

پیش‌بینی سرعت موج برشی در مخزن نفتی به روش آماری - احتمالاتی

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

۱- استادیار، مکانیک سنگ، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک h.fattahi@arakut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

۳- دانشیار، زمین‌شناسی، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک

(دریافت ۱۲ اسفند ۱۳۹۵، پذیرش ۶ اسفند ۱۳۹۶)

چکیده

ارزیابی خواص پتروفیزیکی، پایه و اساس مدلسازی در امر مطالعه تولید و مدیریت یک مخزن نفتی محسوب می‌شود. یکی از پارامترهای ضروری برای توصیف مخازن هیدروکربوری، سرعت موج برشی است. تعیین سرعت موج برشی با روش‌هایی مانند آنالیز مغزه، مستلزم صرف زمان و هزینه گزافی است. همچنین به علت نبود مغزه‌های کافی و تغییرات سنگ‌شناسی و ناهمگنی سنگ مخزن، تعیین این پارامتر با روش‌های معمول دقت چندانی ندارد بنابراین در این تحقیق از یک روش پیشرفته آماری - احتمالاتی به نام روش ترکیبی رگرسیون قطعه‌ای - شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور پیش‌بینی و شبیه‌سازی سرعت موج برشی در یکی از مخازن نفتی جنوب غربی ایران استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا با استفاده از چاه نگارهای مختلف و روش رگرسیون قطعه‌ای مدلسازی انجام گرفته و پس از آن با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو پارامتر سرعت موج برشی شبیه‌سازی و پیش‌بینی شده است. در این مطالعه از بانک اطلاعاتی مجموعه داده‌های تصحیح شده در میدان نفتی مارون شامل ۴۰۰۰ ست داده که ۷۰ درصد آن برای ساخت مدل و مابقی برای ارزیابی عملکرد مدل، استفاده شده است. بعلاوه در این تحقیق با کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین موثرترین پارامتر ورودی، در تعیین سرعت امواج برشی استفاده شد که بر اساس نتایج به دست آمده تأثیرگذارترین متغیر ورودی، سرعت موج فشاری است. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که روش یاد شده در برآورد غیرمستقیم سرعت موج برشی در مخازنی که این پارامتر اندازه‌گیری نشده است، دقت و قابلیت بالایی دارد.

کلمات کلیدی

سرعت موج برشی، روش رگرسیون قطعه‌ای، شبیه‌سازی مونت کارلو، مخزن هیدروکربوری

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

پیچیدگی طبیعی سیستم‌های مخزن هیدروکربوری یک چالش برای علوم زمین ایجاد کرده است. نبود داده‌های قابل اعتماد منجر به درک ناکافی از رفتار مخزن و در نتیجه منجر به پیش‌بینی‌های ضعیف می‌شود [۱]. از طرفی با توجه به اهمیت بسیار بالای مطالعات پتروفیزیکی و ژئوفیزیکی مخزن و نقش آن در اکتشاف، تولید و بهره‌برداری ذخایر هیدروکربنی، شناخت کامل سرعت موج برشی^۱ و تراکمی^۲ می‌تواند اطلاعات مفیدی برای مطالعه مخازن مانند: ارزیابی سازندها و لیتولوژی مخازن، پیش‌بینی پارامترهای ژئومکانیکی مخازن و پیش‌بینی پارامترهای پتروفیزیکی مخازن فراهم کند [۲]. امروزه با رشد تکنولوژی می‌توان سرعت موج برشی را به صورت مستقیم (اندازه‌گیری در آزمایشگاه از روی مغزه) به‌دست آورد، که این روش‌ها بسیار زمان‌بر و پرهزینه‌اند. همچنین به علت نبود مغزه‌های کافی و تغییرات سنگ‌شناسی و ناهمگنی سنگ مخزن، تعیین این پارامتر با روش‌های معمول دقت چندانی ندارد. بعلاوه داده‌های مربوط به سرعت امواج برشی در تمامی چاه‌ها به ویژه چاه‌های قدیمی وجود ندارد. این مساله تنها به دلیل هزینه بالای مغزه‌گیری و انجام نشدن اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی نیست؛ بلکه در برخی چاه‌ها مانند چاه‌های افقی مغزه‌گیری عملاً غیر ممکن است ولی تقریباً از تمامی چاه‌ها نمودارگیری انجام می‌شود، بنابراین استفاده از روش‌های غیرمستقیم که بتوانند از روی نمودارهای چاه‌نگاری به تخمین سرعت موج برشی بپردازند بسیار مفید خواهد بود. در سال‌های اخیر، در زمینه شناخت و ارزیابی پارامترهای پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی مخازن نفت و گاز با استفاده از نمودارهای مختلف چاه‌پیمایی و روش‌های مدلسازی مختلف، مطالعات بسیاری انجام گرفته است که در این مطالعه به مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. نورافکن و کدخدایی ایلخچی [۳] با استفاده از ترکیب سیستم استنتاجی فازی و الگوریتم بهینه مورچگان^۳ سرعت موج برشی میدان نفتی چشمه خوش در جنوب غربی ایران را تخمین زدند. زویداویان‌پور و همکاران [۴] با استفاده از سیستم استنتاجی نروفازی تطبیقی^۴ و

رگرسیون خطی چندگانه^۵ سرعت موج فشاری را از نگارهای چاه‌پیمایی در یک مخزن هیدروکربوری پیش‌بینی کردند. آسوده و باقری‌پور [۵] از روش‌های هوشمند با ایجاد رابطه کمی بین نگارهای چاه‌نگاری و سرعت امواج صوتی برای پیش‌بینی سرعت امواج فشاری، برشی و استونلی بر روی سازند آسماری استفاده کردند. معتضدیان و همکاران [۶] با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک سرعت موج برشی و فشاری را در یک مخزن کربناته واقع در میدان ابودر و هنديجان پیش‌بینی و با مقادیر واقعی مقایسه کردند. رجبی و همکاران [۷] با استفاده از روش‌های هوشمند منطق فازی، الگوریتم ژنتیک و نروفازی سرعت امواج فشاری، برشی و استونلی از نگارهای چاه‌پیمایی مربوط به مخزن کربناتی در آبادان، جنوب غربی ایران (سازند سروک) را پیش‌بینی کردند. رضایی و همکاران [۸] از روش‌های منطق فازی، نروفازی و شبکه عصبی مصنوعی به عنوان ابزارهای هوشمند برای تعیین سرعت موج برشی از داده‌های پتروفیزیکی واقع در نهشته‌های ماسه‌سنگی حوزه کارنارون^۶ استرالیا استفاده کردند. کدخدایی ایلخچی و همکاران [۹] از تکنیک منطق فازی به ارزیابی نفوذپذیری و از نسبت سرعت موج فشاری به موج برشی برای تعیین نوع گروه‌های سنگی مخزن هیدروکربوری واقع در سازند کنگان سواحل جنوب غربی ایران استفاده کردند. اسکندری و همکاران [۱۰] برای پیش‌بینی سرعت موج برشی در یک مخزن کربناته واقع در جنوب غربی ایران از روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند. بوادو [۱۱] با استفاده از مدل‌های پتروفیزیکی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و اندازه‌گیری سرعت امواج برشی و فشاری در آزمایشگاه، اشباع‌شدگی نفت در سطوح ناشناخته را پیش‌بینی کردند. مصطفی کمل و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۰۲ با استفاده از روش رگرسیون غیر خطی به تخمین اشباع آب سازندی در دو منطقه ایالات متحده آمریکا و مصر پرداختند. امیری و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۵ اشباع آب سازندی منطقه ماسه سنگ شیلی کوه‌های راکی واقع در غرب ایالات متحده را با بکارگیری از روش رگرسیون غیرخطی

یک (۹۰ درصد دولومیت) بیشتر است. در لایه‌های مخزنی چهار، پنج و شش این میدان به دلیل افزایش لایه‌های شیلی و مارنی، همچنین کاهش شکنندگی، تراکم شکستگی‌ها کمتر می‌شود. میدان نفتی مارون از سه مخزن آسماری، بنگستان و گروه خامی تشکیل شده است که مخازن آسماری و بنگستان آن نفتی و مخزن خامی، حاوی ذخایر گاز طبیعی است. مخزن آسماری میدان مارون از نظر ویژگی‌های سنگ مخزن، بسیار پیچیده و ناهمگون است. میدان مارون ساختمانی تاقدیسی دارد که با جهت شمال غرب- جنوب شرق به ویژه در قسمت‌های غربی و مرکزی مشخص می‌شود. شواهد سطحی زیادی از تاقدیس مارون وجود ندارد و بنابراین تعیین دقیق ساز و کار چین‌خوردگی بدون داده‌های لرزه‌ای سه بعدی بسیار مشکل است. تنها شواهد سطحی این تاقدیس، لایه‌هایی از سازند آجاجاری است که رخنمون یافته‌اند [۲۰] و در سال ۱۹۶۳ میلادی کشف شد و از سال ۱۳۴۵ مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. همچنین مخزن بنگستان میدان مارون، با حفاری اولین چاه در سال ۱۳۴۷ کشف و بهره‌برداری از آن، از سال ۱۳۵۲ آغاز شد. طول این میدان ۶۷ کیلومتر و عرض آن ۷ کیلومتر است و در حد فاصل کیلومتر ۳۰ تا ۱۱۰ جنوب‌شرقی شهر اهواز قرار دارد.

در این پژوهش داده‌های ورودی برای مدلسازی از نگارهای چاه‌نگاری در یکی از مخازن میدان نفتی مارون به‌دست آمده است. این تحقیق با همکاری شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب و از بانک اطلاعاتی این مجموعه انجام شده است. مجموعه داده‌هایی که توسط شرکت مناطق نفت‌خیز جنوب در اختیار مولفین این مقاله (بدون ذکر شماره چاه که به صورت محرمانه اعلام کردند) قرار گرفت. تعداد ۴۰۰۰ ست داده تصحیح شده در عمق ۲۱۳۲ متری تا ۲۷۶۶ متر از یک چاه واقع در میدان مارون است که با استفاده از عملیات چاه‌نگاری اخذ شده است. چاه‌نگاری عملیاتی است که اطلاعاتی درباره تغییرات خواص فیزیکی سازندهایی که چاه، آن‌ها را قطع کرده است و همچنین سیال (همچون نفت، گاز و آب) موجود در آن‌ها، در

پیش‌بینی کردند. لی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۱ رابطه‌ای میان نگارهای پتروفیزیکی و اشباع سیال هیدراته در کوه آلبرت را با استفاده از روش رگرسیون غیرخطی ارائه کردند. در سال ۲۰۱۴ نعیمی و همکارانش [۱۵] با استفاده از روش رگرسیونی به بررسی اشباع آب سازندی مخازن نفتی پرداختند. حبیبی و همکاران [۱۶] با استفاده از روش تجزیه رگرسیونی به تخمین نفوذپذیری سیال در سنگ‌هایی که شکستگی بالایی دارند، پرداختند. هیوانگ و همکاران (۲۰۱۵) [۱۷] با روش رگرسیونی به تخمین اشباع آب سازند ماسه سنگی خاورمیانه پرداختند. بولوشی و همکاران (۲۰۰۹) [۱۸] به بررسی پارامترهای موثر برای تعیین اشباع آب سازند ماسه‌سنگی مخزن شرق دریای عمان پرداختند. در سال ۲۰۱۴ ودانتی [۱۹] با استفاده از روش مونت کارلو به برآورد نفوذپذیری یک میدان نفتی ماسه سنگی واقع در حوضه هند پرداخت. در این مقاله، با استفاده از داده‌های خام به‌دست آمده از چاه‌نگاری و اطلاعات آزمایشگاهی حاصل از آنالیز مغزه در یکی از مخازن هیدروکربوری جنوب غربی ایران و روش ترکیبی رگرسیون قطعه‌ای- شبیه‌سازی مونت کارلو پارامتر سرعت موج برشی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی شده است.

۲- منطقه مورد مطالعه

میدان نفتی مارون یکی از بزرگترین میدان‌های نفتی حوضه زاگرس است که در بخش شرقی منطقه ساختاری فرفوفتادگی دزفول، در مجاورت میدان نفتی آجاجاری، میدان نفتی اهواز و میدان نفتی کوپال قرار دارد. این میدان با روند شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در قسمت غربی تا مرکزی و روند شمال‌شرقی جنوب‌غربی، در قسمت انتهایی شرقی امتداد یافته است. رخنمون سطحی این میدان، سازند آجاجاری است و سازندهای آسماری و گروه‌های بنگستان و خامی، مخازن هیدروکربوری موجود در این میدان‌اند. سازند آسماری مهم‌ترین سنگ مخزن این میدان به شش لایه مخزنی تقسیم شده است. لایه‌های مخزنی یک، دو و سه به طور عمده از کربنات‌های دولومیتی تشکیل شده‌اند، بنابراین تراکم شکستگی‌ها به ویژه در لایه

جدول ۱- آمار توصیفی داده‌های منطقه مورد مطالعه

پارامتر	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	انحراف معیار
اشعه گاما	۸٫۹۲	۸۵٫۷۷	۲۶٫۸۲	۱۶٫۹۶
سرعت موج فشاری (Km/s)	۲٫۱۱	۶٫۸۱	۴٫۳۲	۱٫۰۶
چگالی (Kg/m ³)	۱۹۱۶	۳۱۹۱٫۹۰	۲۴۲۴٫۷۲	۳۲۴٫۵۶
سرعت موج برشی (Km/s)	۱٫۶۸	۳٫۶۴	۲٫۶۴	۰٫۳۹

جدول ۲- بخشی از داده‌های استفاده شده برای مدل‌سازی

شماره داده	پارامترهای ورودی			پارامتر خروجی
	اشعه گاما	سرعت موج فشاری (Km/s)	چگالی (Kg/m ³)	
۱	۳۵٫۰۹۶۶	۲٫۶۲۳۶۰	۳۱۹۱٫۹۰	سرعت موج برشی (Km/s)
۲	۳۵٫۸۴۵۶	۲٫۶۱۸۵۰	۳۱۹۱٫۹۰	سرعت موج برشی (Km/s)
۳	۳۵٫۶۵۷۶	۲٫۶۱۴۰۲	۳۱۹۱٫۹۰	سرعت موج برشی (Km/s)
۴	۳۵٫۹۷۰۱	۲٫۶۰۳۸۴	۳۱۹۱٫۹۰	سرعت موج برشی (Km/s)
۵	۳۶٫۸۹۰۲	۲٫۵۹۱۲۰	۳۱۹۱٫۹۰	سرعت موج برشی (Km/s)

۳- مدل‌سازی و مروری اجمالی بر روش رگرسیون قطعه‌ای

رگرسیون قطعه‌ای یک ابزار مفید برای توصیف روند تغییرات داده‌ها است. همچنین روشی برای قطعه‌بندی مدل رگرسیونی به تکه‌های خطی جداگانه است که این قطعه‌ها به وسیله نقاط شکست از هم جدا می‌شوند. به این ترتیب که اگر یک نقطه شکست وجود داشته باشد، دو معادله مجزا به دست می‌آید که این معادلات تابع نقطه شکست‌اند و برای مقادیر کمتر و بیشتر از نقطه شکست سازماندهی می‌شوند. به این صورت که یکی از معادلات برای مقادیری که جواب حاصل از آن کمتر از نقطه شکست است و دیگری برای مقادیری که بیشتر از نقطه شکست است در نظر گرفته می‌شوند. معادله‌ای که به عنوان تابع کلی در نظر گرفته

اختیار مهندسان قرار می‌دهد. هر چاه نمودار شعاع بررسی مشخصی دارد. تقریباً تمام نفت و گازی که امروزه از مخازن نفتی (یا گاز) استخراج می‌شوند، در شرایط طبیعی خود در خلل و فرج موجود در سنگ مخزن قرار دارند، بنابراین یکی از روش‌های متداول برای جمع‌آوری اطلاعات لازم و تحقیق در مورد سنگ مخزن، نمودارگیری از داخل چاه‌ها است. این نمودارها به وسیله ابزاری ویژه که تحت کنترل است و با سیم رابط به داخل چاه فرستاده می‌شود، تهیه می‌شوند. بدیهی است هر یک از چاه نمودارها مصرفی خاص داشته و قسمتی از مجهولات را روشن می‌کند، بنابراین به منظور تجزیه و تحلیل

کامل سنگ مخزن و لایه تولیدی و بعضی مشخصات سیال

موجود در لایه، لازم است که چاه نمودارهای مختلفی تهیه شود [۲۱]. در این تحقیق از نمودار اشعه گاما، چگالی و صوتی برای تعیین متغیرهای مستقل و در مقابل برای هر یک از ست داده‌ها یک مغزه‌گیری برای تعیین سرعت موج برشی به عنوان داده واقعی برای مدل‌سازی و ارزیابی استفاده شده است. پس از به دست آمدن اطلاعات چاه‌نگاری، اطلاعات بطور کاملاً تصادفی به دو بخش تقسیم شدند:

۱- داده‌هایی برای ساخت مدل (۷۰ درصد داده‌ها)

۲- داده‌های آزمون (مابقی داده‌ها (۳۰ درصد)) برای ارزیابی دقت و عملکرد مدل به منظور تخمین سرعت موج برشی در این مدل‌سازی ابتدا پس از ارتباط بین چندین ورودی و خروجی به صورت تک‌تک، ورودی‌های سرعت موج فشاری، اشعه گاما و چگالی بیشترین ارتباط را با سرعت موج برشی داشته و به عنوان پارامترهای ورودی مدل انتخاب شدند. هدف از این تحلیل به دست آوردن بهترین ارتباط میان مقادیر چاه نمودارها با مقادیر سرعت موج برشی (حاصل از مغزه‌گیری) است تا بتوان برای مواردی که سرعت موج برشی اندازه‌گیری نشده است از این مدل برای پیش‌بینی غیرمستقیم سرعت موج برشی استفاده کرد. آمار توصیفی هر یک از متغیرها در جدول ۱ و همچنین بخشی از داده‌های استفاده شده برای مدل‌سازی در جدول ۲ آورده شده است.

مقیاس تولید منجر به افزایش و یا کاهش هزینه‌ها می‌شود می‌توان از توابع خطی قطعه‌ای استفاده کرد.

در این مطالعه، برای برازش مدل و برآورد پارامترهای رگرسیونی قطعات از روش‌های حداقل مربعات و کواسی-نیوتن استفاده شده است. در این مقاله تجزیه و تحلیل اطلاعات رگرسیون قطعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار استاتیستیکا انجام گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده، مدل قطعه‌ای دارای دو معادله مجزا برای مقادیری واقعی کمتر از ۰.۶ و بیشتر از آن است. به این صورت که برای مقادیر کمتر از ۰.۶ مقادیری با بازه (۰.۲، ۰.۳۶) و برای بیشتر از آن مقادیری در بازه (۰.۳۶، ۰.۸) تخمین زده است. مقدار ۰.۳۶ نقطه شکست این معادله است.

بنابراین تابع پاسخ میانگین رگرسیون قطعه‌ای برای سرعت موج برشی به شکل رابطه ۳ است.

$$f(x) = 0.21 + 0.09X_1 + 0.5X_2 + 0.1X_3 + 0.08(X_1 - 0.36)^+ - 0.34(X_2 - 0.36)^+ - 0.14(X_3 - 0.36)^+ \quad (3)$$

که در آن:

$$f(x) \text{ سرعت موج برشی}$$

$$X_1 \text{ اشعه گاما}$$

$$X_2 \text{ سرعت موج فشاری}$$

$$X_3 \text{ چگالی}$$

علامت (+) به این منظور است که اگر هر یک از مقادیر X_1, X_2, X_3 بیشتر از مقدار نقطه شکست باشد، عبارت داخل پرانتز مربوط به آن صفر شود.

برای مدلسازی و ورودی داده‌ها، اکثراً لازم است که دامنه تغییرات داده‌ها مشابه یکدیگر باشند که در اصطلاح این عمل را، نرمال سازی داده‌ها می‌نامند. نرمال سازی داده‌ها در این مطالعه با رابطه ۴ انجام شده است که این رابطه دامنه داده‌ها را در بازه [۰، ۱] قرار می‌دهد.

$$P_n = \frac{P - P_{Min}}{P_{Max} - P_{Min}} \quad (4)$$

که در آن:

می‌شود تابع میانگین رگرسیون قطعه‌ای است. در این روش هر قطعه یک تابع $f_i(x, \beta_i)$ رگرسیون خطی با پارامترهای متفاوت دارد. منحنی رگرسیون قطعه‌ای برای r قطعه به صورت رابطه ۱ بیان می‌شود:

$$f(x) = E[y | x] = \begin{cases} f_1(x; \beta_1) & x \leq \tau_1 \\ f_2(x; \beta_2) & \tau_1 < x < \tau_2 \\ \vdots & \\ f_r(x; \beta_r) & \tau_{r-1} < x \end{cases} \quad (1)$$

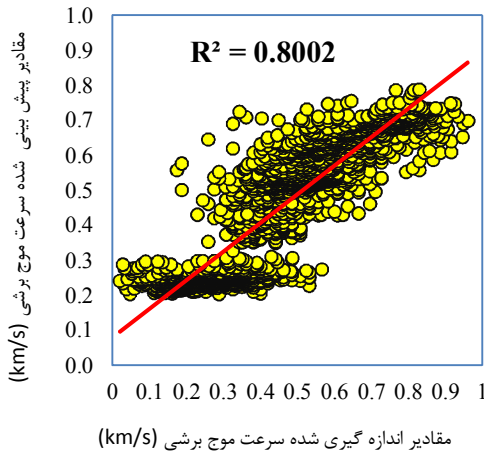
که مدل رگرسیونی در این حالت از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$E[y | x] = \beta_0 + \beta_1 x + \delta_1(x - \tau_1)^+ + \dots + \delta_k(x - \tau_k)^+ \quad (2)$$

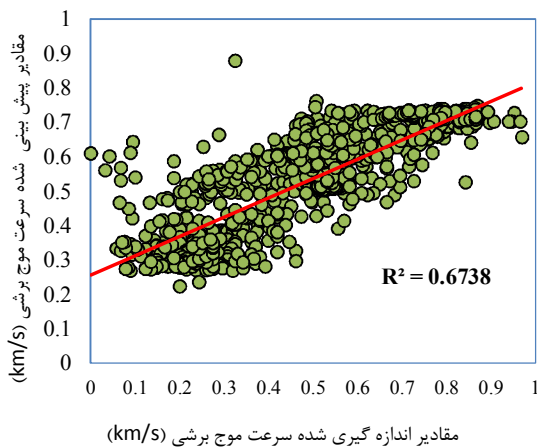
که در آن:

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

مزایا و کاربرد روش رگرسیون قطعه‌ای در مقایسه با سایر روش‌ها عبارت است از: ۱- در رگرسیون قطعه‌ای متغیرهای مستقل در فواصلی تقسیم و برای هر فاصله یک خط رگرسیون قطعه‌ای جداگانه برازش داده می‌شود. ۲- مرز بین قطعات، "نقاط شکست" معادله نامیده شده که این کار باعث بالا رفتن دقت و پایین آمدن خطای رگرسیون می‌شود. لازم به توضیح است که تعیین نقطه شکست یکی از مسایل مهم در تحلیل روند داده‌ها است که با استفاده از رگرسیون قطعه‌ای قابل محاسبه است. ۳- بسیاری از مسایل پیچیده از جمله مسایل علم پتروفیزیک را می‌توان به صورت توابع خطی قطعه‌ای پیوسته مدل کرد. برای مثال در مواردی که تغییر



شکل ۱- همبستگی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت موج برشی (داده‌های آموزش)



شکل ۲- همبستگی مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت موج برشی (داده‌های آزمون)

۴- شبیه‌سازی و مروری اجمالی بر روش شبیه‌سازی مونت کارلو

سیستم‌های مهندسی هیچ یک کامل نیستند. یک طراحی زمانی کامل است که فعال باقی بماند یعنی در طول عمر پیش‌بینی شده وظیفه خود را بدون هیچ نقصی انجام دهد. این یک تعریف مفهومی از یک سیستم مهندسی است اما این دیدگاه ایده‌آل، غیر عملی و از نظر اقتصادی غیر قابل اجراست. حتی اگر دانش فنی، عامل محدود کننده‌ای در طراحی و اجرای یک

P داده حقیقی

P_n داده نرمال شده

P_{Min} کمینه داده حقیقی

P_{Max} بیشینه داده حقیقی

همچنین در این مقاله برای ارزیابی عملکرد مدل، از دو شاخص آماری استفاده شده است که طبق رابطه‌های ۵ و ۶ است.

(۵)

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

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

که در این رابطه‌ها:

y_i مقدار اندازه‌گیری شده

y'_i مقدار پیش‌بینی شده

معیار ضریب همبستگی (\backslash) نشان دهنده انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است که بهترین حالت آن جایی است که مقدار آن یک باشد و مقدار صفر بدان معنی است که عملکرد مدل برای پیش‌بینی خیلی ضعیف است. معیار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز بیانگر خطای بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده است و هر چه مقدار آن کمتر باشد، عملکرد مدل، اطمینان بیشتری دارد. در این تحلیل برای داده‌های آموزش $R^2=80\%$ و $RMSE=0.08$ و برای داده‌های آزمون $R^2=67\%$ و $RMSE=0.12$ محاسبه شد. شکل ۱ و شکل ۲ همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده در مجموعه داده‌های آموزش و آزمون را نشان می‌دهند. در محور افقی مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت موج برشی و در محور عمودی مقادیر پیش‌بینی شده این پارامتر قرار دارد.

۳- بر خلاف روش‌های جبرگرایانه به جای تکیه بر نگاه واقع-گرایانه به نحوه و چگونگی انجام فرآیند طی زمان درباره وقوع اتفاقات محتمل در زمان‌های آتی بحث می‌کند که برم بنای توزیع احتمالات است.

۴- بر اساس تولید اعداد تصادفی مقدار تک تک اجزا یک مجموعه را محاسبه و تاثیر آن‌ها را بر کل مجموعه تعیین می‌کند. این آنالیز با تکرار فرآیند یاد شده نتیجه کلی مجموعه را به صورت تابعی احتمالی بیان می‌کند. مراحل مختلف این روش به شرح زیر است:

۱- انتخاب یک روش حل بسته برای تعیین ارتباط بین پارامتر خروجی با پارامترهای ورودی مساله

۲- تعیین پارامترهای ورودی تغییرپذیر 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 .

۶- محاسبه احتمال مورد نظر مساله بر اساس نسبت تعداد مراحل مورد نظر $(g(x) < 0)$ به کل تعداد مراحل محاسبات

۷- اگر تابع توزیع متغیرهای $g(x)$ که بعد از این فرآیند به دست می‌آید امکان تطابق با یکی از توابع توزیع احتمالاتی شناخته شده را داشته باشد، احتمال مساله می‌تواند دقیق‌تر تخمین زده شود (رابطه ۷).

$$P_f = P(g(x) < 0) \quad (7)$$

در این مقاله، برای شبیه‌سازی سرعت موج برشی و همچنین برای شناسایی پارامترهای موثر بر سرعت موج برشی از نرم‌افزار ریسک استفاده شد. نرم‌افزار ریسک برای تحلیل پروژه‌هایی با پارامترهای احتمالی به کار می‌رود. این نرم‌افزار با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تولید اعداد تصادفی، پارامترهای پروژه را تحلیل می‌کند و توابع توزیع احتمال آن‌ها را ارائه می‌دهد. در این تحلیل بهترین توزیع احتمال برای هر یک از داده‌های ورودی با کمک آزمون کلموگروف اسمیرنوف مشخص می‌شود. جدول ۳ توابع توصیف احتمالاتی هر یک از متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۳ نمودار توزیع فراوانی هر یک از متغیرهای ورودی را نشان می‌دهد.

طرح کامل محسوب نشود، هزینه توسعه، آزمایش، مواد تشکیل دهنده و تحلیل‌های مهندسی می‌تواند از منظر اقتصادی برای چنین سیستمی محدودکننده باشد، بنابراین رویکرد قطعی در این موارد در صورتی درست است که از تک تک نقاط تشکیل دهنده محیط شناخت دقیقی حاصل شود. در نظر گرفتن اطلاعات تنها یک نقطه در تحلیل‌ها تنها شرایط آن نقطه را بررسی می‌کند و نمی‌تواند بیانگر شرایط محیط باشد و طراحی را از حالت بهینه خارج می‌کند.

از طرفی در علم پتروفیزیک توصیف صحیح ناهمگنی‌های خواص مخزن (تخلخل، درجه اشباع آب و نفوذپذیری) نقش مهمی در پیش‌بینی درست تولید دارد. محیط‌هایی مانند مخازن نفتی از جمله محیط‌های غیر همگن و ناهمسانگرد است که مهندس طراح در مواجهه با آن با عوامل و متغیرهایی روبه‌رو می‌شود که مقادیر ثابت و معینی نداشته و ماهیت تصادفی دارند، بنابراین این پارامترها ملزم به تعریف شدن با یک فرآیند آماری‌اند. بنابراین ارزیابی این مسایل با نوعی عدم قطعیت مواجه می‌شود. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در تحلیل‌های مهندسی روش‌های احتمالاتی مانند روش شبیه سازی مونت کارلو ارائه می‌شود. به عبارتی دیگر روش شبیه سازی مونت کارلو عدم قطعیت‌های موجود در مسایل مهندسی مخزن را ممکن می‌سازد. به ویژه در مسایل پیچیده‌ای که متغیرهای تصادفی بی‌شمار و با معادلات غیرخطی به یکدیگر مرتبط شده‌اند. شبیه‌سازی مونت کارلو را می‌توان مانند آزمایشی تصور کرد که به جای اجرا در آزمایشگاه، با رایانه انجام می‌شود. این شبیه‌سازی را می‌توان برای هر مساله پیچیده‌ای با هر دقتی به کار برد به طوری که ممکن است این کار به وسیله روش‌های دیگر امکان‌پذیر نباشد و یا به سختی انجام شود.

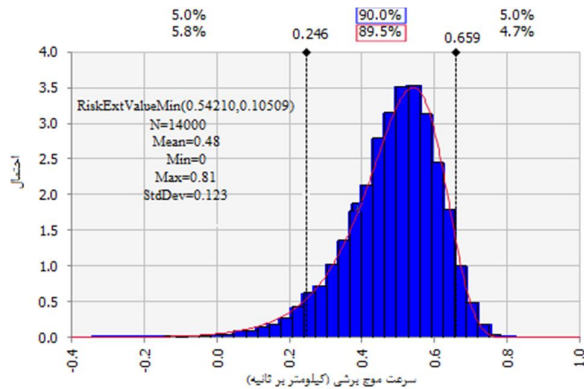
مزایای روش شبیه‌سازی مونت کارلو در علم پتروفیک به شرح زیر است:

۱- به تخمین شکل تابع توزیع (تابع پایه) و همچنین محاسبه دقیق احتمال رخداد می‌پردازد.

۲- برای سامانه‌های پیچیده غیرخطی با درجه عدم قطعیت زیاد مانند سامانه‌هایی با ورودی نامعین با موفقیت به کار می‌رود.

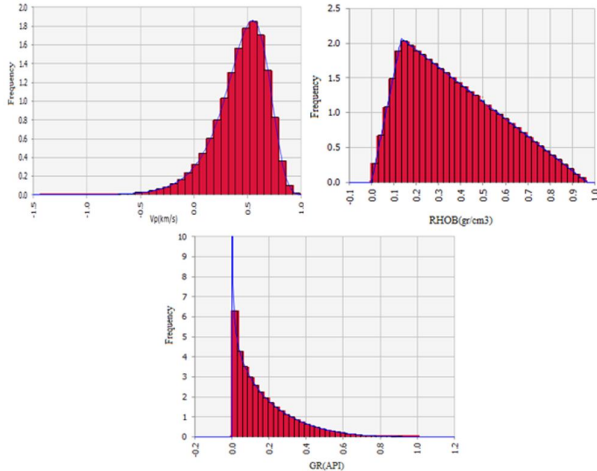
توزیع آن‌ها، شبیه‌سازی می‌شوند. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی در این تحلیل، تعداد اعداد تصادفی با ۱۴۰۰۰ بار تکرار به دست آمد.

پس از تولید اعداد تصادفی دامنه سرعت موج برشی در سطح اعتماد ۹۰ درصد با نرم‌افزار ریسک محاسبه شد. خلاصه آماری مدل بهینه پارامتر خروجی در شکل ۴ آمده است، که در آن نوع تابع توزیع، تعداد اعداد شبیه‌سازی شده، میانگین، انحراف معیار، کمترین و بیشترین مقدار سرعت موج برشی بررسی شده است. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود دامنه سرعت موج برشی در سطح اعتماد ۹۰ درصد در منطقه مورد مطالعه در محدوده ۰/۲۴۶ تا ۰/۶۵۹ کیلومتر بر ثانیه است.



شکل ۴- توصیف مدل بهینه سرعت موج برشی با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو

بعلاوه در این پژوهش مقایسه‌ای بین مقادیر شبیه سازی شده، پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده انجام شده است که نتایج این مقایسه در شکل ۵ قابل مشاهده است. بر اساس نتایج به دست آمده، میانگین سرعت موج برشی شبیه‌سازی شده (۰/۴۸) و با ۰/۰۳ اختلاف از میانگین داده‌های واقعی (۰/۴۵) به دست آمده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که ترکیب روش رگرسیون قطعه‌ای و شبیه‌سازی مونت کارلو دقت بالایی دارد، زیرا به مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) نزدیک است، بنابراین با این روش می‌توان بصورت غیرمستقیم سرعت موج برشی مخازن هیدروکربوری را با دقت مناسبی شبیه‌سازی و تخمین زد.



شکل ۳- نمودار فراوانی پارامترهای ورودی مورد استفاده در شبیه‌سازی

جدول ۳- توابع توصیف احتمالاتی هر یک از متغیرهای ورودی مورد استفاده در شبیه‌سازی

متغیرهای ورودی	توابع
اشعه گاما	Beta General, ۴,۶۶۷۸, ۰,۰۰۰۸۹۹, ۱,۱۵۲۵) (۰,۸۰۳۸۱)
سرعت موج فشاری	Gen. Extreme Value (-۰,۴۵, ۰,۵۴, ۰,۱۹)
چگالی	Triangular (-۰,۰۰۰۴۲, ۰,۱۳۳۷۹, ۰,۹۶۶۶)

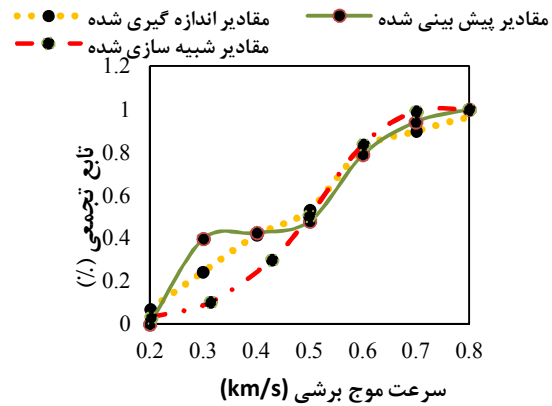
برای بهبود عملکرد مدل، در شبیه‌سازی مونت کارلو از ماتریس همبستگی داده‌های مورد تحلیل استفاده می‌شود. جدول ۴ ماتریس همبستگی میان داده‌های ورودی را نشان می‌دهد.

جدول ۴- ماتریس همبستگی پارامترهای ورودی جهت استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر ورودی	اشعه گاما	سرعت موج فشاری	چگالی
اشعه گاما	۱	-	-
سرعت موج فشاری	-۰,۸۱	۱	-
چگالی	-۰,۱۸	۰,۴۳	۱

در ادامه تعداد اعداد تصادفی با مقایسه توزیع احتمال اعداد شبیه‌سازی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده تعیین می‌شوند. شبیه‌سازی اعداد تصادفی بدان معناست که در هر بار اجرا، ترکیب مختلفی از متغیرهای ورودی، با در نظر گرفتن تابع

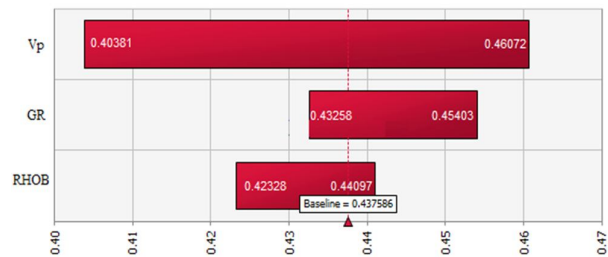
تغییرات این خصوصیات محدوده مخزنی نیز عاملی مهم و راهنمای خوبی برای توسعه فازهای بعدی از مخزن نفتی است. سرعت موج برشی همراه با سرعت موج فشاری می‌تواند اطلاعات مفیدی برای مطالعه مخازن مانند: ارزیابی سازندها و لیتولوژی مخازن، پیش‌بینی پارامترهای ژئومکانیکی مخازن و پیش‌بینی پارامترهای پتروفیزیکی مخازن فراهم کند. به این منظور برای مشخص کردن خواص پتروفیزیکی از جمله سرعت موج برشی مخازن هیدروکربوری با مغزه‌گیری انجام می‌گیرد، این امر نیاز به هزینه بالا و مدت زمان طولانی و نیروی انسانی زیادی دارد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. همچنین در برخی چاه‌ها مانند: چاه‌های افقی مغزه‌گیری عملاً غیر ممکن است ولی تقریباً از تمامی چاه‌ها نمودارگیری انجام می‌گیرد، بنابراین استفاده از روش‌هایی که بتوانند از روی نمودارهای چاه‌نگاری به تخمین پارامترهای پتروفیزیکی بپردازند بسیار مفید خواهد بود. امروزه از روش‌های آماری-احتمالاتی به عنوان یک رهیافت جدید برای تخمین خواص پتروفیزیکی در میداین هیدروکربوری استفاده شده است. همان‌طور که گفته شد هدف از این پژوهش، تخمین سرعت موج برشی یکی از مخازن نفتی جنوب غرب ایران با استفاده از تلفیق روش‌های آماری-احتمالاتی است که به این منظور پس از انجام نمودارگیری از چاه مورد مطالعه، اطلاعات سه نگار گرفته شده از چاه در کنار داده‌های مغزه‌گیری قرار داده شد. پس از آماده‌سازی داده‌ها ابتدا با بکارگیری رگرسیون قطعه‌ای یک مدل بهینه برای تخمین سرعت موج برشی به دست آمد. از سوی دیگر با استفاده از روش مونت کارلو و معادله بهینه ۱۴۰۰۰ داده به طور تصادفی شبیه‌سازی شدند، سپس اعداد شبیه‌سازی شده و اعداد اندازه‌گیری شده، با تابع چگالی مقایسه شدند که نشان از عملکرد قابل قبول روش ترکیبی روش رگرسیون قطعه‌ای و شبیه‌سازی مونت کارلو در مدلسازی و شبیه‌سازی سرعت موج برشی دارد. بعلاوه در این تحقیق، آنالیز حساسیت برای تعیین موثرترین پارامتر بر سرعت موج برشی با استفاده از روش مونت کارلو انجام گرفت که سرعت موج فشاری به عنوان موثرترین پارامتر برای تخمین سرعت موج برشی شناخته شد. بطور خلاصه می‌توان گفت که نتایج این پژوهش نشان داد که می‌توان روش ترکیبی رگرسیون قطعه‌ای- شبیه‌سازی مونت کارلو را به عنوان روشی قابل اطمینان، در پیش‌بینی غیرمستقیم سرعت موج برشی با دقت بالایی مورد استفاده قرار داد.



شکل ۵- مقایسه مقادیر حاصل از روش‌های استفاده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده

۵- آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی با استفاده از روش مونت کارلو

روش مونت کارلو علاوه بر شبیه‌سازی، آنالیز حساسیت را نیز بر روی متغیرها انجام می‌دهد. در این آنالیز میزان همبستگی متغیرهای ورودی شبیه‌سازی شده، نسبت به متغیر خروجی محاسبه می‌شود، محدوده مقادیر همبستگی می‌تواند بین -۱ تا +۱ باشد. در این تحقیق از آنالیز حساسیت برای اولویت‌بندی متغیرها، در تعیین سرعت موج برشی استفاده شد. شکل ۶ نتایج این آنالیز را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل ۶ نشان داده شده است، تاثیرگذارترین متغیرها در تخمین سرعت موج برشی به ترتیب: سرعت موج فشاری، شعله گاما و چگالی است.



شکل ۶- نتیجه آنالیز حساسیت بر روی پارامتر خروجی

۶- نتیجه‌گیری

منابع مطالعات زمین‌شناسی نفت و پتروفیزیکی مخازن هیدروکربوری، نقش بسزایی در شناخت پارامترهای کنترل -کننده خواص مخزنی، مدلسازی ژئومکانیکی و تولید دارد. تشخیص دقیق اطلاعات و توزیع خصوصیات مخزنی و بررسی

[۷] Rajabi M, Bohloli B, Gholampour Ahangar E. Intelligent approaches for prediction of compressional, shear and Stoneley wave velocities from conventional well log data: A case study from the Sarvak carbonate reservoir in the Abadan Plain (Southwestern Iran). *Comput Geosci* 2010;36(5): 647-664.

[۸] Rezaee MR, Kadkhodaie Ilkhchi A, Barabadi A. Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia. *J Pet Sci Eng* 2007;55(3): 201-212.

[۹] Kadkhodaie Ilkhchi A, Rezaee M, Moallemi SA. A fuzzy logic approach for estimation of permeability and rock type from conventional well log data: an example from the Kangan reservoir in the Iran Offshore Gas Field. *J Geophys Eng* 2006;3: 356-369.

[۱۰] Eskandari H, Rezaee M, Mohammadnia M. Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from wireline log data for a carbonate reservoir South-West Iran. *CSEG recorder* 2004;42: 48.

[۱۱] Boadu FK. Predicting oil saturation from velocities using petrophysical models and artificial neural networks. *J Pet Sci Eng* 2001;30(3): 143-154.

[۱۲] Kamel MH, Mabrouk WM. An equation for estimating water saturation in clean formations utilizing resistivity and sonic logs: theory and application. *J Pet Sci Eng* 2002;36(3): 159-168.

[۱۳] Amiri M, Zahedi G, Yunan MH. Reducing predictive uncertainty in log-derived water saturation models in a giant tight shaly sandstones—A case study from Mesaverde tight gas reservoir. *J Natu Gas Sci Eng* 2015;23: 380-386.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از پرسنل محترم شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب بخاطر همکاری صمیمانه‌ای که داشتند، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

[۱] Nikravesh M, Zadeh LA, Aminzadeh F (2003) *Soft computing and intelligent data analysis in oil exploration*, vol 51. Elsevier ,

[۲] Saemi M, Ahmadi M, Varjani AY. Design of neural networks using genetic algorithm for the permeability estimation of the reservoir. *J Pet Sci Eng* 2007;59(1): 97-105.

[۳] Nourafkan A, Kadkhodaie-Ilkhchi A. Shear wave velocity estimation from conventional well log data by using a hybrid ant colony–fuzzy inference system: A case study from Cheshmeh–Khosh oilfield. *J Pet Sci Eng* 2015;127: 459-468.

[۴] Zoveidavianpoor M, Samsuri A, Shadizadeh SR. Adaptive neuro fuzzy inference system for compressional wave velocity prediction in a carbonate reservoir. *J Appl Geophys* 2013;89: 96-107.

[۵] Asoodeh M, Bagheripour P. Prediction of compressional, shear, and stoneley wave velocities from conventional well log data using a committee machine with intelligent systems. *Rock Mech Rock Eng* 2012;45(1): 45-63.

[۶] Moatazedian I, Rahimpour-Bonab H, Kadkhodaie-Ilkhchi A, Rajoli M. Prediction of shear and Compressional Wave Velocities from petrophysical data utilizing genetic algorithms technique: A case study in Hendijan and Abuzar fields located in Persian Gulf. *Geopersia* 2011;1(1): 1-17.

پی‌نوشت

- ¹ Shear wave velocity
- ² Compressional wave velocity
- ³ Ant colony optimization
- ⁴ Adaptive neuro-fuzzy inference system
- ⁵ Multiple linear regression
- ⁶ Carnarvon basin

[۱۴] Lee M, Collett T. In-situ gas hydrate hydrate saturation estimated from various well logs at the Mount Elbert Gas Hydrate Stratigraphic Test Well, Alaska North Slope. *Mar Petrol Geol* 2011;28(2): 439-449.

[۱۵] Na'imi S, Shadizadeh S, Riahi M, Mirzakhani M. Estimation of reservoir porosity and water saturation based on seismic attributes using support vector regression approach. *J Appl Geophys* 2014;107: 93-101.

[۱۶] Habibi MJ, Mokhtari AR, Baghbanan A, Namdari S. Prediction of permeability in dual fracture media by multivariate regression analysis. *J Pet Sci Eng* 2014;120: 194-201.

[۱۷] Huang D, Sima L, Wu F, Wang L, Li Q. Estimating saturation exponent from NMR logging. *Arab J Geosci* 2015;8(9): 6771-6778.

[۱۸] Al-Bulushi N, King PR, Blunt MJ, Kraaijveld M. Development of artificial neural network models for predicting water saturation and fluid distribution. *J Pet Sci Eng* 2009;68(3): 197-208.

[۱۹] Vadapalli U, Srivastava R, Vedanti N, Dimri V. Estimation of permeability of a sandstone reservoir by a fractal and Monte Carlo simulation approach: a case study. *Nonlinear Processes in Geophysics* 2014;21(1): 9-18.

[۲۰] Mirnejad H, Sisakht V, Mohammadzadeh H, Amini A, Rostron B, Haghparast G. Major, minor element chemistry and oxygen and hydrogen isotopic compositions of Marun oil-field brines, SW Iran: Source history and economic potential. *Geological Journal* 2011;46(1): 1-9.

[۲۱] Asquith GB, Krygowski D, Gibson CR (2004) Basic well log analysis, vol 16. American Association of Petroleum Geologists Tulsa.