

بررسی ارتباط میان سرعت موج P با وزن واحد حجم، تخلخل و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌ها با استفاده از روش آماری و شبکه عصبی، مطالعه موردی: ساختگاه سد رودبار لرستان

علی حق‌نژاد^{*}، کاوه آهنگری^۱، علی نورزاد^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲- عضو هیئت علمی، مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۳- عضو هیئت علمی، مهندسی ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی آب، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران

* ahangari@srbiau.ac.ir

دریافت: ۸۹/۱۱/۲۸ پذیرش: ۹۰/۳/۱۸

چکیده

کاربرد روش‌های لرزه‌نگاری در شاخه‌های متعددی مانند مهندسی معدن، ژئوتکنیک، شهرسازی و تونل‌سازی رو به افزایش است. پژوهشگران متعددی ارتباط میان سرعت موج P با سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ را بررسی و روابط آن‌ها را برای پیش‌بینی غیرمستقیم ارائه نموده‌اند. در این بررسی از مجموعه داده‌های حاصل از نمونه‌های اشباع سرعت موج P، وزن واحد حجم و مقاومت فشاری تک‌محوری ساختگاه سد رودبار لرستان که بر روی سازند دالان قرار دارد، برای بررسی ارتباط سرعت موج P با وزن واحد حجم و تخلخل و نیز مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شده است. مقدار سطح معنی‌داری و t روابط خطی به‌دست آمده از بررسی این روابط در دو روش آماری و شبکه عصبی، نشان می‌دهد تخلخل در سرعت موج P موثرتر از وزن واحد حجم می‌باشد. در این راستا مقایسه مقدار R^2 و آماره آزمون روابط خطی و غیرخطی نشان می‌دهد، معادله خطی به‌دست آمده از شبکه عصبی مطلوب‌تر از سایر روابط است. در بررسی مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت موج P، مقایسه معادله خطی هر دو روش آماری و شبکه عصبی بیانگر این مطلب است که مقاومت فشاری تک‌محوری ۰/۱۱ تا ۰/۱۲ برابر سرعت موج P می‌باشد. روابط غیرخطی توانی به‌دست آمده مقدار R^2 را در روش آماری و شبکه عصبی به ترتیب ۰/۹۸۱ و ۰/۹۹۸ به‌دست داده است. به‌طور کلی مقدار R^2 و آماره آزمون در بررسی ارتباط سرعت موج P با وزن واحد حجم و تخلخل و نیز مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت موج P، نشان می‌دهد عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی این روابط مطلوب‌تر از روش آماری است.

واژه‌های کلیدی: خصوصیات فیزیکی، خصوصیات مکانیکی، روش آماری، روش رگرسیون، شبکه عصبی

مقدمه

سنگ، وزن واحد حجم، ابعاد و شکل دانه، تخلخل، آیزوتروپی، مقدار آب و رس، فشار محصور کننده، درجه حرارت، هوازدگی، صفحات لایه‌بندی و مشخصات ناپیوستگی‌ها بر نتایج لرزه‌نگاری موثر می‌باشند [۲ و ۳]. بررسی تمامی این عوامل امری مشکل است، از این رو در بیش تر مواقع بررسی‌های لرزه‌نگاری با ساده‌سازی انجام می‌شود. در این مورد پژوهشگرانی زیادی ارتباط میان سرعت موج P با سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ را بررسی و روابط آن‌ها را برای پیش‌بینی غیرمستقیم ارائه نموده‌اند. جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب روابط پیشنهادی برخی از محققین میان سرعت موج P با وزن واحد حجم و تخلخل و نیز سرعت موج P با مقاومت فشاری تک‌محوری را نشان می‌دهند.

روابط غیر مستقیم در تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ از سال‌ها پیش در علم مکانیک سنگ به کار می‌روند. به عنوان نمونه به نظر هادسون و هریسون^۱ مقاومت کششی سنگ ۰/۱ برابر مقاومت فشاری آن است [۱]. دلایل استفاده از روابط غیرمستقیم در تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ، کاهش زمان و هزینه بررسی‌های مکانیکی سنگ است [۲].

کاربرد روش‌های لرزه‌نگاری در شاخه‌های متعددی مانند مهندسی معدن، ژئوتکنیک، شهرسازی و تونل‌سازی رو به افزایش است. روش‌های لرزه‌نگاری به‌علت کاربرد آسان و غیرمخرب آزمایش‌های آزمایشگاهی، برجا استفاده می‌شوند. در این راستا عوامل متعددی مانند نوع

¹ Hudson & Harrison

مکانیکی سنگ) در شرایط اشباع بررسی گردند. در این بررسی از مجموعه داده‌های ساختگاه سد رودبار لرستان که بر روی سازند دالان قرار دارد، استفاده شده است. در ابتدای بررسی، ویژگی‌های توصیفی مجموعه داده‌های مورد استفاده ارائه می‌شوند تا محدوده هر یک از داده‌ها مشخص گردد. سپس روابط میان سرعت موج P با تخلخل، وزن واحد حجم و مقاومت فشاری تک‌محوری توسط دو روش آماری و شبکه عصبی بررسی می‌شوند.

همان طور که مشاهده می‌شود، بررسی‌های انجام شده توسط محققین ذکر شده در یک و یا چند نوع سنگ تقریباً مشابه انجام گرفته است. در این شرایط حداکثر مقدار R^2 مربوط به معادله پیشنهادی شارما و سینگ در زغال سنگ به مقدار ۰/۹۷۹ است. اهمیت روابط غیرمستقیم در مکانیک سنگ باعث شد تا در این مقاله، روابط میان سرعت موج P با وزن واحد حجم و تخلخل (به عنوان دو خصوصیت فیزیکی سنگ) و نیز مقاومت فشاری تک‌محوری (به عنوان خصوصیت

جدول ۱- روابط پیشنهادی پژوهشگران میان سرعت امواج فشاری، چگالی و تخلخل

شماره رابطه	معادله رگرسیون	R^2	نوع سنگ	منبع
(1)	$\gamma = 0.213V_p + 1.256$	0.821	۱۴ نوع سنگ کربناته	قهرمان و یکن [۲]
(2)	$29.377 + n = -4.733V_p$	0.884		
(3)	$V_p = 0.00363\gamma - 4.1$	0.94	سرپانتیت و پریدوتیت	کریستنسن [۴]
(4)	$V_s = 0.00254\gamma - 3.95$	0.90		
(5)	$V_p = 397\gamma - 4841$	0.95	سنگ‌های سرپانتینی	دیامانتیس و همکاران [۵]
(6)	$V_s = 298\gamma - 4858$	0.94		
(7)	$V_p = 5.0598n^2 - 8.5052n + 5.1284$	0.922	آهک پلاژیک	یورموس و ویلیامز [۶]
(8)	$\gamma = 0.373V_p + 1.045$	0.886		
(9)	$V_p = -3.8835n + 4.8689$	0.375	آهک (اشباع)	کادورت [۷]
(10)	$V_p = -9.38n + 6.606$	0.877		
(11)	$\gamma = 0.202V_p + 1.513$	0.892		
(12)	$V_p = -6.65n + 5.624$	0.886	آهک (اشباع)	استراندنس [۸]
(13)	$V_p = -5.201n + 4.944$	0.728	ماسه‌سنگ (اشباع)	هان [۹]
(14)	$\gamma = 0.195V_p + 1.569$	0.731		
(15)	$V_p = -2.227n + 4.303$	0.513	ماسه‌سنگ (اشباع)	ماوکو و همکاران [۱۰]
(16)	$\gamma = 0.219V_p + 1.45$	0.478		
(17)	$\gamma = 0.137V_p + 1.843$	0.824	دولومیت (اشباع)	یال و جمیسون ^۱ [۱۱]
(18)	$\gamma = 0.117V_p + 1.961$	0.394	شیل و ماسه‌سنگ (اشباع)	جیزبا ^۲ [۱۲]
(19)	$V_p = 0.34 + 1.88\gamma$	0.83	-	بور و هلمستاد ^۳ [۱۳]
(20)	$V_p = 5430 - 107n$	-	-	رزویسکی و نوبک [۱۴]

¹ Yale & Jamieson² Jizba³ Bur and Hjelmstad

جدول ۲ - روابط پیشنهادی میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P

شماره معادله	معادله رگرسیون	R^2	نوع سنگ	منبع
(21)	$UCS = 0.035V_p - 31.5$	-	ماسه سنگ	فربورگ ^۱ [۱۵]
(22)	$UCS = 0.77V_p^{2.93}$	-	شیل	هرسرود [۱۶]
(23)	$UCS = 6 \times 10^{-3}V_p - 0.556$	0.913	نهشته های کالیچی	دینکر و همکاران [۱۷]
(24)	$UCS = 5.136Ln(V_p) - 28.337$	0.913		
(25)	$UCS = 9 \times 10^{-3}V_p^{0.963}$	0.885		
(26)	$UCS = 2.054e^{0.001V_p}$	0.818		
(27)	$UCS = 2.304V_p^{2.4315}$	0.94	۱۹ نوع سنگ مختلف	کلیک و تیمن [۱۸]
(28)	$UCS = 9.95V_p^{1.21}$	0.83	-	قهرمان ^۲ [۱۹]
(29)	$V_p = 0.0317UCS + 2.0195$	0.8	سنگ های کربناته	یاشار و اردوغان ^۳ [۲۰]
(30)	$UCS = 0.78e^{0.88V_p}$	0.533	سنگ های آتشفشانی	انتویزل و همکاران ^۴ [۲۱]
(31)	$UCS = 0.78V_p^{0.88}$	0.531		
(32)	$UCS = 0.0642V_p - 117.99$	0.902	۷ نوع سنگ مختلف	شارما و سینگ ^۵ [۲۲]
(33)	$UCS = 0.019V_p - 1.76$	0.700	فیلیت و متاگرایواک	آندرد و ساریوا ^۶ [۲۳]
(34)	$UCS = 0.133V_p - 227.19$	0.979	زغال سنگ	شارما و سینگ [۲۴]
(35)	$V_p = 4874e^{-0.0018UCS}$	-	سنگ نمک	لاما و وتوکوری ^۷ [۲۵]

روش پژوهش

در روش آماری، ارتباط میان سرعت موج P با وزن واحد حجم و تخلخل و نیز سرعت موج P با مقاومت فشاری تک محوری به دو شکل خطی و غیرخطی بررسی می شوند. در روش غیرخطی از روابط لگاریتمی، درجه دوم، درجه سوم، مرکب^۸، توانی، افزایشی^۹، نمایی، S و لجستیک^{۱۰} استفاده می گردند. همچنین به منظور کاهش تعداد متغیرها و کاربردی بودن آن از نسبت دو خصوصیت استفاده می شود. روابط خطی و غیرخطی به دو روش دارای عرض از مبدا و بدون عرض از مبدا بررسی می گردند، اما در این بررسی به منظور کاهش روابط، در هریک از دو شکل خطی و غیرخطی، معادله با مطلوب ترین مقدار R^2 و آماره آزمون رگرسیون (F Value) ارائه می شود.

معرفی سد رودبار لرستان

سد و نیروگاه رودبار لرستان در ۱۰۰ کیلومتری شهرستان الیگودرز و در بخش بشارت ذلقی آن شهرستان، بر روی رودخانه رودبار لرستان و در سنگ های آهکی و دولومیتی سازند دالان در حال احداث است. منطقه احداث سد در بخش کوچکی از زون زاگرس مرتفع قرار دارد که بلندترین رشته کوه های زاگرس در آن جای گرفته اند. از جمله ویژگی های ریخت شناسی حاکم بر آن وجود سازندهای مقاوم (آهک، دولومیت، و آهک های دولومیتی) در مقابل هوازگی و فرسایش آب های جاری است. از سوی دیگر در نقاطی از این محدوده، سنگ های نیمه مقاوم (شیل، مارن سنگ و آهک های مارنی) و نامقاوم (نهشته های سخت نشده کواترنز) برونزد دارند [۲۶].

⁸ Compound

⁹ Growth

¹⁰ Logistic

¹ Freyburg

² Kahraman

³ Yasar & Erdogan

⁴ Entwisle et al

Singh & ⁵ Sharma

⁶ Andrade & Saraiva

⁷ Lama & Vutukuri

بررسی دو خصوصیت فیزیکی و مکانیکی سنگ در ابتدا ارتباط میان سرعت موج P اشباع با وزن واحد حجم اشباع و تخلخل و سپس روابط میان سرعت موج P اشباع با مقاومت فشاری تک محوری اشباع بررسی می شوند.

ارتباط سرعت موج P اشباع با وزن واحد حجم اشباع و تخلخل

جدول ۳ ویژگی های توصیفی مجموعه داده های سرعت امواج فشاری اشباع (V_{ps})، چگالی اشباع (γ_s) و تخلخل (n) مورد بررسی را نشان می دهد. در این بررسی ۲۴ مجموعه داده، شامل ۵ مجموعه داده از دولومیت، ۴ مجموعه داده از آهک و ۱۵ مجموعه داده از آهک های دولومیتی استفاده شده است. سرعت موج P بر اساس روش پیشنهادی $ASTM:D2845$ و وزن واحد حجم و تخلخل بر اساس روش پیشنهادی $ISRM$ اندازه گیری گردید.

جدول ۴ نشان دهنده معادله خطی بدون عرض از مبدا میان سرعت امواج فشاری اشباع، چگالی اشباع و تخلخل است. در بررسی روابط خطی، مقدار R^2 و آماره آزمون معادله بدون عرض از مبدا مطلوب تر از معادله دارای عرض از مبدا می باشد. مقدار سطح معنی داری ($Sig.$) و t در این جدول نشان دهنده تاثیر تخلخل در سرعت موج P اشباع می باشد. همچنین مقادیر فوق عدم تاثیر چگالی اشباع بر سرعت موج P اشباع را نشان می دهند. جدول ۵ معادله توانی غیرخطی بدون عرض از مبدا میان سرعت موج P اشباع با نسبت چگالی اشباع به تخلخل را نشان می دهد. مقدار R^2 و آماره آزمون معادله توانی بدون عرض از مبدا از عملکرد مطلوب تری نسبت به سایر روابط غیرخطی برخوردار است.

در اجرای برنامه توسعه یافته از ۲۴ مجموعه داده مورد استفاده در روش آماری (به منظور آموزش) از معتبرسازی و آزمایش استفاده شده است. در پیش بینی شبکه عصبی، از ۱۲ مجموعه داده (۵۰ درصد کل مجموعه داده) مربوط به چگالی و تخلخل اشباع که از روش نمونه گیری نرم افزار *Microsoft Office Excel* به دست آمده، استفاده شده است. تعداد گام ها و خطای شبکه عصبی به ترتیب ۱۰۵۲۷ و ۰/۰۰۴۴۶ بوده است.

تمامی بررسی های آماری در محیط نرم افزار *SPSS-16* انجام شده است.

در روش شبکه عصبی از برنامه ای که توسط نویسندگان در نرم افزار *Matlab* توسعه یافته استفاده شده است. در این برنامه برای آموزش از الگوریتم *Back-Propagation (BP)* استفاده گردیده است. زیرا الگوریتم *BP* در حل مسئله های پیش گوینده بسیار توانا می باشد [۲۷]. سایر مشخصات برنامه توسعه یافته عبارتند از:

- تابع آموزش: *Traingdx*
 - تابع پخش کننده داده ها: *Divideind*
 - تابع وزن دهی: *Initlay*
 - تابع بررسی عملکرد آموزش شبکه عصبی: *MSE*
 - توابع انتقال: *Tansig, Purelin*
- در روش شبکه عصبی، به منظور تعیین تعداد نرون لایه مخفی از فرمول های تجربی پیشنهادی هج و نیلسون^{۱۱}، هوش^{۱۲}، ریپلی^{۱۳}، پائولا^{۱۴}، وانگ^{۱۵}، مسترز^{۱۶} کاسترا و بوید^{۱۷} و کونلوپولاس و ویکینسون^{۱۸} استفاده شده است [۲۸]. برای هر یک از روابط فوق، مقدار *MAE*، *MSE* و R^2 محاسبه گردید.

بر اساس روابط پیشنهادی در بررسی سرعت موج P با چگالی و تخلخل، تعداد نرون های لایه مخفی می تواند پنج و شش نرون باشد که مقدار *MAE*، *MSE* و R^2 به تعداد شش نرون به ترتیب ۰/۰۰۳۹، ۰/۰۴۶۴ و ۰/۷۰۹۷ می باشد. این مقادیر مطلوب تر از مقادیر مشابه با پنج نرون است. به همین ترتیب در بررسی سرعت موج P با مقاومت فشاری تک محوری از یک نرون ورودی، یک نرون لایه مخفی و یک نرون خروجی استفاده شده است. شکل ۱ نمودار گردشی عملیات بررسی و پیش بینی شبکه عصبی را نشان می دهد.

¹¹ Hecht-Nielsen

¹² Hush

¹³ Ripley

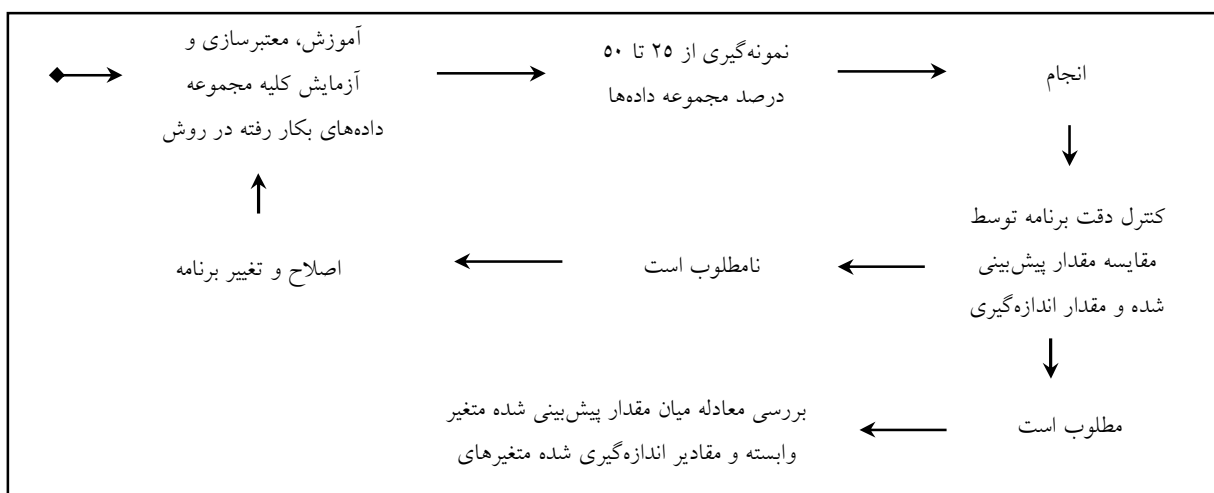
¹⁴ Paola

¹⁵ Wang

¹⁶ Masters

¹⁷ Kaastra and Boyd

¹⁸ Kannellopoulas and Wilkinson



شکل ۱- نمودار گردش بررسی و پیش بینی شبکه عصبی

جدول ۳- ویژگی های توصیفی مجموعه داده های سرعت موج P اشباع، چگالی اشباع و تخلخل

متغیر	تعداد	محدوده تغییرات	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشیدگی
$V_{ps} (m/s)$	24	4232.00	2454.00	6686.00	5.012E3	1075.414	1.157E6	-0.281	-0.291
$\gamma_s (gr/cm^3)$	24	0.24	2.62	2.86	2.716	0.049	0.002	0.876	2.204
$n (%)$	24	0.21	0.21	0.42	0.342	0.061	0.004	-0.628	-0.472

جدول ۴- معادله خطی بدون عرض از مبدا میان سرعت موج P اشباع، چگالی اشباع و تخلخل

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R	R ²	F	متغیر	t	Sig.
(36)	$V_{ps} = 54.876\gamma_s + 14205.17n$	0.992	0.984	673.427	γ_s	0.178	0.860
					n	5.884	0.000

جدول ۵- معادله غیرخطی بدون عرض از مبدا میان سرعت موج P اشباع با نسبت چگالی اشباع به تخلخل

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R ²	F	Sig.	نوع معادله
(37)	$V_{ps} = (\gamma_s/n)^{4.027}$	0.988	1.862E3	0.000	توانی

یافته در پیش بینی روابط میان سرعت موج P اشباع، چگالی اشباع و تخلخل استفاده نمود. جدول ۷ معادله خطی بدون عرض از مبدا میان مقدار پیش بینی شده سرعت موج P اشباع با مقادیر اندازه گیری شده وزن واحد حجم اشباع و تخلخل را نشان می دهد.

جدول ۶ روابط میان مقدار واقعی اندازه گیری شده (A) سرعت موج P اشباع و مقدار پیش بینی شده (P) آن پس از آموزش شبکه عصبی و میان ۱۲ مجموعه داده نمونه گیری شده را نشان می دهد. دقت (مقدار R²) معادله توانی میان مقدار واقعی و پیش بینی شده منحصر به فرد است. لذا می توان از نتایج شبکه عصبی آموزش

R^2 و آماره آزمون معادله درجه سوم به دست آمده از شبکه عصبی مطلوب تر از سایر روابط می باشد. شکل ۲ نشان دهنده پراکندگی مقادیر واقعی اندازه گیری شده سرعت موج P با مقادیر پیش بینی شده روش های آماری و شبکه عصبی می باشد. مقدار نشان داده شده در روش آماری از معادله توانی غیر خطی بدون عرض از مبدا و مقدار مشابه در شبکه عصبی از معادله خطی بدون عرض از مبدا به دست آمده است.

در این معادله، مانند معادله به دست آمده از روش آماری، میزان سطح معنی داری و t نشان دهنده تاثیر تخلخل در سرعت موج P اشباع می باشد. جدول ۸ معادله درجه سوم بدون عرض از مبدا میان مقدار پیش بینی شده سرعت موج P اشباع را با مقادیر اندازه گیری شده وزن واحد حجم اشباع و تخلخل نشان می دهد. مقایسه روابط خطی و غیر خطی به دست آمده از هر دو روش آماری و شبکه عصبی نشان می دهد، مقدار

جدول ۶- معادله میان مقدار واقعی و پیش بینی شده سرعت موج P اشباع در شبکه عصبی

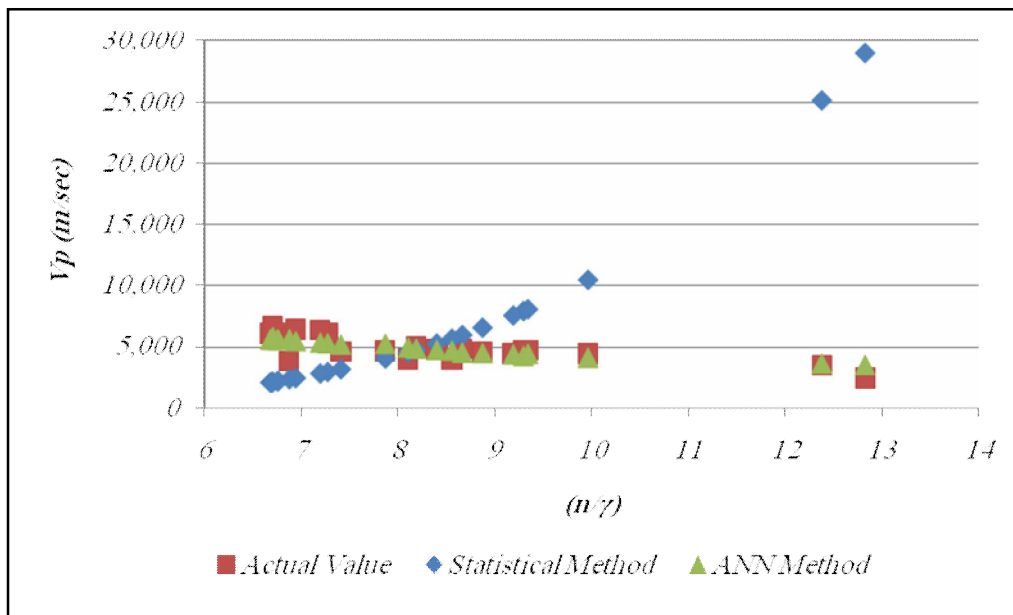
شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R^2	F	Sig.	نوع معادله
(38)	$A = P^{0.998}$	1.000	2.619E4	0.000	توانی

جدول ۷- معادله خطی بدون عرض از مبدا میان سرعت موج P اشباع، چگالی اشباع و تخلخل

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R	R^2	F	متغیر	t	Sig.
(39)	$V_{ps} = 468.118\gamma_s + 10721.494n$	0.998	0.996	1.302E3	γ_s	2.783	0.019
					n	7.785	0.000

جدول ۸- معادله غیر خطی بدون عرض از مبدا میان سرعت موج P اشباع با نسبت وزن واحد حجم اشباع به تخلخل

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R^2	F	Sig.	نوع معادله
(40)	$V_{ps} = 17.466(\gamma_s/n)^3 - 433.248(\gamma_s/n)^2 + 2.974 \times 10^3(\gamma_s/n)$	0.998	1.206E3	0.000	درجه سوم



شکل ۲- پراکندگی مقدار واقعی سرعت موج P با مقادیر پیش بینی شده روش های آماری و شبکه عصبی

سرعت موج P اشباع با مقاومت فشاری تک محوری اشباع

در جدول ۹ ویژگی های توصیفی مجموعه داده های مقاومت فشاری تک محوری اشباع (UCS_s) و سرعت موج P اشباع (V_{ps}) ارائه می دهد. در این بررسی ۲۵ مجموعه داده، شامل ۵ مجموعه داده از دولومیت، ۴ مجموعه داده از آهک، ۱۵ مجموعه داده از آهک های دولومیتی و ۱ مجموعه داده از مارن سنگ استفاده شده است. مقاومت فشاری تک محوری مورد بررسی بر اساس روش پیشنهادی $ASTM:D2938$ اندازه گیری گردید.

جدول ۱۰ نشان دهنده معادله خطی بدون عرض از مبدا میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت امواج فشاری است. در این معادله مقاومت فشاری تک محوری اشباع P برابر سرعت موج P تک محوری اشباع می باشد.

جدول ۱۱ معادله توانی بدون عرض از مبدا میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P را نشان می دهد. توان سرعت موج P نشانگر این است که با افزایش سرعت موج P اشباع اختلاف میان آن با

مقاومت فشاری تک محوری با سرعت اندک رو به کاهش می باشد.

در بررسی ارتباط میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P اشباع، از ۲۵ مجموعه داده مورد استفاده در روش آماری (به منظور آموزش، معترس سازی و آزمایش) استفاده شده است. در پیش بینی شبکه عصبی، از ۱۳ مجموعه داده (۵۰ درصد کل مجموعه داده) سرعت موج P اشباع که از روش نمونه گیری به دست آمده، استفاده می شود. تعداد گام ها و خطای شبکه عصبی به ترتیب ۳۸۵۲ و ۰/۰۰۰۷۹ بوده است.

جدول ۱۲ روابط میان مقدار واقعی اندازه گیری شده (A) مقاومت فشاری تک محوری اشباع و مقدار پیش بینی شده (P) آن، پس از آموزش شبکه عصبی و میان ۱۳ مجموعه داده نمونه گیری شده را نشان می دهد. دقت (مقدار R^2) معادله توانی میان مقدار واقعی و پیش بینی شده مطلوب است. لذا می توان از نتایج شبکه عصبی آموزش یافته در پیش بینی روابط میان مقاومت فشاری تک محوری با سرعت موج P اشباع استفاده نمود.

جدول ۹- ویژگی های توصیفی مجموعه داده های مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P اشباع

متغیر	تعداد	محدوده تغییرات	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	واریانس	چولگی	کشیدگی
$UCS_s (MPa)$	25	85.10	10.30	95.40	58.340	26.204	686.669	-0.177	-1.230
$V_{ps} (m/s)$	25	4232.00	2454.00	6686.00	4.869E3	1118.206	1.250E6	-0.127	-0.127

جدول ۱۰- معادله خطی بدون عرض از مبدا میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P اشباع

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R	R^2	F	متغیر	t	$Sig.$
(41)	$UCS_s = 0.012V_{ps}$	0.915	0.837	122.941	V_{ps}	11.088	0.000

جدول ۱۱- معادله غیرخطی بدون عرض از مبدا میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P اشباع

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R^2	F	$Sig.$	نوع معادله
(42)	$UCS_s = (V_{ps})^{0.465}$	0.981	1.239E3	0.000	توانی

جدول ۱۲- معادله میان مقدار واقعی و پیش بینی شده مقاومت فشاری تک محوری اشباع در شبکه عصبی

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R^2	F	$Sig.$	نوع معادله
(43)	$A = P^{0.987}$	0.982	670.264	0.000	توانی

اشباع وجود دارد. مقایسه روابط غیرخطی به دست آمده در هر دو روش آماری و شبکه عصبی نشان می دهد، مقدار R^2 و آماره آزمون معادله توانی در هر دو روش مطلوب تر از سایر روابط غیرخطی بوده اند. همچنین در میان تمام روابط خطی و غیرخطی به دست آمده، معادله توانی به دست آمده از شبکه عصبی دارای مطلوب ترین مقدار R^2 و آماره آزمون است. شکل ۳ پراکندگی مقدار اندازه گیری شده مقاومت فشاری تک محوری اشباع، مقدار پیش بینی شده از معادله توانی بدون عرض از مبدا روش آماری و مقدار مشابه معادله توانی شبکه عصبی را نشان می دهد.

جدول ۱۳ معادله خطی بدون عرض از مبدا میان مقدار پیش بینی شده مقاومت فشاری تک محوری اشباع با مقادیر اندازه گیری شده سرعت موج P اشباع را نشان می دهد. در معادله خطی مقاومت فشاری تک محوری اشباع ۰/۰۱۱ برابر سرعت موج P تک محوری اشباع می باشد.

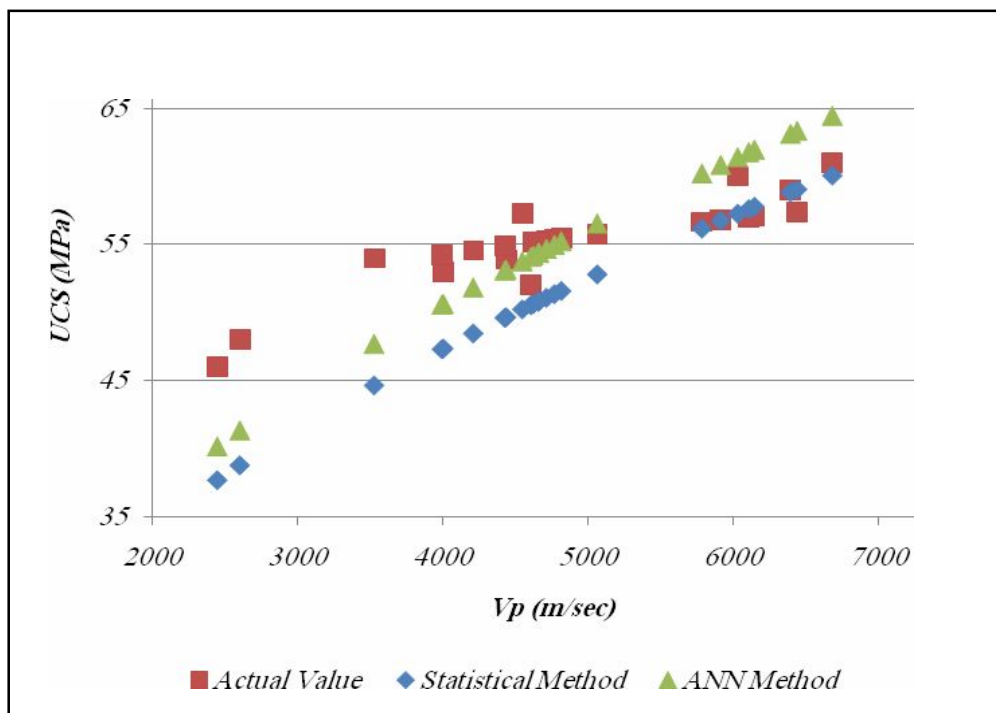
جدول ۱۴ معادله توانی بدون عرض، از مبدا میان، مقدار پیش بینی شده مقاومت فشاری تک محوری با مقادیر اندازه گیری شده سرعت موج P اشباع را نشان می دهد. مقایسه معادله خطی در روش آماری و شبکه عصبی نشان می دهد که تنها اختلاف ۰/۰۰۱ میان هر دو معادله مقاومت فشاری تک محوری با سرعت موج P

جدول ۱۳- معادله خطی بدون عرض از مبدا میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P اشباع

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R	R^2	F	متغیر	t	Sig.
(44)	$UCS_s = 0.011V_{ps}$	0.970	0.942	193.303	V_{ps}	13.903	0.000

جدول ۱۴- روابط غیرخطی بدون عرض از مبدا میان مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج P اشباع

شماره معادله	معادله پیش بینی کننده	R^2	F	Sig.	نوع معادله
(45)	$UCS_s = (V_{ps})^{0.473}$	0.998	5.980E3	0.000	توانی

شکل ۳- پراکندگی مقدار واقعی سرعت موج P با مقادیر پیش بینی شده روش های آماری و شبکه عصبی

بحث و نتیجه‌گیری

در شکل ۲ اختلاف میان مقدار پیش‌بینی شده شبکه عصبی و روش آماری آشکارتر از شکل ۳ است. البته در شکل ۲ مقدار به دست آمده از شبکه عصبی نزدیک‌تر به مقدار واقعی اندازه‌گیری شده است. با توجه به جداول ۱ و ۲ مطلوب‌ترین مقدار R^2 مربوط به معادله پیشنهادهی شارما و سینگ در زغال‌سنگ به مقدار ۰/۹۷۹ می‌باشد. اما در روابط به دست آمده در این بررسی به جز معادله خطی میان مقاومت فشاری تک‌محوری با سرعت موج P در سایر روابط، مقدار R^2 مطلوب‌تر از معادله پیشنهادهی شارما و سینگ است. البته بررسی شارما و سینگ بر روی یک نوع سنگ صورت پذیرفته درحالی که این بررسی براساس مجموعه داده‌های جمع‌آوری شده از سازند دالان می‌باشد.

منابع

- [1] Hudson, J.A., and Harrison, J.P (1997) Engineering rock mechanics, Elsevier Science
- [2] Kahraman, S., and Yeken, T (2008) Determination of physical properties of carbonate rocks from P-wave velocity, Bull Eng Geol Environ, 67:277-281
- [3] Sharma, P.K., and Singh, T.N (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, Bull Eng Geol Environ, 67:17-22
- [4] Christensen, N.I (2004) Serpentinities, peridotites and seismology, Int. Geol. Rev., 46:795-816
- [5] Diamantis, K., Gartzos, E., and Migiros, G (2009) Study on uniaxial compressive strength, point load strength index, dynamic and physical properties of serpentinites from Central Greece: Test results and empirical relations, Engineering Geology, 108:199-207
- [6] Urmos, J., and Williams, R.H (1993) In situ velocities in pelagic carbonates: new insights from ocean drilling program leg 130, Ontong Java. J. Geophys. Res., 98(B5):7903-7920
- [7] Cadoret, T (1993) Effect de la saturation eau/gaz sur les proprietes acoustics des roches, PhD thesis, University of Paris
- [8] Strandenes, S (1991) Rock physics analysis of the Brent Group reservoir in the Oseberg Field, Stanford Rockphysics

امروزه استفاده از روش‌های غیرمستقیم در تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ کاربرد وسیعی یافته است. در ابتدا برای توسعه این روش‌ها از روش‌های آماری استفاده شد. اما با ظهور هوش مصنوعی استفاده از روش‌های داده‌کاوی مانند شبکه عصبی، استنتاج فازی، نرو- فازی و غیره گسترش یافت. مقایسه عملکرد این روش‌ها و انتخاب روش بهینه از بین آنها برای هدف مورد نظر، امری مشکل می‌باشد، زیرا عملکرد کلیه روش‌ها به داده‌ها وابسته است [۳۰]. در این بررسی، عملکرد شبکه عصبی مطلوب‌تر از روش آماری می‌باشد. مهم‌ترین علل عملکرد مطلوب شبکه عصبی استفاده از قابلیت یادگیری، پردازش اطلاعات، قابلیت تعمیم و مدل نرون (شبیه‌سازی شبکه عصبی بیولوژیکی مغز انسان) است [۳۱].

بررسی ارتباط سرعت موج P اشباع با وزن واحد حجم اشباع و تخلخل در دو روش آماری و شبکه عصبی نشان می‌دهد، مقدار R^2 و آماره آزمون معادله خطی بدون عرض از مبدا مطلوب‌تر از معادله خطی با عرض از مبدا می‌باشد. مقدار سطح معنی‌داری و t روابط خطی در هر دو روش، نشان‌دهنده تاثیر تخلخل در سرعت موج P اشباع است.

مقایسه روابط خطی و غیرخطی هر دو روش آماری و شبکه عصبی در بررسی ارتباط سرعت موج P اشباع با وزن واحد حجم اشباع و تخلخل نشان می‌دهد، مقدار R^2 و آماره آزمون معادله خطی به دست آمده از شبکه عصبی مطلوب‌تر از سایر روابط می‌باشد.

مقایسه معادله خطی میان مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع با سرعت موج P اشباع در دو روش آماری و شبکه عصبی نشان می‌دهد، مقاومت فشاری تک‌محوری اشباع ۰/۱۱ تا ۰/۱۲ برابر سرعت موج P اشباع می‌باشد. مقایسه روابط غیرخطی به دست آمده از هر دو روش آماری و شبکه عصبی نشان می‌دهد، مقدار R^2 و آماره آزمون معادله توانی در هر دو روش مطلوب‌تر از سایر روابط غیرخطی است. همچنین در میان تمام روابط خطی و غیرخطی به دست آمده، معادله توانی شبکه عصبی دارای مطلوب‌ترین مقدار R^2 و آماره آزمون است.

- [22] Sharma, P.K., and Singh, T.N (2008) A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength, *Bull Eng Geol Environ*, 67:17–22
- [23] Andrade, P.S., and Saraiva, A.A (2010) Physical and mechanical characterization of phyllites and metagreywackes in central Portugal, *Bull Eng Geol Environ*, 69:207–214
- [24] Sharma, P.K., and Singh, T.N (2010) Reply to discussion by N. Arýoglu, G. Kurt and E. Arýoglu (DOI: 10.1007/s10064-010-0261-7) on the paper entitled “A correlation between P-wave velocity, impact strength index, slake durability index and uniaxial compressive strength” by P. K. Sharma and T. N. Singh
- [25] Lama, R.D., and Vutukuri, V.S (1978) *Handbook on Mechanical Properties OF Rocks, Testing techniques and Results, Volume II*, 242-252
- [۲۶] گزارش آزمایش های آزمایشگاهی مکانیک سنگ سد و نیروگاه پروژه رودبار لرستان (۱۳۸۵) شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران
- [27] Khandelwal, M., and Singh, T.N (2009) Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 46:1214-1222
- [28] Sonmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., and Kayabasi, A (2006) Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation, *Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43:224-235
- [۲۹] کلانتری، خ (۱۳۸۹) پردازش و تحلیل داده ها در تحقیقات اجتماعی- اقتصادی، مهندسين مشاور طرح و منظر، صفحات ۹۷ الی ۱۲۳
- [۳۰] حق نژاد، ع، آهنگری ک، و نورزاد، ع (۱۳۸۹) مقایسه روش های آماری و شبکه عصبی در تعیین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ- مطالعه موردی: نیروگاه تلمبه ذخیره ای ایلام، کنفرانس بین المللی معدن- ایران
- [۳۱] منهای م.ب (۱۳۸۷) مبانی شبکه عصبی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- & Borehole Geophysics Project, Special Volume, 25 pp
- [9] Han, D (1986) Effects of porosity and clay content on acoustic properties of sandstones and unconsolidated sediments, PhD Thesis, Stanford University, USA
- [10] Mavko, G., Mukerji, T., and Dvorkin, J (1998) *The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis in Porous Media*, Cambridge University Press
- [11] Yale, D.P., and Jamieson, Jr., W.H (1994) Static and dynamic rock mechanical properties in the Hugoton and Panoma fields, Kansas Soc, Petr. Engr., Paper 27939
- [12] Jizba, D.L (1991) Mechanical and acoustical properties of sandstones and shales, PhD Dissertation, Stanford University
- [13] Bur, T.R., and Hjelmstad, K.E (1970) Elastic and attenuation symmetries of simulated lunar rocks, *Icarus*, Vol. 13:414-423
- [14] Rzhvesky, V., and Novik, G (1971) *The physics of rocks*, Moscow, MIR Publishers, 320 p
- [15] Freyburg, E (1972) Der Untere und mittlere Buntsandstein SWT huringen in seinen gesteintechnischen Eigenschaften. *Ber. Dtsch. Ges. Geol. Wiss., A; Berlin*, 176:911–919
- [16] Horsrud, P (2001) Estimating mechanical properties of shale from empirical correlations, *SPE Drill*, 16:68–73
- [17] Dincer, I., Acar, A., and Ural, S (2008) Estimation of strength and deformation properties of Quaternary caliche deposits, *Bull Eng Geol Environ*, 67:353–366
- [18] Kılıc, A., and Teymen, A (2008) Determination of mechanical properties of rocks using simple methods, *Bull Eng Geol Environ*, 67:237–244
- [19] Kahraman, S (2001) Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 38:981–994
- [20] Yasar, E., and Erdogan, Y (2004) Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Int J Rock Mech Mining Sci*, 41:871–875
- [21] Entwisle, DC., Hobbs, PRN., Jones, LD., Gunn, D., and Raines, MG (2005) The relationship between effective porosity, uniaxial compressive strength and sonic velocity of intact Borrowdale volcanic group core samples from Sellafield, *Geotech Geol Eng*, 23:793–809