

پیش‌بینی سرعت موج برشی از نگارهای تخلخل به وسیله روش‌های منطق فازی و عصبی - فازی در یکی از مخازن کربناتی جنوب ایران

مجتبی رجبی^۱، بهمن بهلولی^۱، مجید محمدی نیا^۲ و اسماعیل غلامپور آهنگر^۳

^۱دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، تهران، تهران

^۳شرکت مهندسی و توسعه نفت (متن)، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۸/۰۹/۲۸

چکیده

سرعت امواج برشی و تراکمی دارای کاربردهای متعددی در مطالعات پتروفیزیکی، ژئوفیزیکی و ژئومکانیکی مخازن نفتی می‌باشند. سرعت امواج تراکمی توسط ابزار صوتی که در تمامی چاه‌های نفت و گاز رانده می‌شود قابل محاسبه است ولی داده‌های مربوط به سرعت امواج برشی در تمامی چاه‌ها بویژه چاه‌های قدیمی وجود ندارد. در این مطالعه با استفاده از نگارهای تخلخل (نوترون، صوتی، چگالی)، سرعت موج برشی به کمک روش‌های منطق فازی و عصبی - فازی در یک مخزن کربناتی برآورد شد. بانک اطلاعاتی در این مطالعه شامل ۲۰۴۶ نقطه اطلاعاتی برای ساخت سامانه‌های فازی و عصبی - فازی (داده‌های چاه مدل) و ۱۸۶۴ نقطه (از چاه آزمون) برای آزمون مدل‌ها است که وابسته به مخزن کربناتی سروک در یکی از میادین نفتی جنوب ایران هستند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که روش‌های به کار رفته در برآورد سرعت موج برشی در این مخزن کربناتی موفقیت‌آمیز بوده است و در صورتی که داده‌های سه نگار تخلخل کافی باشد، استفاده از این روش‌ها برای برآورد سرعت موج برشی در چاه‌های فاقد این پارامتر (در این منطقه) پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: سازند سروک، سرعت موج برشی، نگارهای تخلخل، مخازن کربناتی، منطق فازی، عصبی - فازی

*نویسنده مسئول: مجتبی رجبی

E-mail: rajabi@Khayam.ut.ac.ir

۱- مقدمه

برای توسعه و ارزیابی میادین نفت و گاز، داشتن اطلاعات کافی در مورد مخازن امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است. از پارامترهای ضروری برای توصیف مخازن هیدروکربوری، سرعت موج برشی است که محاسبه آن به‌صورت مستقیم (اندازه‌گیری در آزمایشگاه از روی مغزه یا اندازه‌گیری به کمک ابزار Dipole Shear Sonic Imager) DSI بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. تاکنون روابط تجربی فراوانی در مورد محاسبه سرعت امواج برشی ارائه شده است اما در بیشتر موارد، نتایج به‌دست آمده از این روابط در مناطق مختلف به دلایل زیر مطلوب نیست:

۱- پارامترهای متعددی بر روی سرعت موج برشی تأثیر می‌گذارند که تمامی این پارامترها در روابط تجربی گنجانده نمی‌شوند، ۲- روابط یادشده مربوط به یک منطقه یا سنگ مخزن خاص (با سنگ‌شناسی و سیال خاص) است و استفاده از این روابط در مناطق دیگر به دلیل این که ویژگی‌های سنگ و سیال تغییر می‌کند پاسخ خوبی نمی‌دهد و ۳- بیشتر مطالعات انجام گرفته برای محاسبه و برآورد سرعت موج برشی در مورد ماسه‌سنگ‌ها بوده و در مورد سنگ‌های کربناتی مطالعات اندکی صورت گرفته است. ابزار DSI از جمله ابزارهای جدیدی است که به‌طور مستقیم سرعت موج برشی را اندازه‌گیری می‌کند، اما داده‌های این ابزار در تمام چاه‌ها بویژه چاه‌های قدیمی موجود نیست. بنابراین تلاش پژوهشگران بر این است که بتوانند این گونه پارامترها را از روش‌های دیگر و با دقت مورد قبول برآورد کنند. نکته مهم این که روش‌های مورد استفاده در برآورد این پارامترها اولاً باید دارای صرفه اقتصادی باشند و ثانیاً به گونه‌ای باشد که نیاز به اطلاعات جدیدی نداشته باشند. اطلاعات نگارهای چاه‌پیمایی در بیشتر چاه‌ها موجود است که از جمله این نگارها می‌توان به نگارهای تخلخل اشاره کرد. یکی از محاسن این نگارها نسبت به اطلاعات دیگر این است که در بیشتر موارد به طور پیوسته در تمامی طول چاه ثبت می‌شود (Lim, 2005). بنابراین همواره سعی پژوهشگران بر این بوده که بتوانند این اطلاعات را با روش‌های دیگر ادغام کرده تا بتوانند اطلاعات جدیدی با صرف کمترین هزینه به‌دست آورند.

به‌تازگی مطالعات گسترده‌ای در مورد کاربرد منطق فازی و عصبی - فازی در مورد برآورد پارامترهای پتروفیزیکی، تعیین سنگ‌شناسی و غیره انجام شده است (Cuddy, 1998; Mohaghegh, 2000; Finol et al., 2001; Kamali et al., 2004; Lim, 2005; Rezaee et al., 2006&2008).

۲- امواج برشی و تراکمی

به طور کلی، امواج برشی و تراکمی تحت عنوان امواج پیکری یا حجمی معرفی می‌شوند. رابطه بین سرعت موج تراکمی و برشی با چگالی و ضرایب الاستیکی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Vp = \left[\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right]^{0.5} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$Vs = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{0.5} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که، Vp : سرعت موج تراکمی، Vs : سرعت موج برشی، ρ : چگالی سنگ، μ : مدول سختی λ : ثابت لامه است.

سرعت امواج صوتی در توده سنگ به چندین متغیر بستگی دارد که از آن جمله می‌توان به تخلخل، سنگ‌شناسی، درجه سیمان‌شدگی، ژرفای تدفین، سن، میزان فشار روباره و محتوی سیال‌ها اشاره کرد (Sheriff & Geldart, 1995). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های موج برشی این است که از سیال‌ها عبور نمی‌کند بنابراین در توصیف ویژگی‌های مخزن نقش عمده‌ای دارد. برخی از کاربردهای مهم امواج برشی در مخزن عبارتند از:

۱- تشخیص سنگ‌شناسی: براساس مطالعات (Pickett, 1963; Tatham, 1982; Domenico, 1984; Castagna et al., 1985 & Ikwaokor, 1988)، "نسبت سرعت موج تراکمی به برشی" (Vp/Vs) برای سنگ‌شناسی‌های مختلف میزان مشخصی است (جدول ۱)، ۲- تشخیص نوع سیال سازندی (Hamada, 2004)، ۳- مطالعات ژئوفیزیکی مانند تغییر دامنه با دور افت (AVO) و ۴- تعیین پارامترهای مکانیک سنگ (Ameen et al., 2009).

۳- رابطه تخلخل و سرعت امواج صوتی

به‌طور کلی، هر چقدر تخلخل افزایش یابد، در صورت ثابت بودن بقیه پارامترها، سرعت صوت کاهش می‌یابد (Norouzi, 2006). تخلخل سنگ می‌تواند از نگارهای صوتی، چگالی و نوترون محاسبه شود. از آنجایی که پاسخ این ابزارها به تخلخل، سیال و سنگ‌شناسی سازند است، با دانستن نوع سیال و سنگ‌شناسی، محاسبه تخلخل امکان‌پذیر است، به همین دلیل به این سه نگار، نگارهای تخلخل گفته می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، پارامترهای متعددی بر روی سرعت امواج تأثیر می‌گذارند. در سنگ‌های آواری (مانند ماسه‌سنگ‌ها) از کانی‌شناسی به عنوان عاملی مهم در سرعت امواج یاد می‌شود (Eberli et al., 2003). چرا که این دسته از سنگ‌ها، کانی‌شناسی متنوعی دارند. اما در مورد کربنات‌ها وضعیت با سنگ‌های آواری متفاوت است، با وجود این که کانی‌شناسی سنگ‌های کربناتی (کلسیت، دولومیت و آراگونیت) نسبت به سنگ‌های آواری محدودتر است اما سنگ‌های کربناتی خالص دارای محدوده گسترده‌ای از سرعت امواج هستند (سرعت امواج تراکمی در کربنات‌ها بین ۱۷۰۰ تا ۶۶۰۰ متر بر ثانیه، و سرعت امواج برشی در کربنات‌ها بین ۶۰۰ تا ۳۵۰۰ متر بر ثانیه است). پس می‌توان عنوان کرد که در سنگ‌های کربناتی نوع کانی‌ها نقش کم‌رنگی در کنترل سرعت امواج دارند. این نکته توسط Anselmetti and Ebreli (1993) به این صورت بیان شده است که تغییرات سرعت امواج صوتی در کربنات‌ها به‌طور عمده به وسیله نوع و میزان تخلخل کنترل می‌شود. Vanorio et al. (2008) طی مطالعات انجام شده بر روی چهار سازند کربناتی، رابطه بین تخلخل و سرعت امواج برشی و تراکمی را به صورت شکل ۱ نشان دادند. همان‌طور که در شکل مشخص است با افزایش تخلخل، از میزان سرعت امواج کاسته می‌شود.

۴- تئوری روش‌های مورد استفاده

۴-۱- منطق فازی

منطق فازی توسط لطفی‌زاده (۱۹۶۵) با مقاله‌ای با عنوان "سیستم‌های فازی (fuzzy sets)" به صورت رسمی معرفی شد (Zadeh, 1965). در اوایل دهه ۶۰ لطفی‌زاده بیان کرد که تئوری کلاسیک بیش از حد بر روی دقت تأکید داشته و از این جهت با سامانه‌های پیچیده و دنیای واقعی چندان سازگاری ندارد. منطق کلاسیک، هر چیزی را بر اساس یک سامانه دوتایی نشان می‌دهد (درست یا غلط، صفر یا یک) اما در منطق فازی، هر چیزی را با یک عدد که مقدار آن بین صفر و یک است نشان می‌دهند، به عبارت دیگر در مجموعه‌های فازی درستی یا نادرستی هر چیزی با درجه عضویت نشان داده می‌شود. اگرچه از نخستین روز تولد اندیشه فازی، در حدود چهل و پنج سال می‌گذرد، ولی در این مدت، نظریه فازی چارچوب فکری و علمی جدیدی را در محافل آکادمیک و مهندسی معرفی کرده است. عدم قطعیت و ابهام موجود در داده‌های زمین‌شناسی، محققان علوم زمین را بر آن داشته که در مسائل خود از منطق فازی استفاده کنند.

– **سامانه‌های استنتاج فازی:** استنتاج فازی، فرایند فرموله کردن نگاهت ورودی داده شده به یک خروجی با استفاده از منطق فازی است. پس از آن، نگاهت یک مینا از این که تصمیم ما چه می‌تواند باشد یا این که الگوی تصمیم‌گیری چه باشد برای ما فراهم می‌کند. دو نوع سامانه استنتاج فازی پرکاربرد وجود دارد: ۱- نوع Mamdani and Assilian (1975) و ۲- نوع Sugeno (1985). این دو نوع سامانه در بسیاری موارد شبیه هم هستند ولی مهم‌ترین تفاوت آنها در خروجی آنهاست، به‌طوری که در سامانه مددانی، خروجی به صورت یک مجموعه فازی است که باید دِفازی (defuzzify) شود ولی در سامانه سوگنو خروجی به صورت خطی یا ثابت است، ضمن این که در سامانه سوگنو توابع عضویت بر اساس فرایند دسته‌بندی فازی، دسته‌بندی می‌شوند (MATLAB user's guide, 2006). برای شروع کار با یک

سامانه استنتاج فازی مهم‌ترین بخش انتخاب سامانه مورد استفاده و سپس تعریف تابع عضویت (membership function) برای مجموعه داده‌های ورودی و خروجی است. به وسیله این توابع عضویت، باید مجموعه قوانین "اگر-آنگاه" را برای ایجاد رابطه‌ای منطقی بین ورودی و خروجی، توسط فرایند دسته‌بندی تعریف کرد.

– **دسته‌بندی (Clustering):** فرایند دسته‌بندی سعی دارد که یک مجموعه داده را به چندین دسته تقسیم کند، به طوری که داده‌های قرار گرفته در یک دسته با یکدیگر شبیه بوده و با داده‌های دسته‌های دیگر متفاوت باشند. یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در منطق فازی، اعمال دسته‌بندی به منظور تعریف توابع عضویت و به‌طور حتم تعداد قوانین اگر-آنگاه است. پس از دسته‌بندی اطلاعات، می‌توان به بهترین روش و با کم‌ترین تعداد قوانین، رفتار داده‌ها را مدل کرد. نکته مهم در تعداد قوانین اگر-آنگاه این است که تعداد کم قوانین نمی‌تواند تمام مسئله را پوشش دهد و تعداد زیاد قوانین نیز باعث پیچیده شدن رفتار سامانه و در نتیجه باعث کارایی ضعیف سامانه می‌شود. بنابراین یافتن تعداد بهینه قوانین یکی از مهم‌ترین نکات منطق فازی است.

انواع مختلفی از روش‌های دسته‌بندی وجود دارد. دسته‌بندی تفریقی (Subtractive clustering) که در سال ۱۹۹۴ معرفی شد (Chiu, 1994)، از جمله روش‌هایی است که در منطق فازی کاربرد دارد. در این روش فرض بر این است که هر داده به‌عنوان یک مرکز دسته‌بندی مورد بررسی قرار می‌گیرند (Delmirlı & Muthukumar, 2000). در روش دسته‌بندی تفریقی هر چه شعاع دسته‌بندی کوچک‌تر باشد، تعداد دسته‌ها و به‌طور حتم تعداد قوانین بیشتر است و برعکس. از مزیت‌های روش تفریقی این است که در مواردی که دید مشخصی در مورد تعداد دسته‌ها نیست، قابل استفاده است (MATLAB user's guide, 2006).

۴-۲- عصبی-فازی

تلفیق منطق فازی و شبکه‌های عصبی منجر به ایجاد سامانه عصبی-فازی می‌شود که دارای مزیت‌های هر دو سامانه فازی و شبکه عصبی است (Jang et al., 1997). به عبارت دیگر یک سامانه عصبی-فازی یک سامانه فازی است که برای تعیین پارامترهای خود (مجموعه‌ها و قوانین فازی) از نمونه آموزشی پردازش شده از الگوریتم آموزش که به وسیله تئوری شبکه عصبی مشتق شده و با الهام گرفته شده، استفاده می‌کند. عملکرد شبکه‌های عصبی، به‌طور مستقیم با تعداد و کمیت داده‌های آموزشی در ارتباط است (Kosko, 1992)، بنابراین زمانی که تعداد داده‌های آموزشی کم باشد، نتایج شبکه‌های عصبی چندان قابل اعتماد نیست. در چنین مواردی ترکیب شبکه‌های عصبی و منطق فازی باعث بهبود عملکرد سامانه شبکه عصبی و نتایج قابل قبول می‌شود (Nava and Taylor, 1996). سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System or ANFIS) که توسط Jang (1993) معرفی شد، یک سامانه استنتاج فازی است که پارامترهای تابع عضویت آن به روش پس-انتشار (backpropagation) به تنهایی و یا همراه با روش کمترین مربعات (least squares) تعدیل می‌شود (MATLAB user's guide, 2006).

۵- برآورد سرعت موج برشی

داده‌های مورد استفاده برای انجام این مطالعه مربوط به مخزن کربناتی سروک (سنومانین-ترونین) در جنوب ایران است. سازند سروک در این میدان با ستبرایی در حدود ۶۰۰ متر و به‌صورت تقریباً تمیز (میزان کم شیل) و ستبرای زیادی از آهک‌های قهوه‌ای و کرم رنگ بوده که به‌صورت هم‌شیب بر روی سازند کژدمی و در زیر سازند ایلام قرار گرفته است. در این میدان نگارهای پتروفیزیکی به‌صورت کامل برداشت شده‌اند که در این مطالعه، از نگارهای تخلخل و سرعت موج برشی (حاصل از ابزار DSI) استفاده شده است. برای ساخت مدل‌ها، در ابتدا بر روی داده‌های مورد

دارای بیش از یک بخش باشد، عملگرهای فازی به کار گرفته می‌شود تا یک عدد که نمایانگر حاصل مقدمه بر آن قانون است به دست آورده شود. سپس این عدد در تابع خروجی به کار گرفته می‌شود.

– **اجتماع تمام خروجی‌ها:** روشی است که به وسیله آن تمام مجموعه‌های خروجی هر قانون را به یک مجموعه فازی واحد ترکیب می‌کند.

– **دافازی کردن:** ورودی این مرحله نتیجه خروجی مرحله قبل (اجتماع خروجی‌ها) است که به صورت مجموعه فازی است، در حالی که خروجی نهایی مورد علاقه برای هر متغیر، تنها یک عدد است. پس وظیفه این مرحله تبدیل مجموعه فازی به یک عدد است. در این مطالعه از روش weighted average استفاده شده است.

نتیجه این مدل در شکل ۵- الف نشان داده شده است، همچنین نمودار مقایسه‌ای سرعت موج برشی واقعی و پیش‌بینی شده در چاه آزمون توسط منطق فازی در شکل ۸- الف نشان داده شده است. چنان‌که دیده می‌شود ارتباط بسیار خوبی ($R^2=0.95$) بین داده‌های پیش‌بینی شده با داده‌های واقعی وجود دارد که نشان‌دهنده کارایی مدل ساخته شده برای میدان مورد نظر است.

۵-۲. برآورد سرعت موج برشی با استفاده از روش عصبی - فازی

در روش عصبی - فازی از "سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی" استفاده شد. چهار تابع عضویت گوسی به وسیله روش بخش‌بندی شبکه‌ای (grid partitioning) برای هر ورودی استخراج شد و پارامترهای بهینه آنها توسط شبکه عصبی با الگوریتم هیبرید (ترکیبی از پس انتشار خطا و کمترین مربعات least squares and backpropagation) محاسبه شد. سامانه ساخته شده شامل پنج لایه، ۱۵۸ گره و ۶۴ قانون اگر-آنگاه است که با عملگر OR یا یکدیگر ارتباط داده شده‌اند (شکل ۶). پس از ۲۱ دوره آموزشی، خطای مدل به مقدار کمینه خود رسید (۰/۰۲۱۵) (شکل ۷). پس از آموزش سامانه عصبی - فازی، از داده‌های چاه آزمون به منظور برآورد سرعت موج برشی استفاده شد، ضریب رگرسیونی و میزان مربعات خطا، بین سرعت موج برشی واقعی و سرعت پیش‌بینی شده به ترتیب برابر ۰/۹۳ و ۰/۰۸۲۱ است (شکل ۵-ب). نمودار مقایسه‌ای سرعت موج برشی واقعی و پیش‌بینی شده در شکل ۸- ب نشان داده شده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از روش‌های منطق فازی و عصبی - فازی، سرعت موج برشی در یکی از مخازن کربناتی جنوب ایران برآورد شد. روش‌های به کار رفته بسیار کم‌هزینه، سریع و دقیق است. برخلاف پیچیدگی دیاژنتیکی کربنات‌ها و این‌که پیش‌بینی در مورد این گروه از سنگ‌ها همواره مشکل است، نتایج به دست آمده قابل قبول است. ضریب رگرسیونی سرعت موج برشی برآورد شده در مورد داده‌های آزمون به کمک منطق فازی و روش عصبی - فازی به ترتیب برابر با ۰/۹۳ و ۰/۰۹۳۹ است، در حالی‌که میزان خطای (MSE) این روش‌ها (در چاه آزمون) به ترتیب ۰/۰۸۲۱ و ۰/۰۰۹۳۹ است. بدین ترتیب استفاده از این روش‌ها برای برآورد سرعت موج برشی در چاه‌های فاقد این نگار در این منطقه پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

از امور پژوهش و توسعه شرکت مهندسی و توسعه نفت تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از اساتید محترمی که داوری این مقاله را متحمل شده و نکات ارزشمندی را یادآور شدند صمیمانه تشکر و سپاسگزاری می‌شود.

نظر تصحیحات لازم (حذف نقاط ریزشی در چاه و تصحیحات محیطی) صورت گرفت و سپس داده‌های تصحیح شده به منظور برآورد سرعت موج برشی به وسیله روش‌های منطق فازی و عصبی - فازی وارد محیط نرم‌افزار مت‌لب (MATLAB) شدند.

۵-۱. برآورد سرعت موج برشی با استفاده از روش منطق فازی

در این مطالعه با استفاده از سامانه استنتاج فازی نوع سوگنو سرعت موج برشی برآورد شد. در ابتدا بانک اطلاعاتی مجموعه داده‌ها که شامل ۳۹۱۰ داده اطلاعات از سازند سروک بودند به دو بخش، داده‌های مدل به تعداد ۲۰۴۶ و داده‌های آزمون به تعداد ۱۸۶۴ تقسیم شدند و از داده‌های مدل، ورودی‌ها به منظور ساختن سامانه استنتاج فازی، مشخص شدند. داده‌های ورودی شامل نگارهای نوترون (NPHI)، چگالی (RHOB) و سرعت موج تراکمی (Vp) هستند که در شکل ۲ ارتباط بین این داده‌ها و سرعت موج برشی نشان داده شده است. پس از مشخص شدن داده‌های ورودی و خروجی باید توابع عضویت‌ها تعریف شوند. پیش از تعریف توابع عضویت، تمامی داده‌ها با استفاده از روش دسته‌بندی تفریقی دسته‌بندی شدند. دلیل استفاده از دسته‌بندی تفریقی در این مطالعه این است که هیچ ایده‌ای از تعداد دسته‌ها وجود نداشت.

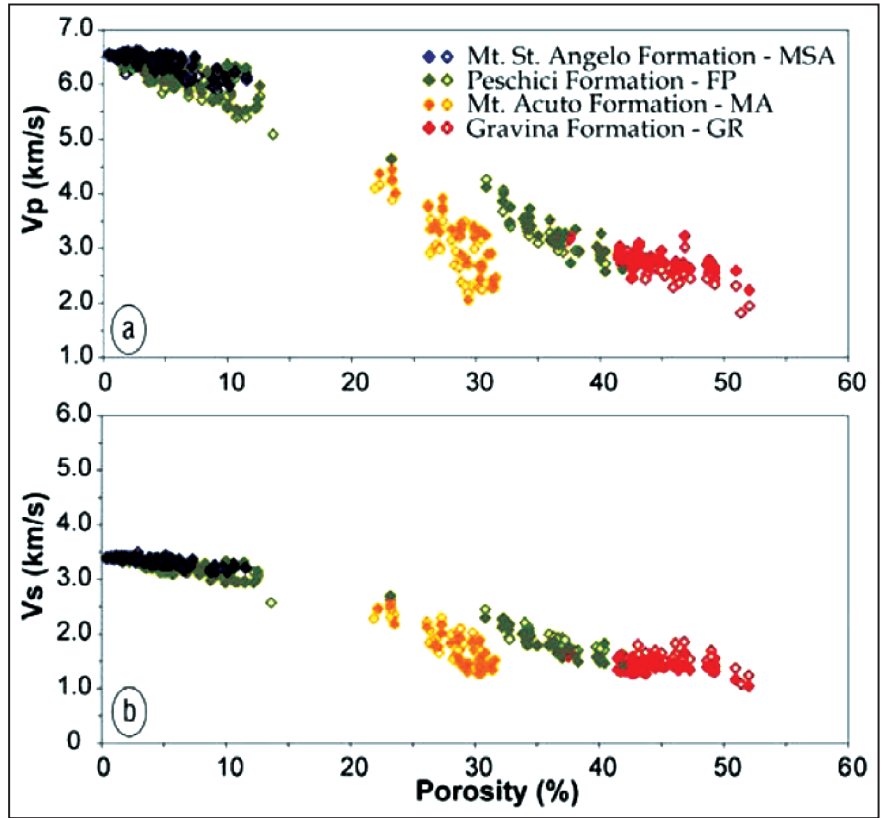
برای مشخص کردن تعداد بهینه قوانین و توابع عضویت، ۱۸ مدل فازی بر اساس شعاع دسته‌بندی متفاوت، ساخته شد و برای یافتن کاراترین مدل، تمامی مدل‌ها با داده‌های چاه آزمون (چاهی که اطلاعات آن فقط به منظور آزمون مدل‌ها است) مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که سرعت موج برشی توسط تمام مدل‌ها (در مورد داده‌های آزمون) برآورد شد، سپس برای مشخص شدن کاراترین مدل، نتایج مدل‌ها با داده‌های واقعی مقایسه و میانگین مربعات خطا (Mean Squared Error or MSE) برای هر مدل محاسبه شد (جدول ۲). بهترین سامانه، سامانه‌ای است که کمترین MSE را داشته باشد (مدل شماره ۵ با کم‌ترین MSE (۰/۰۹۳۹)). در ادامه، ویژگی‌های بهترین مدل (مدل شماره ۵) که کمترین میزان خطا را داشته و به عنوان مدل فازی برآورد کننده سرعت موج برشی در این مخزن معرفی شده است آورده می‌شود.

در این مدل ابتدا داده‌های دسته‌بندی شده (داده‌های ورودی و خروجی یا داده‌های مدل) با استفاده از تابع عضویت نوع گوسی با کلماتی مثل خیلی کم، کم، متوسط و زیاد تعریف شدند (شکل ۳). بعد از این مرحله نوبت به تعریف کردن قوانین اگر-آنگاه و انتخاب عملگرهای فازی می‌رسد. قوانین اگر-آنگاه که شامل چهار قانون می‌شود بعد از دسته‌بندی به شرح زیر مشخص شد:

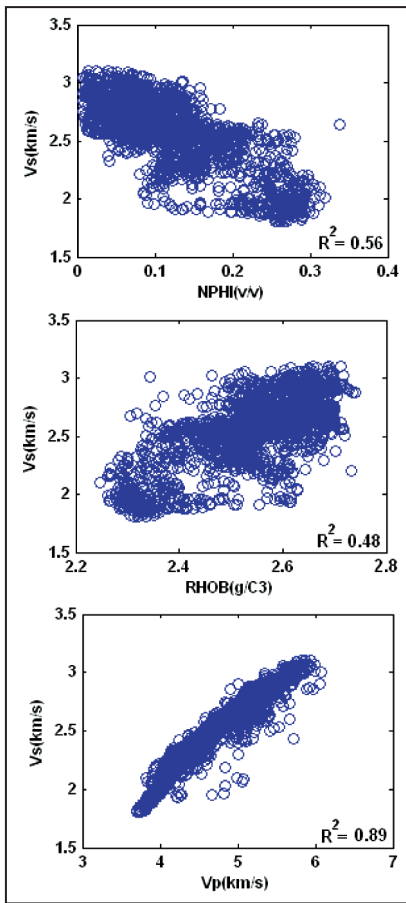
- اگر (سرعت موج تراکمی متوسط)، یا (میزان چگالی متوسط)، یا (میزان تخلخل نوترون کم) باشد، آنگاه (سرعت موج برشی متوسط) است.
- اگر (سرعت موج تراکمی کم)، یا (میزان چگالی کم)، یا (میزان تخلخل نوترون متوسط) باشد، آنگاه (سرعت موج برشی کم) است.
- اگر (سرعت موج تراکمی زیاد)، یا (میزان چگالی زیاد)، یا (میزان تخلخل نوترون خیلی کم) باشد، آنگاه (سرعت موج برشی زیاد) است.
- اگر (سرعت موج تراکمی خیلی کم)، یا (میزان چگالی خیلی کم)، یا (میزان تخلخل نوترون زیاد) باشد، آنگاه (سرعت موج برشی خیلی کم) است.

در نهایت و پس از ساختن سامانه استنتاج فازی (شکل ۴) مراحل زیر و به ترتیب برای داده‌های آزمون به منظور دستیابی به خروجی انجام می‌شود:

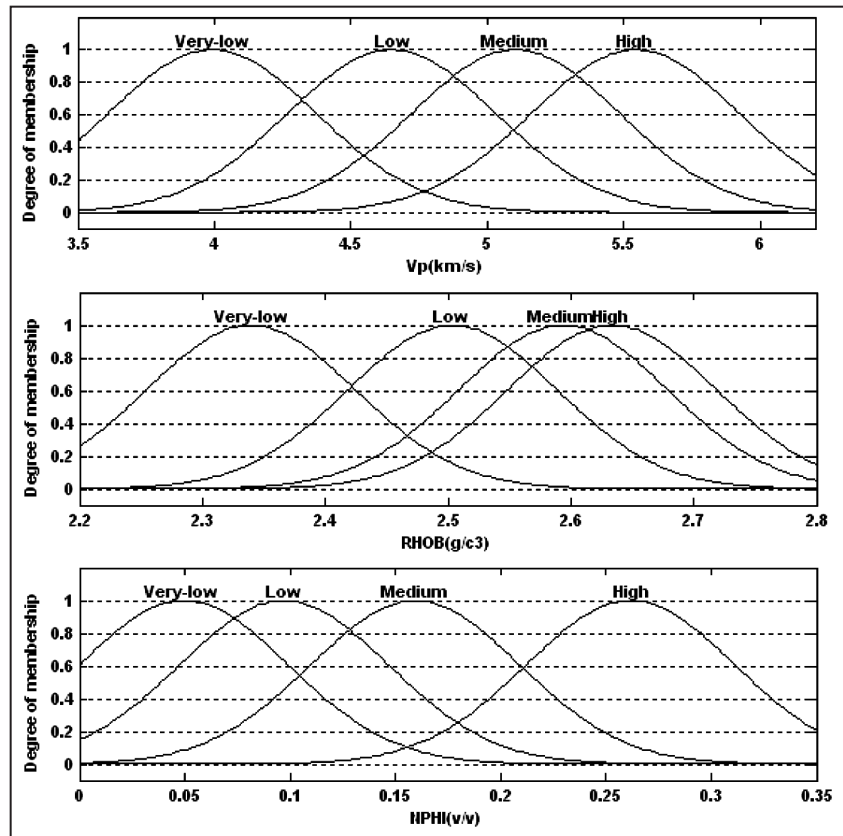
- **فازی‌سازی ورودی‌ها:** در این مرحله، ورودی‌ها توسط توابع عضویت مربوط به مجموعه فازی مناسب، فازی می‌شوند.
- **اعمال عملگرهای فازی و روش دلالت:** در صورتی که مقدمه قوانین اگر-آنگاه،



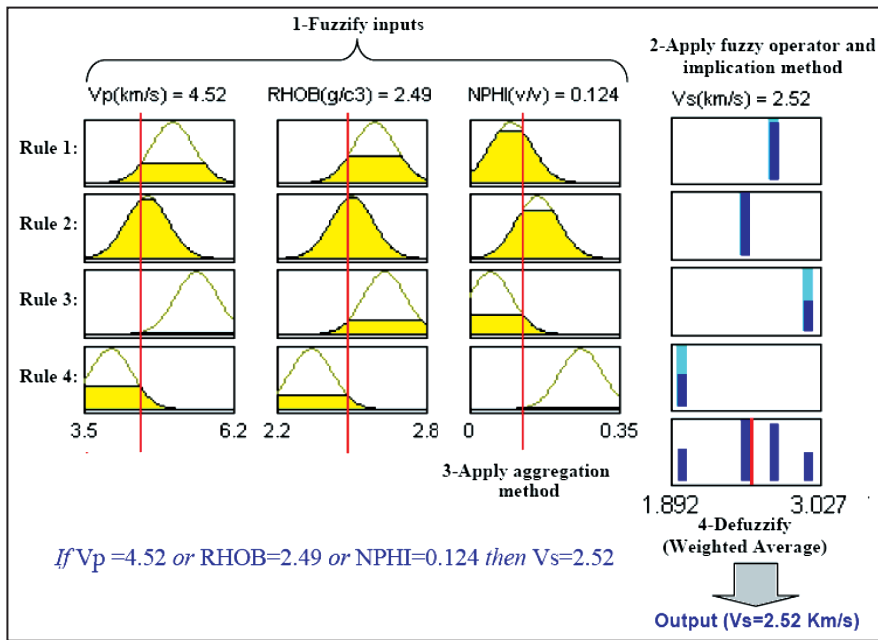
شکل ۱- رابطه بین سرعت امواج تراکمی (a) و برشی (b) با تخلخل در چهار سازند کربناتی ایتالیا. همان‌طور که مشخص است در تمام نمونه‌ها با افزایش تخلخل، سرعت امواج کاهش می‌یابد (Vanorio et al., 2008).



شکل ۲- ارتباط بین نگارهای تخلخل و سرعت موج برشی.

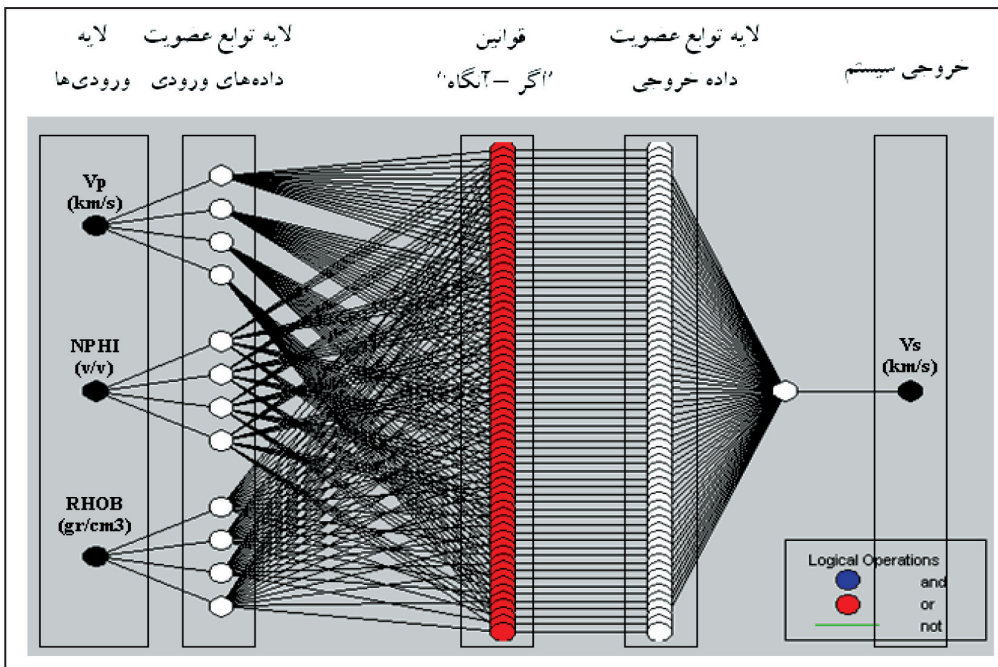
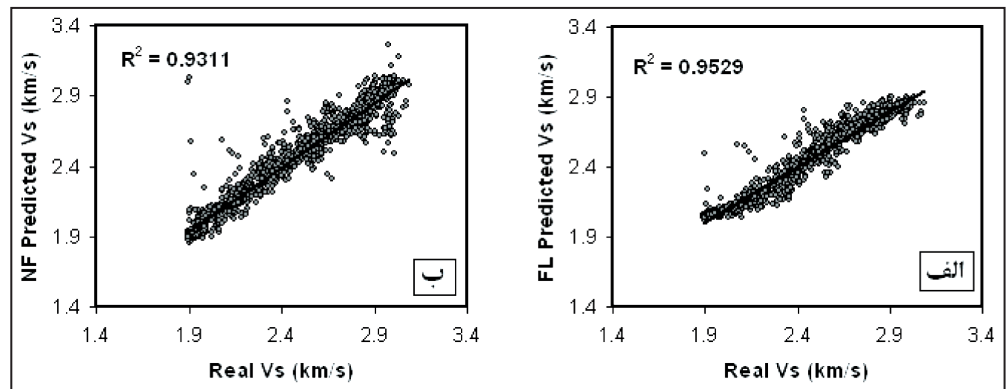


شکل ۳- توابع عضویت به‌دست آمده برای داده‌های ورودی با استفاده از دسته‌بندی تفریقی (با شعاع ۰/۳۵).

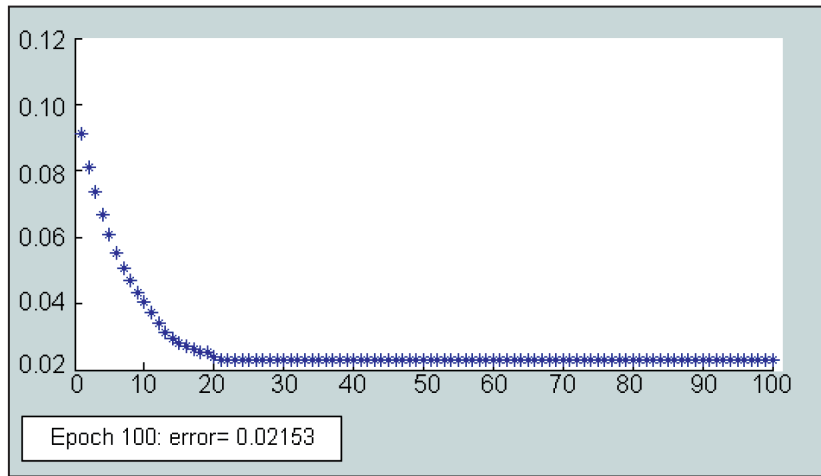


شکل ۴- طرح نمادین از سامانه استنتاج فازی سوگنو به کار رفته در این مطالعه.

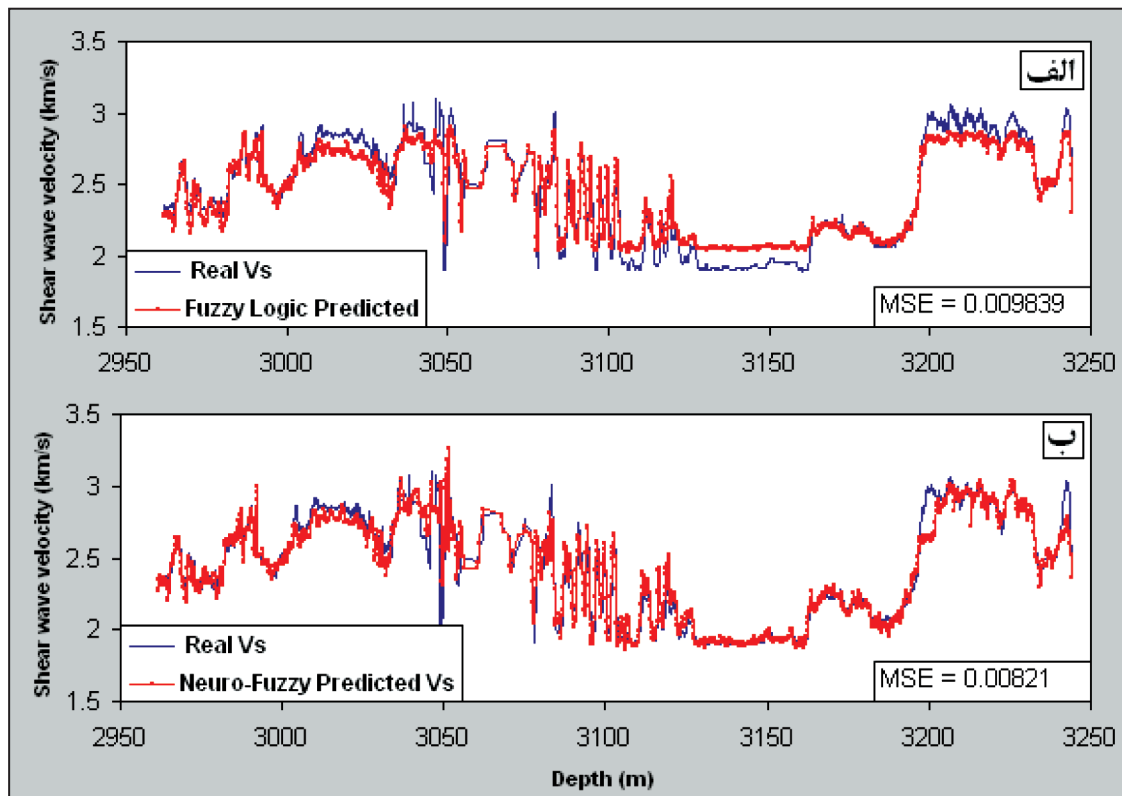
شکل ۵- کراس پلات و ضریب رگرسیونی بین سرعت موج برشی پیش‌بینی شده حاصل از مدل فازی (FL)، عصبی - فازی (NF) و سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده توسط ابزار DSI برای سازند سروک در چاه آزمون.



شکل ۶- ساختار سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی برای فرمول‌بندی بین داده‌های ورودی و خروجی. این سامانه از پنج لایه تشکیل شده است که حاوی ۶۴ قانون اگر-آنگاه و ۱۵۸ گره است. توابع عضویت استفاده شده در این سامانه نوع گوسی است و قوانین با عملگر OR با هم ارتباط داده شده‌اند.



شکل ۷- میزان کمینه سامانه استنتاج تطبیقی فازی عصبی در این مطالعه پس از ۲۱ دوره آموزش.



شکل ۸- نمودار سرعت موج برشی پیش‌بینی شده (الف) حاصل از مدل فازی، ب) عصبی - فازی و سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده (Real) توسط ابزار DSI در سازند سروک در چاه آزمون، همچنین در این شکل میزان مربعات خطا مربوط به هر روش نشان داده شده است.

جدول ۱- رابطه بین "نسبت سرعت موج تراکمی به برشی" با "نوع سنگ‌شناسی" (Pickett, 1963; Tatham, 1982; Domenico, 1984; Castagna et al., 1985; Ikwaokor, 1988).

نسبت سرعت موج تراکمی به برشی	نوع سنگ‌شناسی
۱/۹ - ۲	دولومیت
۱/۸ - ۱/۹	آهک
۱/۷ - ۱/۸	ماسه شیلی
۱/۶ - ۱/۷	ماسه تمیز

جدول ۲- ویژگی‌های مدل‌های فازی ساخته شده به همراه میانگین مربعات خطا.

میزان MSE مدل فازی ساخته شده	تعداد قوانین	شعاع دسته‌بندی	سامانه استنتاج فازی
۰/۰۱۱۶۴۳	۲۰	۰/۱۵	۱
۰/۰۱۱۳۹۴	۱۲	۰/۲۰	۲
۰/۰۱۰۸۹۵	۹	۰/۲۵	۳
۰/۰۱۰۴۸۵	۶	۰/۳۰	۴
۰/۰۰۹۸۳۹	۴	۰/۳۵	۵
۰/۰۲۸۵۶۴	۴	۰/۴۰	۶
۰/۰۲۹۱۸۱	۴	۰/۴۵	۷
۰/۰۲۹۲۸۲	۴	۰/۵۰	۸
۰/۰۷۸۷۷۵	۳	۰/۵۵	۹
۰/۱۲۷۰۵۷	۲	۰/۶۰	۱۰
۰/۱۲۷۹۲۹	۲	۰/۶۵	۱۱
۰/۱۲۷۹۸۸	۲	۰/۷۰	۱۲
۰/۱۲۰۷۶۷	۲	۰/۷۵	۱۳
۰/۱۳۲۰۷۴	۲	۰/۸۰	۱۴
۰/۱۳۲۳۸۲	۲	۰/۸۵	۱۵
۰/۱۳۳۴۲۰	۲	۰/۹۰	۱۶
۰/۱۳۵۴۰۰	۲	۰/۹۵	۱۷
۰/۱۳۶۳۸۰	۲	۱	۱۸

References

- Ameen, M. S., Smart, B. G. D., Somerville, J. M. C., Hamilton, S. & Naji, N. A., 2009- Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). *Marine and Petroleum Geology* 26: 430-444.
- Anselmetti, F. S. & Eberli, G. P., 1993- Controls on sonic velocity in carbonates, *Pure and Applied Geophysics*, 141: 287-323.
- Castagna, J. P., Batzle, M. L. & Eastwood, R. L., 1985- Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in elastic silicate rocks *Geophysics* 50: 571-81.
- Chiu, S. L., 1994- Fuzzy model identification based on cluster estimation. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 2: 267-278.
- Cuddy, S. J., 1998- Litho-facies and permeability prediction from electrical logs using fuzzy logic 8th Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference SPE: 49470.
- Delmirli, K. & Muthukumar, P., 2000- Higher order fuzzy system identification using subtractive clustering, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* 9 (2000): 129-158.
- Domenico, S. N., 1984- Rock lithology and porosity determination from shear and compressional wave velocity *Geophysics* 49: 1188-95.
- Eberli, G. P., Anselmetti, F. S. & Incze, M. L., 2003- Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks. *The Leading Edge*, July 2003: 654-660.
- Finol, J., Guo, Y. K. & Jing, X. D., 2001- A rule base fuzzy model for the prediction of petrophysical rock parameter, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 29: 97-113.
- Hamada, G. M., 2004- Reservoir fluids identification using Vp/Vs ratio, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP* 59(6): 649-654.
- Ikwuakor, K. C., 1988- Vp/Vs revisited: pitfalls and new interpretation techniques *World Oil* (September): 41-46.
- Jang, J. S. R., 1993- ANFIS: Adaptive-Network-Based fuzzy inference systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 23(3): 665-585.

- Jang, J. S. R., Sun, C. T. & Mizutani, E., 1997- Neuro-Fuzzy and Soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice Hall, 640p.
- Kamali, M. R. & Mirshadi, A. A., 2004-Total organic carbon content determination from well logs using ΔLogR and Neuro Fuzzy techniques, Journal of Petroleum Science and Engineering 45: 141-148.
- Kosko, B., 1992- Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Approach to Machine Intelligence, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 449p.
- Lim, J. S., 2005- Reservoir properties determination using fuzzy logic and neural networks from well data in offshore Korea, Journal of Petroleum Science and Engineering 49: 182-192.
- Mamdani, E. H. & Assilian, S., 1975- An experimental in linguistic synthesis with a fuzzy logic control. Int. J. Man-Mach. Stud. 7: 1-13.
- MATLAB user's guide, 2006- Fuzzy logic Toolbox, by the math works Inc.
- Mohaghegh, S., 2000- Virtual-intelligence applications in petroleum engineering: Part I. Artificial neural networks Journal of Petroleum Technology 52: 64-73
- Nava, P. & Taylor, J., 1996- The Optimization of Neural Network Performance through Incorporation of Fuzzy Theory. In: 11th Conference on Systems Engineering, 897-901.
- Norouzi, Gh. H., 2006- Fundamentals of Well-log interpretation, University of Isfahan press, 486p (in Persian).
- Pickett, G. R., 1963- Acoustic character logs and their application in formation evaluation. Journal of Petroleum Technology 15: 650-667.
- Rezaee, M. R., Kadkhodaie Ilkhchi, A. & Barabadi, A., 2006- Prediction of shear wave velocity from petrophysical data utilizing intelligent systems: An example from a sandstone reservoir of Carnarvon Basin, Australia, Journal of Petroleum Science and Engineering 55: 201-212.
- Rezaee, M. R., Kadkhodaie Ilkhchi, A. & Alizadeh, P. M., 2008- Intelligent approaches for the synthesis of petrophysical logs, Journal of Geophysics and Engineering 5(2008): 12-26.
- Sheriff, R. E. & Geldart, L. P., 1995- Exploration Seismology 2nd ed. Cambridge University press.
- Srinivasan, K. & Fisher, D., 1995- Machine Learning Approaches to Estimating Software Development Effort. IEEE Transactions on Software Engineering. 21(2): 126-137.
- Sugeno, M., 1985- Industrial applications of fuzzy control, Elsevier Publication Co. 278 p.
- Tatham, R. H., 1982- Vp/Vs and lithology Geophysics 47: 336-44.
- Vanorio, T., Scotellaro, C. & Mavko, G., 2008 - The effect of chemical and physical processes on the acoustic properties of carbonate rocks. The Leading Edge August 2008: 1040-1048.
- Zadeh, L. A., 1965-Fuzzy sets, Information and Control 8: 338-353.