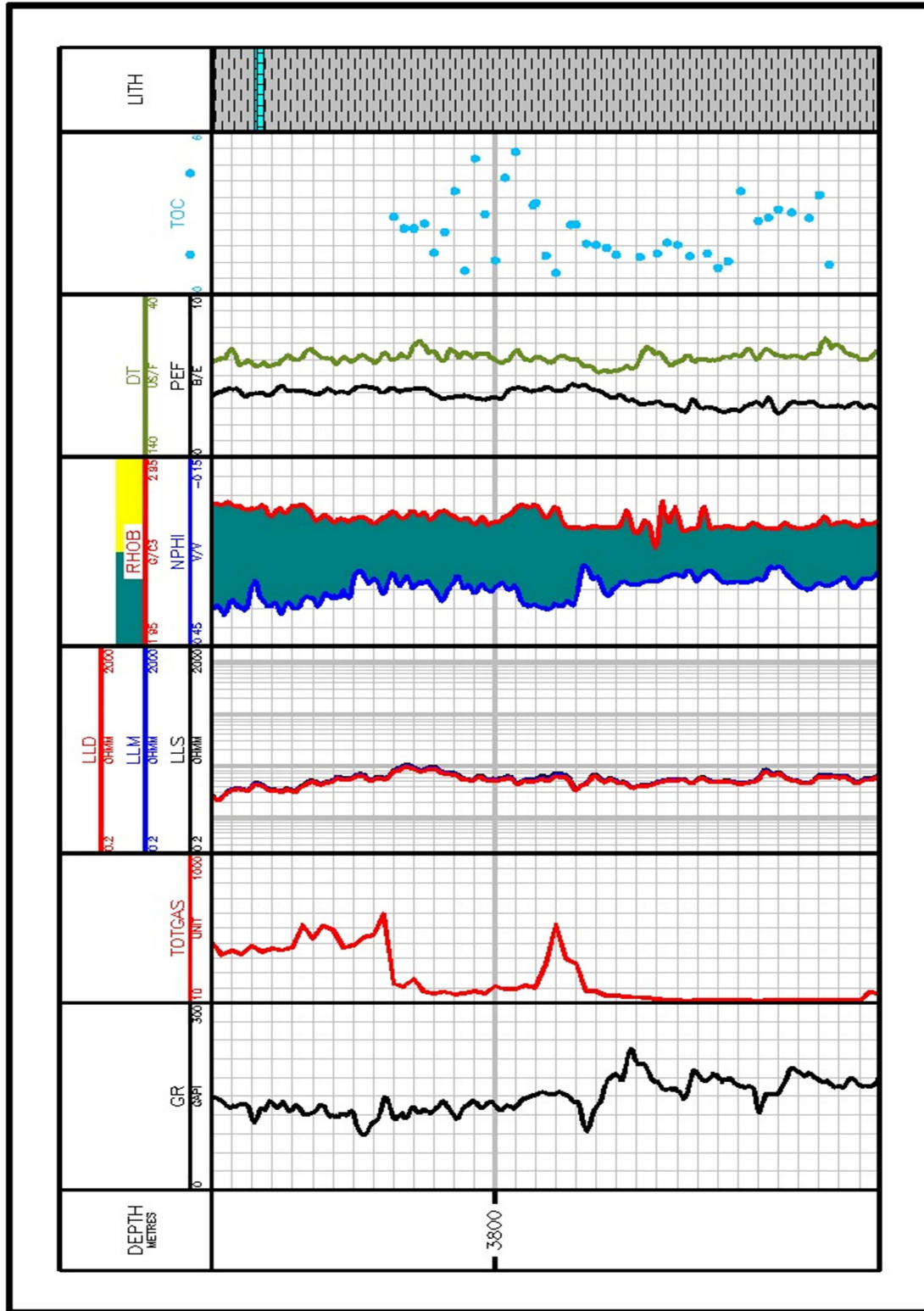
5 - Simandox

6 - Crain

7 - Depth Shifting



شکل ۴-۱۶: جابجایی عمق از طریق مقایسه مقادیر مغزه و نگار



شکل ۱۷-۴: نگاره‌های پتروفیزیکی سازند کوکاتیا شیبیل

برای اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی در شیل‌های گازی منابع بسیار کمی وجود دارد. کویرین^۸ در سال ۲۰۱۰ بدون آن‌که مدل اشباع خاصی را تعیین کند، عدد ۱,۶ را به صورت تجربی برای ضریب سیمان-شدگی پیشنهاد داد و با $\emptyset * S_g$ انطباق داد. پیشنهاد کرین استفاده از $a=1$ و ضرایب M و N برابر و بین بازه ۱,۵ تا ۱,۸ در شیل‌های گازی بوده است. فقدان مطالعات آزمایشگاهی پیشرفته، همچنان مشکل عدم توافق در مورد ضریب سیمان‌شدگی را بدون جواب گذاشته است. در مدل استفاده شده در این پروژه به دلیل انطباق مناسب با داده‌های مغزه از اعداد ۱,۹ و ۲ برای ضرایب سیمان‌شدگی و توان اشباع آب استفاده شده است. نتیجه تفسیر پتروفیزیکی کوکاتیا شیل به روش Multimin در شکل ۴-۱۷ آمده است.

اطلاعات جدول ۴-۳ برای استفاده در ساخت مدل اولیه و نیز پیش محاسبات^۹ مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است که جهت سهولت کار برای آنالیز پتروفیزیکی، مقادیر مقاومت از قبیل مقاومت گل، فیلتره گل^{۱۰} و کبره گل^{۱۱} توسط نرم‌افزار در دماهای مختلف به مقادیر متناظر آن‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی-گراد تبدیل شده‌اند. K مقدار پتاسیم موجود در گل حفاری است و Run شماره راندن ابزار نمودارگیری است.

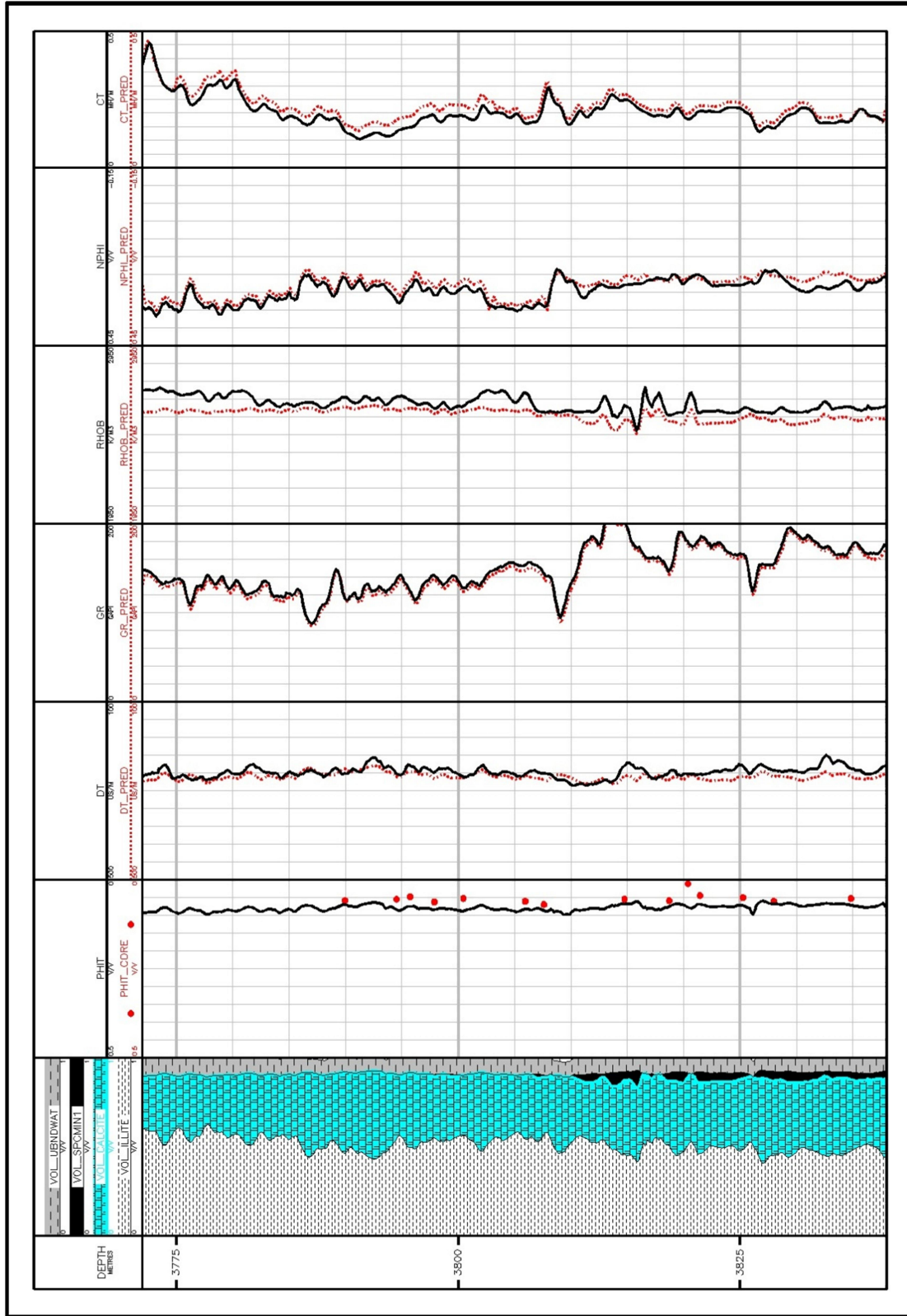
جدول ۴-۳: مقادیر مورد استفاده جهت ساختن مدل پتروفیزیکی					
BHCT	$R_{mc} @ Temp$	$R_{mf} @ Temp$	$R_m @ Temp$	% K	Run
95 °C	0.11 Ω -m @ 95 °C	0.06 Ω -m @ 95 °C	0.08 Ω -m @ 95 °C	6.2	5
101 °C	0.12 Ω -m @ 101 °C	0.06 Ω -m @ 101 °C	0.08 Ω -m @ 101 °C	6.4	6
98 °C	0.14 Ω -m @ 98 °C	0.07 Ω -m @ 98 °C	0.10 Ω -m @ 98 °C	6.2	7
100 °C	0.12 Ω -m @ 100 °C	0.06 Ω -m @ 100 °C	0.08 Ω -m @ 100 °C	5.5	7
100 °C	0.12 Ω -m @ 100 °C	0.06 Ω -m @ 100 °C	0.08 Ω -m @ 100 °C	5.4	8

⁸ - Quirein

⁹ - Pre-Calculation

¹⁰ - Mud Filtrate

¹¹ - Mud Cake



شکل ۴-۱۸: تفسیر پتروفیزیکی سازند کوه کانیاشیل

با توجه به حدود تعیین شده برای محدوده خالص مخزن شیل گازی، مقادیر میانگین پارامترهای مورد نیاز جهت تخمین میزان گاز آزاد در جدول ۴-۴ به دست آمده است.

جدول ۴-۴: مقادیر میانگین جهت تعیین میزان گاز آزاد	
پارامتر مخزن	میانگین مقادیر به دست آمده
ضخامت کل	۶۶ متر
ضخامت خالص	۱۵/۳ متر
نسبت خالص به کل	۰/۲۳۲
اشباع آب	۷۵ درصد
تخلخل	۸ درصد

با توجه به معادلات ۴-۵ و ۴-۶ که در ذیل آمده‌اند، می‌توان میزان گاز برجای کل را تخمین زد. مقدار مساحت سازند کوکاتیشیل از گزارش برآورد اولیه شیل‌های گازی که توسط انجمن انرژی اطلاعات امریکا در مورد حوضه پرت نوشته شده است، استخراج گردیده است.

در نهایت، با توجه به مطالب گفته شده مقدار گاز آزاد از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$GI \ R_{Free} = 43560 * 10^{-9} \frac{\phi_e * (1 - S_w) * h * A}{B_g} \quad (5-4)$$

$$GI \ R_{Free} = 43560 * 10^{-9} \frac{0.08 * (1 - 0.75) * 15.3 * 3.28 * 1395200}{0.00081} = 7465.3 \text{ BCF}$$

که در آن B_g از رابطه ۲-۳۱ به دست آمده است:

$$B_g = \frac{P_s * T_f}{P_f * T_s} * Z = \frac{14.65 * 666.3}{2297.3 * 60} * 1 = 0.00081$$

و همچنین مقدار گاز چسبیده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$(6-4)$$

$$GI_{I_{Adsorbed}} = g_c * \rho * A * h * C$$

$$GI_{I_{Adsorbed}} = 18.24 * 2.7 * 1395200 * 50.184 * 1.3597 * 10^{-6} = 4706.49 \text{ BCF}$$

از جمع کردن مقدار گاز آزاد و چسبیده، مقدار گاز برجای کل به دست می‌آید:

$$GI_{P_{Total}} = GI_{P_{Free}} + GI_{P_{Adsorbed}} = 7465.3 + 4706.49 = 12171.89 \text{ BCF} = 12.17 \text{ TCF}$$

فصل پنجم

نتیجہ گیری و پیشہ داری

۵-۱ نتیجه گیری

- مزیت استفاده از الگوریتم PSO در پی داشتن نتایج قابل قبول در تخمین محتوای ماده آلی در عین ساده بودن الگوریتم است.
- روش ABC نیز مانند PSO نتایج مطلوبی داشته است، اما به دلیل وجود پارامترهای بیشتر و الگوریتم پیچیده تر نیاز به مطالعات دقیق تری می باشد.
- روش $\Delta \log R$ روشی مناسب جهت تخمین TOC می باشد، اما برای به دست آوردن LOM نیازمند دقت فراوانی است تا محتوای ماده آلی به دست آمده با مقدار داده های مغزه مطابقت داشته باشد. از مزیت های این روش می توان به عدم وابستگی آن به داده های ورودی زیاد جهت آموزش سیستم های هوشمند اشاره کرد.
- روش Multimin به همراه پارامترهای پتروفیزیکی به کار گرفته شده در روش آب دوتایی به نسبت روش های دیگر از قبیل روش های قطعی، روشی مطمئن تر می باشد که در این پروژه نتایج تفسیر پتروفیزیکی انجام شده در مورد مقدار اشباع آب و تخلخل با مقادیر حاصل از آنالیز مغزه مطابقت خوبی دارد.
- از مقایسه بین روش های به کار گرفته شده در این پایان نامه برای تخمین محتوای ماده آلی نتیجه می گیریم استفاده از روش های هوشمند به نسبت روش های قدیمی جواب های بهتری را در پی دارد که در جدول زیر مقایسه شده اند.

جدول ۵-۱: مقایسه روش های به کار گرفته شده در تخمین TOC	
روش به کار گرفته شده	مقایسه ضریب R^2
روش $\Delta \log R$	۰/۷
روش بهینه سازی PSO	۰/۹۳
روش بهینه سازی ABC	۰/۸

۲-۵ پیشنهادات

- الگوریتم‌های به کار گرفته شده در این پروژه بر روی داده‌های سازند ابروین‌ریور و کرینجینیا که جزء سازندهای مستعد شیل گازی هستند، نیز اعمال گردد.
- از نگار ECS که جزء نگارهای ژئوشیمیایی می‌باشد، در ارزیابی پتروفیزیکی استفاده گردد که متأسفانه در این پروژه ابزار رانده شده جهت برداشت داده در چاه گیر کرده بود و عملیات نمودارگیری انجام نگردید.
- با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی، پارامترهای ژئومکانیکی از قبیل اندیس شکنندگی^{۱۲} که مقدمه‌ای بر انجام عملیات شکست هیدرولیکی است، به دست آید.
- روش‌های به کار گرفته‌شده در این پروژه، بر روی داده‌های حداقل پنج چاه دیگر که دارای داده‌های مورد نیاز از قبیل آنالیزهای مغزه جهت تعیین گاز چسبیده به سطح مواد آلی، نگارهای پتروفیزیکی پیشرفته از قبیل ECS^{۱۳}، XPT^{۱۳}، NMR^{۱۴} جهت تعیین گاز آزاد و نیز داده‌های کامل ژئوشیمیایی و پتروگرافی هستند، اعمال گردیده و جامعیت این روش‌ها در شیل‌های گازی با تحلیل بر روی این داده‌ها به طور مفصل مورد بررسی قرار گیرد.

¹² - Brittleness Index

¹³ - Express Pressure Tool

¹⁴ - Nuclear Magnetic Resonance

منابع و مأخذ

۱. رضایی م، چهارزی ع، (۱۳۸۹) "اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی"، جلد اول،

چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران

۲. کاشفی ع، پورموسوی ع، جهانبانی ع، (۱۳۸۶) "آموزش شبکه‌های عصبی چندلایه با

استفاده از الگوریتم PSO"، اولین کنفرانس سیستم‌های هوشمند و فازی، دانشگاه فردوسی

مشهد

3. Dianne O., Ellis G., (2000). "*Western Australia: Atlas of petroleum fields*".
4. Glorioso J., and Aquiles .R, (2012) "*Unconventional Reservoirs: Basic Petrophysical Concepts for Shale Gas*", SPE 153004.
5. Haykin, S., (1990) "*Neural Networks, A Comprehensive Foundation*", Prentice Hall, Upper Saddle River.
6. Johnson N.L., Currie S.M., Ilk D., and Blasingame T.A., (2009). "*A Simple Methodology for Direct Estimation of Gas-in-Place and Reserves using Rate-Time Data*", SPE 123298.
7. Jonasson, K., 2013, "*Journal of Petroleum in Western Australia*", May, pp.7-8.
8. Kadkhodaie, A., Rahimpour-Bonab, H., Rezaee, M.R., (2009). "*A Committee Machine with Intelligent Systems for Estimation of Total*

Organic Carbon Content from Petrophysical Data: An Example from the Kangan and Dalan Reservoirs in South Pars Gas Field, Iran". *Computers & Geosciences, Elsevier Publications*, 35, pp 459-474.

9. Kamali, M.R., Mirshady, A.A., (2004). "**Total organic carbon content determined from well logs using $\Delta\log R$ and neuro fuzzy techniques**". *J. Pet. Sci. Eng.* 45, pp 141–148.
10. Karaboga D., Bahriye A., (2009) "*A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm*", *J. Applied Mathematics & Computation.* 214, pp.108-132.
11. Karaboga D., Bahriye A., and Celal O., (2009) "*Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Training Feed-Forward Neural Networks*", Erciyes University, Engineering Faculty, Department of Computer Engineering.
12. Karaboga, D., (2005) "*An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization*", Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.
13. Kennedy, J., (1997) "*The Particle swarm: Social adaptation of knowledge*", In proceedings of the 1997 International Conference on Evolutionary Computation, Indianapolis, pp. 303–308.

14. Kuuskraa V., Stevens S., Van Leeuwen T., Moodhe K. (2011) “*World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States, Department Of Energy*”.
15. Lewis, R., Ingraham, D., Percy, M., Williamson, J., Sawyer, W., and Frantz, J., 2004, (2004) “*New Evaluation Techniques for Shale Gas Reservoirs*”, Reservoir Symposium.
16. Luffel, D.L., and Guidry, F. K. (1992) “*New Core Analysis Methods for Measuring Reservoir Rock Properties of Devonian Shale*”, J. Pet. Tech. SPE 20571.
17. Mory and Iasky R. P., (1996) “*Stratigraphy and structure of the onshore northern Perth basin Western Australia*”.
18. Paradigm™ Geolog 6.7.1 Software Tutorial, (2009) “*Mathematical Model*”.
19. Paradigm™ Geolog 6.7.1 Software Tutorial, (2009) “*Petrophysical Model*”.
20. Passey, Q. R., Creany, S., Kulla, J. B., Moretti, F. J., and Stroud, J. D., 1990, “*A Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs*”, AAPG Bulletin, v. 74, p. 1777-1794.
21. Passey, Q. et al. (2010) “*From Oil-Prone Source Rock to Gas-Producing Shale Reservoir*”, SPE 131350.

22. Quirein, J., Witkowsky, J., Truax, J., Galford, J., Spain, D., and Odumosu, T., (2010) “***Integrating Core Data and Wireline Geochemical Data for Formation Evaluation and Characterization of Shale Gas Reservoirs***”, SPE 134559, Presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy, pp. 18
23. Shtepani, E., Noll L.A., Elrod L.W., and Jacobs P.M., (2008) “***New Regression-Based Method for Accurate Measurement of Coal and Shale Gas Content***”. SPE 115405.
24. Sondergeld, C.H., et al. (2010) “***Petrophysical Considerations in Evaluating and Producing Shale Gas Resources***”, SPE 131768.
25. Thaimar, R., Jim D., Ron J, and James J. H. (2011) “***Comparative Study of Formation Evaluation Methods for Unconventional Shale-Gas Reservoirs: Application to the Haynesville Shale***”, SPE144062.

Abstract

Total Organic Carbon (TOC) is one of the most important parameters in shale gas reservoirs. There are several approaches to estimate TOC from Petrophysical data. Two important approaches including neural network and $\Delta\log R$ are implemented in this dissertation. Artificial Bee Colony (ABC) and Particle Swarm Optimization (PSO) algorithms are used for training neural network. Generally, these algorithms belong to swarm intelligence.

Another key parameter for shale gas reservoirs is Gas In Place (GIP). GIP in shale gas reservoirs consists of free gas and adsorbed gas. Laboratory measurements are necessary to determine amount of adsorbed gas. In this thesis, volumetric method is used to estimate free gas in Kockatea shale formation in Perth basin among several ways such as decline Curve Analysis (DCA) and type curve matching. Multi-Mineral approach is used to estimate free gas. Cut-off values are used to determine net thickness of reservoir for free gas in place calculation. Total GIP is summation of calculated free and adsorbed gas.

Key Words: Gas In Place, Total Organic Carbon, Neural network, Particle Swarm Optimization, Artificial Bee Colony



Shahrood University of Technology
Faculty of Mine, Petroleum and Geophysics

**Petrophysical evaluation of shale gas to determine TOC and gas in place using
neural network data fusion approach**

Saeed Vaezian

Supervisors:

Dr Behzad Tokhmechi

Dr Mohammad Reza Rezaei

July 2013