

مقایسه روش‌های آماری و شبکه عصبی در تعیین خصوصیات ژئومکانیکی سنگ - مطالعه موردی: نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام

علی نورزاد
ایران، تهران، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)،
دانشکده مهندسی آب noorzad@pwut.ac.ir

کاوه آهنگری
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه
مهندسی معدن kaveh.ahangari@gmail.com

علی حق‌نژاد*
ایران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، گروه
مهندسی معدن Ali.h1363@gmail.com

خلاصه مقاله

در این بررسی، مقایسه‌ای تجربی بین عملکرد روش‌های آماری و داده‌کاوی با استفاده از ۵ خصوصیت ژئومکانیکی، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت امواج فشاری و برشی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام انجام گرفته است. بر این اساس شبکه عصبی به‌عنوان روش داده‌کاوی و رگرسیون خطی چندمتغیره به‌عنوان روش آماری بکار رفته‌اند. مدول الاستیسیته اهمیت حیاتی برای طراحی و اجرای موفق پروژه‌های مهندسی سنگ دارد، زیرا این پارامتر مهم‌ترین پارامتر نشان‌دهنده رفتار مکانیکی پیش از شکست ماده سنگ می‌باشد. به‌همین علت به‌منظور کاهش خطا، مدول الاستیسیته به‌عنوان یکی از خصوصیات مکانیکی، توسط سایر خصوصیات سنگ مانند نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوری و سرعت امواج فشاری و برشی مورد بررسی قرار گرفته است. برخلاف یافته‌های قبلی، این بررسی نشان می‌دهد که در متغیرهای مستقل پیوسته، روش داده‌کاوی نتایج بهتری نسبت به روش آماری دارد.

ABSTRACT

In order to compare the statistical methods like polynomial linear regression and the mining data, some rock geomechanical properties, such as elasticity modulus, Poisson's ratio, uniaxial compressive strength, primary wave velocity and shear wave velocity of Ilam pump storage powerhouse located in west of Iran, has been utilized. As the modulus of elasticity of intact rock has an important role for the design of rock engineering projects, the interaction of this parameter is investigated by other rock parameters mentioned above, in order to reduce the error pertinent to computation. The obtained results indicate that the data mining method utilizing artificial neural network is more appropriate in comparison to statistical method for independent associated parameters. This finding is in conflict to the idea of the previous researches that recommending statistical methods for the process of extracting patterns from data.

کلمات کلیدی: شبکه عصبی، خصوصیات ژئومکانیکی سنگ، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام

مقدمه

از طریق آزمایش بر روی مغزه‌های حفاری تهیه می‌گردد. این نوع آزمایش، نیازمند تهیه مغزه‌های فاقد درزه و شکاف می‌باشد. حتی میکروتورک‌های موجود در مغزه‌های حفاری می‌توانند موجب خطا در مدول الاستیسیته گردند که این خطا در آنالیزهای بعدی تاثیر گذار خواهد بود. به همین علت در این تحقیق به منظور کاهش خطا، مدول الاستیسیته به‌عنوان یکی از خصوصیات مکانیکی سنگ توسط سایر خصوصیات مانند نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک‌محوری، سرعت امواج فشاری و برشی مورد بررسی قرار گرفته است. از گزارش‌های تهیه‌شده به‌علت عدم امکان تهیه این ۵ خصوصیت از تمامی مغزه‌های حفاری، ۶۲ نمونه داده تهیه گردیده است. در جدول ۱ برخی از خصوصیات آماری ۵ پارامتر مذکور در ۶۲ مجموعه داده تهیه شده، تشریح گردیده است.

انحراف معیار	میان	مقدار میانگین	مقدار حداکثر	مقدار حداقل	خصوصیت سنگ
۱۰/۴۳	۱۸/۱۹	۱۸/۷۶	۴۰/۲	۱/۸۵	مدول الاستیسیته (GPa)
۳۲/۱	۴۴/۳۴	۵۱/۲	۱۲۰/۲۸	۵/۸۶	مقاومت فشاری تک‌محوره (MPa)
۰/۰۴۴	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۳۷	۰/۲۱	نسبت پواسون (%)
۱۰/۹۱	۵۲۹۸/۵	۵۰۸۸/۳	۸۹۲۹	۲۵۷۷	سرعت امواج فشاری (m/s)
۶/۳۸	۳۲۷۷	۳۰۵۶	۴۰۰۹	۱۵۳۰	سرعت امواج برشی (m/s)

جدول ۱- خصوصیات آماری مجموعه داده های مورد بررسی

بررسی آماری

در بررسی آماری ۵ خصوصیت مذکور از نسخه ۱۶ نرم‌افزار spss استفاده شده است. نرم‌افزار spss عمدتاً برای سرعت‌بخشیدن به کاربرد روش‌ها و آزمون‌های کلاسیک آماری در سطح وسیعی استفاده می‌گردد [۴]. در این مقاله، کلیه داده‌های مدول الاستیسیته، مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و سرعت امواج فشاری و برشی به‌صورت یکجا وارد نرم‌افزار شده و روابط آن به شرح ذیل می‌باشد:

رگرسیون خطی چندمتغیره (بدون عرض از مبدا):

$$E = 0.24 UCS - 14.39 v - 0.001 V_p + 0.006 V_s \quad (1)$$

در این رابطه، ضریب همبستگی $r^2 = 0.969$ تعدیل شده $R^2 = 0.971$ می‌باشد. خطای استاندارد مدل نیز $3/74$ و مقدار آماره آزمون معنی‌داری ضرایب رگرسیون این رابطه $491/85$ است. این مقدار، حاصل تقسیم خطای متوسط رگرسیون به خطای متوسط میان مقدار واقعی متغیر منهای مقدار پیش‌بینی شده معادله رگرسیون می‌باشد. سطح معنی‌داری رابطه $0/000$ است که نشان می‌دهد مدل رگرسیون معتبر است [۴].

سطح معنی‌داری مقاومت فشاری تک‌محوره، نسبت پواسون و سرعت امواج فشاری و برشی به‌ترتیب $0/000$ ، $0/042$ ، $0/249$ ، $0/002$ می‌باشد که نشان می‌دهد ترتیب مقاومت فشاری تک‌محوره سپس سرعت امواج برشی و نسبت پواسون و در نهایت سرعت امواج فشاری در این رابطه تاثیر بیشتری دارند.

بطور کلی روش‌های پیش‌بینی مسائل مهندسی را می‌توان به دو دسته داده‌کاوی و روش‌های آماری تقسیم‌بندی نمود. روش‌های داده‌کاوی شامل روش‌هایی از قبیل شبکه عصبی و درخت‌های تصمیم‌گیری می‌شوند. روش‌های آماری نیز شامل انواع روش‌های رگرسیون هستند. 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. بر این اساس، گور، ناگین و ژسیولا^۱ رگرسیون خطی، رگرسیون چندجمله‌ای مرحله‌ای^۲ و شبکه عصبی را به‌شکل پیش‌بینی متوسط نمره دانشجویان مقایسه نمودند و دریافتند که رگرسیون خطی عملکرد بهتری دارد؛ هرچند هیچکدام عملکرد قابل توجهی نداشته‌اند. شوهوی، وانج، هایر و گیسلمان^۳ در تخمین نیروی توربین بادی یافتند که شبکه عصبی عملکرد بهتری نسبت به رگرسیون خطی داشته در حالی که هاردگراو، ویلسون و والسترون^۴ بطور تجربی نشان دادند عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی موفقیت تحصیلی دانشجویان قابل توجه نبوده است. بطور کلی در نشریات علمی قبلی برای متغیرهای مستقل پیوسته، روش آماری نسبت به داده‌کاوی، روش مناسب‌تری بوده و می‌توان از بررسی‌های صورت‌گرفته نتیجه گرفت، حجم نمونه‌ها، تعداد و نوع متغیرها در عملکرد روش پیش‌بینی تاثیرگذار می‌باشند [۱].

امروزه با توسعه علم مکانیک سنگ به‌موازات روش‌های پیش‌بینی، پیوستگی ویژه‌ای بین آنها به‌وجود آمده است آنچنان‌که از دو روش پیش‌بینی مذکور در تخمین پارامترهای مکانیک سنگ در پروژه‌های معدنی و عمرانی به‌عنوان بررسی اولیه به‌وفور استفاده می‌گردد. بر این اساس در تحقیق حاضر میزان کارایی این دو روش در تعیین پارامترهای مکانیک سنگی در ساختگاه نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام با یکدیگر مقایسه شده است.

معرفی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام

به‌منظور مرتفع ساختن اعمال بار اضافی ناشی از مصرف انرژی برق، به‌ویژه در ساعات آغازین شب، نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام در تراز بالا و سد سیمره در تراز پایین قرار گرفته است. در این طرح با ذخیره آب در مخزن بالایی، طی ساعات عادی و کم‌بار شبکه می‌توان نسبت به آزادسازی این آب و تولید انرژی در ساعات اوج مصرف اقدام نمود. طرح نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام در ساحل راست رودخانه سیمره بر روی آبراه‌ای در بالادست سد سیمره و غرب دره سنجی قرار دارد. توالی سنگ چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه شامل سنگ آهک، آهک دولومیتی، آهک مارنی، آهک ریفی، مارن آهکی، ماسه‌سنگ، لای‌سنگ و کنگلومرا می‌باشد [۲].

بررسی برخی خصوصیات آزمایشگاهی نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام

در بررسی‌های صورت‌گرفته در مطالعات مرحله اول نیروگاه تلمبه ذخیره‌ای ایلام از مغزه‌های تهیه‌شده، چگالی خشک، چگالی طبیعی، درصد تخلخل، آب محتوی، شاخص دوام، سرعت امواج فشاری (V_p) و برشی (V_s)، مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)، مدول الاستیسیته (E) و نسبت پواسون (ν) بطور استاتیکی و همچنین پارامترهای مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به‌صورت دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

مدول الاستیسیته ماده سنگ، اهمیت حیاتی برای طراحی و اجرای موفق پروژه‌های مهندسی سنگ دارد، زیرا این پارامتر مهمترین پارامتر نشان‌دهنده رفتار مکانیکی پیش از شکست ماده سنگ می‌باشد. همچنین این پارامتر مهمترین ورودی در آنالیزهای رفتار تغییر شکل‌پذیری سنگ می‌باشد [۳]. این خصوصیت به‌طور مستقیم

¹ Gorr, Nagin and Szczypula

² Stepwise Polynomial Regression

³ Shuhui, Wunsch, Hair and Giesselmann

⁴ Hardgrave, Wilson and Walstron

شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی سیستم محاسبه مصنوعی است که از تعدادی نمونه بهم پیوسته نرون‌ها که توسط واکنش حالت پویا، اطلاعات ورودی‌های خارجی را پردازش می‌نمایند، تشکیل گردیده است. پرسپترون چندلایه، بهترین نوع شبکه شناخته شده است. پرسپترون چندلایه حداقل از سه لایه نرون، (۱) لایه ورودی، (۲) یک یا چند لایه مخفی و (۳) لایه خروجی تشکیل شده است. هر نرون به نرون بعدی در یک لایه توسط ارتباطات دارای وزن متصل است. در طی فاز آموزش، اتصالات داخلی، به منظور کاهش توابع از پیش تعریف شده بهینه می‌گردند. چندین نوع از الگوریتم‌های آموزش در نشریات علمی بکار رفته است که میان آنها، الگوریتم پس انتشار^۵ محبوب‌ترین نوع می‌باشد. الگوریتم پس انتشار یک تکنیک آموزش ممتاز است که با استفاده از قاعده نسبت شیب^۶ تلاش می‌نماید خطای شبکه را توسط نزول شیب منحنی خطا کاهش دهد. در این روش، مقادیر ورودی به صورت پیش‌رو ارسال شده، سپس تفاوت بین خروجی محاسبه شده و خروجی مورد نظر از مجموعه آموزش را محاسبه می‌نماید. سپس خطا از طریق پس‌روی شبکه انتشار یافته و وزن‌ها در طی تعداد تکرارها تعدیل می‌یابد [۳].

اولین گام در آموزش شبکه مصنوعی پس انتشار، طراحی ساختار شبکه می‌باشد. طراحی شبکه عصبی پس انتشار، توسط جانمایی شبکه^۷ (مثل تعداد گره‌های مخفی و نمونه‌های آموزش، نوع توابع انتقال و غیره) و قاعده یادگیری تعیین می‌گردد. این قاعده نخست مجموعه وزن‌ها، ضرایب مقدار حرکت^۸ و نرخ یادگیری^۹ را تعیین می‌نمایند و که می‌باید در طی یادگیری، به منظور بهبود عملکرد شبکه، تعدیل گردند. هر دو قاعده جانمایی و یادگیری بسیار مهم می‌باشند و انتخاب مناسب آنها عملکرد شبکه را بهتر خواهند کرد. تابع انتقال که تابع فعال‌سازی نیز نامیده می‌شود، برای تغییر مجموع وزنی ضربات سیگنال‌های یک نرون که شدت پرتاب آن را تعیین می‌نماید، لازم می‌باشد. سیگموئید^{۱۰} و خطی متعارف‌ترین توابع فعال‌سازی می‌باشند [۳].

تعداد نمونه‌های آموزش بکار رفته در شبکه، تاثیر قابل توجهی در یادگیری داراست. نظرات متفاوتی در مورد تعداد داده‌های آموزشی اظهار گردیده است. لونی و سینگر^{۱۱} پیشنهاد نمودند به ترتیب ۲۰٪ و ۲۵٪ داده‌ها برای تست نمودن بکار رود. نیلسون و ایلینگورس^{۱۲} یکن ۲۰٪ و ۳۰٪ داده‌ها را برای تست و الباقی را برای آموزش پیشنهاد نموده‌اند [۳].

طراحی شبکه عصبی

به منظور بررسی عملکرد روش‌های آماری، برنامه‌ای در نرم‌افزار *MATLAB 7.7* تهیه گردید. مشخصات برنامه در جدول ۲ ارائه شده است.

مشخصه	نوع/تعداد
تعداد نرون‌های ورودی	۴
تعداد نرون‌های خروجی	۱
تابع آموزش	trainrp

⁵ Back Propagation Neural Network

⁶ Gradient Descent Rule

⁷ Network Topology

⁸ Momentum Coefficient

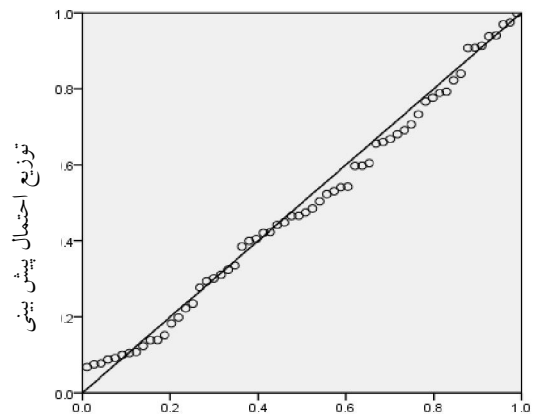
⁹ Learning Rate

¹⁰ Sigmoid

¹¹ Loonet and Swibler

¹² Nelson and Illingworth

شکل ۱ گراف نرمال پلات مدول الاستیسیته معادله مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، قرار گرفتن داده‌ها در راستای یک خط راست در گراف نرمال پلات، مؤید نرمال بودن داده‌ها می‌باشد.



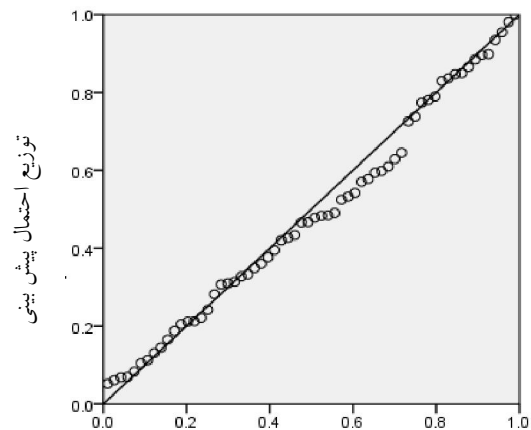
توزیع احتمال بررسی شده

شکل ۱- گراف نرمال پلات مدول الاستیسیته رابطه (۱)

رگرسیون خطی چندمتغیره (با عرض از مبدا):

$$E = 0.109 UCS - 117.88 v - 0.00 V_p + 0.004 V_s + 39.712 \quad (۲)$$

در این رابطه، ضریب سرعت امواج فشاری 0.00 و 0.109 = تعدیل شده R^2 و $R^2 = 0.888$ می‌باشد. خطای استاندارد مدل نیز $3/61$ است. مقدار آماره آزمون معنی‌داری ضرایب رگرسیون این رابطه $112/04$ و سطح معنی‌داری آن $0/000$ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل رگرسیون معتبر است. سطح معنی‌داری مقاومت فشاری تک‌محوره، نسبت پواسون، سرعت امواج فشاری و برشی و عرض از مبدا به ترتیب $0/076$ ، $0/011$ ، $0/425$ ، $0/034$ و $0/023$ می‌باشد که نشان می‌دهد به ترتیب عرض از مبدا، نسبت پواسون، سرعت امواج برشی، مقاومت فشاری تک‌محوره و در نهایت، سرعت امواج فشاری در این رابطه تاثیر بیشتری دارند. شکل ۲ گراف نرمال پلات مدول الاستیسیته معادله مذکور را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، داده‌ها در راستای یک خط راست قرار گرفته‌اند که این امر نشان‌دهنده آن است که نسبت به شکل ۱ نرمال‌تر می‌باشد.



توزیع احتمال بررسی شده

شکل ۲- گراف نرمال پلات مدول الاستیسیته رابطه (۲)

تعداد نرون‌ها می‌باید عدد صحیح باشد			ریپلی
تعداد نرون‌ها می‌باید عدد صحیح باشد			پائولا
۰/۹۴۶	۱۳/۱۱	۳/۴	وانگ
۰/۹۴۲	۱۲/۷۱۲	۳/۳۸۱	مسترز، کاسترا و بوید
۰/۹۵۱	۱۰/۸۱۹	۳/۰۰	کونلوپولاس و ویکینسون

جدول ۴- میزان خطای مطلق، نسبی و ضریب همبستگی روابط پیشنهادی

مقایسه روش‌های آماری و شبکه عصبی

به‌منظور مقایسه عملکرد دو روش مذکور از مقادیر مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون، سرعت امواج فشاری و برشی حداقل و حداکثر مدول الاستیسیته در مجموعه داده استفاده خواهد شد. مقادیر حداقل و حداکثر مدول الاستیسیته در جدول ۱ ذکر گردیده بود.

روش‌های آماری:

ابتدا از مقدار حداقل در رابطه ۱ و ۲ استفاده می‌شود:

$$E = 1.85 \text{ GPa} \rightarrow UCS = 5.86 \text{ MPa}, v = 0.37, V_p = 2958 \text{ m/s}, V_s = 1722 \text{ m/s}$$

مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده از رابطه ۱:

$$E = 0.24 UCS - 14.39 v - 0.001 V_p + 0.006 V_s \rightarrow E = 3.45 \text{ GPa}$$

مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده از رابطه ۲:

$$E = 0.109 UCS - 117.88 v - 0.000 V_p + 0.004 V_s + 39.712 \rightarrow E = 3.62 \text{ GPa}$$

سپس مقادیر حداکثر جاگذاری می‌شوند:

$$E = 40.2 \text{ GPa} \rightarrow UCS = 94.36 \text{ MPa}, v = 0.23, V_p = 5387 \text{ m/s}, V_s = 3654 \text{ m/s}$$

مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده از رابطه ۱:

$$E = 0.24 UCS - 14.39 v - 0.001 V_p + 0.006 V_s \rightarrow E = 35.87 \text{ GPa}$$

مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده از رابطه ۲:

$$E = 0.109 UCS - 117.88 v - 0.000 V_p + 0.004 V_s + 39.712 \rightarrow E = 37.5 \text{ GPa}$$

شبکه عصبی:

شبکه عصبی را با مجموعه داده‌ها و تنظیمات قبلی و به ازای مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره، نسبت پواسون، سرعت امواج فشاری و برشی، حداقل مدول الاستیسیته اجرا نموده که مقدار مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده ۲/۲۳ GPa گردید. پس از آن شبکه به‌ازای مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوره، نسبت پواسون، سرعت امواج فشاری

divideind	تابع پخش‌کننده داده‌ها
initlay	تابع وزن‌دهی
mse	تابع بررسی عملکرد تابع آموزش‌دهنده
logsig, purlin	توابع انتقال

جدول ۲- مشخصات برنامه شبکه عصبی

یکی دیگر از پارامترهای تعیین‌کننده عملکرد شبکه عصبی، تعداد نرون‌های مخفی می‌باشد به این منظور شبکه با ۶۲ مجموعه داده مذکور و به ازای فرمول‌های پیشنهادی جدول ۳ اجرا گردید و میزان خطای هر یک از تعداد نرون‌ها تعیین و در جدول ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که در جدول مشخص است، جهت بررسی عملکرد روش‌های آماری از تعداد ۱۲ نرون استفاده شده است.

پیشنهاد کنندگان	تعداد نرون‌های محاسبه شده لایه مخفی	رابطه پیشنهادی
هچ و نیلسون	۹	$\leq 2N_i + 1^*$
هوش	۱۲	$3N_i$
ریپلی	۲/۵	$(N_o + N_i)/2$
پائولا	۱/۱	$[2 + N_o * N_i + 0.5 N_o(N_o^2 + N_i - 3)] / (N_o + N_i)$
وانگ	۴	$2N_i/3$
مسترز، کاسترا و بوید	۲	$\sqrt{(N_o * N_i)}$
کونلوپولاس و ویکینسون	۱۲	$3N_i$

جدول ۳- روابط پیشنهادی جهت تعیین تعداد نرون‌های لایه مخفی [۵]

* در روابط بالا Ni تعداد نرون‌های ورودی و No تعداد نرون‌های خروجی می‌باشند.

پیشنهاد کنندگان	MAE	MSE	R ²
هچ و نیلسون	۳,۰۸	۱۱/۲۰۸	۰/۹۴۹
هوش	۳/۰۰	۱۰/۸۱۹	۰/۹۵۱

و برشی، حداکثر مدول الاستیسیته اجرا شد که مقدار مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده $38/50$ GPa می‌باشد.

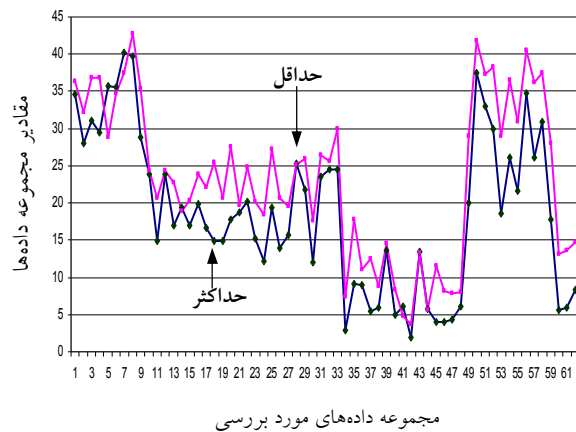
نتیجه گیری

۱- در شکل ۳ منحنی انطباق میان مدول الاستیسیته اندازه گیری شده (خط آبی) و مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده (خط قرمز) توسط رابطه ۱ نمایش داده شده است. حداقل خطا مربوط به مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده $19/84$ GPa با درصد خطای $0/7$ درصد و حداکثر خطا مربوط به مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده $35/74$ با درصد خطای $25/37$ درصد می‌باشد.



شکل ۳- منحنی انطباق میان مدول الاستیسیته اندازه گیری شده و مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده در رابطه ۱

۲- در شکل ۴ منحنی انطباق میان مدول الاستیسیته اندازه گیری شده (خط آبی) و مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده (خط قرمز) توسط رابطه ۲ نمایش داده شده است. حداقل خطا مربوط به مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده $25/35$ GPa با درصد خطای $0/55$ درصد و حداکثر خطا مربوط به مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده $14/91$ GPa با درصد خطای $70/28$ درصد می‌باشد.



شکل ۴- منحنی انطباق میان مدول الاستیسیته اندازه گیری شده و مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده در رابطه ۲

۳- مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده از روش‌های آماری و شبکه عصبی در جدول ۵ نشان داده شده است. شبکه عصبی طراحی شده عملکرد مناسب‌تری نسبت به دو رابطه بدست آمده داشته است.

درصد اختلاف با حداکثر میزان اندازه‌گیری شده	حداکثر مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده	درصد اختلاف با حداقل میزان اندازه‌گیری شده	حداقل مدول الاستیسیته پیش‌بینی شده	روش بررسی
۴/۲۲٪	۳۸/۵	۲۰/۵۴٪	۲/۲۳	شبکه عصبی
۱۰/۷۷٪	۳۵/۸۷	۸۶/۸۱٪	۳/۴۵	رابطه ۱
۶/۷۱٪	۳۷/۵	۹۵/۶۷٪	۳/۶۲	رابطه ۲

جدول ۵- نتایج مقادیر پیش‌بینی شده از روش‌های آماری و شبکه عصبی

۴- با توجه به جدول ۵ در مدول الاستیسیته پایین رابطه ۱ و در مدول الاستیسیته بالا رابطه ۲ عملکرد بهتری داشته‌اند. در حالی که با توجه به اشکال ۳ و ۴ هیچ‌یک از روابط به‌دست‌آمده در یک بازه قابل توجه از همبستگی مناسبی برخوردار نیستند.

۵- برخلاف یافته‌های قبلی، در این بررسی مشخص گردید، در متغیرهای مستقل پیوسته، روش داده‌کاوی بکار رفته، نتایج بهتری نسبت به روش آماری داشته است.

مراجع

- Kim, S.Y., 2008, comparison of the decision tree, artificial neural network, and linear regression methods based on the number and types of independent variables and sample size, Expert systems with applications, 34, 1227-1234
- شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۸، گزارش مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مطالعات مرحله اول
- Majdi, A., Beiki M., 2010, Evolving neural network using a genetic algorithm for predicting the deformation modulus of rock mass, International journal of rock mechanics & mining sciences, 47, 246-253
- SPSS Inc, 2007, spss 16 manual
- Sonmez, H., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., Kayabasi, A., 2006, Estimation of rock modulus: for intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation, 43, 224-235