

تفمین گونه‌های سنگی، رخساره‌های سنگی و تراوایی در یکی از میادین گازی فارس ساحلی با استفاده از مدل سازی فازی

محمّد کشتکار*^۱، مسعود لطف پور^۲، سید علی معلمی^۳ و علی ممد باقری^۳

(۱) مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران mohamad.keshtkar@gmail.com

(۲) واحد زمین‌شناسی نفت پژوهشگاه صنعت نفت

(۳) واحد پتروفیزیک پژوهشگاه صنعت نفت

(* عهده‌دار مکاتبات)

چکیده

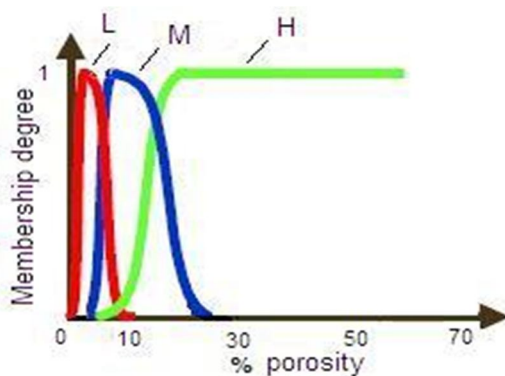
تراوایی، رخساره‌های سنگی و گونه‌های سنگی از جمله پارامترهای مهم مخزنی هستند. در این تحقیق پارامترهای مهم مخزنی به‌طور غیرمستقیم از روی لاگ‌های الکتریکی توسط روش منطق فازی و امکان فازی تخمین زده و نتایج به‌دست آمده با نتایج مغزه مقایسه شدند. بدین‌منظور از داده‌های لاگ و مغزه‌ی دو چاه گازی فارس ساحلی استفاده شد. در انتها تطابق خوبی بین داده‌های مغزه و نتایج به‌دست آمده از روش منطق فازی مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: گونه‌های سنگی، تراوایی، رخساره‌های سنگی، منطق فازی، امکان فازی

۱- مقدمه

(Brouwer 2006) یک پتروفیزیکست ممکن است ماسه‌سنگی با تخلخل کمتر از ۳ درصد را به عنوان تخلخل پایین در نظر بگیرد، یک تخلخل حدّ واسط می‌تواند تخلخل بین ۴ و ۱۰ درصد باشد و تخلخل بالای ۱۵ درصد به‌عنوان تخلخل بالا شمرده شود (Pape et al. 2009). بعضی طبقه‌بندی‌ها با مرزهای واضح اگرچه از نظر ریاضی ساده‌تر و راحت‌تر است، اما از نظر علمی ممکن است مناسب و بی-نقص نباشد. در منطق فازی یک تابع عضویت توصیف می‌شود که اجازه‌ی تعلق به بیش از یک طبقه (در این مورد تخلخل پایین، حدّ واسط و بالا) را با درجات مختلف

توصیف مخزن یکی از مهمترین مباحث در مهندسی نفت است (Aitken et al. 2004). استراتژی لازم برای یک مدیریت مؤثر تنها بعد از به‌دست آوردن تصویری دقیق از ویژگی‌های سنگ مخزن به-دست می‌آید (Honarpour et al. 2006, Haro 2009). صنعت نفت و گاز امروزه از تکنیک‌های تفسیری جدیدی بر اساس سیستم‌های هوشمند برای مدل‌سازی و پیش‌بینی خواص مخزن بهره می‌برد. در این میان روش منطق فازی یا به‌طور کلی تئوری فازی، ارزش‌های خود را به‌خوبی در این حیطه نشان داده است. طی چند سال اخیر روش‌های هوشمند مثل منطق فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌طور گسترده در حلّ مطالعات مخزن مورد استفاده قرار گرفته است. برای مثال (Saggaf & Nebrija 2003, Cuddy 1997, Nordlund 1996, Baygun et al. 1996, Bois 1984). از منطق فازی و شبکه‌های عصبی برای حلّ مسائل مخزنی چند میدان استفاده کرده‌اند. منطق فازی در سال ۱۹۵۶ میلادی توسط پرفسور لطفی‌زاده دانشمند ایرانی تبار دانشگاه برکلی کالیفرنیا با ارائه‌ی مقاله‌ای تحت عنوان (Fuzzy sets) یا مجموعه‌های فازی، به جهانیان معرفی شد (Zadeh 1965). ریاضیات فازی با جایگزینی مجموعه‌های فازی، با مجموعه‌های کلاسیک متولد شد. برای اشاره کردن به اختلاف بین منطق کلاسیک و منطق فازی به تصویر ۱ رجوع می‌شود (Aminzadeh &



تصویر ۱- تابع عضویت تخلخل: تخلخل (x)، درجه‌ی عضویت (y) نمایش تخلخل پایین (قرمز) تخلخل حدّ واسط (آبی) و تخلخل بالا (سبز)

گونه‌ی سنگی را می‌توان به‌عنوان یک ایتروال سنگی با هندسه‌ی منافذ یکسان که از نظر ترکیب کانی‌شناسی تعیین شده باشد و دارای خصوصیات معین جریان سیال باشد، توصیف کرد (Silin & Patzek 2009, Bagheri et al. 2005).

۲-۲- استفاده از منطق فازی برای پیش‌بینی گونه‌های سنگی

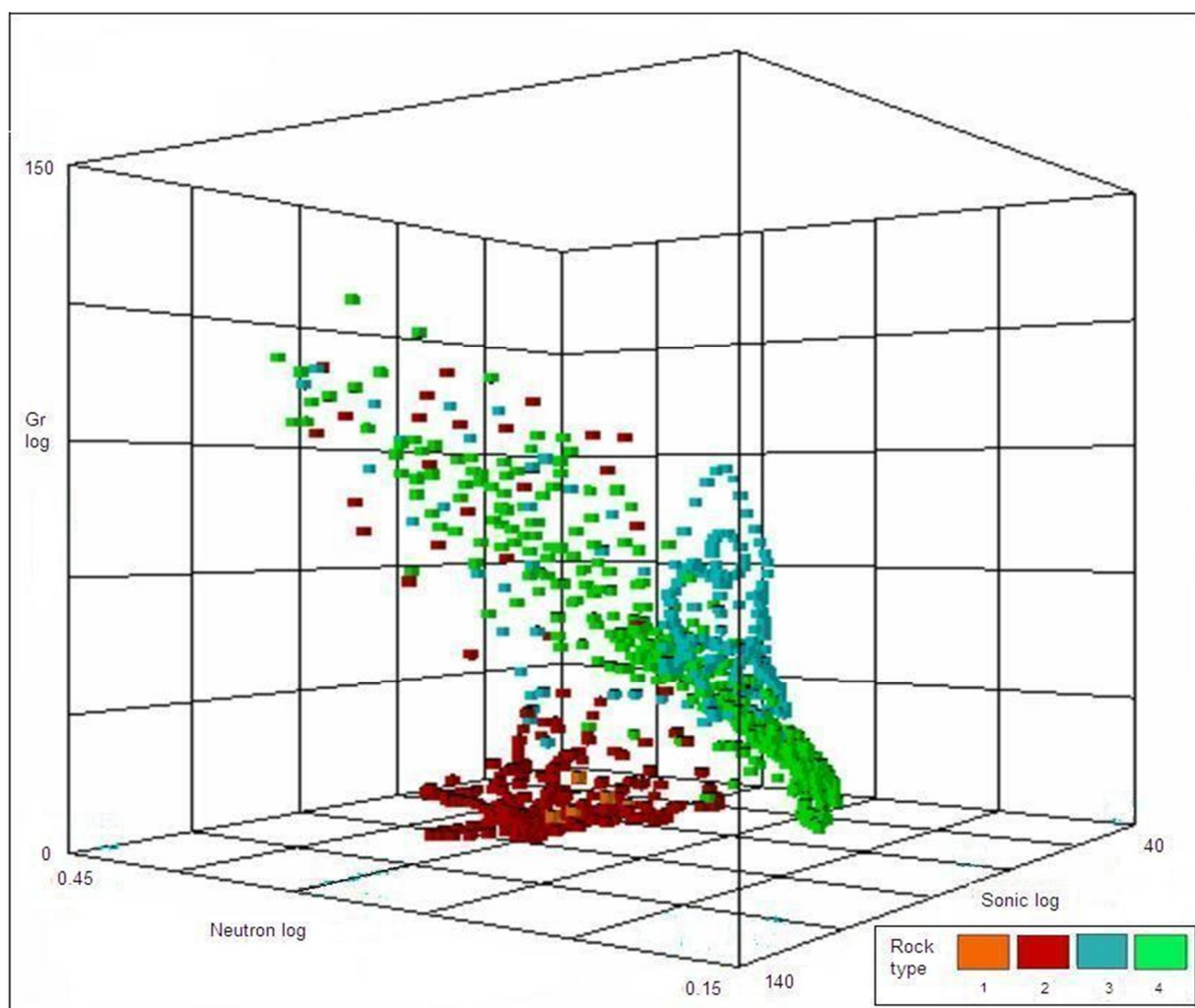
پاسخ لاگ‌های پتروفیزیکی به گونه‌های سنگی به‌صورت مرزهای واضح و مشخص نیست و محدوده‌ی نسبتاً وسیعی را برای بعضی گونه‌های سنگی شامل می‌شود. در تصویر ۲ کراس پلات سه بعدی از لاگ‌های سونیک (DT)، نوترون (NPHI) و پرتوگاما (GR) برای گونه‌های سنگی مورد مطالعه رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مرزها همپوشانی دارند و فازی هستند و از همین فازی بودن مرزها برای پیش‌بینی رخساره‌های سنگی و گونه‌های سنگی از روی لاگ‌ها استفاده می‌شود.

عضویت می‌دهد. برای مثال در تصویر ۱ تخلخل ۸ درصد می‌تواند در گروه تخلخل پایین با درجه‌ی ۲۰ درصد و در گروه تخلخل حد واسط با درجه‌ی ۷۸ درصد و در گروه تخلخل بالا با درجه‌ی ۲ درصد باشد. در این مطالعه سعی شده است گونه‌های سنگی (گونه‌های سنگی حاصل از مطالعات مغزه) رخساره‌های سنگی و تراوایی از روی داده‌های پتروفیزیکی و با استفاده از تکنیک منطق فازی تخمین زده شوند.

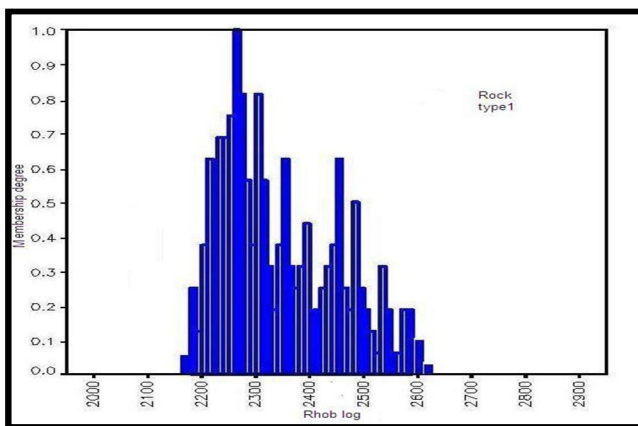
۲- بمت

۲-۱- گونه‌های سنگی

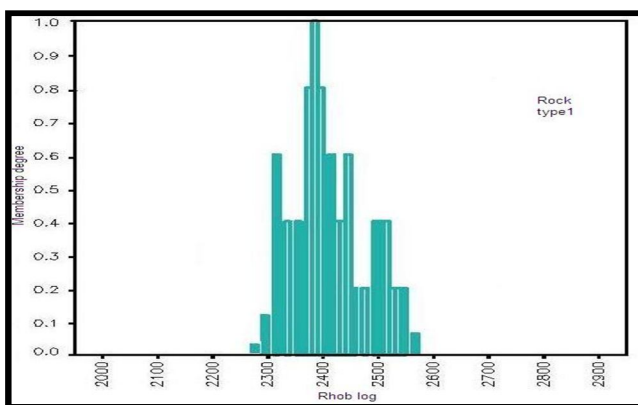
تشخیص گونه‌های سنگی و ناهمگونی افقی و عمودی، یکی از مؤلفه‌های ضروری در فرآیند توصیف مخزنی است. ماس، اولین بار واژه‌ی گونه‌های سنگی (Rock type) را برای توصیف طبقاتی از سنگ‌ها که توسط تفاوت در خصوصیات فیزیکی مشخص می‌شوند را به‌کار برد (Worthington et al. 2004, Worthington 2002).



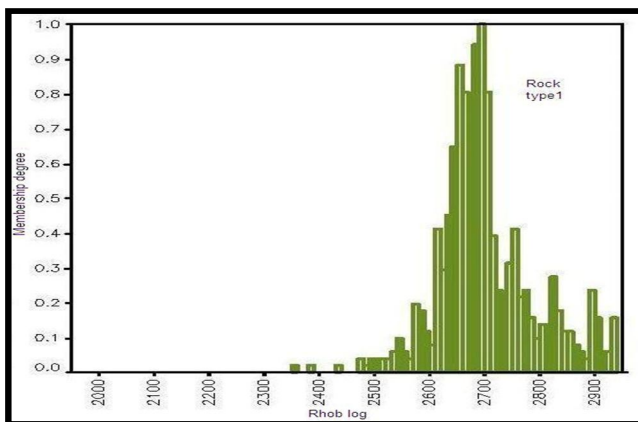
تصویر ۲- کراس پلات سه بعدی سه لاگ NPHI (محور x)، GR (محور y) و DT (محور z) گونه‌های سنگی با چهار رنگ مشخص شده‌اند همان‌طور که مشاهده می‌شود گونه‌های سنگی به‌طور کاملاً واضح قابل تفکیک نیستند و همپوشانی دیده می‌شود.



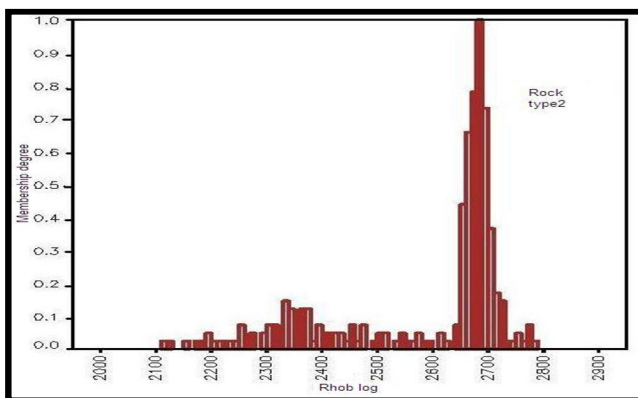
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

تصویر ۳ - تابع عضویت لاگ چگالی برای گونه‌ی سنگی ۱ تا ۴

اساسی‌ترین مبحث در تئوری فازی، بحث تابع عضویت و چگونگی تعریف آن است. برای تعیین تابع عضویت رسم نمودار توزیع فراوانی تعدادی از داده‌های شناخته شده ضروری است، هر یک از این نمودارها بایستی جهت تبدیل فراوانی به امکان (possibility) نرمالیز شوند تا بتوان تابع عضویت مناسب را به آن‌ها برازش نمود. در این مطالعه با توجه به توزیع داده‌های لاگ‌های پتروفیزیکی مخزن که بیشترین شباهت را به تابع گوسی دارد، این تابع اساس کار قرار گرفت. تصویر ۳ (الف-د) تابع عضویت‌های لاگ چگالی برای گونه‌های سنگی ۱ تا ۴ است. نمودار تابع توزیع نرمال به شکل یک منحنی زنگوله‌ای کاملاً متقارن است که با پارامترهای آماری میانگین (μ) که مقدار متناظر با حداکثر فراوانی است و انحراف معیار (σ) که نشان‌دهنده‌ی میزان پراکندگی داده‌هاست، مشخص می‌شود.

$$P(x) = \frac{e^{-(x-u)^2 / 2\sigma^2}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

در آن $P(x)$ احتمال برای وقوع رخداد x می‌باشد. σ انحراف معیار داده x و u میانگین داده x می‌باشد. مساحت زیر منحنی در فاصله‌ی x_1 و x_2 بیانگر احتمال وقوع متغیر x در آن بازه را نشان می‌دهد (تصویر ۴). خود منحنی به تنهایی احتمال نسبی وقوع متغیر x را نشان می‌دهد. در اینجا متغیر x داده‌های لاگ می‌باشد احتمال وقوع خود میانگین بیشتر از احتمال مقادیر x_1 و x_2 است.

منحنی توزیع نرمال برای تخمین امکان فازی نسبت دادن یک داده به یک قسمتی از مجموعه‌ی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر یک گونه-ی سنگی دارای تابع توزیع تخریل با میانگین u و انحراف معیار σ باشد در این صورت امکان فازی این که یک مقدار تخریل مانند x به رخساره‌ی فوق تعلق داشته باشد، از رابطه ۱ به دست می‌آید (Cuddy (1998). در صورتی که تنوع سنگ‌شناسی در یک مخزن زیاد باشد، یک میزان تخریل می‌تواند به هر یک از گونه‌های سنگی نسبت داده شود. اما امکان وابستگی آن به بعضی از گونه‌های سنگی نسبت به بقیه نزدیک‌تر است. هر نوع سنگ مثلاً R دارای میانگین و انحراف معیار مربوط به تخریل مربوط به خود است که با μ_R و σ_R مشخص می‌شوند. امکان فازی مقدار تخریل x موقعی که x برابر میانگین (μ) باشد به صورت زیر است:

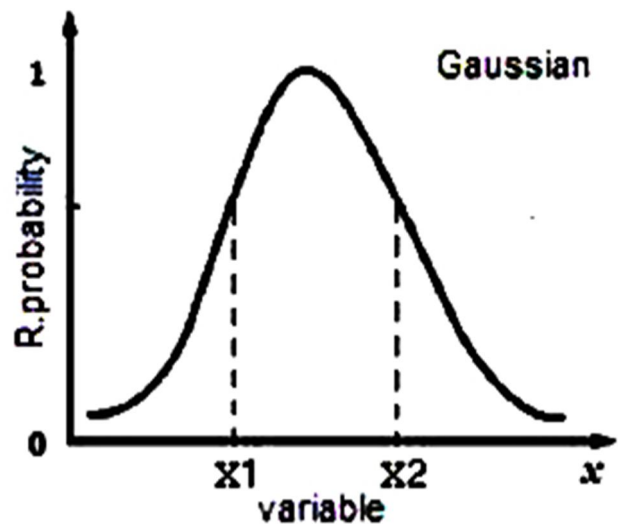
$$P(x) = \frac{e^{-(u-u)^2 / 2\sigma^2}}{\sigma \sqrt{2\pi}} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

حال برای این که امکان فازی نسبی مقدار تخریل x در یک گونه‌ی سنگی به امکان فازی میانگین تخریل کل جامعه به دست آید از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کنیم.

$$R(x_R) = e^{-(x-\mu_R)^2 / 2\sigma^2} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

گونه‌های سنگی انجام می‌شود. برای هر نقطه داده شده‌ی سنگی که بالاترین $\frac{1}{F(C_R)}$ را داشته باشد به‌عنوان گونه‌ی سنگی محتمل‌تر انتخاب می‌شود.

درصد تطابق گونه‌های سنگی واقعی و گونه‌ی سنگی تعیین شده توسط منطق فازی ۷۴ درصد بود. در شکل ۵ گونه‌های سنگی به‌دست آمده از منطق فازی در مقایسه با ۱۰۰ درصد گونه‌های سنگی واقعی نشان داده شده است. دلیل این‌که گونه‌ی ۱ در نتایج مشاهده نشد را می‌توان به تعداد نقاط کم (دو نقطه) نسبت داد. که این را می‌توان به اثرات مشابه لاگ‌های مطابق به این دو نقطه با لاگ‌های گونه‌ی سنگی ۲ تعبیر کرد. برای بررسی تأثیر لاگ‌های پتروفیزیکی بر روی تعیین گونه‌های سنگی، از طریق روش منطق فازی توسط روش آزمایش و خطا دست به حذف لاگ‌ها زده شد. این کار برای همه‌ی لاگ‌ها و همچنین و تخلخل انجام شد. نتایج کار این بود که داده‌های پتروفیزیکی به‌ترتیب اهمیت برای تعیین گونه‌های سنگی به‌ترتیب تخلخل، حجم شیل، لاگ‌های چگالی و صوتی است. در این مطالعه لاگ‌های (PEF) موجود نبود و از آن‌جا که این لاگ‌ها تحت اثر لیتولوژی هستند، لاگ‌های بسیار مفیدی برای تعیین لیتولوژی و همچنین گونه‌های سنگی هستند. به هر حال هدف به‌دست آوردن بهترین نتیجه از داده‌های موجود است.



تصویر ۴- تابع گوسی

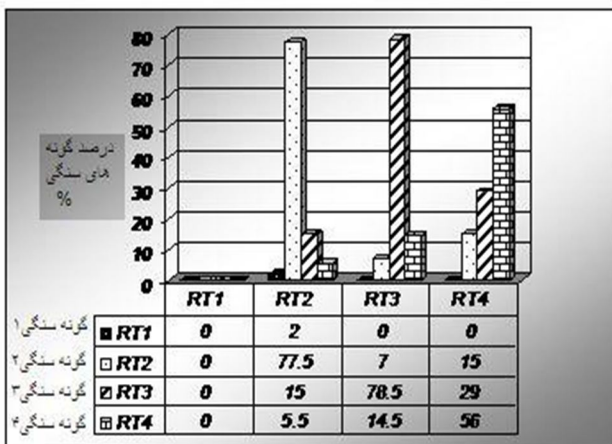
رابطه‌ی ۳ امکان فازی را به تنهایی به تمامی انواع سنگ‌ها نسبت می‌دهد. برای مقایسه‌ی این امکان‌های فازی بین انواع سنگ‌ها رخداد نسبی هر نوع سنگ در چاه باید به حساب آید. این عمل با ضرب رابطه‌ی ۳ در جذر رخداد مورد انتظار هر نوع سنگ در چاه (n_R) انجام می‌شود (Cuddy 1998). بنابراین امکان فازی مقدار تخلخل X در گونه‌های سنگ مختلف به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$F(x_R) = \sqrt{n_R} e^{-(x-\mu_R)^2 / 2\sigma^2_R} \quad (\text{رابطه ی ۴})$$

این امکان فازی را نیز می‌توان برای متغیرهای دیگر مثل چگالی، تخلخل، حجم شیل و غیره، به‌دست آورد. هیچ محدودیتی برای تعداد لاگ‌ها و متغیرها وجود ندارد. ولی گاهی تعداد زیاد لاگ نمی‌تواند تضمینی برای جواب بهتر باشد. پس بهتر است که مناسب‌ترین لاگ‌ها که رابطه‌ی بیشتری با پارامترهای تعیین‌کننده‌ی گونه‌های سنگی مثل تخلخل و ... دارند، انتخاب شوند. پس از آن‌که تعداد زیادی امکان فازی مربوط به پارامترهای مختلف به‌دست آمد، با ترکیب امکان‌های فازی مختلف با هم یک امکان فازی مرکب به‌دست می‌آید. ترکیب امکان‌های فازی می‌تواند به هر صورت انجام گیرد که بستگی به پارامترهای مورد استفاده و تجربیات منطقه‌ای دارد. در این‌جا امکان‌های فازی به‌صورت هارمونیک و رابطه‌ی ۵ (Cuddy 1998) با یکدیگر ترکیب شده‌اند. سنگی که بالاترین امکان فازی را داشته باشد به‌عنوان محتمل‌ترین گونه‌ی سنگی مشخص می‌شود.

$$\frac{1}{F(C_R)} = \frac{1}{F(X_R)} + \frac{1}{F(Y_R)} + \dots \quad (\text{رابطه ی ۵})$$

که در این فرمول $F(C_R)$ امکان فازی برای هر گونه‌ی سنگی مخزنی و $F(X_R)$ و $F(Y_R)$ امکان فازی هر یک از لاگ‌ها و داده‌های ورودی برای پیش‌بینی گونه‌های سنگی است. این عمل برای همه‌ی

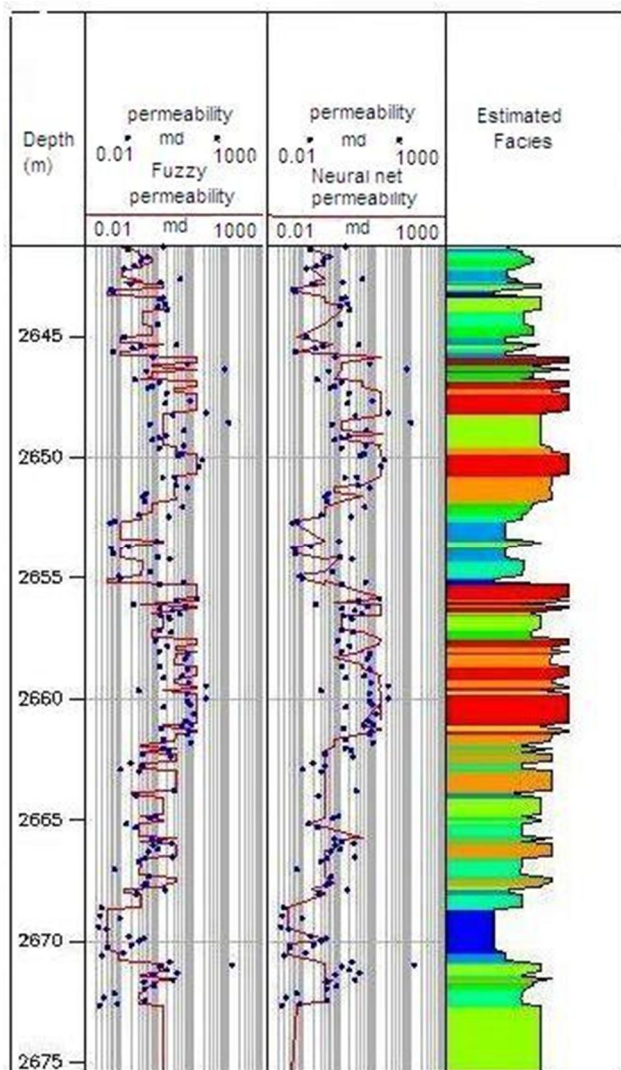


تصویر ۵- مقایسه‌ی درصد گونه‌های سنگی فازی تخمین زده شده در مقابل ۱۰۰ درصد گونه‌های سنگی واقعی

۲-۳- پیش‌بینی (رخساره‌های سنگی) (litho Facies) با استفاده از

منطق فازی

رخساره عبارت است از مجموعه خواص سنگ‌شناسی و فسیل‌شناسی یک واحد چینه‌ای که آن را از رخساره‌های دیگر متمایز می‌کند. در چاه مورد نظر تعداد ۷ رخساره تعیین شده است که نام رخساره و محیط رسوبی آن‌ها در جدول ۱ آمده است. گونه‌های



تصویر ۶- از سمت چپ به راست تراوایی تخمین زده شده توسط منطق فازی (ستون اول) و شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ستون دوم) در مقایسه با تراوایی مغزه و رخساره‌ی تخمین زده شده توسط منطق فازی از داده‌های تراوایی (ستون سوم).

می‌شوند. و امکان فازی هر یک جهت تخمین تراوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر قسمت دارای امکان فازی مختص به خود است. بالاترین امکان فازی به‌عنوان محتمل‌ترین قسمت نفوذ پذیری می‌باشد. نمودارهای پتروفیزیکی که در این بخش استفاده می‌شوند، شامل نمودارهای (GR, NPHI, DT, RHOB) و همچنین داده‌های حجم شیل و تخلخل است. داده‌های یک چاه برای ساخت مدل، وارد نرم افزار (Geolog) شد. داده‌های لاگ و تخلخل و حجم شیل به‌عنوان ورودی و داده‌های تراوایی مغزه به‌عنوان خروجی محسوب می‌شود. سپس برای تست کارایی مدل از چاه دومی استفاده شد. در این قسمت داده‌های لاگ‌ها به مدل وارد شد و داده‌های تراوایی به‌عنوان خروجی از مدل گرفته شد از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial neural networks) با الگوریتم پس انتشار خطا (Back

سنگی دارای یک یا چند تا از این رخساره‌ها است روش تخمین رخساره‌های سنگی از روش فازی شبیه به تخمین گونه‌های سنگی است. در آن به جای کدهای گونه‌ی سنگی از کد رخساره‌های مغزه استفاده می‌شده است. نتایج به‌دست آمده به این صورت است که از ۲۵۹ نقطه رخساره‌های سنگی واقعی حدود ۱۶۳ نقطه از روش منطق فازی به‌دست آمده با رخساره‌های واقعی مطابقت داشت. درصد تطابق ۶۴ درصد بود. در مرحله‌ی بعد به‌جای تخلخل به‌دست آمده از لاگ‌ها از تخلخل مغزه استفاده شد نتایج نشان داد که ۸۳ درصد نقاط با رخساره‌های اصلی مطابقت داشتند

جدول ۱- شماره، نام و محیط رسوبی رخساره‌های چاه

شماره	نام رخساره	محیط رسوبی
2	laminated fenestral mudstone	tidal flat
3	laminated stromatolite boundstone	upper intertidal
4	Bioturbated skeletal packstone to grainstone	Lagoon
5	medium grained peloidal ooid grainstone	oolithic shoal
6	coarse grained intraclastic skeletal grainstone	sea-ward shoal
7	fine grained skeletal peloidal grainstone	lee-ward shoal
10	laminated fossiliferous mudstone	open marine

۴-۴- تخمین تراوایی با استفاده از منطق فازی

جهت تخمین رخساره‌ها و گونه‌های سنگی با استفاده از منطق فازی برای هر گونه‌ی سنگی زیر مجموعه‌ی فازی در نظر گرفته می‌شود. مشکل این روش چگونگی ترکیب امکان فازی بین گونه‌های سنگ‌هاست، چرا که از همه‌ی سنگ‌ها به یک اندازه مغزه وجود ندارد. از این رو امکان فازی هر گونه سنگ می‌بایستی به کلّ جامعه نرمالیز می‌شد. در تخمین تراوایی این مشکل وجود ندارد چرا که زیر مجموعه‌های فازی با اندازه‌های یکسان در نظر گرفته می‌شود. برای تخمین تراوایی توسط منطق فازی ابتدا داده‌های تراوایی مغزه به ده قسمت (bin) مساوی یا بیشتر با مقیاس لگاریتمی تقسیم می‌شود. تعداد قسمت‌ها بستگی به تعداد داده‌های تراوایی مغزه‌ی در دسترس و محدوده‌ی آن‌ها دارد. سپس هر یک از این قسمت‌ها با نمودارهای پتروفیزیکی مطابق با آن مقایسه می‌شوند. با داشتن میانگین (u) و انحراف معیار (σ) داده‌های پتروفیزیکی هر قسمت امکان فازی این‌که یک نقطه می‌تواند در آن قسمت قرار گیرد از رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود. همان‌گونه که توضیح داده شد، نیازی به نرمالیز کردن توزیع نیست چرا که زیر مجموعه‌های فازی تراوایی با اندازه‌ی یکسان در نظر گرفته شده‌اند. امکان‌های فازی برای متغیرهای مختلف که داده‌های پتروفیزیکی هستند در هر قسمت توسط رابطه‌ی ۵ با هم ترکیب

Intelligence in the Petroleum Industry: Symbolic and Computational Applications II, Editions Technip, Vol. 2 (5): 125-138

Bois, P., 1984, "Fuzzy Seismic Interpretation", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-22(6): 692-697.

Cuddy, S. J., 1997, "The application of fuzzy logic to petrophysics", *38th Annual Logging Symposium of the Society of Professional Well Log Analysts, Houston, Texas*: 1-14.

Cuddy, S. J., 1998, "Litho-facies and permeability prediction from electrical logs using fuzzy logic", *SPE 49470, Presented at Eighth Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*.

Haro, C. F., 2009, "The Equations Archie Forgot: Anisotropy of the Rocks", *In SPE Annual Technical Conference and Exhibition*: 823-836.

Honarpour, M. M., Nagarajan, N. R. & Sampath, K., 2006, "Rock/Fluid Characterization and Their Integration-Implications on Reservoir Management", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 58 (9):120-130.

Nordlund, U., 1996, "Formalizing Geological Knowledge: With an Example of Modeling Stratigraphy using Fuzzy Logic", *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 66 (4): 689-698.

Pape, H., Arnold, J., Pechinig, R., Clauser, C., Talnishnikh, E., Anferova, S. & Blümich, B., 2009, "Permeability Prediction for Low Porosity Rocks by Mobile NMR", *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 166 (5):1125-1163.

Saggaf, M. M. & Nebrija, E. L., 2003, "A fuzzy approach for the estimation of facies from wireline logs", *American Association of Petroleum Bulletin*, Vol. 87: 1233-1240.

Silin, D. & Patzek, T., 2009, "Predicting Relative-Permeability Curves Directly From Rock Images", *In SPE Annual Technical Conference and Exhibition*: 4-7 October, New Orleans, Louisiana: SPE 124974.

Worthington, P. F., 2002, "AAPG Methods in Exploration No. 13, Chapter 7: Application of Saturation-height Functions in Integrated Reservoir Description", *AAPG, Special Volumes, Volume AAPG Methods in Exploration No. 13: Geological Applications of Well Logs*: 75 - 89.

Worthington, P. F., 2002, "Maximizing the Effectiveness of Integrated Reservoir Studies: Practical Approaches to Improving the Process and Results", *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 56 (1): 57-62.

propagation neural network) نیز برای مقایسه با روش منطق فازی برای پیش‌بینی تراوایی بهره‌جسته شده است (تصویر ۶). ضریب همبستگی بین تراوایی مغزه و... تراوایی به‌دست آمده از روش منطق فازی برای چاه دوم، در صورتی که تعداد قسمت‌ها ۱۶ عدد باشد، ۰/۸۹۲ است. این مقدار برای شبکه‌های عصبی مصنوعی ۰/۸۵۲ می‌باشد.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پیش‌بینی گونه‌های سنگی، رخساره‌های سنگی و تراوایی با استفاده از روش منطق فازی و با استفاده از امکان فازی از روی لاگ‌های پتروفیزیکی موفق بوده است. روش شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز در تخمین تراوایی خوب عمل کرده است. برای حصول نتایج بهتر در روش منطق فازی موارد زیر توصیه می‌شود:

- ۱- استفاده از لاگ‌های مخزنی مفید در تعیین گونه‌های سنگی مانند لاگ (PEF) و لاگ‌های مقاومت در تعیین تراوایی
- ۲- لزوم تعیین توابع عضویت مناسب‌تر برای داده‌ها. در صورت تعیین توابع عضویت مناسب برای داده‌ها، روش‌هایی مثل شبکه‌های عصبی مصنوعی کارایی بهتری در حل مسائل زمین‌شناسی دارند.

تشکر و قدردانی

از واحد زمین‌شناسی نفت پژوهشگاه صنعت نفت که داده‌های این مطالعه را در اختیار قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

Aitken, Carolyn M., Jones, D. M. & Larter, S. R., 2004, "Anaerobic hydrocarbon biodegradation in deep subsurface oil reservoirs", *Nature*, Vol. 431: 291-294.

Aminzadeh, F. & Brouwer, F., 2006, "Integrating neural networks and fuzzy logic for improved reservoir property prediction and prospect ranking", *76th SEG Annual Meeting, New Orleans*: 1752-1756.

Bagheri, A. M., Rezazadeh, S., Beiranvand, B. & Bakhtiari, H., 2005, "Integrated analysis of core and log data to Determine reservoir rock types and extrapolation to uncored wells in a heterogeneous clastic and carbonate reservoir", *13th Core Analysis Association (SCA), Canada*, SCA2005-42.

Baygun, B., Luthi, S. M., & Bryant, I. D., 1996, "Applications of neural networks and fuzzy logic in geological modeling of a mature hydrocarbon reservoir", *In: Braunschweig, B. & Bremdal, B. (eds.), "Artificial*

Zadeh, L. A., 1965, "Fuzzy sets", *Information and Control*, Vol. 8: 338-353.