

مقاله پژوهشی

کاربرد شبکه عصبی در ارزیابی پتروفیزیکی سازند آسماری در یک چاه تولیدی واقع در جنوب غرب ایران

شادی محول^۱، گلناز جوزانی کهن^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، shadi.mohavvel@ut.ac.ir
۲. استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، gjkohan@ut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

تعیین پارامترهای پتروفیزیکی و بررسی توزیع آن‌ها در عمق مخزن، می‌تواند منجر به زون‌بندی جدید و تغییر ضخامت زون تولیدی میادین شود. کانی‌های رسی از دسته کانی‌های بومی سازندها هستند که در بیشتر سازندهای هیدروکربوری حضور داشته و با کاهش پارامترهای مهم مخزنی و کلیدی از جمله تخلخل و تراوایی پتانسیل تولید را کاهش می‌دهند. در این پژوهش، هدف بررسی پتروفیزیکی سازند آسماری با تلفیق انواع روش‌های سنتی و هوشمند به منظور تخمین حجم رس و ارزیابی کیفیت مخزن است. برای تخمین پتروفیزیکی حجم رس به روش‌های سنتی، روابط پتروفیزیکی بویان - پاسی، استیبر، کلاویر، لارینف - ۱ (با توجه به سن سازند) و جوزانی کهن بر داده‌های نگار پرتوی گاما اعمال شد که با مقایسه با ۱۵ داده آزمایشگاهی این پارامتر در اعماق معلوم، کمترین خطا ۴۵٪ به دست آمد. سپس، برای کاهش خطا به مدل‌سازی توسط شبکه عصبی (MLP) پرداخته شد که با تخمین داده‌های آزمایشگاهی، تعداد ۲۵۹ داده تولید و با تابع فعال‌سازی تانژانت زیگموئید، الگوریتم آموزش لوبنبرگ - مارکوات، تعداد ۶ نرون و ۱ لایه پنهان آموزش داده شد. خروجی‌های حجم رس شبکه عصبی طبقه‌بندی شد و جنس سازندی به طور عمده ماسه‌سنگی - رسی تعیین شد. با بررسی نمودارهای چگالی - تخلخل سنگ‌شناسی سازندی تعیین و بازه‌های با کیفیت مخزنی خوب و مناسب برای عملیات مشبک‌کاری معرفی شدند. داده‌های نمودار پرتوایی گاما و تخلخل نوترونی نیز طبقه‌بندی شد و بازه‌های با کیفیت سازندی از ضعیف تا عالی معرفی شدند که در نهایت با تلفیق تمامی نتایج حاصل از مطالعات در این پژوهش کیفیت کلی سازند آسماری در چاه مورد مطالعه خوب برآورد شد.

کلمات کلیدی

کانی‌های رسی، تخمین پتروفیزیکی حجم رس، شبکه عصبی، چاه نمودارها.

۱- مقدمه

می تواند باعث ایجاد مانع در عبور از سیال از مخزن شوند. اگر میزان رس به صورت خمیره کاذب بین دانه های ماسه زیاد باشد مانند یک مانع در گلوگاه منافذ رفتار می کند و می تواند با ایجاد نیروی موئینه بسیار قوی، تراوایی را به سرعت در حین دیاژنز تدفینی پیش رونده کاهش دهد. فشردگی قطعات شکل پذیر خرده سنگی غنی از رس نیز می تواند منجر به از دست دادن شدید تراوایی در مخزن شود [۲]. فلذا، در یک سامانه نفتی، مطالعه رس ها از نقطه نظر شناسایی انواع، مقدار و الگوی توزیع آنها در مخزن حائز اهمیت است. پارامترهای مهم برای ارزیابی و شناسایی رس ها عبارتند از: میزان تخلخل، نفوذپذیری، مقدار اشباع آب، کانی شناسی، مقدار کل کربن آلی، ویژگی های ژئومکانیکی و ژئوشیمیایی که با استفاده از داده های چاه پیمایی و آنالیز مغزه قابل ارزیابی هستند [۳]. تعیین حجم دقیق رس در مخزن تنها با استفاده از آنالیزهای آزمایشگاهی روی نمونه های مغزه امکان پذیر است. اما از آنجایی که در اعماق مختلفی مخزنی در میدان مختلف، همواره مغزه ها موجود نیستند، روش متداول تخمین حجم رس با استفاده از نمودارهای چاه پیمایی به ویژه نمودار پرتو زایی طبیعی گاما و مولفه های طیفی آن (پتاسیم، توریم و اورانیوم) است [۴ و ۲]. ساده ترین روابط پتروفیزیکی که برای تخمین حجم رس ارائه شده است شامل ضرب ضریب ۰/۶ در شاخص خطی پرتوی محاسبه شده در هر عمق است که بنام رابطه بویان-پاسی شناخته می شود [۵]. ضرایب تصحیح دیگر نیز براساس عواملی مانند سن مخزن و گوناگونی توزیع رس در سازندهای مخزنی توسط لارینف [۶]، کلاویر [۷]، استیبر [۸] و رابطه تجربی جوزانی کهن [۹] ارائه شده اند که همگی برای تخمین حجم رس به کار می روند. در پژوهشی برای تخمین حجم رس، رابطه ای با استفاده از تلفیق سه نگار پتروفیزیکی تخلخل نوترون، چگالی و صوتی معرفی شده است [۱۰]. در رابطه ریاضی ارائه شده، مساله تخمین حجم رس با استفاده از ترکیب داده های سه نگار پتروفیزیکی در کنار داده های پارامترهای دیگری که از اندازه گیری های اولیه و در دسترس چاه حاصل می شوند، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است [۱۰]. در مطالعه ای دیگر، شناسایی کانی های رسی و محاسبه حجم آنها در مخزنی کربناته به سن کرتاسه در غرب ونزوئلا با هدف افزایش ذخیره هیدرکربور انجام شد [۱۱]. بررسی نمونه های آهکی آغشته به دو کانی رسی کائولینیت (تورم پذیر پایین) و مونت موریلونیت (تورم پذیر بالا) در پژوهشی با مطالعه سه بعدی تاثیر تورم کانی های رسی بر تخلخل و تراوایی با استفاده از روش پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. هدف از انجام این

پیش بینی عملکرد و برآورد توان تولید هیدروکربوری در گرو داشتن یک ارزیابی صحیح از مخازن است. ابزار این نوع ارزیابی ها، نگارهای پتروفیزیکی و داده های حاصل از آنالیز مغزه است. اما از آنجایی که عملیات مغزه گیری و آزمایش های متعاقب روی مغزه ها، بسیار گران قیمت و زمان بر است، اغلب ارزیابی های پتروفیزیکی مخازن صرفاً بر مبنای داده های چاه نگاری انجام می شود. اما، باید توجه داشت عوامل متعددی از قبیل قطر چاه، عمق زون رخنه، تغییرات محلی سنگ شناسی، ماهیت و چگالی سیال، دما و فشار، سرعت نمودارگیری و وجود کانی های رسی، قرائت های نگارهای پتروفیزیکی را تحت تاثیر قرار می دهند که این امر سبب ایجاد خطا در محاسبه پارامترهای مخزنی و تفسیرهای متعاقب آن می شوند. نهایتاً، خطا در ارزیابی مخازن سبب از دست رفتن منابع و ضررهای اقتصادی متعدد می شود. پارامتر حجم رس، بحرانی ترین پارامتر در ارزیابی کیفیت مخازن هیدروکربوری است که تخمین صحیح و دقیق آن برای تصحیح تخلخل کلی و محاسبه تخلخل موثر که از روی آن متعاقباً اشباع آب موثر و توان تولید مخزن محاسبه می شود، ضروری و لازم است. اگر حجم رس بیشتر از مقدار واقعی تخمین زده شود، درجه اشباع آب کمتر از اندازه واقعی تخمین زده می شود و نهایتاً سبب می شود مخزن تولیدی به نظر برسد. برعکس اگر حجم رس کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شود، درجه اشباع آب بیشتر از اندازه واقعی خود تخمین زده می شود که نهایتاً سبب می شود تا یک مخزن تولیدی کنار گذاشته شود. دلایل تخمین کمتر یا بیشتر از اندازه واقعی این پارامتر در تحت تاثیر قرار گرفتن قرائت نگارهای پتروفیزیکی به علت تغییر عوامل محیطی درون چاه و تاثیرپذیری آنها از پارامترهای متعددی است که در بالا ذکر شد [۲-۱]. شناسایی رس ها به دلیل ایجاد تورم، ریزش، واکنش با گل حفاری و ایجاد تغییرات شیمیایی به دلیل تبادلات یونی در سطح خود در حین حفاری نیز اهمیت بسزایی دارند [۱]. بعلاوه، این دسته از کانی ها سبب ایجاد فشارهای غیر طبیعی در مخازن و دلیل اصلی بالا رفتن درجه اشباع آب به شکل کاهش ناپذیری در مخازن هستند. کانی های رسی با داشتن ویژگی های خاص و متفاوت با تاثیر بر نگارهای پتروفیزیکی، خطر تفسیرهای اشتباه و تخمین ناصحیح از پارامترهای مهم مخزنی یعنی تخلخل و تراوایی را نیز افزایش می دهند. این دو پارامتر مهم به شدت تحت تاثیر حضور کانی های رسی در سازند حتی در مقادیر اندک هستند. ریزتخلخل های همراه با کانی های رسی با ایجاد فشار موئینی

مخازن هیدروکربوری یعنی حجم رس به توسعه تخمینگری با ساختار شبکه عصبی برای تخمین این پارامتر در سازند مخزنی آسماری پرداخته شده است. هدف از انجام این تحقیق کاهش خطای تخمین حجم رس با استفاده از نگارهای پتروفیزیکی متداول است.

۲- معرفی منطقه

میدان نفتی مورد مطالعه در این پژوهش میدان نفتی مارون، یکی از بزرگترین میدان نفتی جنوب ایران و حوضه زاگرس است که در شمال شرق شهر اهواز و در مجاورت میدان کوپال، آغاجاری، رامین، شادگان و رامشیر واقع شده است. سازندهای واقع در این میدان بیشتر از رسوبات مارن و انیدریت به همراه کربنات و شیل‌های بیتومینه تشکیل شده‌اند [۱۷]. سازند آسماری مهم‌ترین سنگ مخزن میدان نفتی مارون است و از سازندهای مهم زمین‌شناسی ایران، غنی‌ترین مخزن نفتی ایران و از غنی‌ترین مخازن کربناته جهان به شمار می‌رود. سن آن، الیگوسن پسین تا میوسن پیشین است که به عنوان جوان‌ترین سنگ مخزن در زاگرس شناخته می‌شود. این سازند به سمت جنوب غربی و به طرف دهانه خلیج فارس، کمی ماسه‌ای می‌شود که به آن ماسه‌های اهواز می‌گویند. در میادینی مانند پازنان، اهواز، مارون و منصوری، بخش ماسه‌ای اهواز حدود یک سوم تا یک چهارم ضخامت کل سازند را در بر می‌گیرد [۱۸]. تاکنون مطالعات متعددی در ارتباط با زمین‌شناسی سازند آسماری صورت گرفته است که به ارائه زون‌بندی‌های متفاوت این سازند منجر شده است. سازند آسماری توسط بخش اول سازند گچساران از بالا (پوش‌سنگ) و توسط سازند پایده از پایین احاطه شده است [۱۹] و [۱۷]. بر اساس خصوصیات پتروفیزیکی، سازند آسماری میدان مارون به ۸ قطاع و از نظر تناوب رسوبی و محتوای فسیلی به ۵ لایه تقسیم شده است. پژوهش مورد نظر در حدفاصل لایه‌های ۳ تا ۵ سازند آسماری صورت گرفته است. سازند آسماری در میدان نفتی مارون به پنج لایه تقسیم شده است که لایه اول از سنگ‌آهک‌های دولومیتی، آهک به همراه مقادیر جزئی انیدریت و در بخش‌هایی رسی و ماسه‌ای است. ستبرای میانگین آن ۶۰-۷۵ متر و همزمان با آخرین فاز پیشروی دریا در میوسن نهشته شده است. لایه دوم شامل دولومیت و آهک‌های دولومیتی همراه با انیدریت است که در بخش‌های زیرین تبدیل به تناوبی از لایه‌های ماسه‌سنگ آهک، آهک ماسه‌ای و دولومیت می‌شود. میانگین ستبرای این لایه، ۱۰۰-۷۰ متر برآورد شده است. سنگ‌شناسی لایه سوم بیشتر سنگ آهک، دولومیت و در بخش‌های زیرین ماسه‌سنگی با میان‌لایه‌های آهکی و دولومیت ماسه‌ای و در

تحقیق در وهله اول، ارزیابی تراوایی در نمونه‌هایی با میزان متفاوت از کانی‌های رسی و در وهله دوم تطبیق نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی تغییرات تخلخل و کاهش تراوایی بر اثر وجود کانی‌های رسی بود. نتایج حاصل نشان داد که پارامترهای اولیه‌ای که شدت آسیب سازند را در حضور کانی‌های رسی کنترل می‌کنند، اندازه دانه‌ها و درصد کانی‌های رسی حاضر در سازند می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب تورم کانی‌های رسی نمونه‌های آغشته به کانی‌های رسی، تراوایی پایین‌تری نسبت به نمونه‌های غیر آغشته داشته و درصد بالای کانی کائولینیت موجب افت شدید تراوایی می‌شود و طی گذر زمان، بعد از آسیب‌های اولیه تغییری در تراوایی نمونه‌های آغشته به مونت موریلونیت مشاهده نشد [۱۲]. مقایسه تخمین پتروفیزیکی حجم رس با استفاده از روابط مرسوم پتروفیزیکی و روش‌های هوشمند در دو چاه خشک و تولیدی سازند ماسه‌سنگی شوربچه مورد بررسی قرار گرفت که کاربرد روش‌های هوشمند سبب بهبود تخمین این پارامتر شد [۱۳]. تخمین حداقل مقدار فشار امتزاجی در مخازن گازی و نفت خام در شرایط متفاوت مخزنی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی نشان داد که در تخمین این پارامتر، چگالی گاز تزریق شده و دمای مخزن بیشترین تاثیر را بر مدل تخمینی داشته‌اند [۱۴]. تحقیقات نشان می‌دهد که به منظور پیش‌بینی عملکرد مخزن نفتی و بازده تولید نیز مدل‌سازی شبکه عصبی با سرعت بالاتر و پتانسیل قوی‌تر برای مدیریت مخازن و پیش‌بینی تولید از مخازن نفتی و گازی کاربرد دارد [۱۵]. ارزیابی دو پارامتر تخلخل و تراوایی نیز با استفاده از روش یادگیری شبکه عصبی در یکی از میدان‌های نفتی در شمال خلیج فارس انجام شد. در این پژوهش نگارهای نوترون، صوتی، چگالی و تخلخل کل به عنوان ورودی به شبکه معرفی شد و با استناد به بالاترین ضریب همبستگی، مدل (LSSVM) بهترین تخمین‌گر این دو پارامتر با ضریب همبستگی ۰/۹۹۴ و میانگین خطا ۰/۴۱۷۶ معرفی شد [۱۶].

با توجه به تاریخچه مطالعات ذکر شده، حضور کانی‌های رسی در اغلب سازندهای مخزنی اثبات شده است. از آنجا که تاثیر وجود این دسته از کانی‌ها بر پارامترهای مخزنی، عملیات حفاری و تولید سازند قابل‌چشم‌پوشی نیست، تخمین صحیح و دقیق یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخزنی یعنی حجم رس اهمیت بالایی دارد. با توجه به اثبات کارایی روش‌های هوشمند در تخمین ناریب پارامترهای علوم زمین در این پژوهش با توجه به کمبود تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از روش‌های هوشمند برای تخمین پارامتر مهم و کلیدی ارزیابی

بخش‌هایی، لایه‌های نازک رس را داراست. ستبرای میانگین این لایه بطور میانگین ۸۰-۱۰۰ متر است. سنگ‌شناسی عمده لایه چهارم آهک، آهک دولومیتی، ماسه سنگ، رس و مارن است که تشکیل‌دهنده‌های بخش‌های زیرین لایه‌های آهک خالص و در برخی بخش‌ها لایه‌های نازک ماسه و رس و ستبرای میانگین آن ۱۵۰ متر است و لایه پنجم بخش انتقالی میان سازندهای پابده و آسماری است و بطور عمده از آهک‌های رسی فشرده و رس‌های تیره رنگ گلوکونیتی و پیریت‌دار تشکیل شده است. ستبرای این لایه ۶۵-۷۰ متر است [۱۹].

۳- معرفی داده‌ها و روش‌ها

داده‌های در دسترس در این پژوهش شامل ۱۵ نمونه مغزه از اعماق متفاوت سازند آسماری است. برای انتخاب نمونه‌ها در ابتدا نمودار پتروفیزیکی چاه در نرم‌افزار ژئولاگ نسخه ۷ رسم شد و از آنجایی که هدف این پژوهش تخمین حجم رس و مطالعه عملکرد کانی‌های رسی در اعماق مخزنی می‌باشد، نمونه‌ها از اعماقی انتخاب شد که نمودار پرتوزایی گاما مقدار قابل‌توجهی داشته باشند. بعلاوه، ۴۴۸/۵ متر داده چاه‌نگاری نیز به فاصله ۰/۱۵ متر از یک چاه تولیدی سازند آسماری واقع در میدان نفتی مارون شامل نگارهای SGR، CGR، DT، NPFI، RHOB و PEF در اختیار قرار گرفت. در این پژوهش به منظور محاسبه حجم رس آزمایشگاهی، ابتدا آنالیز پراش پرتوی ایکس (XRD) عمومی روی نمونه‌های مغزه انجام شد. سپس با شناسایی کلیه فازهای تشکیل دهنده، فازهای غیر رسی حذف و حداقل سازی شد. سپس با آماده‌سازی‌های ویژه (شامل حرارت دادن تا دمای ۵۵۰°C، اشباع از اتیلن گلیکول، جوشاندن در اسید هیدروکلریدریک)، نمودارهای مختلفی از هر نمونه گرفته شد و با مقایسه این نمودارها با نمودار نرمال (خشک شده در هوا) [۲۰]، نوع کانی‌های رسی موجود در هر نمونه به دقت شناسایی شد. سپس با داشتن آنالیز شیمیایی هر نمونه (XRF)، از طریق برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار EXCEL ۲۰۱۶، یک مجموعه از معادلات خطی نوشته شد که میزان عناصر شیمیایی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش XRF را به فرمول شیمیایی کانی‌های به دست آمده، مربوط می‌ساخت. با این روش، درصد هر کانی رسی به دقت اندازه‌گیری شد. مجموع تمام کانی‌های رسی یک نمونه به عنوان درصد وزنی رس هر نمونه در نظر گرفته شد و سپس با اندازه‌گیری آزمایشگاهی پارامتر چگالی و با در نظر گرفتن میزان تخلخل هر نمونه، حجم رس آزمایشگاهی برای هر ۱۵ نمونه مغزه به دست آمد. مطالعات پتروفیزیکی در این پژوهش به منظور طبقه‌بندی کیفی مخزن از لحاظ پارامترهای فیزیکی اعم از تخلخل و سنگ‌شناسی سازندی و با توجه به

محدوده عمقی کانی‌های رسی، نوع و درصد نیمه‌کمی آن‌ها و الگوی توزیع سازندی انجام می‌شود. در ابتدا با استفاده از خروجی‌های آنالیز XRD که از پژوهش‌های قبلی [۲۱] در دسترس بود، تغییرات نمونه‌های مورد مطالعه با توجه به دو نمودار پرتوزایی گاما بررسی شد و با توجه به همبستگی داده‌ها با نمودار SGR، در مراحل بعدی مطالعه از این نمودار برای محاسبات حجم رس استفاده شد. برای تبدیل حجم شیل به حجم رس، حجم رس تخمین زده شده باید تصحیح شد که با توجه به روابط پیشین حجم پتروفیزیکی رس با روابط لارینف-۱ (با توجه به سن سازند)، کلاویر، استیبر، بویان - پاسی و جوزانی کهن تخمین زده شد. در مرحله سوم بر طبق داده‌های حجم رس آزمایشگاهی از پژوهش‌های پیشین [۲۱]، حجم رس با استفاده از ابزار شبکه عصبی چندلایه مفهومی (پرسپترون) در عمق مخزن مدل‌سازی و تخمین زده شد. دلیل انتخاب این نوع شبکه عصبی خاص به علت اثبات کارایی آن در یکی از پژوهش‌های معتبر [۹] اخیر بوده است که موفق به کاهش خطای تخمین این پارامتر تا میزان ۰/۰۰۲۸۶۹ درصد شده است. در مرحله آخر، با استفاده از نمودارهای متقاطع چگالی - تخلخل و سنگ‌شناسی سازند در اعماق مختلف، مخزن از لحاظ کیفیت طبقه‌بندی شد. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ذکر شده‌اند.

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده در پژوهش.

داده‌های فیزیکی	۱۵ نمونه مغزه از یک چاه تولیدی مخزن آسماری
داده‌های پتروفیزیکی	۴۴۸/۵ متر داده چاه‌نگاری از چاه مورد مطالعه به فاصله ۱۵ سانتی‌متر
انواع نگارهای پتروفیزیکی	CGR/ SGR/ NPFI DT/ RHOB/ PEF
داده‌های آزمایشگاهی	آنالیز پراش پرتو ایکس و چگالی سنجی

۴- روش‌های پژوهش

۴-۱- محاسبه بستگی کانی‌های رسی محاسبه شده حاصل از

آنالیز آزمایشگاهی و نمودار پرتوزایی گاما

در ابتدا، بر اساس داده‌های نگار پرتوزایی گاما چاه مورد مطالعه، کمترین مقدار پرتوزایی گاما به عنوان خط ماسه تمیز و بیشترین مقدار پرتوزایی گاما به عنوان خط پایه رس انتخاب شد. در شکل ۱ تغییرات نمودار پرتوزایی گاما ۱۵ نمونه مغزه مورد مطالعه در برابر چگالی مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودار (شکل ۱) بازه نمونه‌های مورد مطالعه به سمت خط پایه رس سوق دارد.

داده‌هایی هم‌چون حجم رس را می‌توان از نگارهای پتروفیزیکی به دست آورد [۱۹]. خطا در تخمین حجم رس (V_{cl}) منجر به محاسبه نادرست پارامترهای مخزنی از جمله تخلخل موثر و درجه اشباع آب می‌شود که نهایتاً خطر تفسیر نادرست از تولید مخزن را در پی دارد و تخمین صحیح این پارامتر، یکی از مهم‌ترین مراحل ارزیابی کیفیت مخازن نفتی به شمار می‌رود [۸]. به منظور تعیین کمی میزان کانی‌های رسی، مقدار حجم رس تخمین زده شده باید تصحیح شود. برای تصحیح داده‌های پرتوزایی گاما با توجه به مطالعات پیشین، پنج دسته تصحیح بویان - پاسی [۴]، لارینف-۱ (با توجه به سن سازند) [۵]، استیبر [۷]، کلاویر و رابطه تجربی جوزانی کهن [۸] وجود دارد که در روابط ۲ الی ۶ ارائه شده است.

ساده‌ترین تصحیح برای تبدیل حجم شیل به حجم رس، رابطه بویان - پاسی است (رابطه ۲). بر طبق میانگین جهانی شیل‌ها به طور متوسط ۶۰٪ کانی رسی و ۴۰٪ کانی غیررسی دارند. به همین دلیل در این تصحیح شاخص IGR در ضریب ۰/۶ ضرب می‌شوند تا تخمین صحیح‌تری از حجم رس به دست آید [۴].

$$V_{cl} = 0.6 \times IGR \quad \text{رابطه (۲)}$$

لارینف بر اساس سن زمین‌شناسی سازند دو رابطه ۳ و ۴ را به ترتیب برای سازندهای تحکیم‌یافته (پس از ترشیری) و تحکیم‌نیافته (مربوط به ترشیری) ارائه داد که سن سازند مورد مطالعه مربوط به دوره الیگوسن - میوسن بوده و از رابطه لارینف-۱ برای تخمین حجم رس استفاده شد [۵].

$$V_{cl}(\text{Larionov-2}) = 0.83 \times (2^{2.7 \times IGR} - 1) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$V_{cl}(\text{Larionov-1}) = 0.33 \times (2^{2 \times IGR} - 1) \quad \text{رابطه (۴)}$$

کلاویر (۱۹۷۱)، رابطه ۵ را برای محاسبه حجم رس با استفاده از شاخص پرتوزایی گاما (IGR) ارائه داد [۶]:

$$V_{Clavier} = 1.7 - [3.38 - (IGR + 0.7)^{1.0}]^{0.05} \quad \text{رابطه (۵)}$$

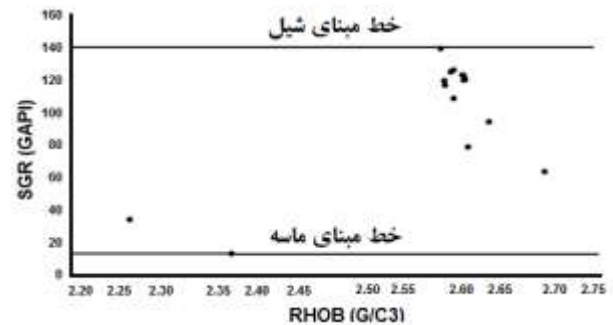
استیبر (۱۹۷۳)، برای محاسبه حجم رس با استفاده از شاخص پرتوزایی گاما رابطه ۶ را ارائه داد [۷]:

$$V_{cl}(\text{Steiber}) = (0.5 \times IGR) / (1.5 - IGR) \quad \text{رابطه (۶)}$$

جوزانی کهن (۱۳۹۳) رابطه ۷ را برای محاسبه حجم رس با استفاده از شاخص پرتوزایی گاما با توجه به مطالعات محققان پیشین ارائه داد [۸]:

$$\text{رابطه (۷)}$$

$$V_{cl}(\text{Empirical}) = 0.69 \times IGR / (1 + 3.9 \times IGR - 3.75 \times IGR^2)$$



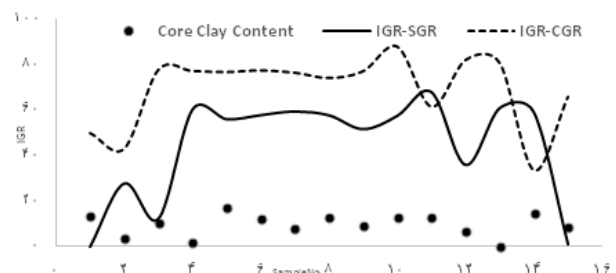
شکل ۱: بازه تغییرات نمودارهای گاما - چگالی در نمونه‌های مغزه.

با توجه به داده‌های موجود در این پژوهش، دو نمودار پرتوزایی SGR و CGR موجود است که باید بستگی داده‌های آزمایشگاهی با هر دو نمودار برای محاسبات حجم رس در بخش‌های آتی بررسی شود. با توجه به داده‌های نگار نمودار پرتوزایی گاما، پارامتر شاخص پرتوزایی گاما بر اساس رابطه ۱ برای ۱۵ نمونه محاسبه شد که در آن IGR شاخص پرتوزایی گاما، GR_{log} قرائت نمودار پرتوزایی گاما در هر نقطه، GR_{min} کمترین مقدار قرائت شده نمودار پرتوزایی گاما و GR_{max} بیشترین مقدار قرائت شده نمودار پرتوزایی گاما می‌باشد.

رابطه (۱)

$$IGR = (GR_{log} - GR_{min}) / (GR_{max} - GR_{min})$$

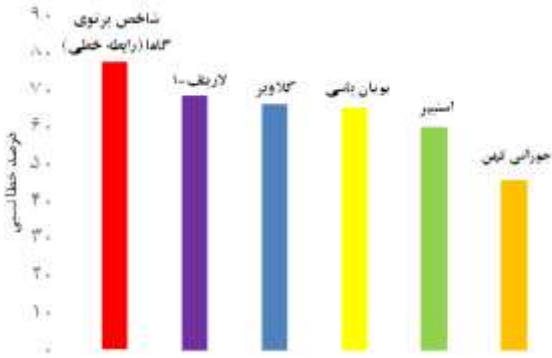
با توجه به درصد کانی‌های رسی نمونه‌های مغزه مورد مطالعه حاصل از آنالیز آزمایشگاهی XRD، نمونه‌ها شامل درصد رس متغیری از ۳۳٪ تا ۴۴٫۵٪ هستند. براساس درصد وزنی رس آزمایشگاهی و پارامتر پرتوزایی رس محاسبه شده، مطابق شکل ۲ نتایج حاصل از آنالیز XRD نمونه‌ها با پارامتر پرتوزایی رس محاسبه شده از نمودار SGR بستگی بیشتری نشان می‌دهد.



شکل ۲: بازه تغییرات نمونه‌های مورد مطالعه با توجه به دو نمودار پرتوزایی گاما.

۲-۴- تخمین پتروفیزیکی حجم رس با استفاده از داده‌های پرتوزایی گاما

نگارهای چاه‌پیمایی یکی از ابزارهای مهم برای ارزیابی خواص پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی محسوب می‌شوند و



شکل ۳: هیستوگرام درصد میانگین خطای روابط تخمین پتروفیزیکی حجم رس.

تمامی روابط تخمین بر داده‌های پرتوزایی نمودار گاما اعمال شد و نتایج در جدول ۲ تنظیم شد. با توجه به داده‌های این جدول، میانگین درصد خطای شاخص پرتوزایی گاما ۷۷٪، رابطه لارینف - ۱ ۶۸٪، کلاویر ۶۶٪، رابطه بویان - پاسی ۶۵٪، استیبر ۶۰٪ و جوزانی کهن ۴۵٪ است. در شکل ۳ هیستوگرام خطای هر رابطه رسم شده است. علت اصلی خطای بالای روابط مرسوم پتروفیزیکی (جدول ۲)، متاثر بودن قرائت نگار پرتوزایی طبیعی گاما از میزان فلدسپارهای قلیایی موجود در این سازند است که سبب تخمین بیش از حد حجم رس شده است.

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از روابط تجربی تخمین پتروفیزیکی حجم رس در نمونه‌های مورد مطالعه با حجم رس آزمایشگاهی.

حجم رس آزمایشگاهی (cm ³)	حجم رس تخمین زده شده (cm ³) براساس روابط						کد نمونه
	جوزانی کهن	بویان - پاسی	لارینف - ۱	کلاویر	استیبر	شاخص پرتوزایی گاما	
۱۲,۸۶	۱۹,۸۹	۳۴,۶۲	۴۰,۴۴	۳۷,۷۵	۳۱,۲۶	۵۷,۷۰	A _۱
۹,۵۳	۱۵,۳۰	۲۶,۵۱	۲۷,۸۸	۲۵,۹	۲۰,۸۷	۲۶,۵۱	A _۲
۷,۹۴	۲۰,۶۵	۳۵,۷۷	۴۲,۴۱	۳۹,۶۱	۳۲,۹۸	۵۹,۶۱	A _۳
۱۲,۸۸	۲۱,۰۲	۳۶,۳۱	۴۳,۳۶	۴۰,۵۲	۳۳,۸۱	۶۰,۵۱	A _۴
۸,۷۷	۱۲,۲۸	۳۶,۶۹	۴۴,۰۳	۴۱,۱۶	۳۴,۴۱	۶۱,۱۵	A _۵
۱۳,۳۱	۱۷,۷۵	۳۱,۰۹	۳۴,۶۹	۳۲,۳۱	۲۶,۳۹	۵۱,۸۲	A _۶
۱۲,۴۳	۱۹,۹۷	۳۴,۷۵	۴۰,۶۶	۳۷,۹۵	۳۱,۴۵	۵۷,۹۲	A _۷
۸,۳۹	۲۴,۵۳	۴۰,۸۹	۵۱,۸۸	۴۸,۶۹	۲۶,۳۹	۶۸,۱۴	A _۸
۱۴,۴۳	۲۰,۵۱	۳۵,۵۸	۴۲,۰۸	۳۹,۳۰	۳۲,۶۸	۵۹,۳	A _۹
۱۲,۶۳	۱۹,۳۲	۳۳,۳۷	۳۸,۹۵	۳۶,۳۳	۲۹,۹۷	۵۶,۲۲	A _{۱۰}
۱۰,۰۹	۲۰,۰۱	۳۴,۸۱	۴۰,۷۶	۳۸,۰۵	۳۱,۵۴	۵۸,۰۲	A _{۱۱}
۱,۴۵	۵,۹۶	۷,۳۷	۶,۱۲	۵,۵۹	۴,۴۶	۱۲,۲۸	A _{۱۲}
۶,۸۸	۱۰,۷۱	۱۶,۷۴	۱۵,۵۸	۱۴,۳۸	۱۱,۴۲	۲۷,۹	A _{۱۳}
۳,۳۷	۰,۷۳	۰,۶۶	۰,۵۱	۰,۴۶	۰,۳۷	۱,۱۱	A _{۱۴}
۱۶,۹۵	۱۲,۹۶	۰,۲۱	۰,۲۱	۰,۲۰	۱۵,۸۱	۳۶,۰۴	A _{۱۵}

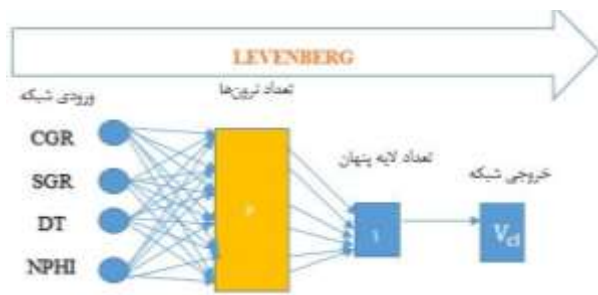
(نرون) با نظمی خاص تشکیل شده است که همانند ذهن انسان دارای ظرفیت بی‌ظنیری در پردازش اطلاعات هستند. یک شبکه عصبی شامل یک لایه ورودی برای اعمال ورودی‌های مساله، یک لایه پنهان برای پردازش و یک لایه خروجی برای ارائه پاسخ‌های مساله است. مهم‌ترین مسئله در رابطه با شبکه‌های عصبی مسئله یادگیری است. شبکه عصبی در حقیقت یک تابع تخمین‌گر چند جمله‌ای با یک عدد ثابت به عنوان ضریب ثابت است که توانایی بالایی در برازش داده‌های غیر خطی دارد [۲۲]. در اولین گام برای جلوگیری از

کمترین میزان خطا را رابطه تجربی جوزانی کهن تخمین می‌زند (۴۵٪) که کماکان این میزان خطا بسیار بالاست. لذا در ادامه برای کاهش بیشتر درصد خطا و مدل‌سازی حجم رس در عمق مخزن به آموزش داده‌ها توسط ابزار شبکه عصبی پرداخته شده است.

۴-۳- تخمین حجم رس با استفاده از ابزار شبکه عصبی

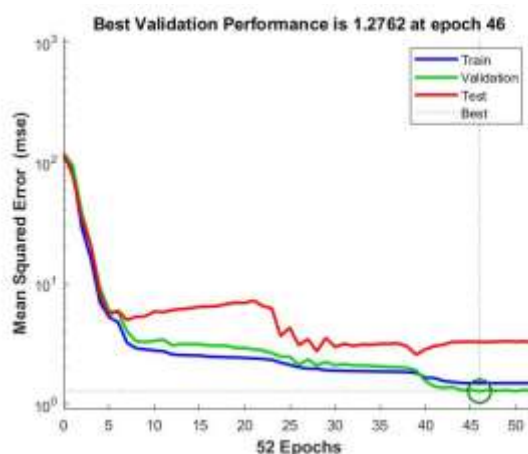
شبکه عصبی نوعی شبیه‌سازی مغز انسان در قالب یک سیستم مصنوعی است که از تعداد زیادی عضوهای پردازشگر

داده‌ها اعمال شد. تعداد داده‌های آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی برای رسیدن به بهترین تخمین بارها تغییر داده شد. در نهایت به طور تصادفی، ۷۰٪ داده‌ها برای آموزش، ۱۵٪ داده‌ها برای آزمایش و ۱۵٪ مابقی برای اعتبارسنجی شبکه اختصاص یافت که با توجه به ضرائب همبستگی در جدول ۲ نگارهای پرتو گاما، تخلخل نوترون و تخلخل صوتی در لایه ورودی و حجم رس به دست آمده از آنالیزهای آزمایشگاهی نمونه‌های مغزه به عنوان خروجی در نظر گرفته شد. شبکه با الگوریتم آموزش لونیبرگ - مارکوات و تابع فعال‌سازی تانژانت زیگموئید به ترتیب با ۶ نرون و ۱ لایه پنهان تخمین زده شد و معیارهای R و MSE پس از ۵۲ بار تکرار، در تکرار ۴۶ برای شبکه عصبی با خصوصیات مذکور به ترتیب ۰٫۹۳ و ۱٫۲۷ به دست آمد (شکل ۵). از شبکه عصبی با معماری بهینه برای تخمین حجم رس در کل اعماق مخزن استفاده شد و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی حجم رس مقایسه شد. در شکل ۴ معماری کلی شبکه عصبی مشاهده می‌شود.



شکل ۴: معماری شبکه عصبی برای تخمین حجم رس.

در شکل ۵ درصد خطاهای داده‌ها آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی در هر مرحله نشان داده شده است که با توجه به این نمودار در تکرار ۴۶ کمترین میزان خطا مشاهده می‌شود.



شکل ۵: منحنی درصد خطای آموزش - اعتبارسنجی - امتحان داده‌های حاصل از آموزش شبکه عصبی.

غلبه یک پارامتر بر مدل تخمینی شبکه عصبی به دلیل داشتن دامنه تغییرات وسیع، داده‌ها به اعدادی بین ۰ و ۱ با استفاده از رابطه ۸ تبدیل شدند.

رابطه (۸)

انحراف معیار / میانگین - مقدار داده = داده استاندارد

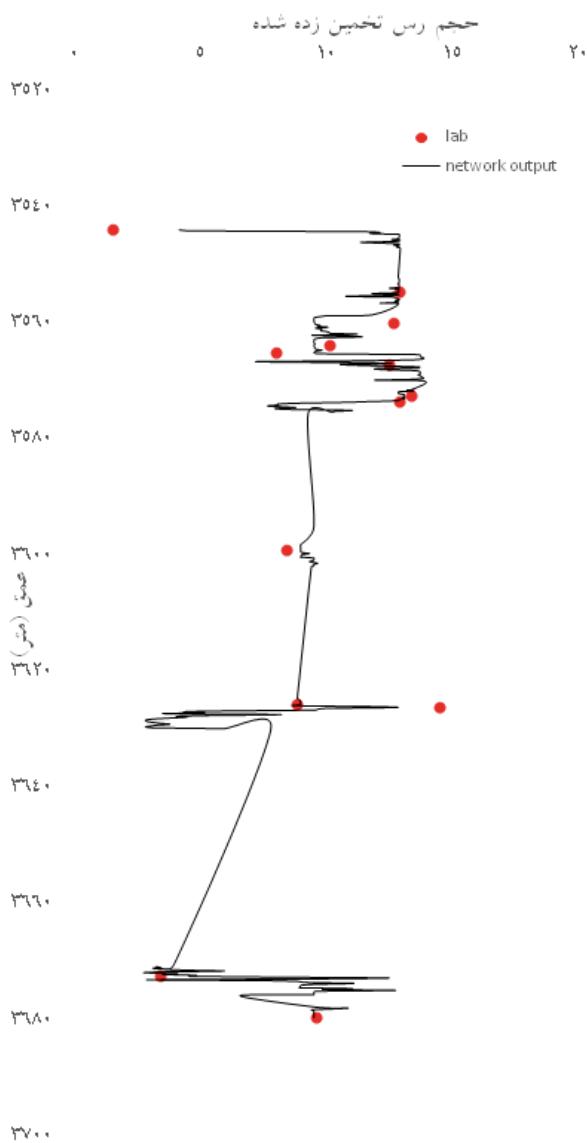
انجام آنالیز حساسیت برای انتخاب نمودارهای بهینه در تخمین حجم رس اهمیت ویژه‌ای دارد [۲۳]. آنالیز حساسیت با محاسبه ماتریس همبستگی پیرسون بین داده‌های نرمال شده نگارهای پتروفیزیکی و پارامتر حجم رس آزمایشگاهی انجام شد. با توجه به ضرائب همبستگی به دست آمده در جدول ۳، داده‌های چاه‌پیمایی پرتوزایی گاما (CGR، SGR)، تخلخل (NPHI) و صوتی (DT) به عنوان ورودی‌های شبکه و خروجی شبکه داده‌های آزمایشگاهی حجم رس انتخاب شد.

جدول ۳: ضرائب همبستگی نمودارهای چاه‌پیمایی حاصل از آنالیز حساسیت.

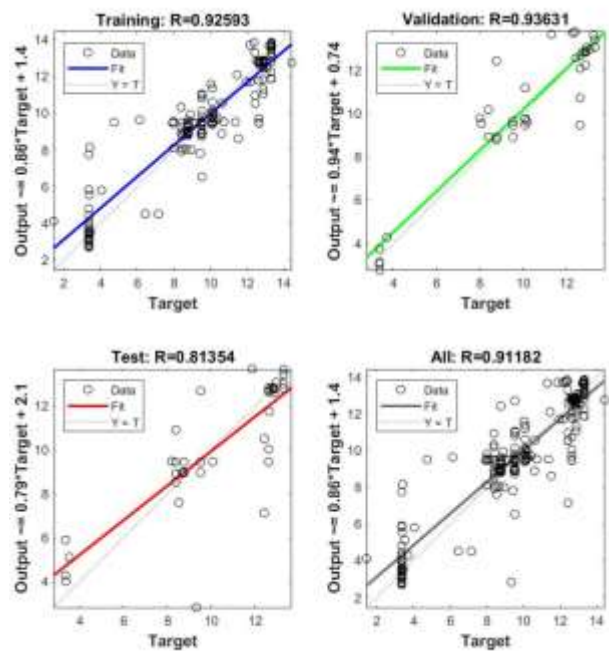
نام نگار	CALI	CGR	DT	ILD	NPHI	RHO B	SGR	Vcl-LAB
CALI	۱							
CGR	-۰٫۰۹	۱						
DT	-۰٫۱۶	۰٫۶۹	۱					
ILD	۰	-۰٫۴۰	-۰٫۷۱	۱				
NPHI	-۰٫۱۴	۰٫۸۰	۰٫۹۱	-۰٫۶۶	۱			
RHO B	۰٫۰۵	۰٫۱۸	-۰٫۳۹	۰٫۴	-۰٫۱۸	۱		
SGR	-۰٫۰۶	۰٫۹۸	۰٫۶۶	-۰٫۳۸	۰٫۷۷	۰٫۲۷	۱	
Vcl-LAB	-۰٫۱۴	۰٫۴	۰٫۳۴	-۰٫۱۹	۰٫۴۱	۰٫۰۱	۰٫۴	۱

از آنجایی که برای آموزش بهینه شبکه عصبی نیاز به تعداد زیادی داده ورودی است، تعداد ۱۵ داده حاصل از آنالیزهای آزمایشگاهی با استفاده از ساده‌ترین روابط تخمین زمین‌آماری به ۲۵۹ داده افزایش یافت. بدین شیوه که از دو داده متوالی میانگین گرفته شده و یک داده جدید با توجه به داده‌های قبل و بعد تخمین زده شد. این روند تا زمانی ادامه یافت که تعداد داده‌ها به میزان قابل قبول برای آموزش شبکه برسد و در نهایت تعداد ۲۵۹ داده برای آموزش توسط شبکه عصبی انتخاب شدند. برای تخمین حجم رس از ابزار شبکه عصبی نرم‌افزار متلب نسخه R۲۰۱۸b استفاده شد. تمامی داده‌ها برای تخمین شبکه نرمال‌سازی شدند و انواع توابع فعال‌سازی، الگوریتم‌های آموزش، تعداد متفاوت لایه پنهان و نرون بر

(PEF) و نمودار صوتی (DT) برای شناسایی بازه مخزنی استفاده شد. در آغاز برای شناسایی بازه تخلخل نمونه‌ها، نمودار چگالی بر حسب تخلخل رسم شد. همان‌گونه که در شکل ۸ قابل رؤیت است دو نوع سنگ از جنس‌های ماسه‌سنگی و کربناته مشاهده می‌شود که بازه تخلخل ماسه‌سنگ بین ۲۰ الی ۲۵ درصد و بازه تخلخل کربناته بین ۲۵ الی ۳۰ درصد می‌باشد. شکل ۹ نشان‌دهنده نمودار چگالی بر حسب نگار فوتوالکتریک در بازه مخزنی می‌باشد که ماسه‌سنگ و دولومیت با بیشینه مقدار تخلخل ۲۵٪ مشاهده می‌شوند اما بیشینه مقدار تخلخل کربناته حدوداً ۱۵٪ و برای ماسه‌سنگ ۲۵٪ توجه به این نمودار شناسایی شدند.



شکل ۷: منحنی تغییرات حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه عصبی بر حسب عمق.

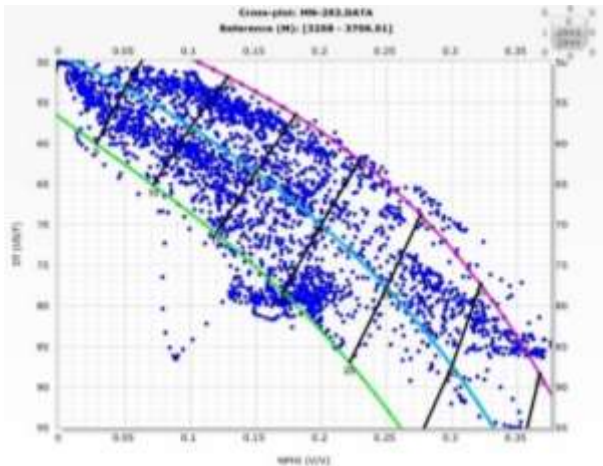


شکل ۶: منحنی رگرسیون داده‌های آموزش - اعتبارسنجی - امتحان در تطابق خروجی حجم رس.

در شکل ۶ منحنی‌های پراکندگی داده‌ها در سه مرحله دیده می‌شود و در شکل ۷، منحنی تغییرات حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه بر حسب عمق رسم شده است. نمودار مشکی رنگ در شکل ۷ حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه عصبی در اعماق مخزنی و نقاط نارنجی رنگ در این منحنی، نشان‌دهنده داده‌های حجم رس آزمایشگاهی هستند. با توجه به هماهنگی و همپوشانی خوبی بین منحنی حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه و داده‌های آزمایشگاهی، این مدل بهترین مدل تخمین‌گر شبکه عصبی با استفاده از داده‌های این سازند است.

۴-۴- طبقه‌بندی کیفی مخزن با استفاده از نمودارهای متقاطع چگالی - تخلخل

تعیین پارامترهای پتروفیزیکی و بررسی توزیع آن‌ها در فواصل مخزنی، می‌تواند منجر به زون‌بندی جدید و تغییر ضخامت تولیدی میداین شود. تخلخل و تراوایی سنگ‌های مخزنی از مهم‌ترین خواص فیزیکی مربوط به ذخیره‌سازی و انتقال سیالات در مخزن هستند [۲۰]. تفسیر کیفیت مخزنی با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی از بازه‌ی ۳۲۷۰ تا ۳۷۰۰ متر از سطح آزاد دریا صورت گرفت. برای شناسایی مقدار تخلخل و جنس سنگ مخزن در بازه مورد مطالعه، از نمودارهای پتروفیزیکی چگالی (RHOB)، تخلخل (NPHI)، فوتوالکتریک



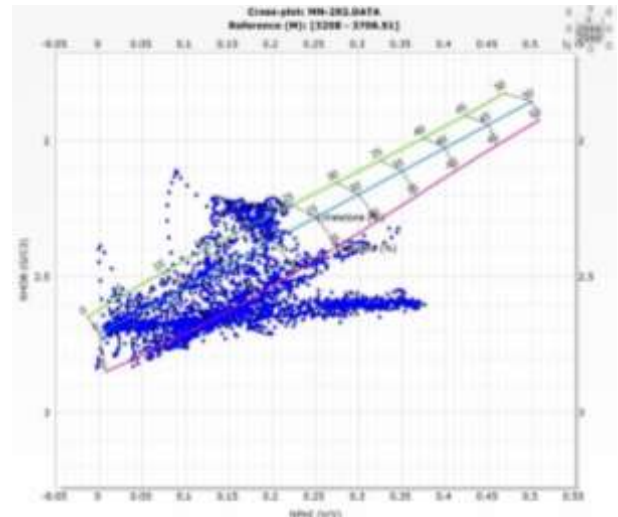
شکل ۱۰: نمودار تخلخل صوتی بر حسب تخلخل نوترون.

در انتها همان گونه که در جدول ۳ قابل رؤیت می باشد، با توجه به نمودارهای متقاطع (شکل های ۸، ۹ و ۱۰) بازه های مخزنی که دارای کیفیت مخزنی مناسب میباشند، مشخص شده اند. این بازه ها با مقایسه پارامترهای سنگ شناسی، تخلخل، درصد اشباع آب و تراوایی محاسبه شده با توجه به روابط پتروفیزیکی تعیین شده اند. برای شناخته شدن یک بازه به عنوان کاندید بازه با کیفیت مخزنی خوب، باید تمامی موارد مطرح شده در کنار یکدیگر قیاس شوند و عدم کافی بودن هر کدام از پارامترها باعث ضعیف بودن آن بازه می شوند. بازه های ذکر شده در جدول ۴ به عنوان گزینه های مناسب برای عملیات مشبک کاری و تولید از چاه مشخص شده اند.

جدول ۴: بازه های عمق مخزن (متر) با کیفیت مناسب.

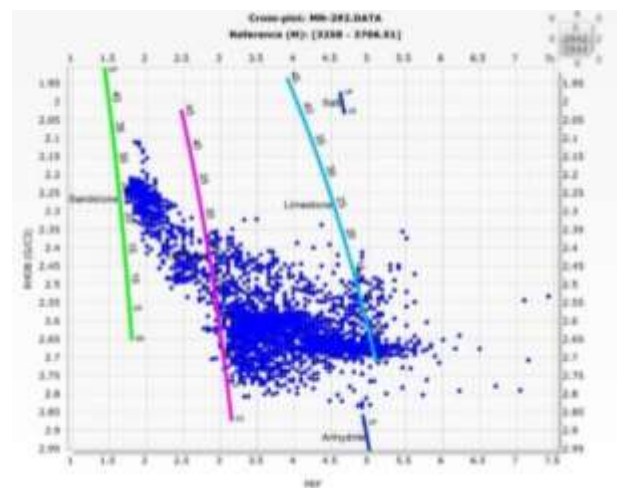
سنگ شناسی	ضخامت (متر)	شروع بازه (متر)	انتهای بازه (متر)
کلسیت، دولومیت و حجم پایین رس	۴۰	۳۲۵۸	۳۲۹۸
کلسیت، دولومیت و حجم پایین رس	۱۳	۳۳۴۳	۳۳۵۶
دولومیت و ترکیب رس و کلسیت	۲۶	۳۴۰۱	۳۴۲۷
کلسیت و ترکیب رس و دولومیت	۱۵	۳۵۰۱	۳۵۱۶
ماسه سنگی و حجم پایین رس	۲۹	۳۵۲۰	۳۵۴۹
کلسیت	۸	۳۶۹۸	۳۷۰۶

با توجه داده های در دسترس از آنالیز XRD، در نمونه ها به طور میانگین حدود ۴۰٪ کانی های سیلیکاته، ۳۰٪



شکل ۸: نمودار چگالی بر حسب تخلخل.

با توجه به نمودار شکل ۹ انیدریت نیز تا تخلخل ۵٪ در بازه مخزنی قابل رؤیت است که در ادامه برای مشخص نمودن کیفیت مخزنی نقش مهمی را ایفا خواهد کرد زیرا که وجود انیدریت کیفیت مخزن را کاهش می دهد.



شکل ۹: نمودار چگالی بر حسب فوتوالکتریک.

با توجه به شکل ۱۰ سه نوع سنگ با جنس های ماسه سنگ و کربناته در نمودار نگار صوتی بر حسب تخلخل قابل تشخیص می باشند. بازه تخلخل تخمین زده شده برای ماسه سنگ بین ۲۰٪ تا ۲۵٪ می باشد که با نتایج نمودارهای اشکال ۸ و ۹ همخوانی دارد اما تخلخل محاسبه شده برای دو نوع سنگ کربناته برای بعضی از اعماق بازه تخلخل را تا ۳۰٪ گزارش کرده است که با توجه به تفسیر نمودارهای اشکال ۸ و ۹ همخوانی ندارد و نتایج این نمودار قابل اعتماد نمی باشد.

جدول ۶: طبقه‌بندی مخزن به لحاظ کیفیت بر حسب تخلخل نگار نوترون.

بازه تخلخل (V/V)	کیفیت مخزن بر اساس مقدار تخلخل	ضخامت مخزنی (متر)
الی ۰/۰۲۵۳ - ۰/۰۹۷۰۴	بد	۹۶/۱۶
الی ۰/۰۹۷۰۴ - ۰/۱۵۰۴۵	متوسط	۹۲/۸
الی ۰/۱۵۰۴۵ - ۰/۲۰۱۴۲۵	خوب	۹۴/۳۳
الی ۰/۲۰۱۴۲۵ - ۰/۳۷۶	عالی	۱۰۴/۳۹

۵-۲- طبقه‌بندی مخزن به لحاظ کیفیت براساس داده‌های نگار پرتوزایی گاما

براساس داده‌های نگار پرتوزایی گاما، کمترین مقدار این نگار ۱۰/۳۱ و بیشترین مقدار آن ۱۹۹ می‌باشد. از این دو عدد میانگین گرفته و دو بازه جدید به عنوان کیفیت متوسط مخزن با مقادیر متوسط رس معرفی شد. با توجه به این دو عدد و سایر داده‌های مابین، بازه‌های مخزنی بر اساس مقدار پرتوزایی نگار گاما و مقادیر رس، به سه بازه در جدول ۷ تقسیم‌بندی شد.

جدول ۷: تقسیم‌بندی بازه‌های مخزنی براساس نگار پرتوزایی گاما.

نوع بازه	محدوده عددی نگار پرتوی گاما (GAPI)	کیفیت مخزن
بازه اول	الی ۱۰/۳۱ - ۱۰۴/۶۵۵	رس پایین، کیفیت خوب
بازه دوم	الی ۱۰۴/۶۵۵ - ۱۹۹	رس متوسط، کیفیت متوسط
بازه سوم	بیش از ۱۹۹	رس بالا، کیفیت پایین

با توجه به تقسیم‌بندی صورت گرفته، ۲۵۸ متر از کل مخزن دارای رس پایین، ۲۵۸ متر از کل مخزن دارای مقادیر رس پایین و کیفیت بالای مخزنی، ۹۰/۶۸ متر از کل مخزن دارای مقادیر رس متوسط با کیفیت متوسط و ۲۵۸ متر حاوی مقادیر رس بالا و کیفیت بد مخزنی می‌باشد. مشاهدات حاصل با جدول ۳ بررسی شده و بازه‌هایی که در جدول ۳ به عنوان بازه‌های با درصد رس پایین معرفی شده‌اند با اعماقی که در این مرحله از مطالعه با توجه به نگار پرتوزایی گاما تعریف شده‌اند، تطابق دارد.

کانی‌های کربناته و ۲۷٪ کانی‌های رسی وجود دارد. بر اساس اعماق نمونه‌های مورد مطالعه و فازهای سازنده هر کدام، تفسیر نمودارهای مقاطع چگالی - تخلخل و داده‌های جدول ۳ در بازه‌هایی که نمونه در دسترس بوده و آنالیز XRD بر آن‌ها اعمال شده است، تطابق خوبی نشان داده می‌شود. داده‌های خروجی حاصل از آنالیز XRD برای نمونه‌ای که در عمق ۳۵۴۳ متری از مخزن قرار داشت، کانی‌های سیلیکاته را حدود ۹۰٪ نتیجه داد که می‌تواند بیانگر کیفیت بالای مخزن و تأییدی بر تفسیر جدول ۴ باشد چراکه این عمق در بازه پنجم جدول ۴ با سنگ‌شناسی "ماسه‌سنگی با حجم پایین رس" قرار می‌گیرد.

۵-۱- طبقه‌بندی کیفی مخزن براساس تلفیق داده‌های پتروفیزیکی

۵-۱-۱- طبقه‌بندی مخزن به لحاظ کیفیت براساس داده‌های نگار نوترون (NPHI)

در داده‌های نگار NPHI، کمترین مقدار این نگار ۰/۰۲۵۳ - و بیشترین مقدار ۰/۳۷۶ است. با توجه به مینیمم و ماکزیمم مقدار و سایر داده‌های مابین، داده‌های نگار تخلخل نوترونی با توجه به جدول ۵ به چهار بازه تقسیم‌بندی شد که کیفیت سازندی را به چهار بازه تقسیم‌بندی می‌کند.

جدول ۵: تقسیم‌بندی بازه‌های مخزنی براساس داده‌های نگار نوترون.

نوع چارک	بازه عددی نگار نوترون (V/V)	کیفیت مخزن
چارک اول	الی ۰/۰۹۷۰۴ - ۰/۰۲۵۳	بد
چارک دوم	الی ۰/۱۵۰۴۵ - ۰/۰۹۴۰۴	متوسط
چارک سوم	الی ۰/۲۰۱۴۲۵ - ۰/۱۵۰۴۵	خوب
چارک چهارم	الی ۰/۳۷۶ - ۰/۲۰۱۴۲۵	عالی

با توجه به تقسیم‌بندی نگار نوترون (جدول ۵)، نگار نوترون بازه‌های مخزنی با کیفیت بد، خوب، متوسط و عالی را از ۴۴۸/۵ متر ضخامت کل مخزن معرفی می‌کند. با تطابق نتایج جدول ۶ با جدول ۴، اعماقی که به عنوان بازه مخزنی با کیفیت مناسب تعریف شده‌اند در محدوده کیفیت مخزنی متوسط تا عالی جدول ۶ قرار می‌گیرند. البته باید توجه داشت که این نتیجه تنها با توجه به بررسی‌های حاصل از نگار نوترون است در صورتی‌که نتایج جدول ۴ براساس بررسی نگارهای بیشتر و کامل‌تری از سازند است.

۳-۵- طبقه‌بندی کیفی مخزن براساس حجم رس تخمین زده شده از مدل‌سازی به روش شبکه عصبی

براساس حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه عصبی، با توجه به این که حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه کمتر از ۱۰٪، بین ۱۰٪ تا ۳۳٪ و بیشتر از ۳۳٪ باشد جنس سازند تعیین شد. اگر کانی‌های رسی کمتر از ۱۰٪ باشد سازند ماسه‌سنگی، بین ۱۰٪ الی ۳۳٪ باشد سازند ماسه‌سنگی - رسی و اگر بیشتر از ۳۳٪ باشد سازند رسی تعیین می‌شود [۹]. براساس حجم رس آزمایشگاهی داده‌های حجم رس بیشتر از ۳۳٪ وجود ندارند و تمامی داده‌ها کمتر از ۱۰٪ و یا بین ۱۰٪ تا ۳۳٪ می‌باشند و محدوده داده‌های حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه عصبی نیز از همین روند تبعیت می‌کنند. به همین دلیل در این مرحله از پژوهش سازند کاملاً شیلی را نمی‌توان تشخیص داد و فقط سازندهایی با جنس ماسه‌سنگی یا ماسه‌سنگی - رسی تعیین و همراه با بازه‌های عمقی متناظر با آن‌ها در جدول ۸ تنظیم شده‌اند.

با تطابق نتایج حاصل از این مرحله از مطالعه با بررسی‌های حاصل از کیفیت مخزنی براساس نگار نوترون و آنالیز XRD می‌توان نتیجه گرفت که این مرحله از مطالعه می‌تواند تکمیل‌کننده مشاهدات حاصل از آنالیز XRD باشد. آنالیز XRD یک آنالیز گسسته و تنها درصد کانی‌های سازنده ۱۵ نمونه موجود است اما خروجی شبکه عصبی یک لاگ پیوسته از تخمین حجم رس بود که می‌توان با توجه به حجم رس تخمین زده شده توسط شبکه در بازه وسیع‌تری از سازند برای سنگ‌شناسی آن نتیجه گرفت. با تطبیق خروجی‌های حاصل از هر دو مرحله نتیجه‌گیری جامعی از کیفیت سازند در ادامه شرح داده شده است.

جدول ۸: تعیین جنس سازند براساس حجم رس حاصل از شبکه عصبی.

جنس سازند	عمق سازند (متر)
ماسه‌سنگی	۳۵۴۳/۷۵ - ۳۵۴۳/۵۹۸
	۳۵۵۸/۵۲۳ - ۳۵۶۱/۲۷۶
	۳۵۶۲/۱۹ - ۳۵۶۴/۹۳۴
	۳۵۷۳/۴۶۸ - ۳۶۷۹/۳۹
ماسه‌سنگی - رسی	۳۵۴۳/۹۰۲ - ۳۵۵۸/۳۸
	۳۵۶۵/۰۸۶ - ۳۵۷۳/۳۱۶

به طور خلاصه می‌توان گفت که تمامی روابط پتروفیزیکی حجم شیل، حجم رس نمونه‌ها را با درصد خطای بسیار زیادی تخمین زدند که البته کمترین خطا مربوط به رابطه جوزانی کهن با مقدار ۴۵٪ بود که در ادامه از شبکه عصبی برای

کاهش خطا کمک گرفته شد و درصد خطا تا ۱/۲۷ کاهش داده شد و حجم رس در اعماق مخزن مدل‌سازی شد.

در جدول ۹ به طبقه‌بندی کیفی مخزن با تلفیق تمامی نتایج حاصل از مطالعات صورت گرفته در این پژوهش در اعماق مخزنی به طور کلی برای معرفی شرایط پایین، متوسط و خوب مخزنی پرداخته شده است که در اعماق محدودی کیفیت مخزن "پایین" تعیین شده است. به عنوان مثال در عمق ۳۶۲۰ الی ۳۶۳۰ متری از مخزن، تخلخل نوترونی و نگار پرتوژی کیفیت سازندی را "پایین"، شبکه عصبی جنس سازندی را ماسه‌سنگی - رسی و تلفیق نمودارهای پتروفیزیکی کربناته با حجم بالای رس تعیین کرده است که در خروجی‌های XRD کانی‌های کربناته و رسی بیشترین کانی‌های سازنده نمونه‌ها در این عمق هستند در چنین شرایطی، کیفیت سازندی "پایین" تلقی می‌شود. در اعماق ۳۴۰۰ الی ۳۶۰۰ متری تخلخل نوترونی و نمودار پرتوژی گاما کیفیت سازندی را از "متوسط" تا "خوب"، شبکه عصبی جنس سازندی را تلفیقی از ماسه‌سنگ و رس و تلفیق نمودارهای پتروفیزیکی جنس سازندی را تلفیقی از کربناته و رس یا کربناته با میان‌لایه‌های رسی تعیین کرده است. خروجی‌های XRD کانی‌های کربناته و سیلیکاته را با بیشترین درصد بین سایر کانی‌های سازنده نمونه‌ها معرفی کرده‌اند. با توجه به تلفیق نتایج، کیفیت چاه تولیدی مورد مطالعه در سازند آسماری میدان مارون با کیفیت متوسط تا خوب معرفی می‌شود که سنگ‌شناسی اعماق مخزنی تلفیقی از ماسه‌سنگ-کربناته-رسی تعیین می‌شود.

۶- نتیجه‌گیری

با بررسی مطالعات صورت گرفته در این پژوهش، چاه مورد مطالعه در سازند آسماری میدان نفتی مارون از سنگ‌شناسی‌های گوناگون ماسه‌سنگی، ماسه‌سنگی - رسی، کربناته - ماسه‌سنگی بوده که مطالعات آزمایشگاهی غالب جنس سازند را نیز کربناته با میان‌لایه‌های رسی تعیین کرده اما جنس کربناته بیشتر بر این سازند غالب است. بطور کلی کیفیت سازندی تحت تاثیر الگو و درصد توزیع کانی‌های سازندی که به صورت پراکنده، پل‌زنده و پرکننده مشاهده شدند، متوسط تا پایین معزفی شد که البته در اعماقی نیز سازند از کیفیت بالای مخزنی برخوردار است که برای تخمین حجم رس از شبکه عصبی برای کاهش خطا کمک گرفته شد و درصد خطا تا ۱/۲۷ کاهش داده شد و حجم رس در عمق مخزن مدل‌سازی شد.

جدول ۹: طبقه‌بندی کیفی نهایی مخزن با تلفیق خروجی‌های آزمایشگاهی و پتروفیزیکی.

عمق مخزن (متر)	اطلاعات حاصل از آنالیز پراش پرتوی ایکس	کیفیت سازندی از تخلخل نوترونی	کیفیت سازندی نگار پرتوزایی	تعیین جنس سازند از تلفیق نگارهای پتروفیزیکی	تعیین جنس سازند از شبکه عصبی
۳۵۰۰ - ۳۴۰۰	کربناته رس سیلیکاته	متوسط	متوسط	کربناته با میان لایه‌های رسی	ماسه‌سنگی - رسی
۳۵۷۰ - ۳۵۵۰	سیلیکاته رس کربناته	خوب	متوسط	دولومیتی - رسی	ماسه‌سنگی با میان لایه‌های رسی
۳۶۰۰ - ۳۵۹۰	سیلیکاته رس کربناته	خوب	خوب	آهکی - رسی	ماسه‌سنگی - رسی
۳۶۳۰ - ۳۶۲۰	کربناته رس سیلیکاته	پایین	پایین	کربناته با حجم بالای رس	ماسه‌سنگی - رسی

تشکر و قدردانی

نویسندگان مایلند مراتب سپاس خود را به آزمایشگاه اشعه ایکس، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران به جهت انجام آنالیزهای صحیح و دقیق دستگاهی استفاده شده در این تحقیق ابراز دارند.

منابع

- Bhuyan, K., & Passey, Q. R. (۱۹۹۴, January ۱). Clay Estimation From GR And Neutron - Density Porosity Logs. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Larionov, V., Borehole radiometry. Nedra, Moscow, ۱۹۶۹. ۱۲۷.
- Clavier, C., Hoyle, W., & Meunier, D. (۱۹۷۱, June ۱). Quantitative Interpretation of Thermal Neutron Decay Time Logs: Part I. Fundamentals and Techniques. Society of Petroleum Engineers. doi:۱۰.۲۱۱۸/۲۶۵۸-A-PA
- Steiber, R. G. (۱۹۷۳). Optimization of shale volumes in open hole logs. Journal of Petroleum Technology, ۳۱(۱۹۷۳), ۱۴۷-۱۶۲.
- Jozanikohan, G. (۲۰۱۷). On the development of a non-linear calibration relationship for the purpose of clay content estimation from the natural gamma ray log. International Journal of Geo-Engineering, ۸(۱), ۱-۱۸.
- Kamel, M. H., & Mabrouk, W. M. (۲۰۰۳). Estimation of shale volume using a combination of the three porosity logs. Journal of Petroleum Science and Engineering, ۴۰(۳-۴), ۱۴۵-۱۵۷.
- Soto Becerra, R., Arteaga, D., Hidalgo, C. M., & Rodriguez, F. (۲۰۱۰, January). The correct shale-volume characterization increases hydrocarbon reserves: case study of
- Leila, M., Eslam, A., El-Magd, A. A., Alwaan, L., & Elgendy, A. (۲۰۲۱). Formation evaluation and reservoir characteristics of the Messinian Abu Madi sandstones in Faraskour gas field, onshore Nile delta, Egypt. Journal of Petroleum Exploration and Production, ۱۱(۱), ۱۳۳-۱۵۵.
- Hill D.G. (۲۰۱۷) Formation Evaluation. In: Hsu C.S., Robinson P.R. (eds) Springer Handbook of Petroleum Technology. Springer Handbooks. Springer, Cham.
- Wilson, L., Wilson, M. J., Green, J., & Patey, I. (۲۰۱۴). The influence of clay mineralogy on formation damage in North Sea reservoir sandstones: a review with illustrative examples. Earth-Science Reviews, ۱۳۴, ۷۰-۸۰.
- Ellis, D. V., & Singer, J. M. (۲۰۰۷). Well logging for earth scientists (Vol. ۶۹۲). Dordrecht: Springer.

۱۸. نورائی نژاد، خ.، محمدی، ح.، ۱۳۹۱. تأثیر خاصیت ترشوندگی سنگ مخزن بر روند تولید سازند آسماری میدان مارون. ماهنامه علمی- ترویجی اکتشاف و تولید نفت و گاز. ۴۷-۵۱.
۱۹. رحیمی پوستین دوز، آ.، خوشبخت، ف.، نبی بیده‌ندی، ب. م.، ۱۳۹۴. ارزیابی پتروفیزیکی و زون بندی سازند آسماری در یکی از چاه های جنوب غرب ایران. مجموعه مقالات چهارمین کنفرانس ملی مهندسی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی.
۲۰. جوزانی کهن، گ.، ۱۳۹۲، "شناسایی کانی‌های رسی به روش طیف‌سنجی پراش پرتو ایکس"، چاپ اول، موسسه انتشارات ستایش، تهران، ۱۵۰ صفحه.
۲۱. محول، ش.، ۱۳۹۸، "بررسی کانی‌های رسی یکی از مخازن کربناته جنوب غرب ایران با هدف طبقه‌بندی مخزن به لحاظ کیفیت"، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ۱۲۷ صفحه.
۲۲. Boukabara, S. A., Krasnopolsky, V., Penny, S. G., Stewart, J. Q., McGovern, A., Hall, D., ... & Hoffman, R. N. (۲۰۲۱). Outlook for exploiting artificial intelligence in the earth and environmental sciences. *Bulletin of the American Meteorological Society*, ۱۰۲(۵), E1۰۱۶-E1۰۳۲.
۲۳. Jozanikohan, G., & Seyfan, A. (۲۰۲۰). The Determination of the Most Effective Petrophysical Logs for Rock typing in a Detrital Reservoir Rock, Using Clustering Methods. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, ۱۰(۲۳), ۶۵-۷۷.
- cretaeous formation, Lake of Maracaibo, Venezuela. In *SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Society of Petroleum Engineers.
۱۲. Aksu, I., Bazilevskaya, E., & Karpyn, Z. T. (۲۰۱۵). Swelling of clay minerals in unconsolidated porous media and its impact on permeability. *GeoResJ*, ۷, ۱-۱۳.
۱۳. Jozanikohan, G., Norouzi, G. H., Sahabi, F., Memarian, H., & Moshiri, B. (۲۰۱۵). The application of multilayer perceptron neural network in volume of clay estimation: case study of Shurijeh gas reservoir, Northeastern Iran. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, ۲۲, ۱۱۹-۱۳۱.
۱۴. Choubineh, A., Helalizadeh, A., & Wood, D. A. (۲۰۱۹). Estimation of minimum miscibility pressure of varied gas compositions and reservoir crude oil over a wide range of conditions using an artificial neural network model. *Advances in Geo-Energy Research*, ۳(۱), ۵۲-۶۶.
۱۵. Amirian, E., Fedutenko, E., Yang, C., Chen, Z., & Nghiem, L. (۲۰۱۸). Artificial neural network modeling and forecasting of oil reservoir performance. *Applications of data management and analysis*, ۴۳-۶۷.
۱۶. Ahmadi, M. A., & Chen, Z. (۲۰۱۹). Comparison of machine learning methods for estimating permeability and porosity of oil reservoirs via petro-physical logs. *Petroleum*, ۵(۳), ۲۷۱-۲۸۴.
۱۷. سلیمانی، ب.، عبدالرحیمی، ق.، اشجعی، ع.، چرچی، ع.، (۱۳۹۱). مطالعه سنگ‌شناسی و مدل ساختمانی سازند گچساران در میدان نفتی مارون با استفاده از روش‌های زمین‌آماری. *زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته*. ۲(۴)، ۳۱-۲۱.