

کاربرد شبکه‌های عصبی RBF و PNN در تعیین رخساره‌های یکی از میدان‌های گازی جنوب ایران

علی اکبر کاکویی^۱، محسن مسیحی^۲ و محمد شیرانی^۳

^۱ پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی، انستیتو مهندسی نفت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، تهران، ایران

^۳ دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، گروه مهندسی نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۱/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۱/۲۱

چکیده

یکی از مراحل اساسی در تعیین و توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی و مهندسی یک مخزن، تعیین رخساره‌های مختلف سنگ‌های آن مخزن توسط داده‌های حاصل از عملیات چاه‌نگاری و مغزه‌گیری است. در این تحقیق در نظر است با استفاده از شبکه‌های عصبی RBF و PNN، رخساره‌های میدان گازی پارس جنوبی برای کاربرد کلان‌تر در مدل‌سازی استاتیک و دینامیک مخزن تعیین و شناسایی شود. روش‌های یادشده برای اولین بار در تعیین رخساره‌های سنگی در میدان‌های ایران استفاده شده است. در این مطالعه از پارامترهای هدف و گسترش شبکه‌های مذکور در بهبود عملکرد آن شبکه‌ها استفاده شده است. در این راستا، بهبود عملکرد شبکه با استفاده از پارامترهای یادشده نشان داد که مقادیر بهینه عدد گسترش و هدف، به ترتیب بین ۰/۰۱ تا ۱۰ و ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ متغیر است. نتیجه حاصل از به کارگیری این روش‌ها، نشان داد که شبکه‌های عصبی توانایی بالایی در تعیین رخساره‌ها دارند.

کلیدواژه‌ها: رخساره، شبکه‌های عصبی، شبکه عصبی RBF، شبکه عصبی PNN، میدان پارس جنوبی

* نویسنده مسئول: علی اکبر کاکویی

E-mail: ali.a.kak@gmail.com

۱- مقدمه

تعیین رخساره‌های مختلف سنگ‌های یک مخزن، یکی از مراحل اساسی در تعیین و توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی و مهندسی مخزن به شمار می‌آید. در این رابطه، روش سنتی مرسوم برای تعیین رخساره‌ها، در حقیقت شامل مطالعات بر روی داده‌های مغزه‌های گرفته‌شده از چاه‌هاست. گفتنی است که در این روش محدودیت‌های کاربردی، اقتصادی و عملیاتی بی‌شماری وجود دارد. به‌ویژه در چاه‌های بسیار شیب‌دار و افقی که در آن عملاً مغزه‌گیری ناممکن است. با توجه به این موضوع، افزون‌بر استفاده از روش سنتی یادشده، از داده‌های حاصل از نگاره‌های مختلف عملیات چاه‌نگاری (Well Logs) نیز در تعیین رخساره‌ها و توالی سنگی مختلف استفاده می‌شود. داده‌های جمع‌آوری شده در عملیات چاه‌نگاری نیازمند تبدیل داده‌ها به اطلاعات و تفسیر آنها به صورت دستی است. این فرایند افزون‌بر نیاز به یک مفسر باتجربه در زمینه تفسیر نمودارهای چاه‌نگاری، عمدتاً با خطای انسانی و صرف زمان قابل ملاحظه‌ای نیز همراه است. اما در دهه‌های اخیر، با ورود رایانه و برنامه‌های رایانه‌ای مناسب به دانش زمین‌شناسی و مهندسی مخزن، سعی بر آن است که عملیات تشخیص رخساره‌ها و منطقه‌بندی یک مخزن که در زمره مسائل "تشخیص الگو" قرار دارند، در قالب فرایندهای عددی مبتنی بر برنامه‌های رایانه‌ای انجام گیرد. استفاده از این روش‌ها به جای روش سنتی تفسیر مغزه و داده‌های حاصل از نگاره‌ها، دارای محاسن زیادی است که می‌توان به مواردی از جمله: قدرت تفسیر بالاتر در مقایسه با مغز انسان در موارد درک همزمان داده‌های چندمتغیره، تحلیل داده‌ها بدون ورود خطای انسانی و دستیابی به نتایج پایدارتر اشاره کرد (Satter & Thakur, 1994; Bhatt, 2002). از روش‌های بر پایه رایانه در زمینه شناسایی الگو که در سال‌های اخیر معرفی شده است، می‌توان به روش شبکه‌های عصبی تابع با پایه شعاعی (Radial Basis Function (RBF)) و شبکه‌های عصبی احتمالی (Probabilistic Neural Networks (PNN)) اشاره کرد که تحول عظیمی را در این زمینه ایجاد کرده است و چشم‌انداز روشن و وسیعی را در زمینه کاربردهای متفاوت انواع مختلف این شبکه‌ها پیش روی مهندسان باز کرده است. تحقیق اخیر با هدف تعیین و شناسایی رخساره‌های زمین‌شناسی میدان پارس جنوبی با استفاده از شبکه‌های عصبی یادشده برای اولین بار در ایران انجام شد.

۲- شبکه‌های عصبی

شبکه‌های عصبی، عملکردی شبیه به عملکرد مغز انسان دارند. مغز به عنوان یک سامانه پردازش اطلاعات با ساختار موازی، از حدود ۱۰۰ تریلیون (۱۰۱۱) نورون مرتبط تشکیل شده است. نورون‌ها ساده‌ترین واحد ساختاری دستگاه‌های عصبی هستند. این شبکه‌ها برخلاف رایانه که نیازمند دستورهای کاملاً صریح و مشخص هستند، به مدل‌های ریاضی محض نیازی ندارند، بلکه مانند انسان تجربه کرده و سپس این تجربیات را تعمیم می‌دهند. امروزه این شبکه‌ها به ابزار قدرتمند و عمومی تبدیل شده‌اند که برای حل مسائل بسیار پیچیده همچون برآورد (تقریب)، تشخیص الگو (Pattern Recognition)، رده‌بندی و خوشه‌بندی به کار می‌روند و در طیف وسیعی از صنایع، کاربردهای عملی دارند.

شبکه‌های عصبی به طور کلی برای حل هر مسئله‌ای، سه مرحله را طی می‌کنند که این مراحل به ترتیب عبارتند از آموزش (Training)، تعمیم (Generalization) و اجرا (Operation) (Demuth et al., 1992-2009). "آموزش" فرایندی است که در خلال آن شبکه می‌آموزد تا الگوی موجود در ورودی‌ها را (که به صورت مجموعه‌ای از داده‌های آموزشی است)، بشناسد. به این ترتیب که داده‌های وارد شده در نورون، پس از آنکه با وزن‌های شبکه ترکیب شدند، وارد بدنه سلول شده و عملیات پردازش داده‌ها و یا آموزش انجام شده و در نهایت به صورت خروجی از نورون خارج می‌شود. پس از اینکه خروجی‌ها محاسبه شدند، این مقادیر با مقادیر هدف که شامل رخساره‌های به دست آمده از مغزه‌ها هستند، مقایسه شده و در صورت وجود اختلاف بین این مقادیر، وزن‌های جدیدی تنظیم و عملیات آموزش تکرار می‌شود. این فرایند تا زمانی که اختلاف بین مقادیر خروجی شبکه با مقادیر هدف زیاد باشد، تکرار می‌شود. "تعمیم"، توانایی شبکه برای ارائه جواب قابل قبول در برابر ورودی‌هایی است که در مجموعه آموزشی قرار نداشته‌اند. فرایند "اجرا" نیز برای بهبود عملکرد شبکه انجام می‌گیرد (شکل ۱). اما لازم به بیان است که در مورد دو شبکه مورد استفاده در این تحقیق، دو مرحله آخر انجام نمی‌شود. بنابراین در این مطالعه، پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌ها، ابتدا آموزش شبکه انجام و سپس برای بررسی میزان دقت نتایج به دست آمده از شبکه، اعتبارسنجی (Verification) بروندادهای شبکه انجام می‌شود (White et al., 1995).

۳- عملکرد شبکه‌های RBF

شبکه‌های RBF برای آموزش، نیاز به تعداد نورون‌های زیادی دارند. عملکرد این شبکه‌ها نیز در صورت استفاده از تعداد بردارهای آموزشی زیاد، به بهترین وجه انجام می‌شود. در این شبکه‌ها بر خلاف شیوه رایج در شبکه‌های دیگر، به تمام فضای ورودی به طور یکسان پاسخ داده نمی‌شود. در اینجا ابتدا مرکز فضای ورودی محاسبه شده و سپس به ورودی‌هایی که به اندازه کافی به این مرکز نزدیک باشند پاسخ داده می‌شود. در نتیجه این شبکه‌ها به ورودی‌ها به صورت محلی (Local) پاسخ می‌دهند. شبکه‌های RBF دارای دو لایه هستند که لایه اول آنها از نوع پایه شعاعی بوده و لایه خروجی آنها نیز از نوع خطی است (شکل ۲). فرایند آموزش نیز در اینجا توسط روش‌های یادگیری رقابتی (Competitive Learning) یا روش خوشه‌ابزایی k (k Means Clustering) انجام می‌گیرد. پارامترهای شبکه در اینجا شامل دو پارامتر "عدد گسترش" (Spread Number) و "عدد هدف" (Goal Number) است. با تغییر این پارامترها، می‌توان عملکرد شبکه را بهبود بخشید. در این بخش پس از اعمال ورودی‌ها به شبکه، فاصله برداری بین بردارهای ورودی و بردارهای وزن محاسبه شده و مقادیر به دست آمده در مقادیر بایاس شبکه ضرب برداری می‌شوند. سپس این مقادیر توسط توابع مربوط، به تعداد ورودی‌ها نورون ایجاد می‌کند و در نهایت توسط لایه خروجی، مقادیر خروجی شبکه به دست می‌آید (Demuth et al., 1992-2009; Principe, 2000).

۴- عملکرد شبکه‌های PNN

این شبکه‌ها از انواع شبکه‌های شعاعی بوده و مبنای عملکرد آنها مشابه عملکرد شبکه‌های شعاعی است. این شبکه‌ها نیز از دو لایه تشکیل شده است. اما لایه دوم در این شبکه‌ها بر خلاف شبکه‌های پیشین، از نوع رقابتی بوده و باید خروجی‌های هدف در قالب بردارهای شاخص با مقادیر ۰ و ۱ به این شبکه‌ها وارد شوند. در این بخش پس از اعمال یک ورودی به شبکه، فاصله بین این ورودی و دیگر ورودی‌ها محاسبه شده و برداری تولید می‌شود که عناصر آن نشان‌دهنده میزان نزدیکی آن ورودی به مجموعه آموزشی است. به همین ترتیب برای دیگر ورودی‌ها نیز این عملیات تکرار می‌شود. در نهایت مجموع فواصل محاسبه شده، در قالب یک بردار احتمالی به لایه خروجی منتقل می‌شود که توسط توابع مربوط، مقادیر خروجی شبکه به دست می‌آید (Demuth et al., 1992-2009).

۵- زمین‌شناسی میدان مورد مطالعه

در این تحقیق از داده‌های زمین‌شناسی میدان پارس جنوبی استفاده شده است. میدان یادشده به تقریب دارای ۴۰۰ متر سنگ‌آهک و دولومیت به همراه انیدریت و شامل دو سازند کنگان و دالان است. این دو سازند توسط یک مرز به سن پرمین-تریاس از یکدیگر جدا شده و به ۵ واحد قابل تقسیم هستند. به این ترتیب که سازند کنگان به واحدهای K1 و K2 و سازند دالان نیز به واحدهای K1, K2, K3 تقسیم شده‌اند. واحدهای K3 و K4، به نام دالان بالایی و واحد K5 نیز به نام دالان زیرین معروف هستند. واحد دالان زیرین از طریق حجم عظیم انیدریتی از واحد K4 جدا شده است. گفتمی است که این واحد، دارای خواص مخزنی ضعیفی است. واحد K1 به طور عمده از دولومیت، سنگ‌آهک و همچنین رگه‌های شیل است. افزون‌بر آن سه لایه فرعی به نسبت کم سبیرا، انیدریت نیز در بخش میانه و نیمه پایینی این واحد وجود دارد. سبیرا این واحد، حدود ۱۱۰ متر و کیفیت سنگ‌ها در این واحد ضعیف است. واحد K2 به طور غالب شامل سنگ‌آهک به همراه لایه‌های سبیرا از دولومیت است که در میان آن قرار گرفته و سبیرا آن تقریباً ۴۳ متر است. واحد K3 به طور عمده از سنگ‌آهک به همراه لایه‌های سبیرا از دولومیت و همچنین دارای بازه‌هایی از انیدریت در بخش پایینی و سبیرا تقریبی ۱۲۰ متر است. بخش K4 نیز بیشتر

۶- جمع‌آوری داده‌ها

برای آموزش مناسب یک شبکه، نیاز به مجموعه داده‌های کاملی از چاه‌های موجود است. در خلال این مطالعه، از داده‌های حاصل از نگارهای مربوط به چهار چاه در میدان پارس جنوبی که شامل پاسخ نگارهای پرتو گاما (Gamma Ray (GR))، تخلخل نوترون (Neutron Proximity (NPHI))، نگاره جانبی برد بلند (Deep Laterolog (LLD))، نگاره جانبی برد کوتاه (Short Laterolog (LLS))، فوتوالکتریک (Photoelectric Effect (PE))، چگالی سازند (Formation Density) و صوتی (Delta-T (DT)) است، استفاده شد. همچنین از داده‌های حاصل از مغزه در چاه‌های یادشده نیز به عنوان خروجی‌های هدف استفاده شد که بیانگر وجود پنج رخساره به نام‌های دولومیت، دولومیت آهکی، انیدریت، سنگ‌آهک و سنگ‌آهک دولومیتی بود.

۷- آماده‌سازی داده‌ها و آموزش شبکه‌های عصبی RBF و PNN

از داده‌های جمع‌آوری شده سه چاه از چهار چاه یادشده برای آموزش شبکه پس از کدگذاری (۰ و ۱) استفاده شد. در این فرایند با توجه به اختلاف کمی و کیفی داده‌های موجود، سه سناریوی مختلف از جمله حذفی، اصلاح شده دستی و شناسایی شده در نظر گرفته شد.

- در سناریوی اول، در ژرفاهای مختلف، اندازه‌گیری مغزه صورت نگرفته و در واقع جنس سنگ مشخص نیست. بنابراین آن ژرفاها به همراه پاسخ‌های نگارهای مربوط حذف شدند. در حقیقت فرض می‌شود که در آن ژرفا هیچ گونه اندازه‌گیری وجود نداشته است. این سناریو "حذفی" نامیده شد.
- در سناریوی دوم، در ژرفایی که اندازه‌گیری مغزه در ژرفاهای متناظر با اندازه‌گیری‌های نگارها وجود نداشت، روند لایه‌ها پیش‌بینی شدند و در حقیقت در ژرفایی که جنس سنگ مشخص نبود، با توجه به روند تغییر جنس لایه‌ها، جنس سنگ حدس زده شد و این سناریو نیز "اصلاح شده دستی" نامیده شد.
- در سناریوی سوم، در ژرفای بدون اندازه‌گیری‌های مغزه، سنگ‌ها و لایه‌های مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و توسط نرم‌افزار متلب، تعیین و مشخص شدند. این سناریو "شناسایی شده" انتخاب شد.

در این راستا باید بردارهای ورودی و خروجی مطلوب که بردارهای هدف (Target Vectors) نیز نامیده می‌شوند و شامل پنج رخساره هستند، به شبکه اعمال شوند تا به وسیله یک الگوریتم آموزشی، مقادیر وزن‌ها تنظیم شوند. در این راستا داده‌های ورودی به صورت بردار به شبکه اعمال شده و سپس در فرایند آموزش شبکه شرکت داده می‌شود که در این مرحله شبکه به یادگیری رابطه بین این بردارها می‌پردازد. سپس مرحله آموزش با رسیدن به میزان کمترین اختلاف بین خروجی شبکه و خروجی‌های هدف (داده‌های مغزه)، متوقف می‌شود. پس از آموزش شبکه با استفاده از داده‌های سه چاه اول، از این شبکه آموزش دیده، به منظور تعیین و شناسایی رخساره‌های چاه چهارم و بررسی میزان دقت شبکه در پیش‌بینی رخساره‌های آن استفاده شد. برای دستیابی به این هدف، مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه با مقادیر هدف که در حقیقت شامل داده‌های مغزه آن چاه است، مقایسه می‌شوند. تعداد بیشتر موارد مشترک در این مقادیر بیانگر قدرت شبکه در تعیین رخساره‌ها است که به صورت درصد قابل ارائه هستند. از سوی دیگر لازم به بیان است که در هر سناریو یک حالت دیگر افزون بر حالت معمولی (پنج رخساره‌ای) نیز به منظور بهبود عملکرد شبکه بررسی شده است که شامل کاهش بردارهای هدف یا به عبارت دیگر رخساره‌های مورد نظر (پنج رخساره) به سه رخساره است

به سناریوی اول در حالت سه رخساره‌ای است و برای سناریوهای دوم و سوم نیز با مشکل کمبود حافظه مواجه بودیم.

در مورد شبکه‌های PNN نیز سناریوهای مختلف و حالت‌های مختلف بررسی شدند. اما سناریوی سوم در حالت سه رخساره‌ای، بالاترین میزان درستی و دقت را به دست داد که در حدود ۷۲ درصد بود. این مورد نشان‌دهنده این واقعیت است که شبکه‌های یادشده در سناریوی سوم یعنی شناسایی شده که در آن رخساره‌های مفقود شده توسط خود شبکه‌های عصبی تنظیم شده‌اند، موفق‌تر عمل کرده و این خود نشان از قدرت این شبکه‌ها در یادگیری روابط بین ورودی و در نتیجه شناسایی رخساره‌ها دارد. اما در مورد سناریوی دوم، دقت شبکه نسبت به سناریوی سوم کمتر بود که این حقیقت بیانگر عدم موفقیت سناریوی دوم بوده و به عبارت دیگر تصحیح رخساره‌های مفقودی توسط دست (سناریوی اصلاح شده دستی)، نتایج ضعیف‌تری را به دست داد.

۹- نتیجه‌گیری

نتایج استفاده از شبکه‌های عصبی PNN و RBF برای شناسایی و تعیین رخساره‌های میدان پارس جنوبی نشان داد که این شبکه‌ها قادرند تا با دقت حدود ۶۷-۷۲ درصد رخساره‌ها را تعیین و شناسایی کنند. در این راستا این دوروش نه تنها قادر به کاهش خطاهای انسانی هستند، بلکه می‌توانند در کاهش زمان و هزینه‌های تعیین رخساره‌ها نیز مؤثر باشند. البته گفتنی است که مقایسه این شبکه‌ها با دیگر شبکه‌های عصبی پیشنهاد می‌شود.

سپاسگزاری

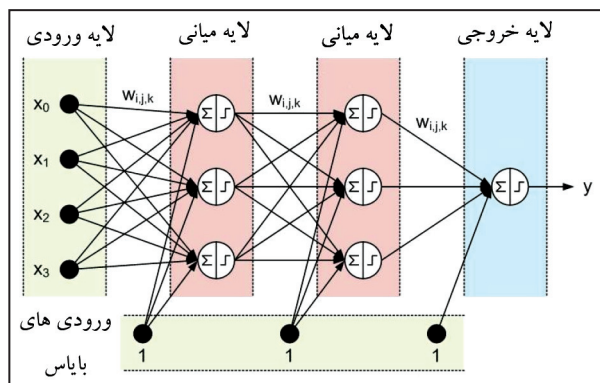
از آقای مهندس بی‌نیاز به خاطر راهنمایی‌های سازنده‌شان تشکر می‌شود. همچنین از کمک‌های مالی و اطلاعاتی شرکت نفت و گاز پارس و داور محترم آن شرکت خانم مهندس مصطفوی نیز تشکر و قدردانی می‌شود.

(Maiti et al., 2007). به این ترتیب که رخساره‌هایی که از نظر ویژگی‌های زمین‌شناختی و سنگ‌شناختی مشابه یکدیگر بودند، در یک گروه قرار گرفتند. به عبارت دیگر، رخساره‌های دولومیت و دولومیت آهکی در یک گروه، انیدریت در گروه دوم و رخساره‌های آهک و آهک دولومیتی نیز در یک گروه مجزا مورد بررسی قرار گرفتند.

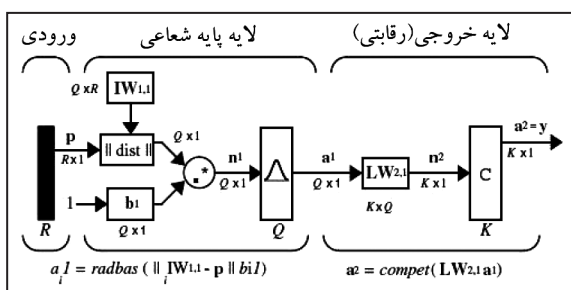
۸- بحث

شناسایی رخساره‌ها در ژرفای مختلف، توسط شبکه‌های RBF و PNN در قالب سناریوهای یادشده انجام شد و نتایج آن نیز در حالت‌های سه و پنج رخساره‌ای مورد بررسی قرار گرفته و نمونه‌ای از بیشترین مقادیر به دست آمده در هر مورد نیز در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

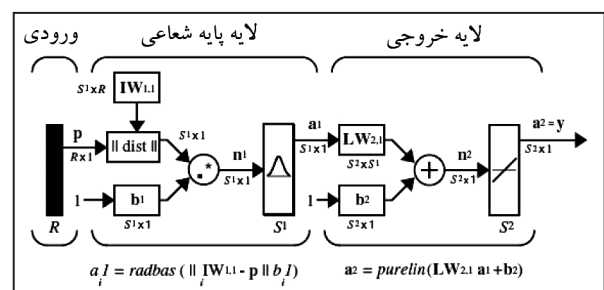
در مورد شبکه‌های RBF، ابتدا رایج‌ترین حالت این شبکه‌ها که شبکه دو لایه با الگوریتم سه پارامتری است، مورد استفاده قرار گرفته شد. در این حالت، میزان دقت شبکه در ارائه نتایج در حدود ۶۷ درصد به دست آمد. سپس برای بهبود عملکرد شبکه، تغییر پارامترهای شبکه، از جمله تغییر الگوریتم آموزشی و نیز تغییر اعداد گسترش و هدف نیز مورد بررسی قرار گرفتند. گفتنی است که در این راستا الگوریتم سه پارامتری نسبت به الگوریتم ۴ پارامتری دارای سرعت بالاتری است. از سوی دیگر، با توجه به اینکه پارامتر اصلی در این شبکه‌ها شامل عدد گسترش است، در نتیجه مقادیر مختلف برای این پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته شد. در این زمینه مشاهدات، نشان‌دهنده این حقیقت بود که بالاترین میزان درستی به ازای مقادیر گسترش، بین ۰/۰۱ تا ۱ به دست آمد. در مورد الگوریتم دوم، عدد هدف نیز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که مقادیر بهینه در این زمینه بین ۰/۰۲ و ۰/۰۶ قرار دارد. این پارامترها در سه سناریوی یادشده و در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شد. پس از بررسی این موارد مشاهده شد که بیشترین میزان دقت مربوط



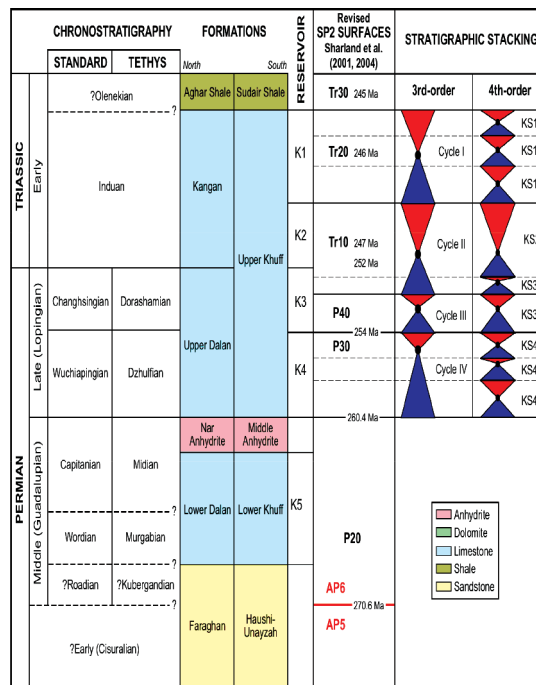
شکل ۱- ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی (GPWR, 2009)



شکل ۳- ساختار شبکه‌های احتمالی (Demuth et al., 1992-2009)



شکل ۲- ساختار شبکه‌های تابع با پایه شعاعی (Demuth et al., 1992-2009)



شکل ۴- توالی چینه‌شناسی سازندهای کنگان و دالان در میدان پارس جنوبی (POGC, 2009)

جدول ۲- نتایج از بیشترین مقادیر دقت به دست آمده در شبکه‌های احتمالی (PNN)

رخساره‌ها	عدد گسترش	دقت
سناریو ۱ سه رخساره‌ای	۰/۱	٪۶۶
سناریو ۱ سه رخساره‌ای	۰/۰۱	٪۶۷
سناریو ۱ سه رخساره‌ای	۱۰	٪۶۷
سناریو ۱ سه رخساره‌ای	۱۰۰۰	٪۶۷
سناریو ۱ پنج رخساره‌ای	۱۰	٪۶۰/۷
سناریو ۲ سه رخساره‌ای	۱۰۰۰	٪۶۳
سناریو ۲ سه رخساره‌ای	۰/۰۱	٪۶۳
سناریو ۲ سه رخساره‌ای	۰/۰۰۱	٪۶۳
سناریو ۳ سه رخساره‌ای	۱۰	٪۷۱/۹

جدول ۱- نتایج از بیشترین مقادیر دقت به دست آمده در شبکه‌های تابع با پایه شعاعی (RBF)

مدل	عدد گسترش	عدد هدف	دقت صحت
مدل معمولی (۳ پارامتری)	۱ (پیش فرض)		٪۶۷
	۳		٪۶۷
	۰/۰۱		٪۶۷
	۰/۰۰۰۱		٪۶۷
مدل اصلاح شده (۴ پارامتری)	۰/۱	۰/۰۲	٪۶۷
	۴	۰/۰۴	٪۶۶
	۱۰	۰/۰۶	٪۶۵

References

- Bhatt, A., 2002- Reservoir properties from well logs using neural networks. Norwegian University of Science and Technology, ch. 6.
- Demuth, H., Beal, M. & Hagan, M., 1992-2009- Neural network toolbox 6 (User's Guide). The MathWorks™.
- GPWR, 2009- Nexy price predictor using neural network. <http://codebase.mql4.com/5738>.
- Maiti, S., Tiwari, R. K. & Kumpel, H., 2007- Neural network modeling and classification of lithofacies using well log data: a case study KTB borehole site. Geophys. J. Int. v. 169, p. 733-746.
- POGC, 2009- Geological History, Pars Oil and Gas Company, Tehran, Iran.
- Principe, J. C., 2000- Artificial Neural Networks, CRC Press LLC. University of Florida, ch. 20.
- Satter, A. & Thakur, G. C., 1994- Integrated petroleum reservoir management. PennWell Publishing Company.
- White, A. C., Molnar, D., Aminian, K., Mohaghegh, S., Ameri, S. & Esposito, P., 1995- The application of ANN for zone identification in a complex reservoir. SPE Paper 30977, SPE Eastern Regional Conference & Exhibition, Morgantown, West Virginia, USA.