

به کارگیری نگار تشدید مغناطیسی هسته‌ای و شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تراوایی یکی از مخازن نفت سنگین در جنوب ایران

مریم روستایی^۱، مجید نبی‌بیدهندی^{۲*}، مهدی تدینی^۳ و سیاوش ترابی^۴

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۲ استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

^۳ کارشناس ارشد ژئوفیزیک، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

^۴ دانشجوی دکتری ژئوفیزیک، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۸/۴/۱، پذیرش نهایی: ۸۹/۷/۲۸)

چکیده

تراوایی یکی از عامل‌های چالش‌برانگیز در مخازن هیدروکربوری است. علت این امر مشکل بودن برآورد تراوایی به صورت دقیق و مستقیم از طریق اندازه‌گیری‌های نگاربرداری کنونی است. در این مقاله کاربرد روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای (Nuclear Magnetic Resonance) در برآورد تراوایی یکی از مخازن کربناته حاوی نفت سنگین در جنوب ایران بررسی شده است. در محاسبه تراوایی با استفاده از نگار NMR، از سه مدل شاره آزاد (کوتس)، میانگین T_2 (SDR) و سوانسون استفاده شده است. ابتدا تراوایی به دست آمده از هر یک از این سه مدل، برای نمونه‌های سه واحد شارش هیدرولیکی مشخص شده در محدوده مورد نظر سازند سروک فوقانی، به صورت جداگانه با تراوایی حاصل از مغزه مقایسه و ضرایب همبستگی محاسبه شده است. سپس برای هر یک از سه مدل فوق، تراوایی کل نمونه‌های تقسیم‌بندی شده در واحدهای شارش هیدرولیکی به صورت هم‌زمان با تراوایی مغزه مقایسه شده است. در نهایت کل نمونه‌های موجود در فاصله مورد نظر با نتایج تراوایی مغزه مقایسه شده است. نتایج به دست آمده در سازند مورد بررسی نشان می‌دهد که استفاده از تقسیم‌بندی نمونه‌ها با به کارگیری واحدهای شارش هیدرولیکی، سبب بهبود تعیین تراوایی می‌شود. روند تغییرات تراوایی برحسب عمق به دست آمده از روی مدل‌ها، با روند تغییرات تراوایی به دست آمده از اطلاعات مغزه مطابقت خوبی دارد و می‌توان از آنها در تعیین تراوایی در محل چاه استفاده کرد. به منظور برآورد دقیق تراوایی، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) با دو مجموعه ورودی متفاوت استفاده شده است. در مجموعه اول از داده‌های تخریل به دست آمده از نگار NMR به منزله یکی از ورودی‌ها استفاده شده و در مجموعه دوم از تخریل حاصل از نگار نوترون در حکم ورودی استفاده شده است. دو دسته تراوایی به دست آمده از شبکه عصبی با هر دو مجموعه ورودی نیز، با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه و ضرایب همبستگی محاسبه شده است. نتایج به دست آمده از شبکه عصبی نشان‌دهنده آن است که در صورت استفاده از تخریل حاصل از NMR در کنار سایر نگارهای سنتی، در حکم ورودی شبکه، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در ضریب همبستگی به وجود می‌آید و بنابراین می‌توان از شبکه عصبی به مثابه روشی قابل اطمینان در برآورد کمی تراوایی در سازند سروک فوقانی استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تشدید مغناطیسی هسته‌ای، تراوایی، شبکه عصبی مصنوعی، نفت سنگین

Using NMR logging and ANN to estimate permeability in one of heavy oil reservoirs in the south of Iran

Roustaie, M.¹, Nabi-Bidhendi, M.², Tadayoni, M.³ and Torabi, S.⁴

¹ Graduate Student in Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

² Professor, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

³ Senior Geophysicist, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

⁴ Ph. D. Student of Geophysics, Earth Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 22 Jun 2009, Accepted: 18 Nov 2010)

Abstract

Permeability is a property of porous medium that quantifies rock capacity to transmit fluids. Frequently, core based permeability data are not available either because of the borehole conditions or due to the high cost of coring. For these reasons, over the years attempts have been made to estimate permeability by alternative ways. Permeability is an elusive parameter in hydrocarbon reservoirs as it is very difficult, if not impossible to determine precisely and directly from current subsurface logging technologies. In this research, an attempt is made to test some methods for estimating permeability as a function of depth from Nuclear Magnetic Resonance (NMR) logging in one of the carbonate reservoirs, bearing heavy oil, in the south of Iran.

NMR uses hydrogen protons as an indicator of fluid presence. Not all nuclei possess the ability to interact with magnetic fields (magnetic moment); only those with an odd number of protons, such as hydrogen, possess magnetic moment. In calculating permeability from NMR logging in the upper Sarvak formation, three models such as average-T2, free-fluid and Swanson model have been used. Permeabilities obtained by these models are compared with core permeability and correlation coefficients are calculated which give poor results. It can be considered that the trends of permeabilities obtained by NMR models have good compatibility with core permeability, so they can be used for in-situ permeability estimation.

A hydraulic unit (HU) is a reservoir layer or zone that has similar average rock properties affecting fluid flow. By using hydraulic units, the samples are grouped into distinct units with clear porosity and permeability properties. We are trying to consider the effect of using hydraulic units in obtained correlation coefficients. Hydraulic units can be determined from core porosity and permeability. This technique calculating the flow zone indicator (FZI) from the pore volume to solid volume ratio (Φ_z) and reservoir quality index (RQI). Based on core porosity and permeability 3 hydraulic flow units for the desired interval were distinguished. The results obtained from hydraulic unit 3 cannot be reliable because the small amount of samples distinguished in this unit.

For accurate permeability estimation, an Artificial Neural Network (ANN) model with two different sets of inputs is applied. In the first case, porosity obtained by NMR logging has been used as one of the input data but in the second case there is no NMR data as an input and core porosity has been used as one of the input data. The predicted permeability by ANN with both sets of input data is then compared with the core permeability. The results show that the correlation between predicted and core permeabilities is very good when the porosity obtained by NMR logging is used as one of the inputs of the ANN model. Using hydraulic units results in increasing obtained correlation coefficients for both NMR models and ANN model.

Carbonate formations are more complex than sandstone formations. This is due to the broad range of pore sizes, complex pore structures and low surface relaxivity values found in carbonate formations. Using ANN models will lead to better results compared with traditional NMR models because ANN models can consider complex relations between permeability and NMR parameters.

Key words: Nuclear magnetic resonance (NMR), Permeability, Artificial neural network (ANN), Heavy oil

۱ مقدمه

پیش‌بینی مقدار از جمله مشکل‌ترین پارامترهای مخزنی به شمار می‌رود (جانسون، ۱۹۹۴). این پارامتر در راهبردهای

تراوایی یکی از ویژگی‌های سنگ متخلخل و نشان‌دهنده قابلیت سنگ در انتقال شاره‌ها است و از نظر برآورد و

گروه‌های مجزایی با خواص تخلخل و تراوایی متفاوتی تقسیم می‌شوند. یکی از راه‌های تعیین واحدهای شارش هیدرولیکی استفاده از داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه است. این فن شامل محاسبه (flow zone indicator) FZI با استفاده از نسبت حجم حفره به حجم بخش جامد، Φ_z ، و اندیس کیفیت مخزنی RQI (reservoir quality index)، از روابط زیر است (کاظم‌زاده و همکاران، ۱۳۸۷):

$$RQI = \Phi_z \times FZI \quad (1)$$

که در آن RQI و Φ_z به صورت زیر تعریف می‌شوند:

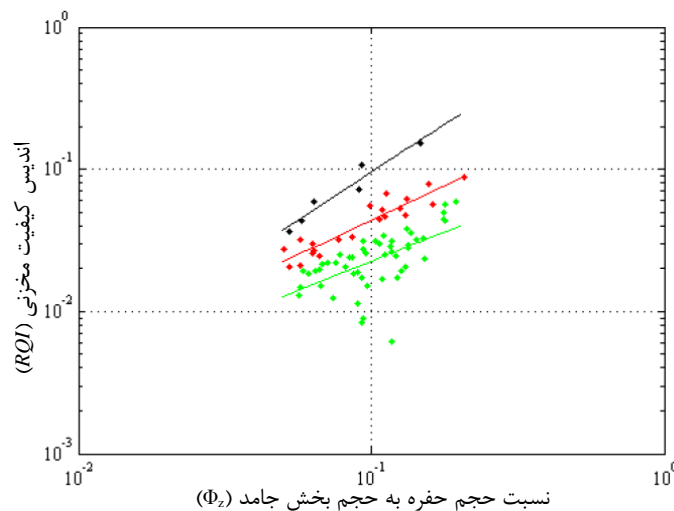
$$RQI = 0.0314 \times (k/\Phi)^{0.5} \quad (2)$$

$$\Phi_z = \Phi_e / (1 - \Phi_e) \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳) Φ_e تخلخل موثر و k تراوایی هوا است. با رسم نمودار RQI برحسب Φ_z در مختصات لگاریتمی- لگاریتمی، خطوط مستقیمی با شیب واحد به دست می‌آید که در نقطه $\Phi_z = 1$ برابر با FZI است. ایده اصلی دسته‌بندی واحدهای شارش تعیین گروه‌هایی برای داده‌هایی است که در نمودار RQI برحسب Φ_z حول خطوط مستقیم تجمع می‌یابند. به همین منظور مقادیر FZI با استفاده از تخلخل و تراوایی مغزه محاسبه می‌شود و سپس با استفاده از روش‌های آماری (آنالیز دسته میانگین تراوایی) به گروه‌هایی تقسیم می‌شوند که مشخص کننده واحدهای هیدرولیکی بوده و رفتار شارشی شاره‌ها در آنها یکسان است. نتایج محاسبات مربوط به دسته‌بندی‌های FZI ناحیه موردنظر، در شکل ۱ قابل مشاهده است. در شکل ۱ واحدهای شارش هیدرولیکی شماره یک، دو و سه به ترتیب با رنگ‌های سبز، سرخ و مشکی نشان داده شده‌اند. در جدول ۱ نیز مقادیر FZI به دست آمده برای هر یک از سه واحد شارش هیدرولیکی آورده شده است.

تکمیل چاه، تولید و مدیریت مخزنی عاملی کلیدی به شمار می‌رود و برآورد دقیق آن بسیار ضروری است. روش متداول تعیین تراوایی استفاده از آنالیزهای مغزه است اما گاهی اوقات به دلیل هزینه زیاد مغزه‌برداری یا شرایط ویژه چاه، به دست آوردن تراوایی به شیوه اندازه‌گیری‌های مغزه ممکن نیست. به همین دلیل تلاش‌هایی صورت گرفته است تا بتوان با استفاده از روش‌های غیرمستقیم، تراوایی را تعیین کرد (راندال و همکاران، ۱۹۹۹ و هاسال و همکاران، ۲۰۰۴). یکی از روش‌های تعیین غیر مستقیم تراوایی، استفاده از نگار NMR است. در طول سال‌های گذشته ثابت شده که روش نگاربرداری NMR ابزاری موفق در بررسی سنگ‌های متخلخل است (کینون، ۱۹۹۷؛ موریس و همکاران، ۱۹۹۷؛ کوتس و همکاران، ۱۹۹۹؛ آلن و همکاران، ۲۰۰۱). استفاده از نگار NMR در بررسی خواص سازندهای ماسه‌سنگی بسیار متداول است اما ارزیابی سازندهای کربناته با این نگار مشکل‌تر است و عامل‌های NMR مورد استفاده در تعیین تراوایی و اشباع آب به صورتی غیرقابل پیش‌بینی تغییر می‌کنند (اهرلیچ و همکاران، ۱۹۹۱). در این مقاله سعی می‌شود تا کارایی نگار NMR در تعیین تراوایی سازند کربناته سروک فوقانی مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر آن تاثیر تقسیم‌بندی نمونه‌ها با استفاده از مفهوم واحدهای شارش هیدرولیکی (hydraulic flow unit) بر دقت نتایج تراوایی تعیین شده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت نیز از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی به منظور پیش‌بینی مقادیر کمی تراوایی استفاده می‌شود.

واحد شارش هیدرولیکی (Hydraulic Unit) لایه یا زون مخزنی است که در آن میانگین خواص سنگ که بر شارش شاره‌ها تاثیر می‌گذارند، یکسان است و نمونه‌ها به



شکل ۱. واحدهای شارش هیدرولیکی سازند سروک فوقانی. واحدهای شارش شماره یک، دو و سه به ترتیب با رنگ‌های سبز، سرخ و مشکی نشان داده شده است.

جدول ۱. واحدهای شارش هیدرولیکی و مقادیر FZI سازند سروک فوقانی.

سازند سروک فوقانی	
واحد هیدرولیکی	FZI
۱	۰/۲۳۸۱
۲	۰/۴۴۶۵
۳	۰/۸۹۱۹

میلی‌متر (قابل مشاهده با چشم) و D) اندازه حفره بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر نظیر تخلخل حفره‌ای و شکستگی. در نهایت، یک نمونه کربناته در تقسیم‌بندی آرچی به صورت ترکیبی از علایم ذکر شده در بالا معرفی می‌شود (آرچی، ۱۹۵۲).

اغلب نمونه‌های واحد شارش هیدرولیکی شماره یک در سازند مورد بررسی از نظر طبقه‌بندی آرچی از نوع I, A/B است. اکثر نمونه‌ها دارای درزه‌های انحلالی (solution seam) هستند و تعداد اندکی از آنها نیز ریزشکستگی (micro fracture) دارند. در واحد شماره دو اغلب نمونه‌ها از نوع I, A و دارای درزه‌های انحلالی هستند. تعداد اندکی از نمونه‌های موجود در این واحد شارش دارای ریزشکستگی و از نوع B هستند. در واحد شارش شماره سه اکثر نمونه‌ها از نوع I/II, A/B هستند و

نمونه‌های قرار گرفته در هر واحد شارش هیدرولیکی را می‌توان برحسب طبقه‌بندی آرچی، که در بررسی خرده‌ها و مغزه‌های حفاری استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار داد. آرچی سنگ‌های کربناته را بر مبنای شکل آنها در نمونه‌های دستی و در زیر میکروسکوپ به سه دسته I یا سنگ‌های آهکی بلورین محکم فاقد تخلخل (compact crystalline)، نوع II یا گل سفید (chalky) و نوع III یا سنگ‌های آهکی دانه‌ای (granular) تقسیم‌بندی کرد. همچنین آرچی نمونه‌ها را برحسب اندازه حفره (قطر حفره) و با استفاده از میکروسکوپ با قدرت کم یا عدسی‌های دستی به چهار رده تقسیم کرد: A) تخلخل غیر قابل مشاهده با اندازه حفره کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر، B) اندازه حفره بین ۰/۱ تا ۰/۱ میلی‌متر (قابل مشاهده با عدسی $\times 10$)، C) اندازه حفره بین ۰/۱ تا ۲

از فازشدگی پروتون‌ها، ثابت زمانی آرامش عرضی (Transversal relaxation time) یا T_2 خوانده می‌شود. با اعمال یک سری توالی‌های پالسی B_1 ، می‌توان واپاشی دنباله اکو (Echo) را ثبت کرد که حاوی ویژگی‌های شاره و محیط در برگرفته آن است. سپس از طریق ویژگی‌های منحنی‌های واپاشی دنباله اکو و روش‌های وارون‌سازی ریاضی می‌توان مقادیر T_1 و T_2 را به دست آورده و با استفاده از آنها خواص پتروفیزیکی را برآورد کرد. این روش قادر به عرضه اطلاعات بسیاری مانند تخلخل کلی و موثر، تراوایی، حجم توده کاهش‌ناپذیر (Bulk Volume Irreducible) و اندیس شاره آزاد (Free Fluid Index) در مورد مخزن است (کوتس و همکاران، ۱۹۹۹). با استفاده از اطلاعات به دست آمده از نگار NMR و مدل‌هایی که در این رابطه معرفی شده‌اند، می‌توان برآوردی از تراوایی بر حسب عمق به دست آورد. برآورد تراوایی با استفاده از نگار NMR بر پایه مدل‌های نظری قرار دارد که بیان‌گر افزایش تراوایی با افزایش تخلخل و اندازه حفره می‌باشند (فلوری و همکاران، ۲۰۰۱). مدل‌های متعددی برای برآورد تراوایی با استفاده از داده‌های نگار NMR وجود دارد. در مطالعه این سازند از سه مدل متداول تشدید مغناطیسی هسته‌ای یعنی مدل شاره آزاد (Free-fluid)، مدل میانگین T_2 (Mean T_2) و مدل سوانسون (Swanson) که در برآورد تراوایی سازندهای ماسه‌سنگی عملکرد خوبی داشته‌اند، استفاده شده است (هاسل و همکاران، ۲۰۰۴). محاسبه تراوایی با استفاده از مدل شاره آزاد (کوتس) با توجه به رابطه زیر انجام می‌پذیرد (کوتس و همکاران، ۱۹۹۹):

$$k = c_1 \left(\frac{FFI}{BVI} \right)^{a_1} \Phi_{NMR}^{b_1} \quad (4)$$

که در آن حجم شاره آزاد و BVI حجم توده کاهش‌ناپذیر است. همچنین Φ_{NMR} تخلخل به دست آمده از راه اندازه‌گیری‌های NMR است. ضرایب معادله با

پدیده‌های زمین‌شناسی از نوع واگ (vug)، درزه‌های انحلالی، ترک و ریز شکستگی در آنها قابل مشاهده است.

۲ تشدید مغناطیسی هسته‌ای

تشدید مغناطیسی هسته‌ای، پاسخ هسته اتم به میدان‌های مغناطیسی است و توانایی تعیین خواص هسته‌ها را از روی ویژگی‌های برهم‌کنش آنها با میدان مغناطیسی، دارد. اندازه‌گیری‌های NMR را می‌توان روی هسته‌هایی که دارای تعداد فرد نوترون یا پروتون هستند، مانند هسته‌های هیدروژن (^1H)، کربن (^{13}C) و سدیم (^{23}Na)، عملی ساخت. از آنجا که هیدروژن در آب و هیدروکربورها فراوان است و سیگنالی نسبتاً قوی تولید می‌کند، تقریباً همه نگاربرداری‌ها و بررسی‌های NMR سنگ، بر پایه پاسخ هسته اتم هیدروژن به میدان‌های مغناطیسی قرار دارد و از پروتون‌های هیدروژن در حکم نشانگر وجود شاره‌ها آزاد استفاده می‌شود. ابتدا در غیاب میدان مغناطیسی خارجی، جهت‌گیری پروتون‌ها به صورت کاتوره‌ای است. با اعمال میدان مغناطیسی ایستای B_0 پروتون‌ها با بسامد لارمور (Larmor) حول B_0 حرکت تقدیمی به انجام می‌رسانند. در این حالت بُردار مغناطش کلی در جهت میدان ایستا تولید می‌شود. زمان لازم برای چرخش پروتون‌ها در راستای میدان ایستا زمان آرامش طولی (longitudinal relaxation time) یا T_1 نامیده می‌شود. سپس میدان مغناطیسی نوسانی B_1 که در جهت عمود بر B_0 قرار دارد، بر سامانه اعمال و بردار مغناطش پروتون‌ها از جهت میدان ایستا خارج می‌شود و در جهت B_1 می‌چرخد. با صفر شدن این میدان نوسانی، بردار مغناطش پروتون‌ها خارج از فاز می‌شود و بار دیگر به سمت میدان مغناطیسی ایستا حرکت می‌کند. برای تغییر جهت موثر بُردار مغناطش، باید بسامد نوسان میدان B_1 با بسامد لارمور حرکت تقدیمی پروتون‌ها یکسان باشد. ثابت زمانی خارج

مدل سوانسون از داده‌های فشار موئینگی (capillary) که از روی منحنی‌های توزیع T_2 به دست می‌آیند، برای برآورد تراوایی استفاده می‌کند. محاسبه تراوایی با استفاده از مدل سوانسون با توجه به رابطه زیر صورت می‌پذیرد (سوانسون، ۱۹۸۱):

$$k = c_3 \left(\Phi_{NMR} \frac{(1 - S_{wc})}{P_c} \right)^{a_3} \quad (7)$$

که در آن P_c فشار موئینگی و S_{wc} اشباع آب به صورت کسری در نقطه‌ای است که در آن فشار موئینگی اندازه‌گیری شده است. a_3 و c_3 ضرایب ثابت مورد استفاده در رابطه هستند که عموماً به ترتیب از مقادیر ۱/۶۹ و ۳۹۹ برای آنها استفاده می‌شود. Φ_{NMR} نیز تخلخل به دست آمده از اندازه‌گیری‌های تشدید مغناطیسی هسته‌ای است.

۳ روش کار

هدف این مقاله بررسی تراوایی در یکی از سازندهای یکی از میددین نفتی جنوب ایران است. سازند کربناته موردنظر از نوع سروک فوقانی است و در یکی از میددین نفت سنگین جنوب ایران با درجه API ۱۴ تا ۱۶ قرار دارد. سازند از نوعی آهک دولومیتی تشکیل شده و تحت تاثیر فرایندهای دیاژنزی (diagenetic) قرار گرفته است. تخلخل عمده آن از نوع ثانویه و ناشی از وجود ترک، شکستگی و ریزشکستگی، درزه‌های انحلالی و واگ (vug) است. به منظور تعیین تراوایی و با توجه به مدل‌های مورد استفاده در تعیین تراوایی به کمک نگار NMR، در ابتدا باید تخلخل سازند برآورد شود. تخلخل سازند را می‌توان با استفاده از داده‌های خام نگار NMR برآورد کرد، بدین صورت که دامنه ابتدایی منحنی واپاشی دنباله اکو به صورت مستقیم متناسب با تعداد هسته‌های هیدروژن قطبیده شده شماره درون حفره‌ها است. با مقایسه این دامنه با پاسخ کلی به دست آمده از اندازه‌گیری محیطی با تخلخل ۱۰۰٪ (مانند یک مخزن آب)، می‌توان تخلخل را به دست

استفاده از انجام آزمایشات NMR بر روی نمونه‌های مغزه تعیین می‌گردند اما بدلیل در دسترس نبودن دستگاه‌های NMR آزمایشگاهی و پرهزینه بودن آن‌ها، عموماً از مقادیر متداول $a_1=2$ ، $b_1=4$ و $c_1=1$ استفاده می‌شود. ضریب c_1 می‌تواند بسته به فرایندهای دخیل در ایجاد سازند، مقادیر متفاوتی برای هر سازند داشته باشد. ویژگی قابل توجه این مدل در نظر گرفتن تاثیر اندازه حفره‌ها از طریق نسبت حجم شماره آزاد به مقدار حجم توده کاهش ناپذیر در تراوایی است، بگونه‌ای که در دو سازند با تخلخل یکسان ولی اندازه حفره‌های متفاوت، مقادیر تراوایی متفاوتی به دست می‌آید. البته مدل شماره آزاد بیشتر در بردارنده تاثیر ریز تخلخل‌ها و حفره‌های حاوی آب کاهش ناپذیر هستند (هاسل و همکاران، ۲۰۰۴). در مدل میانگین T_2 از رابطه زیر در برآورد تراوایی استفاده می‌شود (باباداغلی و ال-سلمی، ۲۰۰۴):

$$k = c_2 T_{2lm}^{a_2} \Phi_{NMR}^{b_2} \quad (8)$$

که در آن T_{2lm} میانگین هندسی توزیع T_2 (Geometric mean of T_2) ضرایب موجود در معادله همانند ضرایب رابطه (۴)، یا از راه آزمایش‌هایی که روی مغزه صورت می‌پذیرد، تعیین می‌شود و یا از مقادیر متداول و ازپیش تعیین شده $a_2=2$ ، $b_2=4$ و $c_2=4$ استفاده می‌شود. ضریب c_2 نیز همانند c_1 می‌تواند بسته به فرایندهای دخیل در ایجاد سازند، مقادیر متفاوتی برای هر سازند داشته باشد. نحوه محاسبه میانگین هندسی توزیع T_2 به صورت زیر است:

$$T_{2lm} = \exp \left[\sum_{T_{2s}}^{T_{2max}} \frac{A_i}{A_T} \ln(T_{2i}) \right] \quad (9)$$

در این رابطه T_{2max} برابر با ۱۰۰۰۰ میلی ثانیه و T_{2s} نشان دهنده محل شروع طیف و T_{2i} مربوط به i امین بین (bin) است. همچنین A_i دامنه در زمان T_{2i} و A_T دامنه کلی طیف NMR است.

واحدهای شارش هیدرولیکی یک، دو و سه به ترتیب برابر با ۰/۵۵، ۰/۵۹ و ۰/۸۰ است. سپس به منظور بررسی بیشتر تاثیر استفاده از واحدهای شارش هیدرولیکی در برآورد تراوایی به کمک مدل شماره آزاد (کوتس) ابتدا تراوایی سازند برای همه نمونه‌های تقسیم شده در واحدهای شارش هیدرولیکی به صورت هم‌زمان با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه شده‌اند. در نهایت همه نمونه‌های موجود بدون در نظر گرفتن تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه شده است. در شکل ۳ در قسمت (الف) تراوایی حاصل از مدل شماره آزاد (کوتس) مربوط به نمونه‌های برداشت شده از سه واحد شارش هیدرولیکی به صورت هم‌زمان با نتایج تراوایی مغزه مقایسه شده و ضریب همبستگی برابر با ۰/۵۲ به دست آمده است. در قسمت (ب) شکل ۳ تراوایی همه نمونه‌های موجود بدون در نظر گرفتن تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه شده و ضریب همبستگی برابر با ۰/۴۳ به دست آمده است. با مقایسه ضرایب همبستگی به دست آمده در شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان مشاهده کرد که استفاده از واحدهای شارش هیدرولیکی سبب افزایش ضرایب همبستگی و دقت در برآورد تراوایی می‌شود. مشابه این نتایج را می‌توان در مورد مدل میانگین T_2 (SDR) در شکل‌های ۴ و ۵ و همچنین مدل سوانسون در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده کرد.

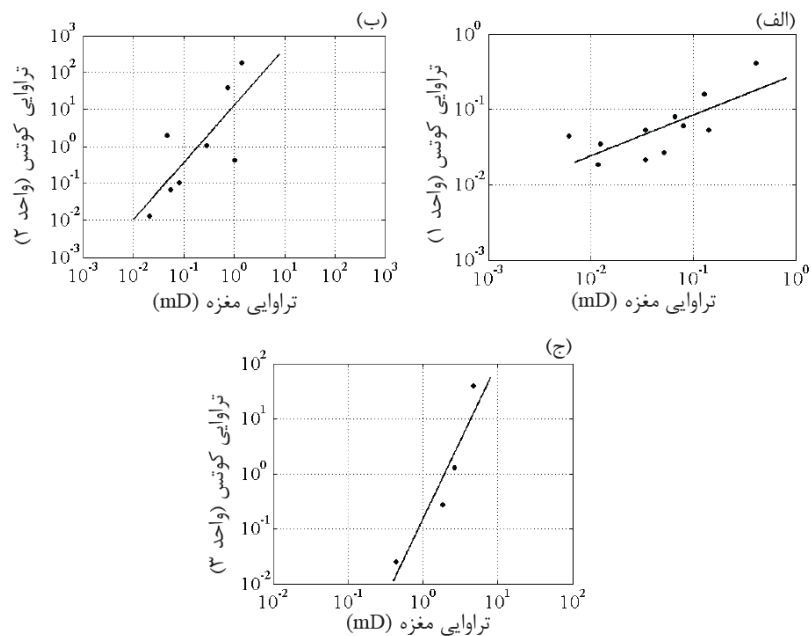
اکنون به بررسی نتایج تراوایی حاصل از مدل میانگین T_2 (SDR) روی واحدهای شارش هیدرولیکی موجود می‌پردازیم. با استفاده از رابطه شماره (۵) تراوایی مربوط به نمونه‌های هریک از سه واحد شارش هیدرولیکی به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. در شکل ۴ نتایج تراوایی به دست آمده از مدل میانگین T_2 (SDR) برای هر سری نمونه‌ها در هریک از سه واحد شارش هیدرولیکی به صورت مجزا رسم شده است. ضرایب همبستگی به دست آمده بین تراوایی حاصل از مدل شماره آزاد (کوتس) و تراوایی حاصل از مغزه برای

آورد. با استفاده از تخلخل به دست آمده می‌توان تراوایی سازند مورد نظر را به کمک مدل‌های متداول شماره آزاد (کوتس)، میانگین T_2 (SDR) و سوانسون از داده‌های حاصل از نگار NMR به دست آورد. در ابتدا تراوایی سازند با استفاده از سه مدل فوق برای نمونه‌های مربوط به سه واحد شارش هیدرولیکی (I, A/B و I, A و I/II, A/B) موجود در سازند به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. سپس برای هریک از این مدل‌ها، نتایج تعیین تراوایی در نمونه‌های مربوط به هریک از سه واحد شارش هیدرولیکی به صورت جداگانه با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه و ضرایب همبستگی آنها محاسبه می‌شود. در ادامه نتایج تراوایی به دست آمده از هر کدام از سه مدل فوق برای همه نمونه‌هایی که در تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی حضور داشته‌اند، با تراوایی حاصل از مغزه مقایسه و ضرایب همبستگی آنها محاسبه می‌شود. همچنین تراوایی همه نمونه‌های ناحیه مورد نظر (شامل نمونه‌هایی که تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی روی آنها صورت گرفته است و همچنین نمونه‌های موجود که در تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی در نظر گرفته نشده‌اند) برای هریک از سه مدل فوق محاسبه می‌شود. سپس ضرایب همبستگی در مقایسه با نتایج تراوایی مغزه به دست می‌آید.

در ابتدا به بررسی نتایج مدل شماره آزاد (کوتس) روی سه واحد شارش هیدرولیکی پیش گفته، می‌پردازیم. تراوایی برای نمونه‌های هریک از سه واحد شارش هیدرولیکی، با استفاده از رابطه شماره (۴) محاسبه می‌شود. برای مقایسه بهتر در شکل ۲ نتایج تراوایی به دست آمده از مدل شماره آزاد (کوتس) با تراوایی حاصل از مغزه، برای هر سری نمونه‌ها در هریک از سه واحد شارش هیدرولیکی، به صورت مجزا رسم شده است. ضرایب همبستگی به دست آمده بین تراوایی حاصل از مدل شماره آزاد (کوتس) و تراوایی حاصل از مغزه برای

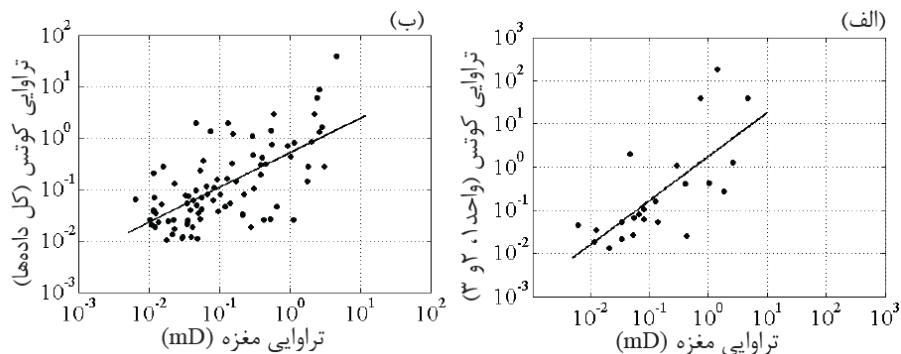
همبستگی برابر با ۰/۴۶ به دست آمده است. در قسمت (ب) تراوایی همه نمونه‌های موجود بدون در نظر گرفتن تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه شده و ضریب همبستگی به دست آمده برابر با ۰/۳۰ است. همان‌گونه که در شکل‌های ۴ و ۵ دیده می‌شود، در صورت به کارگیری تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی در تعیین تراوایی با استفاده از مدل میانگین T_2 (SDR) نیز، ضرایب همبستگی افزایش می‌یابند.

مقایسه شده است. ضرایب همبستگی به دست آمده بین تراوایی حاصل از مدل میانگین T_2 (SDR) و تراوایی حاصل از مغزه برای واحدهای شارش هیدرولیکی یک، دو و سه به ترتیب برابر با ۰/۳۷، ۰/۳۳ و ۰/۸۹ است. سپس در شکل ۵ مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از به کارگیری واحدهای شارش هیدرولیکی و استفاده نکردن از این واحدها صورت گرفته است. در قسمت (الف) شکل ۵ تراوایی حاصل از مدل میانگین T_2 (SDR) برای نمونه‌های برداشت شده از سه واحد شارش هیدرولیکی به صورت هم‌زمان با نتایج تراوایی مغزه مقایسه شده و ضریب



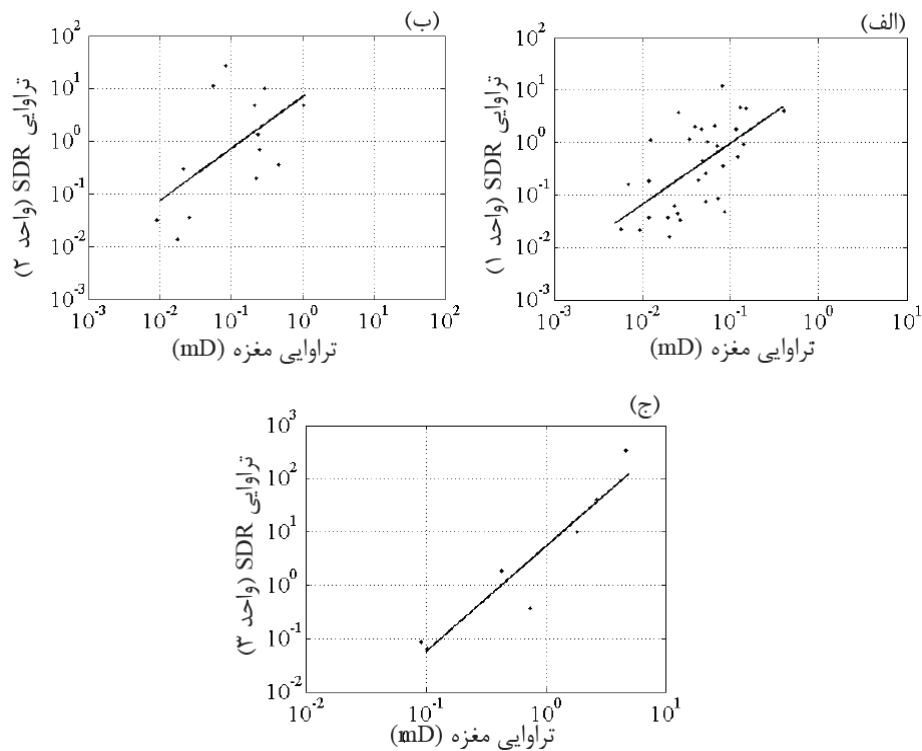
شکل ۲. مقایسه بین نتایج تراوایی به دست آمده از مدل شاره آزاد (کوتس) و تراوایی مغزه در سازند سروک فوقانی (الف) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۱،

$R^2 = 0/55$ ، (ب) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۲، $R^2 = 0/59$ و (ج) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۳، $R^2 = 0/88$



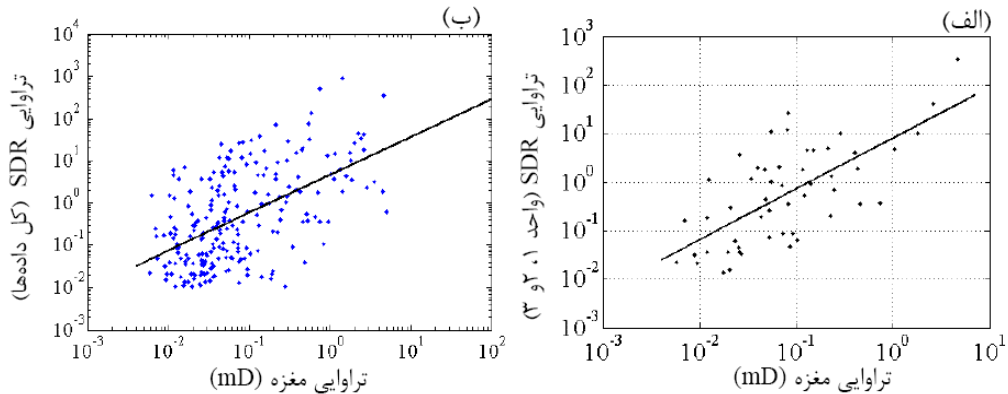
شکل ۳. مقایسه بین نتایج تراوایی به دست آمده از مدل شاره آزاد (کوتس) و تراوایی مغزه در سازند سروک فوقانی (الف) با در نظر گرفتن همه نمونه‌های مربوط

به هر سه واحد شارش هیدرولیکی، $R^2 = 0/52$ ، (ب) با در نظر گرفتن همه نمونه‌ها بدون در نظر گرفتن واحدهای شارش هیدرولیکی، $R^2 = 0/43$



شکل ۴. مقایسه بین نتایج تراوایی به دست آمده از مدل میانگین T_2 (SDR) و تراوایی مغزه در سازند سروک فوقانی (الف) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۱،

(ب) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۲، $R^2 = 0.37$ و (ج) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۳، $R^2 = 0.89$.



شکل ۵. مقایسه بین نتایج تراوایی به دست آمده از مدل میانگین T_2 (SDR) و تراوایی مغزه در سازند سروک فوقانی (الف) با در نظر گرفتن همه نمونه‌های مربوط

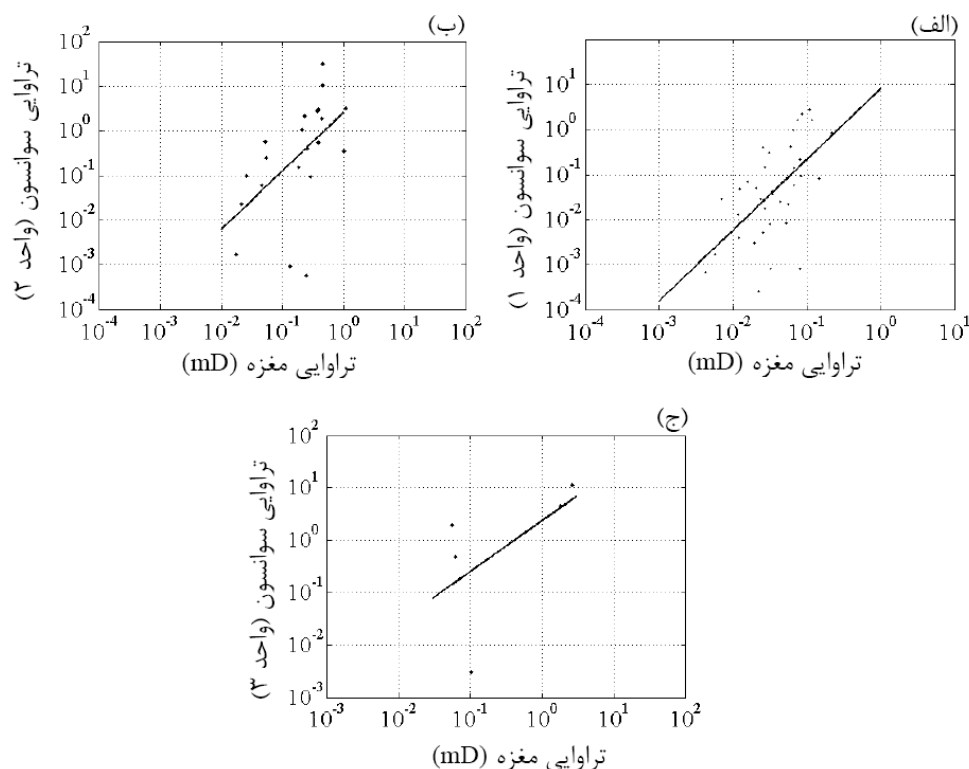
به هر سه واحد شارش هیدرولیکی، $R^2 = 0.46$ (ب) با در نظر گرفتن همه نمونه‌ها بدون در نظر گرفتن واحدهای شارش هیدرولیکی، $R^2 = 0.30$.

واحد شارش هیدرولیکی به صورت مجزا رسم شده است. ضرایب همبستگی به دست آمده بین تراوایی حاصل از مدل سوانسون و تراوایی حاصل از مغزه برای واحدهای شارش هیدرولیکی یک، دو و سه به ترتیب برابر با ۰/۳۶، ۰/۳۰ و ۰/۳۳ است. سپس در شکل ۷ مقایسه‌ای بین نتایج

در نهایت با استفاده از رابطه شماره (۷) تراوایی حاصل از مدل سوانسون محاسبه و نتایج حاصل از این مدل با نتایج حاصل از تراوایی مغزه مقایسه شده است. در شکل ۶ نتایج تراوایی به دست آمده از مدل سوانسون با تراوایی حاصل از مغزه، برای هر سری نمونه‌ها در هر یک از سه

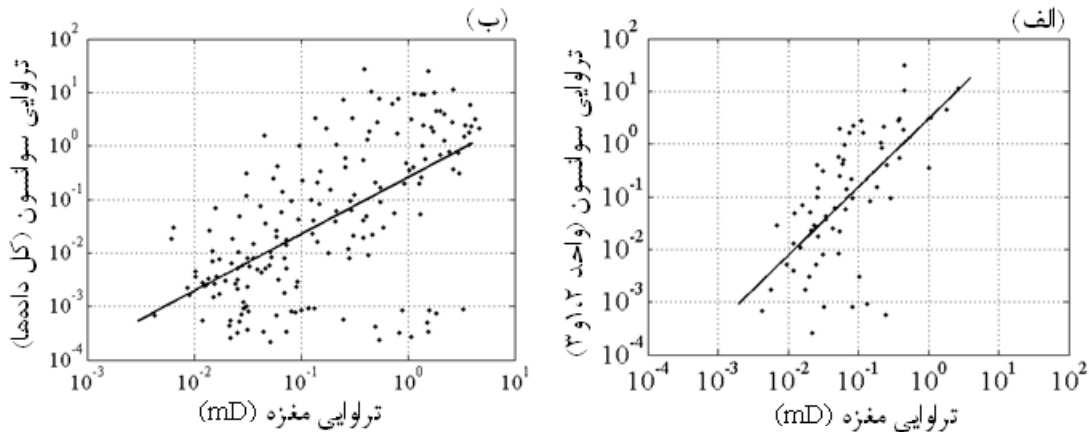
شارش هیدرولیکی سبب افزایش نسبی دقت در برآورد کمی تراوایی شده است. ضرایب همبستگی به دست آمده در شکل های ۲، ۴ و ۶ به ترتیب بزرگ تر از ضرایب همبستگی شکل های ۳، ۵ و ۷ است. همچنین ضرایب همبستگی بخش (الف) شکل های ۳، ۵ و ۷ نیز که دربرگیرنده کل نمونه های سه واحد شارش هیدرولیکی است، به ترتیب بیشتر از ضرایب همبستگی بخش (ب) این شکل ها است که در آن همه نتایج بدون در نظر گرفتن تقسیم بندی واحدهای شارش با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه شده اند. این بدان معنا است که به منظور تعیین دقیق تر مقادیر کمی تراوایی، بهتر است از تقسیم بندی واحدهای شارش هیدرولیکی نمونه ها استفاده شود و تا حد امکان برای هر واحد شارش هیدرولیکی از ضرایب خاص آن واحد در روابط و مدل ها استفاده شود.

حاصل از به کارگیری واحدهای شارش هیدرولیکی و به کار نگرفتن این واحدها صورت گرفته است. در قسمت (الف) شکل ۷ تراوایی حاصل از مدل سوانسون برای نمونه های برداشت شده از سه واحد شارش هیدرولیکی به صورت هم زمان با نتایج تراوایی مغزه مقایسه شده و ضریب همبستگی برابر با ۰/۴۲ به دست آمده است. در قسمت (ب) تراوایی همه نمونه های موجود بدون در نظر گرفتن تقسیم بندی واحدهای شارش هیدرولیکی با نتایج تراوایی حاصل از مغزه مقایسه شده و ضریب همبستگی برابر با ۰/۳۶ است. همان گونه که در شکل های ۶ و ۷ دیده می شود، در صورت به کارگیری تقسیم بندی واحدهای شارش هیدرولیکی در تعیین تراوایی با استفاده از مدل سوانسون نیز، ضرایب همبستگی افزایش می یابند. با مقایسه شکل های ۲ تا ۷ می توان مشاهده کرد، استفاده از تقسیم بندی نمونه ها با به کارگیری واحدهای



شکل ۶. مقایسه بین نتایج تراوایی به دست آمده از مدل سوانسون و تراوایی مغزه در سازند سروک فوقانی (الف) در واحد شارش هیدرولیکی

شماره ۱، ۰/۳۶، $R^2 = 0.36$ (ب) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۲، ۰/۳۰، $R^2 = 0.30$ و (ج) در واحد شارش هیدرولیکی شماره ۳، ۰/۱۳، $R^2 = 0.13$

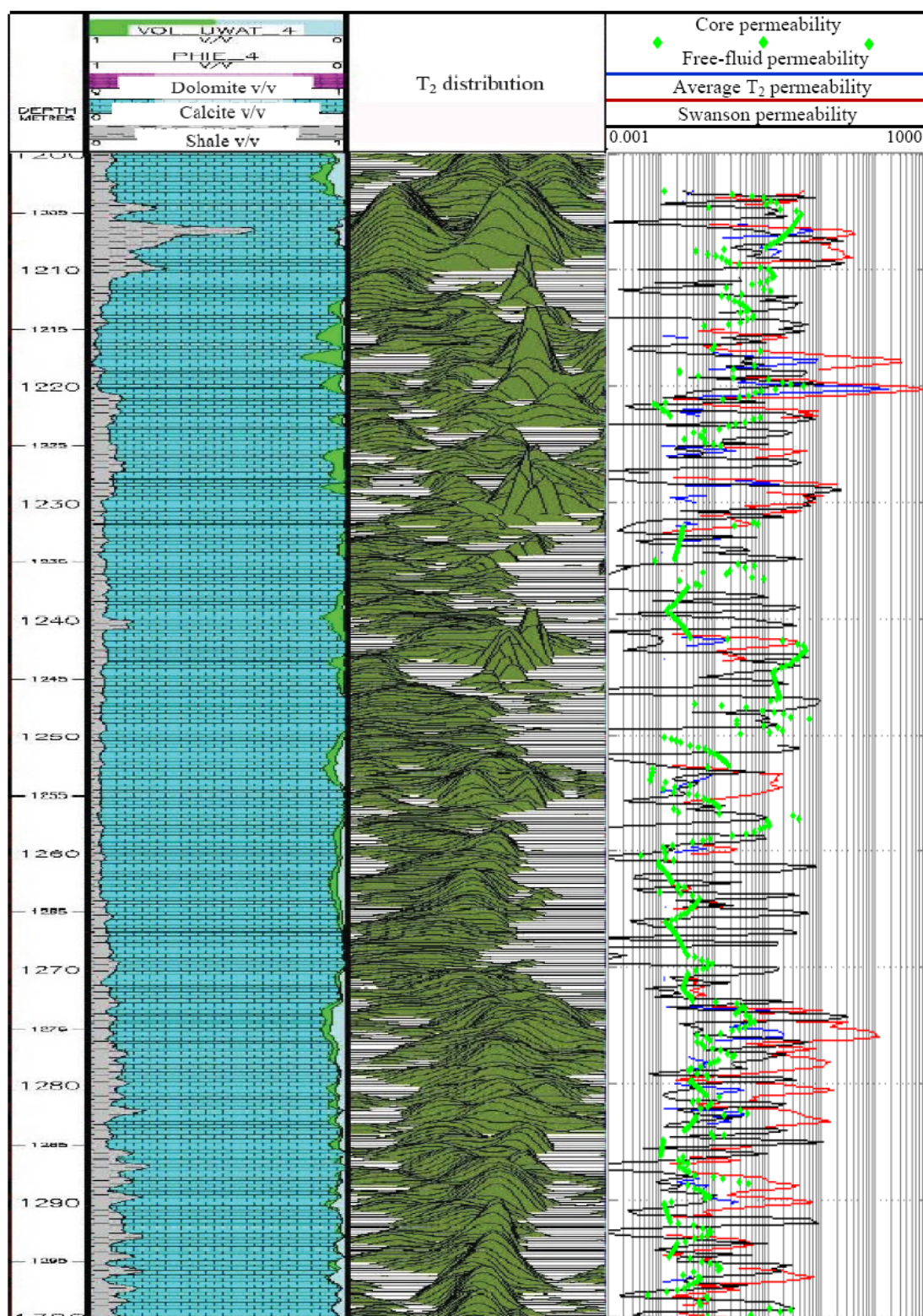


شکل ۷. مقایسه بین نتایج تراوایی به دست آمده از مدل سوانسون و نتیجه تراوایی مغزه در سازند سروک فوقانی (الف) با در نظر گرفتن همه نمونه‌های مربوط به هرسه واحد شارش هیدرولیکی، $R^2 = 0/42$ ، (ب) با در نظر گرفتن همه نمونه‌ها بدون در نظر گرفتن واحدهای شارش هیدرولیکی، $R^2 = 0/36$

از داده‌های مغزه یکسان است (شکل ۸). این امر نشان‌دهنده آن است که می‌توان از NMR به منزله روشی کارا در تعیین روند تراوایی برحسب عمق و به صورت پیوسته در محل چاه استفاده کرد و برای این منظور نیازی به داده‌های NMR مغزه برای واسنجیدن (کالیبره کردن) ضرایب ثابت به کار رفته در مدل‌ها نیز وجود ندارد. در ستون سمت راست شکل ۸، تراوایی تعیین شده با این سه مدل به همراه تراوایی اندازه‌گیری شده از روی نمونه‌های مغزه، برحسب عمق نمایش داده شده است. در این شکل نقاط صورتی رنگ نشانگر داده‌های مغزه و خطوط نقطه‌چین تراوایی‌های به دست آمده از این سه روش هستند که در فاصله ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ متری سازند دیده می‌شوند. در ستون سمت چپ سنگ‌شناسی سازند با استفاده از روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای و در ستون میانی توزیع T_2 مربوط به عمق‌های متفاوت دیده می‌شود که از آن در تعیین تخلخل و تراوایی از مدل‌های متداول استفاده می‌شود.

در بین سه مدل متداول، تعیین تراوایی، مدل شاره آزاد (کوتس) با شرایط منطقه هماهنگی بیشتری نشان داده و ضرایب همبستگی به دست آمده از آن بزرگ‌تر از ضرایب همبستگی مدل‌های میانگین T_2 (SDR) و سوانسون است. همچنین ضرایب همبستگی به دست آمده از مدل‌های میانگین T_2 (SDR) و سوانسون به یکدیگر نزدیک هستند. البته باید به این نکته نیز توجه کرد که به دلیل کم بودن تعداد نمونه‌های مغزه برداشت شده در واحد شارش هیدرولیکی شماره سه، به نتایج و ضرایب همبستگی به دست آمده از آن نمی‌توان استناد کرد.

اگرچه نتایج به دست آمده به دلیل کوچک بودن ضرایب همبستگی در تعیین مقدار کمی تراوایی نمی‌تواند چندان قابل قبول باشد، اما نکته مهمی که باید به آن توجه کرد این است که روند افزایش و کاهش تراوایی برحسب عمق به دست آمده از سه مدل متداول، با روند افزایش و کاهش تراوایی برحسب عمق به دست آمده



شکل ۸. درستون سمت چپ لیتولوژی بر حسب عمق در سازند سروک فوقانی دیده می‌شود. ستون میانی توزیع T_2 برحسب عمق را نشان می‌دهد. ستون سمت راست تراوایی بدست آمده از مدل‌های مختلف NMR به‌مراه تراوایی مغزه را نشان می‌دهد که در آن رنگ سبز نشان دهنده تراوایی مغزه و رنگ‌های سیاه، آبی و قرمز به ترتیب نشان دهنده تراوایی مدل‌های سوانسون، سیال آزاد (کوتس) و میانگین T_2 (SDR) است.

وارد شبکه می‌شوند و شبکه خروجی را تولید می‌کنند. سپس این خروجی با هدف مقایسه می‌شود و قوانین یادگیری وزن‌ها و آریبی‌های شبکه را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که خروجی به هدف نزدیک‌تر شود و به اصطلاح شبکه همگرا شود. شبکه از نوع پس‌انتشار خطا (Back propagation) است و به منظور آموزش آن از روش گرادیان کاهش‌ی استفاده شده است. در الگوریتم گرادیان کاهش‌ی وزن‌ها در جهت منفی گرادیان تابع عملکردی حرکت می‌کند. نوع معماری مورد استفاده در شبکه‌های پس‌انتشار خطا عموماً از نوع شبکه‌های پیش‌خور (feed forward) چندلایه است. این لایه‌ها عموماً به صورت یک لایه ورودی، یک یا چند لایه میانی و یک لایه خروجی هستند.

در ابتدا وزن‌ها دارای مقادیر اتفاقی هستند. علت این مسئله به روش محاسبه وزن‌ها در دستگاه ANN برمی‌گردد که روشی مبتنی بر تکرار (iterative) است. در این روش همان‌گونه که مشخص است، نیاز به یک مقدار اولیه حدسی یا وزن‌های اتفاقی داریم که در ابتدای کار با دستگاه ANN مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ابتدای مرحله آموزش، اطلاعات مربوط به نمونه‌ها یکی‌یکی به شبکه داده می‌شود. اطلاعات ورودی در شبکه جریان می‌یابد و این به معنای آن است که داده‌های ورودی در وزن‌ها ضرب می‌شود و نتیجه فعالیت هر نرون به صورت سیگنالی، خود ورودی نرون‌های لایه بعدی خواهد بود. در پایان جریان اطلاعات هر نمونه، شبکه پاسخی در لایه خروجی خواهد داشت. برای مثال در صورتی که هدف پیش‌بینی تراوایی باشد، فقط وزن نرون لایه خروجی نمایش‌گر آن خواهد بود و در این مرحله ابتدایی، به دلیل استفاده از وزن‌های اتفاقی، پاسخ ایجاد شده با میزان تراوایی مطلوب تفاوت خواهد داشت. این تفاوت، خطای پیش‌بینی شده (predicted error)، که تفاضل میزان پیشگویی شده پاسخ شبکه و میزان اندازه‌گیری شده

۴ استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی

تراوایی

رهیافت دیگری که می‌توان به منظور پیش‌بینی تراوایی از آن استفاده کرد، بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) است. ویژگی منحصر به فرد شبکه عصبی مصنوعی توانایی آن در ایجاد ارتباط بین پارامترهای گوناگون و در نهایت محاسبه مدل ریاضی مناسب بین این پارامترها است. به دلیل اینکه سازند از نوع کرناته است و به خصوص دارای شکستگی و درزهای انحلالی، روابط بین تراوایی و دیگر پارامترهای سازند، دارای پیچیدگی‌های فراوانی است و به همین دلیل به نظر می‌رسد شبکه عصبی به خوبی قادر به تعیین تراوایی در سازند مورد نظر باشد. تاثیر شبکه بر محاسبات به صورت نگاشت مقادیر ورودی به مقادیر خروجی با استفاده از عناصر محاسباتی ساده یعنی نرون‌ها (neuron) صورت می‌گیرد. این نرون‌ها از راه اتصالات ساده‌ای به یکدیگر مربوط می‌شوند. شدت این اتصالات ساده‌ای به مقادیر وزن و آریبی (بایاس)‌های مربوط به آنها که پارامترهای قابل تنظیم شبکه هستند، تغییر می‌کند. از ترکیب نرون‌ها با یکدیگر لایه‌هایی تشکیل می‌شود و سپس لایه‌های متفاوت از طریق توابع انتقال به یکدیگر متصل می‌شوند. معماری شبکه شامل توصیف تعداد نرون‌ها در هر لایه، تابع انتقال هر لایه و نحوه اتصال لایه‌ها با یکدیگر است. هر مسئله و مشکلی، معماری خاص خود را دارد. قوانین (الگوریتم) یادگیری به صورت فرایند تعیین و اصلاح وزن‌ها و آریبی‌های یک شبکه تعریف می‌شود. سامانه یادگیری مورد استفاده در این شبکه، سامانه یادگیری تحت نظارت (Supervised) است و از آن در طراحی شبکه‌هایی استفاده می‌شود که در ازای ورودی خاص، نیاز به تولید خروجی مناسبی دارند. در یادگیری تحت نظارت به منظور آموزش شبکه، پاسخ مطلوب یا هدف (target) به شبکه داده می‌شود. ورودی‌ها

سلول‌های ورودی برابر با تعداد پارامترهای ورودی‌ها یعنی هفت و تعداد سلول خروجی یک است. تعداد لایه‌های میانی به کار رفته برابر با سه و تعداد سلول‌های آن به ترتیب ۱۰ و ۱۲ و ۹ است. توابع انتقال مورد استفاده در لایه‌ها شامل دو تابع سیگموئید دو سویه در لایه‌های میانی اول و دوم و یک تابع خطی در لایه میانی سوم است که عموماً در شبکه‌های پس‌انتشار خطا از آنان استفاده می‌شود. تابع انتقال سیگموئید دوسویه در رابطه شماره (۸) دیده می‌شود (دموث و بیل، ۲۰۰۲).

$$a = \text{tansig}(n) = \frac{2}{1+e^{-2n}} - 1 \quad (8)$$

که در آن a خروجی تابع است که می‌تواند هر مقداری بین -1 تا $+1$ داشته باشد و n نیز شناسه (آرگومان) ورودی تابع با هر مقداری از $-\infty$ تا $+\infty$ است.

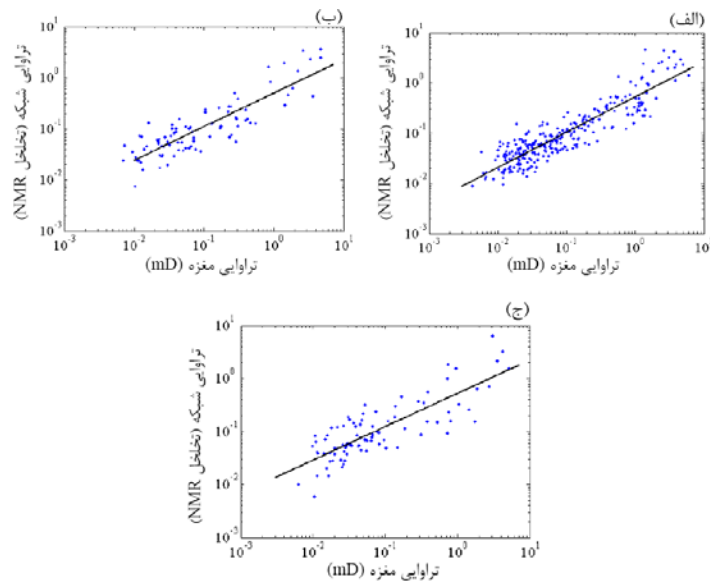
برای پیش‌بینی تراوایی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و همچنین بررسی کارایی روش NMR در این سازند، از دو دسته ورودی متفاوت برای یک شبکه استفاده شده است. در مدل اول تخلخل موثر به دست آمده از روش NMR و در مدل دوم تخلخل حاصل از نگار نوترون به منزله ورودی تخلخل استفاده شده است در حالی که بین سایر پارامترهای ورودی در دو مدل، تفاوتی وجود ندارد. سپس نتایج تراوایی به دست آمده از دو مدل اول و دوم به صورت جداگانه با نتایج تراوایی به دست آمده از مغزه مقایسه شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۹ و ۱۰ دیده می‌شود، ضریب همبستگی بین تراوایی حاصل از شبکه با استفاده از تخلخل موثر حاصل از روش NMR و تراوایی مغزه به دست آمده در مدل اول به ترتیب برای داده‌های آموزش، آزمون و اعتبارسنجی برابر با ۰/۸۲، ۰/۷۵ و ۰/۶۷ است و این ضرایب همبستگی بین تراوایی حاصل از شبکه با استفاده از تخلخل حاصل از نگار نوترون و تراوایی مغزه برای مدل دوم برابر با ۰/۷۶، ۰/۳۴ و ۰/۶۵ است. با مقایسه ضرایب همبستگی دو مدل

تجربی آن است، باید به صفر نزدیک شود تا شبکه از پیشگویی خوبی برخوردار شود. به همین دلیل شبکه پس از محاسبه خطای پیش‌بینی، وزن‌های شبکه را به تدریج از آخرین لایه به سوی نخستین لایه به گونه‌ای تغییر می‌دهد که خطای پیش‌بینی کمتر شود. در واقع پس‌انتشار خطا سرشکن کردن خطای سلول‌های یک لایه و نیز لایه‌های بعدی است. پس از این، اطلاعات نمونه دوم به شبکه داده می‌شود. مسلماً نمونه جدید با همان وزن‌های پیشین، مجدداً دارای خطا خواهد بود. بنابراین باید با استفاده از روش پس‌انتشار، خطای وزن‌ها را به گونه‌ای تغییر داد که کمترین خطا، هم برای این نمونه و هم برای نمونه پیشین، ایجاد شود. بدین ترتیب پس از وارد شدن تعداد کافی نمونه به ورودی شبکه، شبکه تمام فضای n بعدی روابط پارامترها را تجزیه می‌کند. در این حالت گفته می‌شود که شبکه همگرا شده است، به این معنا که در منحنی خطای پیشگویی به پایین‌ترین نقطه رسیده است. در این صورت می‌توان از شبکه به منظور پیش‌بینی اطلاعات مورد نظر استفاده کرد. در فرایند پردازش داده‌های عصبی، عموماً داده‌ها به سه بخش مجزای آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی تقسیم می‌شوند. از بخش آموزش به منظور ایجاد شبکه دلخواه استفاده می‌شود. از داده‌های بخش آزمون به منظور جلوگیری از آموزش بیش از حد شبکه استفاده می‌شود، زیرا این امکان وجود دارد که شبکه، الگو را حفظ کند. در مرحله اعتبارسنجی می‌توان با وارد کردن اطلاعات مربوط به یک نمونه جدید، بدون وارد کردن خروجی مطلوب، میزان پایداری و قدرت تعمیم شبکه را پیش‌بینی کرد.

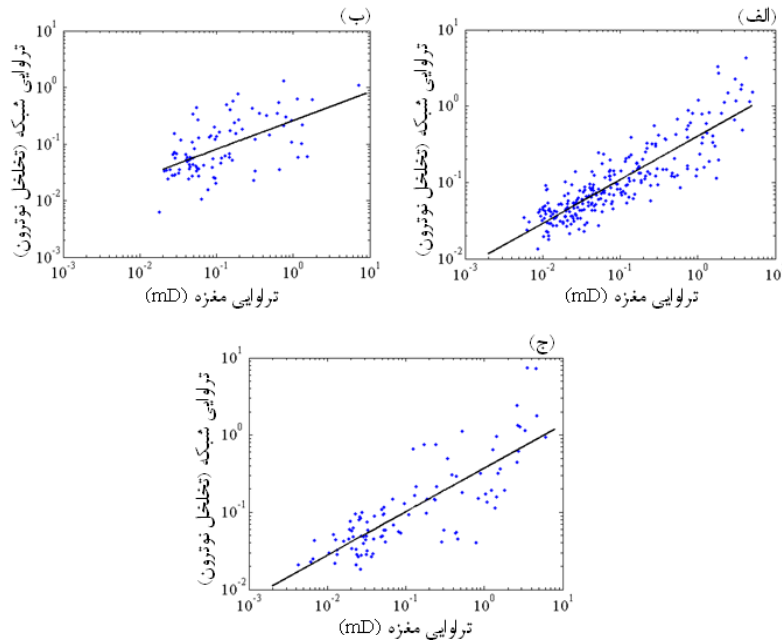
داده‌های ورودی که برای آموزش شبکه مورد نظر به کار رفته‌اند شامل داده‌های عمق؛ نگارهای مقاومت القایی عمیق، متوسط و سطحی؛ نگار فوتوالکتریک؛ نگار سرعت صوتی و تخلخل هستند. داده هدف نیز داده‌های تراوایی حاصل از مغزه در نظر گرفته شده است. تعداد

می‌یابد. این امر را می‌توان در مقایسه دو شکل ۹ و ۱۰ مشاهده کرد. بدین صورت که ضرایب همبستگی به دست آمده در بخش‌های آموزش، آزمون و اعتبارسنجی شبکه اول بیشتر از ضرایب همبستگی به دست آمده در شبکه دوم است.

اول و دوم می‌توان به این نتیجه رسید که در صورت استفاده از نتایج تخلخل به دست آمده از روش تشدید مغناطیسی هسته‌ای در آموزش شبکه عصبی مورد نظر، ضرایب همبستگی و دقت پیش‌بینی تراوایی در سازند مورد بررسی افزایش



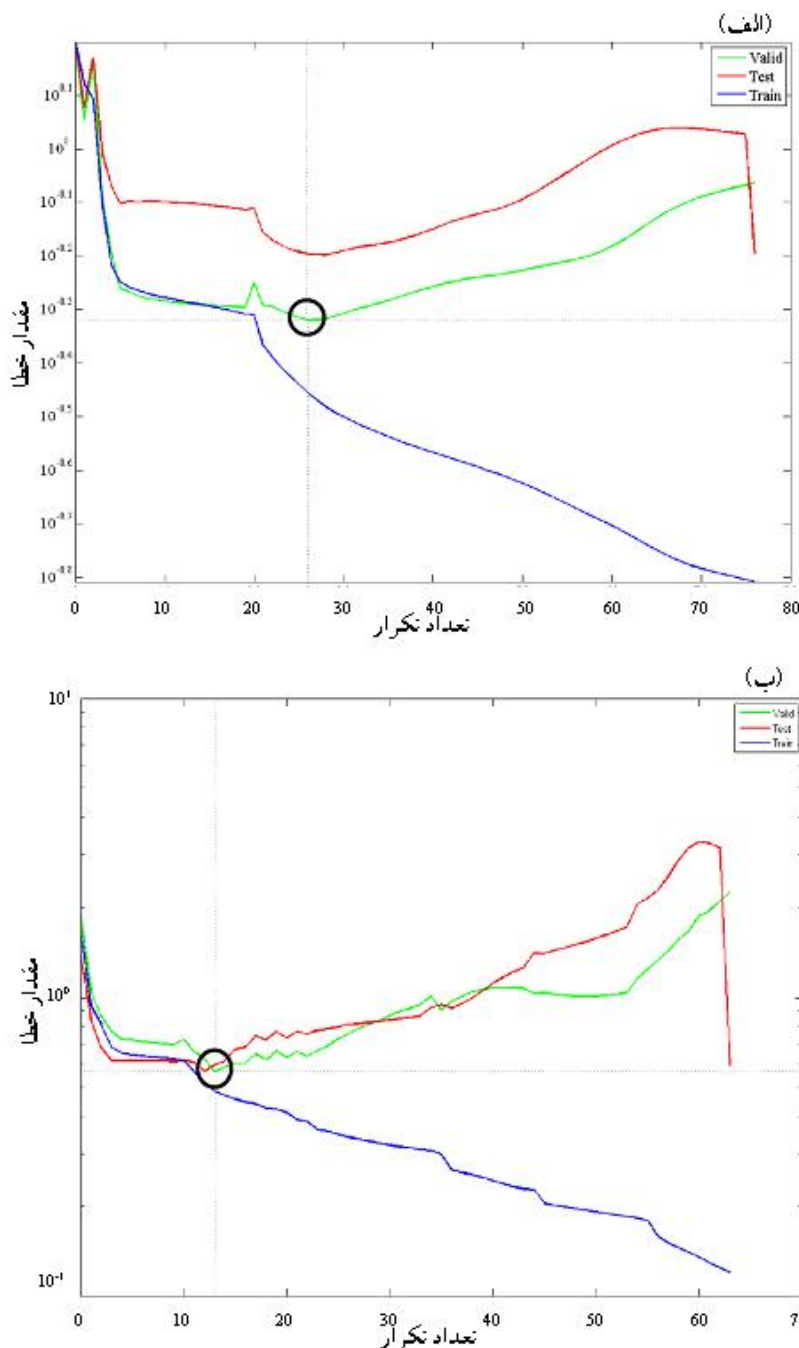
شکل ۹. نتایج مدل اول شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی تراوایی در سازند سروک فوقانی با استفاده از داده‌های تخلخل NMR (الف) داده‌های آموزش، $R^2 = 0.82$ ، (ب) داده‌های آزمون، $R^2 = 0.75$ و (ج) داده‌های اعتبارسنجی، $R^2 = 0.67$



شکل ۱۰. نتایج مدل دوم شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی تراوایی در سازند سروک فوقانی با استفاده از داده‌های تخلخل نوترون (الف) داده‌های آموزش، $R^2 = 0.76$ ، (ب) داده‌های آزمون، $R^2 = 0.34$ و (ج) داده‌های اعتبارسنجی، $R^2 = 0.65$

استفاده می‌کند، دارای خطای کمتری نسبت به شبکه دوم است که از تخلخل حاصل از نگار نوترون استفاده می‌کند. خطای شبکه اول در حد 10^{-3} و خطای شبکه دوم در حد 10^{-1} است.

در شکل ۱۱ تعداد تکرارهای این شبکه در صورت استفاده از دو دسته ورودی‌های تخلخل متفاوت دیده می‌شود. با مقایسه بخش‌های (الف) و (ب) شکل ۱۱ می‌توان مشاهده کرد که شبکه اول که از داده‌های NMR



شکل ۱۱. مقدار خطا برحسب تعداد تکرار در شبکه عصبی به‌منظور پیش‌بینی تراوایی در سازند سروک فوقانی (الف) در مدل اول با استفاده از تخلخل حاصل از نگار NMR، (ب) در مدل دوم با استفاده از تخلخل حاصل از نگار نوترون. فرایند آموزش به رنگ آبی، آزمون به رنگ سرخ و اعتبارسنجی به رنگ سبز نشان داده شده است.

۵ بحث

عموما در سنگ‌های کربناته برخلاف ماسه‌سنگ‌ها، تراوایی بیش از آنکه به میزان تخلخل کلی بستگی داشته باشد، به ناهمگنی‌های (heterogeneous) موجود در توزیع حفره‌ها، نوع حفره‌ها، میزان اتصال (connectivity) حفره‌ها به یکدیگر و اندازه ذرات بستگی دارد. این ویژگی سنگ‌های کربناته و پیچیدگی آن سبب محدود شدن کاربردهای NMR در آنها می‌شود (آلن و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین در مدل‌های متداول تعیین تراوایی به دلیل پیچیده بودن روابط بین پارامترهای متفاوت و تراوایی، فقط از تعداد اندکی پارامتر به منزله ورودی استفاده شده است. برای مثال در این مدل‌ها، وجود شکستگی در سازند که یکی از ویژگی‌های اصلی سازند کربناته مورد نظر است، در نظر گرفته نمی‌شود. بنابراین مارشال و همکاران، ۱۹۹۷، در سازندهای درز و شکاف‌دار کارایی هر دو مدل شماره آزاد (کوتس) و میانگین T_2 (SDR) در تعیین کمی تراوایی بسیار کم است و فقط می‌توانند بیانگر تراوایی ماتریکس باشند. در نتیجه برای برآورد دقیق‌تر تراوایی در سنگ‌های کربناته باید مدل‌های موجود را که عموماً برای سازندهای ماسه‌سنگی طراحی شده‌اند با در نظر گرفتن دسته‌بندی‌های انواع گوناگون حفره‌ها تغییر داده و پارامترهای مورد استفاده در مدل‌ها را کامل کرد (وستفال و همکاران، ۲۰۰۵).
 واسنجیدن این مدل‌ها نیازمند اجرای آزمایش‌های NMR روی نمونه‌های مغزه است که بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. علاوه بر این ضرایب ثابت به کار رفته در مدل‌ها نیز باید به کمک این آزمایش‌های NMR مغزه مجدداً برای سازند مورد نظر تعیین و مقدار T_2 قطع مناسب در سازند مورد نظر نیز تعیین می‌شود. مقدار T_2 قطع از طریق تاثیر بر مقادیر BVI ، FFI و T_{2lm} می‌تواند بر مقدار تراوایی تعیین شده با استفاده از مدل‌ها تاثیر بگذارد.
 به علاوه سازند کربناته مورد نظر حاوی نفت سنگین با

درجه API ۱۴ تا ۱۶ است و نوع گل مورد استفاده در حفاری نیز از نوع گل حفاری بر پایه نفت است و این امر سبب به وجود آمدن نفت پالایه در سازند می‌شود. از آنجاکه هیدروکربورها دارای مقادیر T_2 کوچک‌تری نسبت به سایر شاره‌ها هستند، نفت سنگین و نفت پالایه موجود در سازند ممکن است در حکم BVI در نظر گرفته و سبب برآورد نادرست تراوایی در مدل شماره آزاد (کوتس) شود (کوتس و همکاران، ۱۹۹۹؛ مارشال و همکاران، ۱۹۹۷). در مورد مدل میانگین T_2 (SDR) نیز تجربه نشان داده است که فقط در سازندهای حاوی آب، پاسخ صحیحی از برآورد تراوایی به دست می‌آید. در صورت وجود نفت یا نفت پالایه، T_{2lm} به کار رفته در مدل به سمت مقادیر کمتر از میزان واقعی می‌رود و سبب می‌شود تا تراوایی برآورد شده دارای خطا باشد (کوتس و همکاران، ۱۹۹۹). علت این مشکل آن است که ابزارهای نگاربرداری تشدید مغناطیسی کنونی درون‌چاهی به دلیل کم بودن سرعت نمونه‌گیری، قادر به ثبت همه هیدروژن‌های درون سازند نیستند. به همین دلیل نتایج حاصل از استفاده از مدل میانگین T_2 (SDR) در سازندهای حاوی هیدروکربور، همراه با مقداری خطا است (دلیرسیندر، ۲۰۰۴). با توجه به همه خطاهای اجتناب‌ناپذیر موجود در استفاده از مدل‌های متداول تعیین تراوایی با استفاده از داده‌های نگار NMR، کوچک بودن ضرایب همبستگی به دست آمده از این مدل‌ها امری طبیعی است. همچنین افزایش ضریب همبستگی در برآورد تراوایی در صورت استفاده از نمونه‌های هر واحد شارش هیدرولیکی به صورت جداگانه، به این دلیل است که در هر واحد شارش نمونه‌ها از نظر طبقه‌بندی آرچی به یکدیگر نزدیک تر هستند. تاکید طبقه‌بندی آرچی بیشتر بر ویژگی‌های مربوط به جریان شاره‌ها، یعنی تراوایی و تراوایی نسبی است، بنابراین، این افزایش در ضریب همبستگی امری منطقی به نظر می‌آید.

به اطلاعات به دست آمده از گزارش بررسی مغزه و طبقه بندی های آرچی بیان شده در بخش مقدمه، می توان دریافت که سازند کربناته مورد نظر تحت تاثیر فرایندهای دیازیزی (diagenetic) قرار گرفته است. از طرفی نگارهای متداولی که به منظور تعیین تخلخل سازند از آنها استفاده می شود، به دلیل تاثیر گرفتن از کلیه هیدروژن های درون سازند، نمی توانند حاوی اطلاعات مربوط به اندازه حفره و اندازه گلوگاه حفره باشند. در صورتی که تخلخل حاصل از نگار تشدید مغناطیسی هسته ای، به دلیل نحوه اندازه گیری و حساسیت به هیدروژن شاره ها آزاد درون سازند، در برگیرنده اطلاعات مربوط به اندازه حفره و گلوگاه نیز هست. بنابراین در صورت استفاده از تخلخل حاصل از نگار NMR در حکم ورودی شبکه عصبی در تعیین تراوایی، در واقع تاثیر اندازه حفره ها و گلوگاه ها نیز در نظر گرفته می شود و از این رو، ضریب همبستگی نیز افزایش می یابد.

۶ نتیجه گیری

سه مدل متداول شاره آزاد (کوتس)، میانگین T_2 (SDR) و سوانسون بر آورد تراوایی بر پایه روش NMR، به دلیل محدود بودن پارامترهای مورد استفاده در آنها برای به دست آوردن بر آورد دقیقی از تراوایی در سازند کربناته سروک فوقانی مورد بررسی که دارای شکستگی و حاوی نفت سنگین است، مناسب نیستند. در این نوع سازندهای کربناته و به خصوص دارای شکستگی، نیاز به بررسی ها و آزمایش های بیشتر تشدید مغناطیسی هسته ای روی نمونه های مغزه برای به دست آوردن مدل های دقیق تر بر پایه نگار برداری NMR در تعیین تراوایی است. هر چند بدون این بررسی ها هم می توان از این مدل ها به مثابه روشی موثر در تعیین روند افزایش و کاهش تراوایی بر حسب عمق در محل چاه استفاده کرد. همچنین استفاده از نمونه هایی که در آنها تقسیم بندی واحدهای شارش

به نظر می رسد که با توجه به نبود داده های آزمایشگاهی NMR و همچنین زمان بر و پرهزینه بودن و در نتیجه ناتوانی در تبیین مدل مناسب تعیین تراوایی در سازند مورد نظر، بهترین راه، استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی باشد. با مقایسه ضرایب همبستگی شکل های ۹ و ۱۰ با شکل های ۲ تا ۷ نیز می توان به افزایش ضریب همبستگی در تراوایی های حاصل از شبکه نسبت به مدل های متداول نگار NMR پی برد. علت این امر آن است که شبکه های عصبی مصنوعی قادر به تشخیص روابط پیچیده بین پارامترهای ورودی و خروجی هستند و خود در زمان مناسب مدل مناسب بین آنها را پیدا می کنند. مهم ترین مسئله در استفاده از روش های عصبی مصنوعی، استفاده از الگوهای مناسب آموزشی است. باید در گزینش متغیرهای ورودی به گونه ای عمل کرد که اکثر عوامل موثر بر خروجی (تراوایی) را در بر داشته باشد. البته به دلیل پیچیدگی ذاتی تراوایی، به خصوص در سازندهای کربناته که تابع عوامل بسیاری زیادی هستند، نباید انتظار رسیدن به نتایج ایده آل (نتایجی مانند پیش بینی تخلخل با استفاده از شبکه عصبی) را داشت.

همچنین ضرایب همبستگی به دست آمده از مدل اول شبکه عصبی مصنوعی به صورت قابل ملاحظه ای بیش از ضرایب همبستگی مدل دوم شبکه است. علت بیشتر بودن ضرایب همبستگی مدل اول در مقایسه با مدل دوم، مربوط به تخلخل مورد استفاده در هر کدام از این مدل ها است. تخلخل همواره یکی از مهم ترین پارامترهای تاثیر گذار در تعیین تراوایی است و حتی در سازندهای ماسه سنگی به منظور تعیین رابطه تراوایی، از منحنی تخلخل بر حسب تراوایی استفاده می شود. در مورد سازندهای کربناته ای که تحت تاثیر فرایندهای دیازیزی قرار می گیرند، نبود همبستگی بین تخلخل و تراوایی ایجاد می شود اما همچنان بین اندازه حفره و نیز اندازه گلوگاه حفره با تراوایی، همبستگی وجود دارد (فلوری و همکاران، ۲۰۰۱). با توجه

- conventional logs: Application to a real example, SPE International Thermal Operations and Heavy oil Symposium and Western Regional Meeting, SPE 86939.
- Demuth, H. and Beale, M., 2002, Neural network toolbox for use with MATLAB, User's guide, Version 4.
- Ehrlich, R., Crabtree, S. J., Horkowitz, K. O. and Horkowitz, J. P., 1991, Petrography and reservoir physics I: Objective classification of reservoir porosity, AAPG Bull, **75**, 1547-1562.
- Fleury, M., Deflandre, F. and Godefroy, S., 2001, Validity of permeability prediction from NMR measurements, C.R. Acad. Sci. Paris, Chemistry, **4**, 869-872.
- Hassall, J. K., Ferraris, P., Al-Raisi, M., Hurley, N. F., Boyd, A. and Allen, D. F., 2004, Comparison of permeability predictors from NMR, formation image and other logs in a carbonate reservoir, 11th Abu Dhabi International Pet. Exhibition and Conf., SPE 88683.
- Johnson, W. W., 1994, Permeability determination from well logs and core data. Presented at the SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery conf. held in Midland, SPE 27647.
- Kenyon, W. E., 1997, Petrophysical principles of applications of NMR logging, The Log Analyst, **38**, 21-34.
- Marschall, D., Gardner, J. and Curby, F.M., 1997, MR laboratory measurements requirements to assure successful measurements that will enhance MRI log interpretation, International Symp. Proceedings, SPWLA, Society of Core Analysts Chapter-at-Large, SCA-9704.
- Morriss, C. E., Freedman, R., Straley, C., Johnston, M., Vinegar, N.J. and Tutunjian, P.N., 1997, Hydrocarbon saturation and viscosity estimation from NMR logging in the Belridge Diatomit, The Log Analyst, **38**, 44-59.
- Randall, L., Green, K. and Prichard, T., 1999, Estimation of capillary bound water in carbonate reservoir samples by NMR imaging and relaxation measurements, SCA-9947.
- Swanson, B. F., 1981, a simple correlation between permeabilities and mercury capillary pressure, J. of Pet. Tech., **67**(11), 2498-2504.
- Westphal, H., Surholt, I., Kiesl, C., Thern, H. F. and Kruspe, T., 2005, NMR measurements in carbonate rocks: Problems and an approach to a solution, Pure Appl. Geophys., **162**, 549-570.
- هیدرولیکی صورت گرفته است، سبب بهبود نسبی نتایج در تعیین کمی تراوایی سازند و افزایش ضریب همبستگی در مقایسه با زمانی می‌شود که از تقسیم‌بندی واحدهای شارش هیدرولیکی نمونه‌ها استفاده نمی‌شود. برای تعیین مقادیر کمی تراوایی سازند پیش گفته، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بر پایه داده‌های NMR در مقایسه با استفاده از مدل‌های متداول تشدید مغناطیسی هسته‌ای، روشی مناسب به نظر می‌رسد. علت این امر آن است که شبکه عصبی مصنوعی قادر به درک روابط پیچیده موجود بین تراوایی و پارامترهای نگار NMR است. علاوه بر این استفاده از نتایج تراوایی حاصل از نگارهای قراردادی و NMR به صورت هم‌زمان در حکم ورودی شبکه در مقایسه با استفاده از نگارهای قراردادی در حکم ورودی، منجر به کاهش خطا و افزایش قابل ملاحظه‌ای در ضریب همبستگی بین تراوایی حاصل از مغزه و تراوایی محاسبه شده در سازند سروک فوقانی مورد بررسی می‌شود.
- منابع
- کاظم‌زاده، ع.، نبی‌بیدهندی، م. و رضایی، م.، ۱۳۸۷، مطالعه مقاومت ویژه سازندی با استفاده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته، مجله علوم دانشگاه تهران، (۱) ۳۴، ۱۳-۲۱.
- Allen, D. F., Boyd, A., Massey, J., Fordham, E. J., Amabeoku, M. O., Kenyon, W. E. and Ward, W. B., 2001, The practical application of NMR logging in carbonates: 3 case studies, SPWLA 42nd Annual Logging Symp., Houston, Texas, Paper K, 14 pp.
- Archie, G. E., 1952, Description of pore size distribution in carbonate rocks, Am. Assoc. Petroleum geologists Bull., **36**(2), 278-298.
- Babadagli, T. and Al-Salmi, S., 2004, A review of permeability-prediction methods for carbonate reservoirs using well-log data, SPE Reservoir Evaluation and Engineering, **7**(2), 75-88.
- Coates, G. R., Xiao, L. and Prammer, M. G., 1999, NMR logging principles and applications, Halliburton Energy Services Publication.
- Deleersnyder, M., 2004, In-situ heavy-oils viscosity determination using NMR and