

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران

هادی فتاحی^{۱*}، زهرا ورمزیاری^۲، مصطفی یوسفی‌راد^۳

^۱ استادیار، ژئومکانیک، دانشگاه صنعتی اراک

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

^۳ دانشیار، زمین‌شناسی، دانشگاه صنعتی اراک

*H.fattahi@arakut.ac.ir

دریافت شهریور ۱۳۹۵، پذیرش بهمن ۱۳۹۵

چکیده

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از داده‌های چاه‌نگاری یکی از روش‌های مهم در اکتشافات نفتی و تعیین ویژگی‌های مخزن به حساب می‌آید که شبیه‌سازی و تخمین این پارامتر را امری اجتناب‌ناپذیر می‌کند. در این پژوهش در گام نخست برای ایجاد یک مدل و تخمین اشباع آب سازندی از ترکیب آنالیز خوشه‌ای با رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی بهره گرفته شده است. در مرحله‌ی بعد به کمک مدل ایجاد شده و روش شبیه‌سازی مونت کارلو، مقادیر اشباع آب سازندی شبیه‌سازی شده است. برای این کار از بانک اطلاعاتی مجموعه داده‌های تصحیح شده در میدان نفتی مارون استفاده شده است. نتایج بدست آمده از ترکیب آنالیز خوشه‌ای با رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی و شبیه‌سازی مونت کارلو نشان از دقت و کارایی قابل قبول این شبیه‌سازی را می‌دهد، به طوری که میانگین مقادیر اشباع آب سازندی در مدل‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه بسیار به هم نزدیک می‌باشند. بعلاوه در این تحقیق از آنالیز حساسیت جهت تعیین موثرترین پارامتر ورودی، در تعیین اشباع آب سازندی استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده تاثیرگذارترین متغیر در تخمین درجه اشباع آب لاگ چگالی می‌باشد. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش تنها برای منطقه مورد مطالعه صادق است و برای سایر مناطق تنها استفاده از متودولوژی این پژوهش توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: اشباع آب سازندی، روش رگرسیون قطعه‌ای- غیرخطی، روش آنالیز خوشه‌ای، روش شبیه‌سازی مونت کارلو، آنالیز حساسیت.

۱- مقدمه

توصیف و تخمین خصوصیات پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری جهت گسترش میادین نفت و گاز و در راستای تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار، امری لازم و ضروری است. از طرفی ورود علوم ریاضی و کامپیوتر به قلمرو علم زمین‌شناسی نفت و پتروفیزیک، نقش مهمی در حل مسائل و مشکلات این حوزه داشته است. کاربرد تکنیک‌های جدید آماری در تخمین غیرمستقیم خصوصیات پتروفیزیکی مخزن، از جمله پیشرفت‌های دهه اخیر بوده است، که منجر به کاهش چشمگیری از هزینه‌های اکتشافی شده است. در صنعت نفت تعیین خواص پتروفیزیکی مخازن، از مهم‌ترین فعالیت‌های کلیدی در مدیریت، تولید و توسعه مخازن هیدروکربوری به شمار می‌رود. تعیین پارامترهایی نظیر تخلخل، اشباع آب سازندی، لیتولوژی و حجم شیل معمولاً توسط دو روش متداول آنالیز مغزه^۱ به عنوان روش مستقیم و ارزیابی داده‌های چاه نگاری^۲ به عنوان روش غیرمستقیم تعیین می‌شوند. روش آنالیز مغزه که در آزمایشگاه و از طریق آزمایش بر روی مغزه صورت می‌گیرد اطلاعات بسیار مفیدی راجع به سنگ مخزن ارائه می‌کند. استفاده از روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری این پارامترها دارای هزینه بسیار زیاد و زمانبر است. بنابراین استفاده از این روش تنها در تعداد معدودی از چاه‌های یک میدان امکانپذیر است. علاوه بر این در بسیاری از چاه‌ها به دلایل گوناگون، عملیات مغزه‌گیری امکان‌پذیر نبوده یا برای فواصل خاصی از درون چاه صورت می‌گیرد. از این‌رو در میادین نفتی به منظور دستیابی به این اهداف، از نمودارهای چاه پیمایی که بطور استاندارد و متداول در تمام چاه‌های نفتی برداشت می‌شوند، استفاده می‌شود. اما یکی از مهمترین پارامترهای پتروفیزیکی مخازن نفتی اشباع آب سازندی بوده که تاثیر زیادی بر دقت تخمین میزان نفت اولیه مخزن دارد. اشباع آب سازندی در ارتباط مستقیم با مقادیر آب، نفت و گاز موجود در خلل و فرج مخازن هیدروکربوری است. این ضریب به‌طور کلی بیانگر اشغال بخشی از حجم حفرات توسط سیالات مخزنی به حساب می‌آید. از طرفی تخمین صحیح اشباع آب در ارزیابی مخازن هیدروکربوری امری اجتناب‌ناپذیر بوده و بررسی تغییرات ایجاد شده در میزان اشباع آب در اثر تولید سیال هیدروکربوری، می‌تواند بیانگر تولید موثر از مخزن باشد. این مسئله همواره به مهندسان مخزن کمک می‌کند تا بتوانند نحوه توزیع سیالات مختلف (آب، نفت و گاز) در داخل شکاف‌ها و حفرات موجود در مخزن را مورد تجزیه و تحلیل قرار داده و به فاکتورهای اساسی که توزیع سیالات مذکور را کنترل می‌کند توجه بیشتری کنند. اگر در محاسبه اشباع شدگی آب خطای قابل توجهی رخ دهد، ممکن است آن مخزن بلا استفاده رها شود یا مثلاً ممکن است مخزنی دارای اشباع شدگی آب زیاد باشد و به دلیل خطای محاسبه مقدار آن کمتر تخمین زده شود، در نتیجه هزینه‌های هنگفت صرف مخزنی شود که تولید کننده نیست. با وجود تمام پیشرفت‌های صنعت نفت، نبود اطلاعات اشباع آب به میزان کافی و متناسب با سایر داده‌های موجود یکی از چالش‌های اساسی محسوب می‌شود. این امر می‌تواند به علت لزوم استفاده از دستگاه‌های دقیق و همچنین هزینه بالای این اندازه‌گیری‌ها در چاه باشد. غالباً در بسیاری از مطالعات این اطلاعات تنها در برخی از چاه‌ها و آن هم برای اعماق خاصی اندازه‌گیری شده است. لذا یکی از مسائل مهم و اساسی در مطالعات فیزیک سنگ، پیش‌بینی اشباع آب، با توجه به اطلاعات موجود است. در طول سالیان اخیر، مطالعات بر روی پارامتر اشباع آب سازندی و دیگر پارامترهای پتروفیزیکی سنگ‌ها صورت گرفته است که در ادامه به مهمترین آن‌ها اشاره خواهد شد. مصطفی کمل^۳ و همکاران [۱] در سال ۲۰۰۱ با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی به تخمین اشباع آب سازندی در دو منطقه شامل: ایالات متحده آمریکا و مصر پرداختند. امیری^۴ و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۵ اشباع آب سازندی منطقه ماسه

1 Core analysis
2 Well logging evaluation
3 kamel
4 Amiri

سنگ شیلی کوه‌های راکی واقع در غرب ایالات متحده را با بکارگیری از روش رگرسیون غیرخطی پیش‌بینی کردند. مابروک^۵ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۳ به بررسی مقاومت آب سازندی با استفاده از روش عددی پرداختند. لی^۶ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۱ رابطه‌ای میان نگارهای پتروفیزیکی و اشباع سیال هیدراته در کوه آلبرت را با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی ارائه نمودند. پائول^۷ و همکاران [۵] در سال ۱۹۹۳ به بررسی اشباع آب سازندی منطقه ماسه سنگی واقع در شمال غرب انگلستان با استفاده از روش رگرسیون و داده‌های چاه‌نگاری پرداختند. در سال ۲۰۱۳ نعیمی و همکارانش [۶] با استفاده از روش رگرسیونی به بررسی اشباع آب سازندی مخازن نفتی پرداختند. حبیبی و همکاران (۲۰۱۳) [۷] با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی به تخمین نفوذپذیری سیال در سنگ‌هایی که شکستگی بالایی دارند، پرداختند. هیوانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۸] با روش رگرسیونی به تخمین اشباع آب سازند ماسه سنگی خاورمیانه پرداختند. بولوشی و همکاران (۲۰۰۹) [۹] به بررسی پارامترهای موثر جهت تعیین اشباع آب سازند ماسه‌سنگی مخزن شرق دریای عمان پرداختند. در سال ۲۰۱۴ ودانتی [۱۰] با استفاده از روش مونت کارلو به برآورد نفوذپذیری یک میدان نفتی ماسه سنگی واقع در حوضه هند پرداختند. در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های خام بدست آمده از چاه‌نگاری و اطلاعات آزمایشگاهی حاصل از آنالیز مغزه با استفاده از تلفیق روش‌های آماری-احتمالاتی (رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو)، پارامتر اشباع آب سازندی در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مروری اجمالی بر روش‌های بکار گرفته شده در این پژوهش

۲-۱- رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی

رگرسیون قطعه‌ای که به نام‌های رگرسیون تکه‌ای^۸، رگرسیون دو یا چند حالتی پیوسته^۹، کمترین توان‌های دوم دو مرحله‌ای و رگرسیون خط شکسته^{۱۰} نیز معروف می‌باشد. این نوع رگرسیون یکی از روش‌های تحلیل رگرسیونی می‌باشد که در آن متغیر مستقل در فواصلی تقسیم و برای هر فاصله یک خط رگرسیون قطعه‌ای جداگانه برازش داده شده و مرز بین قطعات نقاط شکست نامیده می‌شود (شکل ۱). به نقاط شکست، نقاط اتصال، نقطه تغییر^{۱۱} و گره^{۱۲} نیز گفته می‌شود. ممکن است در رگرسیون قطعه‌ای بیش از یک نقطه شکست وجود داشته باشد و مکان نقاط شکست معلوم یا نامعلوم باشد و یا قطعات رگرسیونی در محل نقاط شکست پیوسته یا جدا باشند. تعیین نقطه شکست یکی از مسایل مهم در تحلیل روند داده‌ها می‌باشد. در این روش هر قطعه یک تابع $f_i(x; s_i)$ رگرسیون خطی با پارامترهای متفاوت خواهیم داشت. منحنی رگرسیون قطعه‌ای برای Γ قطعه به صورت مدل کلی زیر بیان می‌شود:

$$f(x) = E[y|x] = \begin{cases} f_1(x; s_1) & x \leq \dagger_1 \\ f_2(x; s_2) & \dagger_1 < x < \dagger_2 \\ \vdots & \\ f_r(x; s_r) & \dagger_{r-1} < x \end{cases} \quad (1)$$

که \dagger_i نشان دهنده نقاط شکست و $f_i(x; s_i)$ توابع رگرسیونی برای هر قطعه می‌باشد. در این حالت مدل رگرسیونی بصورت زیر بدست می‌آید:

5 Mabrouk

6 Lee

7 Paul

8 Piecewise regression

9 Continues Two-or multiphase

10 Break line

11 Change point

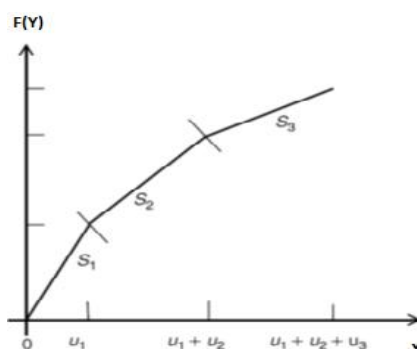
12 Knot

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران

$$E[y|x] = s_0 + s_1x + u_1(x - t_1)^+ + \dots + u_k(x - t_k)^+ \quad (2)$$

که k تعداد نقاط نامعلوم، t_i برای $i=(1, \dots, k)$ مکان‌های نقاط تغییر نامعلوم و u_i ضرایب رگرسیونی قطعات هستند. مواردی که باید در رگرسیون قطعه‌ای مورد توجه قرار گیرد شامل: تعداد نقاط شکست، مکان نقاط شکست و معلوم و نامعلوم بودن نقاط شکست می‌باشند.

از طرفی با توجه به پیچیده بودن ارتباط میان متغیر وابسته و متغیرهای مستقل می‌توان بسیاری از مسائل دنیای واقعی را به صورت توابع غیرخطی قطعه‌ای پیوسته مدل نمود [۱۱]. سیستم غیرخطی در جایی تعریف می‌شود که متغیرها را نتوان به شکل ترکیبی خطی از متغیرهای مستقل نوشت. روش رگرسیون قطعه‌ای-غیرخطی نسبت به روش قطعه‌ای-خطی مدل‌های بهتری تولید می‌کند زیرا در موضوعات همگرایی و پایداری ثبات بیشتری را متحمل می‌شود [۱۲]. در این مقاله از روش رگرسیون قطعه‌ای-غیرخطی برای تخمین اشباع آب سازندی یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران استفاده شده است.



شکل ۱- نمونه‌ای از تابع رگرسیون قطعه‌ای.

۲-۲- روش آنالیز خوشه‌ای

آنالیز خوشه‌ای در بردارنده الگوریتم‌ها و روش‌هایی برای گروه‌بندی داده‌های مشابه می‌باشد. سؤالی که معمولاً محققان با آن روبرو می‌شوند این است که "چگونه داده‌های مشاهده شده را درون ساختاری بامعنی سازماندهی کنند؟". آنالیز خوشه‌ای موارد را بر اساس میزان ارتباطشان دسته‌بندی می‌کند. بنابراین داده‌های یک کلاستر دارای بیشترین میزان ارتباط با یکدیگر و کمترین میزان ارتباط با داده‌های دیگر کلاسترها می‌باشند. از آنچه گفته شد می‌توان فهمید که آنالیز خوشه‌ای بدون آن‌که به تشریح چرایی وجود داده‌ها بپردازد، برای کشف ساختار داده‌ها بکار می‌رود. بنابراین آنالیز خوشه‌ای ابزاری اکتشافی است که می‌تواند ارتباطات و ساختار بین داده‌ها را که قبلاً مشهود و محسوس نبودند را آشکار نماید. در این روش هیچ فرضی در مورد تعداد گروه‌ها یا ساختمان آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. دسته‌بندی کردن بر اساس مشابهنه‌ها و یا فواصل انجام می‌شود.

آنالیز خوشه‌ای انواع مختلفی دارند که عبارت است از: آنالیز خوشه‌ای دو مرحله‌ای^{۱۳}، آنالیز خوشه‌ای K-Means^{۱۴} و آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی^{۱۵}. اما در پژوهش حاضر به دلیل کار با داده‌های بزرگ و امکان ذخیره‌سازی فاصله‌ها از مرکز خوشه از آنالیز خوشه‌ای K-Means استفاده شده است. هدف از بکارگیری آنالیز خوشه‌ای K-Means افزایش کارایی روش رگرسیون قطعه‌ای-غیرخطی و بالا رفتن دقت مدل‌سازی می‌باشد که در ادامه به معرفی اجمالی روش آنالیز خوشه‌ای K-Means پرداخته می‌شود.

13 Two-Step Cluster Analysis
14 K-Means Cluster Analysis
15 Hierarchical Cluster Analysis

۲-۱-۲- آنالیز خوشه‌ای K-Means

این روش علی‌رغم سادگی آن یک روش پایه برای بسیاری از روش‌های خوشه‌بندی دیگر محسوب می‌شود [۱۳]. برای این الگوریتم شکل‌های مختلفی بیان شده است. ولی همه آن‌ها دارای روالی تکراری هستند که برای تعدادی ثابت از خوشه‌ها سعی در تخمین موارد زیر دارند:

• بدست آوردن نقاطی به عنوان مراکز خوشه‌ها که این نقاط در واقع همان میانگین نقاط متعلق به هر خوشه هستند.

• نسبت دادن هر نمونه داده به یک خوشه که آن داده کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را دارا باشد.

در نوع ساده‌ای از این روش ابتدا به تعداد خوشه‌های مورد نیاز، نقاطی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس در داده‌ها با توجه با میزان نزدیکی (شباهت) به یکی از این خوشه‌ها نسبت داده می‌شوند و بدین ترتیب خوشه‌های جدیدی حاصل می‌شود. با تکرار همین روال می‌توان در هر تکرار با میانگین‌گیری از داده‌ها مراکز جدیدی برای آن‌ها محاسبه کرد و مجدداً داده‌ها را به خوشه‌های جدید نسبت داد. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دیگر تغییری در داده‌ها حاصل نشود. تابع زیر به عنوان تابع هدف مطرح است [۱۴].

$$E = \sum_{i=k-1}^k \sum_{x \in S_k} \|x - Z_k\|^2$$

(۳)

که $\| \cdot \|$ معیار فاصله بین نقاط و Z_k مرکز خوشه k ام است. الگوریتم زیر الگوریتم پایه برای این روش محسوب می‌شود:

- در ابتدا K نقطه به عنوان نقاط مراکز خوشه‌ها انتخاب می‌شوند.
- هر نمونه داده به خوشه‌ای که مرکز آن خوشه کمترین فاصله تا آن داده را داراست، نسبت داده می‌شود.
- پس تعلق تمام داده‌ها به یکی از خوشه‌ها برای هر خوشه یک نقطه جدید به عنوان مرکز محاسبه می‌شود.
- مراحل ۲ و ۳ تکرار می‌شوند تا زمانی که دیگر هیچ تغییری در مراکز خوشه‌ها حاصل نشود.

برای مطالعه جزئیات بیشتر در مورد روش آنالیز خوشه‌ای K-Means منابع [۱۵-۱۷] توصیه می‌شود.

۲-۳- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

شبیه‌سازی عبارت است از ایجاد محیطی ساختگی و استفاده از یک مدل نظری برای تخمین رفتار یک سیستم موجود در جهان واقعی. محیط ساختگی یا مصنوعی فضایی معادل حقیقی یا مجازی است که در آن تحلیل‌گر تلاش می‌کند تا سیستم واقع در جهان حقیقی را الگوبندی کند. بسته به اینکه از شبیه‌سازی چه هدفی دنبال می‌شود و چه محدودیتی در به کارگیری آن وجود دارد می‌توان چهار نوع شبیه‌سازی را از یکدیگر تفکیک کرد که عبارت است از: شبیه‌سازی مولد (نمونه‌سازی)، شبیه‌سازی تحلیلی یا تکنیکی، شبیه‌سازی راهبردی و شبیه‌سازی ذهنی یا شهودی [۱۸]. اولین نوع شبیه‌سازی یعنی شبیه‌سازی مولد (نمونه‌سازی)، زمانی به کار می‌رود که به دلیلی نتوان داده‌ای را برای متغیر تحت بررسی بدست آورد که یا ثبت نشده و یا اینکه نمونه‌گیری از آن اقتصادی نیست. این نوع شبیه‌سازی را برای پیش‌بینی از طریق مدل‌های رگرسیونی حاوی اختلال‌های تصادفی نیز می‌توان به کار برد. روش شبیه‌سازی مونت کارلو در دسته اول از انواع شبیه‌سازی می‌گنجد [۱۹]. روش شبیه‌سازی مونت کارلو روشی است که با استفاده از یک سری اعداد تصادفی از توزیع احتمالی متغیرها، تابع نهایی را شبیه‌سازی می‌کند. امروزه روش مونت کارلو در مسائل بسیار پیچیده که دارای ماهیتی غیرقطعی هستند، کاربرد بسیاری دارد.

مراحل مختلف این روش به شرح زیر می‌باشد:

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران

- ۱- انتخاب یک روش حل بسته برای تعیین ارتباط بین پارامتر خروجی با پارامترهای ورودی مسئله
- ۲- تعیین پارامترهای ورودی تغییر پذیر به عنوان متغیر تصادفی و تعیین توزیع آماری آن‌ها
- ۳- تولید اعداد تصادفی و تعیین پارامترهای ورودی جدید با استفاده از این اعداد تصادفی
- ۴- تعیین پارامتر خروجی با استفاده از پارامترهای ورودی جدید
- ۵- تکرار مراحل ۳ و ۴ تا به دست آوردن یک توزیع چگالی احتمال برای پارامتر خروجی.

۳- تخمین اشباع آب سازندی در منطقه مورد مطالعه

۳-۱- ساختار داده‌های ورودی برای مدل سازی

داده‌های ورودی برای مدل‌سازی در این پژوهش از نگارهای چاه‌پیمایی در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران (میدان مارون) بدست آمده است. میدان مارون یک تاق‌دیس تقریباً نامتقارن است که دارای شیب متوسط ۶۰-۴۵ درجه در یال جنوب غربی و ۲۵ الی ۴۵ درجه در یال شمال شرقی می‌باشد. همچنین دارای پیچشی در وسط ساختار است که طی آن روند میدان تقریباً ۲۰ درجه از جهت N۴۵W در شمال غرب به سمت N۶۵W در جنوب غرب تغییر می‌کند. سازند آسماری اصلی ترین سنگ مخزن میدان نفتی مارون است. این سازند در میدان مارون شامل رسوبات دریایی عمیق (در قاعده آسماری زیرین) می‌باشد که به رسوبات نیمه عمیق و کم عمق تا سبخایی در آسماری میانی و بالایی تبدیل می‌شود، و در پهنه‌های بالایی بیشتر از دولومیت و آهک تشکیل شده است. مخزن آسماری میدان مارون از دید سنگ شناسی به ۵ پهنه و ۵ زیرپهنه تقسیم بندی شده که پهنه ۲ در رأس و پهنه ۵ در قاعده مخزن قرار گرفته است [۲۰].

پهنه یک: این پهنه در بخش بالایی سازند آسماری و در بخش زیرین سازند گچساران (پوش سنگ) واقع شده است. از دید سنگ شناسی بخش عمده آن دولومیت، آهک دولومیتی به همراه مقادیر جزئی، انیدریت است و گاهی لایه‌های نازکی از شیل، مارن و ماسه نیز دیده می‌شود. ستبرای میانگین آن ۶۰-۷۵ متر و همزمان با آخرین فاز پیشروی دریا در میوسن نهشته شده است.

پهنه دو: این پهنه بخش بالایی سازند آسماری میانی را تشکیل می‌دهد و سنگ شناسی آن شامل دولومیت و آهک‌های دولومیتی به همراه مقادیر جزئی انیدریت است که در بخش‌های زیرین تبدیل به تناوبی از لایه‌های ماسه سنگ آهک و آهک ماسه‌ای و دولومیت می‌شود. میانگین ستبرای این پهنه ۷۰-۱۰۰ متر است.

پهنه سه: این پهنه بخش‌های پایینی آسماری میانی را شامل می‌شود و سنگ شناسی آن بیشتر از سنگ آهک، دولومیت که در بخش‌های تحتانی ماسه سنگی با میان لایه‌های آهک و دولومیت ماسه‌ای و گاهی لایه‌های نازک شیلی تشکیل شده است. ستبرای میانگین این پهنه میان ۱۰۰ متر است.

پهنه چهار: این پهنه بخش بیشتری از آسماری زیرین را تشکیل می‌دهد و سنگ شناسی عمده آن آهک، آهک دولومیتی، ماسه سنگ، شیل و مارن که در بخش‌های زیرین لایه‌های آهک خالص و در برخی بخش‌ها لایه‌های نازک ماسه و شیل است و ستبرای میانگین آن ۱۵۰ متر است.

پهنه پنج: این پهنه تشکیل دهنده بخش انتقالی میان سازندهای پابده و آسماری است و بیشتر از آهک‌های رسی فشرده و شیل‌های تیره رنگ گلوکونیتی و پیریت دار تشکیل شده است. ستبرای آن میان ۶۵-۷۰ متر است.

برای مدل‌سازی در این مقاله، بانک اطلاعاتی مجموعه داده‌های تصحیح شده شامل ۱۲۱۱ داده بوده که به دو بخش داده‌هایی جهت ساخت مدل (۷۵ درصد ۱۲۱۱ داده به طور تصادفی) و داده‌های آزمون (۲۵ درصد ۱۲۱۱ داده به طور تصادفی) جهت تخمین اشباع آب سازندی تقسیم شدند. از بین نگارهای مختلف آنهایی که با اشباع آب سازندی ارتباط

نزدیکتری داشته‌اند بعنوان داده‌های ورودی در نظر گرفته شده است که شامل پنج متغیر مستقل شامل لاگ‌های سرعت صوت، اشعه گاما^{۱۶}، مقاومت ویژه، تخلخل-نوترون و چگالی هستند. برای بررسی ارتباط میان پارامترهای ورودی و متغیر خروجی از ماتریس همبستگی استفاده شده است، به این صورت که همبستگی پارامترهای در دسترس با اشباع آب سازندی بررسی و طبق آن بیشترین همبستگی و ارتباط میان پارامترهای ورودی و اشباع آب سازندی تعیین شد. در نهایت از اطلاعات پارامترهایی که بیشترین ارتباط را با اشباع آب سازندی داشتند، جهت مدل سازی اشباع آب سازندی استفاده شد. در جدول ۱ همبستگی پارامترهای ورودی و خروجی آمده است.

جدول ۱- ماتریس همبستگی متغیرهای ورودی و پارامتر خروجی.

متغیرها	اشعه گاما	چگالی	سرعت صوت	مقاومت ویژه	سرعت موج فشاری	سرعت موج برشی	تخلخل	اشباع آب سازند
اشعه گاما	۱							
چگالی	۰/۰۰۹	۱						
سرعت صوت	۰/۰۴	-۰/۸	۱					
مقاومت ویژه	-۰/۴	۰/۰۷	-۰/۲۶	۱				
سرعت موج فشاری	۰/۰۶	-۰/۱۹	۰/۱۸	-۰/۰۴	۱			
سرعت موج برشی	۰/۰۸	-۰/۱۳	۰/۱۵	-۰/۰۷	۰/۸	۱		
تخلخل	۰/۰۴	-۰/۴۶	۰/۴۷	-۰/۲۴	۰/۰۹	۰/۰۴	۱	
اشباع آب سازندی	۰/۱۷	۰/۱۸	-۰/۱۷	-۰/۳۱	۰/۰۷	۰/۰۹	-۰/۲۵	۱

لازم به ذکر است که داده‌های خروجی مدل (اشباع آب) هم از آنالیز مغزه بدست آمده است. قسمتی از کل داده‌های استفاده شده برای مدلسازی در جدول آورده شده است. هم‌چنین توصیف آماری داده‌های به کار رفته در این مطالعه در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- قسمتی از کل داده‌های استفاده شده برای مدل سازی.

شماره داده	پارامترهای ورودی					
	چگالی ^{۱۷} (گرم بر سانتی متر مکعب)	تخلخل- نوترون ^{۱۸} (بر حسب درصد)	مقاومت ویژه الکتریکی ^{۱۹} (اهم-متر)	اشعه گاما ^{۲۰} (آی.پی.آی)	سرعت صوت ^{۲۱} (میکروثانیه بر فوت)	اشباع آب ^{۲۲} (مغزه) (گیری)
۱	۲/۵۷	۰/۰۸	۲۷/۱۷	۵۵/۴۴	۶۸/۶۸	۰/۰۹
۲	۲/۵۹	۰/۰۷	۲۵/۷۳	۵۲/۷۴	۶۸/۶۲	۰/۰۹۹
۳	۲/۶۰	۰/۰۶	۲۴/۱۴	۵۲/۶۳	۶۶/۳۸	۰/۰۹۱
۴	۲/۶۱	۰/۰۵	۲۳/۳۱	۴۸/۲۹	۶۲/۹۵	۰/۱۷۰
۵	۲/۵۷	۰/۰۸	۲۷/۱۷	۵۵/۴۴	۶۸/۶۸	۰/۳۴۰۹

جدول ۳- توصیف آماری داده‌های به کار رفته در این مطالعه.

- 16 Gamma Ray Log (GRL)
- 17 Density (RHOB)
- 18 Neutron-porosity (NPHI)
- 19 Induction log dual (ILD)
- 20 Gamma ray (GR)
- 21 Velocity Sonic (DT)
- 22 Water saturation (SW)

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران

پارامتر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۱۰۷	۲/۷۹۸	۲/۵۶۲	۰/۱۲۱
تخلخل-نوترون (بر حسب درصد)	۰/۰۰۵	۰/۳۱۷	۰/۱۳۷	۰/۰۶۱
مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)	۱/۷۰۰	۱۱۶۷/۶۸۲	۵۷/۸۶۱	۸۶/۲۸۲
اشعه گاما (آی.پی.آی)	۰/۹۴۹	۱۳۷/۹۲۶	۲۵/۷۹۴	۱۶/۶۵۶
سرعت صوت (میکروثانیه بر فوت)	۴۱/۰۳۶	۹۰/۶۸۷	۶۳/۰۸۹	۸/۴۵۲
اشباع آب	۰/۰۲۰	۰/۹۷۲	۰/۳۰۱	۰/۲۰۰

۳-۲- پیش پردازش داده‌ها و شاخص‌های آماری جهت ارزیابی عملکرد مدل

برای مدل‌سازی و ورودی داده‌ها، اکثراً لازم است که دامنه تغییرات داده‌ها مشابه یکدیگر باشند که در اصطلاح این عمل را، نرمال‌سازی داده‌ها می‌نامند. نرمال‌سازی داده‌ها در این مطالعه توسط رابطه زیر انجام گرفته است که این رابطه دامنه داده‌ها را در بازه [۰ ۱] قرار می‌دهد.

$$p_n = \frac{p - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}} \quad (۴)$$

که در آن p_n داده نرمال شده، p داده حقیقی، p_{\min} کمینه داده حقیقی و p_{\max} بیشینه داده حقیقی هستند.

هم‌چنین در این مقاله برای ارزیابی عملکرد مدل، از دو شاخص آماری استفاده شده است که روابط مربوطه عبارتند از:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i'^2}{n}} \quad (۵)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2 \quad (۶)$$

که در این روابط y_i مقدار اندازه‌گیری شده و y'_i مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد. لازم به توضیح است که معیار ضریب همبستگی^{۲۳} نشان دهنده انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشد که بهترین حالت آن جایی است که مقدار آن یک باشد و اگر صفر باشد بدان معنی است که عملکرد مدل برای پیش‌بینی خیلی ضعیف است. معیار میانگین مربعات خطا^{۲۴} نیز بیانگر خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده می‌باشد و هر چه مقدار آن کمتر باشد عملکرد مدل از اطمینان بیش‌تری برخوردار است.

23 Correlation coefficient (R^2)
24 Mean Square Error (MSE)

۳-۳- تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از روش‌های رگرسیون چند متغیره معمولی غیرخطی

در این قسمت روش‌های چند متغیره رگرسیون معمولی غیر خطی برای تخمین اشباع آب از همبستگی‌های بین پاسخ چاه نمودارهای مختلف و پارامتر مورد نظر استفاده می‌شود. در این مطالعه چهار روش رگرسیون معمولی غیرخطی شامل: رگرسیون غیرخطی چند جمله‌ای، لگاریتمی، توانی و نمایی جهت برآورد اشباع آب استفاده شده است. برای یافتن معادله بهینه هر یک از روش‌های مذکور، بیش از ۱۵۰ معادله در نرم افزار استاتیستیکا^{۲۵} مورد بررسی قرار گرفته است، که از بین آن‌ها روابط زیر بیشترین همبستگی را در مرحله مدلسازی داشته‌اند که در ادامه به بررسی این مدل‌ها پرداخته شده است. طبق معادله بدست آمده از تابع توانی مقدار همبستگی برابر $R^2=0.3$ حاصل شد.

$$S_w = 10^{(0.5RHOB+0.04ILD+3.6GR+1.2DT+0.19NPHI+0.4)} \quad (7)$$

این مقدار برای تابع لگاریتمی نیز $R^2=0.24$ بدست آمد.

$$S_w = \ln(0.03 + 0.1RHOB + 0.03ILD + 1.6GR + 1.2DT + 0.19NPHI)$$

(۸)

پس از بررسی معادلات نمایی، بیشترین مقدار همبستگی برای این نوع تابع $R^2=0.35$ حاصل شد.

$$S_w = \exp(0.2 + 1.9RHOB + 0.2ILD + 2.6GR + 0.2DT + 0.19NPHI)$$

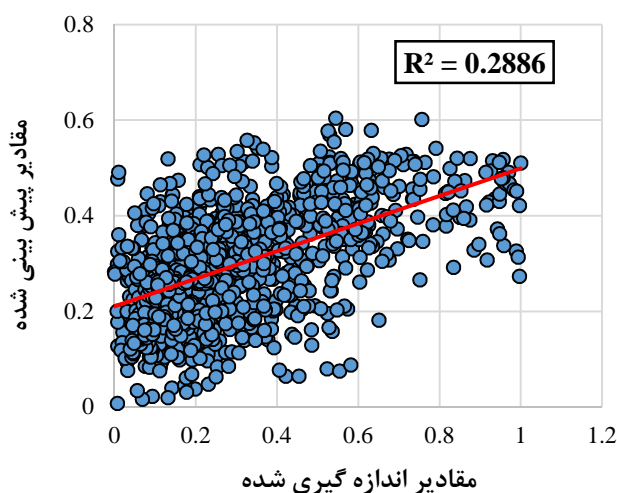
(۹)

در نهایت همبستگی $R^2=0.28$ برای معادله چند جمله‌ای بدست آمد.

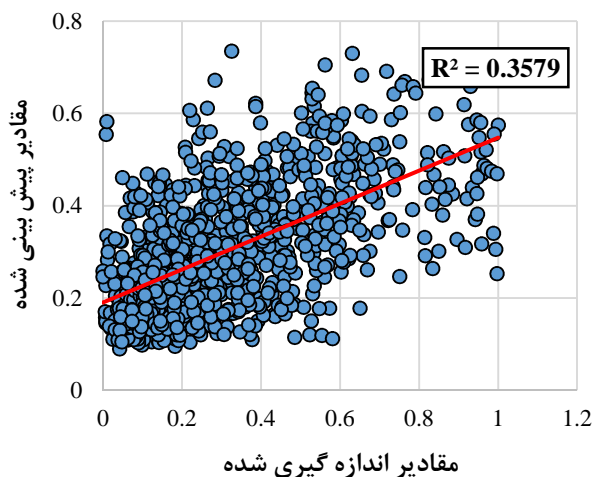
$$S_w = 2.6 + 5.3RHOB^{0.09} - 3.5ILD^{3.5} + 0.01GR^{0.4} + 0.52DT^{1.5} + 0.2NPHI^{4.6}$$

(۱۰)

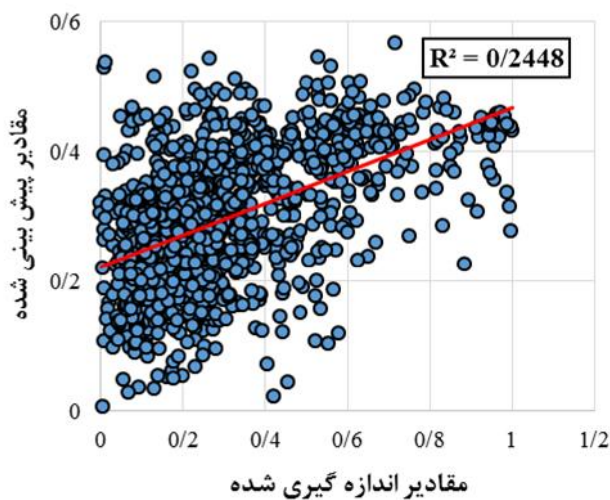
ضریب همبستگی بین اشباع آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از چهار روش رگرسیون معمولی غیرخطی در شکل‌های ۲ تا ۵ مشاهده می‌شود. باتوجه به نتایج حاصله از روش‌های چند متغیره رگرسیون معمولی غیر خطی، چنین نتیجه می‌شود که در این مورد نمی‌توان از این روش‌ها به عنوان مدل بهینه جهت تخمین اشباع آب سازندی منطقه مورد مطالعه استفاده نمود. لذا در ادامه به بررسی روش‌های دیگر پرداخته می‌شود.



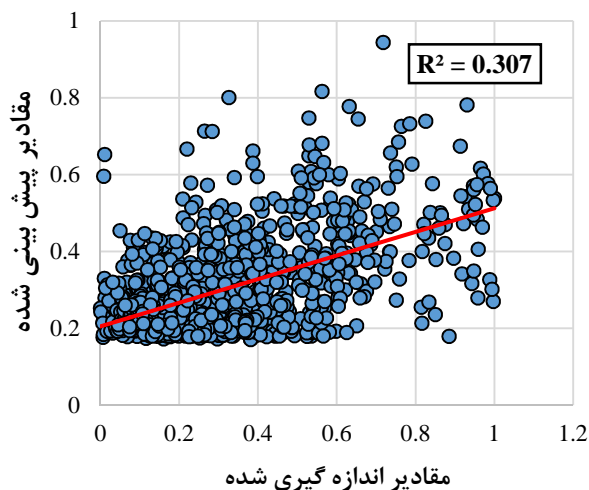
شکل ۲- ضریب همبستگی بین اشباع آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با روش رگرسیون معمولی چندجمله‌ای.



شکل ۳- ضریب همبستگی بین اشباع آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با روش رگرسیون معمولی نمایشی.



شکل ۴- ضریب همبستگی بین اشباع آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با روش رگرسیون معمولی لگاریتمی.



شکل ۵- نمودار ضریب همبستگی بین اشباع آب اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با روش رگرسیون معمولی توانی.

۳-۴- تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از آنالیز خوشه‌ای- رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی

در این قسمت در ابتدا برای بدست آوردن یک مدل مناسب، از آنالیز خوشه‌ای برای بهبود عملکرد مدل رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی استفاده شده است. برای کلاستر بندی داده‌های تحلیل جهت مدلسازی (۷۵ درصد کل داده‌ها یعنی ۹۱۲ داده) از آنالیز خوشه‌ای در محیط نرم افزار استاتستیکا استفاده شده است. برای کلاستر بندی داده‌های این پژوهش از روش میانگین استفاده شده است. این روش یکی از روش‌های خوشه‌بندی داده‌ها در داده کاوی است. برای این الگوریتم شکل‌های مختلفی بیان شده است. ولی همه آن‌ها دارای روالی تکراری هستند که برای تعدادی ثابت از خوشه‌ها سعی در تخمین موارد زیر دارند:

بدست آوردن نقاطی به عنوان مراکز خوشه‌ها این نقاط در واقع همان میانگین نقاط متعلق به هر خوشه هستند. نسبت دادن هر نمونه داده به یک خوشه که آن داده کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را دارا باشد. در نوع ساده‌ای از این روش ابتدا به تعداد خوشه‌های مورد نیاز نقاطی به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. سپس در داده‌ها با توجه با میزان نزدیکی (شباهت) به یکی از این خوشه‌ها نسبت داده می‌شوند و بدین ترتیب خوشه‌های جدیدی حاصل می‌شود. با تکرار همین روال می‌توان در هر تکرار با میانگین‌گیری از داده‌ها مراکز جدیدی برای آنها محاسبه کرد و مجدداً داده‌ها را به خوشه‌های جدید نسبت داد. این روند تا زمانی ادامه پیدا می‌کند که دیگر تغییری در داده‌ها حاصل نشود. (برای اطلاع بیشتر از این روش به قسمت ۲-۲-۱- مراجعه شود.) در این کلاستر بندی، تعداد ۱۴۵ داده در کلاستر اول، ۴۲۸ داده در کلاستر دوم و ۳۳۹ داده در کلاستر سوم قرار گرفتند. آماره‌های توصیفی هر یک از کلاسترها در جداول ۴ تا ۶ نشان داده شده است.

جدول ۴- آماره‌های توصیفی کلاستر اول.

متغیرها	میانگین	انحراف معیار	واریانس
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۴/۵	۰/۴۲	۰/۱۷
تخلخل-نوترون (بر حسب درصد)	۰/۶۵	۰/۱۸	۰/۰۳
مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)	۰/۴۳	۰/۱۸	۰/۰۳
اشعه گاما (آی.پی.آی)	۰/۳۶	۰/۱۶	۰/۰۲
سرعت صوت (میکروثانیه بر فوت)	۲/۵	۰/۴۴	۰/۱۹
اشباع آب	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۰۲

جدول ۵- آماره‌های توصیفی کلاستر دوم.

متغیرها	میانگین	انحراف معیار	واریانس
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۳/۴	۰/۳۸	۰/۰۱۴
تخلخل-نوترون (بر حسب درصد)	۰/۶۹	۰/۱۷	۰/۰۲
مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)	۰/۴۳	۰/۲۰	۰/۰۴

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران

اشعه گاما (آی.پی.آی)	۰/۴۱	۰/۱۴	۰/۰۲
سرعت صوت (میکروثانیه بر فوت)	۲/۹	۰/۳۸	۰/۱۵
اشباع آب	۰/۲۹	۰/۲۲	۰/۰۴

جدول ۶- آماره‌های توصیفی کلاستر سوم.

متغیرها	میانگین	انحراف معیار	واریانس
چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	۲/۰۳	۰/۴۹	۰/۲۴
تخلخل-نوترون (بر حسب درصد)	۰/۶۵	۰/۱۴	۰/۰۲
مقاومت ویژه الکتریکی (اهم-متر)	۰/۵۳	۰/۱۵	۰/۰۲
اشعه گاما (آی.پی.آی)	۰/۵۴	۰/۱۷	۰/۰۳
سرعت صوت (میکروثانیه بر فوت)	۳/۳	۰/۴۳	۰/۱۸
اشباع آب	۰/۴۳	۰/۲۵	۰/۰۶

حال برای مدلسازی با استفاده از روش رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی برای هر یک از کلاسترها، متغیرهای مستقل در فواصل تقسیم شدند و برای هر یک از فواصل معادله خطی محاسبه شد. فصل مشترک خطوط که همان نقطه شکست می‌باشد، با استفاده از معادلات غیرخطی برای هر یک از کلاسترها محاسبه شد. رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی بدست آمده شامل دو معادله خطی و یک معادله غیرخطی می‌باشد (معادله‌های ۱۱ تا ۱۳). در شکل‌های ۶ تا ۸ و جدول ۷ نتایج تحلیل هر یک از کلاسترها توسط رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی مشاهده می‌شود.

معادلات هر یک از کلاسترها به صورت زیر می‌باشد.

معادله رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی برای کلاستر اول:

$$S_w = \begin{cases} 0.02 + 0.5RHOB + 0.1NPFI + 0.05ILD - 0.01GR - 0.007DT & \text{If } S_w \leq 0.2 \\ EXP(0.26 + 10RHOB + 2.1NPFI + 0.25ILD - 0.1GR - 0.7DT) & \text{If } 0.2 \leq S_w \leq 0.4 \\ 0.5 + 0.2RHOB + 0.01NPFI + 0.06ILD - 0.01GR - 0.01DT & \text{If } S_w > 0.4 \end{cases}$$

(۱۱)

معادله کلاستر اول برای مقادیر کمتر از ۰/۲ و بیشتر از ۰/۴ اشباع آب محاسبه شده، که در آن دو معادله خطی و یک تابع نمایی استفاده شده است.

معادله رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی برای کلاستر دوم:

$$S_w = \begin{cases} 0.18 - 0.08RHOB + 0.5NPFI + 0.33ILD - 0.1GR - 0.26DT & \text{If } S_w \leq 0.2 \\ EXP(0.56 + 10RHOB + 4.1NPFI + 0.75ILD - 0.3GR - 0.9DT) & \text{If } 0.2 \leq S_w \leq 0.4 \\ -0.4 + 0.32RHOB + 0.3NPFI + 0.42ILD - 0.31GR - 0.3DT & \text{If } S_w > 0.4 \end{cases}$$

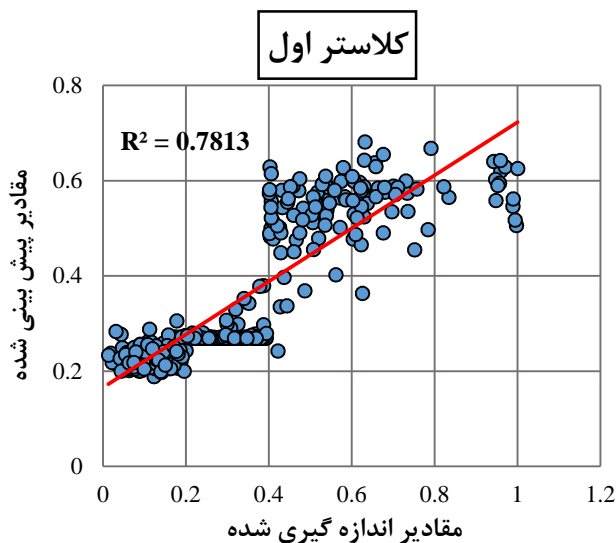
(۱۲)

معادله کلاستر دوم همانند کلاستر اول برای مقادیر کمتر از 0.2 و بیشتر از 0.4 اشباع آب محاسبه شده، که از دو معادله خطی و یک تابع غیرخطی نیز استفاده شده است.

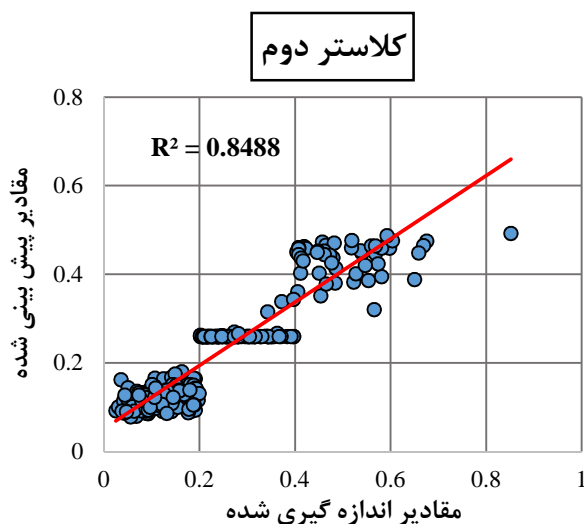
معادله رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی برای کلاستر سوم:

$$S_w = \begin{cases} 0.2 - 0.01RHOB - 0.2NPHI + 0.09ILD - 0.01GR - 0.2DT & \text{If } S_w \leq 0.4 \\ (0.27 + \text{EXP}(-7.4 - 2.2ILD + 0.3RHOB + 15.1GR - 26.3NPHI + 12.9DT)) & \text{If } 0.4 < S_w < 0.6 \\ 0.3 + 0.02RHOB - 0.3NPHI - 0.2ILD - 0.01GR - 0.3DT & \text{If } S_w > 0.6 \end{cases} \quad (13)$$

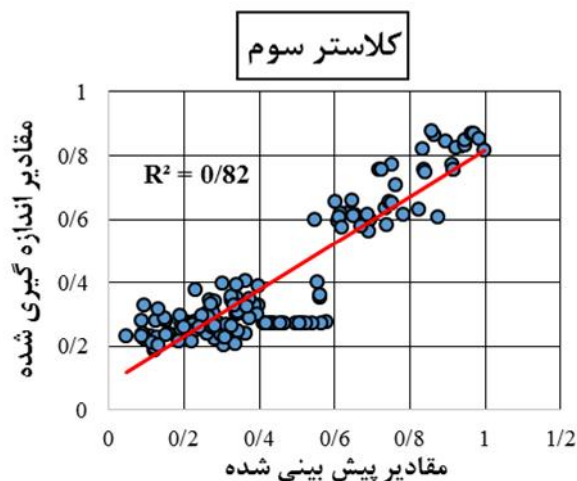
معادله کلاستر سوم برای مقادیر کمتر از 0.4 و بیشتر از 0.6 اشباع آب محاسبه شده، که از دو معادله خطی همانند دو معادله قبلی یک تابع نمایشی نیز استفاده شده است.



شکل ۶- همبستگی میان مقادیر واقعی با مقادیر پیش بینی شده در کلاستر اول.



شکل ۷- همبستگی میان مقادیر واقعی با مقادیر پیش بینی شده در کلاستر دوم.

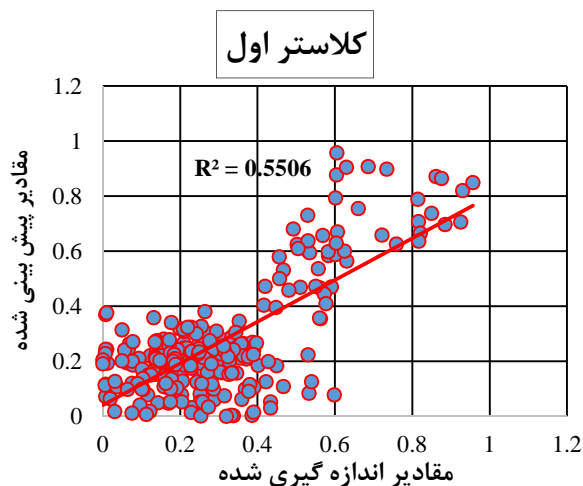


شکل ۸- همبستگی میان مقادیر واقعی با مقادیر پیش بینی شده در کلاستر سوم.

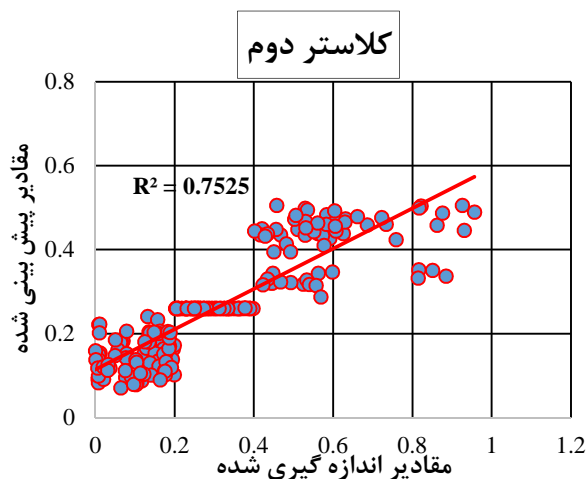
جدول ۷- عملکرد مدل رگرسیون قطعه‌ای-غیرخطی برای داده‌های مورد تحلیل.

کلاستر سوم		کلاستر دوم		کلاستر اول	
MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²
۰/۰۰۸	۰/۸۲	۰/۰۰۳	۰/۸۴	۰/۰۱	۰/۷۸

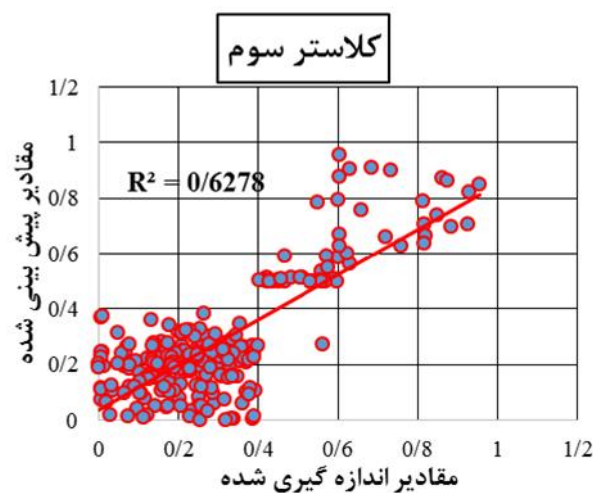
پس از تعیین معادلات، داده‌های آزمون جهت ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از رگرسیون‌های قطعه‌ای غیرخطی هر یک از کلاسترها مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل در شکل‌های ۹ تا ۱۱ و همچنین جدول ۸ آمده است.



شکل ۹- همبستگی داده‌های آزمون و داده‌های محاسبه شده با معادله کلاستر اول.



شکل ۱۰- همبستگی داده‌های آزمون و داده‌های محاسبه شده با معادله کلاستر دوم.



شکل ۱۱- همبستگی داده‌های آزمون و داده‌های محاسبه شده با معادله کلاستر سوم.

جدول ۸- عملکرد مدل رگرسیون قطعه‌ای- غیرخطی برای داده‌های آزمون.

کلاستر سوم		کلاستر دوم		کلاستر اول	
MSE	R ²	MSE	R ²	MSE	R ²
۰/۰۲	۰/۶۲	۰/۰۱	۰/۷۵	۰/۰۱	۰/۶۵

همانطور که در جداول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، در این مدل‌سازی کمترین میانگین مربعات خطا و بیشترین ضریب همبستگی در کلاستر دوم اتفاق می‌افتد. لذا معادله کلاستر دوم بدست آمده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی به عنوان مدل بهینه جهت تخمین اشباع آب سازندی و شبیه‌سازی در مرحله‌ی بعد انتخاب می‌شود.

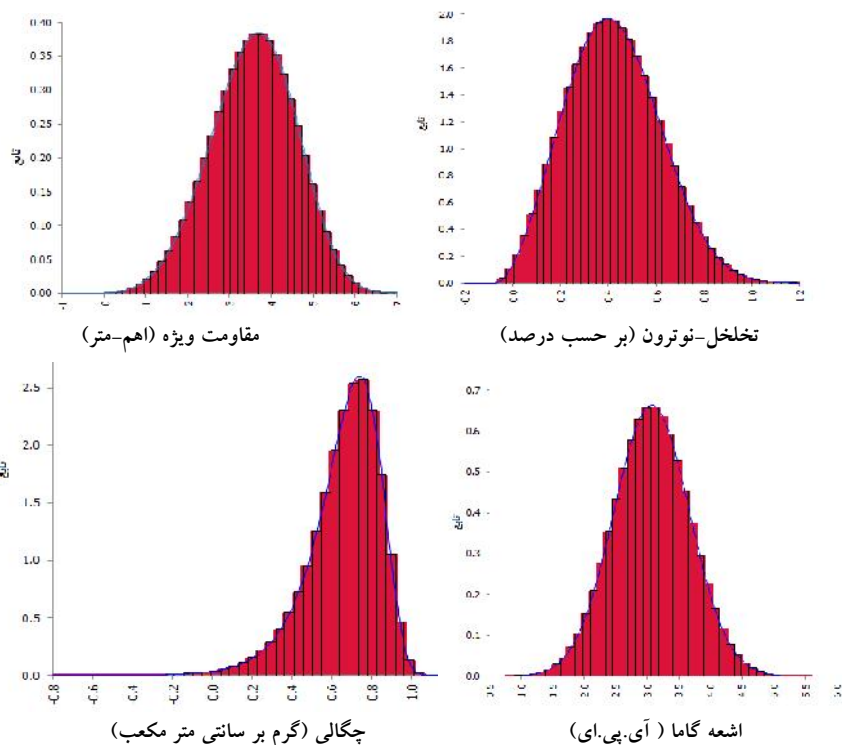
۴- تخمین و شبیه‌سازی اشباع آب سازندی با استفاده از روش مونت کارلو

در قسمت قبل یک معادله بهینه با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی برای تخمین اشباع آب سازندی بدست آمد. در این قسمت به علت وجود عدم قطعیت در داده‌ها با استفاده از معادله بدست آمده پارامتر اشباع آب سازندی با روش مونت کارلو شبیه‌سازی شده است. علاوه بر این تاثیرگذارترین پارامترها در تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از این روش تعیین شده است. در این مدل‌سازی با استفاده از آزمون‌های کلموگروف-اسمیرنوف، کای اسکور، نوع تابع توزیع داده‌ها

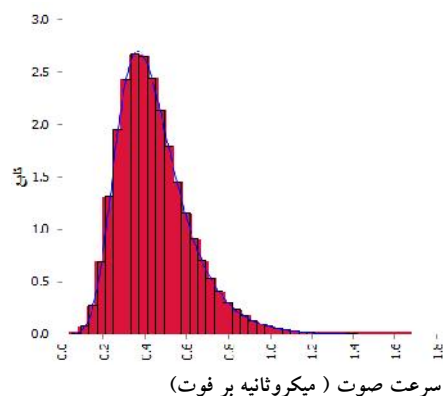
تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران تعیین شد. متغیرهای مقاومت و نوترون با تابع توزیع وایبل^{۲۶}، اشعه گاما با تابع نرمال^{۲۷} و سرعت صوت با چگالی توسط تابع توزیع مقدار حدی تعمیم یافته^{۲۸} تعریف شده‌اند. شکل ۱۱۲ توزیع فراوانی هر یک از متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه سازی را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۹ توابع توصیف احتمالاتی هر یک از متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه سازی را نشان می‌دهد.

جدول ۹- توابع توصیف احتمالاتی هر یک از متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه سازی.

متغیرهای ورودی	توابع
مقاومت ویژه الکتریکی	Weibull(۴/۲۹، ۴/۲۲)
اشعه گاما	Normal(۳/۶، ۰/۶)
تخلخل-نوترون	Weibull (۲/۷، ۰/۵)
چگالی	Extvalue (۰/۷۴، ۰/۱۴)
سرعت صوت	Extvalue (۰/۳۶، ۰/۱۳)



26 Weibull
27 Normal
28 Extvalue



شکل ۱۲- توزیع فراوانی متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه سازی (خروجی نرم افزار ریسک).

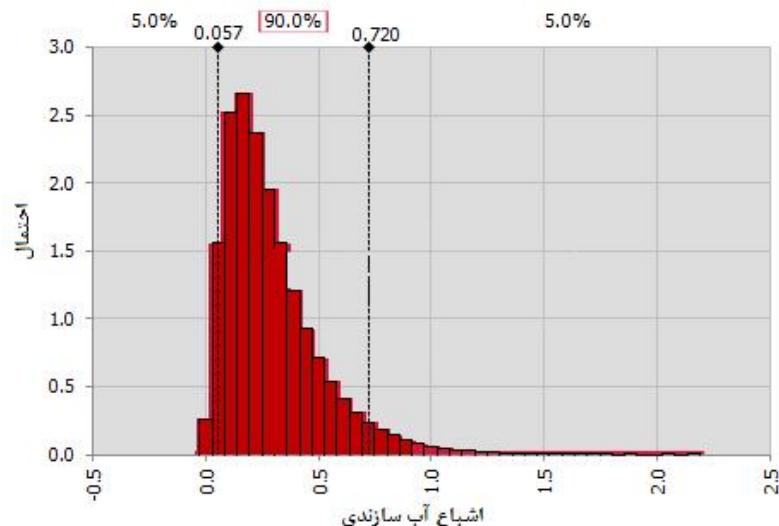
در این پژوهش، برای شبیه سازی از نرم افزار ریسک^{۲۹} استفاده شده است. نرم افزار ریسک با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو و تولید اعداد تصادفی، پارامترهای ورودی را تحلیل کرده و مقادیر خروجی را همراه با توابع توزیع احتمال آن ارائه می‌دهد. برای بهبود عملکرد شبیه‌سازی مونت کارلو از ماتریس همبستگی داده‌های مورد تحلیل استفاده می‌شود (جدول ۱۰). سپس با توجه به معادلاتی که در قسمت قبل توضیح داده شد، مناسب‌ترین تابع (از نظر همبستگی با مقادیر مورد تحلیل و آزمون) جهت تخمین اشباع آب در شبیه سازی مونت کارلو انتخاب شد. معادله بهینه توسط کلاستر دوم با روش رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی بدست آمده است.

جدول ۱۰- ماتریس همبستگی متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه سازی.

سرعت صوت	تخلخل-نوترون	چگالی	اشعه گاما	مقاومت ویژه الکتریکی	متغیرهای ورودی
				۱	مقاومت ویژه الکتریکی
			۱	-۰/۴۵	اشعه گاما
		۱	۰/۰۰۹	۰/۰۷	چگالی
	۱	-۰/۴۶	۰/۰۴	-۰/۲۴	تخلخل-نوترون
۱	۰/۴۷	-۰/۸۳	۰/۰۴	-۰/۲۶	سرعت صوت

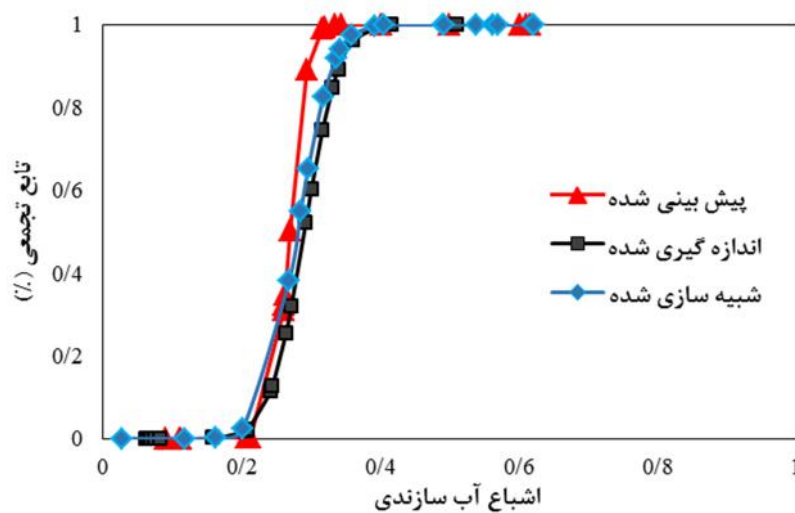
شکل ۱۳ نتیجه شبیه‌سازی اشباع آب سازندی را نشان می‌دهد، طبق تابع توزیع بدست آمده میانگین اشباع آب سازندی در منطقه مورد مطالعه ۰/۲۸ می‌باشد. تابع توزیع یاد شده در مقایسه با روش‌های آماری دید بهتری نسبت به تغییرات اشباع آب سازندی داده و به جای یک عدد می‌تواند بازه‌ای از تغییرات را در اختیار مهندسین قرار دهد. به عنوان مثال با سطح اطمینان ۹۰ درصد، مقدار اشباع آب سازندی در منطقه مورد مطالعه بین ۰/۰۵ تا ۰/۷ می‌باشد.

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران



شکل ۱۳- نتیجه توصیف مدل بهینه شده اشباع آب سازندی با استفاده از روش مونت کارلو (خروجی نرم افزار ریسک).

بعلاوه در این پژوهش مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه سازی شده، پیش بینی شده و اندازه گیری شده انجام شده است که نتایج این مقایسه در شکل ۱۴ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین اشباع آب سازندی در مقادیر اندازه گیری شده آزمایشگاهی ۰/۲۹، در روش شبیه‌سازی این مقدار ۰/۲۸ و در حالت پیش‌بینی با روش رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی ۰/۲۷ بدست آمده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که روش‌های آماری-احتمالاتی می‌توانند یک تخمین گر مفید و کارآمد در زمینه علم پتروفیزیک می‌باشد و در نتیجه با این متودولوژی می‌توان بصورت غیرمستقیم و بدون انجام عملیات مغزه‌گیری، اشباع آب سازندی مخازن هیدروکربوری را با دقت مناسبی شبیه‌سازی و تخمین زد.

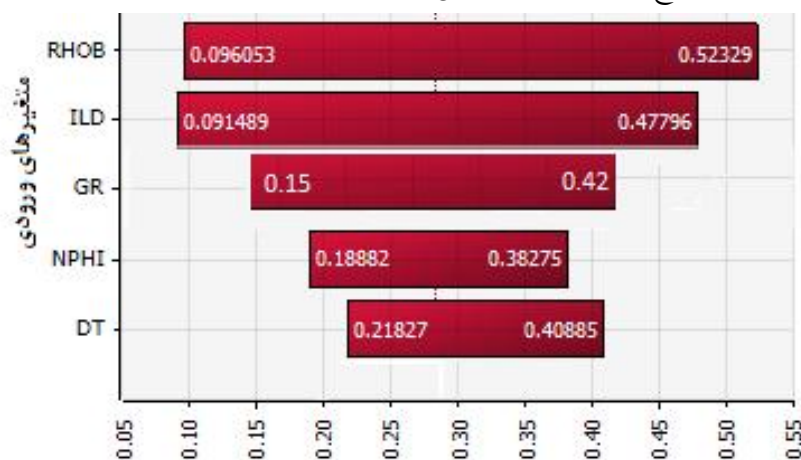


شکل ۱۴- مقایسه توابع چگالی مقادیر پیش بینی شده، شبیه سازی شده و اندازه‌گیری شده (خروجی نرم افزار ریسک).

۴-۱- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی با استفاده از روش مونت کارلو

روش مونت کارلو علاوه بر شبیه سازی، آنالیز حساسیت را نیز بر روی متغیرهای ورودی را انجام می‌دهد. در این آنالیز میزان همبستگی متغیرهای ورودی شبیه سازی شده، نسبت به متغیر خروجی محاسبه می‌شود که محدوده مقادیر همبستگی می‌تواند بین ۱- تا ۱+ باشد. در این تحقیق از آنالیز حساسیت جهت اولویت‌بندی متغیرهای ورودی، در تعیین اشباع آب

سازندی استفاده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۱۵ تاثیرگذارترین متغیر در تخمین درجه اشباع آب به ترتیب: چگالی، مقاومت ویژه الکتریکی، اشعه گاما می باشد. همچنین جدول ۱۱ اولویت بندی متغیرها را بر اساس کمترین، بیشترین و میانگین تاثیر روی اشباع آب سازندی نشان می دهد.



تاثیر متغیرهای ورودی

شکل ۱۵- میزان تاثیر متغیرهای ورودی بر روی اشباع آب سازندی (خروجی نرم افزار ریسک).

جدول ۱۱- آنالیز حساسیت متغیرهای مورد استفاده در تحلیل نسبت به اشباع آب سازندی.

متغیرها	اولویت بندی	کمترین	بیشترین	تاثیر	میانگین متغیرها
اشعه گاما	۳	۰/۱۵	۰/۴۲		۰/۲۷
چگالی	۱	۰/۰۹	۰/۵۲		۰/۴۲
تخلخل-نوترون	۴	۰/۱۸	۰/۳۸		۰/۱۹۳
مقاومت ویژه الکتریکی	۲	۰/۰۹	۰/۴۷		۰/۳۸
سرعت صوت	۵	۰/۲۱	۰/۴۰		۰/۱۹۰

۵- نتیجه گیری

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که باید با استفاده از نمودارهای چاه پیمایی به دقت محاسبه شود، میزان اشباع شدگی آب است. هرگونه اشتباه در محاسبه این پارامتر می تواند منجر به از دست دادن لایه های تولید کننده نفت شود. هدف از این پژوهش، تخمین اشباع شدگی آب سازندی یکی از چاه نفت های جنوب غرب ایران با استفاده از تلفیق روش های آماری می باشد. بدین منظور پس از انجام نمودارگیری از چاه مورد مطالعه، اطلاعات پنج نگار گرفته شده از چاه در کنار داده های مغزه گیری قرار داده شد، ۲۱۲ ردیف داده در دسترس بود، ۳۰ درصد آن را به طور تصادفی جهت آزمون روش ها کنار گذاشته و مابقی داده ها وارد تحلیل شدند. پس از آماده سازی داده ها ابتدا با استفاده از روش آنالیز خوشه ای به سه کلاستر بر اساس شباهت گروه بندی شدند، سپس با بکارگیری رگرسیون قطعه ای-غیرخطی بر روی هر کلاستر میزان همبستگی داده های چاه نگاری با داده های مغزه گیری محاسبه شد. معادله ای که دارای بهترین ضریب همبستگی بود به عنوان معادله مناسب برای بررسی داده های آزمون انتخاب شد. از سوی دیگر با استفاده از روش مونت کارلو و معادله ای که در آنالیز خوشه ای-رگرسیون قطعه ای به عنوان بهترین معادله انتخاب شد، ۸۰۰۰ داده به طور تصادفی شبیه سازی شدند، سپس اعداد

تخمین اشباع آب سازندی با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی، آنالیز خوشه‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران

شبیه‌سازی شده با اعداد اندازه‌گیری شده، با تابع چگالی مربوط به نوع تابع توزیع اعداد مقایسه شدند. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین اشباع آب سازندی در مقادیر اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی ۰/۲۹، در روش شبیه‌سازی این مقدار ۰/۲۸ و در حالت پیش‌بینی با روش رگرسیون قطعه‌ای غیرخطی ۰/۲۷ بدست آمده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که روش‌های آماری-احتمالاتی می‌توانند یک تخمین گر مفید و کارآمد در زمینه علم پتروفیزیک می‌باشد و در نتیجه با این متودولوژی می‌توان بصورت غیرمستقیم و بدون انجام عملیات مغزه‌گیری، اشباع آب سازندی مخازن هیدروکربوری را با دقت مناسبی شبیه‌سازی و تخمین زد. بعلاوه در این مقاله با استفاده از روش مونت کارلو، آنالیز حساسیت جهت تعیین موثرترین پارامتر ورودی، در تعیین اشباع آب سازندی انجام شد که تاثیرگذارترین متغیر در تخمین درجه اشباع آب سازندی، لاگ چگالی بدست آمد.

سپاس و قدردانی

نویسندگان این مقاله از پرسنل محترم شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب بخاطر همکاری صمیمانه‌ای که داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارند. از آقایان دکتر علی معلمی، دکتر سجاد کاظم شیرودی بخاطر داوری مقاله سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

- [1] KAMEL M. H., MABROUK W. M. 2002, An equation for estimating water saturation in clean formations utilizing resistivity and sonic logs: theory and application: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **36**, 159-168.
- [2] AMIRI M., ZAHEDI G., YUNAN M. H. 2015, Reducing predictive uncertainty in log-derived water saturation models in a giant tight shaly sandstones—A case study from Mesaverde tight gas reservoir: *Journal of Natural Gas Science & Engineering*, **23**, 380-386.
- [3] MABROUK W. M., Soliman K. S., Anas S. S. 2013, New method to calculate the formation water resistivity (R_w): *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **104**, 49-52.
- [4] LEE M., COLLETT T. 2011, In-situ gas hydrate hydrate saturation estimated from various well logs at the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope: *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 439-449.
- [5] WORTHINGTON P. F. 1993, The uses and abuses of the Archie equations, 1: The formation factor-porosity relationship: *Journal of Applied Geophysics*, **30**, 215-228.
- [6] NAIMI S., SHAHIDZADEH S., RIAHI M., MIRZAKHANIAN M. 2014, Estimation of reservoir porosity and water saturation based on seismic attributes using support vector regression approach: *Journal of Applied Geophysics*, **107**, 93-101.
- [7] HABIBI M. J., MOKHTARI A. R., BAGHBANaghbanan A., Namdari S. 2014, Prediction of permeability in dual fracture media by multivariate regression analysis: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **120**, 194-201.
- [8] HUANG D., SIMA L., WU F., WANG L., LI Q. 2015, Estimating saturation exponent from NMR logging: *Arabian Journal of Geosciences*, **8**, 6771-6778.
- [9] AL-BULUSHI N., KING P. R., BLUNTI M. J., KRAAJVELD M. 2009, Development of artificial neural network models for predicting water saturation and fluid distribution: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **68**, 197-208.
- [10] VADAPALLI U., SRIVASTAVA R., VEDANTI N., DIMIRI V. 2014, Estimation of permeability of a sandstone reservoir by a fractal and Monte Carlo simulation approach: a case study: *Nonlinear Processes in Geophysics*, **21**, 9-18.
- [11] QUANDT R. E. 1958, The estimation of the parameters of a linear regression system obeying two separate regimes: *Journal of the american statistical association*, **53**, 873-880.

-
- [12] MICHELI O. J., HERO A. O., BADEL A. E. 1999, Tree-structured nonlinear signal modeling and prediction: *IEEE Transactions on Signal Processing*, **47**, 3027-3041.
- [13] PANDIT Y. P., BADHE Y. P., SHARMA B., TAMBE S. S., KULKARNI B. D. 2011, Classification of Indian power coals using K-means clustering and Self Organizing Map neural network: *Fuel*, **90**, 339-347.
- [14] ALPAYDIN E. (2014) Introduction to machine learning. MIT press,
- [15] ALSABTI K., RANKA S., SINGH V. 1997, An efficient k-means clustering algorithm.
- [16] DING C., HE X. K-MEANS clustering via principal component analysis. In: Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning, 2004. ACM, p 29
- [17] NG H., ONG S., FOONG K., GOH P., NOWINSKI W. Medical image segmentation using k-means clustering and improved watershed algorithm. In: 2006 IEEE Southwest Symposium on Image Analysis and Interpretation, 2006. IEEE, pp 61-65
- [18] KAWARAKOW I. 2000, Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. II. Application to ion chamber response simulations: *Medical physics*, **27**, 499-513.
- [19] MILNER R. (1971) An algebraic definition of simulation between programs. Citeseer,
- [20] ARIAN M., MOHAMMADIAN R. 2011, Analysis of Fractures in the Asmari Reservoir of Marun Oil Field (Zagros): *Geosciences*, **20**, 88-96.



Estimation of formation water saturation using cluster analysis, piecewise nonlinear regression and Monte Carlo simulation in a carbonate reservoir, south-west Iran

H. Fattahi*, Z. Varmazyarii, M. Yousefirad

*H.fattahi@arakut.ac.ir

Received: September 2016, Accepted: February 2017

Abstract

Estimation of formation water saturation (S_w) using log data is an important approach in the seismic exploration and characterization of a hydrocarbon reservoir. Therefore, it seems that the proper prediction/simulation of S_w is essential. The first objective of this study was to develop a predictive model for S_w estimation based on hybrid cluster analysis with piecewise nonlinear regression, and after that, using the developed model, S_w was simulated by the Monte Carlo simulation (MCS). In order to achieve objectives of this study, a group of 909 data points was used for model construction and 302 data points were employed for assessment of model. The obtained results of MCS modeling indicated that this approach is capable of simulating S_w ranges with a good level of accuracy. The mean of simulated S_w by MCS was obtained as 0.28 m, while this value was achieved as 0.29 m for the measured one. Furthermore, a sensitivity analysis was also conducted to investigate the effects of model inputs on the output of the system. The analysis demonstrated that RHOB is the most influential parameter on S_w among all model inputs. It is noticeable that the proposed hybrid cluster analysis with piecewise nonlinear regression and MCS models should be utilized only in the studied area and the direct use of them in the other conditions is not recommended.

Keywords: Formation water saturation, Cluster analysis, Monte Carlo simulation, Piecewise nonlinear regression, Sensitivity analysis.