



پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از نگاره‌های چاه و تلفیقی از روش‌های هوش مصنوعی در یکی از میادین نفتی جنوب ایران

علی میرادزاده، شرکت نفت و گاز اروندان

شاهو ملکی، دانشگاه صنعتی شاهرود

چکیده

در پروژه‌های ژئومکانیکی آگاهی از مقاومت دیواره‌ی چاه‌های حفاری شده ضروری است. این امر با انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره و سه‌محوره امکان‌پذیر است. اما انجام این آزمایش‌ها اولاً پرهزینه و وقت‌گیر است؛ ثانیاً نمونه‌های مغزه برای انجام این آزمایش‌ها همیشه در دسترس نیست و ثالثاً بیشتر مشکلات مربوط به ژئومکانیک در ارتباط با در دسترس نبودن نمونه‌های مغزه برای انجام تست‌های آزمایشگاهی است. در حقیقت، در بیشتر موارد، نمونه‌های مغزه مربوط به سازندهای خرد شده، برای انجام تست‌های آزمایشگاهی در دسترس نیستند. آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)، از جمله آزمایش‌های مکانیک‌سنگی است که برای تعیین خصوصیات فیزیکی سازندهای حفاری شده در ژئومکانیک بکار می‌رود. به دلیل مشکلات ذکر شده، در ژئومکانیک مخزن برای تعیین مقدار مقاومت تک‌محوره از نگاره‌های چاه استفاده می‌شود. از خصوصیات مقاومت تک‌محوره بدست آمده از نگاره‌های چاه پیوسته بودن مقدار مقاومت تک‌محوره در طول چاه حفاری شده است. برای تعیین مقاومت تک‌محوره از طریق نگاره‌های چاه، یک سری روابط تجربی توسط متخصصین چاه‌نگاری ارائه و از شبکه‌های هوشمند نیز استفاده شده است. در این راستا، هدف از مقاله حاضر، تعیین مقدار مقاومت تک‌محوره با استفاده از نگاره‌های چاه و ماشین‌بردار پشیتیان (SVM)، و در نهایت کالیبره کردن آنها از طریق مغزه‌های آنالیز شده در آزمایشگاه است.

واژگان کلیدی مقاومت فشاری تک‌محوره، ماشین‌بردار پشیتیان، نگاره‌های چاه، ژئومکانیک مخزن

مقدمه

تعیین کرد، استفاده از روش‌های هوشمند مانند شبکه‌های عصبی، ماشین‌بردار پشیتیان و غیره است. در این راستا، هدف از مقاله حاضر، تعیین مقدار مقاومت تک‌محوره از نگاره‌های چاه با استفاده از روابط تجربی و روش هوشمند SVM است.

سطح تنش‌ی که تحت آن یک سنگ معمولاً دچار گسیختگی می‌شود، مقاومت‌سنگ نام دارد. در شرایط کلی جهت تعیین مقاومت فشاری سنگ آزمایش‌های تک‌محوره و سه‌محوره استفاده می‌شوند. مهندسين نفت و معدن اغلب به مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌ها نیاز دارند [۱]. دومین خصوصیتی که اغلب این دو رشته از علوم مهندسی دنبال آن هستند، مقاومت فشاری سه‌محوره است، اگرچه اغلب میزان نیاز به مقاومت فشاری تک‌محوره بیشتر است [۲]. در ژئومکانیک مخزن، آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوره بر روی نمونه‌های مغزه که از چاه‌های حفاری بدست می‌آید، انجام می‌گیرد. بیشتر مشکلات مربوط به ژئومکانیک در ارتباط با در دسترس نبودن نمونه‌های مغزه برای انجام تست‌های آزمایشگاهی است. در این شرایط، برای اندازه‌گیری پارامترهای مقاومتی سنگ از نگاره‌های چاه استفاده می‌گردد. برای محاسبه پارامترهای مقاومتی سنگ از روینگارهای چاه، یک سری روابط تجربی توسط متخصصان مختلف مانند چانگ و همکاران [۳]، چریستراس و همکاران [۴]، ترکان و همکاران [۵]، یاسر و اردوغان [۶]، کیلیک و تیمن [۷] و التین داگ [۸]، برای مدول یانگ زمان عبور موج فشاری و تخلخل نگاشته شده است. البته هر رابطه تجربی، برای یک میدان نفتی با یک سری خصوصیات زمین‌شناسی و سازندی متفاوت نگاشته شده است که در صورت به کار بردن در میدان دیگر باید شرایط زمین‌ساختی آن با میدان مورد مطالعه تقریباً مشابه باشد و در صورت لزوم کالیبره گردد. روش دیگری که می‌توان مقدار مقاومت تک‌محوره را

۱- روش اجرای کار

۱-۱- تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از روابط تجربی

روابط تجربی که توسط بیشتر متخصصان چاه‌نگاری، برای تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌ها از طریق نگاره‌های ژئوفیزیکی ذکر گردیده است، به کمک یکی از سه پارامتر سرعت موج فشاری، مدول یانگ و یا تخلخل محاسبه می‌گردد. سرعت موج فشاری را می‌توان از طریق نگاره‌های صوتی مانند DSI و یا سونیک در طول چاه محاسبه کرد. مدول یانگ با در اختیار داشتن نگار DSI^۳ و نگار RHOB یا همان چگالی محاسبه می‌گردد. تخلخل نیز از طریق نگار نوترون بدست می‌آید. بنابراین، همان‌گونه که گفته شد، با در اختیار داشتن یکی از سه پارامتر ذکر شده می‌توان از روابط تجربی که در ادامه به تعدادی از آنها اشاره خواهد شد، مقدار مقاومت تک‌محوره را در طول چاه محاسبه کرد. مقاومت تک‌محوره محاسبه شده بدین روش نسبت به مقاومت تک‌محوره بدست آمده از آزمایش‌های مکانیک سنگی دارای مزایا و معایبی است که بخشی از این مزایا و معایب عبارتند از:

مزایا: ۱- مقاومت فشاری تک‌محوره بدست آمده از نگاره‌های چاه به صورت

* نویسنده‌عهددار مکاتبات (sh.maleki.ch@gmail.com)

نگارهای چاه نسبت به نمونه‌های مغزه که از آزمایش‌های مکانیک سنگی برای یک حلقه‌چاه در یک میدان نفتی به دست می‌آید، به این دلیل است که این روابط تجربی در یک منطقه خاص که دارای شرایط زمین‌ساختی خاصی می‌باشد، بدست آمده است. بنابراین، تفاوت زیاد مقدار مقاومت تک محوره به دلیل وجود اختلاف زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه با منطقه‌ای است که از آن، رابطه تجربی استخراج گردیده است؛ در صورت استفاده از این روابط باید کالیبراسیون صورت گیرد. در اینجا یکسری از این روابط که توسط محققان مختلف به دست آمده، معرفی می‌گردد:

معادله ۱- معادله ارائه شده توسط چانگ و همکاران برای سنگ‌های کربناته مانند سنگ آهک و دولومیت را نشان می‌دهد. برای سنگ آهک، در صورت داشتن زمان عبور موج فشاری، می‌توان از این معادله، مقاومت فشاری تک محوره را بدست آورد [۳]:

$$UCS = (7682 / \Delta t)^{1.82} / 145 \quad (1)$$

گولوبو و رابین اویچ بر اساس مطالعاتی که بر روی سنگ‌های کربناته انجام دادند، معادله ۲- را برای تخمین مقاومت فشاری تک محوره بر اساس تغییرات زمان موج فشاری ارائه کردند [۳]:

$$UCS = 10^{(2.44 + 109.14 / \Delta t)} / 145 \quad (2)$$

برای سنگ آهکی که در آن $10 < UCS < 300 MPa$ باشد، در صورت داشتن مدول یانگ از معادله ۳- می‌توان مقدار مقاومت فشاری تک محوره را به دست آورد [۳]:

$$UCS = 0.4067 E^{0.51} \quad (3)$$

برای دولومیتی که در آن $60 < UCS < 100 MPa$ باشد، در صورت داشتن مدول یانگ، از معادله ۴- می‌توان مقدار مقاومت فشاری تک محوره را به دست آورد [۳]:

$$UCS = 2.4 E^{0.34} \quad (4)$$

برای سنگ‌های کربناته‌ای که دارای تخلخل پایین تا متوسط بوده ($0 < \phi < 0.2$) و مقاومت فشاری تک محوره بالایی داشته باشند ($10 < UCS < 300 MPa$)، در صورت داشتن مدول تخلخل از معادله ۵- می‌توان مقدار مقاومت فشاری تک محوره را به دست آورد [۳]:

$$UCS = 135.9 \exp(-4.8\phi) \quad (5)$$

واحدهای به کار رفته در معادلات بالا به صورت زیر است:

$$\Delta t (\mu s / ft), E (MPa), \phi (fraction)$$

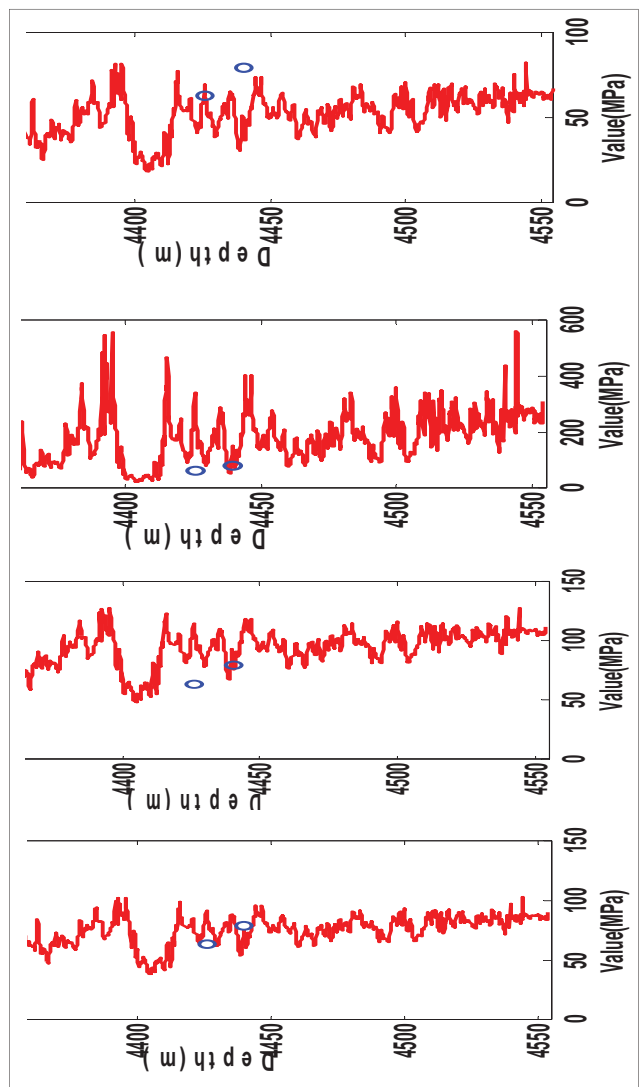
چریستاراس و همکاران [۴]، ترکان و همکاران [۵]، یاسر و اردوغان [۶]، کیلیک و تیمن [۷]، التین داگ [۸] و چریستاراس و همکاران برای مارن، سنگ آهک، ماسه سنگ، دولومیت، هماتیت، سرپانتین، دیاباز و توف معادله ۶-

پیوسته است. زیرا نمونه‌های مغزه تنها مربوط به بخش‌های مشخصی از سازند است، ولی مقدار مقاومت تک محوره به دست آمده از نگارهای چاه، تمام بخش‌های چاه یا سازند را که چاه‌نگاری شده است، در بر می‌گیرد.

۲- اگر بخش‌هایی از سازند حفاری شده، شکسته یا خرد شده باشد، نمی‌توان از آن نمونه‌گیری کرد. بنابراین با استفاده از آزمایش‌های مکانیک سنگی نمی‌توان مقدار مقاومت تک محوره آن بخش را تعیین نمود. ولی با استفاده از نگارهای چاه می‌توان مقدار مقاومت تک محوره را در آن بخش‌ها محاسبه کرد.

معایب: مقاومت تک محوره به دست آمده از نگارهای چاه نسبت به مقداری که از طریق نمونه‌های مغزه در آزمایشگاه به دست می‌آید، اختلاف دارد، به طوری که این اختلاف گاهی تا دو برابر نیز می‌رسد.

اختلاف بین مقاومت تک محوره به دست آمده از روابط تجربی برای



شکل ۱ | مقاومت فشاری تک محوره کالیبره شده برای سنگ مغزن از بالا به پایین به ترتیب با استفاده از روابط تجربی ۱ تا ۴



را ارائه دادند [۴]:

تصمیم‌گیری غیرخطی را می‌سازد. برای تعمیم الگوریتم SVM به تخمین‌های رگرسیونی، یک حاشیه مشابه در فضای مقادیر هدف (y) توسط تابع جریمه و پنالتی (ε) ساخته می‌شود:

$$|y - f(x)|_\epsilon := \max\{0, |y - f(x)| - \epsilon\} \quad (9)$$

با توجه به شرایط بیان شده، برای تخمین یک رگرسیون گر خطی از معادله ۱۰ استفاده می‌شود:

$$f(x) = (w \cdot x) + b \quad (10)$$

که با در نظر گرفتن دقت و خطای مدل می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m |y_i - f(x_i)|_\epsilon \quad (11)$$

و با توجه به محدودیت‌های موجود برای مسئله بیان شده، داریم:

$$L(w, \xi, \xi') = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^m (\xi_i + \xi'_i) \quad (12)$$

$$\text{Subject to } \begin{cases} y_i - w^T x - b \leq \xi_i + \epsilon & (13) \\ y_i + w^T x + b \leq \xi'_i + \epsilon & (14) \\ \xi_i, \xi'_i, x_i \geq 0 & (15) \end{cases}$$

این معادلات برای تمامی مقادیر $i=1, \dots, m$ برقرار است. باید توجه داشت که اساساً معادلات ۱۳ و ۱۴ برای هر خطایی کمتر از ε، به مقادیر غیر صفر و ξ نیاز ندارد و در تابع هدف معادله (۱۰) جای نمی‌گیرد. با در نظر گرفتن تابع لاگرانژ برای حل مسئله بهینه‌سازی فوق، معادله ۱۰ به معادله ۱۶ تبدیل می‌شود. در این حالت سعی می‌شود تا تابع معادله ۱۶ بیشینه گردد.

$$L_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n (\alpha_j - \alpha'_j) x_j^T x_j (\alpha_j - \alpha'_j) + \sum_{j=1}^n ((\alpha_j - \alpha'_j) y_j - (\alpha_j + \alpha'_j) \epsilon) \quad (16)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq (\alpha_j - \alpha'_j) \leq C \quad (17)$$

که در این شرایط، x_i تنها در فرآیند ضرب داخلی ظاهر می‌شود. جهت نشان دادن بهتر داده‌ها، می‌توان داده‌ها را به فضای بالاتر که به فضای ویژگی (فضای هیلبرت) معروف است، انتقال داد که در این حالت جابجایی معادله ۱۸ اتفاق می‌افتد:

$$x_i, x_j \rightarrow \varphi(x_i), \varphi(x_j) \quad (18)$$

در این شرایط، مقدار $\varphi(x_i)$ به خوبی از طریق به کارگیری یک کرنل مناسب که در فضای بالا به طبقه‌بندی داده‌ها می‌پردازد، معرفی می‌شود، در حالی که فضای ورودی هنوز در حالت غیرخطی حضور دارد. بنابراین، داده‌هایی که در فضای ورودی قابل جداسازی نیستند، در فضای هیلبرت از طریق یک کرنل مناسب مانند کرنل گوسین (RBF) قابل جداسازی خواهند شد (معادله ۱۹):

ترکان و همکاران برای ماسه‌سنگ، مادستون، سنگ آهک و شیل معادله ۷ را ارائه دادند [۵]:

$$UCS = 9.95V_p^{1.21} \quad (6)$$

$$UCS = 7.1912V_p + 26.258 \quad (7)$$

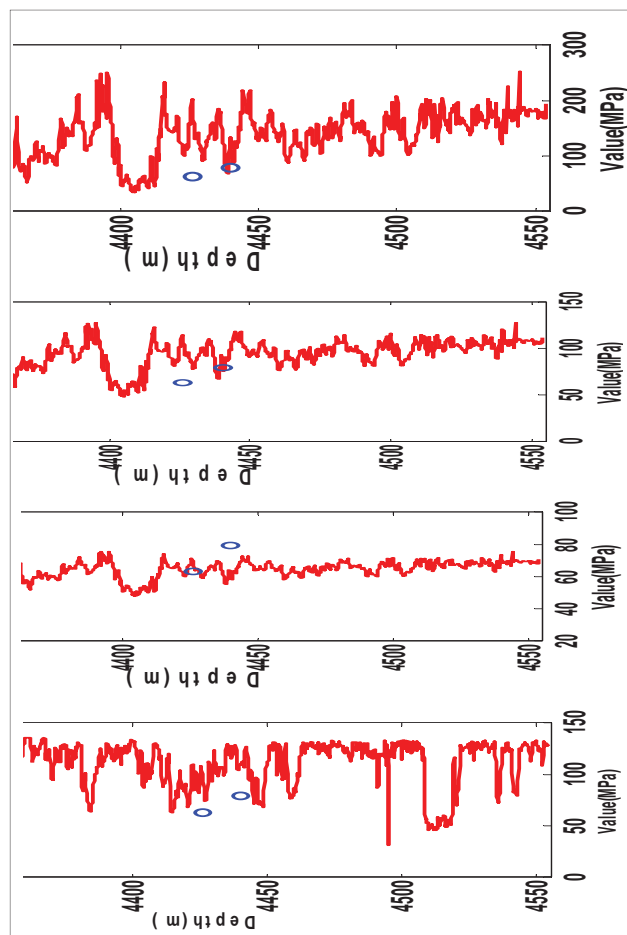
یاسر و اردوغان برای سنگ آهک، مارن، دولومیت، توف و بازالت رابطه زیر را ارائه دادند [۶]:

$$UCS = 21.677V_p + 21.427 \quad (8)$$

واحدها در معادلات ۶ تا ۸ $UCS(MPa), V_p(Km/s)$ است.

۲-۱- ماشین برداری پشتیبان

در مبحث شناسایی الگو، الگوریتم ماشین برداری پشتیبان، از طریق یک طبقه‌بندی کننده که قادر است داده‌ها را در فضای بالاتر دسته‌بندی کند، توابع



شکل ۲ | مقاومت فشاری تک محوره کالیبره شده برای سنگ مخزن از بالا به پایین به ترتیب با استفاده از روابط تجربی ۵ تا ۸



نشان می دهد؛ رأس منحنی تنش- کرنش، مقدار مقاومت تک محوره است. همان طور که در شکل های مذکور نشان داده شده است، مقاومت فشاری به دست آمده از رابطه گولوبو (معادله-۲)، بهترین مدل ممکن برای مقاومت فشاری تک محوره را ارائه داده است. بنابراین می توان این رابطه را در مطالعه حاضر به کار گرفت. در این مطالعه، علاوه بر استفاده از روابط تجربی ذکر شده، رابطه دیگری بر اساس سرعت موج فشاری و داده های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره چاه مورد نظر به دست آمده است. این رابطه که برای تعیین مقدار مقاومت فشاری تک محوره در میدان مورد مطالعه ارائه گردیده، به صورت معادله-۲۱ است:

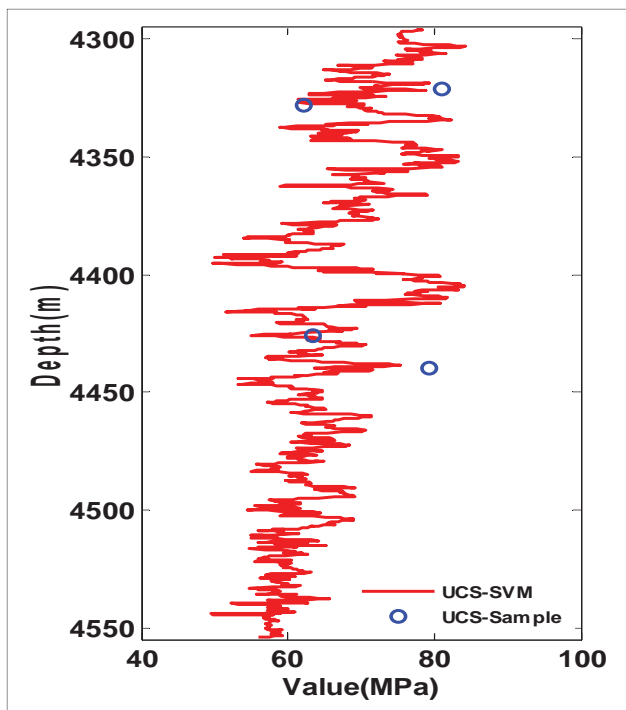
$$UCS = 7.483 V_p + 27.22 \quad (21)$$

واحدها در معادله بالا، $UCS(MPa), V_p(Km/s)$ است.

رابطه تجربی ارائه شده در بالا به علت تعداد کم نمونه های حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره از سطح اعتماد پایینی برخوردار است. بنابراین، در این میدان بهتر است که از معادله تجربی (۲) استفاده گردد.

۳- تعیین مقاومت فشاری تک محوره با استفاده از ماشین برداری پشتیبان (SVM)

بعد از تعیین مقاومت فشاری تک محوره، از طریق روابط تجربی از یکی از روش های بسیار قوی هوش مصنوعی یعنی روش SVM برای به دست آوردن رابطه ای برای تعیین مقدار مقاومت تک محوره از طریق نگارهای



شکل ۴ | مقاومت فشاری تک محوره پیش بینی شده توسط ماشین برداری پشتیبان و مقایسه آنها با مقادیر واقعی مقاومت فشاری تک محوره

$$k(x_i, x_j) = e^{-\|x_i - x_j\|^2 / 2\sigma^2} \quad (19)$$

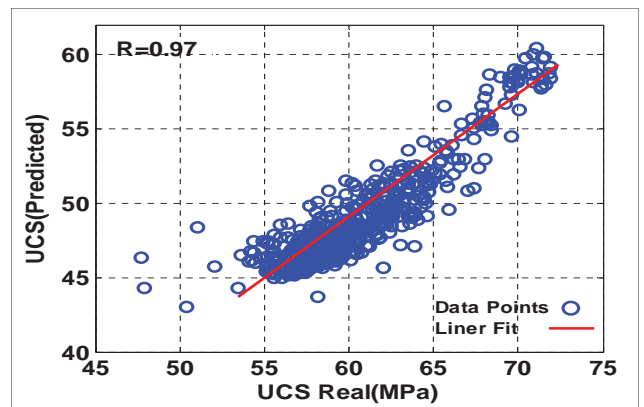
با توجه به شرایط ذکر شده، تخمین رگرسیون به شکل معادله-۲۰ بیان خواهد شد.

$$y_i = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N (\alpha_j - \alpha'_j) \phi(x_j) \phi(x_i) + b = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N (\alpha_j - \alpha'_j) K(x_j, x_i) + b \quad (20)$$

که در این معادله، b از طریق در نظر گرفتن معادلات ۱۳ و ۱۴ محاسبه می شود. این معادله، معادله اساسی ماشین برداری پشتیبان در فرآیند پیش بینی داده ها است [۱۰] تا [۱۵].

۲- بحث

در این مطالعه از داده های چاه-۱۰ یکی از میدانی نفتی در جنوب ایران استفاده شد. داده های استفاده شده در این مقاله شامل نگارهای پتروفیزیکی مانند چگالی (RHOB)، تخلخل نوترونی (NPHI)، صوتی (DT)، مقاومت ویژه (RT)، گاما (GR)، نگار تصویری صوتی دوقطبی (DSI)، کالیپر (CAL)، و تعداد ۴ نمونه مغزه است. همان گونه که ذکر گردید، مقاومت فشاری تک محوره را می توان از روابط متفاوتی که توسط عده ای از متخصصان چاه نگاری و ژئومکانیک مخزن بر اساس لیتولوژی و شرایط زمین شناسی مختلف ارائه گردیده است، محاسبه کرد. مخازن موجود در میدان مورد مطالعه از نوع کربناته هستند. بنابراین، از آنجایی که نمونه های چاه-۱۰ در میدان نفتی مورد مطالعه (بر اساس مطالعات حاصل از مقاطع گرفته شده از آنها)، از نوع آهک با یومیکریت هستند، بنابراین، روابط به کار گرفته شده (که در بالا نیز تعدادی از آنها ذکر گردیدند)، باید بر اساس این سنگ آهک باشد. در روابط بکار رفته، با توجه به نوع رابطه، از داده های مورد نیاز استفاده شد. از آنجایی که روابط ذکر شده تجربی و بر اساس حالت دینامیکی است، بنابراین، مقاومت فشاری تک محوره به دست آمده دارای مقداری خطا بوده که باید کالیبره گردد. بنابراین، این نتایج توسط مقاومت فشاری تک محوره حاصل از تست مقاومت تک محوره، کالیبره گردید (شکل های-۲۱). در شکل های نشان داده شده، دواير آبی رنگ، مقاومت فشاری تک محوره به دست آمده از منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک محوره را



شکل ۳ | همبستگی بین مقاومت فشاری تک محوره بدست آمده و مقدار پیش بینی شده از طریق SVM



نتیجه‌گیری

■ نتیجه کالیبراسیون مقاومت فشاری تک محوره حاصل از نگارهای چاه (روابط تجربی)، نشان داد که رابطه گولوبو می‌تواند به عنوان مناسب‌ترین رابطه در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره برای منطقه مورد مطالعه استفاده شود.

■ روابط تجربی با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ساختاری هر میدان نفتی بدست می‌آید. بنابراین، این روابط باید اولاً برای میدانی نفتی مشابه به کار گرفته شوند و ثانیاً بعد از کاربرد آنها باید با داده‌های واقعی کالیبره گردند.

■ جهت آموزش ماشین‌بُرداری پشتیبان از تعداد نمونه‌های آموزشی کمی استفاده شده است و نتایج مناسبی ارائه شد؛ یعنی همبستگی میان مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر موردنظر در حدود ۹۷ درصد بود که می‌تواند نشان‌دهنده دقت بالای این روش در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک محوره از طریق نگاره‌های چاه باشد.

■ تعیین مقاومت فشاری تک‌محوره از نگاره‌های متداول چاه‌نگاری، بسیار کم‌هزینه و سریع است و همچنین مقاومت فشاری تک‌محوره حاصل از نگار به‌صورت پیوسته است که می‌تواند پایداری کل چاه را با دقت بالاتری بسنجد.

متداول چاه‌نگاری، که در چاه‌نگاری برای تعیین لیتولوژی و نیز تخلخل مخزن همواره بکار می‌رود، استفاده گردید. نگاره‌های مورد استفاده عبارتند از نگار چگالی (RHOB) و نگار گاما (GR)، نگار سونیک (DT) و مقاومت تک‌محوره (UCS)، که بعد از استفاده از SVM، نتایج آن در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. جهت پیاده‌سازی ماشین‌بُرداری پشتیبان از کرنل گوسین به‌عنوان بهترین کرنل استفاده شد [۱۴]. نتایج این مطالعه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، ماشین‌بُرداری توانسته با دقت بالا و روند تقریباً مناسبی به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره پردازد. همبستگی میان مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر موردنظر در حدود ۹۷ درصد است که نشان‌دهنده دقت بالای این روش است. هدف از استفاده از ماشین‌بُرداری پشتیبان در این تحقیق، نشان دادن کارایی این روش در پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره است. اگر تعداد نمونه‌های مغزه در مطالعات ژئومکانیکی زیاد باشد، شاید بتوان به‌طور مستقیم از طریق نمونه‌ها به پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوره پرداخت و نیازی به استفاده از روابط تجربی نخواهد بود.

پانویس‌ها

¹Uniaxial Compressive Strength
²Support Vector Machine

³Dipole Shear Imaging
⁴Vapnik's ϵ -insensitive loss function

⁵Dipole Sonic Imager (DSI)

منابع

- [1] Bieniawski, Z.T. (1974). "Estimating the strength of rock materials". Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 74, 312-320.
- [2] Cargill, J.S., Shakoor, A. (1990). "Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 27 (6), 495-503.
- [3] Chang, C., Zoback, M. D. et al. (2006). "Empirical relations between rock strength and physical properties in sedimentary rocks." Journal of Petroleum Science and Engineering, 51, 223-237.
- [4] CHRISTARAS, B., MARIOLAKOS, I., FOUNDOULIS, J., ATHANASIAS, S., and DIMITRIOU, A. Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece. Proceedings of the 6th International Symposium Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes, 1997. pp. 125-132.
- [5] TERCAN, A.E., UNVER, B., TIRYAKI, B., and ÖZBILGIN, D. A study of relationships among mechanical, index and petrographic properties of some sandstones using canonical correlation analysis, (in Turkish). Mining, vol. 44, 2005. pp. 3-14.
- [6] YAŞAR, E. And ERDOĞAN. Y. Yapı-kaplamakayalarının P dalga hızı ile fiziko-mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerinin atıksel analizi (in Turkish), Türkiye IV. Marble Sempoium (Mersem'2003), 2003. pp. 353-362.
- [7] KILIÇ, A. AND TEYMEN, A. Determination of mechanical properties of rocks using simple methods, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 67, 2008. pp. 237-244.
- [8] R, Altindag. (2011). Correlation between P-wave velocity and some mechanical properties for sedimentary rocks, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, SA ISSN 0038-223X/3.
- [9] James G.A. & Wyndj.G. (1965). Stratigraphic Nomenclature of Iranian oil Consortium Agreement Area, AAPG Bulletin V.49, No.12, p.2182-2245.
- [10] Agarwala S., VijayaSaradhib V., and Karnick H., (2008). Kernel-based online machine learning and support vector reduction, Neurocomputing 71, pp 1230-1237
- [11] Chih-Hung W., Gwo-Hsiung T., and Rong-Ho L. (2009). A Novel hybrid genetic algorithm for kernel function and parameter optimization in support vector regression, Expert Systems with Applications 36, pp 4725-4735
- [12] Eryarsoy E., Koehler, Gary J., and Aytug H. (2009). Using domain-specific knowledge in generalization error bounds for support vector machine learning, Decision Support Systems 46, pp 481-491.
- [13] Gunn S.R. (1997). Support vector machines for classification and regression, Technical Report, Image Speech and Intelligent Systems Research Group, University of Southampton, Southampton, UK.
- [14] Han D., and Cluckie, I. (2004). Support vector machines identification for runoff modeling. In S. Y. Liang, K. K. Phoon, & V. Babovic, (Eds.), Proceedings of the sixth international conference on hydroinformatics, June, Singapore (pp. 21-24).
- [15] Hwei-Jen L., and Jih Pin Y. (2009). Optimal reduction of solutions for support vector machines, Applied Mathematics and Computation 214, pp 329-335.