



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه اکتشاف

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

## بهینه سازی ضرایب آرچی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران با استفاده از روش‌های آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مجتبی معمارزاده زواره

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر محمد کنشلو

استاد مشاور

دکتر شاهین کرد

بهمن ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

---



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه اکتشاف

## بهینه سازی ضرایب آرچی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران با استفاده از روش‌های آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی

مجتبی معمارزاده زواره

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر محمد کنشلو

استاد مشاور

دکتر شاهین کرد

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی شاهرود  
دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
گروه اکتشاف

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مجتبی معمارزاده زواره

تحت عنوان:

بهینه سازی ضرایب آرچی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران با استفاده از روش های  
آماری و شبکه های عصبی مصنوعی

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۲۹ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و  
با درجه بسیارخوب مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر شاهین کرد		دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی
			دکتر محمد کنشلو

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	دکتر امین روشندل کاهو		دکتر رضا قوامی ریایی
			دکتر بهزاد تخم چی

با احترام؛

تقدیم به پدر و مادر مهربان و همسر عزیزم

## تشکر و قدردانی

خداوند رحمان را شاکرم که توفیق داد این پایان نامه را به پایان رسانم. ضمناً بر خور واجب می دانم از راهنمایی های اساتید گرانقدر، جناب آقای دکتر کامکار روحانی و آقای دکتر کنشلو که در تمامی مراحل انجام این پایان نامه مرا یاری نموده اند صمیمانه سپاس گذاری نمایم. همچنین از اساتید عزیز جناب آقای دکتر قوامی ریایی و آقای دکتر تخم چی که داوری این پایان نامه را بر عهده گرفتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

جا دارد از تمامی دانشجویان، دوستانم و مسئولین دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک به خصوص آقای شاه حسینی، مهندس شریفی نژاد، مهندس میرزاوند و مهندس مجلسی که در تمام این مدت مرا همراهی نموده اند صمیمانه سپاس گذاری نمایم. در آخر از تلاش های ستودنی همسر عزیزم، مهندس سمیره حسینی که در تمامی مراحل این پایان نامه پشتوانه و همراهم بوده، کمال سپاس و قدردانی را دارم.

با آرزوی موفقیت و بهروزی

مجتبی معمارزاده

## تعهد نامه

اینجانب مجتبی معمارزاده زواره دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف معدن دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه سازی ضرایب آرچی در یکی از مخازن کربناته جنوب ایران با استفاده از روش های آماری و شبکه های عصبی مصنوعی تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر محمد کنشلو متعهد می شوم.

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

۱۳۹۱/۱۱/۲۹

امضای دانشجو

مجتبی معمارزاده

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

اشباع از آب یکی از پارامترهای مهم و کاربردی در مخازن هیدروکربوری می‌باشد. رایج‌ترین رابطه محاسبه اشباع از آب در این مخازن رابطه آرچی است. این رابطه دارای سه پارامتر با عناوین سیمان‌شدگی ( $m$ )، توان اشباع ( $n$ ) و پیچاپیچی ( $a$ ) است که پارامترهای آرچی نامیده می‌شوند. تغییر اندکی در هر یک از این ضرایب باعث تغییرات قابل توجه در محاسبه اشباع از آب می‌شود. اگرچه تا به امروز روش‌های زیادی برای تخمین این پارامترها ارائه شده است اما روش دقیق و قابل اعتمادی برای تعیین این پارامترها در همه شرایط وجود ندارد. در این پایان‌نامه پارامترهای آرچی مربوط به سه چاه در یک میدان کربناته با استفاده از روش‌های آماری و شبکه عصبی محاسبه شد و توانایی هر یک از روش‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ابتدا ضرایب آرچی به کمک دو روش آماری موجود یعنی روش متداول و روش رگرسیون سه بعدی محاسبه و نتایج این دو روش بررسی و مقایسه شدند. در مجموع روش رگرسیون سه بعدی به دلیل محاسبه هم‌زمان پارامترهای آرچی نتایج بهتری را نسبت به روش متداول داشته است.

از آن جایی که رفتار پارامترهای آرچی به عوامل زیادی وابسته است، و تعیین رفتار هر یک از این ضرایب، به سادگی امکان پذیر نمی‌باشد. با توجه به قابلیت شبکه‌های عصبی در یادگیری این ارتباطها، روش شبکه عصبی می‌تواند در تعیین این ضرایب مؤثر باشد. به همین دلیل با استفاده از شبکه عصبی ضریب سیمان‌شدگی برای هر نمونه در میدان مورد مطالعه محاسبه گردید. در این تحقیق شبکه پس انتشار خطای پیش‌خور به دو روش توقف سریع و مرتب‌سازی آموزش داده شد. برای این منظور از چاه نمودارهای گامای تصحیح‌شده (CGR)، گامای کل (SGR)، وزن مخصوص توده (RHOB)، زمان گذر (DT)، القایی عمیق (ILD)، تخلخل نوترونی (NPHI) و اثر فوتوالکتریک (PEF) به عنوان ورودی شبکه و فاکتور سیمان‌شدگی به عنوان خروجی استفاده شده است. در روش توقف سریع به کمک الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت و در روش مرتب‌سازی با تابع مرتب‌ساز بی‌زین شبکه‌ها آموزش داده شدند. به دلیل کم بودن تعداد نمونه‌ها و داده‌های ورودی شبکه، نتایج حاصل از



شبکه عصبی آن چنان که مورد نیاز بود، با دقت و صحت بالا به دست نیامده است. با این حال روش توقف سریع نسبت به روش مرتب‌سازی نتایج بهتری در بر داشته است. در این روش، شبکه‌ای با سه لایه میانی، دارای میانگین مربعات خطای (MSE)  $0/01$  و ضریب تعیین  $91/02$  درصد برای داده‌های آزمون به دست آمده است.

### واژگان کلیدی

پارامترهای آرچی، روش متداول، روش رگرسیون سه بعدی، شبکه عصبی، اشباع از آب

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- معمارزاده م.، حسینی س.، کامکار روحانی ا.، کنشلو م.، (۱۳۹۱)، "بررسی و مقایسه نتایج تعیین پارامترهای آرچی در ارزیابی مخازن نفتی"، سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، تهران، ایران
  
- معمارزاده م.، کامکار روحانی ا.، کنشلو م.، حسینی س.، (۱۳۹۱)، "استفاده از روش رگرسیون سه بعدی در تعیین ضرایب آرچی"، دومین همایش ملی انجمن علمی زمین شناسی دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

## فهرست مطالب

ج	تشکر و قدردانی.....
ح	تعهدنامه .....
خ	چکیده .....
ذ	لیست مقالات مستخرج از پایان نامه .....
ر	فهرست مطالب .....
ش	فهرست شکل ها .....
ط	فهرست جداول .....

### فصل اول: کلیات .....

۲	۱-۱- مقدمه .....
۲	۲-۱- تعریف رابطه آرچی .....
۵	۳-۱- روش ها و بیان سؤال های اصلی .....
۷	۴-۱- سابقه و ضرورت انجام این پایان نامه .....
۹	۵-۱- اهداف پایان نامه .....
۹	۶-۱- معرفی میدان و داده های مورد استفاده .....
۱۰	۱-۶-۱- افق مورد مطالعه: مخزن سروک .....
۱۱	۲-۶-۱- داده ها و اطلاعات مورد استفاده .....
۱۲	۷-۱- ساختار پایان نامه .....

### فصل دوم: ضرایب آرچی و روش های تعیین آن .....

۱۴	۱-۲- مقدمه .....
۱۴	۲-۲- فاکتور سیمان شدگی .....
۱۴	۱-۲-۲- مفهوم فاکتور سیمان شدگی .....
۱۸	۲-۲-۲- پارامترهای تأثیرگذار بر فاکتور سیمان شدگی .....
۲۰	۳-۲-۲- محدوده و دامنه توان سیمان شدگی .....
۲۳	۳-۲- توان اشباع .....
۲۳	۱-۳-۲- مفهوم پارامتر توان اشباع .....
۲۴	۲-۳-۲- تعیین پارامتر توان اشباع در آزمایشگاه .....
۲۶	۳-۳-۲- پارامترهای تأثیرگذار بر فاکتور توان اشباع .....
۲۹	۴-۳-۲- محدوده پارامتر توان اشباع .....

۳۱	۴-۲- پارامتر پیچاپیچی .....
۳۱	۴-۲-۱- مفهوم پارامتر پیچاپیچی .....
۳۶	۵-۲- روش‌های تعیین ضرایب آرچی .....
۳۶	۵-۲-۱- مقدمه .....
۳۶	۵-۲-۲- روش عمومی .....
۳۶	۵-۲-۳- روش متداول و رایج .....
۳۸	۵-۲-۴- روش رگرسیون سه بعدی (3-D) .....
۳۹	۵-۲-۵- روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE) .....
۴۲	<b>فصل سوم: استفاده از روش‌های آماری در تعیین پارامترهای آرچی .....</b>
۴۳	۳-۱- مقدمه .....
۴۳	۳-۲- تعیین پارامترهای آرچی به روش متداول .....
۴۳	۳-۲-۱- اندازه‌گیری فاکتور مقاومت ویژه سازندی .....
۴۴	۳-۲-۲- اندازه‌گیری اندیس مقاومت ویژه الکتریکی .....
۴۵	الف- روش متداول؛ چاه A1 .....
۴۹	ب- روش متداول؛ چاه B1 .....
۵۲	ج- روش متداول؛ چاه C1 .....
۵۶	۳-۳- تعیین پارامترهای آرچی به روش رگرسیون سه بعدی .....
۵۷	۳-۳-۱- روش رگرسیون سه بعدی؛ چاه A1 .....
۵۸	۳-۳-۲- روش رگرسیون سه بعدی؛ چاه B1 .....
۵۹	۳-۳-۳- روش رگرسیون سه بعدی، چاه C1 .....
۶۱	۳-۴- بررسی و مقایسه دو روش متداول و رگرسیون سه بعدی .....
۶۴	<b>فصل چهارم: استفاده از شبکه عصبی در تعیین پارامترهای آرچی .....</b>
۶۵	۴-۱- مقدمه .....
۶۶	۴-۲- مبانی شبکه عصبی .....
۶۶	۴-۲-۱- مقدمه .....
۶۷	۴-۲-۲- ساختار شبکه عصبی مصنوعی .....
۶۸	۴-۲-۳- کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین پارامترهای آرچی .....
۶۹	۴-۲-۴- ویژگی‌های شبکه عصبی .....
۷۱	۴-۳- انتخاب داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی .....
۷۲	۴-۳-۱- انتخاب چاه نمودارهای مناسب به منظور ورودی شبکه عصبی .....

۷۴	..... آمادہ سازی دادہما
۷۵	..... ۴-۴ - ساختار شبکہ عصبی
۷۶	..... دستور یا ساختار newff
۷۶	..... دستور یا ساختار newcf
۷۷	..... دستور یا ساختار newfit
۷۷	..... ۴-۵ - بہبود توان تعمیم شبکہ
۷۸	..... ۴-۵-۱ - آموزش بہ روش مرتب سازی
۷۹	..... ۴-۵-۲ - آموزش بہ روش توقف سریع
۸۰	..... ۴-۶ - برنامه نویسی رایانہ ای
۸۱	..... ۴-۷ - ایجاد شبکہ پس انتشار خطا بہ روش مرتب سازی
۸۸	..... ۴-۸ - ایجاد شبکہ پس انتشار خطا بہ روش توقف سریع
۹۷	..... <b>فصل پنجم: نتیجہ گیری و پیشنہادہا</b>
۹۸	..... ۵-۱ - جمع بندی و نتیجہ گیری
۱۰۱	..... ۵-۲ - پیشنہادہا
۱۰۳	..... <b>منابع</b>
۱۰۳	..... منابع فارسی
۱۰۳	..... منابع لاتین

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: نمودار شاخص مقاومت ویژه در برابر اشباع از آب برای محاسبه توان اشباع ..... ۲۵
- شکل ۲-۲: فاکتور سیمان‌شدگی  $m$  که از روی شیب رابطه خطی بین فاکتور سازندی و تخلخل به دست می‌آید. (الف) نمونه ماسه‌سنگ‌های با تراوایی کم مربوط به لوئیزیانا (ب) نمونه ماسه‌سنگ‌های متراکم حاشیه خلیج در آمریکای شمالی ..... ۲۶
- شکل ۳-۲: مسیر جریان واقعی  $L_a$ ، طول نمونه  $L$  و پیچاپیچی  $\frac{L_a}{L}$  ..... ۳۲
- شکل ۱-۳: چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه‌شناسی مربوط به چاه A1 (جنس سنگ کاملاً کربناته و آهکی می‌باشد) ..... ۴۶
- شکل ۲-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت ویژه سازندی در برابر تخلخل برای چاه A1 ..... ۴۷
- شکل ۳-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب برای چاه A1 ..... ۴۸
- شکل ۴-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه A1 به روش متداول ..... ۴۹
- شکل ۵-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت ویژه سازندی در برابر تخلخل برای چاه B1 ..... ۵۰
- شکل ۶-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب برای چاه B1 ..... ۵۰
- شکل ۷-۳: چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه‌شناسی چاه B1 که نشان‌دهنده سنگ کربناته است ..... ۵۱
- شکل ۸-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه B1 به روش متداول ..... ۵۲
- شکل ۹-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت ویژه سازندی در برابر تخلخل برای چاه C1 ..... ۵۳
- شکل ۱۰-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب برای چاه C1 ..... ۵۴
- شکل ۱۱-۳: چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه‌شناسی چاه C1 که نشان‌دهنده سنگ کربناته است ..... ۵۵
- شکل ۱۲-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه C1 به روش متداول ..... ۵۶
- شکل ۱۳-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه A1 به روش رگرسیون سه بعدی ..... ۵۸
- شکل ۱۴-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه B1 به روش رگرسیون سه بعدی ..... ۵۹
- شکل ۱۵-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه C1 به روش رگرسیون سه بعدی ..... ۶۰
- شکل ۱۶-۳: مقایسه نتایج اشباع از آب بدست آمده از دو روش متداول و رگرسیون سه بعدی با مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) در هر نمونه برای چاه الف (A1، ب (B1 و ج (C1 ..... ۶۲

شکل ۴-۱: مدل یک نرون ..... ۶۷

شکل ۴-۲: نمایی از ساختار لایه‌ای شبکه‌های عصبی مصنوعی ..... ۶۸

شکل ۴-۳: نمودار ماتریسی ضرایب همبستگی چاه‌نمودارها و فاکتور سیمان‌شدگی ..... ۷۳

شکل ۴-۴: نمایش شماتیکی از یک شبکه پیش‌خور پس‌انتشار ساده، دستور newff و newfit ..... ۷۶

شکل ۴-۵: نمایش شماتیکی از یک شبکه پیش‌خور پس‌انتشار خطا آبخاری، دستور newcfc ..... ۷۷

شکل ۴-۶: نمودار همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newff با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون ۷-۲-۶ برای لایه‌ها ..... ۸۳

شکل ۴-۷: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newff با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون‌های ۷-۲-۶ برای لایه‌ها ..... ۸۳

شکل ۴-۸: نمودار همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newcfc با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون‌های ۱۰-۳-۸ برای لایه‌ها ..... ۸۵

شکل ۴-۹: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newcfc با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون‌های ۱۰-۳-۸ برای لایه‌ها ..... ۸۵

شکل ۴-۱۰: نمودار همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد نرون‌های ۶ و ۱۵ برای لایه‌ها اول و دوم ..... ۸۷

شکل ۴-۱۱: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد نرون‌های ۶ و ۱۵ برای لایه‌ها اول و دوم ..... ۸۷

شکل ۴-۱۲: نمودار همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newff با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۹ نرون برای هر یک از لایه‌ها ..... ۹۰

شکل ۴-۱۳: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newff با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۹ نرون برای هر یک از لایه‌ها ..... ۹۰

شکل ۴-۱۴: نمودار همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newcfc با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون‌های ۲-۸-۵ برای لایه‌ها ..... ۹۲

شکل ۴-۱۵: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newcfc با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون‌های ۲-۸-۵ برای لایه‌ها ..... ۹۲

شکل ۴-۱۶: نمودار همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۴ و ۱۲ نرون در لایه‌های اول و دوم ..... ۹۴

شکل ۴-۱۷: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان‌شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۴ و ۱۲ نرون در لایه‌های اول و دوم..... ۹۴



## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: وضعیت چاه‌نمودارهای موجود در چاه‌های مورد مطالعه ..... ۱۱
- جدول ۲-۱: اطلاعات پتروفیزیکی موجود در چاه‌های مورد مطالعه ..... ۱۲
- جدول ۲-۲: محدوده و دامنه برای فاکتور سیمان‌شدگی یا توان تخلخل (m) ..... ۲۲
- جدول ۲-۲: محدوده و دامنه برای فاکتور توان اشباع (n) ..... ۳۰
- جدول ۱-۳: پارامترهای آرچی محاسبه شده به کمک روش متداول ..... ۵۶
- جدول ۲-۳: پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش رگرسیون سه بعدی برای چاه A1 ..... ۵۷
- جدول ۳-۳: پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش رگرسیون سه بعدی برای چاه B1 ..... ۵۸
- جدول ۴-۳: پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش رگرسیون سه بعدی برای چاه C1 ..... ۵۹
- جدول ۱-۴: بررسی معنی‌داری نمودارهای متقاطع فاکتور سیمان‌شدگی و چاه نمودارهای پتروفیزیکی ..... ۷۴
- جدول ۲-۴: نتایج مربوط به شبکه پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newff ..... ۸۲
- جدول ۳-۴: نتایج مربوط به شبکه پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newcf ..... ۸۴
- جدول ۴-۴: نتایج مربوط به شبکه پس‌انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newfit ..... ۸۶
- جدول ۵-۴: نتایج مربوط به شبکه پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newff ..... ۸۹
- جدول ۶-۴: نتایج مربوط به شبکه پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newcf ..... ۹۱
- جدول ۷-۴: نتایج مربوط به شبکه پس‌انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newfit ..... ۹۳

فصل اول

کلیات

در این فصل ابتدا به تعریف و بیان مسئله پرداخته شده و تاریخچه و منشأ موضوع تعیین پارامترها یا ضرایب آرچی، مورد بررسی قرار گرفته است. در گام بعدی ضرورت و جایگاه این مطالعه ارزیابی می‌شود چرا که لازم است اهمیت موضوع مورد بررسی مشخص شود. سپس اهداف این پایان-نامه با یک دید کلی و اجمالی ارائه و روش کار یا شیوه انجام پایان‌نامه توضیح داده می‌شود. در ادامه جزئیاتی هرچند مختصر در مورد میدان مورد مطالعه، اطلاعات و داده‌های در دسترس ارائه می‌گردد. در نهایت ساختار کلی پایان‌نامه معرفی شده تا در انتهای فصل دیدی کلی نسبت به فصل‌بندی و قسمت‌های مختلف پایان‌نامه ایجاد شود.

## ۱-۲- تعریف رابطه آرچی

در سال ۱۹۴۲ آرچی مقاله‌ای تحت عنوان «نگار الکتریکی، ابزاری برای تعیین بعضی از خواص مخزنی» منتشر کرد. مقاله‌ای که شاید بتوان آن را مهم‌ترین مقاله پتروفیزیکی تا به حال نامید. تا پیش از انتشار این مقاله تعیین مقدار ذخیره بسیار مشکل و گران تمام می‌شد. تنها راه مطمئن برای این کار مغزه‌گیری با استفاده از گل نفت‌پایه و محاسبه اشباع‌شدگی در آزمایشگاه بود. نگارهای الکتریکی به صورت کیفی برای تعیین زون‌های حاوی هیدروکربن به کار برده می‌شدند، و کاربرد کمی نداشت. با انتشار رابطه آرچی که خواص الکتریکی سنگ و تخلخل را مرتبط می‌کرد، امکان استفاده‌ی کمی از نگارها میسر شد [Archie, 1942].

البته در آن زمان کانی‌های رسانا و رس‌ها مد نظر آرچی نبودند. وی کار خود را فقط بر روی نمونه‌های بسیار زیادی مغزه از سازند تمیز در گلف کست<sup>۱</sup> متمرکز کرد. او تخلخل، تراوایی و مقاومت ویژه‌ی نمونه‌ها را با شوری‌های مختلف که از ۲۰ ppm تا ۱۰۰۰۰ ppm اشباع شده بودند، اندازه‌گیری کرد. آرچی بیان کرد که مقاومت ویژه هر نمونه اشباع از آب شور ( $R_0$ ) به صورت خطی با افزایش

---

<sup>۱</sup> Gulf Coast

مقاومت ویژه آب شور ( $R_w$ ) افزایش پیدا می‌کند. او این نسبت ثابت را، فاکتور مقاومت ویژه سازندی<sup>۱</sup> ( $F$ ) نامید.

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (1-1)$$

البته این نسبت ۱۰ سال قبل از آرچی توسط ساندربرگ<sup>۲</sup> (۱۹۳۲) بیان شده بود، ولی وی به علت عدم وجود داده، نتوانست آن را ثابت کند. سپس آرچی فاکتور مقاومت سازندی را در مقابل تخلخل ( $\phi$ ) بر روی نمودار لگاریتمی رسم کرد و رابطه خطی دیگری را به دست آورد، این رابطه به صورت ریاضی چنین بیان می‌شود [Archie, 1942].

$$F = \frac{1}{\phi^m} \quad (2-1)$$

توان  $m$  که ضریب سیمان‌شدگی نامیده می‌شود شیب منفی خط را نشان می‌دهد. رابطه (۲-۱) را می‌توان به صورت صحیح‌تر و کلی‌تر  $F = \frac{a}{\phi^m}$  نشان داد که در آن  $a$  فاکتور یا ضریب پیچاپیچی سازند نام دارد. در ادامه نمونه‌هایی که حاوی هیدروکربن بودند، آزمایش شدند. بر این اساس فاکتور دیگری توسط آرچی معرفی گردید که بعدها آن را اندیس یا شاخص مقاومت ویژه ( $I_R$ ) نامید.

$$I_R = \frac{R_t}{R_o} \quad (3-1)$$

که در این رابطه  $R_t$  مقاومت ویژه سازند می‌باشد.

به علت مشکلات فراوان در اندازه‌گیری مقاومت ویژه در نمونه‌های حاوی هیدروکربن، آرچی از نمونه‌های محققان قبلی استفاده کرد و با رسم اشباع‌شدگی از آب ( $S_w$ ) و اندیس مقاومت ویژه در نمودار لگاریتمی رابطه (۴-۱) را به دست آورد.

$$I_R = \frac{1}{S_w^n} \quad (4-1)$$

<sup>1</sup> Formation resistivity factor

<sup>2</sup> Sundberg

در این رابطه  $n$  توان اشباع‌شدگی است و آرچی آن را برابر ثابت ۲ فرض کرد. با تلفیق روابط (۱-۱) تا (۴-۱)، آرچی فرمول معروف خود را به صورت رابطه (۵-۱) بیان کرد که شکل دیگر و متداول‌تر آن با رابطه (۶-۱) آورده شده است.

$$R_t = \frac{aR_w}{\phi^m S_w^n} \quad (۵-۱)$$

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{aR_w}{\phi^m R_t}} \quad (۶-۱)$$

آرچی مقدار  $m$  را برای سنگ‌های سخت شده ۲ و برای سنگ‌های سست برابر  $۱/۳$  بیان کرد. از این‌رو به نظر می‌آید که مقدار  $m$  با افزایش سنگ‌شدگی و سیمان‌شدگی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین  $m$  را توان سیمان‌شدگی نامید [Archie, 1942].

به خاطر نقش محوری قانون آرچی، این قانون به طور دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. پتروفیزیست‌ها و مفسران چاه نمودارهای پتروفیزیکی به خاطر سادگی فرمول، به فکر تعبیر فیزیکی ضرایب آرچی افتادند. آرچی مقدار این ضرایب ( $n$  و  $m$ ) را برابر ۲ در نظر گرفت. در حال حاضر بیشتر عوامل کنترل‌کننده این ضرایب شناخته شده است. ضریب  $m$ ، مقاومت ویژه سنگ را زمانی که سنگ کاملاً اشباع از آب است، تعیین می‌کند ولی  $n$  میزان مقاومت ویژه را زمانی که هم آب و هم هیدروکربن وجود داشته باشند، تعیین می‌کند. رسانایی در یک سنگ ناشی از انتقال یون‌هاست، زمانی که مسیر حرکت سیال حاوی یون پیچاپیچ باشد، در کار انتقال مشکل پیش آمده و مقاومت ویژه افزایش پیدا می‌کند. در صورت وجود هیدروکربن که جای قسمتی از آب سازندی را اشغال می‌کند باعث کاهش میزان کاتیون‌ها و در نتیجه افزایش مقاومت ویژه می‌شود.

### ۱-۳- روش‌ها و بیان سؤال‌های اصلی

تعیین پارامترهای پتروفیزیکی در مطالعات جامع مخزن و تخمین میزان ذخیره از اهمیت خاصی برخوردار است. به طور معمول برای تعیین این پارامترها دو راه وجود دارد: روش اول اندازه‌گیری مستقیم بر روی مغزه‌ها با انجام آزمایش‌ها است که روشی دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر است. علاوه بر این امکان مغزه‌گیری در برخی چاه‌ها وجود ندارد، یا اینکه در برخی از قسمت‌های یک چاه بازیابی مغزه کامل نیست. روش دوم، روشی غیرمستقیم است که از چاه نمودارهای مختلف استفاده می‌کند. در این روش میزان تخلخل، تراوایی و سایر پارامترهای پتروفیزیکی تخمین زده شده و در نهایت ذخیره سنگ مخزن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای تخمین از روابط تجربی خاص و ایجاد ارتباط بین متغیرهای مختلفی که توسط این نگارها اندازه‌گیری می‌شود، استفاده می‌گردد. این نتیجه متأثر از عوامل مختلفی مانند ضخامت لایه‌ها، زون تهاجم، قطر چاه و... می‌باشد.

فاکتور پیچاپیچی (a)، سیمان‌شدگی (m) و توان اشباع (n) سه پارامتر اصلی هستند که تأثیر زیادی در برآورد و تخمین خصوصیات مخزن و پیش‌بینی اشباع از آب و هیدروکربور در سنگ مخزن دارند. همچنین این پارامترها به منظور محاسبه فاکتور سازندی (F) به کمک رابطه آرچی مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحت عنوان ضرایب آرچی شناخته می‌شوند.

روش‌های زیادی برای محاسبه ضرایب یا پارامترهای آرچی و میزان اشباع‌شدگی از آب یا هیدروکربور در سنگ مخزن وجود دارد که بعضی از این روش‌ها در زیر ذکر شده است:

الف) روش اندازه‌گیری آزمایشگاهی که در آن با انجام آنالیزها بر روی نمونه مغزه‌های به دست آمده، مقادیر پارامترها اندازه‌گیری می‌شود که بسیار پرهزینه و زمان‌بر است.

ب) روش دیگر تخمین پارامترهای آرچی از طریق مغزه‌ها<sup>۱</sup> می‌باشد که با اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های مغزه، پارامترهای  $a$ ،  $m$  و  $n$  به دست می‌آید. در این روش اساس کار بر پایه‌ی کم‌ترین خطای بین اشباع از آب محاسبه شده و اندازه‌گیری شده است.

ج) یکی از روش‌های کاربردی و متداول در محاسبه پارامترهای آرچی استفاده از روش‌های آماری که با رسم منحنی‌های همبستگی پارامترهای مختلف مقادیر این پارامترها محاسبه می‌شود. در این روش فاکتور توان اشباع ( $n$ ) با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی شاخص مقاومت ویژه ( $R_t/R_o$ ) در برابر اشباع از آب ( $S_w$ )، که در آن خطی با شیب منفی  $n$  به دست می‌آید محاسبه می‌شود. با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازندی ( $F$ ) در برابر تخلخل ( $\phi$ )، فاکتور سیمان‌شدگی  $m$  نیز از منفی شیب خط در این نمودار به دست می‌آید.

هم‌اکنون و همکارانش در سال ۲۰۰۲ برای تعیین پارامترهای آرچی، روش رگرسیون سه بعدی<sup>۳</sup> به وسیله اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی بر روی نمونه‌های مغزه را پیشنهاد دادند. پایه و اساس این روش در نظر گرفتن  $S_w$  به عنوان یک متغیر در نمودار رگرسیون سه بعدی  $S_w$ ،  $R_t/R_o$  و  $\phi$  می‌باشد. در این روش پارامترهای آرچی  $m$ ،  $n$  و  $a$  از حل هم‌زمان سه رابطه به دست می‌آید. سؤال اصلی در تخمین پارامترهای آرچی با استفاده از روش‌های آماری، این است که این روش‌ها با چه دقتی می‌توانند این ضرایب را برآورد نمایند.

امروزه با پیشرفت تکنولوژی و رایانه‌ها استفاده از روش‌های هوشمند به ویژه شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین پارامترهای مخزن مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها به طور روزافزون در محاسبات و مطالعات مربوط به مهندسی نفت بهره گرفته می‌شود. به همین دلیل، در این تحقیق، از روش شبکه‌های عصبی در تخمین ضرایب آرچی استفاده خواهد شد. در طراحی شبکه عصبی، سه سؤال عمده وجود دارد: الف) چه تعداد داده برای مسئله مورد بررسی نیاز است؟ ب) چه تعداد نرون

<sup>1</sup> Core Archie Parameter Estimation (CAPE)

<sup>2</sup> Hamada

<sup>3</sup> 3-D Regressions

برای هر لایه باید در نظر گرفت؟ ج) چگونه شبکه‌ای با بهترین قابلیت تعمیم طراحی شود؟ د) تعداد

داده‌های آموزش مورد نیاز برای تعمیم شبکه چه مقدار است؟ [Rao, 2000]

با توجه به کاربرد و نیاز ما، از شبکه عصبی که می‌تواند فرآیندهای پیش‌بینی سری‌های زمانی<sup>۱</sup>، دسته‌بندی<sup>۲</sup>، تخمین<sup>۳</sup> و یا برازش<sup>۴</sup> باشد، ساختار مناسب انتخاب می‌شود. به طور کلی می‌توان گفت که هر چه داده‌های آموزش بیشتر، و نرون و لایه‌های میانی کمتر باشند، بهتر است. اگر تعداد داده آموزش خیلی کم و یا تعداد نرون میانی خیلی زیاد باشد باعث می‌شود که شبکه، داده‌های آموزش را به خاطر بسپارد. در نتیجه، در مرحله آموزش، ممکن است عملکرد خوبی داشته باشد و خطا به مقدار بسیار کوچکی برسد. اما وقتی که با داده‌هایی به غیر از داده‌های آموزش<sup>۵</sup>، آزموده می‌شود، امکان دارد عملکرد ضعیفی داشته باشد و خطای پاسخ زیاد باشد. به بیان دیگر، شبکه دچار بیش‌برازش<sup>۶</sup> شده و توانایی تعمیم کمی دارد. تعداد نرون‌های میانی باید کافی باشد تا شبکه، مسئله را به خوبی بیاموزد ولی نرون و لایه میانی بیشتر از حد لزوم، احتمال بیش‌برازش و کاهش توان تعمیم را افزایش می‌دهد. ساختار بهینه با استفاده از رهیافت سعی و خطا<sup>۷</sup> از میان تعدادی شبکه آموزش دیده انتخاب می‌شود. این روش، روشی وقت‌گیر است و تضمین نمی‌کند که حاصل کار، بهترین نتیجه باشد [Rao, 2000].

#### ۱-۴- سابقه و ضرورت انجام این پایان‌نامه

همان‌طور که گفته شد رابطه آرچی ( $F = \phi^{-m}$ ) در سال ۱۹۴۲ طی مقاله‌ای توسط آرچی [Archie, 1942] ارائه شد. در ادامه وینسور و همکاران به همبستگی فاکتور سازندی با پیچاپیچی و تخلخل اشاره کردند و رابطه آرچی را به صورت  $F = a\phi^{-m}$  اصلاح<sup>۸</sup> کردند [Winsauer et al.,

<sup>1</sup> Time series prediction

<sup>2</sup> Clustering

<sup>3</sup> Estimation

<sup>4</sup> Fitting

<sup>5</sup> Unseen data

<sup>6</sup> Over fitting

<sup>7</sup> Trial and error

<sup>8</sup> Modify Archie Equation



1952]. در سال ۱۹۵۳ وایلی با آزمایش بر روی لایه‌های ماسه سنگی رابطه‌ای بین تخلخل و فاکتور سازندی پیشنهاد می‌کند [Wyllie and Gregory, 1953] که البته فک توضیح می‌دهد این رابطه با در نظر گرفتن یک سیستم ایده‌آل است و برای یک سیستم کامل مانند سنگ‌های کربناته قابل اطمینان نیست [Focke and Munn, 1987]. وبل به بررسی تأثیر فشار روی خصوصیات ماسه سنگ پرداخت و نشان داد توان سیمان‌شدگی (m) با افزایش فشار افزایش می‌یابد [Weble, 1958]. اما تاویل با بیان وابستگی فاکتور سیمان‌شدگی برای یک سیستم متخلخل به میزان حفره‌دار<sup>۱</sup> بودن و پیچاپیچی نشان داد که هیچ‌یک از حالات به طور رضایت‌بخش رابطه فاکتور سازندی را با تخلخل در طبیعت بیان نمی‌کند [Towel, 1962]. بعد از آن آتکینز و اسمیت متذکر شدند که فاکتور سیمان‌شدگی به شدت به شکل دانه‌بندی و فشار طبقات فوقانی<sup>۲</sup> بستگی دارد [Atkins & Smith, 1961]. هیگلد و همکاران برای مواد متخلخل سخت نشده و آرایش دانه‌بندی با جورشدگی ضعیف توان m را برابر ۱/۳ معرفی کردند. در سال ۱۹۹۳ همدا با اندازه‌گیری فاکتور سیمان‌شدگی بر روی نمونه‌های سنگ کربناته توضیح داد که محدوده m در این نمونه‌ها بین ۱/۴۱ تا ۲/۷۹ و به طور متوسط ۲/۰۳ می‌باشد. وی همچنین اشاره کرد که فاکتور سیمان‌شدگی نسبت به فشار فوقانی حساس است و با افزایش این فشار فاکتور سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد [Hamada and El-Farsi, 1994].

در ایران هم می‌توان به مطالعات ارزشمند کاظم‌زاده و همکارانش در تعیین ضرایب آرچی با استفاده از نگارهای انحراف سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های کربناته اشاره کرد [کاظم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵] که نشان داد با افزایش مقادیر انحراف سرعت، مقدار ضریب سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد. در مطالعه دیگری تأثیر تراکم‌پذیری را در سنگ‌های کربناته روی پارامتر سیمان‌شدگی بررسی کرد و مشاهده کرد که با افزایش فشار مؤثر، تراکم‌پذیری کاهش و سیمان‌شدگی افزایش می‌یابد [کاظم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸].

---

<sup>1</sup> Vugginess

<sup>2</sup> Overburden

بیشتر مطالعات و تحقیقاتی که در زمینه ضرایب آرچی صورت گرفته، بر تأثیر پارامترهای مختلف مانند بافت و ساختار سنگ، فشار طبقات فوقانی، حضور کانی‌های رسی و... تمرکز یافته‌اند. با در نظر گرفتن این موضوع و با توجه به گسترش روز افزون روش‌های هوشمند و در این مساله شبکه‌های عصبی، لازم است کاربرد و توانایی این روش نوین را در تعیین ضرایب آرچی مورد ارزیابی قرار داد و نتایج حاصل از این روش، با نتایج آزمایشگاهی موجود و روش‌های متداول دیگر مقایسه شود.

#### ۱-۵- اهداف پایان‌نامه

هدف اصلی این پایان‌نامه محاسبه ضرایب آرچی است، که به کمک روش‌های آماری متداول و رسم نمودارهای رایج و همچنین از روش رگرسیون سه بعدی انجام می‌شود. سپس با بررسی آماری داده‌ها و نوع رفتار آن‌ها، شبکه‌های عصبی مصنوعی برای ایجاد یک برازش مناسب بین داده‌های ورودی و خروجی انتخاب می‌گردد. در مرحله بعد با انتخاب ورودی‌های مناسب بهترین ساختارهای شبکه عصبی به روش سعی و خطا انتخاب و نتایج حاصل از شبکه و رفتار آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در نهایت هدف از این پایان‌نامه، تحقیق درباره قابلیت‌های روش‌های آماری و شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین یا تخمین ضرایب یا پارامترهای آرچی می‌باشد. سپس نتایج حاصل از این روش‌ها با نتایج به دست آمده از مغزه‌ها و سایر روش‌های موجود مقایسه خواهد شد.

#### ۱-۶- معرفی میدان و داده‌های مورد استفاده

داده‌ها و اطلاعات مورد مطالعه، از شرکت ملی منابع نفت خیز جنوب ایران تأمین شده است. بدیهی است به علت محرمانه بودن اطلاعات نفتی، محل دقیق میدان مشخص نمی‌باشد. برای سهولت،

نام میدان در این پایان نامه  $F^1$  گذاشته شده است. در ادامه اطلاعات و مشخصاتی هر چند مختصر در رابطه با این میدان ارائه می‌شود.

#### ۱-۶-۱- افق مورد مطالعه: مخزن سروک

میدان  $F$ ، یکی از میادین خشکی ایران و شامل مخازن متعددی است. در این مجال مخزن سروک از گروه بنگستان مورد مطالعه قرار گرفته است. سروک یک سازند کربناته است و مقطع نمونه<sup>۲</sup> (مقطع تیپیک) آن در تنگ سروک در کوه بنگستان واقع در استان خوزستان با ضخامت ۸۳۲ متر قرار گرفته است و در بسیاری از میادین زاگرس به عنوان سنگ مخزن مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. سازند کمر پایین سازند سروک معمولاً سازند عمیق کژدمی است و در بالا، سروک با یک دگرشیبی از سازند کمر بالای خود (که معمولاً سازند ایلام است) جدا می‌شود [Motiei, 2009].

این دگرشیبی بالای سروک به علت بیرون از آب بودن سروک ایجاد شده است (پس‌روی آب دریا پس از نهشته شدن تخت‌گاه آهکی ایران). یکی از تأثیرات این بیرون بودن از آب، ایجاد تخلخل حفره‌ای و کارستی در بخش‌های فوقانی سروک است. از شواهد این بیرون‌زدگی، مشاهده‌ی کانی‌سازی بوکسیتی در برخی مکان‌ها در مرز ایلام و سروک است [Zarasvandi et al., 2008].

سازند سروک از نقطه نظر سنگ‌شناسی، به گروه سنگ‌های پک‌استون<sup>۳</sup> - وکستون<sup>۴</sup> تعلق دارد. یک مطالعه چینه‌شناسی زیستی تفصیلی نشان داده است که این سازند در محیط کم‌عمق فلات قاره-ای کربناته راسب شده است و حتی بخش‌های جوان‌تر در عمق کم‌تری نسبت به بخش‌های قدیمی‌تر نهشته شده‌اند [Ghabeishavi et al., 2010].

---

<sup>1</sup> Field

<sup>2</sup> Type section

<sup>3</sup> Pack stone

<sup>4</sup> Wack stone

## ۱-۶-۲- داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

همان‌طور که قبلاً اشاره شد تمام داده‌ها و اطلاعات استفاده شده در این پایان‌نامه از شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب ایران تهیه گردیده است. این داده‌ها شامل چاه نمودارهای پتروفیزیکی قطر چاه (CALI)، گامای تصحیح‌شده (CGR)، گامای کل (SGR)، وزن مخصوص توده (RHOB)، زمان گذر (DT)، القایی عمیق (ILD)، تخلخل نوترونی (NPHI) و اثر فوتوالکتریک (PEF) برای سه چاه A1، B1 و C1 روی میدان F است. همچنین اطلاعات مربوط به تخلخل اولیه و ثانویه، اشباع از آب، مقاومت ویژه کل و درصد دولومیت، آهک، ماسه‌سنگ، انیدریت و شیل هم برای این سه چاه موجود می‌باشد که به کمک نرم‌افزار پترس<sup>۱</sup> به دو روش محاسبه قطعی<sup>۲</sup> و احتمالاتی<sup>۳</sup> محاسبه شده بود. اما مقدار توریم (THOR)، اورانیوم (URAN) و پتاسیم (POTA) حاصل از عملیات چاه‌نگاری فقط برای چاه B1 موجود می‌باشد. علاوه بر این نتایج آزمایشگاهی مربوط به آنالیز مغزه در بخشی از این چاه‌ها وجود دارد که شامل تخلخل، فاکتور مقاومت ویژه سازندی، ضریب سیمان‌شدگی، اشباع از آب و اندیس مقاومت ویژه الکتریکی است. خلاصه اطلاعات و داده‌های مهم استفاده شده در این پایان‌نامه در جداول ۱-۱ و ۲-۱ آمده است.

جدول ۱-۱: وضعیت چاه‌نمودارهای موجود در چاه‌های مورد مطالعه

چاه	چاه نمودارها پتروفیزیکی										
	POTA	URAN	THOR	PEF	NPHI	ILD	DT	RHOB	SGR	CGR	CLII
A1	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
C1	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ داده‌های موجود

\* داده‌هایی که در دسترس نبوده است.

<sup>1</sup> Petros

<sup>2</sup> Deterministic

<sup>3</sup> Probabilistic

جدول ۱-۲: اطلاعات پتروفیزیکی موجود در چاه‌های مورد مطالعه

داده‌های موجود از مدل‌سازی و محاسبه در نرم‌افزار پتروس								چاه
حجم شیل	حجم انیدریت	حجم ماسه‌سنگ	حجم آهک	حجم دولومیت	$S_w$	$\phi_2$	$\phi_1$	
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	A1
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	B1
✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	C1

### ۱-۷- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل می‌باشد که در فصل اول کلیاتی در رابطه با هدف انجام پایان‌نامه و همچنین به بررسی مختصری از سابقه و ضرورت آن پرداخته شد. علاوه بر این اطلاعات مختصری در مورد میدان مورد مطالعه و داده‌های موجود ارائه شده است. در فصل دوم مفاهیم هر یک از پارامترهای آرچی بیان شده و به طور مختصر تحقیقات و مطالعاتی که در زمینه پارامترها و رابطه‌ی آرچی صورت گرفته مرور شده است. در پایان تعدادی از رایج‌ترین روش‌ها در تعیین پارامترهای آرچی آورده شده است. در فصل سه بر اساس دو روش آماری متداول و رگرسیون سه بعدی، پارامترهای آرچی مربوط به سه چاه موجود در میدان F محاسبه و نتایج آن‌ها با هم مقایسه شده است. در فصل چهارم سعی شده با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، پارامترهای آرچی تعیین گردد. در ابتدا در این فصل اشاره مختصری به شبکه‌های عصبی شده و به علت وجود منابع بسیار و جلوگیری از تکرار مطالب، جزئیات و تئوری شبکه عصبی فقط در حد مختصر آورده شده است و تنها نتایج حاصل از کاربرد شبکه عصبی در تعیین پارامترهای آرچی از روی داده‌های این پایان‌نامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در پایان، در فصل پنجم با جمع‌بندی فصل‌ها به نتیجه‌گیری پرداخته شده و پیشنهادها و مواردی که نیاز به تحقیق بیشتر دارد، نیز ارائه شده است.

فصل دوم

ضرایب آرچی و روش‌های تعیین آن

در این فصل به بررسی هریک از پارامترهای آرچی پرداخته شده و مفاهیم تئوری و فیزیکی این پارامترها بیان شده است. با مرور مطالعات قبلی، عوامل تاثیرگذار بر روی پارامترهای آرچی مشخص شده و محدوده‌ی تغییرات این پارامترها در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه به کمک مطالعه و بررسی کارهای گذشته، به روش‌های آماری تعیین ضرایب آرچی اشاره شده و مزایا و معایب هریک از این روش‌ها آورده شده است. در واقع این فصل ترکیبی از مرور ادبیات گذشته در زمینه پارامترهای آرچی و روش‌های محاسبه آن و روش‌شناسی<sup>۱</sup> تعیین هریک از پارامترهای آرچی می‌باشد.

## ۲-۲- فاکتور سیمان‌شدگی

### ۲-۲-۱- مفهوم فاکتور سیمان‌شدگی

برای اولین بار مفهوم فاکتور یا ضریب سیمان‌شدگی را آرچی بیان کرد [Archie, 1942]، در واقع او عبارت فاکتور سیمان‌شدگی را به کار نبرد ولی متوجه شد که این فاکتور یا توان به توصیف رابطه تجربی بین تخلخل ( $\phi$ ) و فاکتور سازندی (F) کمک می‌کند. همچنین این رابطه کاربرد بسیار خوبی در مطالعات کمی لاگ‌های الکتریکی دارد. در ابتدا او رابطه بین مقاومت ویژه ( $R_0$ ) ماسه سنگی با اشباع کامل ( $S_w = 1$ ) از آب شور و مقاومت ویژه آب شور ( $R_w$ ) برای تعداد زیادی نمونه مغزه اشباع از آب شور به صورت رابطه (۱-۱) بیان کرد. سپس متوجه شد که فاکتور سازندی تابعی از نوع سازند با تخلخل متفاوت است. این رابطه اساسی (رابطه (۲-۱)) مبنایی برای دسته‌بندی سازندهای ماسه‌ای شد [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹].

همان‌طور که بیان شد مقدار فاکتور سیمان‌شدگی m در ماسه سنگ‌های سست و تمیز (بدون شیل) توسط آرچی به کمک مطالعات آزمایشگاهی برابر  $1/3$  و برای ماسه سنگ‌های متراکم و

<sup>1</sup> Methodology

یکپارچه در دامنه ۱/۸ تا ۲ است. گایود در سال ۱۹۴۸ توان  $m$  را فاکتور سیمان‌شدگی معرفی کرد [Guyod, 1948] زیرا او متوجه شد که فاکتور سازندی در یک تخلخل معین با افزایش سیمان‌شدگی، افزایش می‌یابد. اما آرچی نیز این توان را با توجه به این که مقدار آن به میزان استحکام و تراکم ماسه‌سنگ بستگی داشت، توان سیمان‌شدگی نامید.

تنها راه مطمئن برای اندازه‌گیری فاکتور سیمان‌شدگی  $m$ ، از طریق اندازه‌گیری آزمایشگاهی است. برای اندازه‌گیری  $m$  ابتدا فاکتور سازندی ( $F$ ) تعیین می‌شود. برای تعیین  $F$ ، نمونه با محلول-هایی با شوری‌های مختلف اشباع می‌شود و هر بار مقدار  $R_w$  و  $R_o$  اندازه‌گیری می‌شود. همان‌طور که در رابطه (۱-۱) دیده می‌شود با رسم  $R_w$  در مقابل  $R_o$ ، خطی به دست می‌آید که شیب آن نشانگر فاکتور سازندی ( $F$ ) است.

مقدار  $m$  به کمک مطالعات آزمایشگاهی از طریق تهیه نمونه‌های مغزه در طول سازند با تخلخل‌های متفاوت که کاملاً از آب اشباع شده و متعاقباً مقاومت ویژه آن اندازه‌گیری شده است، به دست می‌آید. با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازندی در برابر تخلخل ( $\log F - \log \phi$ ) مقدار  $m$  از شیب خط حاصل به دست می‌آید [Joseph et al., 1999].

در نتیجه با توجه به رابطه (۱-۲) داریم

$$\log F = \log a - m \log \phi \quad (1-2)$$

در صورتی که مقدار  $m$  به دست آمده در آزمایشگاه موجود نباشد، می‌توان با استفاده از روابط تجربی ارائه شده در شرایط مختلف مقدار آن را برآورده کرد. تعدادی از این روابط تجربی در زیر آورده شده است.

۱- رابطه شل برای کربنات‌های با تخلخل کم [Shlumberger, 1989]:

$$m = 0.019\phi^{-1} + 1.87 \quad (2-2)$$

۲- رابطه بورای برای کربنات‌های با تخلخل کم [Borai, 1987]



$$m = 2.02 - \frac{0.035}{\phi + 0.042} \quad (3-2)$$

۳- راگلدن روابط زیر را برای سنگ‌های کربناته با تخلخل بین ذره‌ای ( $\phi_{int}$ ) و تخلخل قالبی<sup>۱</sup>

ارائه کرد [Ragland, 2002]. ( $\phi_{moldic}$ )

$$m = 2.29 - 0.44\phi_{int} \quad (4-2)$$

$$m = e^{\phi_{moldic}} + 0.7 \quad (5-2)$$

۴- راسموس رابطه زیر را برای سنگ‌های کربناته شکسته معرفی کرد [Rasmus, 1983].

$$m = \frac{\log[\phi_s^3 + \phi_s^2(1 - \phi_t) + (\phi_t - \phi_s)]}{\log(\phi_t)} \quad (6-2)$$

۵- رابطه دیگری که m را با سه پارامتر دیگر که از چاه نمودار قابل محاسبه‌اند مرتبط می‌-

سازد به صورت زیر است [Rasmus, 1983].

$$m^2 = 3.75 - \phi + \frac{[\log(R_w/R_{tir}) + 2.2]^2}{2} \quad (7-2)$$

در این رابطه  $R_w$  مقاومت ویژه آب سازندی و  $R_{tir}$  مقاومت ویژه سازند در منطقه اشباع از آب

غیرقابل کاهش<sup>۲</sup> است.

۶- رابطه ناگنت برای کربنات‌های با تخلخل حفره‌ای [Nugent et al., 1978]

$$m = \frac{(2\log\phi_s)}{(\log\phi_t)} \quad (8-2)$$

در این رابطه  $\phi_s$  تخلخل صوتی و  $\phi_t$  تخلخل کل است.

۷- رابطه پیکت<sup>۳</sup> (۱۹۶۶) بین  $R_w$  و m به صورت زیر است [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹]:

$$m = 2.54 - 2.62R_w \quad (9-2)$$

<sup>۱</sup> تخلخل قالبی یا مولدیک (moldic) نوعی تخلخل ناشی از انحلال در سنگ‌های کربناته است که به صورت قالبی و دایره‌ای شکل دیده می‌شود.

<sup>۲</sup> Irreducible water saturation

<sup>۳</sup> Pickett

متغیر بودن این فرمول‌ها به این دلیل است که همگی می‌خواهند فاکتور پیچیده‌ای مانند  $m$  را با یک یا چند پارامتر و در بیشتر موارد تنها با تخلخل توصیف کنند. این فرمول‌ها کارایی خود را در مورد کربنات‌ها از دست می‌دهند. به عنوان مثال سنگ‌های کربناته با تخلخل حفره‌ای مقادیری از  $m$  را نشان می‌دهند که کاملاً با سنگ‌های دیگر با همان مقدار تخلخل تفاوت دارد. لوسیا<sup>۱</sup> در تقسیم‌بندی سنگ‌ها بر اساس تخلخل، سنگ‌های کربناته را بر اساس مقدار تخلخل حفره‌ای و اینکه آیا تخلخل‌های حفره‌ای به هم مرتبطند یا نه، تقسیم‌بندی کرد. وی با اندازه‌گیری بر روی مغزه، روی طیف وسیعی از مخازن کربناته، تأثیر تخلخل حفره‌ای ایزوله بر روی  $m$  را مشاهده کرد. روند مشاهده، نشان‌گر افزایش  $m$  با افزایش نسبت تخلخل حفره‌ای ایزوله به تخلخل کل بود. مزیت فرمول لوسیا (رابطه ۲-۱۰) این است که می‌توان تمام پارامترها را از چاه نمودارها به دست آورد [Lucia, 1983]:

$$m = 2.14\left(\frac{\phi_{sv}}{\phi_t}\right) + 1.76 \quad (2-10)$$

در این رابطه  $\phi_{sv}$  تخلخل ثانویه و  $\phi_t$  تخلخل کل است.

مفسران چاه نمودارها بعدها متوجه مدلی بهتر از مدل لوسیا شدند و آن نگار<sup>۲</sup> EPT است. نگار EPT زمان سیر موج الکترومغناطیس با فرکانس بالا (گیگاهرتز) در طول مسافتی ثابت را اندازه‌گیری می‌کند. یکی از معادلات مرسوم در تفسیر نگار EPT استفاده از معادله زمان میانگین است:

$$t_{pl} = t_{pma}(1 - \phi) + \phi[t_{ph}(1 - S_{xo}) + t_{pw}S_{xo}] \quad (2-11)$$

با دانستن مقادیر زمان سیر موج در آب ( $t_{pw}$ )، ماتریس سنگ ( $t_{pma}$ )، هیدروکربور موجود در سنگ ( $t_{ph}$ ) و زمان سیر موج در نمونه ( $t_{pl}$ )، مقدار  $S_{xo}$  قابل محاسبه است. مقدار  $S_{xo}$  از آن‌رو به جای  $S_w$  وارد شده که قدرت نفوذ در نگار EPT بسیار اندک بوده و زون آغشته را اندازه‌گیری می‌کند.

<sup>۱</sup> Lucia

<sup>۲</sup> Electromagnetic Propagation Tool

در این معادله با داشتن نگار EPT، تنها مجهول باقی مانده  $S_{xo}$  است. با محاسبه  $S_{xo}$  و قرار دادن آن در فرمول آرچی و با فرض یکسان بودن مقدار  $m$  و  $n$  می‌توان  $m$  را محاسبه کرد.

$$R_{xo} = \frac{R_{mf}}{\phi^m S_{xo}^n} \quad (12-2)$$

هرچند فرض برابر بودن  $m$  و  $n$  ممکن است سؤال برانگیز باشد، با این حال تجربیات مختلف نشان می‌دهد که تغییر  $m$  با عمق بهتر از فرض ثابت بودن  $m=2$  (یا هر مقدار دیگری) می‌باشد [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹].

### ۲-۲-۲- پارامترهای تأثیرگذار بر فاکتور سیمان شدگی

اخیراً ضریب سیمان شدگی  $m$ ، به عنوان فاکتور شکل هندسی خلل و فرج شناخته می‌شود.  $m$  پارامتر پیچیده‌ای است و عواملی چون مقدار تخلخل، مقدار تخلخل ثانویه، قطر گلوگاه‌ها و توزیع اندازه گلوگاه‌ها و تخلخل‌ها بر بزرگی آن تأثیر دارند [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹].

بر اساس مطالعات گایود عبارت فاکتور سیمان شدگی بر طبق اندازه‌گیری درجه‌ی سیمان-شدگی و تراکم سنگ محاسبه می‌شود. به طوری که سیمان شدگی بیشتر در سنگ باعث افزایش مقدار فاکتور سیمان شدگی می‌شود. اخیراً فاکتور سیمان شدگی به عنوان مقیاسی از پیچاپیچی، هندسه فضای متخلخل و میزان جریان پذیرفته شده است [Guyod, 1948].

پارامترهای زیر بر روی فاکتور سیمان شدگی  $m$  تأثیر می‌گذارند [Rasmus, 1987]:

- سیمان شدگی: سیمان در فضای تخلخل بین دانه‌ای یا حتی روی سطح دانه‌های جامد باعث می‌شود که آب درون شبکه‌ای یا مواد رسانای دیگر به صورت جزئی و کلی از لحاظ الکتریکی از سیستم جدا و ایزوله شود [Bernal, 2004].

- تخلخل ثانویه<sup>۱</sup>: هنگامی که اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی تخلخل علاوه بر تخلخل بین دانه-ای شامل تخلخل ثانویه (تخلخلی که با تغییر و اصلاح در تخلخل اولیه به وجود می‌آید) باشد، رسم بهترین خط برازش بر داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین مقدار  $m$  سخت و دشوار می‌شود. علت این امر ثابت نبودن درصد تخلخل ثانویه در محدوده تخلخل موجود در یک زون می‌باشد. در نتیجه فاکتور سیمان‌شدگی منعکس‌کننده میزان پیچاپیچی صحیح در فضای متخلخل نیست، در واقع مقدار  $m$  می‌تواند برای هر نمونه رسم شده در نمودار مربوط متفاوت باشد و احتمالاً این تفاوت وجود دارد. با مدل‌سازی ریاضی مسیرهای شکسته و حفره‌ای مشخص شد که در کنار میزان سیمان‌شدگی، حفره‌ها باعث افزایش توان سیمان‌شدگی شده در حالی که در موارد شکسته و خردشده مقدار  $m$  کاهش می‌یابد [Rasmus, 1987].

- اندازه دهانه و گلوگاه فضای متخلخل:  $m$  به هندسه فضای متخلخل بستگی دارد. در حالت طبیعی، اندازه و شکل دانه‌ها همیشه به طور یکسان توزیع نشده است که این مورد بر اندازه گلوگاه فضای متخلخل سنگ تأثیر مستقیم دارد.

- رسانایی آب و کانی‌ها: رانسون نشان داد که توان  $m$  تنها زمانی با هندسه فضای متخلخل رابطه مستقیم دارد که رسانایی الکتریکی موجود در سنگ از آب پر شده در فضای خالی، ناشی شده باشد. هنگامی که رسانایی الکتریکی اضافی علاوه بر رسانایی آب پر شده در منافذ توسط رسانایی الکتریکی مواد جامد (از قبیل پیریت) و یا رسانایی سطحی به علت جانشینی و مبادله یون‌ها در شیل وجود داشته باشد توان  $m$  تغییر می‌کند و این رسانایی باید برای تمام مواد رسانای موجود در سنگ به حساب آید. اگر این رسانایی اضافی پارامترهای مستقل از هم به حساب آیند، تأثیر آن‌ها در ضریب  $a$  مشهود می‌شود [Ransom, 1984].

---

<sup>1</sup> Secondary Porosity

- مساحت سطح بر واحد حجم<sup>۱</sup>: وقتی دانه‌های موجود در سنگ کمتر کروی شکل و بیشتر پهن و کشیده، زاویه‌دار و یا دارای شکل پیچیده‌ای باشند، مساحت سطح بر واحد حجم و همچنین مقدار  $m$  افزایش می‌یابد [Ransom, 1984].

## ۲-۲-۳- محدوده و دامنه توان سیمان‌شدگی

محدوده وسیعی از مقدار  $m$  توسط محققین ارائه شده است که از مقدار ۱ برای سنگ‌های شکسته، تا کمی بیشتر از ۵ برای سنگ‌های به شدت متراکم<sup>۲</sup> ذکر شده است [Rasmus, 1983]. از لحاظ تئوری، فاکتور سیمان‌شدگی می‌تواند بین ۱ تا بی‌نهایت تغییر کند [Thornton, 1949 و Wyllie and Rose, 1950]. اما در عمل محدوده توان سیمان‌شدگی بین ۱ تا ۳ می‌باشد. مقدار  $m=1$  برای سازندی با ۱۰۰ درصد تخلخل از نوع شکستگی، هم راستا و مطلوب در جهت حرکت جریان که تمام فضای متخلخل با آب پر شده باشد، در نظر گرفته می‌شود [Ransom, 1984]. مقدار  $m=3$  برای تخلخل قالبی غیر متصل و جدا از هم ارائه شده است [Hartmann and Beaumont, 1999]. مقدار  $m=1/3$  به صورت تئوری به دست می‌آید و برای دانه‌بندی با شکل کروی به کار می‌رود. مقدار  $m$  کمتر از  $1/3$  هنگامی که شکستگی و یا خردشدگی به شکل ناهمسان در فضای خالی و در مسیر حرکت جریان باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما مقدار  $m$  بزرگ‌تر از  $1/3$  برای مسیرهای جریان غیر مؤثر، شکل دانه‌بندی نامنظم، بلورین و ناپیوسته به کار برده می‌شود [Day, 1992 و Ransom, 1974].

در یک مطالعه وسیع، با بررسی بر روی ۱۸۰۰ نمونه ماسه‌سنگ فاکتور سیمان‌شدگی برابر با  $1/73$  به دست آمد [Timur et al., 1972]. وانگ و همکاران در روی سنگ‌های آمیخته با مواد شیشه‌ای و مذاب<sup>۳</sup> کار کرد و نشان داد که مقدار  $m$  برای  $0/2 < \phi < 0/2$  برابر  $2/3$  و برای

<sup>1</sup> Surface area per unit volume

<sup>2</sup> Highly compacted rock

<sup>3</sup> Fused-glass beads

$0.4 < \phi < 0.2$  برابر ۱ می‌باشد [Wong et al., 1984]. همدا و همکاران مقدار  $a$  و  $m$  را بر روی ۲۰ نمونه ماسه‌سنگ تمیز و متخلخل تعیین کرد. آن‌ها مقدار  $a$  و  $m$  را به ترتیب برای چاه اول  $1/36$  و  $2/03$  و برای چاه دوم  $0/95$  و  $1/85$  به دست آوردند [Hamada et al., 2002]. فوک و مون نشان دادند که مقدار  $m$  به نوع تخلخل و رخساره سنگی در کربنات‌ها بستگی دارد. در مطالعات آن‌ها  $a=1$  فرض شده و مقدار دامنه  $m$  بین ۲ تا بیش از  $5/5$  به دست آمده است [Focke and Munn, 1987]. دوبویز و همکاران برای سنگ‌های آهکی اُلیتی مقدار  $m$  را برابر  $1/36$  معرفی کردند [Dubois et al., 2001]. مطالعات دیگر محققان (از قبیل نستدتر<sup>۱</sup> (۱۹۶۸)، سِتی<sup>۲</sup> (۱۹۷۹)، راسموس (۱۹۸۷)، فوک و مون (۱۹۸۷)) در حیطه رابطه آرچی، روش‌های تعیین  $m$  از داده‌های لاگ را معرفی می‌کنند [Rezaee et al., 2007].

در جدول ۱-۲ محدوده پارامتر سیمان‌شدگی که برای شرایط متفاوت توسط محققین مختلف محاسبه شده است به همراه مرجع آن ارائه گردیده است.

---

<sup>1</sup> Neustaedter

<sup>2</sup> Sethi

جدول ۲-۱: محدوده و دامنه برای فاکتور سیمان‌شدگی یا توان تخلخل  $m$

محدودیت <sup>۱</sup>	دامنه پارامتر $m$	محقق (منبع)
ماسه‌سنگ متراکم و یکپارچه	۱/۸-۲	Archie (۱۹۴۲)
بسته‌های ماسه‌سنگ متراکم و تمیز در آزمایشگاه	$> 1/3$	
ماسه‌سنگ‌های وودبین حوضه هاوکینز، محدوده مغزه‌های ماسه‌سنگ تمیز	۲/۷	Williams et al. (۱۹۵۰)
از لحاظ تئوری و محاسبات ریاضی	$1 - \infty$	Wyllie et al. (۱۹۵۰)
در عمل	۱/۳-۳	
اندازه‌گیری در تعداد زیادی ماسه‌سنگ	۲/۱۵	Winsauer et al. (۱۹۵۲)
غیر رسی (تمیز) تصحیح شده	۱/۴	Waxman et al. (۱۹۷۴)
رسی تصحیح شده	۱/۸-۲/۱	
$m$ مستقل از میزان شیلی شدن	۱/۸۹-۲/۱۳	Clavier, Coates and Dumanoir (۱۹۷۷)
شکستگی‌های هم‌ردیف و در مسیر جریان سیال، ۱۰۰٪ تخلخل از نوع درزه و شکستگی	۱	
کروی شکل	۱/۳	Ramson (۱۹۸۴)
مسیر جریان نامطلوب و ناکارآمد، شکل دانه‌بندی نامنظم، کریستاله، بلورین و منفصل	$> 1/3$	
درزه‌دار و شکسته با خصوصیات ناهمسان در مسیر حرکت جریان	$< 1/3$	
سنگ‌های درزه‌دار	۱	
ماسه‌سنگ‌های شیلی	۱/۷-۱/۸	Hartmann and Beaumont (۱۹۹۹)
سازندهای تمیز با منافذ متخلخل کوچک و بزرگ سایز (سنگ‌های آرچی)	۲	
تخلخل با حفره‌ها و واگ‌های متصل	۲-۲/۵	
تخلخل مولدیک ناپیوسته	۲/۵-۳	
<b>مقادیر گزارش شده <math>m</math> بر اساس روش‌های مختلف</b>		
مغزه‌های ماسه سنگی آفریقا: تمیز و با تخلخل زیاد	۱/۷۹۶-۱/۸۱۳	
• روش متداول		
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)	۱/۷۶۷-۱/۷۸۶	Maute et al. (۱۹۹۲)
مغزه‌های کربناته خاورمیانه		
• روش متداول	۱/۸۰۴	
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)	۱/۷۷۵	NOTE: $a = 1$
مغزه‌های ماسه سنگی خاورمیانه: تمیز و با تخلخل زیاد		
• روش متداول	۱/۸۱۷-۱/۸۵۴	
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)	۱/۷۸۸-۱/۸۰۶	
ماسه‌سنگ تمیز		
• روش عمومی	۲	Hamada and Al-Awad (۲۰۰۱)
• روش متداول	۱/۶۲-۱/۶۶	
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)	۱/۵۶-۱/۶۵	
مخازن کربناته با استفاده از لاگ	۱/۶۸-۲/۴۳	Aldoleimi et al. (۱۹۸۹)
		NOTE: $a = 1$

<sup>۱</sup> Restriction

## ۲-۳- توان اشباع

### ۲-۳-۱- مفهوم پارامتر توان اشباع

ضریب  $n$  که با نام توان اشباع‌شدگی شناخته می‌شود، یکی از ضرایب آرچی بوده و میزان مقاومت ویژه سازند را زمانی که هم آب و هم هیدروکربن وجود داشته باشند، تعیین می‌کند. رسانایی در سنگ ناشی از انتقال یون‌ها است و زمانی که مسیر حرکت پیچاپیچ باشد، در کار انتقال مشکل پیش آمده و مقاومت زیاد می‌شود. به همین ترتیب وجود هیدروکربن که قسمتی از آب سازند را اشغال می‌کند باعث افزایش مقاومت ویژه می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد آرچی در رابطه خود میزان افزایش مقاومت ویژه با افزایش اشباع هیدروکربن را به صورت روابط (۱-۳) و (۱-۴) بیان کرد که بعدها این ضریب به نام اندیس مقاومت ویژه نامیده شد. اندیس مقاومت ویژه بیانگر نسبت مقاومت ویژه سازند در حالتی است که دارای هیدروکربن بوده و ۱۰۰ درصد اشباع از آب است. آرچی اظهار داشت که مقدار  $n$  ثابت است و مقاومت ویژه فقط با تغییر اشباع‌شدگی آب تغییر می‌کند. اما چند دهه تحقیق نشان داد که واقعیت بسیار پیچیده‌تر است؛ بنابراین برای تعیین  $n$  سعی شد تا جایی که ممکن است شرایط مخزن را اعمال کنند. در یک آزمایش ایده‌آل، مغزه باید شرایط واقعی مخزن به ویژه ترشوندگی سازند را داشته باشد و هیدروکربن که به احتمال زیاد از سیالات و گاز تولید شده از مخزن هستند، باید همان‌گونه که میلیون‌ها سال قبل در زیر زمین به مخزن وارد شده‌اند، در طول آزمایش نیز همان‌طور رفتار کنند. برای اندازه‌گیری  $n$ ، اندیس مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده در طول تزریق هیدروکربن یا جیوه، در مقابل اشباع‌شدگی به صورت لگاریتمی رسم می‌شود. شیب خط به دست آمده نشانگر  $n$  خواهد بود. رابطه (۲-۱۳) به کمک خطی سازی رابطه (۱-۴) به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\log I_R = \log 1 - n \log S_w \Rightarrow \log I_R = -n \log S_w \quad (۲-۱۳)$$



خطی که به این طریق به دست می‌آید همواره به صورت خط مستقیم نیست. وجود ریز تخلخل‌ها که از کانی‌های رسی نشأت می‌گیرند باعث شکستگی در خط می‌شوند و از این‌رو مقدار  $n$  گاهی بیشتر قرائت می‌شود. همچنین در صورتی که مقدار  $n$  در هنگام تزریق هیدروکربن و هنگام زهکشی یا خروج هیدروکربن از نمونه اندازه‌گیری شود مقادیر متفاوتی به دست می‌آید. علاوه بر موارد ذکر شده مقدار  $n$  کاملاً وابسته به سیالی است که سطح دانه‌ها را پوشانده است. در صورتی که نمونه آب‌تر باشد، مقدار  $n$  به مراتب کمتر از موقعی است که نمونه نفت‌تر است. بنا به دلایل ذکر شده حفظ شرایط مخزن برای اندازه‌گیری  $n$  الزامی است [رضایی و چهارزی، ۱۳۸۹].

معادلات ارائه شده توسط روابط (۱-۳) و (۱-۴) برای ماسه سنگ‌های اشباع کامل از آب شور به کار می‌رود. در واقع آرچی با جمع‌آوری و بررسی کارهای مارتین و همکاران [Martin et al., 1938]، جکوزی و هوپر [Jakosky and Hopper, 1937]، وی‌گف و بوتست [Wyckoff and Botset, 1936] و لورت [Leverett, 1939] این روابط را پیشنهاد داد که برای اشباع از آب جزئی، زمانی که قسمتی از منافذ از آب شور پر شده باشد، کاربرد دارد [Bernal, 2004].

معمولاً مقدار  $n$  در آزمایشگاه به وسیله کاهش گام به گام اشباع از آب در نمونه‌های مغزه و اندازه‌گیری مقاومت ویژه در هر مرحله به دست می‌آید. با رسم نمودار مقاومت ویژه در برابر اشباع از آب  $(R_t - S_w)$ ، مقدار توان اشباع ( $n$ ) برابر شیب خط برازش شده برای تمام نمونه‌ها می‌باشد [Bernal, 2004].

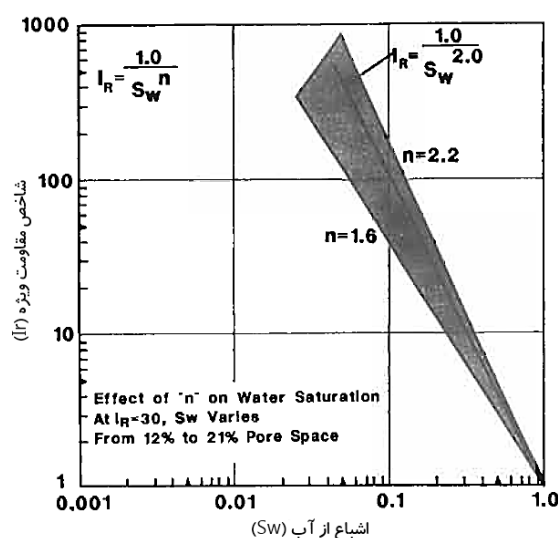
## ۲-۳-۲- تعیین پارامتر توان اشباع در آزمایشگاه

توان اشباع  $n$  روی یک نمونه تمیز و خشک به کمک اندازه‌گیری آزمایشگاهی اشباع از آب  $(S_w)$  و اندیس مقاومت ویژه الکتریکی  $(I_R)$  و رسم آن روی یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی بدست می‌آید. بدین منظور مقادیر مقاومت ویژه آب شور  $(R_w)$ ، مقاومت ویژه در حالت اشباع از آب کامل

$(R_0)$  و مقاومت ویژه نمونه  $(R_t)$  اندازه‌گیری می‌شود. سپس با زهکشی بیشتر آب از نمونه کاملاً اشباع، مقادیر  $R_t$  و  $S_w$  به طور هم زمان اندازه‌گیری شده و مشاهده می‌شود که با کاهش اشباع از آب نمونه، مقاومت ویژه افزایش می‌یابد. در ادامه اندیس مقاومت ویژه برای اشباع از آب‌های متفاوت بر اساس رابطه (۳-۱) محاسبه می‌گردد و رسم آن در مقابل اشباع از آب روی نمودار لگاریتمی-لگاریتمی، توان اشباع بدست می‌آید.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد با رسم داده‌ها بر حسب اندیس مقاومت ویژه (نسبت  $R_t/R_0$ ) در مقابل پارامتر اشباع از آب  $(S_w)$  روی نمودار لگاریتمی-لگاریتمی، از شیب خط برازش شده به داده‌ها مقدار  $n$  محاسبه می‌شود (شکل ۲-۱). توان اشباع به صورت نمونه به نمونه تعیین می‌شود؛ در حالی که فاکتور سیمان‌شدگی  $(m)$  را به کمک مجموعه‌ای از نمونه‌های یک سازند مشخص می‌کنند (شکل

(۲-۲)



شکل ۲-۱: نمودار شاخص مقاومت ویژه در برابر اشباع از آب برای محاسبه توان اشباع [Tiab and Donaldson., 2004]

اندازه‌گیری توان اشباع  $(n)$  در آزمایشگاه‌های مختلف بر روی یک سری نمونه‌های مشخص ماسه‌سنگ و آهکی ارزیابی شد. با برازش و ارزیابی آن، دامنه توان اشباع برای نمونه‌های ماسه‌سنگ برابر ۱/۵۷ تا ۱/۹۹ با میانگین ۱/۸۳ و انحراف معیار ۰/۱۱ به دست آمد. این انحراف معیار برای فشار

محدود کننده ۱۰۰۰ psi مقدار بالاتری و برابر با ۰/۲۳ محاسبه شد. همچنین به طور کلی مقدار این انحراف معیار برای سنگ آهک از ماسه سنگ بالاتر است (۰/۲۲ در حالت معمولی و ۰/۳۱ در حالت تحت فشار) [Joseph et al., 1999].

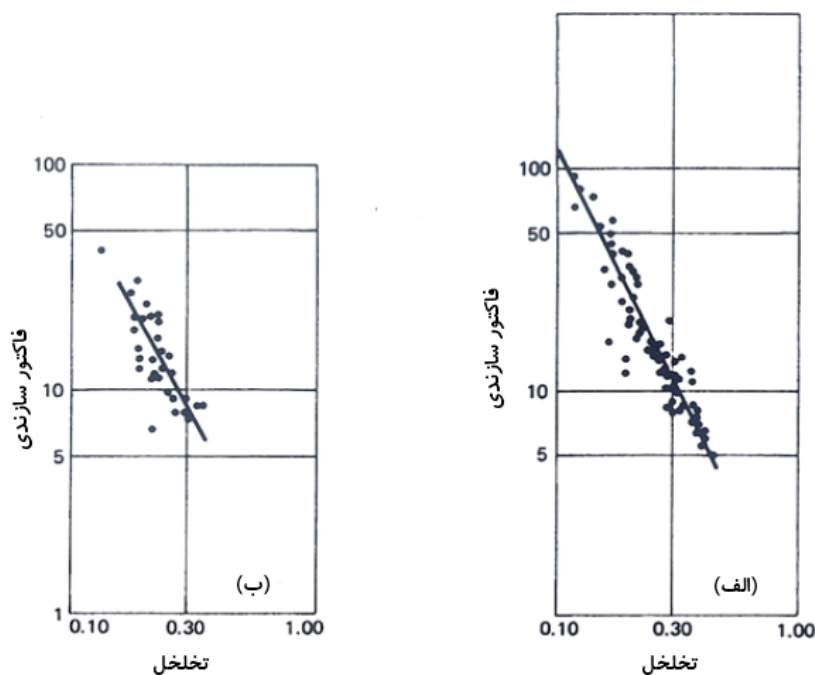
### ۲-۳-۳- پارامترهای تأثیرگذار بر فاکتور توان اشباع

توان اشباع، میزان تقابل و واکنش بین سیال و سطح جامد داخل سیستم فضای متخلخل سنگ را اندازه‌گیری می‌کند [Ransom, 1984].

در زیر عوامل اولیه مؤثر بر توان اشباع آورده شده است.

الف- قابلیت ترشوندگی<sup>۱</sup> یا توزیع سیال: توان اشباع به کمک اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

بر روی نمونه‌های مغزه و با تخلیه از اشباع<sup>۲</sup> تحت فشار به دست می‌آید.



شکل ۲-۲: فاکتور سیمان شدگی  $m$  که از روی شیب رابطه خطی بین فاکتور سازندی و تخلخل به دست می‌آید. (الف) نمونه ماسه‌سنگ‌های با تراوایی کم مربوط به لوئیزیانا<sup>۳</sup> (ب) نمونه ماسه‌سنگ‌های متراکم حاشیه خلیج در آمریکای شمالی، [Swanson, 1985].

<sup>۱</sup> Wettability

<sup>۲</sup> Desaturation

<sup>۳</sup> Louisiana

فاکتور اصلی تأثیرگذار بر روی توان اشباع، تغییرات ترشوندگی است که آندرسون و سُنَدِنَا و همکارانش به آن اشاره کرده‌اند [Anderson, 1986 و Sondena et al., 1991]. در زیر نکات اصلی که می‌توان از مطالعات آن‌ها استخراج کرد، آورده شده است:

(۱) در حین فرآیند جانشینی تحت فشار، آب از فضای متخلخل خارج و نفت خام جایگزین آن می‌شود و ترشوندگی سنگ از حالت آب‌تر<sup>۱</sup> به نفت‌تر<sup>۲</sup> تغییر می‌کند.

(۲) تغییر ترشوندگی به حالت نفت‌تر باعث می‌شود سطح تماس نفت با دانه‌های سنگ به تدریج افزایش پیدا کند که باعث ایجاد انفصال و ناپیوستگی بین فاز شور شده و متعاقباً در فضای متخلخل محبوس می‌شود.

(۳) به دام افتادن و محبوس شدن فاز شور و آب توسط نفت باعث ایزوله شدن الکتریکی و افزایش مقاومت ویژه می‌شود.

(۴) در حین فرآیند تخلیه اشباع و جانشینی، آب شور ناپیوسته و منفصل می‌شود؛ به عبارت دیگر هم آب شور کاملاً محبوس و هم آب شوری که ارتباط هیدرولیکی پیوسته دارد، وجود دارد.

(۵) از طرفی اشباع از آب غیرقابل کاهش یا غیر قابل کاهشی ( $S_{wir}$ ) نیز باعث افزایش انفصال می‌شود. بیشترین انحراف از قانون آرچی (رابطه (۳-۱) و (۴-۱))، در این نوع اشباع دیده می‌شود. این موضوع به خصوص زمانی که آب با نفت خام در شرایط مخزن جایگزین نفت خام شود، بیشتر به چشم می‌آید [Sondena et al., 1991].

(۶) توان اشباع  $n$  در اشباع از آب پایین، برای مغزه‌های نفت‌تر بیشتر از مغزه‌های آب‌تر می‌باشد.

(۷) در سیستم‌های نفت‌تر، توان اشباع با کاهش اشباع از آب افزایش می‌یابد.

(۸) هنگامی که نمونه‌ها بیشتر و بیشتر خاصیت نفت‌تری پیدا کنند (یعنی با تغییر ترشوندگی) توان اشباع افزایش می‌یابد.

---

<sup>1</sup> Water-wet

<sup>2</sup> Oil-wet

بعضی از مشاهدات تجربی در مورد رابطه (۱-۴) صحیح نمی‌باشد. وایلی و همکاران این موضوع را به میزان ترشوندگی از نفت ماسه‌سنگ نسبت دادند. توزیع سیال و میزان ترشوندگی برای موئینگی‌هایی ساختگی با اندازه گلوگاه متفاوت به طور هم‌زمان توسط وایلی و همکاران مورد آزمایش قرار گرفت. به کمک این مدل تئوری، مشخص شد که اتصال فضاهای موئینه مرطوب با اندازه‌های مختلف بر روی توزیع سیال در منافذ موئین تأثیر می‌گذارد [Wyllie and Gregory, 1950]. واردلاو متوجه شد که سنگ‌های آب‌تر با فضای موئین کوچک (معادل تخلخل بین دانه‌ای<sup>۱</sup>) حاوی آب غیرقابل کاهش خواهد بود در حالی که فضاهای موئین بزرگ (معادل با تخلخل حفره‌ای<sup>۲</sup>) تقریباً به طور کامل حاوی نفت می‌باشد. از این مطالعه به سادگی می‌توان به این نتیجه رسید که در طول فرآیند زهکشی (تخلیه اشباع) در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های آب‌تر، نفت وارد فضاهای موئین بزرگ-تر خواهد شد [Wardlaw, 1980]. در ادامه تأثیر اندازه فضای موئین بر روی زهکش مغزه‌ها و متعاقباً در محاسبه توان اشباع به صورت ریاضی توسط راسموس اثبات شد. این مطالعه در مورد ترشوندگی و توزیع سیال نشان می‌دهد که توزیع سیال در محل و در حوضه نفتی ممکن است با مقدار به دست آمده در آزمایشگاه متفاوت باشد. بنابراین ممکن است توان  $m$  و  $n$  به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری‌های درجا قابل کاربرد نباشد [Rasmus, 1987].

**ب- جداسازی و ایزولاسیون الکتریکی:** هم‌چنان که حجم آب کاهش می‌یابد، به علت آب آزاد جمع شده در خلل و فرج ریز (فضای موئینه) تحرک یون‌ها افزایش می‌یابد. همچنین آب می‌تواند در مسیر منافذ جذب شود (اصولاً توسط شیل) که این امر می‌تواند باعث جداسازی کلی یا جزئی الکتریکی آب آزاد شود.

---

<sup>1</sup> Intergranular porosity

<sup>2</sup> Vugs

ج- کشش سطحی<sup>۱</sup>: در یک سیستم آب تر شامل آب و نفت، در حالت اشباع بحرانی<sup>۲</sup> از نفت، کرویت ذرات نفتی<sup>۳</sup> به ابعاد آن‌ها در رابطه با اندازه فضای متخلخل و کشش سطحی بین آب و نفت بستگی خواهد داشت. به ازای کاهش کرویت، توان اشباع  $n$  افزایش خواهد یافت. علاوه بر این با اتصال ذرات نفتی در شبکه فضای متخلخل توان اشباع افزایش پیدا می‌کند [Rasmus, 1987].

د- فشار و دما: معمولاً فشار و دما تأثیری بر روی تغییرات توان اشباع ندارد. بعضی مطالعات نشان می‌دهد که توان اشباع با افزایش دما یا اندکی کاهش می‌یابد و یا تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که فاکتور  $n$  با افزایش فشار به مقدار کمی افزایش می‌یابد [Mahamood et al., 1991].

#### ۲-۳-۴- محدوده پارامتر توان اشباع

همانند توان سیمان‌شدگی توان اشباع از لحاظ تئوری بین ۱ تا بینهایت متفاوت است. مطالعات وایلی و همکاران نشان می‌دهد که توان اشباع در عمل بین ۱ تا ۳ می‌باشد [Wyllie and Gregory, 1950]. مقداری که اغلب به عنوان پیش‌فرض در مراجع و مطالعات برای توان اشباع در نظر گرفته می‌شود برابر  $n=2$  می‌باشد. این مقدار توسط مارتین و همکاران [Martin et al., 1938]، جاکوسکی [Jakosky and Hopper, 1937]، وی‌گف [Wyckoff and Botset, 1936] و لورت [Leverett, 1939] در مواد متخلخل پر شده توسط گاز و آب به دست آمد. آرچی هم در سال ۱۹۴۲ همین مقدار را به دست آورد و رابطه اشباع از آب را به شکل قابل قبولی ارائه و اثبات کرد. در جدول ۲-۲ محدوده توان اشباع که برای شرایط متفاوت توسط افراد مختلف محاسبه شده به همراه مرجع تألیف آن ارائه شده است.

---

<sup>1</sup> Interfacial Tension

<sup>۲</sup> حداقل درجه اشباع از سیال که در آن سیال شروع به حرکت می‌کند درجه اشباع بحرانی (critical saturations) گفته می‌شود.

<sup>3</sup> Oil globules

جدول ۲-۲: محدوده و دامنه برای فاکتور توان اشباع n

محدودیت	دامنه پارمتر n	محقق (منبع)
مواد متخلخل اشباع شده با گاز و آب	۲	Martin, et al. (۱۹۳۸)
		Jakosky et al. (۱۹۳۷)
		Wyckoff et al. (۱۹۳۶)
		Leverett (۱۹۳۹)
ماسه سنگ متراکم و یکپارچه	۲	Archie (۱۹۴۲)
ماسه سنگ های آب تر مصنوعی ماسه سنگ های نفت تر مصنوعی	۱/۸۲	Morse et al. (۱۹۴۷)
	۲/۵۱	
آغشته کردن مغزه های ماسه سنگ و جانشین کردن نفت به جای آب شور. دامنه n به میزان نفت تری ماسه سنگ دارد و از ۲/۸ برای اشباع کم تا ۸/۵ در اشباع ۹۰٪ می باشد.	۲/۸-۸/۵	Morse et al. (۱۹۴۷)
کمتر از ۲ برای سازند حاوی مواد جامد رسانا و بیش از ۴/۳ که به بافت سازند یا توزیع سیال بستگی دارد.	۱/۷-۴/۳	Guyod (۱۹۴۸)
مغزه های ماسه سنگی در کاتن <sup>۱</sup> و استراون <sup>۲</sup> مغزه های نامتراکم سیلیسی آتاوا <sup>۳</sup> • جایگزین کردن منافذ توسط N <sub>2</sub> ، نفت، کروژن و نفت خام	۱/۱۱-۲/۲۴	Dunlap et al. (۱۹۴۹),
	۱/۶۹-۲/۹۰	
ماسه سنگ های وودبین <sup>۴</sup> حوضه هاوکینز <sup>۵</sup> ، محدوده مغزه های ماسه-سنگ تمیز	۲/۷	Williams (۱۹۵۰)
از لحاظ تئوری و محاسبات ریاضی برای اشباع از آب کم ( $S_w < 30\%$ ) برای اشباع از آب بالا ( $S_w > 30\%$ )	۱-۵۵	Wyllie et al. (۱۹۵۰)
	۱/۵-۲/۵ ۲/۵-۴	
رخنمون های ماسه سنگی وودبین، محدوده مغزه های تمیز. با استفاده از روش دو-چهار الکترودی (Two-Four Electrode)	۲/۳۱-۲/۴۰	Rust (۱۹۵۲)
بر اساس مطالعات تئوری شبکه منافذ، n به میزان فشردگی و جمع-شدگی <sup>۶</sup> وابسته است.	۰-۴	Fatt (۱۹۵۶)
مغزه های ماسه سنگی نفت تر که با توجه به میزان رطوبت رفتار می-کند، آب-هوا	۱/۵-۱۱/۷	Keller G.V (۱۹۵۳)
غیر رسی (تمیز) تصحیح شده رسی تصحیح شده	۱/۳	Waxman et al. (۱۹۷۴)
	۲	

<sup>1</sup> Cotton

<sup>2</sup> Strawn

<sup>3</sup> Ottawa

<sup>4</sup> Woodbine

<sup>5</sup> Hakins

<sup>6</sup> Packing

ادامه جدول ۲-۲: محدوده و دامنه برای فاکتور توان اشباع n

مقادیر گزارش شده n براساس روش‌های مختلف	دامنه پارامتر n	محقق (منبع)
مخازن کربناته با استفاده از لاگ	۱/۸۱-۲	Aldoleimi et al. (۱۹۸۹) NOTE: a = 1
مغزه‌های ماسه سنگی آفریقا: تمیز و با تخلخل زیاد	۱/۷۹۵-۱/۸۲۳	
• روش متداول	۱/۸۷۱-۱/۸۷۶	Maute et al. (۱۹۹۲)
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)	۱/۷۴۸	
مغزه‌های کربناته خاورمیانه	۲/۹۴۸	NOTE: a = 1
• روش متداول	۱/۹۸۹-۲/۱۵۷	
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)	۱/۹۲۵-۲/۱۸۵	
مغزه‌های ماسه سنگی خاورمیانه: تمیز و با تخلخل زیاد		
• روش متداول		
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)		
ماسه‌سنگ تمیز	۲	
• روش عمومی	۱/۵۶-۱/۷۶	Hamada and Al-Awad (۲۰۰۱)
• روش متداول	۱/۶۱-۱/۹۲	
• روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)		

## ۲-۴- پارامتر پیچاپیچی

### ۲-۴-۱- مفهوم پارامتر پیچاپیچی

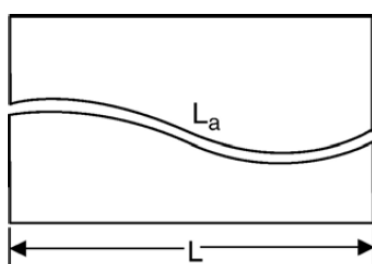
پارامتر یا ضریب پیچاپیچی که معمولاً با حرف a و گاهی با سمبل  $\tau$  نشان داده می‌شود، در سال ۱۹۵۲ توسط وینسور و همکارانش معرفی شد که مقیاسی برای اندازه‌گیری هندسه فضای متخلخل و منافذ می‌باشد. همان‌طور که او در مقاله‌اش با عبارت «مقیاسی برای مجاری، گسترش و شبکه داخلی منافذ» اشاره کرده است. تأثیر هندسه و پیچاپیچی منافذ بر روی مقاومت ویژه سنگ نیز توسط وینسور و همکاران بررسی شد. به علت تأثیر سیال داخل منافذ سنگ و پیچاپیچی این منافذ بر روی مقاومت ویژه آن‌ها پارامتر a در رابطه آرچی را فاکتور پیچاپیچی نامیدند. آن‌ها دریافتند که بهترین برازش برای نمودار فاکتور سازندی در برابر تخلخل  $(F - \phi)$ ، در داده‌های آزمایشگاهی (تجربی) مغزه در قانون آرچی، استفاده از مقادیر  $a=0.62$  و  $m=2/15$  در رابطه  $F = a\phi^{-m}$  می‌باشد

[Winsauer et al., 1952].



$$F = \frac{a}{\phi^m} = \frac{0.62}{\phi^{2.15}} \quad (۱۴-۲)$$

پیچاپیچی ( $\tau$ ) به صورت تئوری به نسبت طول واقعی مسیر ( $L_a$ ) به طول مستقیم تئوری بلوک ( $L$ ) تعریف می‌شود [Carman, 1939]. همان‌طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است این نسبت بدون توان است. (در بعضی از مطالعات پیچاپیچی به صورت  $\tau = (L_a/L)^2$  نیز تعریف شده است. در این مورد فاکتور پیچاپیچی «a» و « $\tau$ » هم‌ارزند [Amyx et al., 1960].



شکل ۲-۳: مسیر جریان واقعی  $L_a$ ، طول نمونه  $L$  و پیچاپیچی  $\frac{L_a}{L}$  [Tiab and Donaldson, 2004]

فاکتور پیچاپیچی مقدار مستقل و ثابتی ندارد و با پارامترهای زیادی از قبیل تخلخل، هندسه اتصالات منافذ، میزان دانه‌بندی نرم و ریز، میزان فشردگی و فاکتور سازندی تغییر می‌کند [Attia, 2005]. از لحاظ تئوری، این غیر ممکن است که فاکتور پیچاپیچی کمتر از ۱ باشد (بر اساس تعریف کمترین مقدار  $L_a$  برابر  $L$  است). برای یک جریان خطی یونی در طول مسیر واسطه‌های متخلخل تنها می‌تواند نزدیک به یک باشد (سطح شکستگی ممکن به این نزدیک باشد  $L_a = L$ ). مقدار کمینه تئوری برای  $a$  یک و مقدار بیشینه قابل قبول آن برابر  $1/4$  می‌باشد [Adisoemarta et al., 2000].

در بیشتر مطالعات آزمایشگاهی، حاصل فاکتور مقاومت ویژه الکتریکی سازند ( $F$ ) و تخلخل به پیچاپیچی و همبستگی جریان ارتباط دارد [Amyx et al., 1960].

$$\tau = (F_R \phi)^x \quad (۱۵-۲)$$

مقدار توان  $x$  برابر با ثابت همبستگی می‌باشد، در اشکال مختلف بر پایه استدلال‌های تئوری و آزمایشگاهی بین  $0/5$  تا  $1/5$  می‌باشد. کمترین مقدار پیچاپیچی بر اساس معادله (۲-۱۵) زمانی که توان  $x$  برابر با  $0/5$  است به دست می‌آید. در این معادله نقش تخلخل بسیار حساس می‌باشد. اگر در این معادله از تخلخل کل استفاده شود، پیچاپیچی ظاهری را می‌توان تخمین زد و زمانی که از تخلخل جریانی استفاده شود می‌توان پیچاپیچی واقعی را تخمین زد. بنابراین:

$$\tau_R = (F_R \phi^m)^x \quad (2-16)$$

که در آن  $\tau_R$  پیچاپیچی واقعی است. از آنجائی که پیچاپیچی واقعی را از داده‌های ورودی نمی‌توان تعیین کرد در ابتدا باید پیچاپیچی ظاهری محاسبه شود. حد بالایی و پایینی برای مقدار پیچاپیچی ظاهری در اتصال‌های حفره‌ای شکسته به صورت  $\tau_A < 4 \tau_A / 5$  (پیچاپیچی ظاهری است) به کار می‌رود [Hassanzadeh-Azar et al., 2008].

مقدار پیچاپیچی در ترکیبات آمیخته با مواد شیشه‌ای<sup>۱</sup> توسط وانگ و همکاران برای تخلخل بین  $0/02$  تا  $0/2$  برابر  $3/3$  محاسبه شد [Wong et al., 1984] و برای سنگ آهک‌های آلیتی مقدار فاکتور پیچاپیچی توسط دوبیز و همکاران برابر  $9/5$  محاسبه گردید [Dubois et al., 2001]. هیراساکی<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) گزارش داد زمانی که جورشده‌گی و تخلخل دانه‌های ماسه‌سنگ کاهش می‌یابد مقدار پیچاپیچی افزایش پیدا می‌کند. او نشان داد زمانی که تخلخل دانه‌های ماسه به صفر نزدیک می‌شود مقدار فاکتور پیچاپیچی می‌تواند به  $3/5$  نیز برسد.

فاکتور پیچاپیچی را نمی‌توان ثابت در نظر گرفت زیرا این فاکتور به پارامترهای زیادی از قبیل مقدار ریز دانه بودن، فاکتور مقاومت ویژه سازند، توان سیمان‌شدگی، تخلخل و درجه شوری اشباع

<sup>1</sup> Fused-glass beads

<sup>2</sup> Hirasaki

بستگی دارد. به طور کلی، پیچاپیچی بیشتر مسیر منافذ، باعث سخت شدن حرکت جریان در طول مخزن و افزایش مقاومت ویژه می شود [Attia, 2005].

بر اساس نتایج رانسون، زمانی که فاکتور سازندی در آزمایشگاه اندازه گیری می شود اگر در نمونه های مغزه مواد جامد دارای رسانایی الکتریکی وجود نداشته باشد میزان پارامتر  $a$  باید برابر ۱ باشد. اگر رسانایی الکتریکی نمونه های مغزه کاملاً وابسته به آب پر شده در حجم منافذ نباشد و این رسانایی اضافی برای فاکتور سیمان شدگی به حساب آورده نشود آن را می توان به عنوان پارامتر پیچاپیچی به حساب آورد. وقتی رسانای اضافی به طور ضمنی درون توان سیمان شدگی است، توان سیمان شدگی به مقادیر کمتر از  $1/3$  میل می کند. لازم به تأکید است که دلیل کمتر از  $1/3$  بودن توان سیمان شدگی تنها رسانای اضافی نیست [Ransom, 1984].

اندازه گیری های آزمایشگاهی تخلخل، علاوه بر تخلخل بین دانه ای، تخلخل ثانویه را نیز شامل می شود. مقدار تخلخل ثانویه، درصد ثابتی از تخلخل موجود در مخزن باقی نمی ماند. این موضوع باعث می شود که بهترین خط برازش شده به داده های آزمایشگاهی مشکل شود. در نتیجه توان های سیمان شدگی که منعکس کننده پیچاپیچی صحیح از فضای متخلخل نمی باشند مقداری غیر از یک را نشان می دهد [Rasmus, 1983].

دی مباحث جالبی در مورد پارامتر  $a$  ارائه کرد. در زیر نکات اصلی این بحث آورده شده است [Day, 1992].

- مقدار  $a$  بسته به روشی که محاسبه می شود متفاوت است.
- وقتی خطای ایجاد شده در اشباع از آب بررسی می شود پرسش در مورد اینکه آیا پارامتر  $a$  می تواند غیر از یک باشد بی معنی است. داده ها نشان می دهد که در نظر گرفتن مقدار پارامتر  $a$  برابر یک یا غیر از آن، تغییرات چندانی در مقدار خطا ندارد. از لحاظ تئوری، پارامتر  $a$  زمانی که خطای اشباع به حداقل رسانده شود چندان مؤثر نمی باشد.

- وقتی داده‌ها پراکندگی زیادی داشته باشد، در نظر گرفتن مقدار ثابت ۱ برای  $a$  و یا تعیین مقدار این پارامتر از طریق نمودار رگرسیون، موجب عدم پیش‌بینی صحیح اشباع از آب می‌شود.

در دو مطالعه دیگر پارامتر  $a$  دارای یک برازش ضعیف با اهمیت فیزیکی کم نشان داده شده است، و توصیه می‌شود که برای پارامتر  $a$ ، مقدار ثابت ۱ انتخاب شود و به صورت یک آنالیز ریاضی ثابت شد تغییرات خطا در اشباع برای  $a=1$  و  $a \neq 1$  بسیار کوچک و ناچیز است [Maute et al., 1992]. طی مطالعه‌ای انحراف معیار اشباع از آب با استفاده از روش‌های عادی<sup>۱</sup>، رایج و متداول<sup>۲</sup>، تخمین پارامترهای آرچی مغزه و رگرسیون سه بعدی (3-D) مقایسه شد. نتایج نشان داد که تغییرات در انحراف معیار برای پارامتر  $a$  برابر ۱ و مخالف ۱ ناچیز و قابل چشم‌پوشی است [Hamada and Al-Awad, 2001]. این روش‌ها در فصل بعدی مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.

به طور کلی  $a$  نماینده متغیرهای مجهول یا نامشخص مانند رسانایی اضافی موجود در سنگ که به حجم منافذ پر شده توسط آب وابسته نیست، می‌باشد. پارامتر  $a$  را می‌توان برابر ۱ در نظر گرفت که در این حالت این رسانایی اضافی موجود در سنگ به طور ضمنی بر روی توان سیمان‌شدگی تأثیر می‌گذارد و موجب انحراف آن از مقدار عادی  $m=2$  می‌شود. از طرف دیگر اگر پارامتر  $a$  برابر ۱ نباشد اثر آن روی خطای اشباع از آب کمینه است که باعث می‌شود استفاده آن از نظر زمان و حجم عملیات مورد سؤال واقع شود [Bernal, 2004].

---

<sup>1</sup> Common method

<sup>2</sup> Conventional method

## ۲-۵- روش‌های تعیین ضرایب آرچی

### ۲-۵-۱- مقدمه

تقریباً اکثر روش‌های معمول به کار گرفته شده برای محاسبه ضرایب آرچی، روش‌های آماری هستند. علاوه بر این انواع روش‌هایی که برای تعیین پارامترهای آرچی ارائه شده و در بررسی کارهای گذشته دیده می‌شود، مربوط به یک منطقه یا مورد خاصی است و چندان قابلیت تعمیم ندارد. در این بخش تنها تعدادی از این روش‌ها که کاربرد و اهمیت بیشتری داشته‌اند، ارائه شده است.

### ۲-۵-۲- روش عمومی

روش عمومی یا ابتدایی، روشی بسیار کم دقت است که تنها در مراحل اولیه‌ی کار برای به دست آوردن تخمین و برآوردی اولیه از میزان اشباع از آب استفاده می‌شود؛ و یا در مواردی که برای یک منطقه نمونه‌های مغزه در دسترس نباشد، تعیین مقادیر اشباع و توان سیمان‌شدگی به کمک اطلاعات موجود از تخلخل و خصوصیات عمومی بافت سنگ صورت می‌گیرد. این روش بر اساس جمع‌آوری و تلفیق قسمتی از مطالعات و بررسی‌های انجام شده در گذشته می‌باشد که ضرایب آرچی را با توجه به نوع و بافت سنگ و خصوصیات دیگر آن از جداولی مشابه جدول ۲-۱ و ۲-۲ انتخاب می‌شود [Hamada et al., 2010].

### ۲-۵-۳- روش متداول و رایج

الدولیم و برتا (۱۹۸۹)، ماوت و همکاران (۱۹۹۲) و همدا و الاود<sup>۱</sup> (۲۰۰۲) در مقاله‌های خود روش‌های متداول را بررسی کردند. در روش متداول، نتایج داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده از نمونه‌های مغزه بر روی نمودارهای لگاریتمی-لگاریتمی با توجه به معادلات (۲-۱) و (۲-۱۳) رسم می‌شوند. با برازش داده‌های اندیس مقاومت ویژه ( $I_R$ ) در مقابل اشباع از آب ( $S_w$ )، با توجه به معادله

<sup>۱</sup> Al-Awad

(۱۳-۲) مقدار توان اشباع ( $n$ )، و برازش فاکتور سازندی ( $F$ ) در مقابل تخلخل ( $\phi$ )، با توجه به معادله (۱-۲) مقدار ضریب سیمان‌شدگی ( $m$ ) به دست می‌آید. همان‌طور که آرچی قبلاً تشخیص داده بود این نمودارها بیان‌کننده میزان ناهمگنی در سنگ می‌باشد.

روش متداول دارای مزیت‌های زیر می‌باشد:

الف) ایجاد یک مقدار کمی برای همبستگی بین سازندها.

ب) می‌توان از این روش حدودی از محتوای مخزن به دست آورد.

ج) این روش اولین روش در توسعه و بهبود تفاسیر نگارهای چاه الکتریکی می‌باشد، که هنوز هم کاربرد دارد.

به هر حال آلدولیم و پرتا (۱۹۸۹)، ماوت و همکاران (۱۹۹۲)، همدآ و آلاود (۲۰۰۲) ناکارآمدی و نامناسب بودن روش متداول را تشخیص دادند و اشکال‌های آن را به صورت زیر بیان کردند:

الف) تعیین مقادیر دو پارامتر  $m$  و  $n$  در این روش به صورت جداگانه صورت می‌گیرد در حالی که از لحاظ ساختاری و فیزیکی این جدایش صحیح نمی‌باشد و باعث ایجاد خطا در محاسبه اشباع از آب می‌شود.

ب) به منظور سادگی در محاسبات، فاکتور پیچاپیچی معمولاً برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت، مقدار این فاکتور براساس عرض از مبدأ خط برازش شده در نمودار ( $\log F - \log \phi$ ) به دست می‌آید.

ج) شاخص مقاومت ویژه ( $I_R$ ) در اشباع‌شدگی کم، تابعی از ترشوندگی است. این تأثیر باعث می‌شود که داده‌ها از رابطه آرچی مورد انتظار منحرف شوند. این نویسندگان تشخیص دادند که ترشوندگی در آزمایشگاه به خوبی اندازه‌گیری نشده و این عامل تأثیر قطعی بر روی توان سیمان‌شدگی در اشباع کم می‌گذارد.

د) زمانی که بر روی نمونه‌های مغزه فرآیند جانشینی صورت می‌گیرد، صحت و دقت داده‌های آزمایشی به مدت زمان آزمایش بستگی دارد. این صحت داده‌ها نیز از مواردی است که بر روی توان اشباع تأثیر می‌گذارد [Bernal, 2004].

### ۲-۵-۴- روش رگرسیون سه بعدی (3-D)

با توجه به رابطه آرچی  $S_w$  (رابطه (۱-۶)) و با رسم یک دستگاه سه بعدی برای متغیرهای  $S_w$  (محور  $Y$ )،  $R_w/R_t$  (محور  $Z$ ) و  $\phi$  (محور  $X$ ) بر اساس این رابطه، روش رگرسیون سه‌بعدی به دست می‌آید. با گرفتن لگاریتم از دو طرف رابطه (۱-۶) و مرتب کردن آن در نهایت رابطه (۲-۱۷) به دست می‌آید.

$$\log\left(\frac{R_w}{R_t}\right) = m \log \phi + n \log S_w - \log a \quad (2-17)$$

برای مجموعه‌ای از داده‌های نمونه مغزه، رابطه (۲-۱۸) برای  $i$  نقطه اندازه‌گیری شده به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$Z_i = mX_i + nY_i - A \quad (2-18)$$

بعد از نرمال‌سازی رابطه (۲-۱۸) برای  $N$  داده، مجموعه معادلات زیر را به طور هم‌زمان می‌توان حل نمود:

$$\sum Z_i = m \sum X_i + n \sum Y_i - NA \quad (2-19)$$

$$\sum Z_i X_i = m \sum X_i^2 + n \sum X_i Y_i - NA \sum X_i \quad (2-20)$$

$$\sum Z_i Y_i = m \sum X_i Y_i + n \sum Y_i^2 - NA \sum Y_i \quad (2-21)$$

به کمک حل این سه معادله در یک دستگاه معادلات، مقادیر هر یک از ضرایب آرچی به طور هم‌زمان محاسبه می‌شود.

الدولیم و برتا (۱۹۸۹) همچنین یک روش رگرسیون سه بعدی با استفاده از داده‌های لاگ چاه ارائه کردند. این مطالعه با استفاده از مقادیر آزمایشگاهی پارامترهای آرچی به دست آمده، اعتبار داده‌های چاه‌نگاری را تأیید می‌کند. در این روش به جای استفاده از  $S_w$ ،  $R_w$  و  $R_t$  در معادله (۲-۱۷)، از مقادیر  $S_{xo}$ ،  $R_{mf}$  و  $R_{xo}$  استفاده می‌شود؛ که به ترتیب اشباع از آب در زون شسته شده، مقاومت گل در قسمت تراویده گل و مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده گل حفاری در زون تراویده گل می‌باشد [Bernal, 2004].

$$\log\left(\frac{R_{mf}}{R_{xo}}\right) = m \log \phi + n \log S_{xo} - \log a \quad (2-22)$$

به طور کلی مزایای روش رگرسیون سه بعدی در زیر آورده شده است [Hamada and Al-] [Awad, 2001].

- ۱- در این روش پارامترهای آرچی به صورت هم زمان به دست می‌آید.
- ۲- همچنین امکان محاسبه مقدار پارامتر  $a$  که یک مسئله و موضوع پیچیده‌ای است را می‌دهد.
- ۳- روش رگرسیون سه بعدی بر پایه ارزیابی کم‌ترین خطای میانگین ( $E_{S_w}$ ) بین اشباع از آب اندازه‌گیری شده از داده‌های مغزه و اشباع از آب محاسبه شده می‌باشد.

## ۲-۵-۵- روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE)

روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه (CAPE) توسط ماوت و همکاران (۱۹۹۲) و همدا و الاود (۲۰۰۱) معرفی شد. این روش بر پایه این ایده مبتنی است که رگرسیون و یا برازش در نمودارهای اندیس مقاومت ویژه ( $I_R$ ) در مقابل اشباع از آب ( $S_w$ ) و همچنین فاکتور سازندی ( $F$ ) در مقابل تخلخل ( $\phi$ )، روشی بهینه برای به دست آوردن پارامترهای آرچی نمی‌باشند. روش متداول از شیوه حداقل مربعات خطی به منظور برازش کمترین خطا در پارامترهایی مثل فاکتور سازندی ( $F$ ) و اندیس مقاومت ویژه ( $I_R$ ) استفاده می‌کند. معرفی کنندگان روش CAPE بیان می‌کنند که خطای اشباع از آب ( $E_{S_w}$ ) به دلیل این که فاکتور اشباع از آب کمیت مطلوب و مورد نظر ماست، باید کمینه شود. در



این روش خطای اشباع از آب از رابطه (۲-۲۳) به دست می‌آید [ Hamada and Al-Awad, 2001; Maute et al., 1992].

$$E_{S_w} = \sum_j \sum_i [S_{w_{ij}} - \left(\frac{aR_{w_i}}{\phi_j^m R_{ij}}\right)^{\frac{1}{n}}]^2 \quad (2-23)$$

که در آن  $j$  شاخص مغزه،  $i$  شاخص برای نقاط اندازه‌گیری شده در مغزه،  $S_{w_{ij}}$  لامین اندازه‌گیری آزمون آزمایشگاهی اشباع از آب برای لامین مغزه (شکستگی)،  $R_{ij}$  لامین مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده برای لامین مغزه ( $\Omega, m$ ),  $R_{w_j}$  مقاومت ویژه آب استفاده شده در لامین مغزه و  $\phi_j$  تخلخل (شکستگی) مغزه زام می‌باشد. با گرفتن مشتقات جزئی نسبت به هر کدام از پارامترهای رابطه (۲-۲۵) و برابر صفر قرار دادن آن‌ها چندین معادله به دست می‌آید که با حل این معادلات بهترین مقادیر برای پارامترهای آرچی محاسبه می‌شود.

ماوت و همکاران (۱۹۹۲)، همدا و الاود (۲۰۰۱) مزایای زیر را برای روش CAPE بیان کرده‌اند. الف) به این سوال پاسخ داده می‌شود که  $a$  چه مقداری است. زیرا با استفاده از حل دستگاه معادلات به طور هم‌زمان تخمین زده می‌شود.

ب) اجازه می‌دهد که مقادیر  $m$  و  $a$  انتخابی را بدون اینکه نیاز به  $S_w = 1$  باشد تخمین بزنند.

د) از تمام داده‌های موجود استفاده می‌کند.

به هر حال در روش CAPE دو فرض وجود دارد. اول اینکه فرض شده قانون آرچی برای نمونه‌های مغزه قابل کاربرد است، در صورتی که قانون آرچی تنها برای ماسه سنگ‌های تمیز قابل استفاده می‌باشد. ماسه سنگ غیر تمیز (ماسه سنگ شیلی) و سازندهای حفره‌ای<sup>۱</sup> شبیه کربنات‌ها ممکن است از قانون آرچی پیروی نکنند [ Hamada and Al-Awad, 2001 و Maute et al., 1992].

<sup>۱</sup> Vuggy formation

در ادامه بر اساس داده‌های موجود از میدان  $F$ ، مقادیر هر یک از پارامترهای آرچی برای سه چاه A1، B1 و C1 محاسبه شده است. از آن جایی که امروزه در صنعت نفت برای تعیین این پارامترها بیشتر از روش متداول استفاده می‌شود، در فصل سوم نیز به کمک این روش، هر یک از پارامترهای آرچی محاسبه شده است. ضمناً به دلیل سادگی و مزایای اشاره شده برای روش رگرسیون سه بعدی، بر اساس این روش نیز پارامترهای آرچی سه چاه موجود در میدان  $F$  محاسبه و در انتها نتایج حاصل از دو روش با هم مقایسه می‌شود.

فصل سوم

استفاده از روش‌های آماری در

تعیین پارامترهای آرچی

### ۳-۱- مقدمه

همان‌طور که در فصل ۲ اشاره شد، اکثر روش‌هایی که در تعیین پارامترهای آرچی به کار می‌روند، روش‌های آماری هستند که در فصل ۲ مورد بحث قرار گرفتند. در این فصل مقادیر هر یک از پارامترهای آرچی با استفاده از روش‌های آماری محاسبه شده است. این محاسبات بر روی نمونه‌های مغزه موجود در میدان F با استفاده از دو روش متداول و رگرسیون سه بعدی صورت گرفته است. در نهایت به تحلیل و بررسی نتایج به دست آمده از دو روش مذکور پرداخته شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

### ۳-۲- تعیین پارامترهای آرچی به روش متداول

این روش یکی از کاربردی‌ترین روش‌های تعیین پارامترهای آرچی است. در حال حاضر رایج‌ترین شیوه محاسبه این پارامتر در صنعت نفت، استفاده از همین روش می‌باشد. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد روش متداول مبتنی بر اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی می‌باشد، که در آن پارامترهای فاکتور مقاومت ویژه سازندی، اندیس مقاومت ویژه الکتریکی، تخلخل و مقدار اشباع از آب به کمک شیوه‌های آزمایشگاهی محاسبه می‌شود. بر اساس رابطه (۲-۱) و با رسم نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور سازندی در مقابل تخلخل، توان سیمان‌شدگی از روی شیب نمودار و ضریب پیچاپیچی به کمک عرض از مبدأ آن به دست می‌آید. مقدار توان اشباع نیز بر طبق رابطه (۲-۱۳) به کمک رسم اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب روی یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی و بر اساس شیب خط حاصل از برازش نقاط روی نمودار به دست می‌آید.

### ۳-۲-۱- اندازه‌گیری فاکتور مقاومت ویژه سازندی

به منظور تعیین فاکتور مقاومت ویژه سازندی، ابتدا نمونه‌های مغزه انتخاب و بعد از تعیین خواص پتروفیزیکی، با آب نمک سازند، اشباع می‌شود. نمونه‌های مغزه در مغزه نگه‌دار سه محوری

دستگاه FRF قرار داده شده و مقدار مقاومت ویژه الکتریکی در حالت صد درصد اشباع ( $R_0$ ) تعیین می‌شود. سپس مقاومت ویژه الکتریکی آب سازند ( $R_w$ ) نیز اندازه‌گیری می‌شود. این عمل برای محلول‌هایی با شوری‌های مختلف تکرار و هر بار مقادیر  $R_0$  و  $R_w$  اندازه‌گیری شده و در نهایت با رسم  $R_w$  در مقابل  $R_0$  و بر اساس رابطه  $F = R_0/R_w$ ، مقدار  $F$  از روی شیب خط رگرسیون برازش شده بر این داده‌ها به دست می‌آید.

### ۳-۲-۲- اندازه‌گیری اندیس مقاومت ویژه الکتریکی

بعد از اندازه‌گیری فاکتور مقاومت ویژه سازندی، نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری اندیس مقاومت ویژه الکتریکی آماده می‌شوند. قسمت بالای نمونه به یک منبع ورود نفت تحت فشار و قسمت پایین آن به یک لوله خروجی متصل می‌شود. فرآیند تخلیه از اشباع نمونه با افزایش فشار منبع ورودی در طول یک دوره ۱۴ روزه صورت می‌گیرد. مقاومت الکتریکی نمونه با کاهش متناوب آب شور اشباع شده اندازه‌گیری می‌شود. اندیس مقاومت ویژه الکتریکی به کمک نسبت مقدار مقاومت ویژه نمونه به مقدار فاکتور مقاومت ویژه سازندی اندازه‌گیری شده در قبل (اشباع کامل) محاسبه می‌شود (در واقع به منظور مقایسه در دو حالت اشباع کامل و اشباع جزئی در نمونه). روابط مربوط به این محاسبات در ادامه آورده شده است.

$$R_t = \frac{A R_c}{100 L} \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه:

$R_t$ : مقاومت ویژه کل نمونه یا مقاومت ویژه نمونه در حالت اشباع جزئی (ohm.m)

$R_c$ : مقاومت نمونه (ohms)

$L$ : فاصله الکترودی (طول نمونه بر حسب cm)

$A$ : سطح مقطع نمونه ( $cm^2$ )

و عدد ۱۰۰ به علت تبدیل واحد در رابطه استفاده شده است. سپس به کمک رابطه (۲-۳) اندیس مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه می‌شود:

$$I_R = \frac{R_t}{R_w F} \quad (2-3)$$

که در این رابطه:

$R_w$ : مقاومت ویژه آب شور (ohm.m)

$F$ : فاکتور مقاومت ویژه سازندی

ضمناً در حین انجام این آزمایش مقدار اشباع از آب در هر مرحله به کمک رابطه (۳-۳) اندازه‌گیری می‌شود:

$$S_w = \frac{V_p - V_{WE}}{V_p} \times 100 \quad (3-3)$$

که در این رابطه:

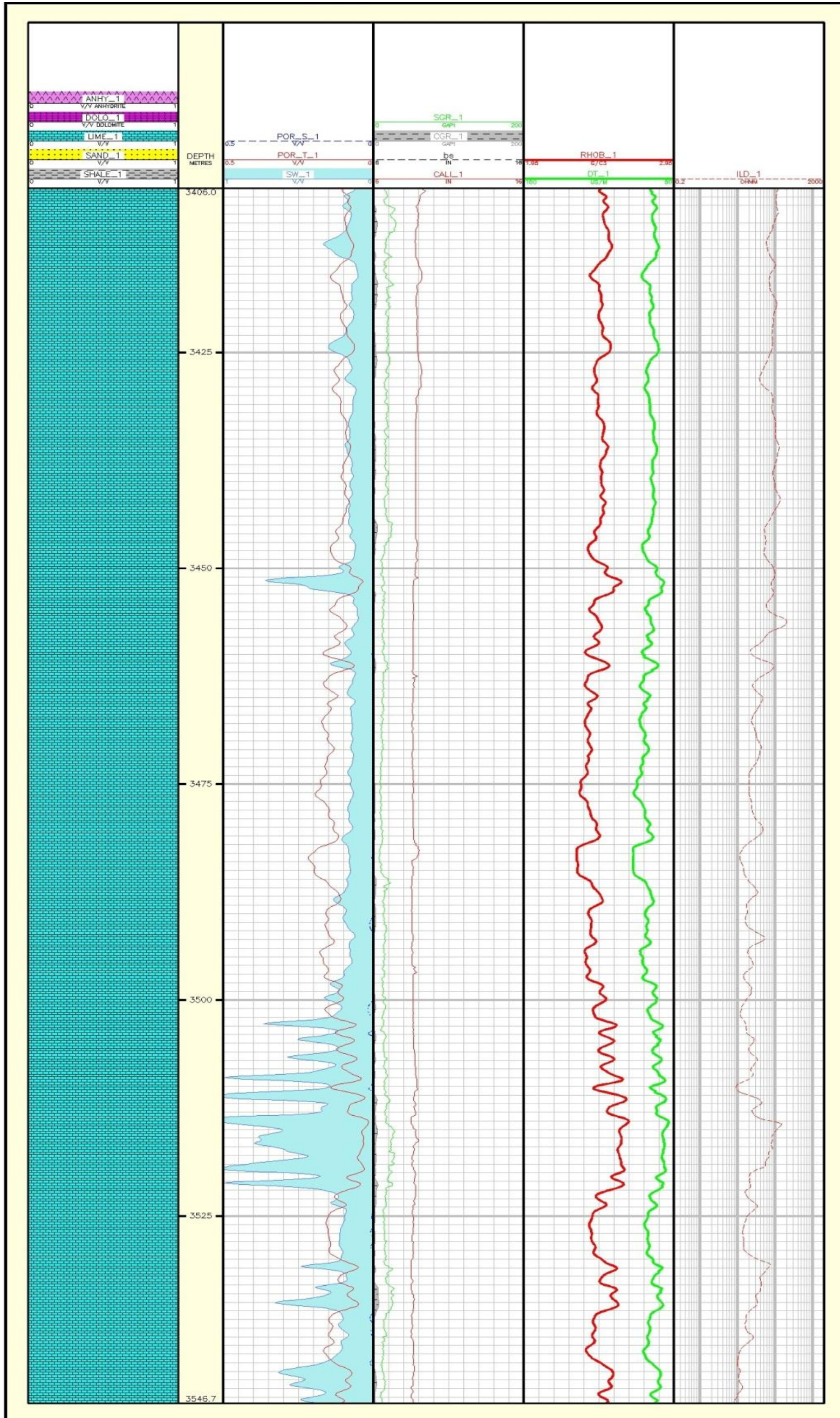
$V_p$ : حجم فضای متخلخل

$V_{WE}$ : حجم آب شور خارج شده از نمونه مغزه

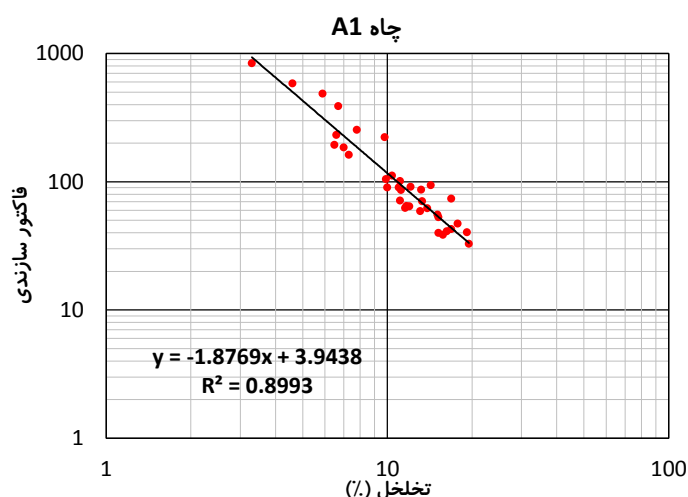
### الف- روش متداول؛ چاه A1

تعداد ۳۷ نمونه مغزه از عمق ۳۴۰۶ تا ۳۵۴۶/۷ متری چاه A1 برداشت شده است. این بخش در محدوده مخزن کربناته این چاه می‌باشد که در شکل ۱-۳ چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه شناسی این قسمت آورده شده است. محدوده تغییرات سیمان‌شدگی اندازه‌گیری شده در این چاه بین ۱/۶۹ تا ۲/۱۴ متغیر است. مقدار متوسط سیمان‌شدگی ۱/۸۵ در نظر گرفته شده است. بر اساس روش متداول و به کمک رسم نمودار تخلخل در مقابل فاکتور مقاومت ویژه سازندی، مقدار این فاکتور محاسبه می‌شود. همان‌طور که در نمودار شکل ۲-۳ دیده می‌شود، شیب خط رگرسیون برای نمونه داده‌های چاه A1 برابر ۱/۸۸ و عرض از مبدأ آن ۳/۹۴ به دست آمده است. که به ترتیب نشان‌دهنده فاکتور سیمان‌شدگی و ضریب پیچاپیچی سنگ مخزن یا سازند کربناته در این چاه می‌باشند.





شکل ۳-۱: چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه‌شناسی مربوط به چاه A1 (جنس سنگ کاملاً کربناته و آهکی می‌باشد).



شکل ۲-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت ویژه سازندی در برابر تخلخل برای چاه A1.

مقدار خطای نسبی در این روش برای محاسبه فاکتور سیمان‌شدگی برابر ۱/۳۷ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده دقت نسبتاً بالایی است. این خطای نسبی از رابطه (۴-۳) محاسبه شده است.

$$Er = \frac{|X - X_e|}{X} \times 100 \quad (4-3)$$

در این رابطه:

$Er$ : خطای نسبی بر حسب درصد

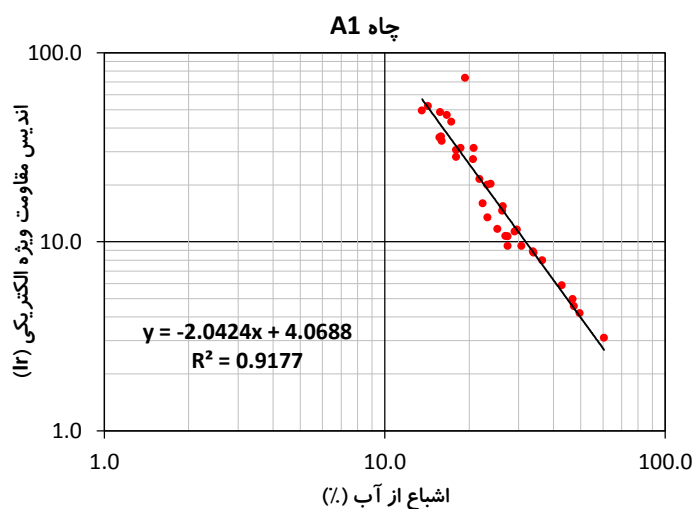
$X$ : مقدار واقعی

$X_e$ : مقدار تخمینی

نکته قابل توجه دیگر مقدار ضریب پیچاپیچی بالای ۳/۹۴ در این چاه می‌باشد. از آنجایی که مقدار متداول پیچاپیچی برابر واحد ( $a=1$ ) است، مقدار فاکتور  $a$  بالا در این چاه نشان‌دهنده پیچاپیچی زیاد در نمونه‌ها می‌باشد. اما به منظور محاسبه فاکتور توان اشباع، نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه رسم می‌شود. در بخش ۲-۲-۳ از همین فصل شیوه‌ی اندازه‌گیری اندیس مقاومت ویژه الکتریکی ( $I_R$ ) و اشباع از آب ( $S_w$ ) برای نمونه‌های مغزه توضیح داده شد. با توجه به نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی ( $I_R$ ) در مقابل اشباع از آب ( $S_w$ ) برای چاه A1 که در شکل ۳-۳ نشان داده



شده، تغییرات اشباع‌شدگی از آب برای نمونه مغزه‌های چاه A1 بین ۱۳/۶ درصد تا ۶۰/۶ درصد با متوسط ۲۷/۳۵ درصد می‌باشد و محدوده اندیس مقاومت ویژه بین ۳ تا ۷۴ متغیر است. با توجه به شکل ۳-۳ و رگرسیون حاصل از نمودار  $I_R-S_w$ ، مقدار پارامتر توان اشباع ( $n$ ) برای ۳۷ نمونه موجود از چاه A1 برابر ۲/۰۴ محاسبه شده است. این شیب خط رگرسیون با ضریب همبستگی ( $R^2$ ) نسبتاً بالای ۹۱/۸ درصد به دست آمده است.



شکل ۳-۳: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب برای چاه A1.

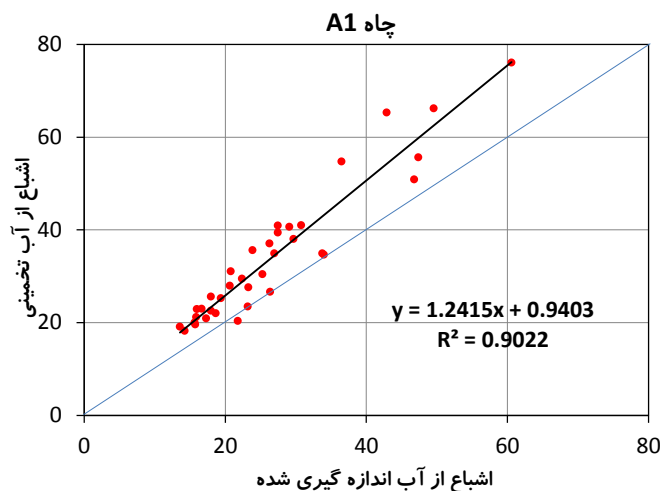
در نهایت بر اساس پارامترهای آرچی به دست آمده از طریق نمودارهای متقاطع  $F-\phi$  و  $I_R-S_w$  و به کمک رابطه آرچی، مقدار اشباع از آب در هر یک از نمونه‌ها محاسبه و با مقدار اشباع از آب اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه مقایسه شد. در شکل ۳-۴ اشباع از آب تخمین زده شده<sup>۱</sup> به کمک رابطه آرچی و پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده<sup>۲</sup> در آزمایشگاه رسم شده است. این شکل به طور واضح در اکثر داده‌ها مقداری بیش برآورد را در

<sup>1</sup> Estimated

<sup>2</sup> Measured

داده‌های تخمینی نشان می‌دهد. علاوه بر این میزان خطای حداقل مربعات<sup>۱</sup> برای داده‌های تخمینی اشباع از آب برابر ۰/۰۱۲ به دست آمده است. این خطا از رابطه (۵-۳) محاسبه می‌شود:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{ie})^2}{n} \quad (5-3)$$



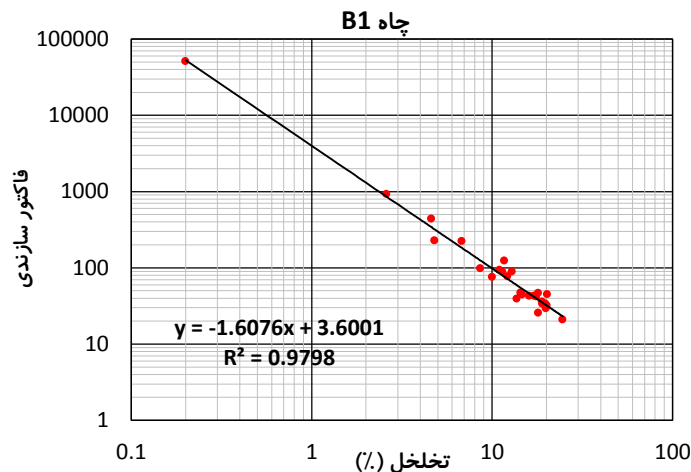
شکل ۳-۴: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه A1 به روش متداول.

#### ب- روش متداول؛ چاه B1

نوع سنگ B1 مانند چاه A1 از جنس کربناته می‌باشد. در فاصله عمقی بین ۳۳۷۲/۵ تا ۳۴۹۰/۹ از این چاه تعداد ۲۷ نمونه مغزه برداشت و مورد آزمایش قرار گرفته است. چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه شناسی این بخش از چاه، در شکل ۳-۷ آورده شده است. ستون سمت چپ از این شکل واحد زمین‌شناسی این چاه را نشان می‌دهد که تقریباً به طور کامل کربناته است. فاکتور سیمان‌شدگی سازند کربناته در این چاه با متوسط ۱/۶۰ در محدوده بین ۱/۱۲ تا ۲/۰۱ متغیر است. مقدار فاکتور سیمان‌شدگی بر اساس شیب خط رگرسیون به دست آمده در نمودار تخلخل-مقاومت ویژه سازندی، برابر ۱/۶۱ به دست آمده است. این نمودار و معادله خط رگرسیون آن در شکل ۳-۵ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است خطای نسبی فاکتور سیمان‌شدگی محاسبه شده و متوسط فاکتور سیمان‌شدگی اندازه‌گیری شده برابر ۰/۱ درصد می‌باشد که خطای بسیار کمی است.

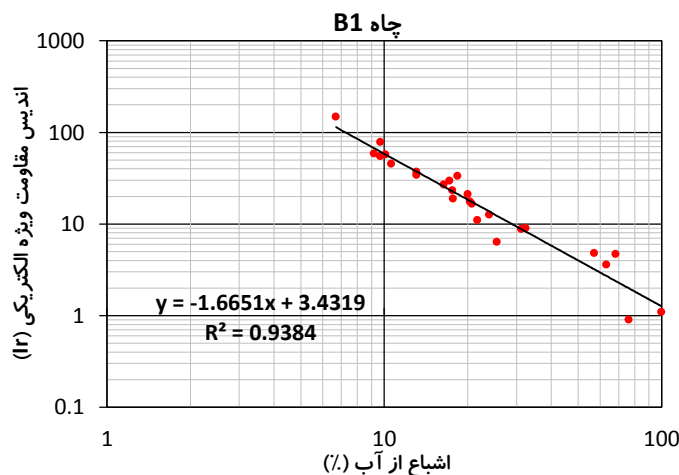
<sup>۱</sup> Mean Square Error (MSE)

علاوه بر این با توجه به عرض از مبدأ نمودار (یا رابطه خط رگرسیون در شکل ۳-۵) مقدار ضریب پیچاپیچی برابر ۳/۶۰ محاسبه شده است. در این چاه مانند چاه A1، ضریب پیچاپیچی مقدار بالایی را نسبت به مقدار متداول خود (یعنی یک) نشان می‌دهد که مؤید میزان بالای پیچاپیچی در سنگ‌های کربناته این چاه می‌باشد.



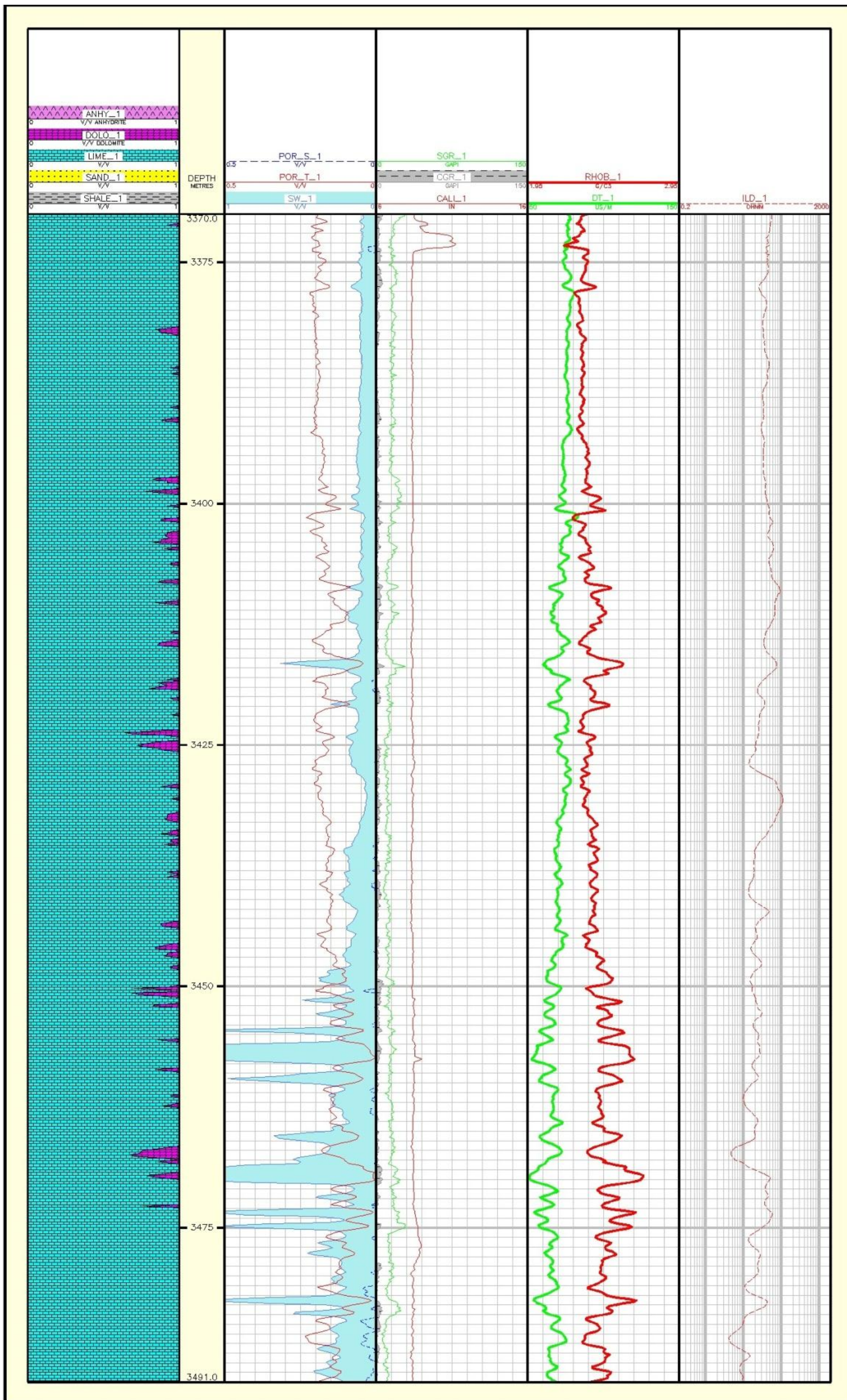
شکل ۳-۵: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت ویژه سازندی در برابر تخلخل برای چاه B1.

برای چاه B1 اندیس مقاومت ویژه الکتریکی اندازه‌گیری شده در مقابل اشباع از آب اندازه‌گیری شده برای ۲۷ نمونه مغزه موجود بر روی یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی رسم شده در شکل ۳-۶ آورده شده است. شیب خط رگرسیون حاصل از برازش بر این داده‌ها با ضریب همبستگی ( $R^2$ ) ۹۴ درصد، برابر ۱/۶۷- به دست آمده است که بیانگر فاکتور توان اشباع ۱/۶۷ می‌باشد.



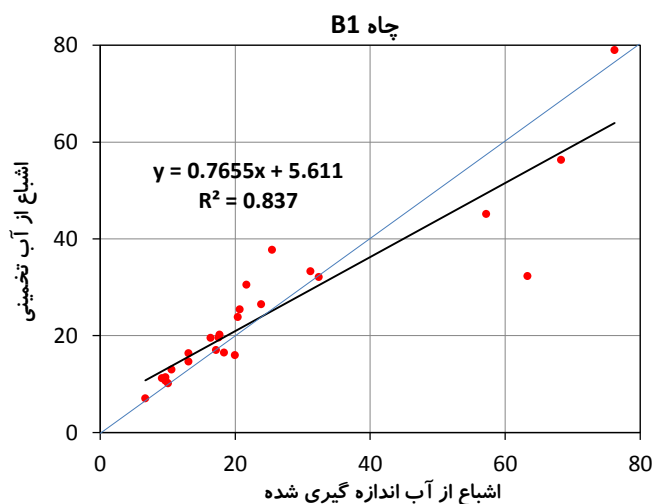
شکل ۳-۶: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب برای چاه B1





شکل ۳-۷: چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه شناسی چاه B1 که نشان دهنده سنگ کربناته است.

برای چاه B1 نیز به کمک پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول و نمودارهای مقاطع  $F002D\phi$  و  $I_R-S_w$  مقدار اشباع‌شدگی محاسبه شد. در شکل ۳-۸ مقادیر اشباع از آب تخمین زده شده به کمک رابطه آرچی و پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول در مقابل اشباع از آب اندازه‌گیری شده رسم شده است. نکته قابل توجه در این شکل برآورد مناسب اشباع از آب در نمونه‌های اشباع از آب پایین (کمتر از ۴۰ درصد) می‌باشد. در این مورد با افزایش اشباع‌شدگی دقت تخمین اشباع‌شدگی توسط رابطه آرچی و پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول کاهش یافته است. به طوری که در دو نمونه با اشباع از آب حدود ۶۰ و ۷۰ درصد مقدار خطای تخمین اشباع از آب بسیار بالاست.



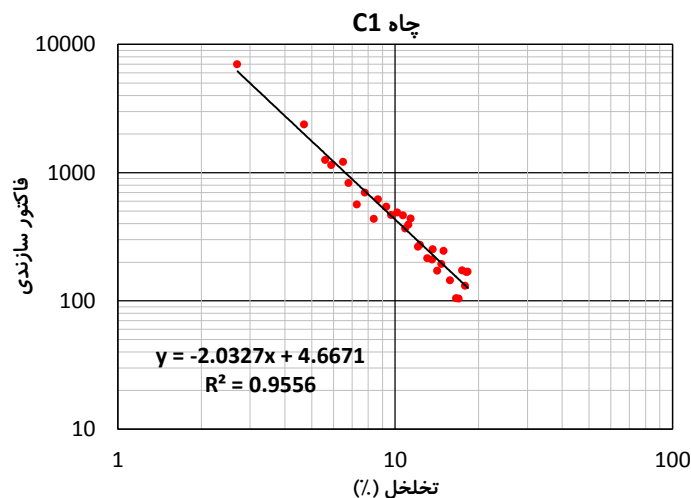
شکل ۳-۸: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه B1 به روش متداول.

### ج- روش متداول؛ چاه C1

مخزن کربناته چاه C1 در عمق بین ۳۲۰۰ تا ۳۳۲۲/۶ متری قرار گرفته است. از این بخش چاه ۳۲ نمونه مغزه انتخاب شده و مطالعات آزمایشگاهی روی آن صورت گرفته است. ستون چینه‌شناسی این بخش از چاه در سمت چپ شکل ۳-۱۱ به همراه چاه نمودارهای پتروفیزیکی آن آورده شده است. داده‌های حاصل از آزمایش‌های مربوط به فاکتور سیمان‌شدگی، نشان‌دهنده سیمان‌شدگی بیشتر سازند کربناته در این چاه نسبت به دو چاه A1 و B1 می‌باشد. متوسط فاکتور سیمان‌شدگی



سازند کربناته در چاه C1 برابر ۲/۱۲ و محدوده تغییرات آن بین ۱/۶۱ تا ۲/۳۹ متغیر است. به کمک رسم نتایج آزمایشگاهی تخلخل و فاکتور مقاومت ویژه سازندی اندازه‌گیری شده در نمودار لگاریتمی- لگاریتمی شکل ۳-۹، مقدار توان سیمان‌شدگی برابر ۲/۰۳ به دست می‌آید. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، این مقدار از شیب خط رگرسیون برازش شده بر داده‌ها محاسبه می‌شود که در این نمودار با ضریب همبستگی ۹۶ درصد به دست آمده است.



شکل ۳-۹: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی فاکتور مقاومت ویژه سازندی در برابر تخلخل برای چاه C1

خطای نسبی در محاسبه فاکتور سیمان‌شدگی سازند کربناته به روش متداول در چاه C1 نسبت به دو چاه دیگر مقدار بالاتری است و میزان آن برابر ۴/۲۵ درصد است. البته این مقدار خطا هم برای این روش قابل قبول است و دقت نسبتاً خوبی برای محاسبه اشباع از آب در رابطه آرچی دارد. فاکتور پیچاپیچی نیز با توجه به عرض از مبدأ نمودار در شکل ۳-۹ برابر ۴/۶۷ به دست آمده است. این مقدار فاکتور پیچاپیچی نشان‌دهنده میزان بالای پیچاپیچی در نمونه مغزه‌های چاه C1 می‌باشد. پیچاپیچی بالا در نمونه مغزه‌ها باعث کاهش عبور جریان الکتریکی و افزایش مقاومت ویژه سنگ می‌شود. نکته قابل توجه در این چاه بالا بودن فاکتور مقاومت ویژه سازندی است که در نمودار شکل ۳-۹ نیز محدوده تغییرات این فاکتور مشخص است. متوسط فاکتور سازندی در این چاه نسبت به دو چاه A1 و B1 بالاتر بوده و حدوداً برابر با ۶۹۰ می‌باشد. این موضوع با توجه به رابطه فاکتور سازندی

$(F = R_o/R_w)$ ، بیانگر بالا بودن مقاومت ویژه در حالت اشباع از آب کامل ( $R_o$ ) می‌باشد. یکی از علل

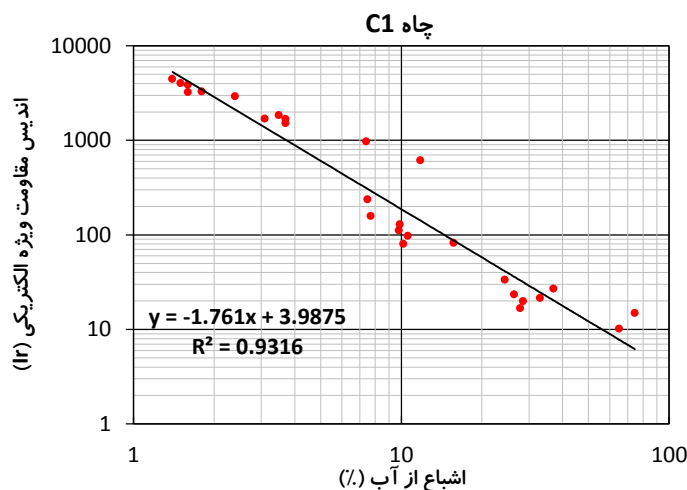
این مقاومت بالا را می‌توان در پیچاپیچی بالای مسیر جریان سیال در نمونه مغزه‌ها جستجو کرد.

در ادامه برای تعیین فاکتور توان اشباع در چاه C1 مانند دو چاه دیگر نمودار لگاریتمی-

لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در برابر اشباع از آب برای ۳۲ نمونه موجود رسم شد که در

شکل ۳-۱۰ آورده شده است. مقدار پارامتر توان اشباع به دست آمده از شیب خط رگرسیون برازش بر

این داده‌ها با ضریب همبستگی ۹۳ درصد برابر  $1/76$  می‌باشد.



شکل ۳-۱۰: نمودار لگاریتمی-لگاریتمی اندیس مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل اشباع از آب برای چاه C1.

برای چاه C1 نیز به کمک پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول (رسم نمودارهای

مقاطع) و از رابطه آرچی، میزان اشباع از آب محاسبه گردید. نتایج حاصل از آن با مقادیر

آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده مقایسه شد. شکل ۳-۱۲ نشان‌دهنده داده‌های محاسباتی به کمک رابطه

آرچی و روش متداول در برابر داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود محاسبه

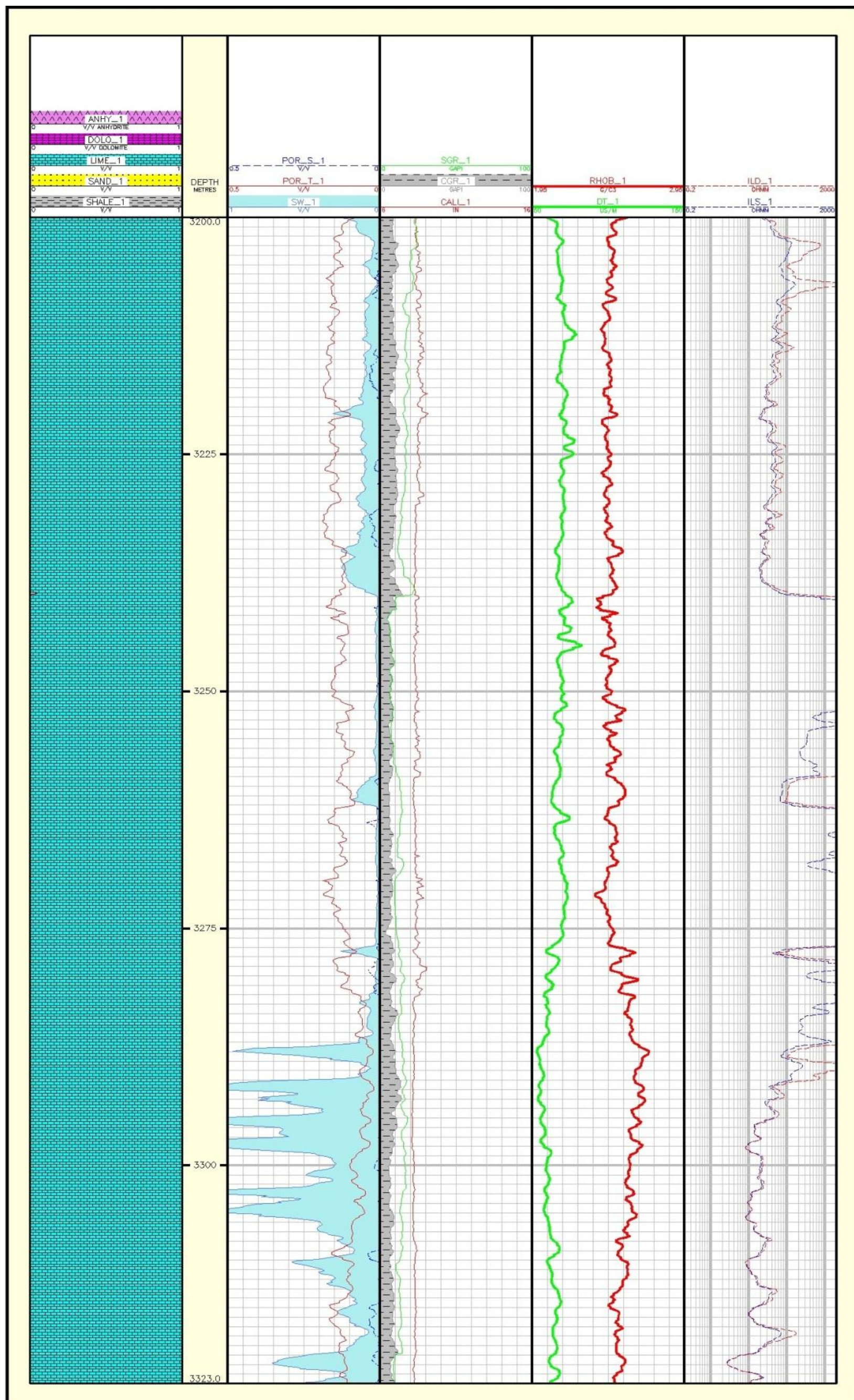
اشباع‌شدگی به این روش دارای دقت نسبتاً خوبی است. اما نکته قابل ذکر که در داده‌های چاه B1 نیز

دیده شد افزایش خطای تخمین با افزایش اشباع از آب می‌باشد. از روی شکل ۳-۱۲ به خوبی می‌توان

دید که برای نمونه‌هایی که اشباع از آب آن‌ها بین صفر تا ۲۰ درصد می‌باشد نسبت به نمونه‌هایی با

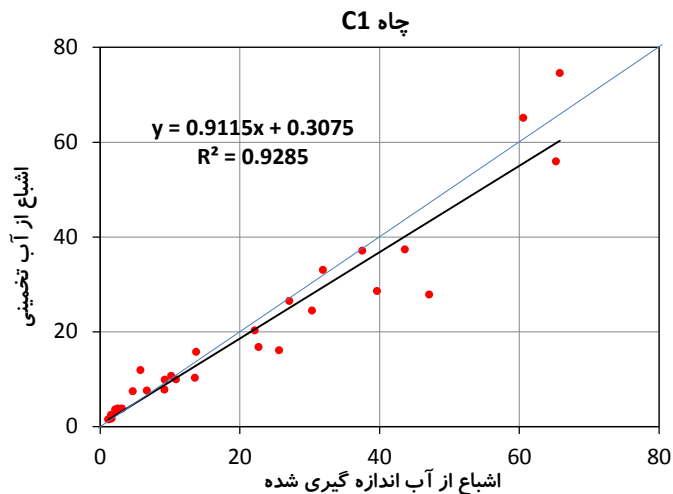
اشباع از آب ۲۰ درصد تا ۴۰ درصد تخمین بهتری صورت گرفته است.





شکل ۳-۱۱: چاه نمودارهای پتروفیزیکی و ستون چینه شناسی چاه C1 که نشان دهنده سنگ کربناته است.





شکل ۳-۱۲: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه گیری شده در چاه C1 به روش متداول.

در پایان نتایج حاصل از روش متداول برای محاسبه پارامترهای آرچی در سه چاه A1، B1 و C1 در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱: پارامترهای آرچی محاسبه شده به کمک روش متداول

چاه	سیمان شدگی	پیچاپیچی	توان اشباع	خطای نسبی تخمین فاکتور سیمان شدگی (%)	میانگین مربعات خطای تخمین اشباع از آب
A1	۱/۸۸	۳/۹۴	۲/۰۴	۱/۳۷	۰/۰۱۱۵
B1	۱/۶۱	۳/۶۰	۱/۶۷	۰/۱	۰/۰۰۵۶
C1	۲/۰۳	۴/۶۷	۱/۷۰	۴/۲۵	۰/۰۰۱۸

### ۳-۳- تعیین پارامترهای آرچی به روش رگرسیون سه بعدی

همان طور که در فصل ۲ اشاره شد پارامترهای آرچی در روش رگرسیون سه بعدی (3-D) بر اساس رابطه (۲-۱۹) و رسم یک دستگاه سه بعدی برای متغیرهای تخلخل ( $\phi$ ) اشباع از آب ( $S_w$ ) و نسبت مقاومت ویژه آب سازند به مقاومت ویژه کل ( $R_w/R_t$ ) به دست می آید. این روش در صنعت نفت چندان رایج نیست و بیشتر به عنوان یک روش تئوری در تعدادی مقالات مانند تحقیقات همدا [Hamada et al., 2002]، الدولیم و برتا [Aldoleimi and Berta, 1989] دیده می شود.

در ادامه نتایج مربوط به روش رگرسیون سه بعدی برای سه چاه A1، B1 و C1 آورده شده

است.

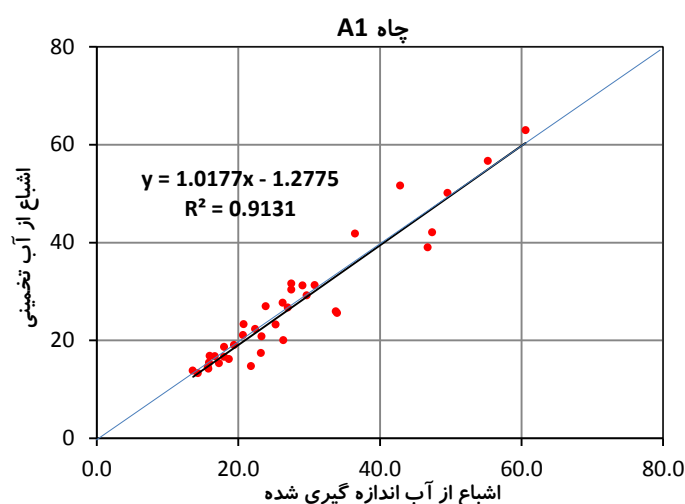
### ۳-۳-۱- روش رگرسیون سه بعدی؛ چاه A1

نتیجه حاصل از رگرسیون سه بعدی برای ۳۷ نمونه مغزه چاه A1 در جدول ۳-۲ آورده شده است. در این جدول مقدار هر یک از پارامترهای آرچی محاسبه شده به وسیله روش رگرسیون سه بعدی و میزان خطای استاندارد در محاسبه این ضرایب دیده می‌شود. در این جا خطای استاندارد، مقدار انحراف معیار خطای تخمین است. در ضمن مقادیر پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول نیز در جدول ۳-۲ آورده شده تا بهتر بتوان با نتایج حاصل از روش رگرسیون سه بعدی مقایسه کرد.

جدول ۳-۲: پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش رگرسیون سه بعدی برای چاه A1

روش متداول	خطای استاندارد روش رگرسیون سه بعدی	روش رگرسیون سه بعدی	پارامترهای آرچی
۱/۸۸	۰/۱۳	۱/۸۱	سیمان‌شدگی
۳/۹۴	۰/۱۲	۳/۸۸	پیچاپیچی
۲/۰۴	۰/۰۹	۱/۹۱	توان اشباع

در ادامه بر اساس پارامترهای آرچی دست آمده از روش رگرسیون سه بعدی و رابطه آرچی، میزان اشباع از آب در نمونه‌های چاه A1 محاسبه شده است. داده‌های اشباع از آب به دست آمده از این روش بر حسب اشباع از آب اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه رسم شده است (شکل ۳-۱۳). خط رگرسیون منطبق بر این داده‌ها با ضریب همبستگی ۹۱ درصد بسیار به یک ( $Y=X$ ) نزدیک است؛ که نشان‌دهنده تخمین خوبی از اشباع از آب توسط این روش می‌باشد. مقایسه دو شکل ۳-۴ (نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری برای چاه A1 به روش متداول) و شکل ۳-۱۳ عملکرد بهتر و دقیق‌تر روش رگرسیون سه بعدی را در تعیین ضرایب آرچی و در نهایت تخمین اشباع از آب برای چاه A1 به وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه گیری شده در چاه A1 به روش رگرسیون سه بعدی

### ۳-۲-۲- روش رگرسیون سه بعدی؛ چاه B1

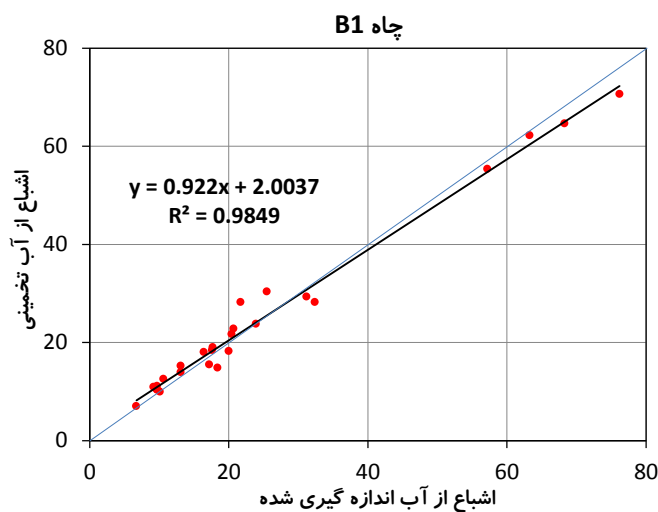
جدول ۳-۳ نتایج محاسبه پارامترهای آرچی به روش رگرسیون سه بعدی برای نمونه مغزه‌های چاه B1 را نشان می‌دهد. در این جدول نیز مانند جدول ۳-۲ به منظور مقایسه نتایج دو روش رگرسیون سه بعدی و روش متداول، پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول نیز آورده شده است. در این چاه میزان انحراف از معیار خطای تخمین (خطای استاندارد) نسبت به چاه A1 کمتر و در حدود ۰/۸ می‌باشد.

جدول ۳-۳: پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش رگرسیون سه بعدی برای چاه B1.

روش متداول	خطای استاندارد روش رگرسیون سه بعدی	روش رگرسیون سه بعدی	پارامترهای آرچی
۱/۶۱	۰/۸	۱/۴۵	سیمان‌شدگی
۳/۶۰	۰/۹	۳/۶۷	پیچاپیچی
۱/۶۷	۰/۸	۱/۷۸	توان اشباع

به منظور اعتبارسنجی پارامترهای آرچی به دست آمده از روش رگرسیون سه بعدی، در چاه B1 نیز اشباع‌شدگی به کمک رابطه آرچی و پارامترهای آرچی به دست آمده از این روش محاسبه شده، سپس اشباع‌شدگی محاسبه شده به کمک پارامترهای آرچی به دست آمده از روش رگرسیون

سه بعدی در برابر داده‌های آزمایشگاهی اشباع‌شدگی نمونه مغزه‌ها رسم گردید (شکل ۳-۱۴). در این نمودار شیب خط رگرسیون نزدیک به یک است. بنابراین از روی مقایسه این نمودار با نمودار مشابه آن که به کمک روش متداول به دست آمده بود (شکل ۳-۸)، بار دیگر نتایج دقیق‌تری در روش رگرسیون سه بعدی مشاهده شد. پارامترهای آرچی به دست آمده از روش رگرسیون سه بعدی در چاه B1 مانند چاه A1 اشباع از آب به نحو بهتری تخمین می‌زند و نتایج حاصل از این روش در این چاه نیز به مقادیر آزمایشگاهی بسیار نزدیک است.



شکل ۳-۱۴: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه B1 به روش رگرسیون سه بعدی

### ۳-۳-۳- روش رگرسیون سه بعدی، چاه C1

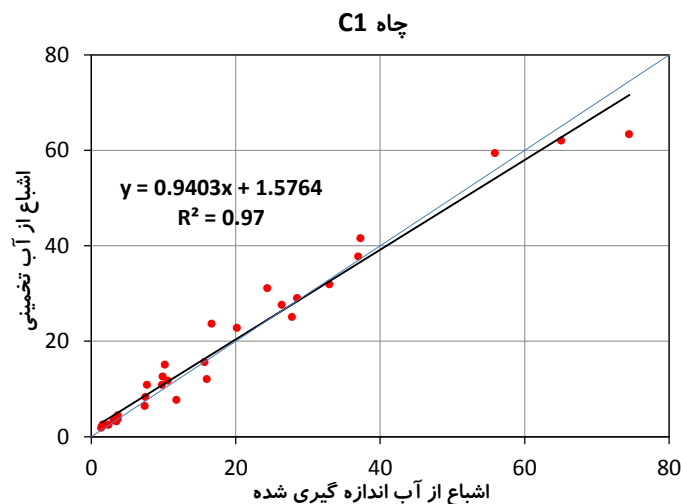
برای چاه C1 نیز مانند دو چاه A1 و B1 تمامی مراحل، جهت تعیین پارامترهای آرچی به کمک روش رگرسیون سه بعدی، صورت گرفته است. نتایج حاصل از این روش به همراه خطای استاندارد و پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش متداول در جدول ۳-۴ آورده شده است.

جدول ۳-۴: پارامترهای آرچی محاسبه شده از روش رگرسیون سه بعدی برای چاه C1.

روش متداول	خطای استاندارد روش رگرسیون سه بعدی	روش رگرسیون سه بعدی	پارامترهای آرچی
۲/۰۳	۰/۰۷	۲/۱۳	سیمان‌شدگی
۴/۶۷	۰/۱۱	۴/۸۴	پیچاپیچی
۱/۷۰	۰/۰۶	۱/۹۸	توان اشباع

با رسم نمودار اشباع از آب تخمینی به کمک پارامترهای آرچی به دست آمده از روش رگرسیون سه بعدی و اشباع از آب اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه برای چاه C1، نتایج محاسبه پارامترهای آرچی توسط رگرسیون سه بعدی مورد بررسی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. این نمودار در شکل ۱۵-۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از روی نمودار شکل ۱۵-۳ بین داده‌های اشباع از آب اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده با ضریب همبستگی ۹۷ درصد و شیب خط ۰/۹۴ دیده می‌شود، همانند دو چاه A1 و B1 اشباع از آب با دقت بالایی تخمین زده شده است. نمودار شکل ۱۵-۳ را می‌توان با شکل ۱۲-۳ مقایسه کرد و نتایج بهتر روش رگرسیون سه بعدی را نسبت به روش متداول در این چاه تأیید نمود.

در کل، روش رگرسیون سه بعدی در این سه چاه نسبت به روش متداول نتایج قابل قبول‌تری داشته است و جا دارد این روش با دقت بیشتری مورد ارزیابی قرار گیرد. به علت تأثیر پارامترهای آرچی روی یکدیگر، در این روش با اندازه‌گیری پارامترهای آرچی به صورت هم‌زمان، نتایج با دقت بالاتری به دست می‌آید؛ که این مهم در روش‌های دیگر از جمله روش متداول در نظر گرفته نمی‌شود.



شکل ۱۵-۳: نمودار اشباع از آب تخمینی در برابر اشباع از آب اندازه‌گیری شده در چاه C1 به روش رگرسیون سه بعدی

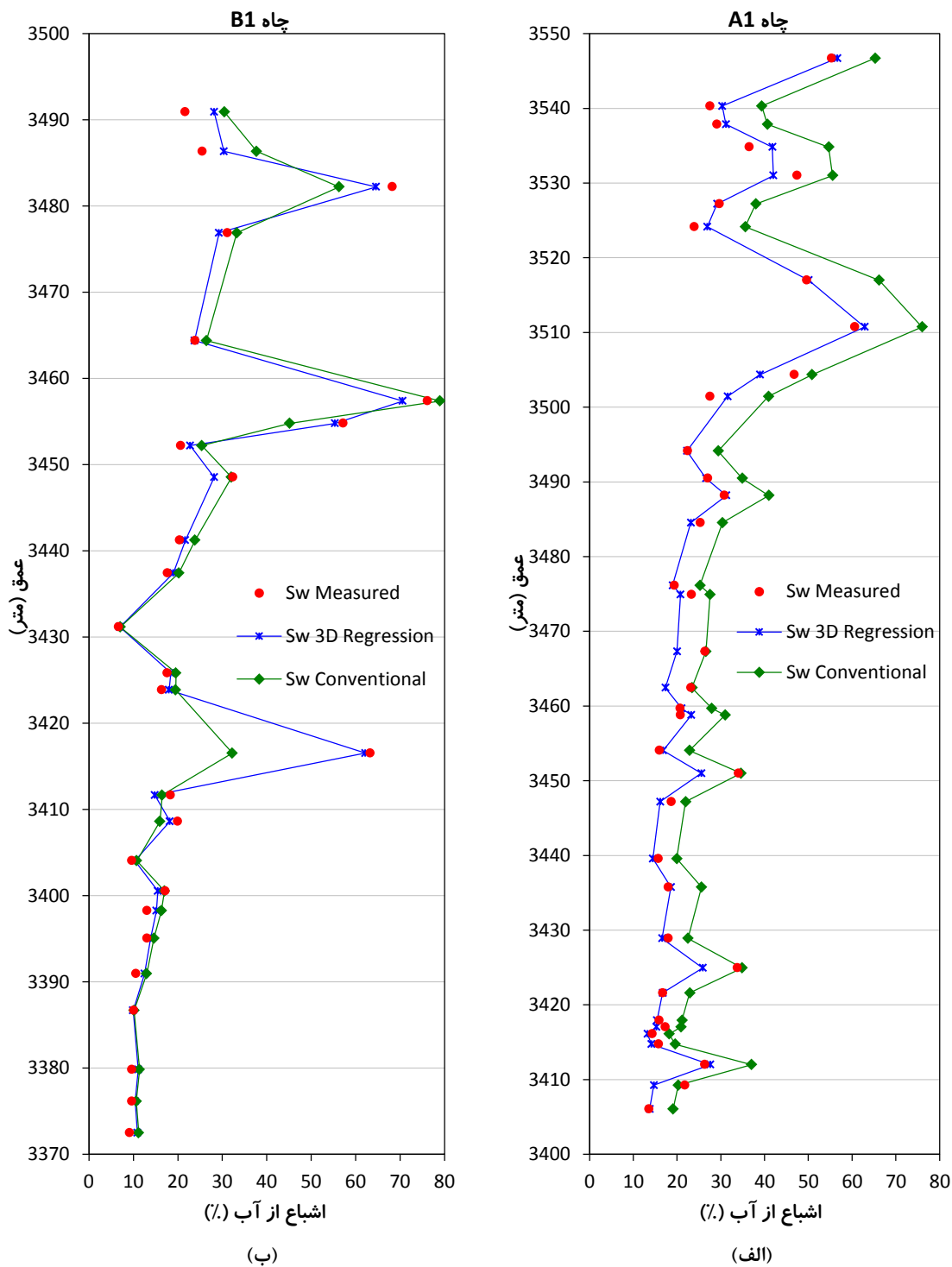
### ۳-۴- بررسی و مقایسه دو روش متداول و رگرسیون سه بعدی

از آن جایی که در داده‌های موجود، تنها فاکتور سیمان‌شدگی به صورت آزمایشگاهی در دسترس می‌باشد و امکان مقایسه و اعتبارسنجی برای فاکتور پیچاپیچی و توان اشباع به صورت مستقیم وجود ندارد؛ به کمک ضرایب آرچی به دست آمده از هر دو روش و رابطه آرچی، اشباع از آب برای هر نمونه محاسبه شد و نتایج به دست آمده از روش متداول و رگرسیون سه بعدی با مقدار واقعی و اندازه‌گیری شده آن مقایسه گردید. این مقایسه در نمودارهای ضریب همبستگی اشباع از آب و تخمینی و واقعی برای هر روش در هر چاه ارائه شده که نتایج آن در شکل‌های ۳-۴، ۳-۸ و ۳-۱۲ برای روش متداول و شکل‌های ۳-۱۳، ۳-۱۴ و ۳-۱۵ برای روش رگرسیون سه بعدی آورده شد.

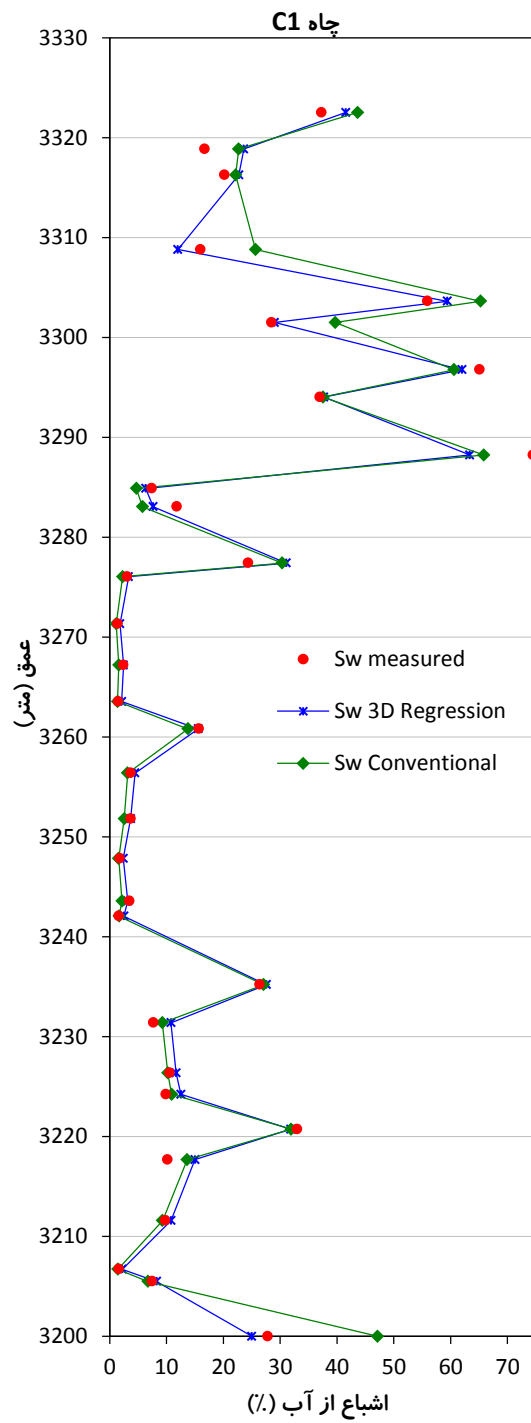
در این بخش نمودارهای اشباع از آب مربوط به سه چاه A1، B1 و C1 بر حسب عمق برای مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) و محاسباتی به روش متداول و رگرسیون سه بعدی رسم شده (شکل ۳-۱۶). سپس نتایج به دست آمده از هر روش با مقدار واقعی مقایسه شده است. در چاه A1، مقادیر اشباع از آب به دست آمده از روش متداول و رگرسیون سه بعدی اختلاف قابل توجهی دارد (شکل ۳-۱۶-الف) و در بیشتر نمونه‌ها روش متداول دارای بیش‌برآورد می‌باشد. در چاه B1 و C1 اختلاف چندانی بین نتایج به دست آمده از دو روش وجود ندارد. ولی در مجموع رگرسیون سه بعدی تخمین‌های بهتری نسبت به روش متداول دارد (شکل ۳-۱۶-ب و شکل ۳-۱۶-ج).

نکته قابل توجه دیگر در مقایسه این دو روش، نتایج دقیق‌تر روش رگرسیون سه بعدی است؛ این در حالی است که در صنعت نفت از روش متداول جهت محاسبه پارامترهای آرچی استفاده می‌شود. در پاسخ به این سؤال که چرا در صنعت نفت از روش رگرسیون سه بعدی جهت محاسبه پارامترهای آرچی استفاده نمی‌شود (با توجه به نتایج صحیح‌تر روش رگرسیون سه بعدی نسبت به روش متداول)، می‌توان گفت: لازم است این موضوع با در نظر گرفتن حالات مختلف و شرایط متفاوت و همچنین به کمک پایگاه داده‌ای کامل و دقیق‌تری مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. این احتمال وجود دارد که این روش به طور خاص در مورد داده‌های موجود از میدان F نتایج دقیق‌تری ارائه نموده

است. اما با توجه به ویژگی‌های روش رگرسیون سه بعدی و همچنین برطرف کردن بعضی از معایب موجود در روش متداول به دست آوردن چنین نتایجی نیز دور از انتظار نیست و امید است با بررسی دقیق‌تر این روش، ابعاد بیشتری از آن مشخص شود.



شکل ۳-۱۶: مقایسه نتایج اشباع از آب به دست آمده از دو روش متداول و رگرسیون سه بعدی با مقادیر واقعی در هر نمونه برای چاه الف (A1) و ب (B1)



(ج)

ادامه شکل ۳-۱۶: مقایسه نتایج اشباع از آب به دست آمده از دو روش متداول و رگرسیون سه بعدی با

مقادیر واقعی در هر نمونه برای چاه C1



فصل چهارم

استفاده از شبکه عصبی در

تعیین پارامترهای آرچی

روش شبکه‌های عصبی به طور وسیعی به منظور تخمین پارامترهای گوناگون مخازن هیدروکربوری مورد استفاده قرار گرفته است. این روش به عنوان روشی ساده و تا حدی قابل قبول برای به دست آوردن پارامترهای گوناگون مخازن مانند اشباع از آب، تخلخل، تراوایی و ... با استفاده از چاه نمودارهای پتروفیزیکی به کار برده می‌شود [لویمی، ۱۳۸۹]. اما مروری بر پژوهش‌های انجام شده در این رابطه نشان می‌دهد که تا به حال از روش شبکه‌های عصبی و به کمک چاه نمودارهای پتروفیزیکی برای تعیین ضرایب آرچی استفاده نشده است. از آن جایی که راه حل دقیقی برای تعیین پارامترهای آرچی وجود ندارد و شرایط مختلف تأثیر زیادی بر مقادیر این پارامترها دارد و در واقع، مسئله تعیین پارامترهای آرچی دارای الگویی بسیار پیچیده و مبهم است به طوری که رفتار عوامل تأثیرگذار روی آن کاملاً غیر خطی و نامشخص می‌باشد، در چنین مواردی شبکه عصبی پتانسیل بالایی در تولید نتایج با دقت قابل قبول دارد و از قابلیت و توانایی مناسبی نسبت به سایر روش‌ها در تخمین برخوردار است [لویمی، ۱۳۸۹]. به ویژه در مواردی که رابطه علت و معلولی بین داده‌های ورودی و خروجی (نتایج) نامشخص یا مبهم است.

با توجه به قابلیت روش شبکه‌های عصبی و مسئله مورد بحث، در این فصل سعی شده توانایی شبکه‌های عصبی در تخمین پارامترهای آرچی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور داده‌های سه چاه A1، B1 و C1 از میدان F مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه، انتخاب داده‌های ورودی، تعیین تعداد نرون<sup>۱</sup>ها و لایه(های) میانی، ساختار شبکه و در نهایت نتایج حاصل از آموزش و آزمون شبکه‌های عصبی آورده شده است.

---

<sup>۱</sup> Neuron

به دلیل پرهیز از تکرار مطالب از بیان مبانی و تئوری شبکه عصبی خودداری شده است. تنها به طور مختصر و کلی به اصول، قابلیت‌ها و کاربرد شبکه عصبی اشاره گردیده است. تمام محاسبات و پردازش‌ها به کمک نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> و در جعبه‌ابزار شبکه عصبی<sup>۲</sup> این نرم‌افزار صورت گرفته است.

## ۲-۴- مبانی شبکه عصبی

### ۲-۴-۱- مقدمه

یک شبکه عصبی را می‌توان به شکل یک پردازنده قوی در نظر گرفت که از واحدهای ساختاری به نام نرون تشکیل شده است؛ و این توانایی را دارد تا دانش تجربی را به خوبی برای کاربردهای بعدی ذخیره کند. این شبکه‌ها از دو جهت یادگیری و قدرت ارتباطی بین نرون‌ها (که تحت عنوان وزن‌های سیناپسی<sup>۳</sup> شناخته می‌شود) به عملکرد مغز انسان شبیه است [Bhatt, 2002].

واحد سلول اصلی و اساسی سیستم مغز، نرون می‌باشد. نرون‌ها واحد پردازش ساده می‌باشند که پیام‌های دریافتی را از طریق دندریت<sup>۴</sup> (مسیر ورودی به نرون) از نرون‌های دیگر دریافت و ترکیب می‌کنند. سپس پیام از طریق اکسون<sup>۵</sup> که به دندریت‌های تعداد زیادی نرون دیگر متصل است به نرون‌های دیگر منتقل می‌شود. هر پیامی که از دندریت‌ها به نرون وارد می‌شود از سیناپس<sup>۶</sup> یا گره سیناپسی عبور می‌کند. سیناپس‌ها واحدهای ساختاری کوچکی هستند که ارتباط بین نرون را برقرار می‌کنند به طور خلاصه آنچه مهم است ترتیب نرون‌ها و شدت سیناپس‌های بین دو نرون می‌باشد [منهاج، ۱۳۷۹].

---

<sup>1</sup> MATLAB

<sup>2</sup> Nntools (Neural Network Toolbox)

<sup>3</sup> Synaptic Weights

<sup>4</sup> Dendrite

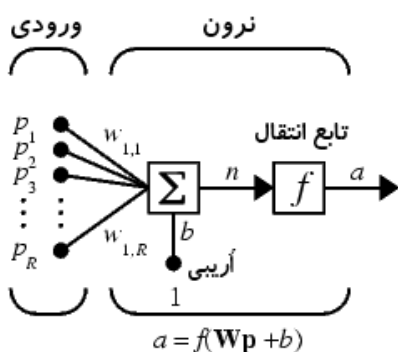
<sup>5</sup> Axon

<sup>6</sup> Synapse

#### ۴-۲-۲- ساختار شبکه عصبی مصنوعی

همان طور که اشاره شد نرون واحد اساسی سیستم عصبی مغز می باشد. به طور مشابه نیز یک نرون اساس عملکرد شبکه های عصبی را تشکیل می دهد. شکل ۴-۱ مدل یک نرون را نشان می دهد که از اجزای زیر تشکیل شده است.

- ۱- در این مدل، سیناپس ها به شکل وزن مشخص شده اند. سیگنال  $x_j$  در ورودی سیناپس  $k$ ام متصل است در وزن سیناپسی  $w_{kj}$  ضرب می شود.
- ۲- یک جمع کننده که سیگنال های وزن دار را با هم جمع می کند.
- ۳- تابع انتقال یا فعال ساز برای محدود ساختن خروجی نرون
- ۴- ضمناً این مدل نرونی دارای یک مقدار بایاس ( $b_k$ ) می باشد که بسته به این که منفی یا مثبت باشد ورودی تابع فعال ساز را کاهش یا افزایش می دهد.



شکل ۴-۱: مدل یک نرون [Beale et al., 2012]

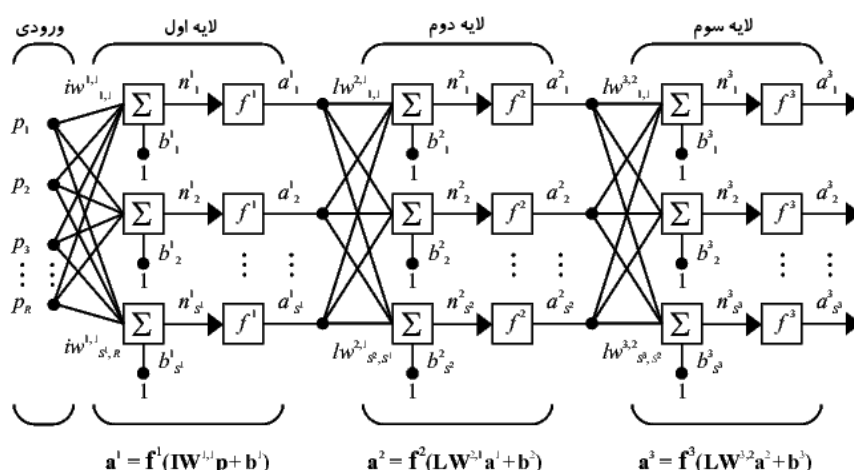
در جعبه ابزار نرم افزار متلب به صورت پیش فرض برای لایه های میانی تابع انتقال تانژانت هیپربولیک و برای لایه خروجی تابع خطی در نظر گرفته شده است [ذاکری، ۱۳۸۷]. سه نوع از توابع انتقال متداول عبارتند از: ۱- تابع دو مقدار حدی<sup>۱</sup> ۲- تابع خطی<sup>۲</sup> ۳- تابع زیگموئیدی<sup>۳</sup>. شبکه های عصبی مصنوعی ساختار لایه ای دارند و نرون ها در این لایه ها تعبیه شده اند. اولین لایه، لایه ورودی

<sup>1</sup> Hardlimit function

<sup>2</sup> Linear function

<sup>3</sup> Sigmoid function

است که صرفاً ورودی‌ها را در قسمت خروجی کپی می‌کند. لایه آخر لایه‌ی خروجی است و لایه‌های بین لایه ورودی و خروجی را لایه‌های میانی یا پنهان می‌نامند [لویمی، ۱۳۸۹]. در شکل ۲-۴ نمایی از ساختار لایه‌ای شبکه‌های عصبی مصنوعی نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: نمایی از ساختار لایه‌ای شبکه‌های عصبی مصنوعی [Beale et al., 2012].

#### ۲-۳-۴- کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در تعیین پارامترهای آرچی

روش‌هایی که به طور معمول برای تعیین پارامترهای آرچی و دیگر خصوصیات مخزنی ارائه شده است شامل فرض‌ها و شرایطی (مانند تمیز بودن یا غیر شیلی بودن سازندهای مورد مطالعه) هستند که در صورت اقناع آن‌ها، نتایج حاصل صحیح بوده و در غیر این صورت دارای خطای قابل توجهی است و نیاز به تصحیح دارند. همچنین روش‌ها و معادلاتی که از آن‌ها در این رابطه استفاده می‌شود، شامل ضرایب و عباراتی هستند که به نقطه اندازه‌گیری و سنگ‌شناسی آن وابسته است و به طور کلی ناشناخته‌اند و باید با تحلیل نمونه‌های سنگی تعیین شوند [Helle and Bhatt, 2002].

چنانچه از شبکه عصبی برای تخمین پارامترهای آرچی استفاده شود، حداقل می‌توان گفت بعد از آن که شبکه مناسبی طراحی شد، در مرحله اجرا و کاربرد، ما را از فرمول‌ها و روابطی که نیاز به تعیین و عبارات لازم دارند و همچنین تصحیحات ناشی از عدم تحقق فرض‌ها و شرایط حاکم بر روش

مورد استفاده بی نیاز می‌کند، زیرا شبکه این مورد را در مرحله آموزش آموخته و در مرحله تعمیم<sup>۱</sup>، توانایی شبکه در اعمال آن‌ها مورد آزمون قرار گرفته است.

در مواردی که راه حل‌های متعارف می‌تواند مسئله را به طور مؤثر حل کند، لزومی ندارد که از روش شبکه‌های عصبی یا هر روش هوش مصنوعی دیگر استفاده کرد؛ اما مسائل متعددی از جمله مسائل چالش‌انگیز در علوم زمین، نفت و معدن وجود دارند که برای آن‌ها این روش، راه حلی منحصر به فرد است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد شبکه‌های عصبی به کمک پایگاه بزرگ داده‌ها می‌تواند نتایج نسبتاً دقیقی ایجاد کند و در شرایط زیر قابلیت و توانایی مناسبی نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است و می‌تواند به طور مؤثر به کار رود.

۱- هنگامی که داده‌ها خطای زیادی دارند و قطعیت آن‌ها کم است.

۲- الگوی تصمیم‌گیری، بسیار پیچیده و مبهم است، به طوری که مغز انسان و روش‌های آماری استاندارد قادر به استنباط آن‌ها نیست.

۳- داده‌ها کاملاً غیر خطی، آشفته و نابسامان هستند به گونه‌ای که همه‌ی پارامترهای دخیل در یک فرآیند به خصوص شناخته شده نیستند و یا اینکه رابطه‌ی پارامترها برای مدل کردن سیستم بسیار پیچیده است و در نتیجه امکان استفاده از مدل‌سازی ریاضی وجود ندارد. داده‌های مربوط به علوم زمین در اغلب موارد چنین شرایط و پیچیدگی‌هایی را دارند و به همین دلیل در این علوم از روش شبکه عصبی مصنوعی به طور روزافزون استفاده می‌شود [Bhatt et al., 2002].

#### ۴-۲-۴- ویژگی‌های شبکه عصبی

در زیر ویژگی‌ها و مزایایی از روش شبکه‌های عصبی که آن‌را در مواجهه با داده‌هایی با شرایط مذکور در بالا توانمند و ممتاز می‌سازد آورده شده است.

---

<sup>۱</sup> Generalization

۱- قابلیت یادگیری: قابلیت یادگیری یعنی توانایی تنظیم پارامترهای شبکه وقتی که محیط شبکه تغییر می‌کند و شبکه شرایط جدید را تجربه می‌کند، با این هدف که اگر شبکه برای یک وضعیت خاص آموزش دید و تغییر کوچکی در شرایط محیطی آن (وضعیت خاص) رخ داد، شبکه بتواند با آموزش مختصر برای شرایط جدید نیز کارآمد باشد. دیگر این که اطلاعات در شبکه‌های عصبی در پارامترها ذخیره می‌گردد و هر نرون در شبکه، به صورت بالقوه از کل فعالیت سایر نرون‌ها متأثر می‌شود. در نتیجه اطلاعات از نوع مجزا از هم نبوده بلکه متأثر از کل شبکه می‌باشد [منهاج، ۱۳۷۹].

۲- پراکندگی اطلاعات در تمامی شبکه‌ها: اطلاعات و دانشی که شبکه فرا می‌گیرد، در پارامترهای شبکه مستتر می‌باشد. رابطه یک به یک بین ورودی‌ها و پارامترها وجود ندارد. به عبارت دیگر هر نرون در شبکه از کل فعالیت سایر نرون‌ها متأثر می‌باشد. بر این اساس چنان‌چه بخشی از نرون‌های شبکه حذف شوند و یا عملکرد غلط داشته باشند باز هم احتمال رسیدن به پاسخ صحیح وجود دارد. اگر چه این احتمال برای ورودی‌ها کاهش یافته ولی برای هیچ یک از بین نرفته است [منهاج، ۱۳۷۹].

۳- قابلیت تعمیم: پس از آنکه مثال‌های اولیه به شبکه داده شد، شبکه می‌تواند در مقابل یک ورودی آموزش داده نشده قرار گیرد و یک خروجی مناسب ارائه نماید. این خروجی بر اساس مکانیزم تعمیم که همانا چیزی جز فرآیند درون‌یابی نیست، به دست آید. به عبارت روشن‌تر، شبکه تابع را یاد می‌گیرد، الگوریتم را می‌آموزد و یا رابطه تحلیلی مناسبی را برای تعدادی نقاط در فضا به دست می‌آورد [منهاج، ۱۳۷۹].

۴- پردازش موازی<sup>۱</sup>: هنگامی که شبکه عصبی در قالب سخت افزار پیاده می‌شود، نرون‌هایی که در یک تراز یا لایه قرار می‌گیرند می‌توانند به طور هم‌زمان به ورودی‌های آن تراز پاسخ دهند. این

---

<sup>۱</sup> Parallel Processing

ویژگی باعث افزایش سرعت پردازش می‌شود. در واقع در چنین سیستمی وظیفه‌ی کلی بین پردازنده-های کوچک‌تر توزیع می‌گردد [منهاج، ۱۳۷۹].

۵- مقاوم بودن<sup>۱</sup>: در یک شبکه عصبی، رفتار کلی شبکه، برآیند رفتارهای محلی نرون‌های متعدد است. این ویژگی باعث می‌شود تا خطاهای محلی در خروجی نهایی تأثیر چشمگیری نداشته باشد. به عبارت دیگر، نرون‌ها در یک روند همکاری خطاهای محلی یکدیگر را تصحیح می‌کنند. این خصوصیت باعث افزایش قابلیت مقاوم بودن و تحمل‌پذیری خطا در سیستم می‌گردد [منهاج، ۱۳۷۹].

#### ۳-۴- انتخاب داده‌ها برای آموزش شبکه عصبی

به منظور آموزش شبکه از داده‌های موجود سه چاه A1، B1 و C1 میدان F استفاده شده است. از آن جایی که چاه‌های مورد مطالعه مربوط به یک منطقه و داده‌های موجود از بخش مخزن (سازند کربناته) با ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی شبیه به هم می‌باشد، داده‌های سه چاه با هم ترکیب شده و به صورت یک پایگاه داده‌ای برای آموزش شبکه آماده شده‌اند.

از طرف دیگر آموزش شبکه عصبی نیاز به پایگاه داده نسبتاً بزرگ دارد و هر چه تعداد داده‌ها بیشتر باشد می‌توان توقع نتیجه بهتری داشت. با توجه به اینکه داده‌های آزمایشگاهی موجود از هر چاه تعداد اندکی است، ناگزیر داده‌های هر سه چاه ترکیب شدند. این امر همان طور که بالا گفته شد، با توجه به ویژگی‌های مشابه سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی سه چاه قابل توجیه است. به این ترتیب با مجموع ۳۷ نمونه از چاه A1، ۲۷ نمونه از چاه B1 و ۳۲ نمونه از چاه C1، تعداد ۹۶ نمونه برای طراحی، آموزش و آزمون شبکه موجود است. داده‌های آزمون و اعتبارسنجی نیز از بین همین ۹۶ نمونه داده انتخاب می‌شود. این انتخاب را خود شبکه عصبی به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن بیشترین و کم‌ترین مقدار خروجی انجام می‌دهد. در هر نمونه تنها پارامتر سیمان‌شدگی به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده است و دیگر پارامترهای آرچی (ضریب پیچاپیچی و توان اشباع) اندازه-

---

<sup>۱</sup> Robustness



گیری نشده است. به همین دلیل از شبکه عصبی تنها برای تخمین پارامتر سیمان شدگی استفاده شده است. در واقع خروجی شبکه عصبی فاکتور سیمان شدگی و ورودی آن داده‌های چاه نمودارهای پتروفیزیکی است.

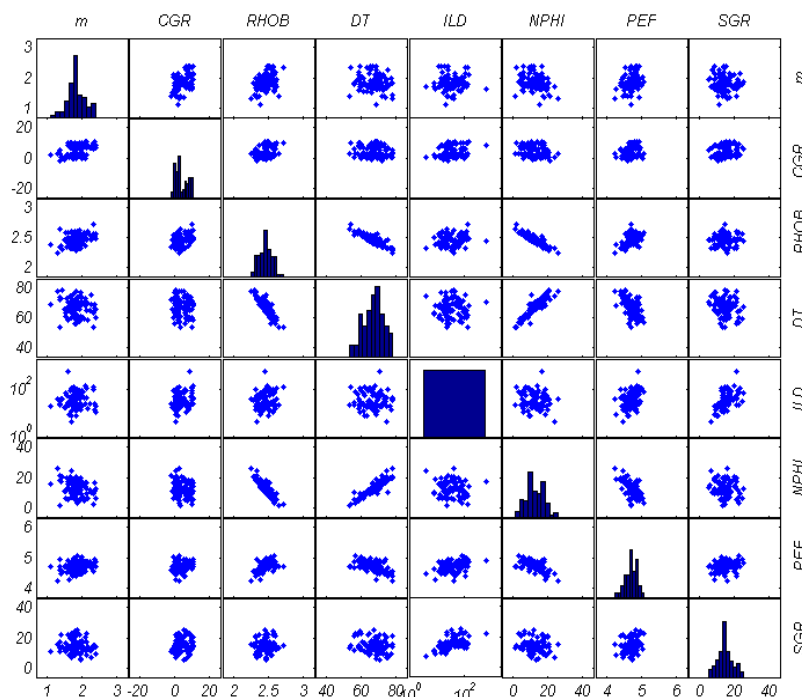
#### ۴-۳-۱- انتخاب چاه نمودارهای مناسب به منظور ورودی شبکه عصبی

همان‌طور که در فصل یک نیز اشاره شد برای هر یک از سه چاه در دسترس میدان  $F$ ، هفت چاه نمودار پتروفیزیکی مشترک شامل گامای تصحیح شده (CGR)، گامای کل (SGR)، وزن مخصوص توده (RHOB)، زمان گذر (DT)، القایی عمیق (ILD)، تخلخل نوترونی (NPHI) و اثر فوتوالکتریک (PEF) موجود است. روش یکسان و واضحی برای انتخاب چاه نمودارها به منظور داده‌های ورودی به شبکه عصبی وجود ندارد. در این مورد به منظور به دست آوردن دید کلی از داده‌های ورودی (چاه نمودارهای پتروفیزیکی) و خروجی (فاکتور سیمان شدگی) در ابتدا نمودارهای متقاطع ضریب همبستگی هر یک از چاه نمودارها با یکدیگر و همچنین هر یک از چاه نمودارها با فاکتور سیمان شدگی رسم شد. در شکل ۴-۳ نمودار ماتریسی این ضرایب همبستگی در یک دید کلی آورده شده است. به عنوان نمونه سطر اول از ستون اول در شکل ۴-۳ هیستوگرام فراوانی مقادیر فاکتور سیمان شدگی و سطرهای بعدی میزان همبستگی این فاکتور با هر یک از چاه نمودارهای پتروفیزیکی را نشان می‌دهد (سطر دوم میزان همبستگی فاکتور سیمان شدگی با گامای تصحیح شده است و به همین ترتیب سطرهای بعدی میزان همبستگی این فاکتور با دیگر چاه نمودارها را نشان می‌دهد). علاوه بر این به صورت جزئی‌تر میزان معنی‌داری هر یک از نمودارهای متقاطع ضریب همبستگی فاکتور سیمان شدگی و چاه نمودارهای پتروفیزیکی مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر  $P^1$ ، میزان معنی‌داری در سطح اعتماد ۹۵ درصد (مقدار  $P$  کمتر از ۰/۰۵ معنی‌دار است) و ضریب همبستگی ( $R^2$ ) هر یک از چاه نمودارها آورده شده است (جدول ۴-۱).

---

<sup>1</sup> P-Value

به جز چاه نمودارهای صوتی (DT) و گامای مجموع (SGR)، تمامی مقادیر P چاه نمودارها در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنی دار می‌باشند. هدف از این بررسی، به وجود آوردن دید کلی به منظور انتخاب چاه نمودارهای پتروفیزیکی (که ضریب همبستگی بالاتری را نسبت به ضریب سیمان‌شدگی نشان می‌دهند) برای آموزش شبکه عصبی می‌باشد. اما با توجه به پایین بودن ضرایب همبستگی و همچنین در نظر گرفته نشدن رابطه فیزیکی چاه نمودارها و پارامتر سیمان‌شدگی، در نهایت چاه نمودارهای مناسب برای آموزش شبکه با توجه به ارتباط فیزیکی هر یک از چاه نمودارها با پارامتر سیمان‌شدگی انتخاب شد. به عنوان مثال با توجه به ارتباط چاه نمودارهای گاما (گامای تصحیح شده و گامای کل)، وزن مخصوص، زمان گذر و تخلخل نوترونی با تخلخل سازند و رابطه مستقیم تخلخل و ضریب سیمان‌شدگی، ارتباط فیزیکی این چاه نمودارها با پارامتر سیمان‌شدگی مشخص است و می‌تواند در آموزش شبکه مؤثر باشد. اما سایر چاه نمودارها شامل چاه نمودارهای القایی عمیق و اثر فتوالکتریک ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم با تخلخل نیز دارند. به این ترتیب با بررسی‌های انجام شده هر هفت چاه نمودار موجود برای آموزش شبکه انتخاب شده و ورودی شبکه را تشکیل می‌دهند.



شکل ۴-۳: نمودار ماتریسی میزان همبستگی هر یک از چاه نمودارها و فاکتور سیمان‌شدگی

جدول ۴-۱: بررسی معنی داری نمودارهای متقاطع فاکتور سیمان شدگی و چاه نمودارهای پتروفیزیکی

معناداری در سطح اعتماد ۹۵٪	P-value	ضریب همبستگی (R <sup>2</sup> ) درصد	پارامتر مورد بررسی
✓	۹/۹×۱۰ <sup>-۶</sup>	۱۸/۸۵	CGR
✓	۰/۰۰۰۵	۱۲/۸۳	RHOB
×	۰/۱۵۵۴	۲/۱۴	DT
✓	۰/۰۱۹۹	۵/۹۹	ILD
✓	۰/۰۰۴۷	۸/۱۹	NPHI
✓	۰/۰۰۷۸	۷/۳۰	PEF
×	۰/۳۲۶۲	۱/۰۳	SGR

✓ در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنادار است.

× در سطح اعتماد ۹۵ درصد معنادار نیست.

#### ۴-۳-۲ آماده‌سازی داده‌ها

با انتخاب تمام چاه نمودارها برای ورودی و پارامتر سیمان شدگی به عنوان خروجی، هر نمونه مغزه شامل ۸ پارامتر برای آموزش می‌باشد. با توجه به عمق برداشت نمونه مغزه در چاه، داده‌های مربوط به ۷ چاه نمودار و همچنین پارامتر سیمان شدگی در همان عمق، ۸ پارامتر مورد نظر را تشکیل می‌دهند. در صورتی که دقیقاً در همان عمق مورد نظر چاه نموداری موجود نباشد<sup>۱</sup> به کمک میانگین-گیری خطی بین داده‌های یک عمق بالاتر و یک عمق پایین‌تر از عمق نمونه موجود، مقادیر هر یک از چاه نمودارها در عمق مناسب به دست می‌آید. در ضمن قبل از مشخص کردن هر یک از چاه نمودارهای ورودی در عمق مورد نظر و یا میانگین‌گیری خطی، عملیات انطباق عمق<sup>۲</sup> بین داده‌های آزمایشگاهی و چاه نمودارهای پتروفیزیکی صورت گرفته است. این کار به کمک رسم داده‌های تخلخل اندازه‌گیری شده ( $\phi$ ) و چاه نمودار تخلخل نوترونی (NPHI) انجام شده است. عملیات انطباق عمق به دلیل اختلاف عمق احتمالی ایجاد شده بین داده‌های حاصل از مغزه‌گیری و چاه نمودارهای پتروفیزیکی صورت گرفته است. در ادامه فایل مناسب داده‌های ورودی و خروجی برای آموزش شبکه در نرم‌افزار اکسل<sup>۳</sup> تهیه شد که یک ماتریس با ۹۶ سطر و ۸ ستون می‌باشد. ستون ۱ تا ۷، داده‌های

<sup>۱</sup> با توجه به این که فاصله برداشت هر نقطه در چاه ۶ اینچ (تقریباً ۱۵ سانتی متر) می‌باشد.

<sup>۲</sup> Depth matching

<sup>۳</sup> Excel

چاه نمودارهای پتروفیزیکی که به عنوان ورودی انتخاب شده و ستون هشتم پارامترهای سیمان‌شدگی اندازه‌گیری شده است؛ که به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شود. هر سطر در این ماتریس معرف داده‌های یک نمونه مغزه در یک عمق مشخص می‌باشد.

#### ۴-۴- ساختار شبکه عصبی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد طراحی و آموزش شبکه در محیط نرم‌افزاری متلب انجام گرفته و از توابع، الگوریتم‌ها و ساختارهای موجود در جعبه‌ابزار این نرم‌افزار استفاده شده است. انتخاب ساختار (معماری<sup>۱</sup>) شبکه عصبی بر اساس نوع مسئله موجود و هدف در این مسئله انتخاب شده است. ضمناً کارهای مشابه و مطالعات موجود در این زمینه نیز مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به تحقیقات موجود در زمینه‌های مشابه و استفاده از شبکه‌های عصبی در تعیین اشباع از آب، تخلخل و تراوایی به کمک چاه نمودارهای پتروفیزیکی [برای مثال Bhatt, 2002، لویمی، ۱۳۸۹ و ذاکری، ۱۳۸۷]، از شبکه‌های عصبی نوع پرسپترون چند لایه<sup>۲</sup> (MLP) به منظور آموزش و تعمیم (آزمون و اعتبارسنجی) شبکه استفاده شد. ساختار داخلی آن‌ها نیز بی توجه به مسئله مورد بررسی که نوعی برازش<sup>۳</sup> می‌باشد، انتخاب شد. در زیر سه ساختار مورد استفاده در این پایان‌نامه اشاره شده است.

---

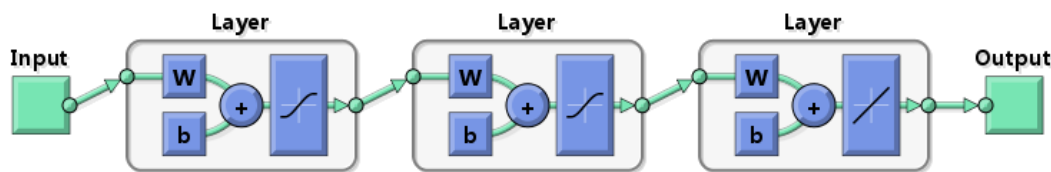
<sup>۱</sup> Architecture

<sup>۲</sup> Multilayer Perceptron (MLP)

<sup>۳</sup> Fitting

## - دستور یا ساختار newff

یک شبکه عصبی پیش‌خور پس‌انتشار خطا<sup>۱</sup> می‌باشد که در نرم‌افزار متلب با دستور newff شناخته می‌شود. در شکل ۴-۴ ساختار این شبکه به صورت شماتیک آورده شده است [MATLAB, 2011]



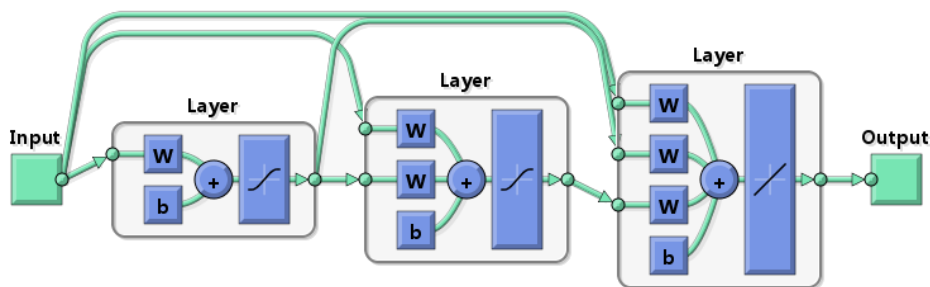
شکل ۴-۴: نمایش شماتیکی از یک شبکه پیش‌خور پس‌انتشار خطا ساده، دستور newff و newfit [MATLAB, 2011]

## - دستور یا ساختار newcf<sup>۲</sup>

یک شبکه پس‌انتشار خطا که نسبت به newff رابطه بین ورودی و خروجی را بهتر درک کرده و قابلیت آموزش بهتری دارد. این شبکه شبیه به ساختار newff است با این تفاوت که ماتریس وزن‌ها از ورودی به هر یک از لایه‌ها و از هر لایه به تک‌تک لایه‌های بعدی و دوباره از هر لایه به لایه متوالی خود متصل می‌شود. این دستور به دلیل شکل ساختاری خود به شبکه پیش‌خور پس‌انتشار خطای آبخاری معروف است. در شکل ۴-۵ ساختار شماتیک این شبکه آورده شده است و با مقایسه آن با شکل ۴-۴ تفاوت ساختاری این دستور نسبت به دستور newff مشخص است. با اضافه کردن این اتصالات بین لایه‌ها سرعت بهبود و آموزش شبکه افزایش می‌یابد [MATLAB, 2011].

<sup>۱</sup> Feed-forward backpropagation

<sup>۲</sup> Cascade-forward backpropagation



شکل ۴-۵: نمایش شماتیکی از یک شبکه پیش خور پس انتشار خطا  
آبشاری، دستور newcf [MATLAB, 2011]

### - دستور یا ساختار <sup>1</sup>newfit

این دستور در نرم افزار متلب به منظور ایجاد یک شبکه برای برازش داده ها می باشد. ساختار این شبکه از لحاظ شماتیکی مانند یک شبکه پیش خور پس انتشار خطای ساده می باشد (شکل ۴-۴) اما الگوریتم و روش ریاضی در تعیین وزن ها متفاوت است.

### ۴-۵- بهبود توان تعمیم شبکه

با شروع آموزش شبکه عصبی به کمک داده های موجود و ساختارهایی که ارائه شد در همان ابتدا مسئله بیش برازش<sup>۲</sup> دیده شد. این مسئله یکی از مشکلات رایج در آموزش شبکه های عصبی می باشد. منظور از بیش برازش این است که پس از آموزش شبکه، خطا بر روی مجموعه ی آموزشی به حداقل خود می رسد اما با ارائه ی داده های جدید به شبکه میزان خطا به مقدار قابل توجهی بالا می رود. در واقع شبکه بر روی داده های آموزشی احاطه ی کامل می یابد اما نمی تواند در قبال داده های جدید عکس العمل مناسب نشان دهد. در اصطلاح می توان گفت شبکه، عمومیت یا قابلیت (توان) تعمیم کافی ندارد.

یک روش برای بهبود توان تعمیم شبکه، استفاده از شبکه ای با ابعاد مناسب است که برازش کافی را برای داده های آموزشی در بالاترین سطح ایجاد نماید. متأسفانه انتخاب این ابعاد مناسب کار

<sup>1</sup> Fitting network

<sup>2</sup> Over fitting

بسیار دشواری می‌باشد. بنابراین باید راه‌حل‌های تازه‌ای جستجو کرد. دو راه حل برای افزایش عمومیت یا توان تعمیم شبکه در جعبه ابزارهای شبکه‌های عصبی در نظر گرفته شده است:

۱- مرتب‌سازی<sup>۱</sup>. ۲- توقف سریع<sup>۲</sup> [Beale et al., 2012 و Bhatt, 2002]. در ادامه به بررسی

این دو روش خواهیم پرداخت.

#### ۴-۵-۱- آموزش به روش مرتب‌سازی

این روش شامل اصلاح توابع کارایی که معمولاً میانگین مربعات خطا (MSE) در نظر گرفته می‌شود، می‌باشد. برای بهبود توان تعمیم می‌توان تابع کارایی را با اضافه کردن یک جمله شامل میانگین مجموع مربعات پارامترهای شبکه اصلاح نمود [Beale et al., 2012].

$$F = \gamma MSE + (1 - \gamma)MSW \quad (۱-۴)$$

که در آن

$$MSW = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_j^2 \quad (۲-۴)$$

در این دو رابطه  $MSW$  میانگین مربعات پارامترهای شبکه،  $MSE$  میانگین مربعات خطا و  $\gamma$  پارامتر مرتب‌سازی است که مقدار آن بین صفر و یک تغییر می‌کند. انتخاب تابع کارایی به این شکل باعث می‌شود شبکه وزن‌ها و بایاس‌های کوچک‌تری داشته باشد و در نتیجه پاسخ‌های آن هموارتر و احتمال بیش‌برازش کاهش می‌یابد [Beale et al., 2012].

مشکل اصلی در این روش یافتن مقدار مناسب و بهینه‌ی  $\gamma$  می‌باشد. اگر این پارامتر خیلی بزرگ در نظر گرفته شود بیش‌برازش رخ می‌دهد و اگر کوچک‌تر از حد مناسب انتخاب شود، شبکه قابلیت انطباق کافی نخواهد داشت. در نرم‌افزار متلب برای رفع این مشکل تابع  $Trainbr$  در نظر گرفته شده

<sup>۱</sup> Regularization

<sup>۲</sup> Early stopping

است. توضیح دقیق شیوهی کار این تابع فراتر از این متن می‌باشد. در استفاده از این تابع هرگاه تعداد پارامترهای مؤثر شبکه و یا مجموع مربعات خطا (SSE) و یا مجموع مربعات پارامترهای شبکه (SSW) در چند تکرار به مقدار نسبتاً ثابتی برسند، شبکه همگرا شده و آموزش پایان می‌یابد [Beale et al., 2012].

در الگوریتم Trainbr این نکته بسیار مهم است که اجازه داده شود که الگوریتم آن قدر اجرا شود تا مقدار پارامترها همگرا شوند. آموزش ممکن است با رسیدن به بیشترین  $\mu^1$  متوقف شود، که این علامت خوبی برای عملکرد درست الگوریتم می‌باشد. از طرف دیگر، زمانی که مجموع مربعات خطا، مجموع مربعات پارامترها و تعداد پارامترهای مؤثر شبکه ثابت شود، شبکه همگرا شده است [Beale et al., 2012].

#### ۴-۵-۲- آموزش به روش توقف سریع

در این روش داده‌های آموزش به دو دسته تقسیم می‌شوند. مجموعه‌ی اول همان مجموعه آموزشی است که برای محاسبه و به روز رسانی وزن‌ها و بایاس‌ها از آن استفاده می‌شود. دسته‌ی دوم به سری اعتبارسنجی موسوم است که در تعیین پارامترها نقشی ندارند ولی در طول آموزش خطای شبکه برای آن‌ها محاسبه می‌شود. خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی مانند خطای مجموعه‌ی آموزشی در مراحل اولیه‌ی آموزش کاهش می‌یابد. زمانی که شبکه شروع به بیش برآزش کند خطای مجموعه‌ی اعتبارسنجی شروع به افزایش می‌کند. وقتی که خطای اعتبارسنجی برای تعداد خاصی از تکرارها افزایش یابد آموزش متوقف می‌شود و وزن‌ها و بایاس‌های مربوط به زمانی که این خطا حداقل بود، در نظر گرفته می‌شوند. هر دو روش مرتب‌سازی و توقف سریع وقتی که به درستی به کار گرفته شوند می‌توانند قابلیت تعمیم بالای شبکه را تضمین کنند.

---

<sup>1</sup> Maximum mu reached



نکته مهم در مورد روش توقف سریع این است که نباید آن را همراه با الگوریتمی که سریع همگرا می‌شود به کار برد. اگر این امر رخ دهد پارامترهای الگوریتم مزبور باید به گونه‌ای تنظیم شوند که همگرایی کندتر صورت بگیرد.

بر اساس تجربه در مسئله‌ی تخمین تابع، و زمانی که تعداد داده‌ها کم است، روش مرتب‌سازی کارایی بهتری نسبت به روش توقف سریع دارد. دلیل این امر آن است که این روش نیازی به داده‌های اعتبارسنجی ندارد و از تمام داده‌ها استفاده می‌کند. این مزیت به خصوص وقتی که مجموعه‌ی داده‌ها کوچک است از اهمیت بیشتری برخوردار است [Beale et al., 2012].

#### ۴-۶- برنامه نویسی رایانه‌ای

همان‌طور که قبلاً اشاره شد در تمامی مراحل این تحقیق از نرم‌افزار متلب استفاده شده و تمامی برنامه‌ها در محیط این نرم‌افزار نوشته شده است. طراحی و آموزش شبکه پس انتشار خطا به دو روش مرتب‌سازی و توقف سریع انجام شد. تعداد دوره‌های تکرار<sup>۱</sup> برای آموزش شبکه در روش مرتب‌سازی ۴۰۰ دور و برای روش توقف سریع ۱۰۰۰ دور در نظر گرفته شده است. بعد از مراحل سعی و خطای طولانی تابع انتقال یا فعال‌ساز نرون‌های لایه‌های میانی، از نوع تانژانت هیپربولیک و تابع انتقال نرون‌های لایه خروجی از نوع تابع خطی انتخاب شد. در نرم‌افزار متلب نیز برای لایه‌های میانی و خروجی به ترتیب توابع انتقال تانژانت هیپربولیک و خطی به صورت پیش فرض قرار گرفته است. لازم به ذکر است اگر در لایه آخر شبکه عصبی از توابع غیر خطی مانند تانژانت هیپربولیک استفاده شود خروجی بین محدوده‌ی کوچکی قرار می‌گیرد ولی اگر از تابع انتقال خطی استفاده شود خروجی می‌تواند هر مقداری را بگیرد.

مراحل کلی این بخش از تحقیق را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد:

---

<sup>۱</sup> Epochs

الف) طراحی شبکه‌های پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی، ب) طراحی شبکه‌های پس انتشار خطا به روش توقف سریع.

در هر بخش شبکه‌هایی با یک، دو و سه لایه میانی با تعداد نرون‌های متغیر بین یک تا بیست نرون برای هر لایه ایجاد شدند. برای هر ساختار (تعداد مشخص لایه‌ها و نرون‌ها)، ۱۰ مرحله آزمون و خطا صورت گرفت تا بهترین نتیجه با معیار کم‌ترین میانگین مربعات خطا (MSE) برای داده‌های آزمون ثبت شد.

#### ۴-۷- ایجاد شبکه پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی

برای آموزش شبکه‌ها به روش مرتب‌سازی از تابع مرتب‌ساز بیزین<sup>۱</sup> استفاده شد. این شبکه‌ها با یک، دو و سه لایه میانی و تعداد نرون‌های متغیر بین ۱ تا ۲۰ نرون طی یک مرحله طولانی آزمون و خطا مورد آموزش قرار گرفت و برای هر ساختار بهترین نتیجه ثبت شد. تمامی مراحل آموزش به روش مرتب‌سازی با سه دستور newff، newcf و newfit به صورت مجزا انجام شد. نتایج مربوط به این روش برای ده ساختار اول با کم‌ترین خطا از بین ساختارهای موجود در جداول ۴-۲، ۴-۳ و ۴-۴ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ۴-۲ مشاهده می‌شود شبکه عصبی با ساختار ۳ لایه پنهان و ۶ نرون در لایه اول، ۲ نرون در لایه دوم و ۷ نرون در لایه سوم (ساختار ردیف ۱ در جدول ۴-۲) بهترین نتیجه را با دستور newff داشت. با این حال از این دستور و به کمک تابع مرتب‌ساز بیزین، با تعیین بالاتر از ۸۰ درصد بین مقدار تخمینی و آزمایشگاهی فاکتور سیمان‌شدگی در مرحله آموزش و آزمون به دست نیامده است. در شبکه بدست آمده میزان میانگین مربعات خطا برای داده آزمون در بهترین حالت برابر ۰/۰۱۹ می‌باشد.

---

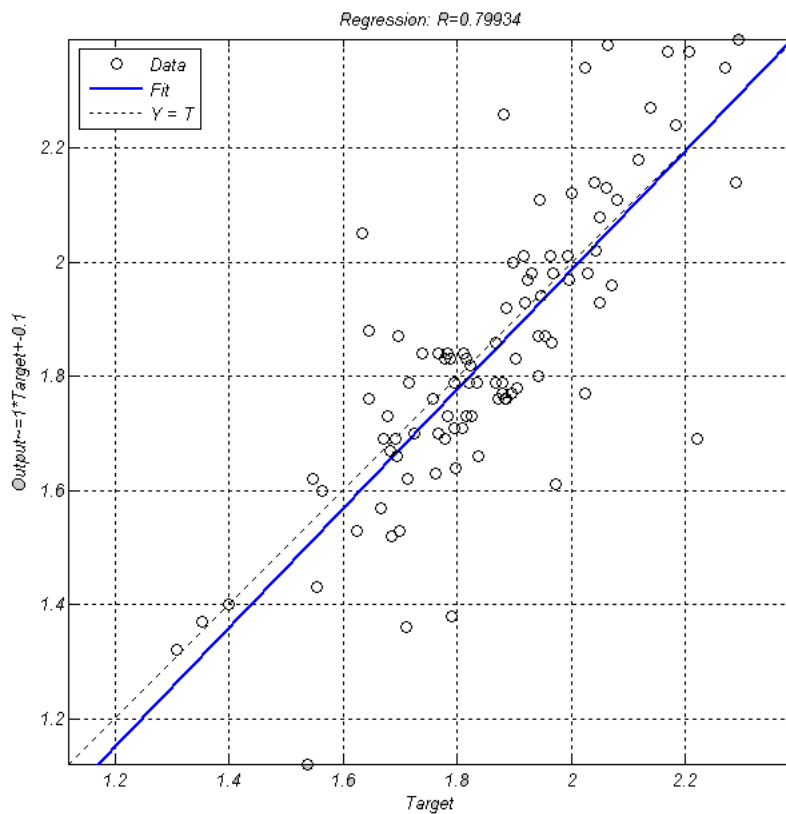
<sup>۱</sup> Bayesian regularization function

مقدار فاکتور سیمان‌شدگی تخمین زده شده با استفاده از روش شبکه های عصبی به کار گرفته شده (دستور newff) در محور قائم و مقدار فاکتور سیمان‌شدگی واقعی حاصل از کارهای آزمایشگاهی در محور افقی شکل ۴-۶ نشان داده شده است. همان طور که از روی این شکل دیده می‌شود، مقدار ضریب تعیین ( $R$ ) بین دو مقدار تخمینی و واقعی در حدود ۰/۸ بدست آمده است. با فاصله گرفتن از خط  $Y=T$  در بعضی از نمونه‌ها خطای نسبتاً بالایی در تخمین دیده می‌شود. محور افقی شکل ۴-۷ معرف نمونه‌ها یا داده‌های موجود و محور عمودی آن نشان دهنده مقدار فاکتور سیمان‌شدگی است. به منظور مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی برای هر نمونه یک مقدار واقعی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و یک مقدار تخمینی بدست آمده از شبکه عصبی در کنار هم آورده شده است.

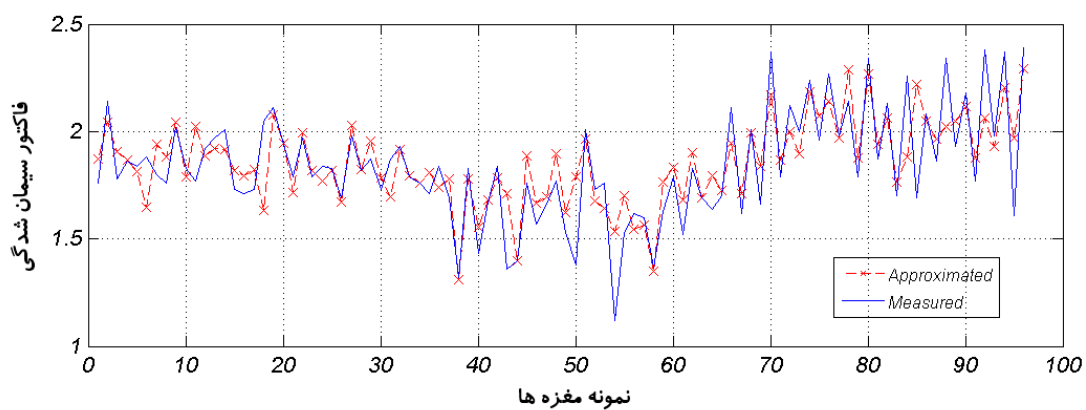
جدول ۴-۲: نتایج مربوط به شبکه پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newff

ردیف	ساختار شبکه	MSE داده‌های آموزش	ضریب تعیین داده‌های آموزش ( $R$ )	MSE داده‌های های آموزش	ضریب تعیین داده‌های های آموزش ( $R$ )
۱	۶-۲-۷	۰/۰۰۸۳	۰/۸۰۳۳	۰/۰۱۸۸	۰/۷۸۷۶
۲	۶-۱-۶	۰/۰۰۹۱	۰/۷۹۰۱	۰/۰۲۰۳	۰/۷۷۶۳
۳	۸-۵	۰/۰۰۹۳	۰/۷۷۶۱	۰/۰۲۰۸	۰/۷۶۰۹
۴	۵-۱-۹	۰/۰۰۹۸	۰/۷۶۴۵	۰/۰۲۱۴	۰/۷۴۹۸
۵	۱۳-۳	۰/۰۱۱۲	۰/۷۶۲۱	۰/۰۲۴۵	۰/۷۴۰۱
۶	۸-۹	۰/۰۱۲۰	۰/۷۵۵۳	۰/۰۲۵۹	۰/۷۳۲۱
۷	۶-۲۰	۰/۰۱۲۸	۰/۷۳۵۶	۰/۰۲۶۱	۰/۷۲۹۸
۸	۵-۳-۹	۰/۰۱۳۱	۰/۷۳۱۱	۰/۰۲۶۳	۰/۷۲۰۵
۹	۴-۷-۹	۰/۰۱۳۶	۰/۷۱۰۹	۰/۰۲۶۹	۰/۷۰۲۲
۱۰	۱۰-۸	۰/۰۱۳۷	۰/۷۰۰۲	۰/۰۲۷۱	۰/۶۸۴۹

Epochs=400, goal=0, min\_grad=1e-10, mem\_reduc=1, mu=0.001, mu\_dec=0.1, mu\_inc=10, mu\_max=1e10



شکل ۴-۶: نمودار همبستگی پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب سازی با دستور newff با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون ۶-۲-۷ برای هریک از لایه ها



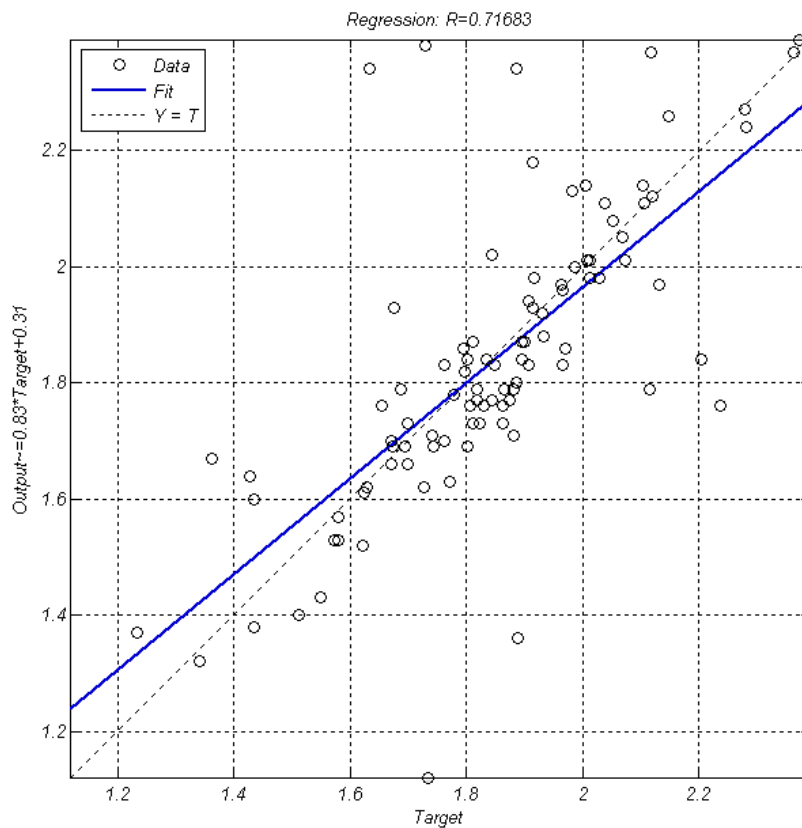
شکل ۴-۷: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب سازی با دستور newff با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون های ۶-۲-۷ برای هریک از لایه ها

با توجه به نتایج شبکه عصبی پس انتشار خطا به کمک تابع مرتب‌ساز بیزین و دستور newcf که در جدول ۳-۴ آورده شده، شبکه سه لایه با ۸ نرون در لایه اول، ۳ نرون در لایه دوم و ۱۰ نرون در لایه سوم با ضریب تعیین تقریباً ۷۱ درصد بهترین نتیجه و کمترین خطای MSE در مرحله آزمون راداشته است. نمودار ضریب همبستگی پارامتر سیمان‌شدگی داده‌های آزمایشگاهی و تخمینی برای این شبکه در شکل ۴-۸ آورده شده است که روی محور افقی آن مقادیر واقعی (آزمایشگاهی) فاکتور سیمان‌شدگی و روی محور قائم، مقادیر تخمین زده شده توسط بهترین شبکه عصبی بدست آمده از دستور newff نشان داده شده است. در ادامه مقادیر واقعی و تخمینی برای هر نمونه مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۴-۹).

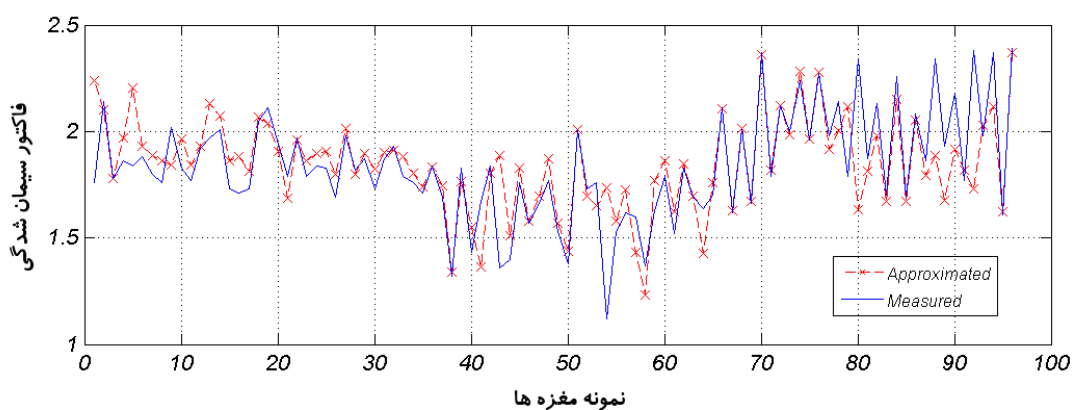
جدول ۳-۴: نتایج مربوط به شبکه پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newcf

ردیف	ساختار شبکه	MSE داده‌های آموزش	ضریب تعیین داده‌های آموزش (R)	MSE داده‌های آزمون	ضریب تعیین داده‌های آزمون (R)
۱	۸-۳-۱۰	۰/۰۱۸۳۱	۰/۷۲۰۸	۰/۰۴۳۱۶	۰/۷۰۹۸
۲	۶-۹-۴	۰/۰۱۸۸۲	۰/۷۱۰۱	۰/۰۴۳۲۱	۰/۶۹۲۸
۳	۱۲-۱۴	۰/۰۱۸۷۷	۰/۷۰۳۸	۰/۰۴۳۲۴	۰/۶۸۲۹
۴	۱-۲-۵	۰/۰۱۹۱۰	۰/۶۹۲۴	۰/۰۴۳۲۶	۰/۶۷۸۳
۵	۱-۹-۶	۰/۰۱۹۲۳	۰/۶۸۲۱	۰/۰۴۳۲۹	۰/۶۷۱۳
۶	۱۹-۶	۰/۰۱۹۲۱	۰/۶۷۹۳	۰/۰۴۳۳۰	۰/۶۶۷۸
۷	۵-۵-۲	۰/۰۱۹۳۱	۰/۶۷۰۱	۰/۰۴۳۳۵	۰/۶۶۳۶
۸	۱۵-۱	۰/۰۱۹۴۲	۰/۶۶۳۲	۰/۰۴۳۳۷	۰/۶۵۶۳
۹	۸-۹-۹	۰/۰۱۹۸۹	۰/۶۵۹۷	۰/۰۴۳۳۸	۰/۶۵۱۲
۱۰	۹-۴	۰/۰۲۱۱۹	۰/۶۳۱۲	۰/۰۴۳۴۰	۰/۶۲۳۸

Epochs=400, goal=0, min\_grad=1e-10, mem\_reduc=1, mu=0.001, mu\_dec=0.1, mu\_inc=10, mu\_max=1e10



شکل ۴-۸: نمودار همبستگی پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب سازی با دستور newcf با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون های ۱۰-۳-۸ برای هریک از لایه ها



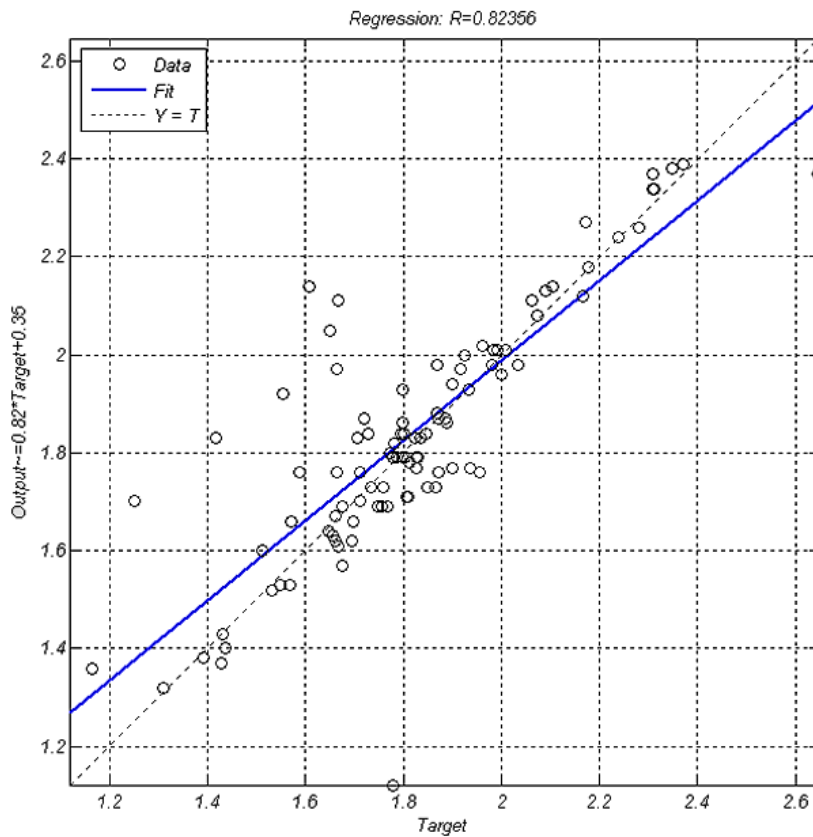
شکل ۴-۹: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب سازی با دستور newcf با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون های ۱۰-۳-۸ برای هریک از لایه ها

در نهایت شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی توسط دستور newfit آموزش داده شد. ۱۰ نتیجه برتر از بین ساختارهای مختلف آموزش داده شده در جدول ۴-۴ آورده شده است. بهترین نتیجه یعنی بالاترین ضریب تعیین (۸۱/۰۳ درصد) و کمترین MSE در مرحله آزمون، مربوط به یک شبکه با ساختار ۲ لایه پنهان که ۶ نرون در لایه اول و ۱۵ نرون در لایه دوم دارد، به دست آمده است. در این شبکه ضریب تعیین داده‌های آموزش بیش از ۸۲ درصد می‌باشد که نسبت به شبکه‌های عصبی به دست آمده از دستور newff و newcf نتیجه بهتری است. ضمناً این نتایج تنها بر اساس فرآیند سعی و خطا بدست آمده است. به کمک رسم مقادیر تخمینی روی محور افقی در مقابل مقادیر واقعی روی محور عمودی در شکل ۴-۱۰، پراکندگی کمتر داده‌ها نسبت به خط  $Y=T$  دیده می‌شود که نشان دهنده تخمین صحیح‌تر این ساختار از شبکه عصبی می‌باشد. همچنین با توجه به شکل ۴-۱۱ مقادیر واقعی و تخمینی در محاسبه فاکتور سیمان‌شدگی (محور قائم) برای هر نمونه (محور افقی) مقایسه شده است.

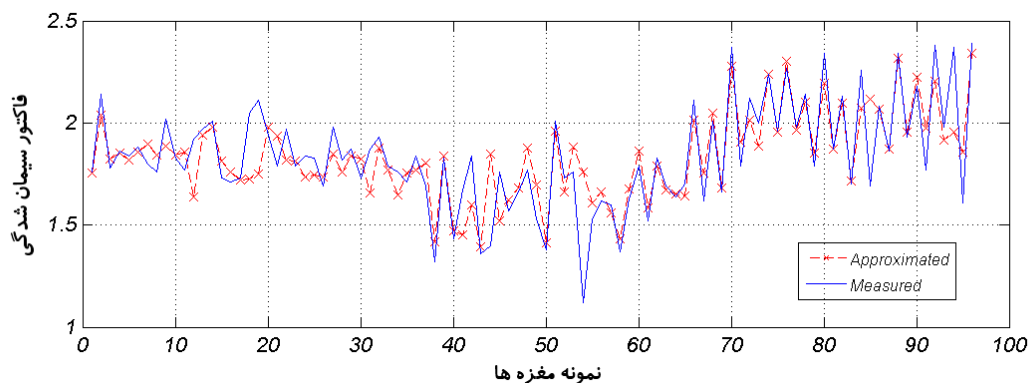
جدول ۴-۴: نتایج مربوط به شبکه پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newfit

ردیف	ساختار شبکه	MSE داده‌های آموزش	ضریب تعیین داده‌های آموزش (R)	MSE داده‌های آزمون	ضریب تعیین داده‌های آزمون (R)
۱	۶-۱۵	۰/۰۰۹۱	۰/۸۲۳۵	۰/۰۲۱۶	۰/۸۱۰۳
۲	۱۲-۱۰	۰/۰۰۹۸	۰/۸۲۲۵	۰/۰۲۲۷	۰/۸۰۹۶
۳	۹-۳	۰/۰۱۰۸	۰/۸۰۹۶	۰/۰۲۴۱	۰/۷۹۳۸
۴	۵-۳-۴	۰/۰۱۱۳	۰/۷۸۶۳	۰/۰۲۴۴	۰/۷۷۸۱
۵	۷-۵-۹	۰/۰۱۱۸	۰/۷۷۲۴	۰/۰۲۵۷	۰/۷۵۹۷
۶	۱۳-۲	۰/۰۱۲۶	۰/۷۶۴۷	۰/۰۲۶۲	۰/۷۵۲۱
۷	۵-۱-۱۰	۰/۰۱۲۹	۰/۷۵۳۱	۰/۰۲۶۶	۰/۷۴۲۳
۸	۸-۱-۵	۰/۰۱۲۹	۰/۷۵۰۱	۰/۰۲۶۷	۰/۷۳۴۸
۹	۱-۱۸	۰/۰۱۳۴	۰/۷۳۶۸	۰/۰۲۷۶	۰/۷۱۸۳
۱۰	۳-۶	۰/۰۱۳۵	۰/۷۲۹۸	۰/۰۲۷۷	۰/۷۱۰۲

Epochs=400, goal=0, min\_grad=1e-10, mem\_reduc=1, mu=0.001, mu\_dec=0.1, mu\_inc=10, mu\_max=1e10



شکل ۴-۱۰: نمودار همبستگی پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد نرون‌های ۶ و ۱۵ برای لایه‌ها اول و دوم



شکل ۴-۱۱: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش مرتب‌سازی با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد نرون‌های ۶ و ۱۵ برای لایه‌ها اول و دوم



در مجموع شبکه‌های عصبی آموزش دیده به روش مرتب‌سازی نتایج چندان مناسبی نداشته و لازم است بعضی از پارامترها مورد بررسی بیشتری قرار گیرد. شاید بتوان با تغییر پارامترها یا تغییر ترکیب شبکه‌های مختلف و یا تغییر روش هوشمند، نتایج بهتری را به دست آورد.

#### ۴-۸- ایجاد شبکه پس انتشار خطا به روش توقف سریع

برای آموزش به روش توقف سریع از تابع لونبرگ-مارکوارت<sup>۱</sup> (Trainlm) استفاده شده است. برای این تابع در روش توقف سریع پارامترهای تابع آموزش باید به گونه‌ای تعیین شود که همگرایی سریع رخ ندهد. بدین منظور پارامترهای تابع آموزش به صورت  $\mu_{dec}=0.9$ ,  $\mu=1$  و  $\mu_{inc}=1.3$  تعیین شد [Beale et al., 2012].  $\mu$  پارامتری است که میزان تغییر وزن‌ها در هر تکرار را مشخص می‌کند. ضمناً مقدار پارامتر  $\mu$  با توجه به روند همگرایی الگوریتم، ممکن است افزایش ( $\mu_{inc}$ ) و یا کاهش ( $\mu_{dec}$ ) پیدا کند که این مقادیر در  $\mu$  ضرب می‌شود. همچنین با رسیدن  $\mu$  به  $\mu_{max}$  آموزش شبکه متوقف می‌شود.

به منظور آموزش اعتبارسنجی حین آموزش و آزمون شبکه، داده‌ها به سه دسته تقسیم شدند، ۷۰ درصد برای آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی حین آموزش و ۱۵ درصد به منظور آزمون شبکه مورد استفاده قرار گرفته است. تعداد تکرارها برای این روش ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. در واقع آموزش شبکه با تکرار متوقف نمی‌شود، بلکه با بررسی روند افزایش خطا در داده‌های اعتبارسنجی<sup>۲</sup>، شبکه طی ۶ مرحله افزایش خطا متوقف می‌شود. شبکه پس انتشار خطای آموزش داده شده به روش توقف سریع نیز یک، دو یا سه لایه میانی و تعداد نرون‌های متغیر بین ۱ تا ۲۰ نرون برای هر لایه مورد آموزش قرار گرفت. هر شبکه طی ۱۰ مرحله آموزش داده شد و در هر مرحله بهترین شبکه انتخاب شد. مانند روش مرتب‌سازی، در این روش هم به کمک سه دستور newff، newcf و newfit

<sup>۱</sup> Levenberg-Marquardt

<sup>۲</sup> Validation check

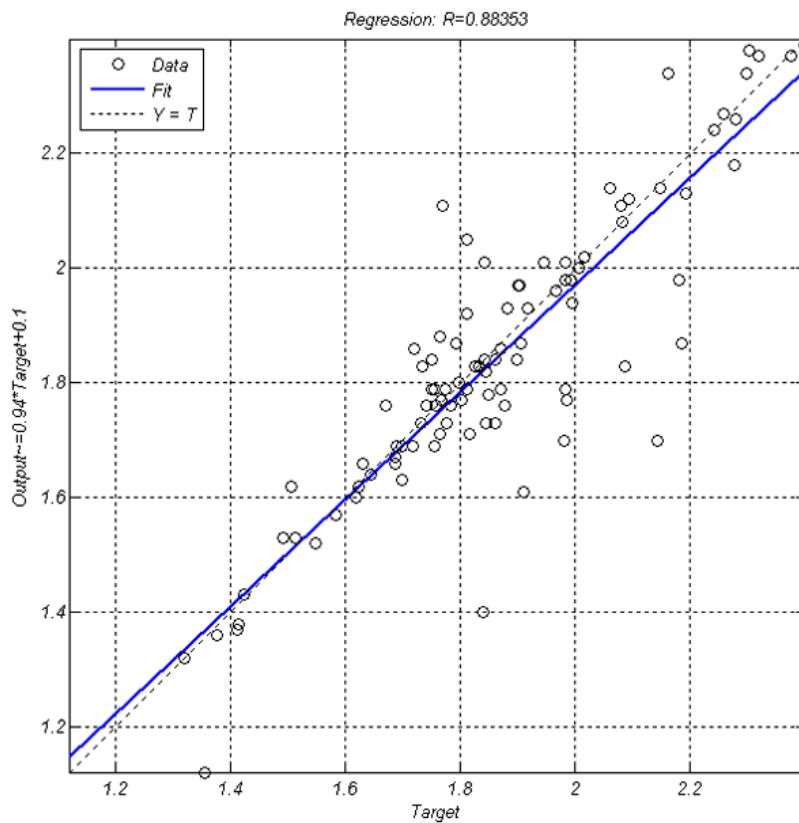
طی سه مرحله جداگانه، شبکه‌های مختلف آموزش داده شد که نتایج هر یک از آن‌ها در ادامه ارائه خواهد شد. از بین ۸۴۲۰ شبکه آموزش داده شده، در هر مرحله، نتایج ۱۰ شبکه با کمترین میانگین مربعات خطا (MSE) در جداول ۴-۵، ۴-۶ و ۴-۷ ارائه شده است.

بهترین شبکه‌ی پس انتشار خطای ایجاد شده به روش توقف سریع با دستور newff (ردیف ۱ از جدول ۴-۵) با ساختار ۲ لایه میانی به دست آمده است که لایه اول و دوم هر کدام ۱۹ نرون دارد. در این شبکه ضریب تعیین داده‌های آموزش ۹۰ درصد و میانگین مربعات خطا (MSE) ۰/۰۰۵۶ می-باشد. در مرحله آزمون شبکه، ضریب تعیین بین داده‌های واقعی و تخمینی حدوداً برابر ۸۸ درصد و MSE تقریباً ۰/۰۱۳۴ حاصل شد. با توجه به مقدار MSE بدست آمده در مرحله آزمون برای دستور newff در دو روش مرتب‌سازی و توقف سریع و مقایسه آن‌ها مشاهده می‌شود که روش توقف سریع نتایج بهتری را ارائه کرده است. شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ به ترتیب نمودارهای همبستگی و مقایسه پارامتر سیمان‌شدگی واقعی و تخمینی برای داده‌ها یا نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد.

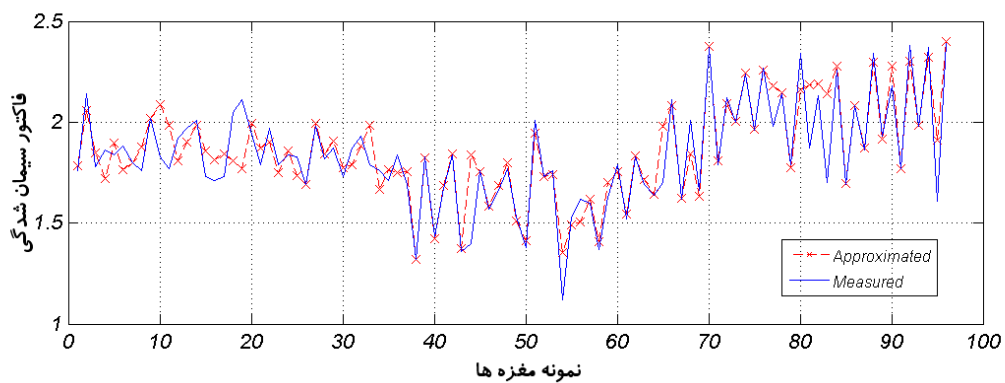
جدول ۴-۵: نتایج مربوط به شبکه پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newff

ردیف	ساختار شبکه	MSE داده‌های آموزش	ضریب تعیین داده‌های آموزش (R)	MSE داده‌های آزمون	ضریب تعیین داده‌های آزمون (R)
۱	۱۹-۱۹	۰/۰۰۵۶۱	۰/۹۰۲۳	۰/۰۱۳۳۷	۰/۸۸۱۲
۲	۲۰-۱۱	۰/۰۰۶۱۷	۰/۹۰۱۷	۰/۰۱۴۵۳	۰/۸۸۰۱
۳	۱۵-۵	۰/۰۰۶۳۴	۰/۸۹۴۶	۰/۰۱۵۶۱	۰/۸۷۲۳
۴	۱۰-۵-۲	۰/۰۰۶۷۲	۰/۸۹۱۷	۰/۰۱۵۶۵	۰/۸۶۹۳
۵	۸-۷-۹	۰/۰۰۶۸۹	۰/۸۸۹۸	۰/۰۱۵۷۹	۰/۸۶۷۵
۶	۱۱-۱۲	۰/۰۰۶۹۹	۰/۸۸۷۶	۰/۰۱۶۱۲	۰/۸۵۶۹
۷	۱۵-۱۸	۰/۰۰۷۲۱	۰/۸۸۲۳	۰/۰۱۶۱۵	۰/۸۵۴۳
۸	۱۷-۱۱	۰/۰۰۷۲۲	۰/۸۷۶۴	۰/۰۱۶۱۷	۰/۸۵۲۱
۹	۱۶-۱۴	۰/۰۰۷۲۲	۰/۸۷۱۴	۰/۰۱۶۱۸	۰/۸۴۸۳
۱۰	۸-۱۷	۰/۰۰۷۲۵	۰/۸۶۹۴	۰/۰۱۶۹۶	۰/۸۴۶۵

Epochs=1000, goal=0, min\_grad=1e-10, mem\_reduc=1, mu=1, mu\_dec=0.9, mu\_inc=1.3, mu\_max=1e10



شکل ۴-۱۲: نمودار همبستگی پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newff با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۹ نرون برای هر یک از لایه‌ها



شکل ۴-۱۳: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newff با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۹ نرون برای هر یک از لایه‌ها

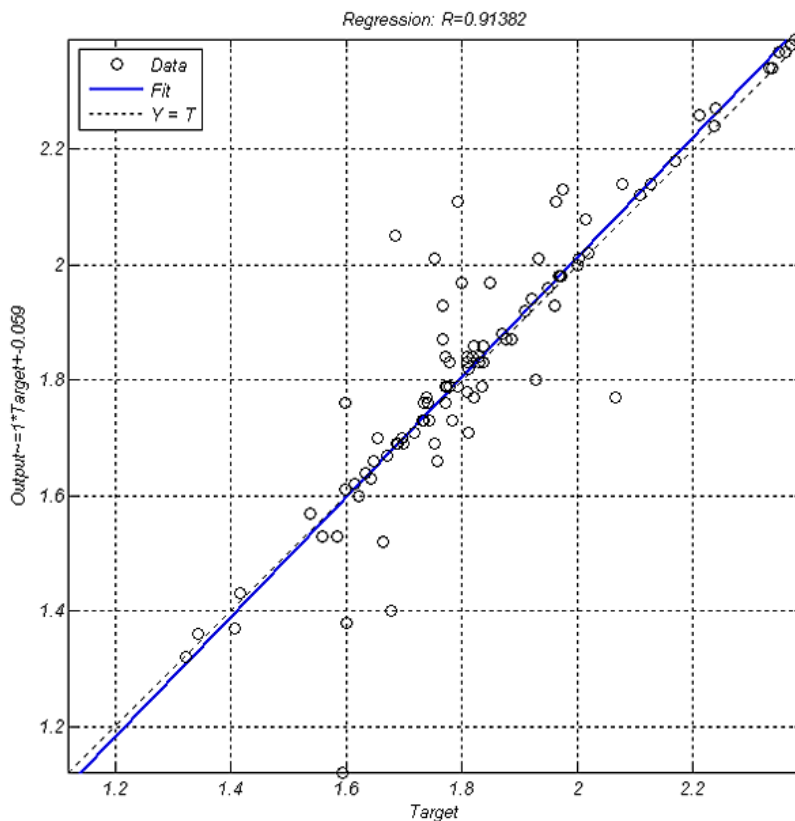
از بین ۸۴۲۰ شبکه آموزش داده شده به روش توقف سریع با دستور newcf، شبکه با ساختار سه لایه میانی که لایه اول ۵ نرون، لایه دوم ۸ نرون و لایه سوم ۲ نرون دارد، دارای کمترین میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب تعیین بین داده‌ها می‌باشد (جدول ۴-۶). برای این شبکه میانگین مربعات خطا (MSE) و ضریب تعیین به ترتیب ۰/۰۰۴۴ و ۹۲/۲ درصد برای داده‌های آموزش و ۰/۰۱۰۴ و ۹۱ درصد برای داده‌های آزمون بدست آمده است.

شکل ۴-۱۴ نمودار همبستگی داده‌های واقعی و تخمینی با ضریب تعیین ۹۱/۳ درصد، برای کل داده‌ها را نمایش می‌دهد. در این شکل نیز محور افقی داده‌های واقعی حاصل از نتایج آزمایشگاهی و محور قائم، داده‌های بدست آمده و تخمین زده شده توسط بهترین شبکه عصبی آموزش داده شده با دستور newcf و روش توقف سریع (ردیف ۱ جدول ۴-۶) است. همچنین هریک از داده‌های واقعی و تخمینی در شکل ۴-۱۵ نیز مقایسه شده‌اند که نشان‌دهنده برآورد نسبتاً خوب این شبکه می‌باشد.

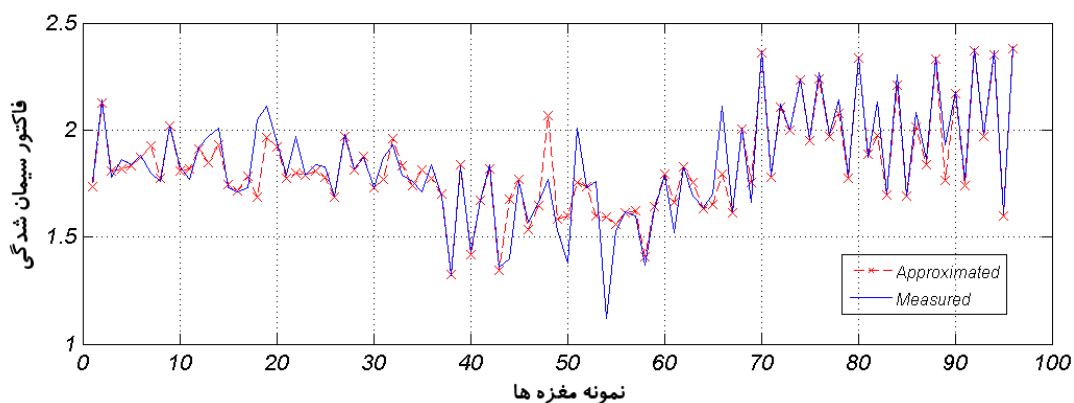
جدول ۴-۶: نتایج مربوط به شبکه پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newcf

ردیف	ساختار شبکه	MSE داده‌های آموزش	ضریب تعیین داده‌های آموزش (R)	MSE داده‌های آزمون	ضریب تعیین داده‌های آزمون (R)
۱	۵-۸-۲	۰/۰۰۴۳۶	۰/۹۲۲۶	۰/۰۱۰۴۶	۰/۹۱۰۲
۲	۱۵-۱۷	۰/۰۰۵۷۰	۰/۹۲۱۰	۰/۰۱۲۵۸	۰/۹۰۹۸
۳	۲۰-۲۰	۰/۰۰۵۷۱	۰/۹۱۸۳	۰/۰۱۲۶۰	۰/۹۰۳۷
۴	۵-۱-۷	۰/۰۰۵۸۳	۰/۹۱۳۴	۰/۰۱۲۹۴	۰/۹۰۱۳
۵	۱-۱۶	۰/۰۰۶۱۲	۰/۹۱۱۶	۰/۰۱۳۳۴	۰/۸۹۹۳
۶	۱۸-۱۹	۰/۰۰۶۲۲	۰/۹۰۸۷	۰/۰۱۳۷۵	۰/۸۹۲۷
۷	۷-۱۰-۱	۰/۰۰۶۳۹	۰/۹۰۶۴	۰/۰۱۳۸۶	۰/۸۹۱۰
۸	۱۶-۱۵	۰/۰۰۶۸۷	۰/۹۰۴۳	۰/۰۱۴۰۳	۰/۸۸۷۴
۹	۶-۵-۷	۰/۰۰۶۷۰	۰/۹۰۱۱	۰/۰۱۴۲۰	۰/۸۸۳۲
۱۰	۱۷-۲۰	۰/۰۰۶۷۹	۰/۹۰۰۳	۰/۰۱۴۴۰	۰/۸۸۲۹

Epochs=1000, goal=0, min\_grad=1e-10, mem\_reduc=1, mu=1, mu\_dec=0.9, mu\_inc=1.3, mu\_max=1e10



شکل ۴-۱۴: نمودار همبستگی پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newcf با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون های ۲-۸-۵ برای هریک از لایه ها



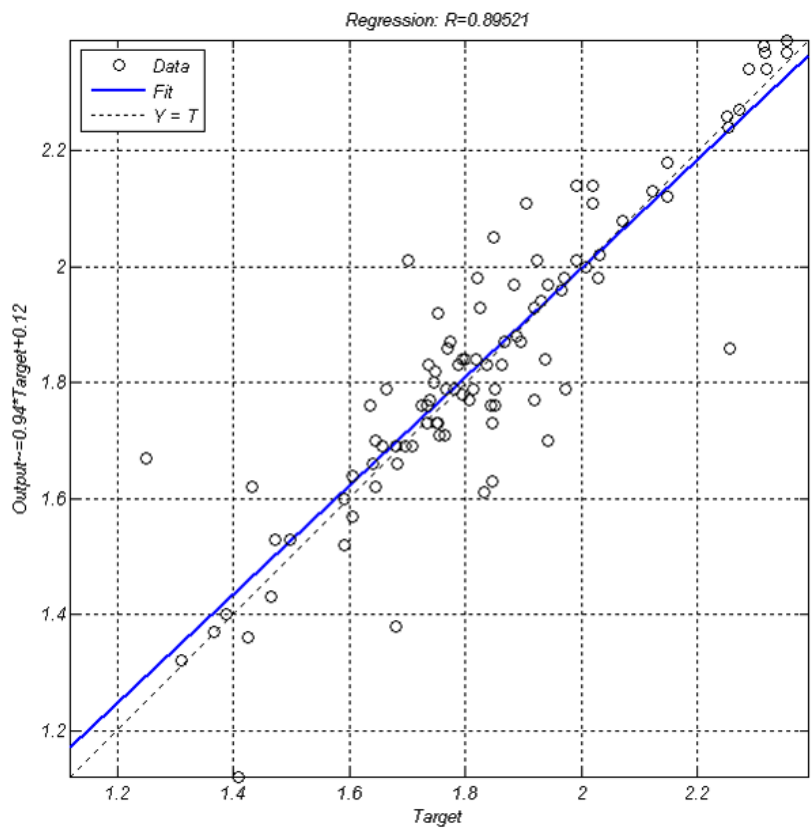
شکل ۴-۱۵: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newcf با ساختار سه لایه میانی و تعداد نرون های ۲-۸-۵ برای هریک از لایه ها

در پایان به کمک آخرین دستور (newfit) و به روش توقف سریع، شبکه‌های مختلف آموزش داده شد که ۱۰ مورد از بهترین شبکه‌های به دست آمده در جدول ۴-۷ ارائه شده است. بهترین شبکه عصبی به دست آمده دارای ۲ لایه میانی که لایه اول ۱۲ نرون و لایه دوم ۱۴ نرون دارد. میانگین مربعات خطا (MSE) این شبکه برای داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۰/۰۰۵۶ و ۰/۰۱۲۷ و ضریب تعیین آن برابر ۹۰/۳ و ۸۹/۱ درصد است. نمودار همبستگی داده‌های واقعی یا آزمایشگاهی (محور افقی) و تخمینی حاصل از شبکه عصبی (محور عمودی) کل داده‌ها برای این شبکه در شکل ۴-۱۶ آورده شده است. همچنین نمودار مقایسه مقدار واقعی و تخمینی فاکتور سیمان‌شدگی روی محور قائم برای هریک از نمونه‌ها روی محور افقی در شکل ۴-۱۷، این مقادیر مقایسه شده است.

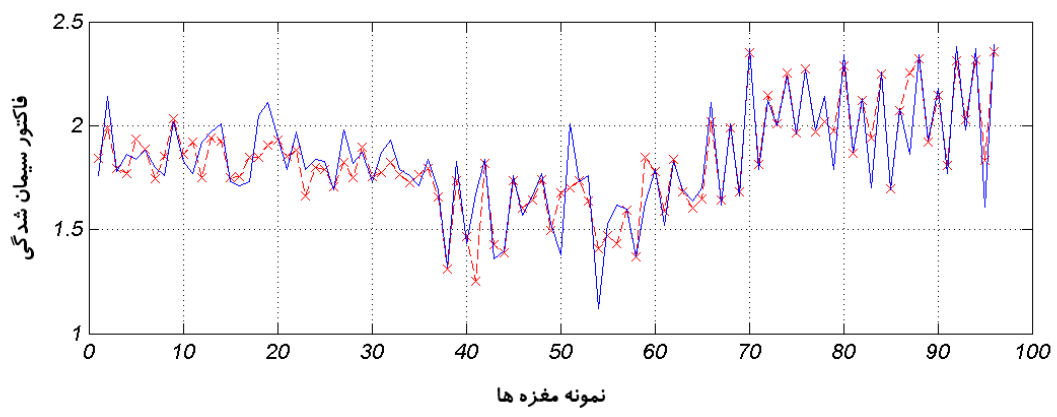
جدول ۴-۷: نتایج مربوط به شبکه پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newfit

ردیف	ساختار شبکه	MSE داده‌های آموزش	ضریب تعیین داده‌های آموزش (R)	MSE داده‌های آزمون	ضریب تعیین داده‌های آزمون (R)
۱	۱۲-۱۴	۰/۰۰۵۶۴	۰/۹۰۳۲	۰/۰۱۲۷۱	۰/۸۹۱۲
۲	۱۷-۱۴	۰/۰۰۵۹۸	۰/۹۰۱۹	۰/۰۱۳۸۲	۰/۸۹۰۱
۳	۱۹-۱۵	۰/۰۰۶۱۷	۰/۸۹۶۷	۰/۰۱۴۱۴	۰/۸۸۹۲
۴	۹-۴-۸	۰/۰۰۶۴۵	۰/۸۹۲۴	۰/۰۱۴۳۷	۰/۸۸۷۳
۵	۷-۱۴	۰/۰۰۶۸۷	۰/۸۹۱۰	۰/۰۱۵۶۳	۰/۸۸۵۴
۶	۹-۸-۷	۰/۰۰۶۹۴	۰/۸۸۹۳	۰/۰۱۵۶۴	۰/۸۸۰۳
۷	۱۷-۱۹	۰/۰۰۷۲۱	۰/۸۸۳۹	۰/۰۱۶۰۳	۰/۸۷۴۹
۸	۵-۱۸	۰/۰۰۷۳۹	۰/۸۸۱۹	۰/۰۱۶۱۶	۰/۸۷۴۶
۹	۱۳-۱۷	۰/۰۰۷۸۴	۰/۸۷۹۳	۰/۰۱۶۴۱۰	۰/۸۷۳۵
۱۰	۸-۱۰	۰/۰۰۸۰۱	۰/۸۷۶۷	۰/۰۱۷۱۸	۰/۸۶۹۸

Epochs=1000, goal=0, min\_grad=1e-10, mem\_reduc=1, mu=1, mu\_dec=0.9, mu\_inc=1.3, mu\_max=1e10



شکل ۴-۱۶: نمودار همبستگی پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۴ و ۱۲ نرون در لایه‌های اول و دوم



شکل ۴-۱۷: مقایسه مقادیر پارامتر سیمان شدگی آزمایشگاهی و تخمین زده شده توسط شبکه عصبی پس انتشار خطا به روش توقف سریع با دستور newfit با ساختار دو لایه میانی و تعداد ۱۴ و ۱۲ نرون در لایه‌های اول و دوم

از میان شبکه‌های آموزش داده شده به روش توقف سریع، بهترین شبکه با ضریب تغییرات ۹۲ درصد و میانگین مربعات خطای (MSE)  $0/0043$  برای داده‌های آموزش و همچنین ضریب تغییرات ۹۱ درصد و میانگین مربعات خطای (MSE)  $0/0104$  برای داده‌های آزمون با دستور newcf آموزش داده شده است. در مجموع شبکه‌های آموزش داده شده به کمک تابع لونیگ-مارکوارت و از روش توقف سریع نتایج بهتر و دقیق‌تری نسبت به روش مرتب‌سازی داشتند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد این نتایج به کمک فرآیند سعی و خطا بدست آمده است، همچنین بر اساس انجام و اجرای تعداد محدودی شبکه بدست آمده است و اجرای شبکه‌های عصبی متنوع و بیشتر به بهبود نتایج منجر شود. همچنین لازم است برای رسیدن به نتایج بهتر و دقیق‌تر بعضی موارد بازنگری شود. به عنوان مثال یکی از مهم‌ترین عوامل، ورودی‌های مناسب برای آموزش شبکه است. شاید بعضی از ورودی‌های ارائه شده به شبکه باعث افزایش خطا و ایجاد بایاس شود یا با ارائه ورودی‌های جدیدی بتوان فرآیند آموزش شبکه را بهبود داد. متأسفانه بعضی از چاه نمودارها که احتمالاً می‌توانست به آموزش شبکه کمک کند در دسترس نبود. برای نمونه در محاسبه پارامتر سیمان‌شدگی، فاکتور مقاومت ویژه اهمیت زیادی دارد؛ در نتیجه چاه نمودارهای مختلف الکتریکی ممکن است روند آموزش شبکه را بهبود بخشد. همان‌طور که دیده شد، تنها چاه نمودار الکتریکی موجود در آموزش شبکه‌ها در این پایان‌نامه چاه نمودار القایی عمیق بود که این مورد می‌تواند به عنوان یکی از نقاط ضعف در داده‌های ورودی باشد.

مورد دیگری که در بهبود آموزش یک شبکه عصبی می‌تواند مؤثر باشد، یک پارچه بودن داده‌های ورودی است. شاید در بعضی موارد برای داده‌های ناهمگن بتوان با خوشه‌بندی<sup>۱</sup> و دسته‌بندی داده‌های ورودی نتایج حاصل از شبکه عصبی را تا حد قابل توجهی بهبود داد. در مورد داده‌های استفاده شده در این تحقیق عملیات خوشه‌بندی تنها به منظور به دست آوردن دید کلی از داده‌ها

---

<sup>۱</sup> Clustering



صورت گرفت اما به دلیل کم بودن تعداد داده‌های ورودی به بررسی جزئی این موضوع پرداخته نشد و نتایج آن ارائه نشده است.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین پارامترها در مخازن هیدروکربوری، تعیین اشباع شدگی از آب می‌باشد. رایج‌ترین رابطه محاسبه اشباع از آب، رابطه آرچی است. از همین جهت تعیین پارامترهای آرچی یعنی فاکتورهای سیمان‌شدگی، توان اشباع و پیچاپیچی اهمیت زیادی دارد. مطالعات زیادی در رابطه با روش‌های تعیین پارامترهای آرچی انجام شده ولی تا به امروز یک روش ثابت و دقیق برای محاسبه این پارامترها ارائه نشده و با توجه به نوع منطقه، سنگ یا سازند مورد بررسی و خصوصیات دیگر، روابطی که معمولاً قابلیت تعمیم کمی دارد به دست آمده است. عمده روش‌های ارائه شده برای محاسبه پارامترهای آرچی روش‌های آماری است. در این پایان‌نامه دو روش آماری و رگرسیون سه بعدی برای تعیین پارامترهای آرچی مورد استفاده و بررسی قرار گرفته است. همچنین در انتها روش شبکه‌های عصبی نیز به عنوان یک روش جدید و کاربردی در تعیین فاکتورهای پیچیده و غیر خطی ارائه شده است.

مقدار سیمان‌شدگی محاسبه شده به روش متداول در سه چاه A1، B1 و C1 با متوسط سیمان‌شدگی در این سه چاه اختلاف بسیار جزئی و مختصری داشت. به طوری که خطای نسبی در این سه چاه به ترتیب ۱/۳۷، ۰/۱ و ۴/۲۵ درصد می‌باشد. در واقع این روش فاکتور سیمان‌شدگی را با دقت نسبتاً خوبی محاسبه کرده است. متأسفانه به دلیل در دسترس نبودن مقادیر آزمایشگاهی دو پارامتر پیچاپیچی و توان اشباع، مقایسه و اعتبارسنجی نتایج حاصل از محاسبه این دو پارامتر به روش مستقیم امکان‌پذیر نبوده است. به همین دلیل با محاسبه اشباع از آب به کمک ضرایب آرچی به دست آمده از روش متداول و رابطه آرچی، مقدار اشباع از آب در هر نمونه محاسبه و با مقدار واقعی مقایسه شده است. در مجموع چاه A1 دارای بیش‌برآورد قابل توجهی در محاسبه اشباع از آب نمونه‌های سازند کربناته (آهکی) می‌باشد که ناشی از عدم تخمین دقیق ضرایب آرچی سازند کربناته در این چاه می‌باشد. در چاه B1 نیز نمونه‌های سازند کربناته با اشباع از آب کم (کم‌تر از ۴۰ درصد) تا حدی نسبت به مقدار واقعی دارای بیش‌برآورد می‌باشد و در نمونه‌های با اشباع از آب بیشتر میزان دقت

تخمین کاهش می‌یابد. اما چاه C1 تخمین بهتری را نسبت به دو چاه دیگر داشته و به جز در چند نمونه گرفته شده از سازند کربناته در این چاه، مقادیر اشباع از آب را به خوبی تخمین زده است. نکته مشترک در تخمین اشباع از آب به کمک پارامترهای آرچی به دست آمده از روش متداول در این سه چاه، افزایش خطای تخمین با افزایش مقدار اشباع از آب است. ممکن است روش متداول، پارامترهای آرچی را به صورت جداگانه با خطای کمی تخمین بزند و در محاسبه تک تک پارامترها دقت بالایی داشته باشد، ولی به دلیل محاسبه این پارامترها به صورت مجزا، خطای تخمین در محاسبه اشباع از آب که هدف اصلی در به دست آوردن پارامترهای آرچی است؛ مقدار نسبتاً بالایی به دست آمده است. با این حال به دلیل سادگی، این روش هنوز یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها در صنعت می‌باشد.

نکته قابل توجه دیگر در محاسبه پارامترهای آرچی به روش متداول، مقادیر بالای پیچاپیچی به دست آمده در این منطقه می‌باشد. این ضریب پیچاپیچی بالا نشان‌دهنده پیچیدگی و ناهمگنی بالای نمونه سنگ‌های سازند (مخزن) کربناته می‌باشد. به عنوان مثال در چاه C1، ضریب پیچاپیچی سازند کربناته برابر  $4/67$  می‌باشد. با دقت در داده‌های آزمایشگاهی موجود و فاکتور سازندی، مقدار نسبتاً بالای فاکتور سازندی برای سازند کربناته در این چاه مشاهده می‌شود. با توجه به رابطه مستقیم مقاومت ویژه الکتریکی در حالت اشباع کامل ( $R_0$ ) با فاکتور سازندی، محدوده بالای فاکتور سازندی نشان‌دهنده مقاومت بالای نمونه مغزه در حالت اشباع کامل می‌باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش دهنده مقاومت ویژه در نمونه‌های کربناته، ضریب پیچاپیچی بالای این نمونه‌ها می‌باشد که در این مورد نیز مصداق داشته است.

اما مقایسه نتایج حاصل از روش رگرسیون سه بعدی با روش متداول، نشان می‌دهد که پارامترهای آرچی محاسبه شده از این دو روش تفاوت چندانی ندارند اما با توجه به نتایج محاسبه اشباع از آب بدست آمده از دو روش و مقایسه این نتایج با نتایج برآورد این کمیت در آزمایشگاه، دقت بالاتر روش رگرسیون سه بعدی نسبت به روش متداول را به خوبی نشان می‌دهد. در واقع تغییر اندک و ایجاد خطای کم در محاسبه یکی از پارامترهای آرچی در روش متداول باعث ایجاد خطای قابل

توجهی در محاسبه اشباع از آب در این روش شده است. همان‌طور که در فصل سوم نیز اشاره شد، یکی از مزایای روش رگرسیون سه بعدی محاسبه هم‌زمان پارامترهای آرچی می‌باشد که این موضوع می‌تواند در افزایش دقت و صحت این پارامترها نقش مهمی داشته باشد. در کل، با بررسی نمودارهای مربوط به اشباع از آب واقعی و تخمینی به دست آمده از روش رگرسیون سه بعدی (شکل‌های ۳-۱۳، ۳-۱۴ و ۳-۱۵)، ارزیابی مناسبی از این روش به دست می‌آید و نشان می‌دهد که این روش، مقدار اشباع از آب سازند یا سنگ مخزن کزیناته در هر سه چاه را به خوبی تخمین زده است.

به دلیل رفتار غیرخطی و نامشخص پارامترهای آرچی نسبت به خصوصیات مختلف نمونه‌های سنگی، روش‌های هوشمند مانند روش شبکه‌های عصبی در تعیین این پارامترها می‌تواند مؤثر باشد. در این پایان‌نامه برای اولین بار از روش شبکه‌های عصبی به عنوان یک روش جدید در تعیین فاکتور سیمان‌شدگی استفاده شد. به دلیل در دسترس نبودن داده‌های لازم مربوط به فاکتورهای توان اشباع و پیچاپیچی، تنها محاسبه فاکتور سیمان‌شدگی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور به کمک رهیافت سعی و خطا و بر اساس مطالعات مشابه، از شبکه‌های پرسپترون چند لایه (MLP) به منظور آموزش شبکه استفاده شده است. از آن جایی که شبکه در مراحل اولیه آموزش دچار مسئله متداول بیش‌برازش شد، برای حل این مسئله و بهبود توان تعمیم شبکه از دو روش مرتب‌سازی و توقف سریع استفاده شد. در هر روش نیز با سه دستور newff، newcf و newfit به صورت جداگانه شبکه‌ها آموزش داده شدند. برای آموزش شبکه از چاه نمودارهای گامای تصحیح شده، گامای کل، وزن مخصوص توده، زمان گذر، القایی عمیق، تخلخل نوترونی و اثر فوتوالکتریک به عنوان ورودی و فاکتور سیمان‌شدگی به عنوان خروجی استفاده شد.

با توجه به ساختارهای محدود شبکه‌های عصبی مصنوعی و اجرای محدود این شبکه‌ها بر روی داده‌های این تحقیق، مشخص شد که در کل، روش توقف سریع به کمک الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت نتایج بهتری نسبت به روش مرتب‌سازی داشته است. در این روش بهترین شبکه آموزش داده شده با دستور newcf به دست آمد که دارای ضریب تعیین ۹۱ درصد برای داده‌های آزمون می‌باشد. در این

شبکه میانگین مربعات خطا (MSE) برای داده‌های آزمون با ساختار سه لایه میانی و تعداد ۵، ۸ و ۲ نرون به ترتیب برای لایه‌های اول، دوم و سوم برابر  $0/0104$  به دست آمده است. در مجموع بهترین شبکه‌های به دست آمده در روش توقف سریع با ضریب تعیین برای داده‌های سیمان‌شدگی واقعی و تخمینی در حدود ۸۸ درصد و میانگین مربعات خطای  $0/013$  برای داده‌های آزمون می‌باشد. این در حالی است که ضریب تعیین داده‌های واقعی و تخمینی در بهترین شبکه‌ها به روش مرتب‌سازی حدود ۸۱ درصد با MSE  $0/021$  برای داده‌های آزمون می‌باشد.

یکی از ویژگی‌های استفاده از شبکه عصبی در تعیین ضرایب آرچی به کمک چاه نمودارهای پتروفیزیکی، محاسبه این پارامترها به ازای فواصل کم در چاه می‌باشد. در واقع در هر قسمتی از یک چاه که چاه نمودارهای مناسب برای ورودی شبکه موجود باشد می‌توان مقادیر پارامترهای آرچی را محاسبه کرد. به عنوان نمونه در چاه‌های مورد بررسی در این پایان‌نامه فاصله برداشت چاه نمودارها  $15/2$  سانتی متر می‌باشد. در نتیجه می‌توان برای هر  $15/2$  سانتی متر یک مقدار سیمان‌شدگی مجزا به دست آورد. این ویژگی باعث محاسبه بهتر و دقیق‌تر اشباع از آب در عمق‌های مختلف چاه می‌شود؛ که البته نیاز به آموزش شبکه‌ای با صحت، دقت و قدرت تعمیم بالا دارد.

## ۵-۲- پیشنهادها

- محدودیت‌های داده‌های موجود در مطالعه اخیر باعث مبهم ماندن ابعاد و جنبه‌های بسیاری چه در روش‌های آماری و چه در روش شبکه‌های عصبی شده است. با در دست داشتن یک پایگاه داده‌ای مناسب‌تر که حاوی نتایج آزمایشگاهی فاکتورهای پیچاپیچی و توان اشباع نیز باشد می‌توان دو روش آماری به کار رفته در این پایان‌نامه را با دقت بالاتری اعتبارسنجی کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود از روش تخمین پارامترهای آرچی مغزه که در فصل ۲ به آن اشاره شد، هر یک از این پارامترها محاسبه شود و با دو روش دیگر مقایسه گردد.

- در روش رگرسیون سه بعدی با خطی کردن رابطه آرچی به کمک لگاریتم گرفتن و رسم آن در یک دستگاه سه بعدی، پارامترهای آرچی محاسبه می‌شود. در صورتی که به دلیل غیر خطی بودن رابطه آرچی، می‌توان به کمک الگوریتم‌های بهینه‌ساز غیرخطی مانند الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت پارامترهای آرچی را محاسبه کرد. لذا پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های بهینه‌ساز غیر خطی مانند الگوریتم لونیبرگ-مارکوارت برای ارزیابی و تعیین پارامترهای آرچی استفاده نمود.

- با توجه به نتایج شبکه عصبی نیاز است به منظور بهبود شبکه پارامترهای شبکه بازنگری شود. ضمناً با داشتن یک پایگاه داده‌ای کامل تر و ارائه ورودی‌های مناسب‌تر، می‌توان به آموزش بهتر شبکه کمک کرد. همچنین برای کاهش خطا و بهبود نتایج شبکه عصبی به جای استفاده از بهترین شبکه منفرد، حاصل از فرآیند آزمون و خطا، پیشنهاد می‌گردد نتایج چندین شبکه عصبی مصنوعی ترکیب شود. به عنوان مثال می‌توان از ترکیبات آنسامبلی و مدوله‌ای شبکه‌های عصبی استفاده کرد. علاوه بر این استفاده از روش‌های هوشمند دیگر مانند الگوریتم ژنتیک می‌تواند در تعیین بهینه ضرایب آرچی مؤثر باشد.

- همان‌طور که اشاره شد همگن بودن و یک‌پارچگی داده‌های ورودی در بهبود آموزش شبکه بسیار مهم و تاثیر گذار است. یکی از راه‌های بدست آوردن داده‌های همگن خوشه‌بندی و دسته‌بندی داده‌های ورودی است. پیشنهاد می‌شود یک بار دیگر با خوشه‌بندی داده‌ها مراحل آموزش شبکه تکرار شود و با نتایج بدست آمده از داده‌های دسته‌بندی نشده مقایسه شود. البته این موضوع نیاز به یک پایگاه بزرگ داده دارد.

- در این تحقیق مباحث و موارد زیادی وجود دارد که می‌توان به عنوان مسئله حل نشده و یک موضوع تحقیقاتی به آن پرداخت. در این جا تنها به گوشه‌ای از این موارد اشاره شده است.

## منابع

### منابع فارسی

بختیاری ح، کاظمزاده ع، ولی ج، اصفهانی م ر، (۱۳۸۸)، نقش تخلخل‌های غیر مرتبط در تعیین ضریب سیمان‌شدگی و تاثیر فشار همه جانبه بر آن در یکی از مخازن کربناته ناهمگن ایران، **مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۵، شماره ۳، صفحه ۴۵-۵۲.**

ذاکری م، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تخمین نخلخل سنگ مخزن کنگان در میدان پارس جنوبی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی کمیته‌ای"، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رضایی م ر، چهارزی ع، (۱۳۸۹)، "اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

کاظمزاده ع، نبی‌بیدهدی م، کرامتی م، رضایی م ر، سعادت ک، (۱۳۸۶)، تعیین ضرایب آرچی در پتروفاسیس‌های متفاوت سنگ‌های کربناته، با استفاده از نگارهای انحراف سرعت امواج ارزه‌ای، **مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۳، شماره ۱، صفحه ۵۱-۶۶.**

لویمی م، (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بهینه سازی پاسخ شبکه عصبی کمیته‌ای در تخمین اشباع از آب مخزن توسط الگوریتم ژنتیک"، دانشگاه صنعتی شاهرود.

منهاج م ب، (۱۳۷۹)، "مبانی شبکه‌های عصبی"، جلد اول، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران.

### منابع لاتین

Adisoemarta P.S., Anderson G.A., Frailey S.M. and Asquith G.B., (2000), Historical use of m and a in well log interpretation: is conventional wisdom backwards?, SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, 21-23 March 2000, Midland, Texas.

Aldoleimi A.M. and Berta D., (1989), "A New Technique for Deriving the Resistivity Parameters of Archie's Equation from Combination of Logs and Core Measurements", Paper SPE 17942, SPE Middle East Oil Technical Conference and Exhibition held in Manama, Bahrain, March 11-14.

Amyx J.W., Bass D.M. and Whiting R.L., (1960), "**Petroleum reservoir engineering**", McGraw-Hill Book Co., New York.

Anderson, W.G., (1986), "Wettability Literature Survey – Part 3: The Effect of Wettability on the Electrical Properties of Porous Media", **JPT**, Volume 38, Number 12, pp 1371-1378.



- Archie G.E., (1942), "The electrical resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics", **Transactions of the AIME**, Vol. 146, No. 1, pp 54-62.
- Atkins E.R. and Smith G.H., (1961), "The significance of particle shape in formation resistivity factor- porosity relationship", **JPT**, 3, pp 285-291.
- Attia M.A., (2005), "Effects of petrophysical rock properties on tortuosity factor". **Journal of Petroleum Science and Engineering**. Vol. 48, Issues 3-4, pp 185-198.
- Beale M.H., Hagan M.T. and Demuth H.B., (2012), "**Neural Network Toolbox™ User's Guide of MATLAB**", version 8.
- Bernal M.U., (2004), Msc. thesis, "Obtaining Archie's exponent ranges through the use of J-Function plots. Athesis for Master of science", The Mewbourne School of Petroleum and Geological Engineering, Oklahoma.
- Bhatt A. and Helle H.B., (2002), "Committee neural network for porosity and permeability prediction from well logs", **Geophysical Prospecting**, Vol. 50, Issue 6, pp 645-660.
- Bhatt A., (2002), PhD. thesis, "Reservoir properties from well logs using neural network", Department of Petroleum Engineering and Applied Geophysics, Norwegian University of Science and Technology.
- Borai A.M., (1987), "A new correlation for the cementation factor in low-porosity carbonates", **SPE Formation Evaluation**, Vol. 2, Number 4, pp 495-499.
- Carman P.C., (1939), "Permeability of saturated sands, soils and clays". **J. Agri. Sci.**, Vol. 29, Issue 2, pp 262-273.
- Clavier C., Coates G. and Dumanoir J., (1977), "The Theoretical and Experimental Bases for the Dual-Water" Model for the Interpretation of Shaly Sands", **SPE Journal**, Vol. 24, No. 2, pp 153-168.
- Day P.I., (1992), "Discussion of improved data analysis determines Archie parameters from core data", **JPT**, p 846.
- Dubois M.K., Byrnes A.P. and Watney W.L., (2001), "Field development and renewed reservoir characterization for CO<sub>2</sub> flooding of the Hall-Gurney Field, Central Kansas", **AAPG Annual Convention in Denver, Colorado**.
- Dunlap, H. F., Bilhartz, H.L. Shuler, E. and Bailey, C.R., (1949) "The Relation Between Electrical Resistivity and Brine Saturation in Reservoir Rocks", **JPT**, Vol. 1 No. 10, pp 259-264.
- Fatt I., (1956), "The Network Model of Porous Media", **Trans. AIME**, Vol. 207, pp 144-181.
- Focke J.W. and Munn D., (1987), "Cementation exponents in middle eastern carbonate reservoirs", **SPE Form. Eval.**, Vol. 2, No. 2, pp 155-167.

- Ghabeishavi A., Vaziri-Moghaddam H., Taheri A. and Taati F. (2010) "Microfacies and depositional environment of the Cenomanian of the Bangestan anticline, S<sub>w</sub> Iran" **Journal of Asian Earth Sciences**, Vol. 37, Issue 3, pp 275-285.
- Guyod H., (1948), "Electrical Logging Developments in the U.S.S.R." Part 6, **World Oil**, Vol. 128, No. 4, pp 110-120.
- Hamada G.M., AlMajed A.A., Okasha T.M. and AlGathe A.A., (2010), "Uncertainly Analysis of Archie's Parameters Determination Techniques in Carbonate Reservoirs", **OGEP**, Paper No. 161.
- Hamada G.M. and El-Farsi N.H., (1994), "Determination of Archie parameter from Omani carbonate cores", **J. King Saud Univ. Eng. Sci**, Vol. 6, No. 2, pp 281-294.
- Hamada G.M. and Al-Awad M.N., (2001), "Evaluating Uncertainty in Archie's Water Saturation Equation Parameters Determination Methods", **SPE Middle East Oil Show**, Bahrain.
- Hamada G.M. and Al-Awad M.N.J., Alsughayer A.A., (2002), "Water saturation computation from laboratory, 3-D regression", **Oil and Gas Science and Technology**, Vol. 57, No. 6, pp. 637-651.
- Hartmann D.J. and Beaumont E.A., (1999), "Prediction Reservoir Systems Quality and Performance in Exploring Oil and Gas Traps", **AAPG Special Publication**, Chapter 9, 61 p.
- Hassanzadeh-Azar J., Javaherian A., Pishvaie M.R. and Nabi-Bidhendi M., (2008), "An approach to defining tortuosity and cementation factor in carbonate reservoir rocks", **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Vol. 60, pp 125–131.
- Helle H. B. and Bhatt A., (2002), "Fluid saturation from well logs using committee neural networks", **Petroleum Geoscience**, Vol. 8, pp 109-118.
- Jakosky J.J. and Hopper R.H., (1937), "The Effect Of Moisture on the Direct Current Resistivity of Oil Sands and Rocks" **Geophysics**, Vol. 2, No. 1, pp 33-55
- Joseph R.H., Philip H.N. and Fredrick L.P, (1999), "**Well logging for physical properties: a handbook for geophysicists**", geologists and enjeenes, 2nd ed., Wiley, pp 423-428
- Keller G.V., (1953), "Effect of Wettability on the Electrical Resistivity of Sand", **Oil & Gas J.**, Vol. 31, No.4, pp 62-65.
- Leverett M.C., (1939), "Flow of Oil-Water Mixtures through Unconsolidated Sands and Rocks", **Trans. AIME.**, Vol 132, No. 1, pp 149-171.
- Lucia F.J., (1983), "petrophysical parameter estimated from visual description of carbonate rock; a field classification of carbonate pore space", **Journal of Petroleum Technology**, Vol. 35, No. 3, pp 629-627
- Mahamood S.M., Maerefat N.L. and Chang, M.M., (1991) "Laboratory Measurement of Electrical Resistivity at Reservoir Conditions", **SPE Formation Evaluation**, Vol. 6, No. 3, pp 291-300.
- Martin M., Murray G.H. and Gillingham W.J., (1983), "Determination of the Potential Productivity of Oil-Bearing Formations by Resistivity Measurements", **Geophysics**, Vol. 3, No. 3, pp 258-272.

- Maute R.E., Lyle W.D. and Sprunt E.S., (1992), "Improved Data-Analysis Method Determines Archie Parameters From Core Data", **JPT**, Vol. 44, No. 1, pp 103-107.
- Morse R.A., Terwilliger P.L. and Yuster S.T., (1947), "Relative Permeability Measurements on Small Core Samples", **Oil Gas J.**, Vol 46, (16), p 109.
- Motiei H., (2009), "**Petroleum Geology of the Persian Gulf**", University of Tehran, Tehran, 707 p.
- Nugent W.H., Coates G.R. and Peebler R.P., (1978), "A new approach to carbonate analysis", 19th **SPWLA** Symposium.
- Ragland D.A., (2002), "Trends in cementation exponents (m) for carbonate pore systems", **Petrophysics**, Vol. 43, No 5, pp 434-446.
- Ransom R.C., (1984), "A Contribution Toward a Better Understanding Of The Modified Archie Formation Resistivity Factor Relationship", **The Log Analyst**, Vol. XXV, No. 2, pp 7-12.
- Ransom R.C., (1974), "The Bulk Volume Water Concept Of Resistivity Well Log Interpretation. A Theory Based On A New Reservoir Rock Resistivity Model", **The Log Analyst**, Vol. XV, No. 1, pp 3-16.
- Rasmus, J.C., (1983), "A variable cementation exponent, m, for fractured carbonates", **The Log Analyst**, Vol. XXIV, No. 6, pp 13–23.
- Rasmus J.C., (1987), "A Summary of the Effects of Various Pore Geometries and Their Wettabilities on Measured and In-Situ values of Cementation and Saturation Exponents", **The Log Analyst**, Vol. 28, No. 2, Section PP,
- Rezaee M.R., Motiei H.E. and Kazemzadeh, (2007), "A new method to acquire m exponent and tortuosity factor for microscopically heterogeneous carbonates", **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Vol. 56, No. 4, pp 241–251.
- Rao Z., (2000), "**Artificial neural networks, In: Computation and Hydroinformatics**", (Modul Code CIV 937), lecture materials, school of Civil Engineering and Geosciences, University of Newcastle Upon Tyne.
- Rust C.F., (1952), "Electrical Resistivity Measurements on Reservoir Samples by the Two-Electrode and Four-Electrode Methods", **Journal of Petroleum Technology**, Vol. 4, No. 9, pp 217-224.
- Shlumberger, (1989), "**Log Interpretation Charts**", 151p.
- Sondena E, Brattell F., Kolltvelt K. and Normann H.P., (1991), "The Effect of Reservoir Conditions and Wettability on Electrical Resistivity", Paper SPE 22991, SPE Asia-Pacific Conference, Perth. Australia.
- Swanson B.F., (1985), "Microporosity in reservoir, it's measurement and enflence on electrical resistivity", **The Log Analyst**, Vol. 26, No. 6, pp 42-52.
- Thornton O.F., (1949), "A Note On The Evaluation of relative Permeability" **Trans. AIME**, Vol. 186.
- Tiab D. and Donaldson E.C., (2004), "**Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties**", second edition, ELSEVIER.

- Timur A., Hemphkins W.B. and Worthington A.E., (1972), Porosity and pressure dependence of formation resistivity factor for sandstones". Form. Eval. Symp. Can. Well Log. Soc., 4th, Calgary (Paper, D).
- Towel G., (1962), "An analysis of the formation resistivity factor-porosity relationship of some assumed pore geometries", paper 3, in 3rd Annual Logging Symposium Transactions, Houston, TX, SPWLA.
- Tutorial for user MATLAB, (2011a), v 7.12.0635, licence no. 161052.
- Wardlaw N.C., (1980), "The Effects of Pore Structure on Displacement Efficiency in Reservoir Rocks and in Glass Micromodels", SPE/DOE Enhanced Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma.
- Waxman M.H. and Thomas E.C., (1974), "Electrical Conductivities in Shaly Sands Sands—I. The Relation Between Hydrocarbon Saturation and Resistivity Index: II. The Temperature Coefficient of Electrical Conductivity", **JPT. or Trans. AIME**, Vol. 26, No. 2, pp 213-225.
- Williams M., (1950), "Estimation of Interstitial Water from the Electrical Log", **Journal of Petroleum Technology**, Vol. 2, No. 10, pp 295-308.
- Winsauer W.O., Shearin H.M., Masson Jr P.H. and Williams M., (1952) "Resistivity Of Brine-Saturated Sands in Relation to Pore Geometry", **AAPG Bulletin**, Vol. 36, No. 2, pp 253-277.
- Wong P.Z., Koplik J. and Tomanic J.P., (1984), "Conductivity and permeability of rocks" **Phys. Rev.**, Vol. 30, No. 11, pp 6606–6614.
- Wyckoff R.D. and Botset H.G., (1936), "The Flow of Gas-liquids Mixtures Through Unconsolidated Sands" **Physics**, Vol. 7, No. 9, pp 325-337.
- Wyllie M.R.J. and Gregory G.R., (1953), "Formation factor of unconsolidated porous media: Influence of particle shape and effect of cementation", **Journal of Petroleum Technology**, Vol. 5, No. 4, pp 103-110.
- Wyllie M.R.J. and Rose W.D., (1950), "Some Theoretical Considerations Related to the Quantitative Evaluation of the Physical Characteristics of Reservoir Rocks from Electrical Log Data", **Journal of Petroleum Technology**, Vol. 2, No. 4, pp 105-118.
- Zarasvandi A., Charchi A., Carranza E.J.M. and Alizadeh B., (2008), "Karst bauxite deposits in the Zagros Mountain Belt, Iran" **Ore Geology Reviews**, Vol. 34, No. 4, pp 521-532.

## **Abstract**

Water saturation is one of the most important parameters of hydrocarbon reservoirs. Archie formula is best known technique for calculating water saturation. This formula includes three parameters as cementation factor ( $m$ ), saturation exponent ( $n$ ) and tortuosity ( $a$ ) that are called Archie's parameters. A slight change of any of these three parameters can cause significant change in water saturation calculated value. Although numerous methods have been presented so far for estimation of these parameters, unfortunately no reliable and accurate method exists that can estimate these parameters in any circumstances. In this thesis, we used statistical and neural network methods to estimate the Archie's parameters in three wells located in a carbonate field, and the capability of each of the methods has been evaluated. In this regard, first, we computed the Archie's parameters using two known statistical techniques, namely conventional method three-dimensional (3-D) regression method, and then, a comparison has been made between the results of these two methods. In sum, the 3-D regression method has had better results than conventional method because of simultaneous computation of these parameters by this method.

The Archie's parameters does not follow a specific process and depend on many factors. The behaviour of any of these parameters or coefficients is complex and vague. Hence, it is reasonable to use artificial neural network (ANN) method to estimate these parameters. As a result, this method has been used to compute the cementation factor in each sample in the study area or field. In this research work, feed forward back propagation error networks were trained using two methods including early stopping and regularization methods. For this purpose, well logging data including CGR, SGR, RHOB, DT, ILD, NPHI and PEF data were used as the inputs to the networks, and the cementation factor was considered as the output. Levenberg-Marquardt algorithm and bayesian regularization function were used for the training the networks in the early stopping and regularization methods, respectively. Due to the low number of samples and the inputs to the networks, the expected accuracy and soundness in the obtained results from the ANN method were not achieved. However, the early stopping method contained better results than the regularization method. The best network obtained with the early stopping method, was a three-layer network, in which the mean of square error (MSE) of 0.01 and determination coefficient of  $r = 91.02\%$  in the training step were obtained.

## **Keywords**

Archie's parameters, Conventional method, 3-D regression, Neural networks, Water saturation



Shahrood University of Technology  
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics  
Department of Exploration

Thesis for Master's degree

**Archie's parameters optimization in one of carbonate reservoirs  
in south of Iran using statistical and artificial neural network  
methods**

**Mojtaba Memarzadeh Zavareh**

Supervisors:

**Dr. A. Kamkar-Rouhani**

**Dr. M. Koneshloo**

Advisor:

**Dr. Sh. Kord**

**Feb. 2013**