

تخمین شاخص شکنندگی با استفاده از وارون‌سازی پس از برانبارش داده‌های لرزه‌ای با مثالی از حوضه پرت واقع در استرالیای غربی

مسعود سراج‌امانی^۱، رامین نیکروز^{۲*} و علی کدخدائی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت: ۹۸/۱۱/۱۵، پذیرش نهایی: ۹۹/۷/۸)

چکیده

شکنندگی یکی از مهم‌ترین خصوصیات سنگ می‌باشد. تاکنون روشی مستقیم و استاندارد برای به‌دست آوردن شاخص شکنندگی ارائه نشده است. از شاخص شکنندگی بر اساس پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوره و مقاومت کششی جهت ارزیابی شکنندگی استفاده می‌شود. هدف از این مطالعه بررسی مفاهیم شکنندگی ارائه‌شده توسط محققین و استفاده از روش وارون‌سازی لرزه‌ای، آنالیز چندشانگری و شبکه عصبی در میدان ویچرنج (Whicher-Range) واقع در حوضه پرت (Perth Basin) استرالیای غربی می‌باشد. به این منظور دو چاه و یک مقطع لرزه‌ای از میدان ویچرنج مورد استفاده قرار گرفت. کمترین شاخص شکنندگی در چاه اول و دوم که با فاصله ۱ کیلومتری از هم حفاری شدند، به ترتیب با استفاده از مفهوم B_4 برابر $1/69$ و $1/67$ مگاپاسکال که بیانگر شکنندگی کم و بیشترین مقدار آن برابر $39/78$ و $48/15$ مگاپاسکال که بیانگر شکنندگی زیاد و از نظر حفاری در رتبه حفاری بسیار سخت می‌باشد. در مرحله بعد با استفاده از استخراج موجک و رسم مدل زمین‌شناسی، مدل‌سازی اولیه انجام و سپس امپدانس صوتی حاصل از فرایند وارون‌سازی در کنار دیگر نشانگرها در راستای ساخت ترکیب بهینه از نشانگرها جهت تخمین شاخص شکنندگی استفاده شد. از سه نوع الگوریتم شبکه عصبی جهت تخمین پارامتر هدف از ترکیب بهینه نشانگرهای موجود استفاده می‌شود که به کمک نرم‌افزار همپسون-راسل و نشانگرهای بهینه‌ای، الگوریتم شبکه عصبی تهیه و در نهایت آنالیز چند نشانگری با سه الگوریتم شبکه عصبی مقایسه می‌شود و نتایج بیانگر ضریب همبستگی بیشتر شبکه عصبی احتمالی نسبت به آنالیز چند نشانگری جهت تعیین شاخص شکنندگی است.

واژه‌های کلیدی: شاخص شکنندگی، مقاومت فشاری، وارون‌سازی، نشانگرهای لرزه‌ای، شبکه عصبی، پرت استرالیا.

۱. مقدمه

آن بسیار ناچیز باشد، به‌رغم شکست نرم که در آن قبل از شکست، تغییر اشکال پلاستیک قابل توجهی بروز می‌دهد (رمزی، ۱۹۶۷). از دیگر تعاریف شکنندگی سنگ که به‌صورت عمده مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است می‌توان به از بین رفتن انسجام سنگ در تنش‌های بالاتر از میزان حد تسلیم سنگ اشاره کرد.

مورلی (۱۹۵۴) شکنندگی را عدم وجود شکل‌پذیری (حالت کشسانی تحت تأثیر تنش) بیان کرد. هنتی (۱۹۶۶) شکنندگی را به‌صورت عدم شکل‌پذیری یا عکس شکل‌پذیری تعریف کرد. رمزی (۱۹۶۷) از جمله مهم‌ترین تعریف موجود برای شاخص شکنندگی را بر

شکنندگی یکی از بارزترین خصوصیات مکانیکی سنگ است که تأثیر فراوانی در فرایند شکست سنگ و پاسخ عامه سنگ به فعالیت‌های حفاری و عمرانی دارد. شکنندگی نه تنها به‌عنوان یک خصوصیت بلکه تلفیقی از خصوصیات سنگ بیان می‌شود که تأثیر فراوانی در کنترل فرایند شکست سنگ دارد. به‌طور کلی سنگ با خاصیت شکنندگی بیشتر در مقایسه با سنگ‌های نرم‌تر در زمان شکست، مقادیر تغییر شکل پلاستیک کمتری از خود نشان می‌دهد (مورلی، ۱۹۵۴). به‌عبارتی دیگر در مکانیک سنگ، شکنندگی به نوعی از شکستی اطلاق می‌شود که در طی آن تغییر شکل دائمی وجود نداشته باشد و یا میزان

اساس چسبندگی بیان کرد. در این تعریف، هنگامی که چسبندگی داخلی مواد سنگی که در محدوده الاستیک تغییر شکل می‌دهند، کاهش یابد یا از بین برود، بیان می‌شود که سنگ رفتاری شکننده دارد. اوبرت و دوال (۱۹۶۷) موادی همچون چدن و بسیاری از سنگ‌ها را که معمولاً به صورت کششی یا فقط اندکی بعد از تنش تسلیم می‌شکند را مواد شکننده نامید. به عبارت دیگر می‌توان شکنندگی را جزء خواص موادی بیان کرد که به صورت کششی با مقداری جریان‌یافتگی یا بدون استفاده از جریان‌یافتگی می‌شکند. هوکا و داس (۱۹۷۴) اذعان داشتند که مفهوم شکنندگی به طور دقیق بیان نشده است. با این حال آنچه برای سنگ‌هایی با میزان شکنندگی بالا به دست آمد، عبارت است از: قابلیت کشسانی پایین، شکست کششی، بالا بودن نسبت مقاومت فشارشی به مقاومت کششی، بالا بودن خاصیت ارتجاعی، زاویه اصطکاک داخلی بالا. گوکتان (۱۹۹۱) بیان کرد که سنگ مستعد شکنندگی، انرژی ویژه کمتری را نسبت به سنگ با شکنندگی کمتر، جهت برش نیاز دارد. اندرو (۱۹۹۵) در حدود ۲۰ فرمول و تعاریف مختلف از شکنندگی سنگ را بررسی کرده که می‌توان آن‌را در نوشته‌ها یافت. آلتینداگ (۲۰۰۳) میل به شکستگی سنگ به همراه عدم شکل‌پذیری که در تنش‌های پایین قابل رؤیت است را به عنوان شکنندگی تعریف کرد. ایلماز و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که به نظر می‌رسد اندازه دانه عمدتاً بر روی مقادیر شاخص شکنندگی نسبی آنها در سنگ‌های گرانی تأثیر می‌گذارد.

خاصیت شکنندگی تأثیر قابل توجهی بر روی فرایند شکست سنگ‌ها دارد. به عنوان مثال در قسمت استخراج نفت از سنگ شیل با استفاده از روش شکست هیدرولیکی، مقدار شکستگی سنگ که بر روی میزان برداشت نفت مؤثر است، به وسیله فشار تزریق و شکنندگی سنگ کنترل می‌شود. نمونه برجسته‌ای از فرایند شکنندگی که در آن به میزان قابل توجهی انرژی آزادسازی می‌شود، پدیده انفجار سنگ است که به طور کلی در پروژه‌های

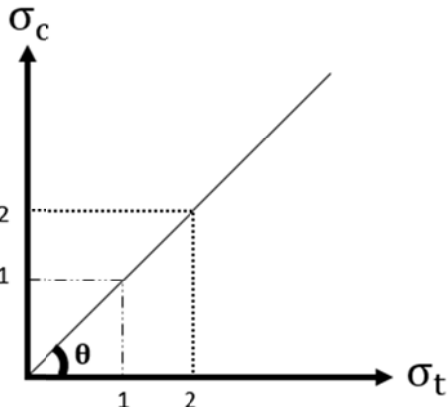
معدنی و تونلی که در اعماق انجام می‌شوند، اتفاق می‌افتد (منگ و همکاران، ۲۰۱۵). روابط بین قابلیت حفاری و میزان شکنندگی به مهندسان در کارهای حفاری کمک فراوانی می‌کند. از طرفی تقاضا در خصوص تخمین پارامترهای سنگ که مهم‌ترین داده‌ها جهت برآورد اعتبار و انجام پروژه و برنامه‌ریزی جهت حفاری فضاهای زیرزمینی به حساب می‌آید، روز به روز در حال افزایش است. حفاری سریع و مقرون به صرفه که به خواصی از قبیل جنس کانی و مکانیک سنگ و تجهیزات حفاری بستگی دارد، نقش به‌سزایی در کاهش هزینه‌ها و افزایش میزان استخراج دارد (اوزفرا و همکاران، ۲۰۱۶). شاخص شکنندگی و مقاومت فشاری سنگ جزء پارامترهای مؤثر در عملکرد دستگاه در حین حفاری می‌باشند. سنگ‌ها تحت فشار و کشش رفتاری شکننده از خود نشان می‌دهند از این رو تعیین شکنندگی سنگ از اهمیت بالایی در پروژه‌های عملی مکانیک سنگ، سازه‌های زیرزمینی و مخازن دارای پسماندهای هسته‌ای دارد (یاگیز، ۲۰۰۹).

به صورت کلی شکنندگی تابعی از مقاومت بوده و بیانگر مقاومت سنگ در برابر تغییر شکل در بازه الاستیک می‌باشد (آلتینداگ، ۲۰۱۰). با این حال روش مستقیم و استاندارد برای اندازه‌گیری شکنندگی موجود نیست ولی به طور غیرمستقیم می‌توان با استفاده از بعضی روابط در خصوص خواص سنگ مانند نسبت‌های مختلف مقاومت فشارشی و کششی سنگ برای تعیین مفهوم شکنندگی استفاده کرد (گوکتان، ۱۹۹۱؛ لاون، ۱۹۷۹). به دلیل اختلاف بیان مفهوم شکنندگی توسط محققین مختلف هنوز قانون کلی برای اندازه‌گیری میزان شکنندگی در زمینه مکانیک سنگ وجود ندارد (یاگیز و گوکچوگلو، ۲۰۱۰). معمولاً دو پارامتر مهم برای محاسبه شاخص شکنندگی مقاومت فشارشی تک‌محوره و مقاومت کششی می‌باشد که در ادامه به توصیف رایج‌ترین روابط جهت می‌پردازیم.

۲. مفاهیم شکنندگی
تلاش‌های فراوانی برای مفهوم شکنندگی انجام شده است، ولی نظر مشترک و کاملی در خصوص مفاهیم بین محققان وجود ندارد (آلتینداگ، ۲۰۱۰). از مقاومت فشارشی تک‌محوره و مقاومت کششی در مطالعات مختلف جهت توسعه شاخص شکنندگی استفاده شده است.

$$B_1 = \tan \theta = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (3)$$

به صورت زیر می‌توان بیان کرد (وطن‌خواه، ۱۳۹۶):
شاخص شکنندگی B_1 یک سنگ، با تاثرات زاویه خط مماس بر نمودار مقاومت فشارشی تک‌محوره-مقاومت کششی برابر است (وطن‌خواه، ۱۳۹۶):



شکل ۱. نمودار مقاومت فشارشی تک‌محوره - مقاومت کششی.

مقاومت فشارشی تک‌محوره، پارامتری مهم جهت به‌دست آوردن مقاومت یک سنگ است و کاربرد زیادی در مطالعات ژئومکانیک دارد. با استفاده از داده‌های نمودار صوتی فشارشی به‌دست آمده از ابزار دوقطبی یا نمودار صوتی معمولی می‌توان مقاومت فشارشی تک‌محوره را به‌دست آورد. رابطه ۱ در بخشی از یک پروژه تحقیقاتی که توسط انجمن زغال‌سنگ استرالیا انجام شده است، مورد استفاده قرار گرفته و می‌توان آن را برای ماسه سنگ‌هایی با دانه‌بندی متوسط در حالت‌های تحکیم‌یافته و تحکیم‌نیافته با میزان نفوذپذیری و تخلخل بالا به کار گرفت که مدت زمان گذر موج فشارشی (DT) بر حسب میکرو ثانیه بر فوت و واحد مقاومت فشارشی تک‌محوره (Uniaxial Compressive Strength) بر حسب مگاپاسکال است (مک نالی، ۱۹۸۷):

$$UCS(MPa) = 1200 \exp(-0.036 \times DT) \quad (1)$$

نسبت مقاومت فشارشی تک‌محوره به مقاومت کششی که بیانگر شاخص شکنندگی است، به‌طور وسیعی در حفاری‌های سنگ و مکانیک سنگ کاربرد دارد. این شاخص با شکنندگی رابطه مستقیمی دارد، به‌عبارت دیگر با افزایش مقدار شاخص، میزان شکنندگی سنگ بیشتر می‌شود (رابطه ۳).

$$B_2 = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (4)$$

مقاومت کششی (Tensile Strength) که با نماد σ_t یا TS نشان داده می‌شود (رابطه ۲)، میزان مقاومت یک سنگ در برابر تنش کششی بیان شده و به‌طور تقریبی یک‌دهم مقاومت فشارشی تک‌محوره است (کدخدائی ایلخچی، ۱۳۹۷):

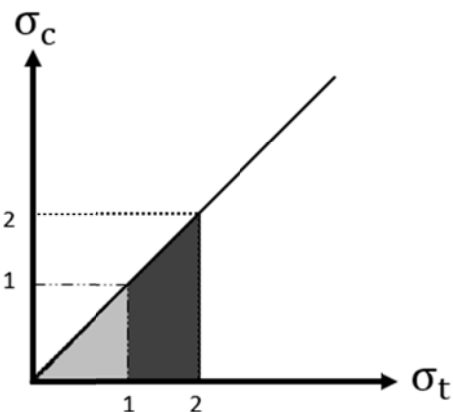
$$TS(MPa) = 0.1 \times UCS \quad (2)$$

$$B_3 = \frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2}, (MPa)^2 \quad (5)$$

از شاخص شکنندگی B_2 جهت اندازه‌گیری میزان شکنندگی مواد شکننده مانند زغال‌سنگ استفاده می‌شود (رابطه ۴).
شاخص شکنندگی B_3 که سطح زیر منحنی مقاومت فشارشی تک‌محوره و مقاومت کششی برزلی تعریف می‌شود (شکل ۲) که ناحیه زیر نمودار مقاومت فشارشی - مقاومت کششی (شاخص B_1) می‌تواند بسیار مفید واقع شود (وطن‌خواه، ۱۳۹۶):

در اصل شکنندگی از مقاومت که نشان‌دهنده استحکام سنگ در محدوده الاستیک است، تبعیت می‌کند (آلتینداگ، ۲۰۱۰). مفهوم شکنندگی سنگ‌ها را با استفاده از نسبت‌های مختلف مقاومت فشارشی تک‌محوره

است. در حدود نیمی از این حوضه رسوبی تا عمق ۱ کیلومتری در دریا قرار دارد. این حوضه در جنوب غرب استرالیا با مقادیر ویژه‌ای از ذخایر هیدروکربنی که قسمت وسیعی از مخازن گازی نامتعارف را داراست شناخته می‌شود. پژوهش در زمینه سیستم نفتی این حوضه بیانگر وجود سنگ‌های منشأ کاملاً وسیع و فراوانی سنگ‌های مخزن و ساختارهایی با گستره زمانی مناسب جهت وجود تله‌های نفتی است (جونز و الیس، ۲۰۰۰). رسوبات و سنگ‌های آواری قاره‌ای از دوره پرمین تا حال حاضر مهم‌ترین قسمت این حوضه را تشکیل می‌دهد (شکل ۳- الف). میدان گازی ویچرنج در ۲۲ کیلومتری جنوب شهر باسلتون (Busselton) و ۲۰۰ کیلومتری جنوب شهر پرت قرار گرفته است (شکل ۳-ب). این میدان توسط شرکت Union Oil Development در سال ۱۹۶۸ کشف شد (شریف‌زاده، ۲۰۰۸؛ کرسلا و بکھوس، ۲۰۰۰). چاه اول (Whicher-Range1) به وسیله‌ی شرکت Union Oil Development باعث کشف ماسه سنگ‌های گازی سازند ویلسپی از گروه سو (Willespie Formation) در محدوده مرکزی ساختار میدان شد که به دلیل پایین بودن جریان گاز در این چاه شکست هیدرولیکی انجام شد که نتیجه‌ای در بهبود جریان گاز به همراه نداشت. چاه دوم (Whicher-Range2) در سال ۱۹۸۰ به فاصله ۱ کیلومتری از جنوب شرق چاه اول توسط Mesa Australia Limited حفاری شد. از دیدگاه ساختمانی، قسمت بالایی سازند ویلسپی، در چاه دوم حدود ۲۳ متر بالاتر از چاه اول قرار دارد. بر اساس آزمایشات و مطالعات میزان جریان گاز و نفوذپذیری در این چاه از چاه اول نیز کمتر بود. بر اساس نتایج حاصل از حفاری در دو چاه دیگر وجود گاز در مخزن تأیید شد. تحقیقات در زمینه سنگ مخزن، عامل کاهش میزان تولید در این چاه‌ها را آسیب سازند توسط سیالات حفاری بیان کرد (کدخدائی ایلخچی، ۱۳۹۳).



شکل ۲. نمودار مقاومت فشارشی تک‌محوره-مقاومت کششی.

همچنین شاخص B_4 بر اساس مقادیر مقاومت فشارشی تک‌محوره و مقاومت کششی به صورت رابطه ۶ بیان می‌شود (آلتینداگ، ۲۰۱۰):

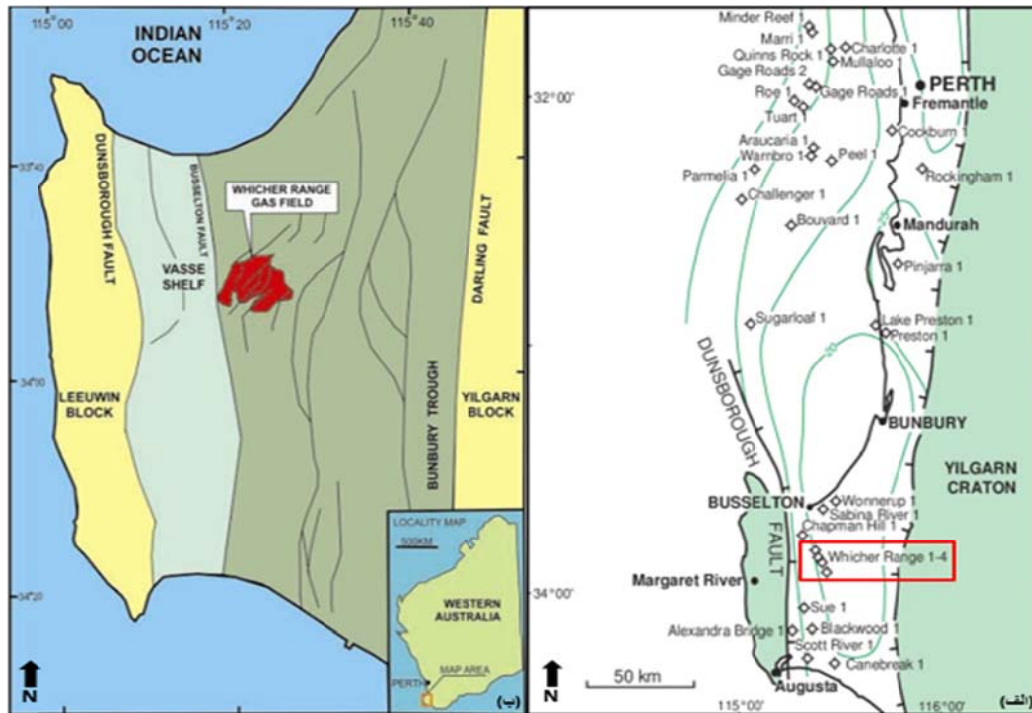
$$B_4 = \sqrt{B_3} = \sqrt{\frac{\sigma_c \times \sigma_t}{2}}, (MPa) \quad (6)$$

در این تحقیق از رابطه B_4 جهت بررسی شاخص شکنندگی استفاده شده است و میزان شکنندگی و قابلیت حفاری سنگ‌ها بر اساس مقدار شاخص شکنندگی آنها در جدول ۱ مشاهده می‌شود:

جدول ۱. تعیین شکنندگی و قابلیت حفاری در سنگ‌ها بر اساس رابطه B_4 (آلتینداگ، ۲۰۱۰).

مقادیر شاخص شکنندگی	میزان شکنندگی	قابلیت حفاری
۰-۱۰	شکنندگی کم	بسیار راحت
۱۰-۱۵	شکنندگی متوسط	راحت
۱۵-۲۰	شکننده	متوسط
۲۰-۲۵	شکندگی زیاد	سخت
۲۵<	شکندگی بسیار زیاد	بسیار سخت

۳. موقعیت زمین‌شناسی میدان ویچرنج (Whicher-Range) واقع در حوضه پرت (Perth Basin) حوضه رسوبی پرت در حدود ۱۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع در جهت شمال-جنوب از حاشیه استرالیای غربی کشیده شده



(ب)

(الف)

شکل ۳. (الف) شمای کلی از حوضه پرت واقع در استرالیا غربی (هال و همکاران، ۱۹۹۲) (ب) موقعیت میدان گازی ویچرنج در حوضه پرت (شریف‌زاده، ۲۰۰۷).

نتیجه هم‌میخت یک موجک با دنباله‌ای از ضریب بازتاب می‌باشد و با نوفه جمع می‌شود و توسط رابطه ۸ نشان داده می‌شود:

$$S(t) = W(t) * R(t) + N(t) \quad (8)$$

که در رابطه ذکر شده S لرزه‌نگاشت مصنوعی، W موجک لرزه‌ای، R دنباله ضریب بازتاب و N نوفه می‌باشند. در حالت ایده‌آل یک مرز امپدانس صوتی روی مقطع لرزه‌ای مانند یک خار (Spike) مشخص می‌شود. با این فرض که پرتوی لرزه‌ای عمود بر مرز بتابد، عبارت مربوط به دنباله‌ی ضریب بازتاب یک رویداد معمولی به صورت رابطه ۹ خواهد بود:

$$R_i = \frac{\rho_i V_i - \rho_{i-1} V_{i-1}}{\rho_i V_i + \rho_{i-1} V_{i-1}} = \frac{Z_i - Z_{i-1}}{Z_i + Z_{i-1}} \quad (9)$$

که R دنباله ضریب بازتاب مرز بازتابی، V سرعت لایه و ρ چگالی لایه است. عمل وارون‌سازی جهت برآورد موجک وارون و انجام وارون‌سازی لرزه‌ای می‌باشد. رابطه

۴. وارون‌سازی لرزه‌ای

روش وارون‌سازی لرزه‌ای (Seismic Inversion) می‌تواند به‌عنوان روشی مطمئن برای تخمین کمی از خصوصیات مخزن و برای به‌دست آوردن مقادیر کمی امپدانس صوتی (Acoustic Impedance) از داده‌های لرزه‌ای استفاده شود. وارون‌سازی لرزه‌ای فرایندی است که ژئوفیزیکدانان در تلاشند تا با استفاده از داده‌های لرزه‌ای بازتابی، امپدانس صوتی لایه‌های سنگ در زمین را به‌دست بیاورند. به‌طور کلی امپدانس صوتی حاصل سرعت و چگالی می‌باشد و رابطه‌ای قوی با خصوصیات پتروفیزیکی مانند سنگ‌شناسی و تخلخل دارد. برای انجام برگردان لرزه‌ای لازم است که شکل پالس لرزه‌ای تخمین زده شود تا امپدانس صوتی به‌دست آید (کدخدائی ایلخچی، ۱۳۸۸). امپدانس صوتی معمولاً به‌صورت معادله ۷ تعریف می‌شود (جعفری و همکاران، ۲۰۱۷):

$$Z_p = \rho V_p \quad (7)$$

که V_p سرعت موج P و ρ چگالی می‌باشد. ثبت لرزه‌ای

ابتدایی‌ترین مرحله به این صورت است که باید بین داده‌های لرزه‌ای و نمودارهای چاه تطابق ایجاد کنیم. داده‌های لرزه‌ای در حوزه‌ی زمان (بر حسب ثانیه) برداشت می‌شوند و در طرف دیگر داده‌های چاه‌پیمایی در حوزه‌ی عمق (بر حسب متر) برداشت می‌شوند. تبدیل عمق به زمان فرایندی است که به ما اجازه می‌دهد تا نمودارهای چاه به‌همراه سرسازندهای معین را با داده‌های لرزه‌ای در زمان مقایسه کنیم (کدخدائی ایلخچی، ۱۳۸۸) که این عمل با استفاده از داده‌های شات کنترل، انجام می‌شود. داده‌های شات کنترل مجموعه‌ای از اطلاعات پیمایشی هستند که در محل چاه‌های حفاری شده حاصل می‌شوند و در نقش پل ارتباطی میان اطلاعات لرزه‌ای و اطلاعات چاه‌پیمایی عمل می‌کنند (جعفری، ۱۳۹۵). پس از بارگذاری داده‌ها، رابطه‌ی عمق-زمان بر اساس داده‌های شات کنترل تصحیح می‌شود و هر دو داده (هم لرزه، هم چاه) هم‌حوزه می‌شوند. یکی از مهم‌ترین بخش‌های فرایند وارون‌سازی لرزه‌ای، استخراج موجک می‌باشد (شکل ۵) و می‌توان گفت موجک حاصله از تلفیق داده‌های لرزه‌ای و چاه‌پیمایی، صحت بالایی دارد. بنابراین استخراج پیاپی موجک و ایجاد لرزه‌نگاشت برای قرار گرفتن داده‌های چاه در حوزه‌ی زمان، لازم است (کدخدائی ایلخچی، ۱۳۸۸).

موجک وارون‌شده در حوزه‌ی زمان می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۱۰ به‌دست آید:

$$w(t) * a(t) = \delta(t) \quad (10)$$

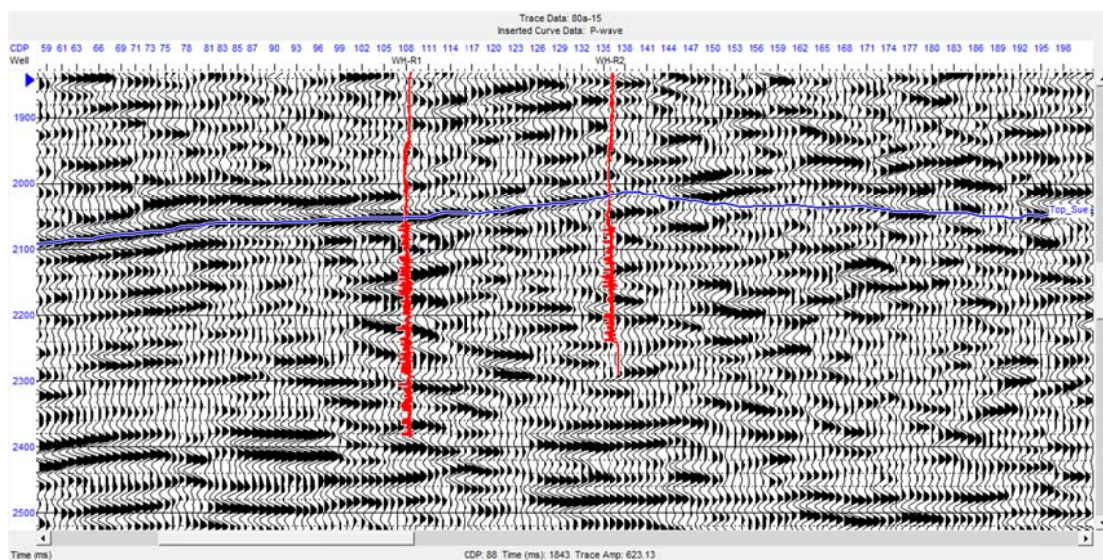
که در آن a موجک وارون‌شده و δ تابع ضربه‌ی واحد است. با هم‌میخت موجک وارون‌شده a و رد لرزه S ، دنباله‌ی ضریب بازتاب به‌صورت رابطه‌ی ۱۱ خواهد بود:

$$R(t) = S(t) * a(t) \quad (11)$$

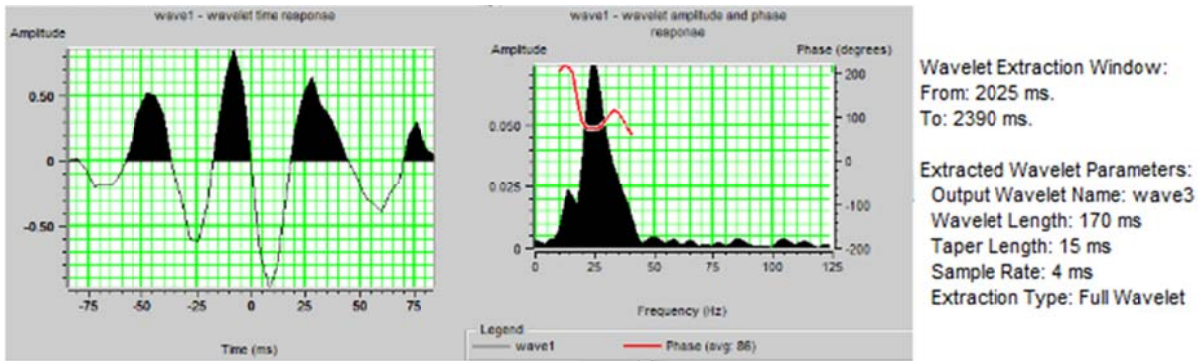
در سال ۱۹۷۹، لیندسز نشان داد که اگر سیگنال لرزه‌ای ثبت‌شده با استفاده از رابطه‌ی ۹ بیان شود، می‌توان این معادله را برای بازسازی امپدانس P با استفاده از رابطه‌ی بازگشتی وارون کنیم. در آخر دنباله‌ی ضرایب بازتاب به‌صورت بازگشتی محاسبه شده و پس از آن مقادیر امپدانس موج هر لایه می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۱۲ نوشته شود:

$$Z_{i+1} = \rho_{i+1} V_{i+1} = \rho_i V_i \frac{1+R_i}{1-R_i} = Z_i \frac{1+R_i}{1-R_i} \quad (12)$$

بنابراین می‌توانیم ضریب بازتاب را در بخش لرزه‌ای تعیین کنیم تا اطلاعات بیشتری در بخش چینه‌شناسی نیز پیدا کنیم (جعفری و همکاران، ۲۰۱۷). نقطه‌ی شروع فرایند وارون‌سازی، داشتن داده‌های لرزه‌ای تماماً برانبارش‌شده، مدل سرعت فاصله‌ای و افق‌های لرزه‌ای است (شکل ۴).



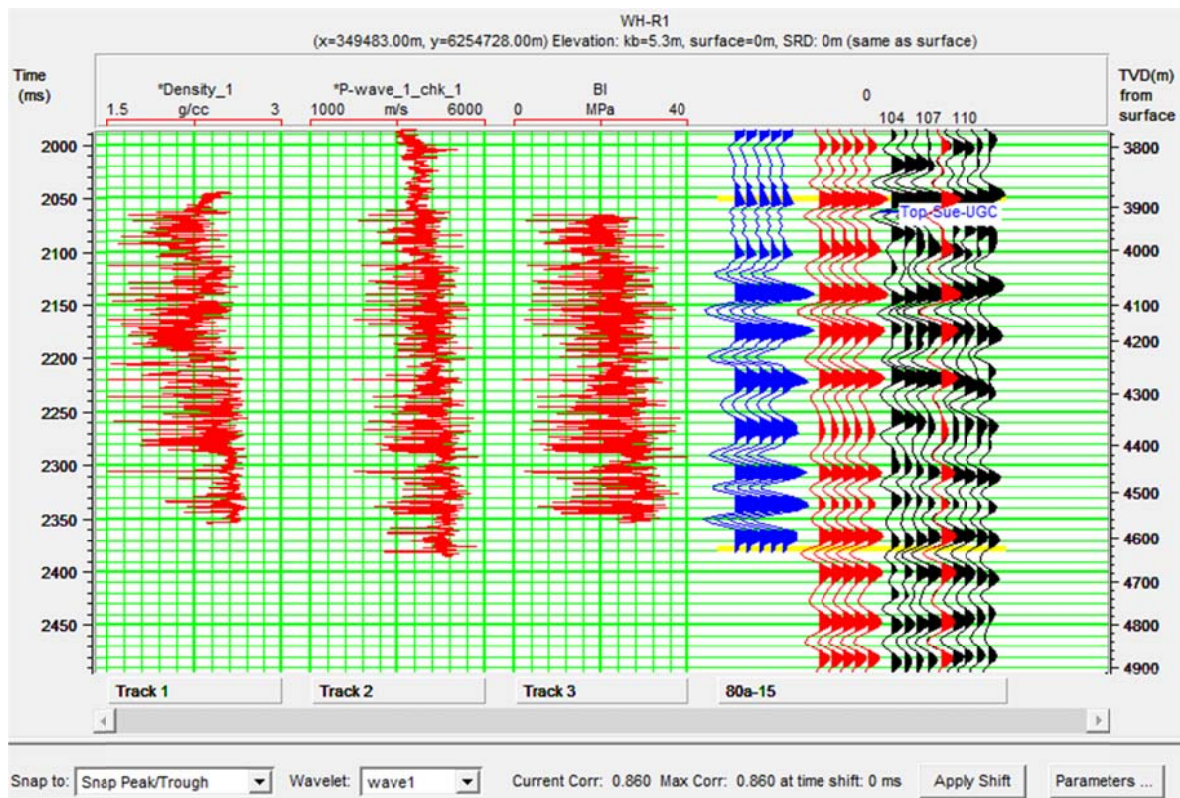
شکل ۴. مقطع لرزه‌ای در محل چاه‌های WH-R2 و WH-R1. منحنی‌های قرمز چاه‌ها می‌باشد و خط آبی افق لرزه‌ای سازند ویلسپی (Willespie Formation) است.



شکل ۵. استخراج موجک در محل چاه WH-R1.

مختلف از قبیل کشیدگی، فشردگی و جابجایی با لرزه‌نگاشت مرکب مطابقت داده می‌شود تا جایی که میزان همبستگی بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و لرزه‌نگاشت مرکب نتیجه قابل قبولی از خود نشان دهد (جعفری، ۱۳۹۵). برای نمونه در یکی از چاه‌های میدان ویچرنج میزان همبستگی بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و لرزه‌نگاشت مرکب در حدود $0/۸۶$ می‌باشد که نتیجه قابل قبولی است (شکل ۶).

در مرحله بعد باید برای دو چاه WH-R1 و WH-R2 لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی ایجاد کنیم. ابتدا با استفاده از لاگ صوتی تصحیح‌شده و چگالی، مدلی از ضرایب بازتاب و تغییرات امپدانس صوتی در محل چاه‌ها، مطابقت داده می‌شود. نتیجه همامیخت موجک لرزه‌ای استخراج شده و سری ضرایب بازتابی حاصله از ترکیب لاگ صوتی تصحیح‌شده و چگالی برابر لرزه‌نگاشت مصنوعی است. لرزه‌نگاشت مصنوعی با استفاده از فرایندهای



شکل ۶. تطابق داده‌های چاه و لرزه با میزان همبستگی ۸۶ درصد بین لرزه‌نگاشت مصنوعی و لرزه‌نگاشت مرکب در محل چاه WH-R1.

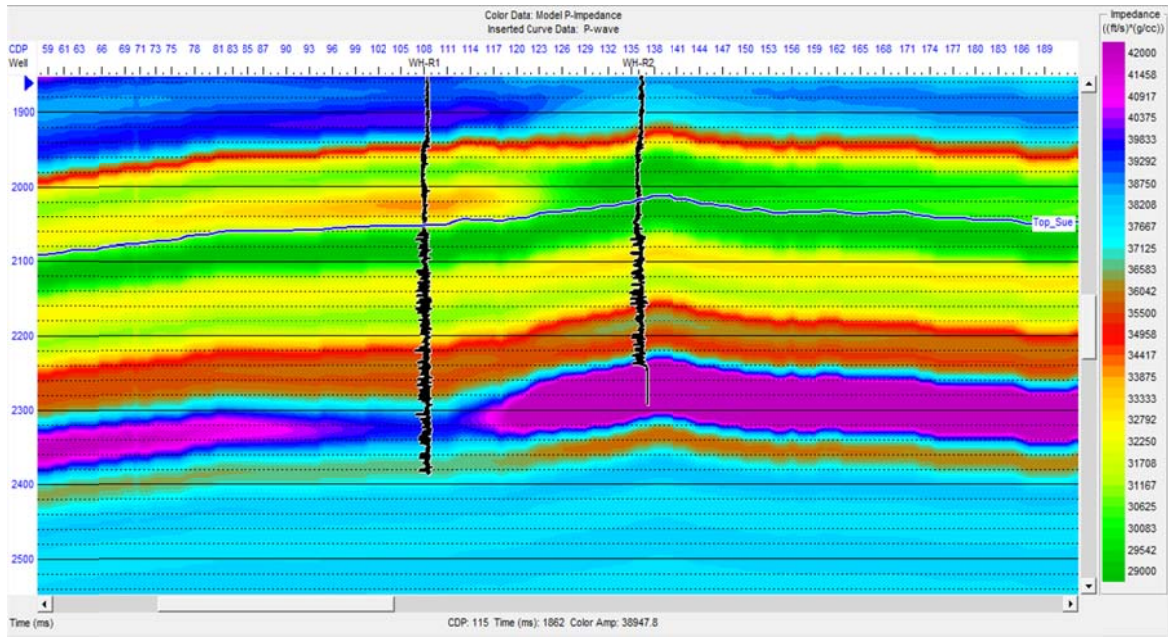
در داده‌های لرزه‌ای میدان ویچرنج از الگوریتم وارون‌سازی مبتنی بر مدل جهت وارون‌سازی لرزه‌ای استفاده شده است. در ضمن سایر روش‌های وارون‌سازی لرزه‌ای مانند باند محدود، خطی خارهای پراکنده (برنامه‌ریزی خطی) و خارهای پراکنده (بیشینه احتمال) بررسی شدند. با این وجود الگوریتم وارون‌سازی مبتنی بر مدل، برترین روش با میزان خطای کمتر در میان سایر الگوریتم‌های مورد استفاده شناخته شد. مدل پایه زمین‌شناسی در وارون‌سازی مبتنی بر مدل دخیل است، به این صورت که شاهد کاهش خطای بین داده‌های لرزه‌ای ساخته شده از مدل و داده‌های لرزه‌ای واقعی هستیم. در نتیجه مدلی حاوی اطلاعات لرزه‌ای و نزدیک‌ترین مدل به مدل زمین، در محدوده تعریف کاربر ایجاد می‌شود. نتایج حاصل از این مدل قدرت تفکیک بالایی دارد که فقط از طریق اطلاعات لرزه‌ای حاصل شده و به مدل فرضی اولیه بستگی دارد (راسل، ۲۰۰۴). در مرحله آخر با استفاده از موجک و ساخت مدل زمین‌شناسی و انتخاب الگوریتم مبتنی بر مدل از میان الگوریتم‌های مختلف وارون‌سازی، مدل‌سازی اولیه انجام گرفت (شکل ۷).

۴-۱. نشانگرهای لرزه‌ای (Seismic Attributes)

برای بالابردن قدرت تخمین، نیاز به استفاده ترکیبی از نشانگرها به صورت همزمان نیاز داریم. در آنالیز چند نشانگری، خصوصیتی مکمل از چند نشانگر جهت تفکیک خصوصیات جزئی روی پارامترهای هدف، ترکیب می‌شوند و مهم‌ترین قسمت آن،

انتخاب نشانگرها در جهت ساخت ترکیبی بهینه و ارزیابی اهمیت آنها می‌باشد (سراج‌امانی و همکاران، ۱۳۹۸). در این مرحله امیدانس صوتی حاصل از فرایند وارون‌سازی در کنار دیگر نشانگرها در راستای ساخت ترکیب بهینه از نشانگرها جهت تخمین شاخص شکنندگی مورد استفاده واقع می‌شود. برای برقراری رابطه بین پارامتر هدف و نشانگرهای لرزه‌ای و انتخاب ترکیبی بهینه از نشانگرها، از روش‌های آماری و هوشمند استفاده شده است. در روش رگرسیون مرحله‌ای که هدف انتخاب ترکیب بهینه‌ای از نشانگرهاست، برای نشانگرهای موجود در لیست، ضرایب بهینه و خطای تخمین را محاسبه می‌کنیم و نشانگری را که بیشترین همخوانی را با پارامتر هدف و کمترین خطای تخمین در مرحله آموزش را داراست، انتخاب می‌کنیم. حال نشانگر دومی که با نشانگر اول ترکیب بهتری را می‌سازد و دارای کمترین میزان خطای تخمین است، رؤیت می‌شود. بعد به این ترتیب در هر مرحله نشانگری به ترکیب مرحله قبل خود اضافه می‌شود تا جایی که ترکیب حاصله کمترین میزان خطای تخمین را نتیجه دهد. نتایج برپایه مرحله آموزش، با افزایش تعداد نشانگرها و کاهش میزان خطای تخمین حاصل می‌شود در حالی که خطا در مرحله اعتبارسنجی تا رسیدن به ترکیب نشانگر بهینه سیر نزولی و پس از آن روند صعودی به خود می‌گیرد (جدول ۲).

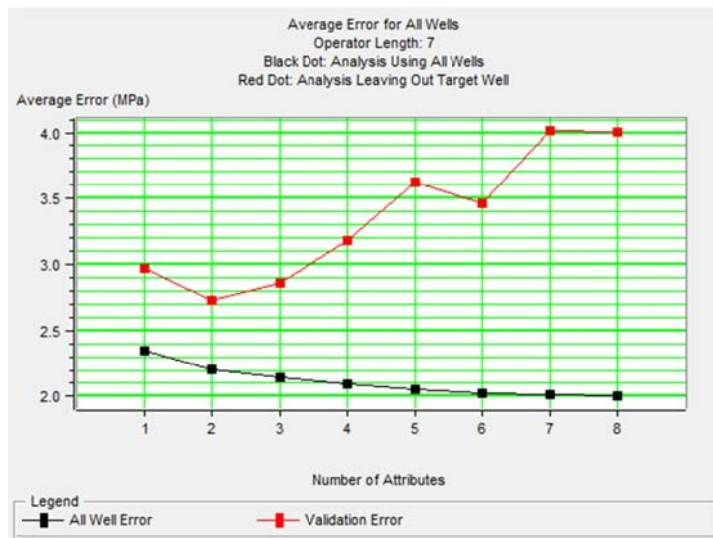
در این مطالعه میزان خطای اعتبارسنجی برای دو نشانگر اول رفته‌رفته با کاهش همراه بوده و با اضافه شدن نشانگرهای بعدی افزایش یافته است به عبارتی دیگر دو نشانگر اول به‌عنوان نشانگرهای بهینه در تعیین شاخص شکنندگی کاربرد دارند (شکل ۸).



شکل ۷. مدل اولیه تولیدشده در فرایند وارون‌سازی مبتنی بر مدل برای یکی از مقاطع لرزه‌ای میدان ویچرنج.

جدول ۲. نتایج حاصل از روش رگرسیون مرحله‌ای برای تخمین شاخص شکنندگی به‌همراه خطای مرحله آموزش و اعتبارسنجی.

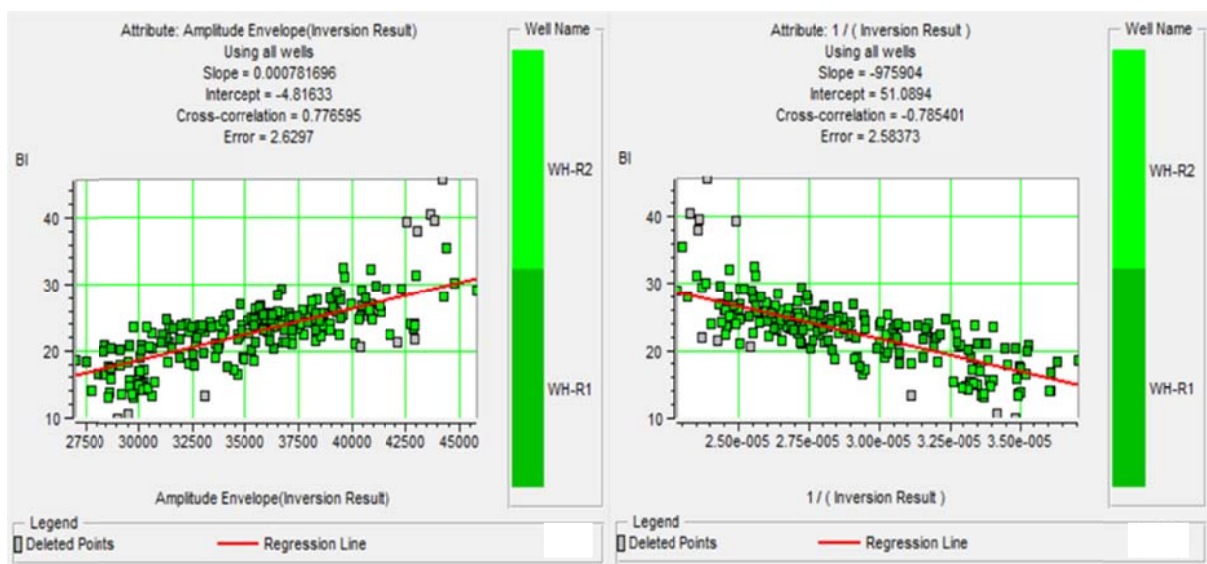
هدف	نشانگر نهایی	خطای آموزش (مگاپاسکال)	خطای اعتبارسنجی (مگاپاسکال)
۱ شاخص شکنندگی	۱ / نتیجه وارون‌سازی	۲/۳۵	۲/۹۷
۲ شاخص شکنندگی	پوش دامنه	۲/۲	۲/۷۳
۳ شاخص شکنندگی	قطبش ظاهری	۲/۱۴	۲/۸۶
۴ شاخص شکنندگی	کسینوس فاز لحظه‌ای	۲/۱	۳/۱۸
۵ شاخص شکنندگی	کسینوس فاز لحظه‌ای (نتیجه وارون‌سازی)	۲/۰۶	۳/۶۲
۶ شاخص شکنندگی	پوش دامنه (نتیجه وارون‌سازی)	۲/۰۲	۳/۴۶
۷ شاخص شکنندگی	داده لرزه‌ای خام	۲/۰۱	۴/۰۱
۸ شاخص شکنندگی	قطبش ظاهری (نتیجه وارون‌سازی)	۲	۴



شکل ۸. شناسایی تعداد نشانگرهای لرزه‌ای بهینه در تخمین شاخص شکنندگی با استفاده از خطای اعتبارسنجی.

را نمایان می‌کنند که در امتداد سطح تماس بازتابش، مقاومت صوتی کاهش پیدا کند. ناگفته نماند ضرایب بازتابش مقادیری بین +۱ و -۱ دارند. مقادیر $+0/2$ یا $-0/2$ حاصل بازتابنده‌های بسیار قوی هستند ولی در عمل ضرایب بازتابش مقادیری بین $+0/1$ و $-0/1$ دارند. مرز یک ماسه متخلخل با آهک متراکم و چگال ضریب بازتابش بالایی دارد و به صورت سطح بازتابش آشکار ظاهر می‌شود در حالی که سطح تماس دو سازند شیلی با مقاومت صوتی ظاهری مشابه، ضریب بازتابش قابل‌اغماض دارد و انرژی ناچیزی را بازتاب می‌کند. نشانگر پوش دامنه بیانگر بیشینه مقدار دامنه موج در هر لحظه است. پوش دامنه مستقل از فاز بوده و مستقیماً با تفاوت مقاومت صوتی در ارتباط است. بنابراین پوش دامنه یک نشانگر فیزیکی است و به‌عنوان شاخصی مؤثر در تعیین مواردی همچون تفاوت مقاومت صوتی، تعیین نقاط روشن، تجمع‌های احتمالی گاز، تعیین مرزهای سکانسی، اثر کوتاه‌شدگی لایه نازک، تغییرات عمده لیتولوژیکی، گسل خوردگی و دگرشیبی‌ها کاربرد دارد (نیکروز و همکاران، ۱۳۹۶).

طبق جدول ۲، دو نشانگری که در تخمین شاخص شکنندگی کارایی دارد، شامل امپدانس صوتی یا عکس نتیجه وارون‌سازی (I/Inversion Result) و پوش دامنه (Amplitude Envelope) است که دارای بیشترین درجه تطابق و کمترین خطای تخمین در ارتباط با شاخص شکنندگی است. از این‌رو این پارامترها به‌عنوان نشانگرهای اصلی در تخمین شاخص شکنندگی ماسه سنگ‌های میدان از روی لاگ‌ها بکار گرفته می‌شوند. بر اساس کراس پلات‌های نشان داده‌شده در شکل ۹ امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی لرزه‌ای دارای ارتباط معکوس مشخص و پوش دامنه دارای ارتباط مستقیم با شاخص شکنندگی در چاه‌های میدان است. نشانگر امپدانس صوتی اختلاف مقاومت صوتی، مرزهای سکانسی، پیوستگی و ناپیوستگی سطوح را نشان می‌دهد که بر اساس ضریب بازتابش (Reflection Coefficient) مقطع حاصل را می‌توان تفسیر کرد. از آنجایی که چگالی و سرعت معمولاً با حرکت به سمت عمق، افزایش پیدا می‌کند، ضریب بازتابش به‌طور معمول مثبت خواهد بود. ضرایب منفی معمولاً زمانی خود



(ب)

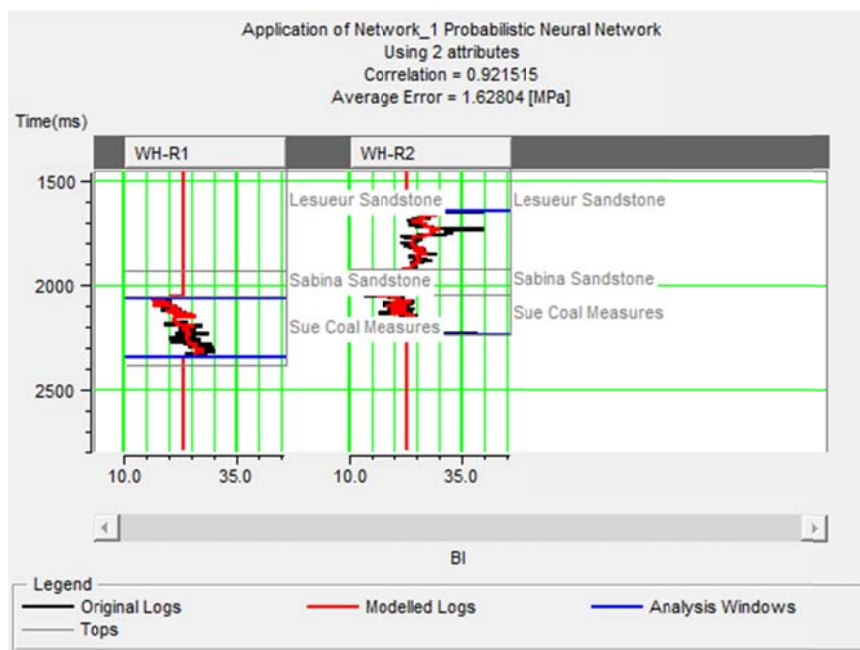
(الف)

شکل ۹. الف) ارتباط بین شاخص شکنندگی و نشانگر لرزه‌ای امپدانس صوتی حاصل از وارون‌سازی برای یکی از مقاطع لرزه‌ای میدان ویچرنج، ب) ارتباط بین شاخص شکنندگی و نشانگر لرزه‌ای پوش دامنه حاصل از وارون‌سازی برای یکی از مقاطع لرزه‌ای میدان ویچرنج.

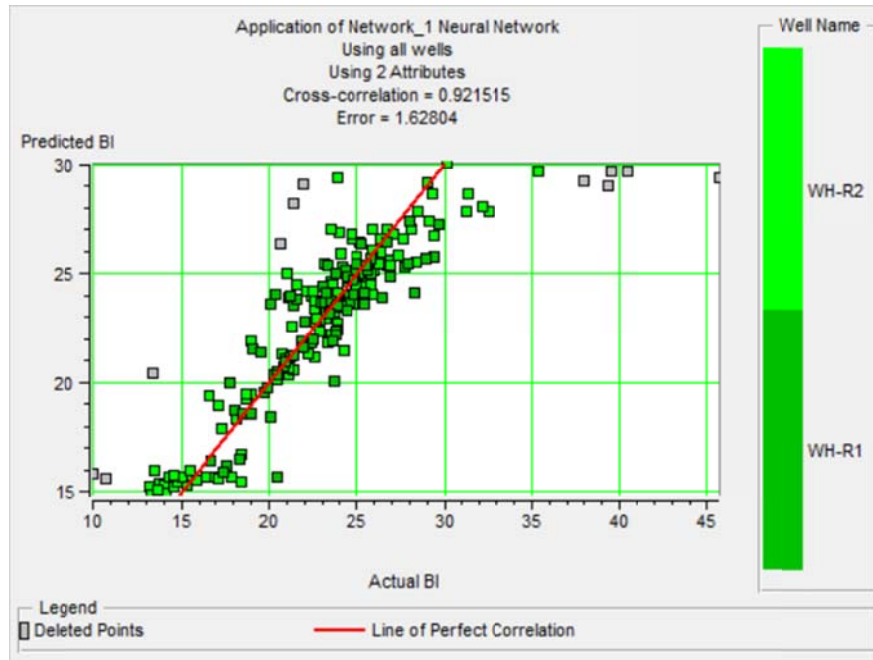
یاد می‌گیرد. در نهایت رابطه یادگیری شده را روی مجموعه‌ای بزرگ‌تر که مقادیر خروجی را برای آن نداریم، اعمال می‌کند. مزیت این روش توانایی بالا برای تفسیر خروجی‌ها می‌باشد که شبکه‌هایی مانند شبکه عصبی احتمالی (PNN)، شبکه عصبی پیشخور چند لایه عصبی (MLFN)، شبکه عصبی تابع پایه شعاعی (RBFN)، شبکه عصبی رگرسیون عمومی (GRNN) از روش یادگیری نظارتی استفاده می‌کنند. در دسته دوم یادگیری غیر نظارتی، شبکه عصبی الگوها را به وسیله مجموعه‌ای از ورودی‌ها جستجو می‌کند و خروجی‌های خاصی مد نظر نیست (راسل و همکاران، ۲۰۰۳). در این مطالعه از سه نوع الگوریتم شبکه عصبی که مشتمل بر روش احتمالی (Probabilistic)، پیشخور چند لایه عصبی (Multi-Layer Feed Forward) و تابع پایه شعاعی (Radial Basis Function) است، جهت تخمین پارامتر هدف از ترکیب بهینه نشانگرهای موجود مورد استفاده واقع شده است. با استفاده از نرم‌افزار همپسون-راسل، الگوریتم شبکه عصبی احتمالی از نشانگرهای بهینه حاصله آموزش دید (شکل ۱۰).

۴-۲. شبکه عصبی (Neural Network)

شبکه عصبی یک الگوریتم ریاضی با قابلیت آموزش پذیری است جهت حل مسائلی که به طور طبیعی در برآورد جواب نیازمند مداخله انسان می‌باشد. انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی وجود دارد، با این حال می‌توان بر اساس نوع مسئله‌ای که حل می‌کنند و بر اساس نوع یادگیری آنها به دو بخش دسته‌بندی کرد (کدخدائی ایلخچی، ۱۳۸۸). شبکه‌های عصبی بر اساس نوع مسئله‌ای که حل می‌کنند، به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: مسئله تمایز کلاس که مجموعه داده‌های ورودی به کلاس‌هایی از قبیل ماسه، شیل و کربنات، یا گاز، آب و نفت و غیره و... تقسیم می‌شوند و مسئله تخمین مقدار که یک پارامتر مورد نظر مانند تخلخل، از مقادیر ورودی تخمین زده می‌شود. شبکه‌های عصبی بر اساس روش یادگیری نیز به دو دسته یادگیری نظارتی و یادگیری غیرنظارتی طبقه‌بندی می‌شوند: در دسته اول یادگیری نظارتی، شبکه عصبی رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌ها را به وسیله مجموعه‌ای از داده‌های ورودی و خروجی برای مسئله‌ای خاص



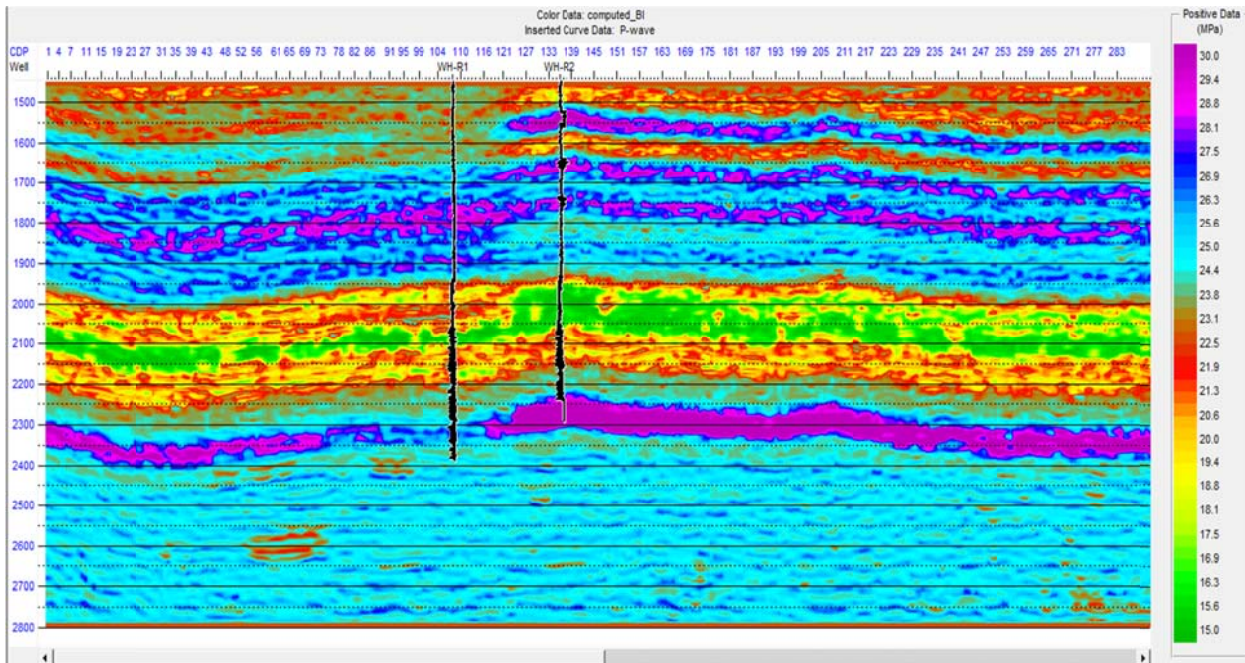
شکل ۱۰. نتیجه مرحله آموزش شبکه عصبی احتمالی.



شکل ۱۱. ارتباط بین شاخص شکندگی و شبکه عصبی احتمالی برای یکی از مقاطع لرزه‌ای میدان ویچرنج.

استفاده از برنامه ایمرج (Emerge)، برای مقطع لرزه‌ای مورد نظر در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

مقطع دوبعدی شاخص شکندگی برآوردشده از الگوریتم شبکه عصبی احتمالی در نرم‌افزار همپسون-راسل با



شکل ۱۲. مقطع شاخص شکندگی برآوردشده بر پایه الگوریتم شبکه عصبی احتمالی.

جدول ۳. مقایسه نتایج حاصل از آنالیز رگرسیون چند نشانگری و شبکه عصبی در برآورد شاخص شکنندگی.

شاخص شکنندگی (بر حسب مگاپاسکال)				
نتیجه آنالیز	مرحله آموزش	خطای میانگین	مرحله اعتبارسنجی	خطای میانگین
آنالیز چند نشانگری	۰/۸۴۹	۲/۲۰۴	۰/۷۵۶	۲/۷۲۸
شبکه عصبی احتمالی	۰/۹۲۱	۱/۶۲۸	۰/۷۸۴	۲/۵۹۲
شبکه عصبی پیشخور چند لایه	۰/۹۰۰	۱/۸۱۶	۰/۴۰۶	۴/۹۴۰
شبکه عصبی تابع پایه شعاعی	۰/۸۵۵	۲/۱۶۴	۰/۶۳۵	۱۰/۰۸۷

۵. بحث و نتیجه‌گیری

نشانگرهای عکس نتیجه وارون‌سازی و پوش دامنه به‌عنوان بهترین نشانگرها جهت برآورد شاخص شکنندگی است. در نهایت بررسی داده‌های لرزه‌ای و تلفیق و تطابق آن با داده لاگ‌های چاه با استفاده از وارون‌سازی و از طرفی استخراج نشانگرهای لرزه‌ای مرتبط با پارامتر مذکور و مقایسه روش‌های آنالیز چند نشانگری و شبکه‌های عصبی مشاهده شد که میزان همبستگی در روش شبکه عصبی احتمالی بهتر از آنالیز چند نشانگری در برآورد شاخص شکنندگی ماسه سنگ‌های میدان ویچرنج است (جدول ۳).

تشکر و قدردانی

از جناب دکتر رحیم کدخدائی ایلخچی و سیستم مدیریت اطلاعات نفت و زمین گرمایی استرالیای غربی جهت در اختیار قرار دادن داده‌ها کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

جعفری، م.، ۱۳۹۵، تخمین پارامترهای مخزنی از تلفیق وارون‌سازی لرزه‌ای و تحلیل چند نشانگری با استفاده از شبکه عصبی در یکی از میدانی نفتی در جنوب ایران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه ارومیه، ایران.

سراج‌امانی، م.، نیکروز، ر. و کدخدائی، ع.، ۱۳۹۸، تخمین پارامترهای مکانیک سنگ با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای و شبکه عصبی در سازند سوء حوضه پرت واقع در استرالیا غربی، اولین همایش ملی پردازش سیگنال و تصویر در ژئوفیزیک، دانشگاه

میزان شکنندگی با استفاده از رابطه مقاومت فشاری تک‌محوره، مقاومت کششی و B_4 (شاخص شکنندگی) در نرم‌افزار اکسل محاسبه شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار همپسون-راسل وارون‌سازی برای مقطع لرزه‌ای انجام گرفت. جهت مدل سازی اولیه الگوریتم مبتنی بر مدل بهترین روش با کمترین میزان خطا در میان سایر الگوریتم‌های وارون‌سازی جهت وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای میدان ویچرنج شناخته شد. در مراحل بعدی به کمک آنالیز چند نشانگری و شبکه‌های عصبی، مقطع لرزه‌ای از این شاخص ساخته شد. با توجه به مقطع لرزه‌ای (شکل ۱۲) میزان شاخص شکنندگی در بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۲۰۰ (در ناحیه مخزن ماسه سنگی ویلسپی) با کاهش چشمگیری روبه‌روست. شاخص شکنندگی از بازه ۲۵ تا ۳۰ مگاپاسکال در پوش سنگ، به بازه ۱۵ تا ۱۸ مگاپاسکال در مخزن کاهش پیدا کرده است که با توجه به جدول ۱ بیانگر قابلیت حفاری متوسط در محدوده مخزن است. قابلیت حفاری در چاه WH-R2 به دلیل پایین بودن میزان شکنندگی در محدوده مخزن نسبت به چاه WH-R1، راحت‌تر است. از طرفی رگرسیون مرحله‌ای به‌عنوان یک روش سریع در تعیین نشانگرهای لرزه‌ای در نظر گرفته می‌شود (دراپر و اسمیت، ۱۹۹۸) که بر اساس جدول حاصل از روش رگرسیون مرحله‌ای (جدول ۲) مقدار خطای اعتبارسنجی برای دو نشانگر اول سیر نزولی دارد اما با افزودن نشانگر سوم مقدار آن سیر صعودی به‌خود می‌گیرد. این نکته بیانگر این است که

- صنعتی شاهرود، ایران.
- کدخدائی ایلخچی، ر.، ۱۳۹۳، سرشت نمایی مخزنی ماسه‌های گازی سفت (کم‌تراوا) میدان ویچرنج در حوضه پرت واقع در استرالیای غربی، رساله دکتری، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
- کدخدائی ایلخچی، ع.، ۱۳۹۷، ارزیابی سازندهای نفت دار، مؤسسه انتشارات دایره دانش.
- کدخدائی ایلخچی، ع.، ۱۳۸۸، تخمین پارامترهای ژئوشیمیایی و پتروفیزیکی از نمودارهای چاه‌پیمایی و نشانگرهای لرزه‌ای با استفاده از سیستم‌های هوشمند
- در میادین هیدروکربنی جنوب ایران، رساله دکتری، دانشگاه تهران، ایران.
- نیکروز، ر.، ثیاب قدسی، ع.ا. و حسنعلی زاده، پ.، ۱۳۹۶، شناسایی تله‌های چینه‌ای سازند سروک با استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی و نشانگرهای لرزه‌ای در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران، م. فیزیک زمین و فضا، ۱، ۵۳-۶۹.
- وطن‌خواه، ح.، ۱۳۹۶، بررسی تأثیر شکنندگی بر قابلیت برش نمونه‌های سنگی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ایران.
- Altindag, R., 2010, Assessment of some brittleness indexes in rock-drilling efficiency. *Rock mechanics and rock engineering*, 43(3), 361-370.
- Altindag, R., 2003, Correlation of specific energy with rock brittleness concepts on rock cutting. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 103(3), 163-171.
- Andreev, G. E., 1995, Brittle failure of rock materials: test results and constitutive models, A. A. Balkema/Rotterdam, 446.
- Crostella, A. and Backhouse, J., 2000, Geology and petroleum exploration of the central and southern Perth Basin, Western Australia (No. 57). Perth, WA: Geological Survey of Western Australia.
- Draper, N. R. and Smith, H., 1998, Applied regression analysis (Vol. 326). John Wiley & Sons.
- Göktan, R. M., 1991, Brittleness and micro-scale rock cutting efficiency. *Mining Science and Technology*, 13(3), 237-241.
- Hall, P. B. and Kneale, R. L., 1992, Perth Basin rejuvenated. *The APPEA Journal*, 32(1), 33-43.
- Hetenyi, M., 1966, Handbook of experimental stress analysis, Wiley, New York, 15.
- Hucka, V. and Das, B., 1974, October. Brittleness determination of rocks by different methods. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11(10), 389-392. Pergamon.
- Jafari, M., Nikrouz, R. and Kadkhodaie, A., 2017, Estimation of acoustic-impedance model by using model-based seismic inversion on the Ghar Member of Asmari Formation in an oil field in southwestern Iran. *The Leading Edge*, 36(6), 487-492.
- Jones, D. O. and Ellis, G., 2000, Atlas of petroleum fields, onshore Perth Basin, Petroleum Division, DMEWA, 1, 122.
- Lawn, B. R. and Marshall, D. B., 1979, Hardness, toughness, and brittleness: an indentation analysis. *Journal of the American ceramic society*, 62(7-8), 347-350.
- Lindseth, R. O., 1979, Synthetic sonic logs—A process for stratigraphic interpretation. *Geophysics*, 44(1), 3-26.
- McNally, G. H., 1987, Estimation of coal measures rock strength using sonic and neutron logs. *Geoexploration*, 24(4-5), 381-395.
- Meng, F., Zhou, H., Zhang, C., Xu, R. and Lu, J., 2015, Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48(5), 1787-1805.
- Morley, A., 1954, *Strength of materials*, 11th ed. Longmans, Green, London, 532.
- Obert, L. and Duvall, W. I., 1967, *Rock mechanics and the design of structures in rock* (No. BOOK). J. Wiley.
- Özfirat, M. K., Yenice, H., Şimşir, F. and Yarıal, O., 2016, A new approach to rock brittleness and its usability at prediction of drillability. *Journal of African Earth Sciences*, 119, 94-101.
- Ramsay, J. G., 1967, *Folding and fracturing of rocks*. McGraw Hill Book Company, 568.
- Russell, B. H., 2004, The application of multivariate statistics and neural networks to the prediction of reservoir parameters using seismic attributes.
- Russell, B.H., Lines, L. R. and Hampson, D. P., 2003, Application of the radial basis function neural network to the prediction of log properties from seismic attributes. *Exploration Geophysics*, 34(2), 15-23.
- Sharifzadeh, A., 2008, Tight gas resources in the Northern Perth Basin, *Petroleum W.A Magazine*, 41-44.
- Sharifzadeh, A., 2007, Tight gas resources in

- Western Australia, Petroleum W.A Magazine, 28-31.
- Yagiz, S., 2009, Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(1), 66-74.
- Yagiz, S. and Gokceoglu, C., 2010, Application of fuzzy inference system and nonlinear regression models for predicting rock brittleness. *Expert Systems with Applications*, 37(3), 2265-2272.
- Yilmaz, N. G., Karaca, Z., Goktan, R. M. and Akal, C., 2009, Relative brittleness characterization of some selected granitic building stones: influence of mineral grain size. *Construction and Building Materials*, 23(1), 370-375.

Estimation of Brittleness Index Using Post-Stack Inversion of Seismic Data: Example from Perth Basin in Western Australia

Serajamani, M.¹, Nikrouz, R.^{2*} and Kadkhodaie, A.³

1. M.Sc. Student, Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran

2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran

3. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

(Received: 4 Feb 2020, Accepted: 29 Sep 2020)

Summary

Brittleness is one of the most important properties of the rock. Brittleness is a function of strength and indicates rock strength to deformation in the elastic modules. However, there is no direct and standard method for brittleness measurement but it can be done indirectly by using rock properties such as different ratios of compressive strength and tensile strength of rock to determine the concept of brittleness. The purpose of this study is to investigate the concepts of brittleness which are presented by the researchers and to use seismic inversion, multi-attribute analysis and neural network in the Whicher-Range field in Perth, Western Australia to estimate brittleness. The Perth sedimentary basin stretches about 100,000 square kilometers in the north-south direction of the western Australian margin. About half of this sedimentary basin is located 1 km deep in the sea. Whicher-Range gas field is 22 km south of Baselton and 200 km south of Perth. Two wells and one seismic section of Whicher-Range field are selected in this research. The lowest brittleness indexes in the first and second wells drilled 1 km apart, are 1.69 and 1.67 MPa using B_4 criteria. The highest values of the brittleness are 39.78 and 48.15 MPa, respectively, which are difficult for drilling. The starting point of the inversion process is to have post-stack seismic data, velocity model, well logs, and seismic horizons. The product of the density log and sonic velocity is equal to the impedance. Then the current impedance is converted from depth to time using the appropriate depth to time relation. As a result, the convolution of a suitable wavelet and reflectivity over time will produce the synthetic seismic trace. Adaptation rate between synthetic seismic trace and composite field seismic trace yields an acceptable result. Next, the initial modeling is performed using wavelet, geological model, and a model-based algorithm. Next, the acoustic impedance of the inversion process along with other attributes is used to construct the optimal combination of attributes to estimate the brittleness index. First, an attribute is selected that has the highest correlation with the target log and the least estimation error in the training step. Then the second attribute, which makes the best combination with the first attribute, has the lowest estimation error. Then each attribute step is added to its previous step combination until the resulting combination results in the lowest estimation error. The results based on this method are obtained by increasing the number of attributes and decreasing the estimation error, while the error in the validation stage until the optimal attribute combination, is ascending. In the next step, three types of neural network algorithm including probabilistic method, multi-layer feed forward and radial basis function are used to estimate the target parameter, with optimal combination of available attributes and the use of neural network algorithm training from the optimal attributes using the Hampson-Russell software. In the last step, multi-attribute analysis is compared with three neural network algorithms. The results indicate a higher correlation coefficient for probabilistic neural network than that of multi-attribute analysis for determination of the brittleness index.

Keywords: Brittleness Index, Compressive Strength, Inversion, Seismic Attributes, Neural Network, Perth Australia.

* Corresponding author:

r.nikrouz@urmia.ac.ir