

## بررسی تأثیر پارامترهای شاخص بر خواص استاتیک سنگ‌آهک در شرایط خشک و اشباع با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی

محمدرضا مطهری

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک

نویسنده مسئول: \* M-Motahari@araku.ac.ir

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۹۹/۱۲/۱۲

دریافت: ۹۹/۹/۲۱

### چکیده

مطالعات قبلی نشان داده است که رطوبت تأثیر ویژه‌ای بر خصوصیات استاتیک سنگ (مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته) دارد. در این مقاله، مقاطع نازک و XRD، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته، شاخص بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و تخلخل نمونه‌های سنگ‌آهک در شرایط خشک و اشباع در ساختگاه سد خرسان دو در جنوب غربی ایران بررسی شده است. سپس، با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون ساده، اثر شاخص بار نقطه‌ای در شرایط خشک، مقاومت کششی در شرایط خشک و اشباع و تخلخل بر مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک و اشباع بررسی شد. بررسی XRD و مقاطع نازک نمونه‌ها نشان می‌دهد که کلسیت کانی اصلی است و طبقه‌بندی نمونه‌ها از مادستون تا گرینستون متغیر است. نتایج شبکه عصبی و رگرسیون ساده نشان داد که اثر متغیرهای مستقل بر مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک دارای دقت بالاتری نسبت به شرایط اشباع می‌باشند. واسنجی روابط ارائه شده محققین قبلی بر اساس نتایج آزمایشگاهی این تحقیق و با استفاده از معیارهای ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات نشان داد که اکثر روابط می‌توانند جهت تخمین خصوصیات سنگ‌آهک آسماری مورد استفاده قرار گیرند. بررسی نمودارهای همگنی واریانس باقی مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش‌بینی شده، ضریب تعیین و خطای روش‌ها نشان داد که شبکه عصبی از دقت بالاتری نسبت به رگرسیون ساده جهت تخمین خصوصیات استاتیک سنگ‌آهک برخوردار است و روش شبکه عصبی در تخمین خصوصیات مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته محافظه کارانه عمل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آزمون‌های مقاومتی، تخلخل، شرایط خشک و اشباع، رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی، سنگ‌آهک

### پیشگفتار

اشباع توسط محققین مختلف انجام شده است (ترک و وآسارهیلی، ۲۰۱۰؛ شاکور و بارفیلد، ۲۰۰۹؛ وآسارهیلی، ۲۰۰۳). کاراکول و الوسای (۲۰۱۳) بیان کردند که ویژگی مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ با افزایش درجه اشباع کاهش می‌یابد در حالی که سرعت موج تراکمی روندی کاهشی و افزایشی نسبت به درجه اشباع نشان می‌دهد. کاراکول (۲۰۱۶) نشان داد که رابطه بین مقاومت فشاری تک‌محوری با عدد چکش اشمیت وابسته به درجه اشباع سنگ بکر می‌باشد. سلکو و نار (۲۰۱۶) مقاومت فشار تک محوری را بر اساس سرعت موج پیش‌بینی کرد. حیدری و همکاران (۲۰۱۱) رابطه مقاومت کششی برزیلی و مقاومت تراکم تک‌محوری با شاخص بار نقطه‌ای سنگ گچ را بررسی کردند. همچنین مهدی‌آبادی و خانلری (۲۰۱۸) روشی جهت تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ ارائه کردند. علی قلی و همکاران

تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها جهت کاربردهای مهندسی همچون طراحی سد و تونل، انفجار سنگ، شیب‌های سنگی، پی‌های سنگی و حفاری‌های زیرزمینی دارای اهمیت ویژه‌ای می‌باشند. برای تعیین مستقیم این پارامترها، مغزه‌هایی بدون درز و ترک و با کیفیت بالا مورد نیاز بوده و تهیه نمونه‌های مناسب از سنگ‌های دارای درز و ترک و هوازده برای این منظور به آسانی امکان‌پذیر نیست. بنابراین تخمین این خصوصیات بر اساس خصوصیات شاخص باعث صرف‌جویی در هزینه و زمان خواهد شد (برهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ اسپرهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ عبدی، ۱۳۹۹؛ سخاوتی و جعفر کاظمی، ۲۰۱۹؛ ابراهیمی‌فر و جباری، ۲۰۱۷؛ رحمانی و همکاران، ۲۰۱۳). تحقیقات زیادی جهت تخمین پارامترهای مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک و

می‌باشد. اگرچه مطالعات ذکر شده روابطی آماری و با استفاده از رگرسیون ساده جهت پیش‌بینی مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک و اشباع ارائه کرده‌اند اما اثر اشباع یا خشک بودن نمونه‌ها بر دقت روابط پیش‌بینی کننده خواص استاتیک به روش شبکه عصبی مصنوعی بررسی نشده است. هدف اصلی از این پژوهش اثر تخلخل، شاخص بار نقطه‌ای و مقاومت کششی برزلی در شرایط خشک و اشباع بر مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌آهک سازند آسماری در ساختگاه سد خرسان ۲ به روش شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون می‌باشد.

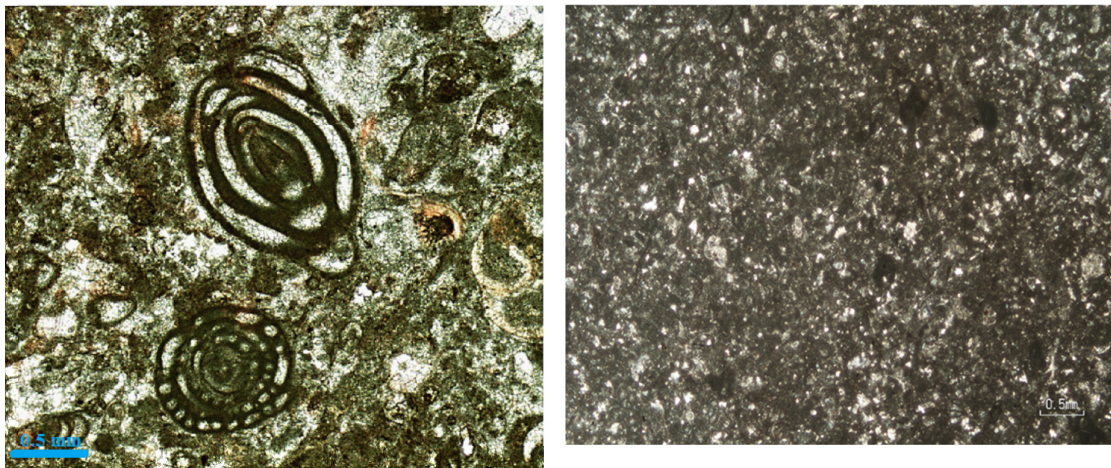
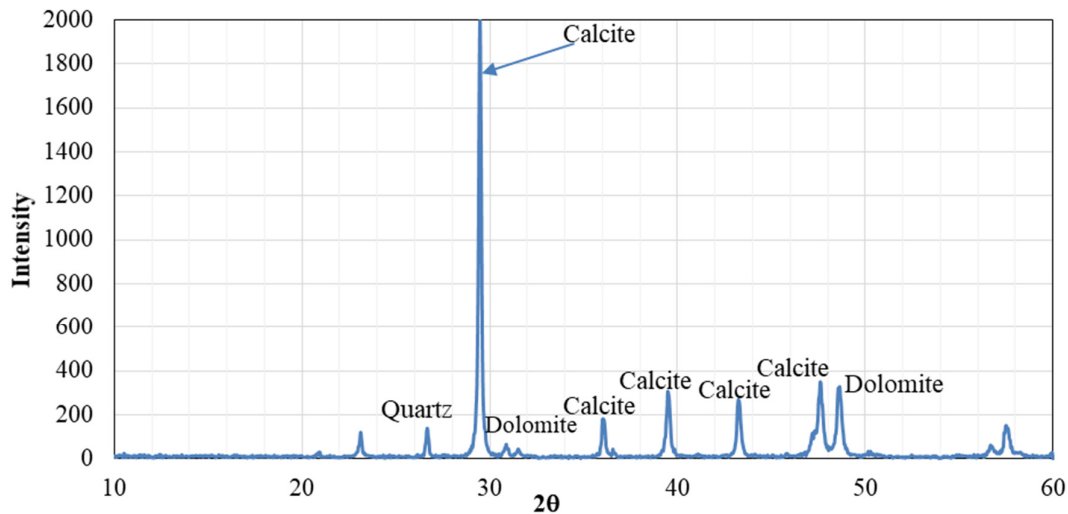
### ساختگاه سد خرسان ۲

ساختگاه سد بتنی دو قوسی با ارتفاع پیشنهادی ۲۴۰ متر و حجم مخزن ۲۱۴۲، در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری جنوب باختری شهرستان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری واقع می‌گردد. ساختگاه سد خرسان دو، بر روی رودخانه خرسان به مختصات ۳۱/۲۵ درجه عرض شمالی و ۵۰/۳۶ درجه طول خاوری در ناحیه جنوب باختری ایران در ارتفاعات زاگرس واقع شده است. سازند آسماری و گچساران تکیه‌گاه‌های ساختگاه را تشکیل می‌دهند. در این پژوهش ۵۶ نمونه از این ساختگاه تهیه شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

### بررسی نتایج آنالیز XRD و مقاطع نازک نمونه‌ها

بر اساس بررسی مقاطع میکروسکوپی از سازند آسماری این سنگ‌ها عمدتاً از کلسیت، آراگونیت، کوارتز، رس و اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن تشکیل شده است. بر اساس نتایج XRD بیش از ۵۰ درصد کانی‌های تشکیل دهنده این سازند کلسیت می‌باشد. سنگ‌آهک سازند آسماری دارای میکروفسیل‌های فرامینیفر می‌باشد. فراوانی این میکروفسیل‌ها نشان می‌دهد که این سازند با سن الیگومیوسن در محیط لاگونی نهشته شده است. مطالعات روی ۵۶ نمونه از مقاطع نازک نشان داد که این سنگ‌آهک حاوی میکروفسیل‌های فرامینیفر، اکیونوئید (Echinoid) و پالسی‌پودا (Placypoda) است. طبق طبقه‌بندی دانه‌ام (۱۹۶۲)، نمونه‌های مورد مطالعه مادستون، وکستون و پکستون طبقه‌بندی می‌شوند. شکل ۱ تصویری از نتایج آنالیز XRD و مقاطع نازک سه نمونه از سازند آسماری را نشان می‌دهد.

(۲۰۱۷) رابطه بین پارامترهای مکانیکی (شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته)، فیزیکی و دینامیکی سنگ‌های آذرین را بررسی کردند. عبدی و قاسمی‌دهنوی (۱۳۹۸) مشاهده کردند که مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌ها بر اساس خصوصیات فیزیکی با دقت بالایی قابل تخمین می‌باشند. همچنین عبدی و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند که با افزایش درجه اشباع مقاومت تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌ها به ترتیب ۶۱ درصد و ۵۸ درصد کاهش پیدا می‌کند. مقاومت فشاری سنگ‌آهک‌های متخلخل در شرایط خشک و اشباع توسط واسانلی و همکاران (۲۰۱۵) بررسی شد و مشخص شد که اشباع شدن نمونه‌ها تاثیر بسیار زیادی در کاهش مقاومت دارد. وآسارهیلی (۲۰۰۵) نیز نشان داد که رابطه خطی با همبستگی بالا بین مدول استاتیک در شرایط خشک و اشباع وجود دارد و از لحاظ آماری مدول الاستیسیته در شرایط اشباع حدود ۶۷ درصد مدول استاتیک در شرایط خشک می‌باشد. امروزه در رشته‌های مهندسی، استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با توجه به عدم فرمول‌بندی و پویا بودن، راهبرد مناسبی برای تخمین و مدل‌سازی به شمار می‌رود (هوبیک، ۱۹۹۲). تحقیقاتی در خصوص حل مسائل ژئوتکنیک با بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی و به طور خاص جهت تخمین مدول الاستیسیته صورت گرفته است (اسماعیلی و همکاران، ۱۳۹۵؛ پسندی و همکاران، ۱۳۹۲). برخی از محققان از عدد سختی چکش‌اشمیت برای تخمین مدول الاستیسیته استفاده کرده‌اند (یاگیز، ۲۰۰۹؛ ساچپازیس، ۱۹۹۰). بررسی حق‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹) جهت تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس سرعت موج تراکمی نشان داد که عملکرد شبکه عصبی در پیش‌بینی این روابط مطلوبتر از روش آماری است. محققان مختلف از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون برای تخمین شاخص مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته بر اساس آزمایشات غیرمخرب و خصوصیات فیزیکی استفاده کرده‌اند (برهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ فرنشو و فکر، ۲۰۱۷؛ جاهد ارمغانی و همکاران، ۲۰۱۵). نتایج حاصل از مطالعه اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۵) به منظور مقایسه عملکرد روش‌های تخمین نشان داد که روش‌های مورد استفاده در تخمین مقاومت سنگ نشانگر عملکرد مطلوب‌تر شبکه عصبی نسبت به رگرسیون غیرخطی



شکل ۱. نتایج آنالیز XRD یکی از نمونه‌ها (سمت بالا) و مقاطع نازک (سمت پایین)

به ترتیب مطابق با استانداردهای (ASTM ۲۰۰۱a) و (ASTM ۲۰۰۱b) بر روی نمونه‌ها انجام شد. در آزمایش برزیلی قطر نمونه‌ها ۵۴ میلی‌متر با نسبت ضخامت به قطر برابر تهیه گردید. تخلخل (n) نمونه‌ها بر اساس استاندارد (ISRM ۱۹۸۱) بر روی نمونه‌ها انجام شد. هیستوگرام نتایج آزمایشات تخلخل به روش اشباع و غوطه‌وری و آزمایش‌های مکانیکی در شرایط خشک و اشباع در شکل ۲ ارائه شده است.

### نتایج و بحث

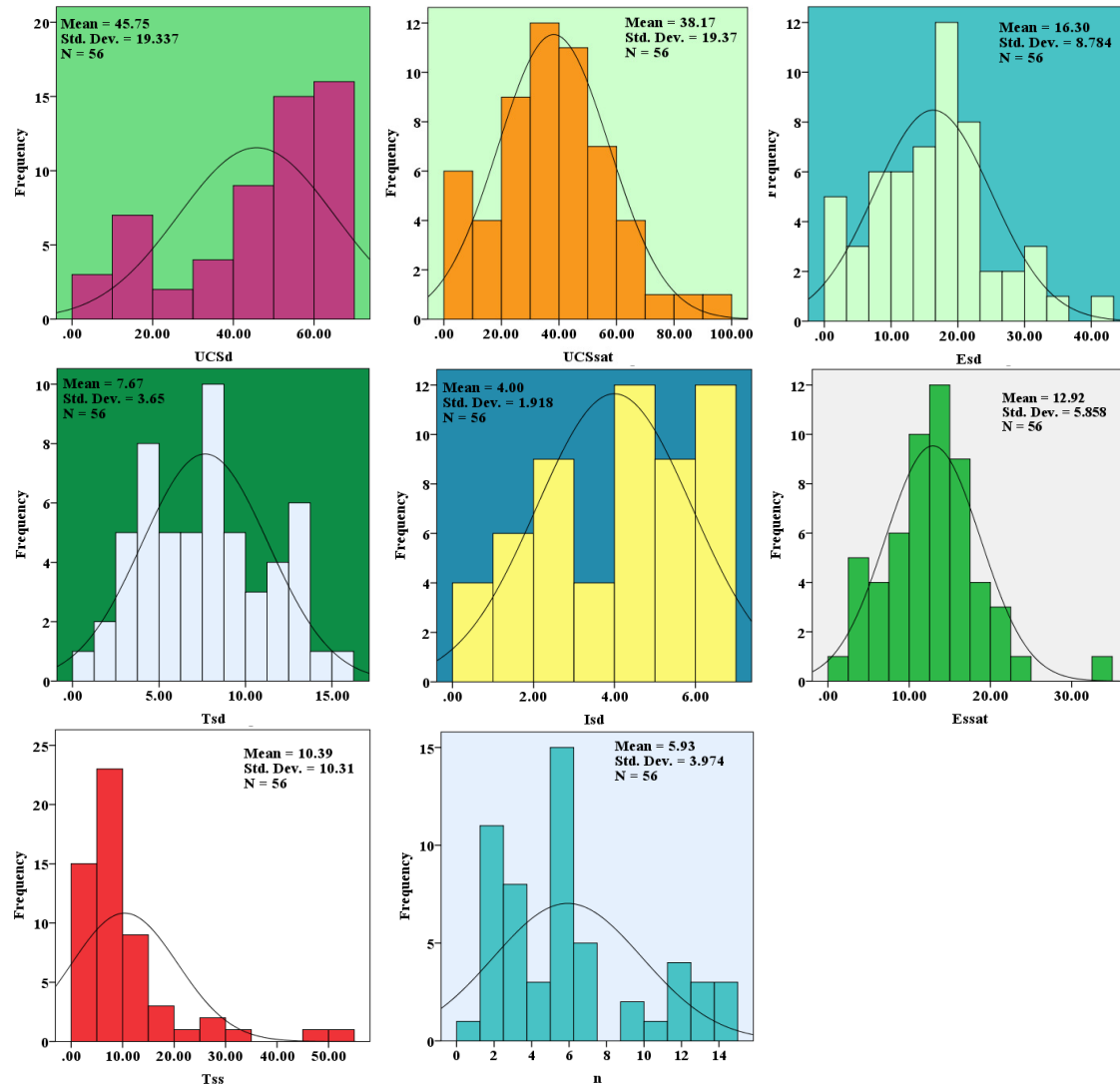
مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترها در مهندسی سنگ، کاربرد گسترده‌ای در طبقه‌بندی‌های رایج توده‌ی سنگ، معیارهای شکست و تحلیل‌های عددی، تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی و دامنه‌های سنگی دارد (ناصری و

### بررسی ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها

در این تحقیق نمونه‌های مغزه سنگ‌آهک فاقد درز و ترک و ساختارهای ثانویه از بلوک‌هایی از سازند آسماری تهیه شد و در شرایط خشک و اشباع آزمایش شدند. درزه و ناپیوستگی‌ها و به طور کلی ساختارهایی که باعث ناهمسانی در نمونه‌ها و باعث تمرکز نامتقارن تنش بر نمونه‌ها در حین بارگذاری می‌شوند. این امر باعث خطا در خصوصیات مکانیکی اندازه‌گیری شده می‌شوند (لطف الهی و همکاران، ۲۰۱۸؛ اشنویه و باقرزاده خلخالی، ۲۰۱۹). از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد (ASTM ۲۰۰۲) انجام شد. نرخ بارگذاری در این آزمایش ۰/۷ مگاپاسکال بر ثانیه بود. سپس منحنی تنش کرنش ترسیم و مدول الاستیسیته متقاطع (Es) و مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) تعیین شد. آزمایش‌های مقاومت کششی برزیلی و شاخص بارنقطه‌ای

مقاومت کششی اشباع از لحاظ آماری و بر اساس هیستوگرام، آزمون شاپیروویلیک و کلموگراف اسمیرونوف (جدول ۱) و نمودار ساقه و برگ نرمال می‌باشند. از طرفی چونکه تعداد داده‌ها بیش‌تر از ۲۵ داده می‌باشد امکان بررسی همبستگی پیرسون بر روی تمام داده‌ها وجود دارد و می‌توان همه داده‌ها را نرمال فرض کرد.

همکاران، ۲۰۱۷؛ عباسی دزفولی، ۲۰۲۰؛ یوسفوند و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا، در این تحقیق به منظور آگاهی از خواص فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک سازند آسماری در ساختگاه سد خرسان ۲، آزمایش‌های فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی در شرایط خشک و اشباع انجام شد که نتایج این خصوصیات در شکل ۲ ارائه شده است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهد که تمام متغیرها بجز



شکل ۲. هیستوگرام متغیرها

(اتزنی و همکاران، ۲۰۰۶؛ اندریانی و والاش، ۲۰۱۰). سنگ‌هایی با تخلخل زیاد هنگامی که اشباع هستند می‌توانند دامنه زیادی از سرعت امواج را نشان دهند (ترک و آسارهیلی، ۲۰۱۰). و آسارهیلی (۲۰۱۰) بیان کرد که UCS در شرایط اشباع حدود ۷۵/۶ درصد آن در شرایط

مشاهده می‌شود که اشباع شدن نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت کششی شده است. مقادیر مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیک در حالت اشباع کمتر از مقادیر این پارامترها در حالت خشک می‌باشد. کاهش مقاومت فشاری در حالت اشباع توسط دیگر محققین نیز تایید شده است

نیز نشان می‌دهد که سازند آسماری دارای دامنه گسترده‌ای از تخلخل ( $n=0.36-14.88$ ) می‌باشد. افزایش چگالی به طور عمده باعث افزایش تخلخل می‌شود. معمولاً با افزایش دما، سرعت سنگ کاهش می‌یابد.

خشک می‌باشد در حالی که مدول مماسی و متقاطع در حالت اشباع به ترتیب ۷۶/۱ و ۷۹ درصد آن‌ها در شرایط خشک می‌باشد. در این مطالعه UCS در شرایط اشباع حدود ۸۴ درصد UCS در شرایط خشک می‌باشد. نتایج

جدول ۱. آزمون‌های نرمالیتی متغیرها

	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilk
	Sig.	Sig.
UCSd	0.03	0.036
UCSsat	0.200	0.477
Esd	0.200	0.360
Essat	0.200	0.131
n	0.045	0.042
Isd	0.200	0.04
Tsd	0.200	0.137
Tss	0.000	0.000

خصوصیات مکانیکی در شرایط خشک دقت بیش‌تری دارد. همچنین رابطه این پارامتر جهت تخمین مقاومت تراکمی دقت بیش‌تری نسبت به مدول الاستیسیته دارد (شکل ۳). بررسی عبدی و خانلری (۱۳۹۸) نیز نشان داده است که سرعت موج در مقایسه با سختی چکش اشمیت قابلیت بیش‌تری برای پیش‌بینی ویژگی‌های مکانیکی ماسه‌سنگ-ها دارد. با استفاده از روابط ارائه شده برخی از محققان (روابط جدول ۲) مقادیر خواص استاتیک تخمین زده شد و با نتایج تحقیق حاضر مقایسه شد (شکل ۴). نتایج واسنجی روابط محققین قبلی با داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر در شکل ارائه شده است. مشاهده می‌شود که رابطه ارگول و الوسای (۲۰۰۹) که برای سنگ‌های رسوبی ارائه شده است با نتایج آزمایشگاهی تفاوت زیادی دارد. سایر روابط ارائه شده تقریباً همخوانی مناسبی با نتایج تحقیق حاضر دارند (شکل ۴).

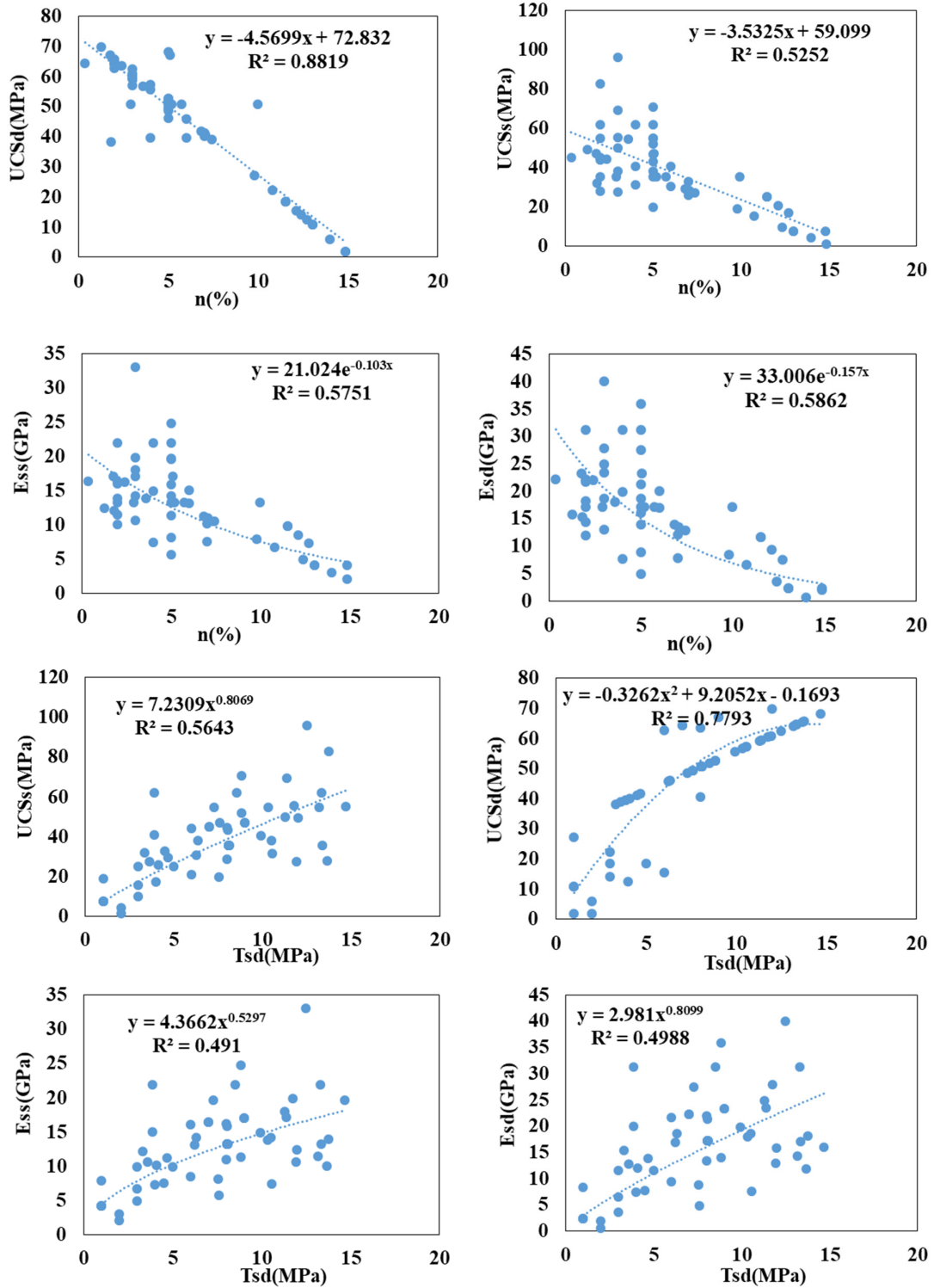
### شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی بطور گسترده توسط محققین مختلف در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است (ساقی و همکاران، ۲۰۱۹؛ شمس آشتیانی و امیری، ۲۰۱۸؛ حق‌نژاد و همکاران ۱۳۸۹؛ رستگاریا و همکاران، ۲۰۱۸؛ عبدی و قاسمی‌دهنوی، ۲۰۱۹). در تحقیق حاضر تعداد ده نورون در لایه پنهان در شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شد که برای ساختن مدل پس‌انتشار برای تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته استفاده شد. در این مطالعه تعداد بهینه نورون‌ها در لایه مخفی شبکه

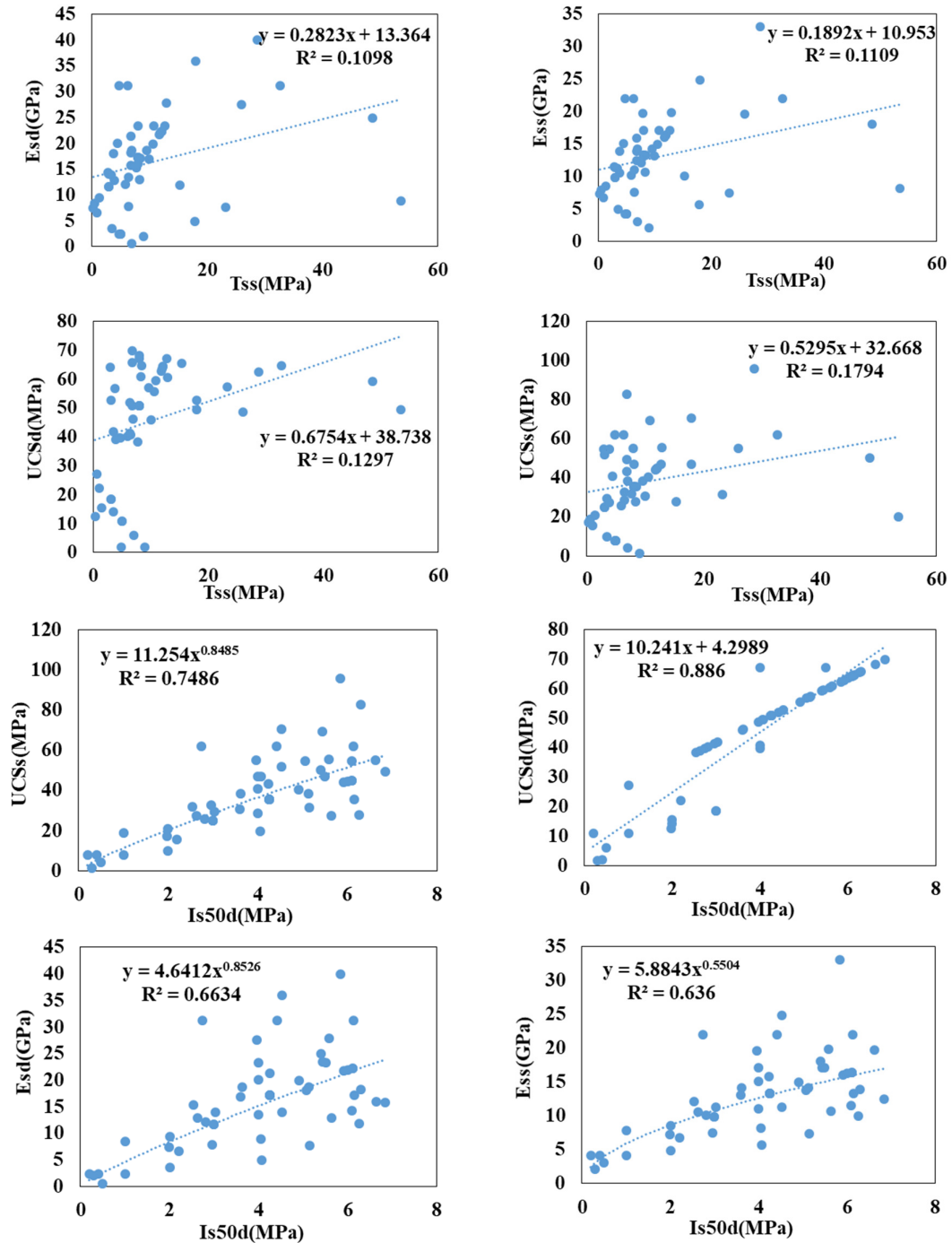
همبستگی خصوصیات استاتیکی در شرایط خشک و اشباع با متغیرهای مستقل در شکل ۳ ارائه شده است. همبستگی مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته با همه پارامترهای بررسی شده بجز مقاومت کششی در شرایط اشباع، دارای دقت بالایی می‌باشد. همبستگی تخلخل با پارامترهای استاتیک (UCS و Es) در شرایط خشک و اشباع نشان می‌دهد که UCS در شرایط خشک بیش‌ترین همبستگی را با شاخص بارنقطه‌ای و تخلخل دارد. به طور کلی در حالت خشک همبستگی بیش‌تری بین تخلخل و پارامترهای مکانیکی وجود دارد. با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود که تخلخل روش مناسبی برای تخمین پارامترهای مقاومت فشاری و مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ‌آهک در شرایط خشک و اشباع بوده و می‌توان با استفاده از آن از انجام آزمایش‌های پرهزینه، وقت‌گیر و مخرب جهت برآورد این پارامترها اجتناب کرد. در تحقیقات متعدد رابطه‌ای خطی با ضریب همبستگی بالا بین شاخص بارنقطه‌ای و مقاومت تک‌محوری گزارش شده است (باسو و کارامان، ۲۰۱۰؛ عظیمیان و همکاران، ۲۰۱۴؛ باسو و ایدین، ۲۰۰۶). بررسی وآسارهیلی (۲۰۰۵) نشان داد که از لحاظ آماری مدول در شرایط اشباع حدود ۶۷ درصد مدول در شرایط خشک می‌باشد. آزمایش سرعت موج تراکمی سنگ از دیگر آزمون‌هایی است که از نظر اجرایی دشوار و هزینه‌بر نمی‌باشد. در این پژوهش رابطه‌ای این پارامتر با مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوری بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که سرعت موج تراکمی جهت تخمین

خروجی (مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک و اشباع) می‌باشد.

۲ تعیین شد. به عبارتی دیگر، بهترین شبکه (حالت بهینه با بالاترین دقت و کمترین خطا) در نظر گرفته شده شامل دو نورون در لایه پنهان با حداکثر چهار ورودی و چهار



شکل ۳. تاثیر مقاومت کششی، شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل بر خصوصیات استاتیک



ادامه شکل ۳. تاثیر مقاومت کششی، شاخص بار نقطه‌ای و تخلخل بر خصوصیات استاتیکی

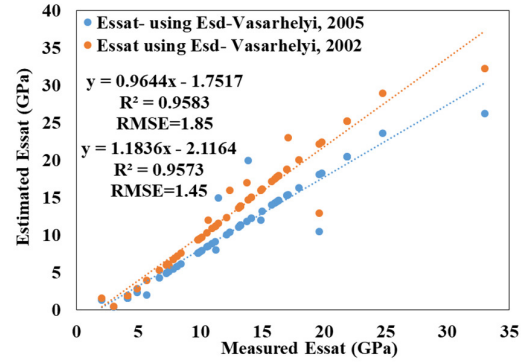
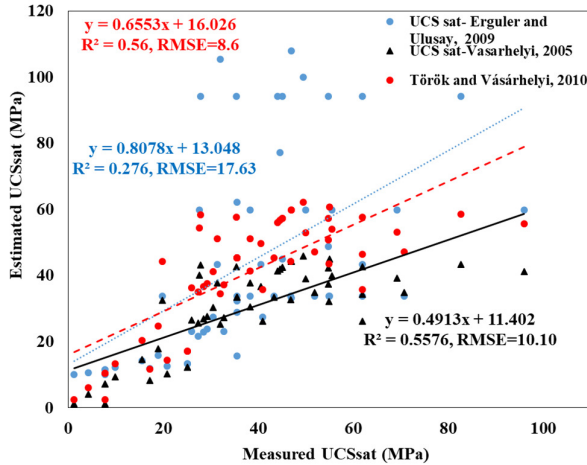
ترتیب برای آموزش و جلوگیری از برازش بیش از حد شبکه (overfitting) استفاده شد. ویژگی الگوریتم BR این است که با کنترل عملکرد برای داده‌های آموزش و آزمایش، با تغییر در عملکرد توابع به گونه‌ای که کمترین مقدار خطا ممکن برای هر مجموعه داده بدست آید، عملیات آموزش را متوقف می‌کند. شکل ۵ تصویری از ساختار شبکه‌های

شبکه چند لایه مورد استفاده در این مطالعه از نوع پس انتشار با الگوریتم آموزش لوبنرگ-مارکورت (-Levenberg Marquardt) انتخاب شد. تابع انتقال نورون در لایه خروجی و لایه میانی، به ترتیب سیگموئید (Sigmoid) و پرلین (Purelin) تعیین شد. از الگوریتم -Levenberg Marquardt (LM) و Bayesian-regularization (BR) به

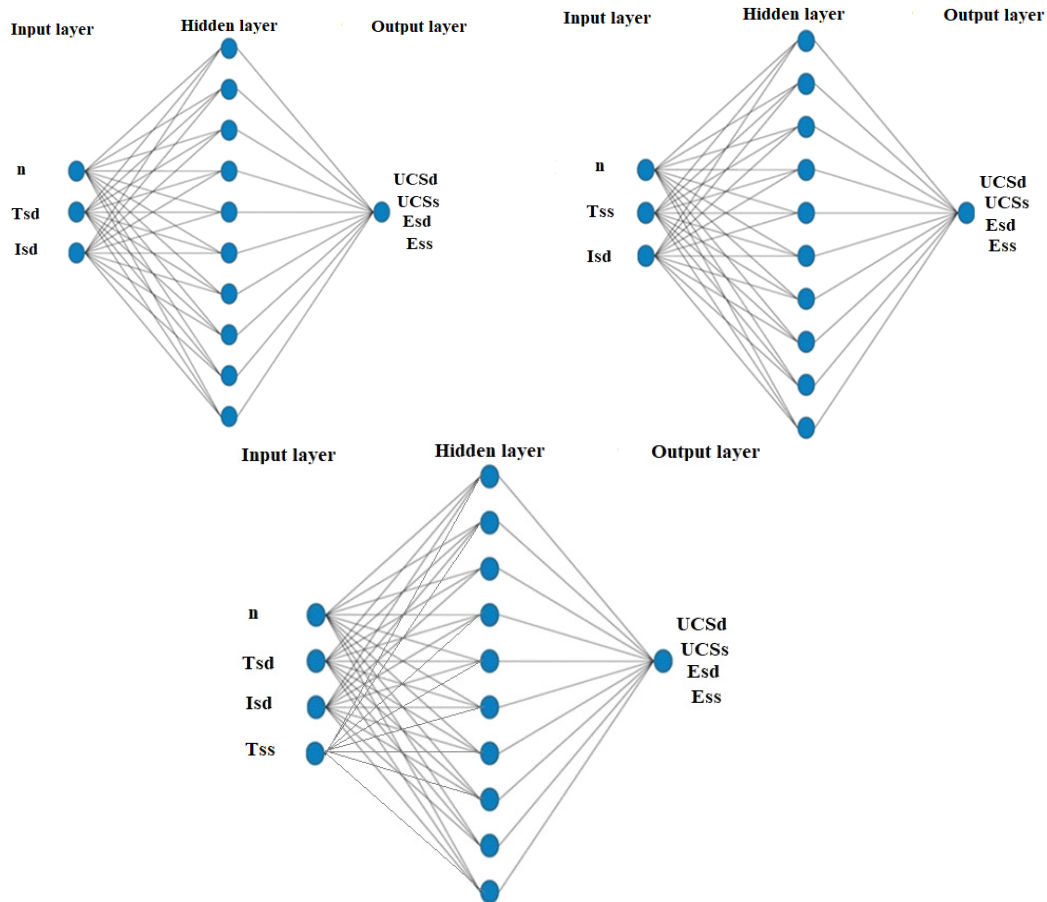


خروجی از جمله مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک و اشباع (UCSs, UCSd, Ess, Esd) تشکیل شده است.

مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. این شبکه از یک لایه پنهان با ۳ ورودی شامل تخلخل (n)، مقاومت کششی خشک (Tsd) یا اشباع (Tss) و شاخص بار نقطه‌ای (Isd) مربوط به مغزه‌های با قطر ۵۴ میلی‌متر و چهار



شکل ۴. نتایج واسنجی روابط محققین با داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر

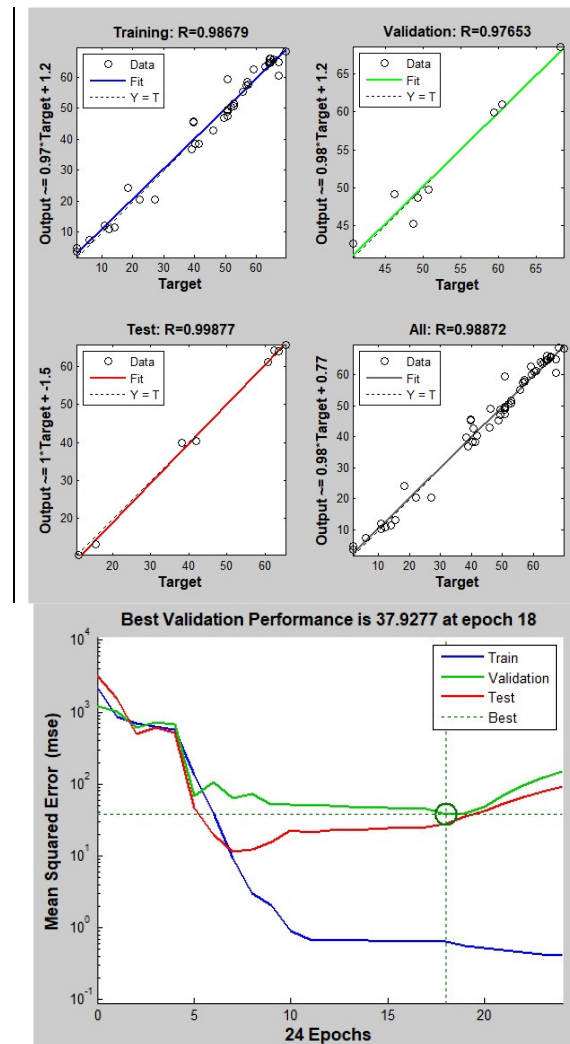
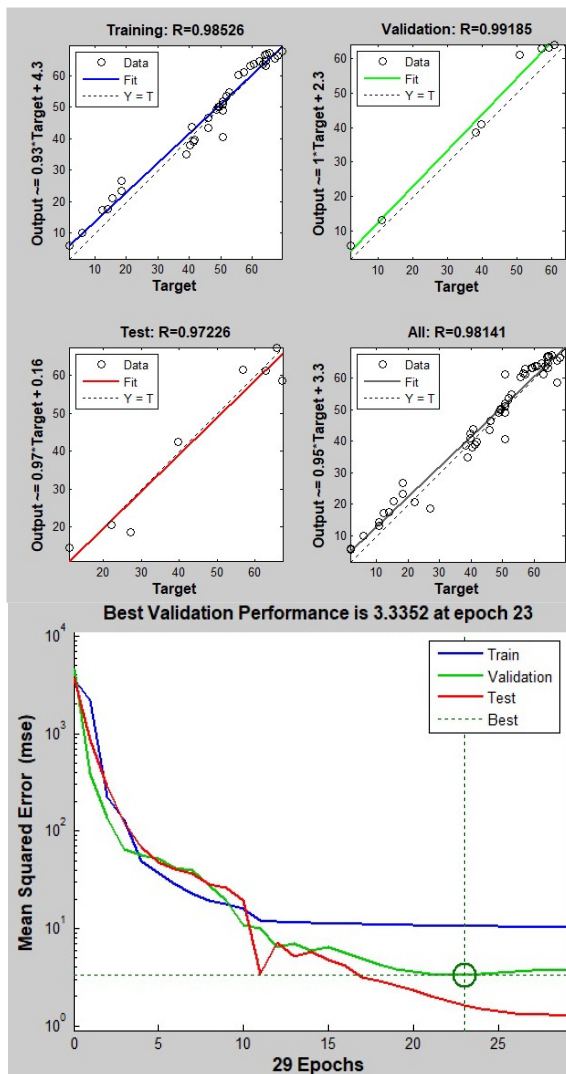


شکل ۵. ساختار شبکه‌های مورد استفاده در این تحقیق

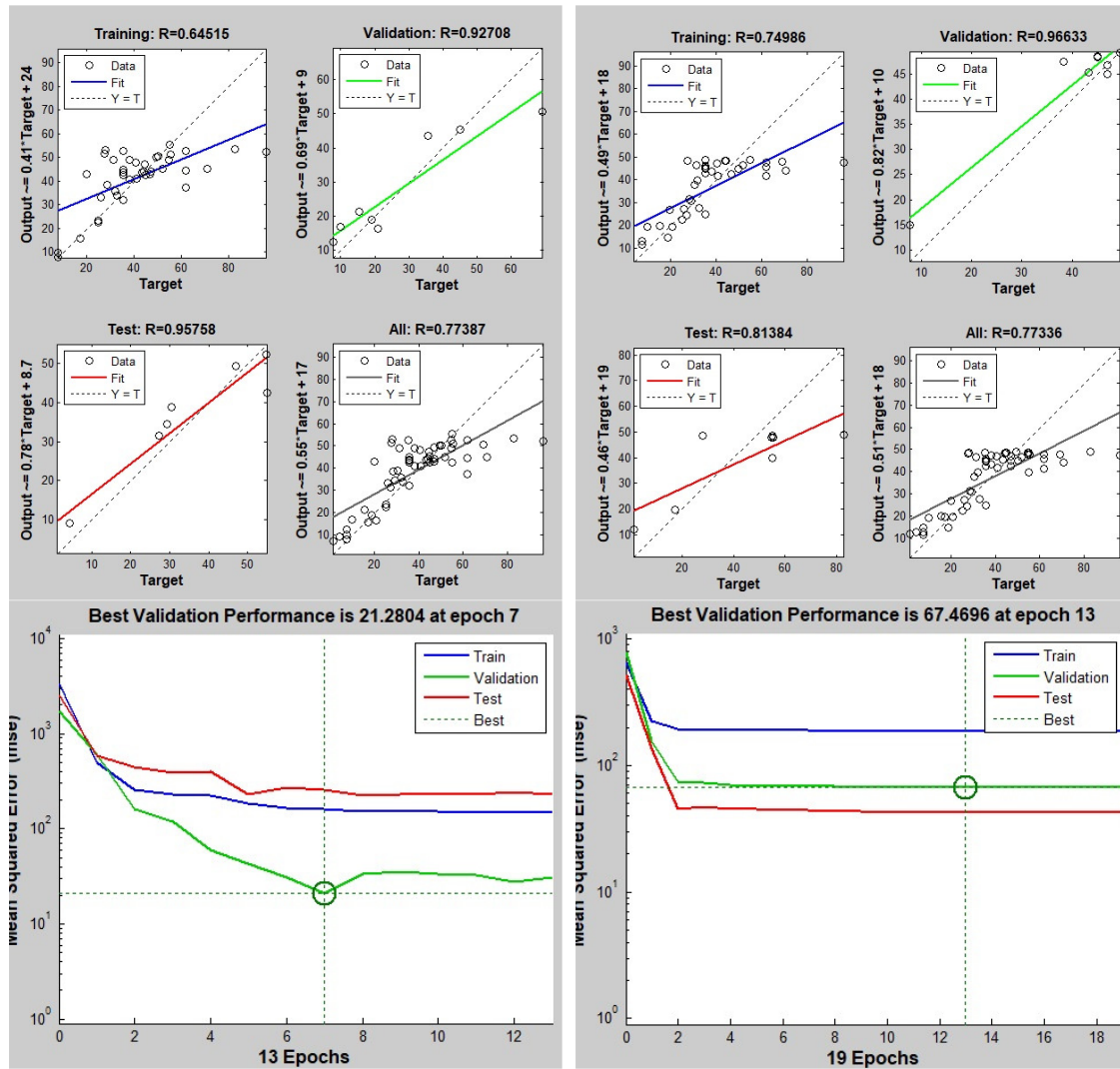


جدول ۲. روابط ارائه شده جهت تخمین خصوصیات استاتیک در شرایط خشک و اشباع توسط محققین قبلی

روابط	ضریب تعیین ( $R^2$ )	نوع سنگ	مرجع
$UCS_{sat.} = 204.8 * n^{(-1.121)}$	0.84	سنگ‌های رسوبی	ارگول و الوسای (۲۰۰۹)
$UCS_{sat.} = 0.659UCS_{dry}$	0.93	سنگ‌های آهکی	وآسارهیلی (۲۰۰۵)
$E_{s-sat.} = 0.657E_{s-dry}$	0.87	سنگ‌های آهکی	وآسارهیلی (۲۰۰۵)
$UCS_{sat.} = 0.879UCS_{dry} + 0.818$	0.95	تراورتن	ترک و وآسارهیلی (۲۰۱۰)
$UCS_{sat.} = 0.759UCS_{dry}$	0.91	ماسه‌سنگ	وآسارهیلی (۲۰۰۳)
$UCS_{sat.} = 0.729UCS_{dry}$	0.90	توف آتشفشانی	وآسارهیلی (۲۰۰۲)
$E_{s-sat.} = 0.807E_{s-dry}$	0.90	توف آتشفشانی	وآسارهیلی (۲۰۰۲)



شکل ۶. ضرایب همبستگی و خطای شبکه عصبی در پیش‌بینی مقاومت تراکم تک‌محوری در حالت خشک (سمت راست با ورودی‌های  $n$ ،  $T_{sd}$ ،  $I_{sd}$ ) و (سمت چپ با ورودی‌های  $n$ ،  $I_{sd}$ ،  $T_{sd}$ )



شکل ۷. ضرایب همبستگی و خطای دو مورد از نتایج شبکه عصبی مصنوعی در پیش بینی مقاومت تراکم تک محوری اشباع (سمت راست با ورودی های  $n$ ,  $T_s$ ,  $I_s$ ) و (سمت چپ با ورودی های  $n$ ,  $I_s$ ,  $T_s$ )

از یک گروه مستقل از داده‌های آزمایش تأیید شود (انصاری و هاشمی، ۲۰۱۷؛ طاهری و همکاران، ۲۰۱۸؛ مخبری و خادمی، ۲۰۱۷).

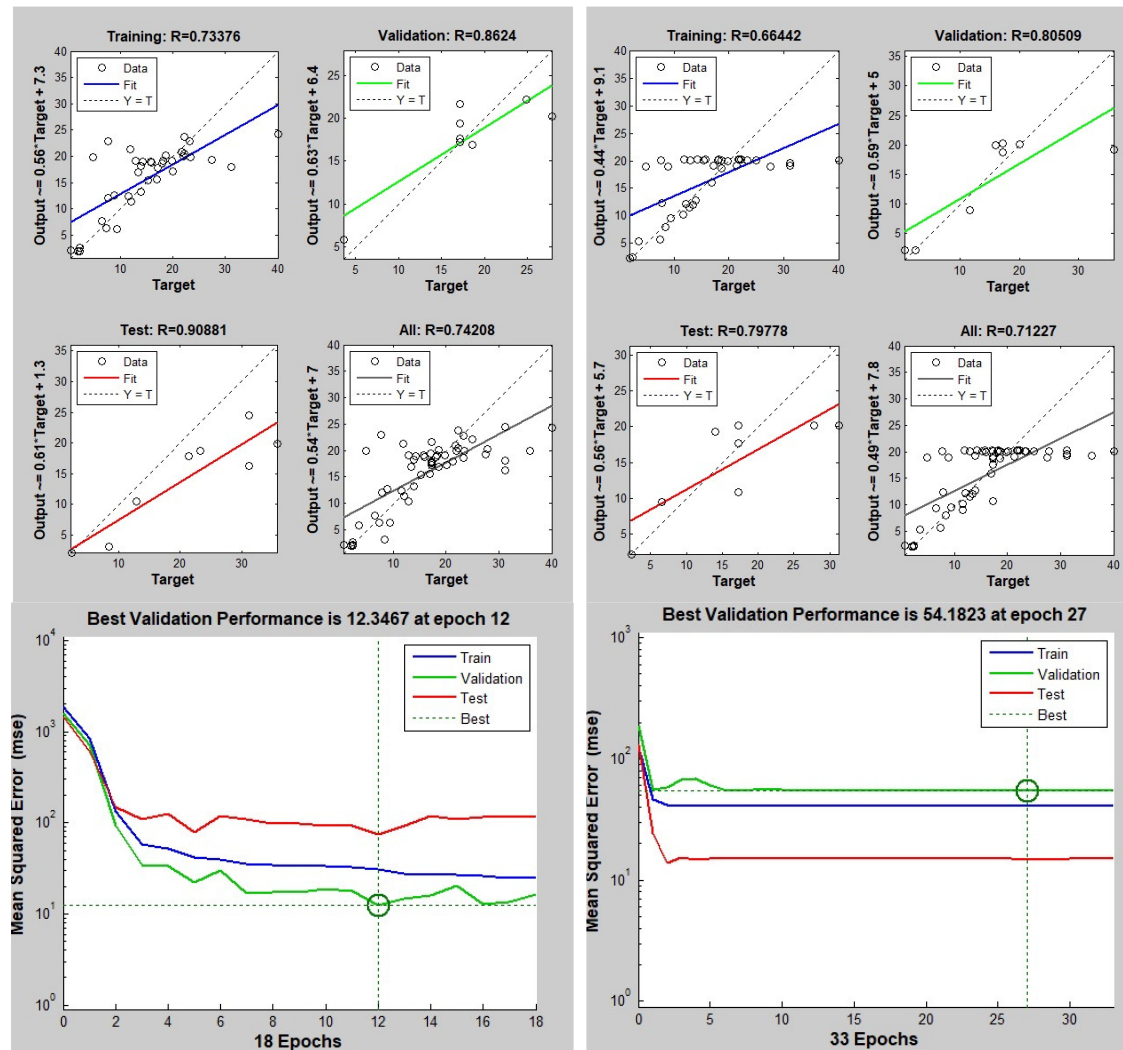
روند تغییرات خطای مجذور میانگین (MSE) و ضریب همبستگی مدل‌های بهینه با ۲ لایه پنهان بین خروجی و ورودی برای موارد آموزش، آزمایش و کل داده‌های در شکل ۶ تا ۹ ارائه شده است. دقت متغیرهای تخمین زده شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بهینه با محاسبه شاخص‌های  $R^2$  و MSE ارزیابی شد.

نتایج شبکه عصبی با توجه به تعداد حلقه‌های پنهان در مدل‌های مورد استفاده برای تخمین UCS و Es در این مطالعه نشان داد که مناسب‌ترین تعداد نوروں لایه پنهان

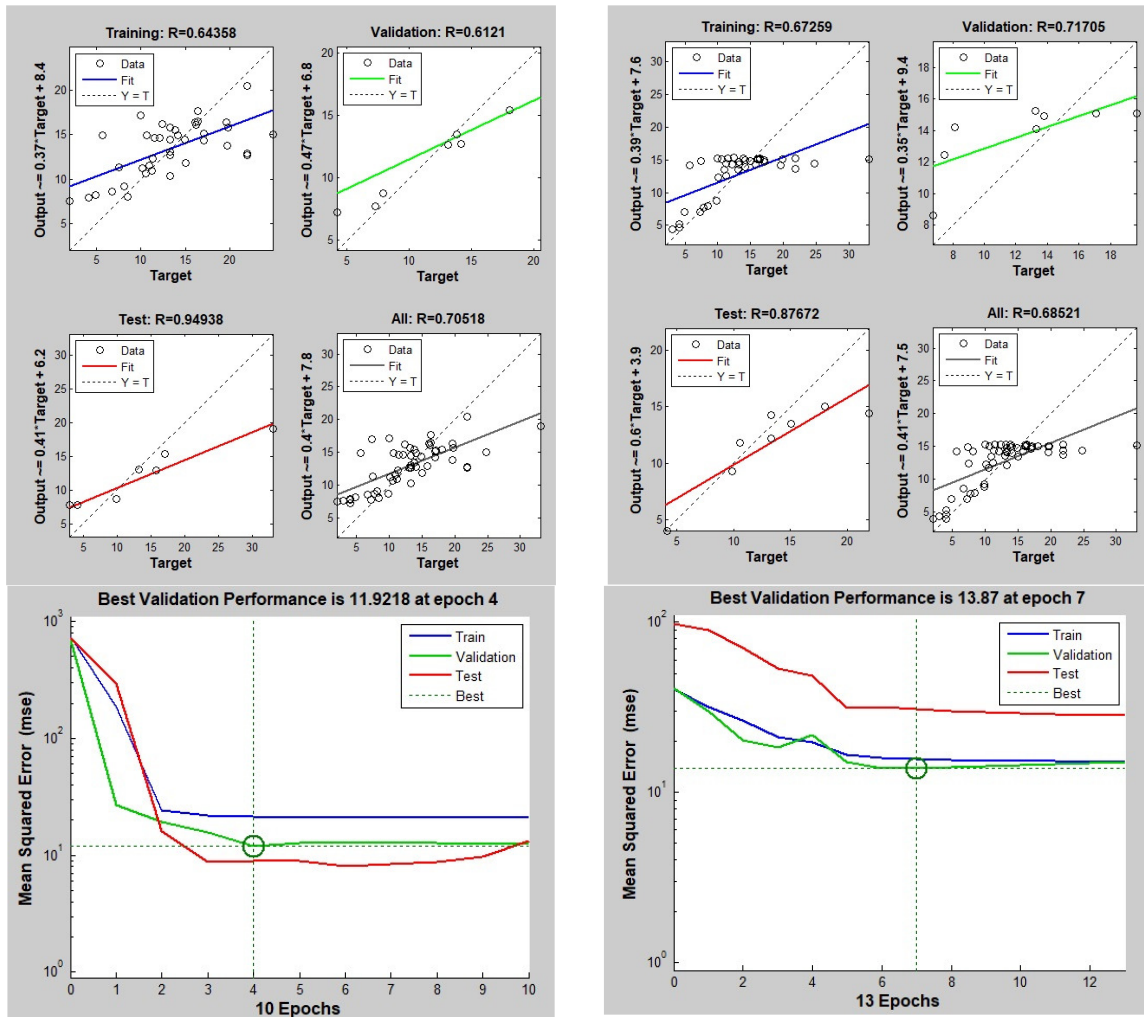
کل داده‌ها به عنوان ورودی به شبکه به سه مجموعه شامل داده‌های آموزش، آزمایش و صحت‌سنجی تقسیم می‌شوند. در این مطالعه، درصد آموزش، آزمون و اعتبارسنجی به ترتیب به ترتیب ۷۰، ۱۵، ۱۵ انتخاب شدند. از مجموعه آموزشی برای آموزش الگوریتم و بدست آوردن مقادیر دقیق وزن‌ها برای نتایج مطلوب استفاده شد. از مجموعه اعتبارسنجی برای اطمینان از عدم وابستگی زیاد شبکه به مجموعه داده‌های آموزش استفاده شد که از فرایند بیش-برازش (overfitting) توسط شبکه عصبی جلوگیری می‌کند. مجموعه آزمایش در طول آموزش شبکه استفاده نشده و برای آزمایش شبکه در پیش‌بینی داده‌های جدید محفوظ می‌ماند. عملکرد مدل آموزش دیده باید با استفاده

پیش‌بینی کننده‌ها در حالت اشباع باشند میزان خطا بیش‌تر می‌باشد. نتایج تخمین مدول الاستیسیته در حالت خشک بر اساس متغیرها در حالت مختلف در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است. مشاهد می‌شود متغیرهای مستقل در حالت خشک تاثیر بیش‌تری بر مدول الاستیسیته دارند. در شکل ۹ ضرایب همبستگی و خطای نتایج شبکه عصبی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته در حالت اشباع (سمت راست با ورودی‌های n, Tss, Isd) و (سمت چپ با ورودی‌های n, Tsd, Isd) ارائه شده است. در این حالت نیز مدول الاستیسیته در حالت اشباع بیش‌ترین همبستگی را با متغیرها در حالت خشک دارد.

در این مدل‌ها برابر با ۲ می‌باشد و در این حالت پارامترهای استخراج شده دقیق‌تر از سایر لایه‌ها می‌باشند. ضریب همبستگی و خطای مربوط به مدل‌های بهینه در حالت‌های مختلف آموزش، آزمایش و اعتبارسنجی در شکل ۶ تا ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج داده‌های آزمایش، شبکه عصبی در پیش‌بینی مقاومت تراکم تک‌محوری اشباع (سمت راست با ورودی‌های n, Tss, Isd) و خشک (سمت چپ با ورودی‌های n, Tsd, Isd) با دقتی بالاتر از رگرسیون ساده قادر به تخمین مقاومت تک‌محوری می‌باشد (شکل‌های ۶ و ۷). مشاهد می‌شود که متغیرهای مستقل در حالت اشباع بهتر از حالت خشک مقاومت تک‌محوری اشباع را تخمین می‌زنند. همچنین در حالتی که



شکل ۸. ضرایب همبستگی و خطای نتایج شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته در حالت خشک (سمت راست با ورودی‌های n, Tss, Isd) و (سمت چپ با ورودی‌های n, Tsd, Isd)



شکل ۹. ضرایب همبستگی و خطای نتایج شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته اشباع (سمت راست با ورودی‌های  $n$ ،  $Tss$ ،  $Isd$ ) و (سمت چپ با ورودی‌های  $n$ ،  $Isd$ ،  $Tsd$ )

الگوی نقاط داده‌ها مربوط به مقاومت تراکم تک‌محوری در شرایط اشباع در حال تنگتر شدن به سمت چپ می‌باشد، که این نشانه‌ای برای ناهمسانی خفیف می‌باشد (شکل ۱۰).

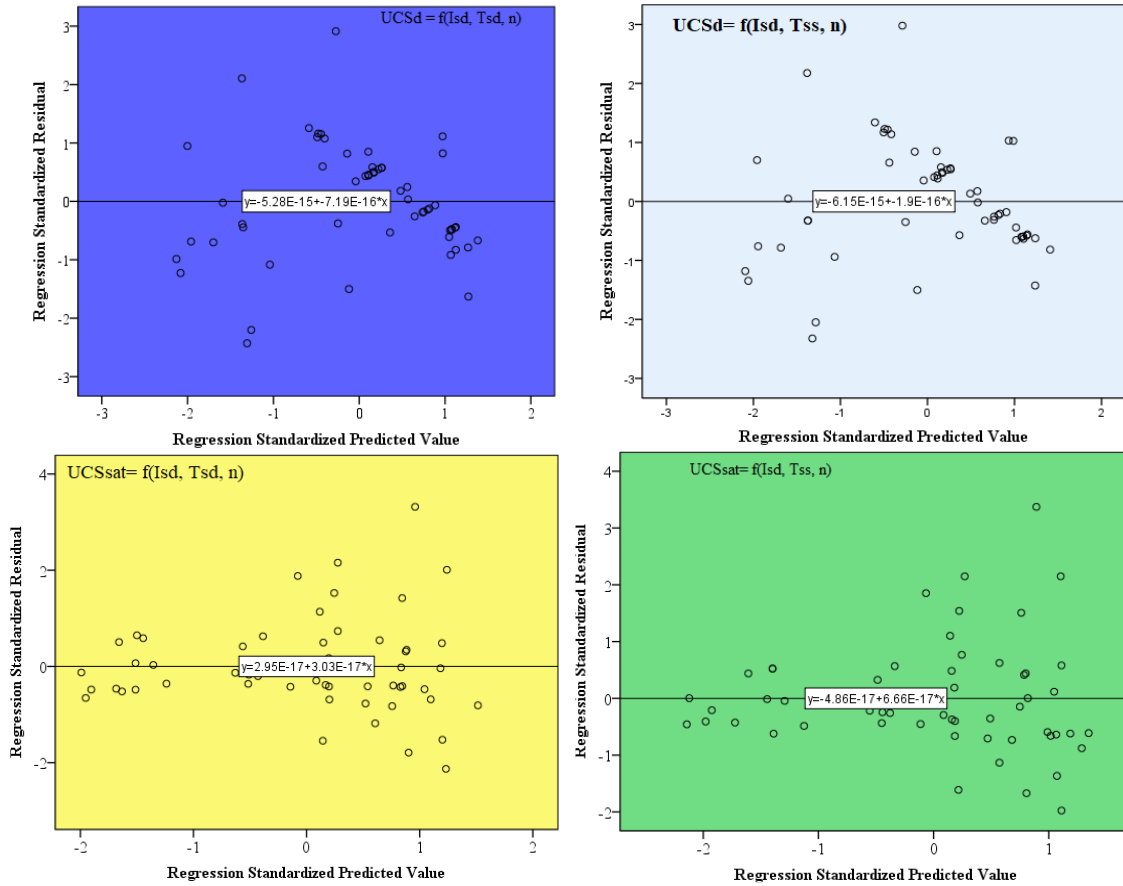
### اثر ترکیب متغیرهای مستقل بر خواص استاتیک خشک و اشباع

در مطالعات تکمیلی اثر خصوصیات خشک و اشباع بطور همزمان (متغیرهای  $n$ ،  $Isd$ ،  $Tss$ ،  $Tsd$ ) بر مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته خشک و اشباع بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که دقت متغیرهای مستقل در تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته خشک بیش‌تر از حالت اشباع می‌باشد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

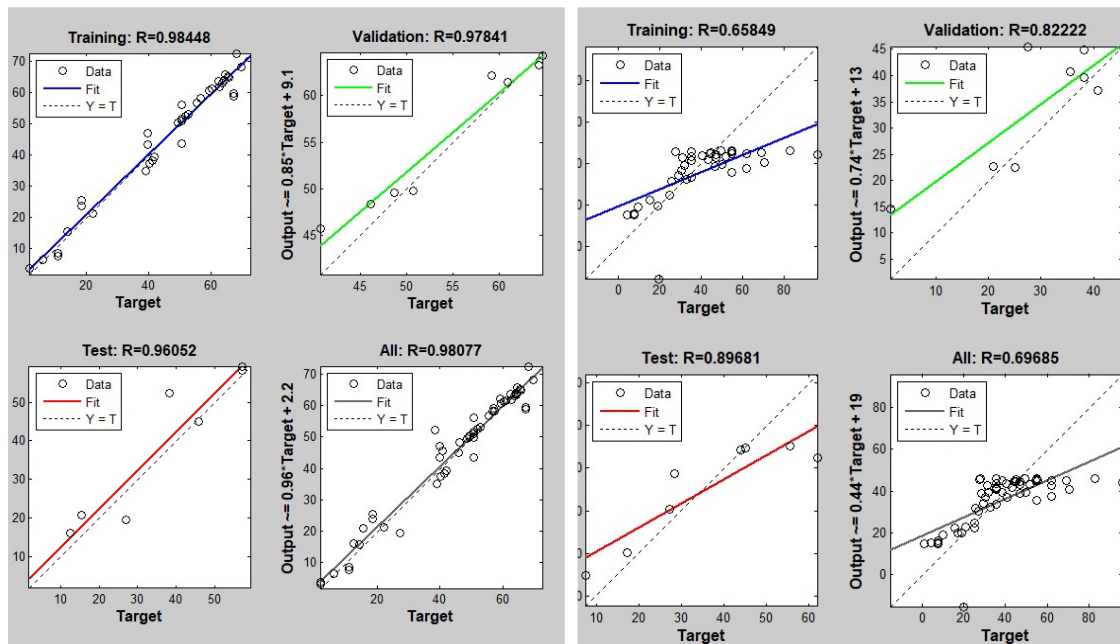
### ناهمسانی (Heteroscedasticity)

یکی از فرضیات مدل‌ها حداقل مربعات آن است که واریانس باقی‌مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش‌بینی شده همگن باشد، که با عنوان ناهمسانی شناخته می‌شود. اگر مدل به خوبی ساخته شده باشد، هنگامی که نمودار باقیمانده‌ها در برابر مقادیر پیش‌بینی شده رسم می‌شود، هیچ الگوی مشخصی نباید وجود داشته باشد. اگر واریانس باقیمانده‌ها غیر ثابت باشد در این صورت واریانس باقیمانده‌ها را ناهمسان می‌خوانند. در شکل ۱۰ با استفاده از روش‌های نموداری ناهمسانی مدل‌ها شماتیک‌وار ارائه شده است. این روش نموداری متداول از باقیمانده در برابر نمودار پیش‌بینی شده استفاده می‌کند تا باقیمانده‌ها را در برابر مقادیر پیش‌بینی شده نشان دهد. مشاهده می‌شود که

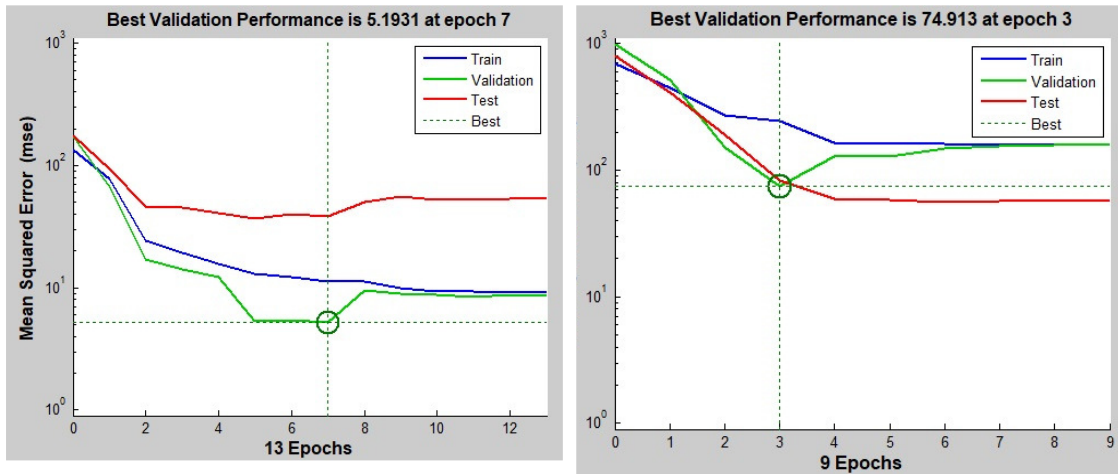




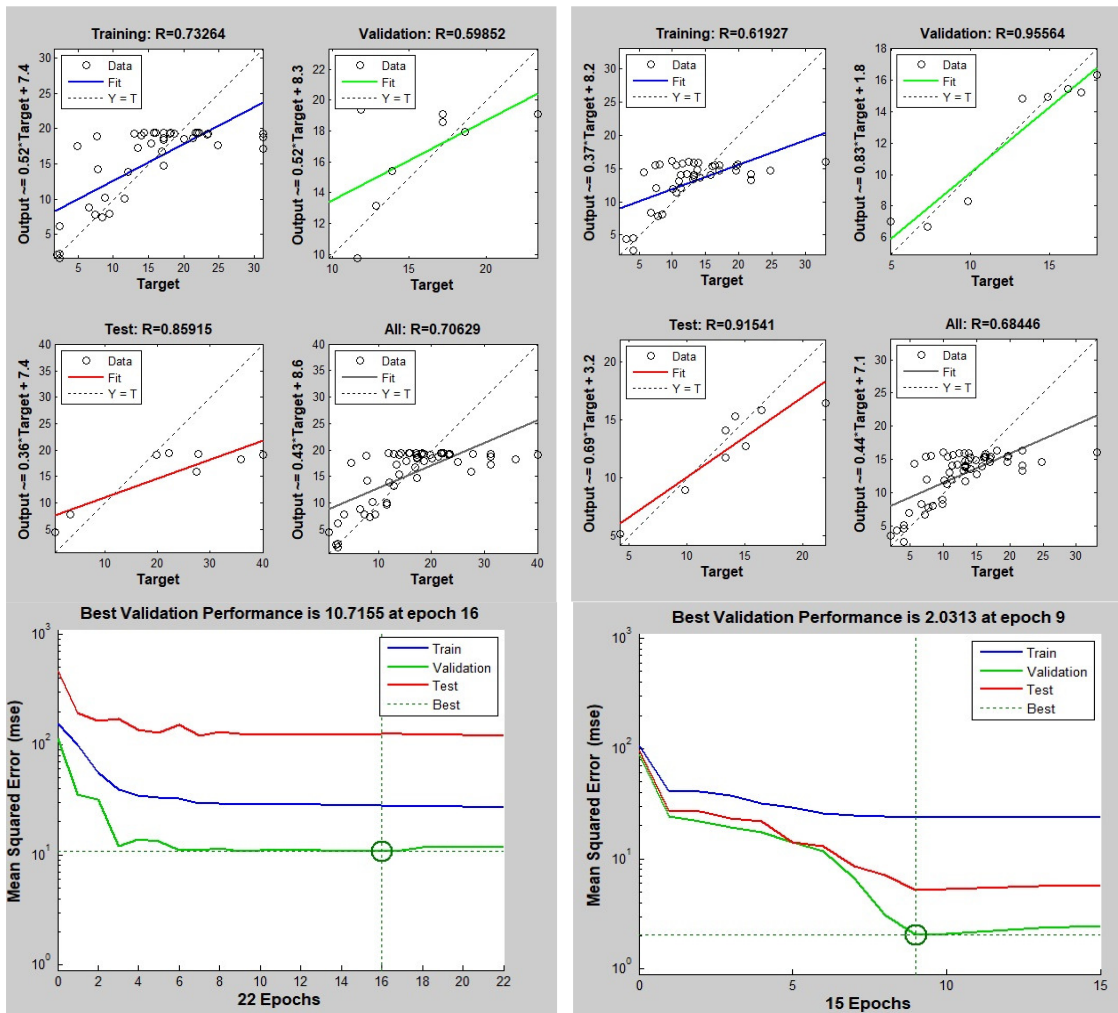
شکل ۱۰. وضعیت همگنی واریانس باقی‌مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش‌بینی شده



شکل ۱۱. اثر  $n, Isd, Tss, Tsd$  بر مقاومت تراکم تک‌محوری در حالت خشک (سمت چپ) و بر مقاومت تراکم تک‌محوری در حالت اشباع (سمت راست)



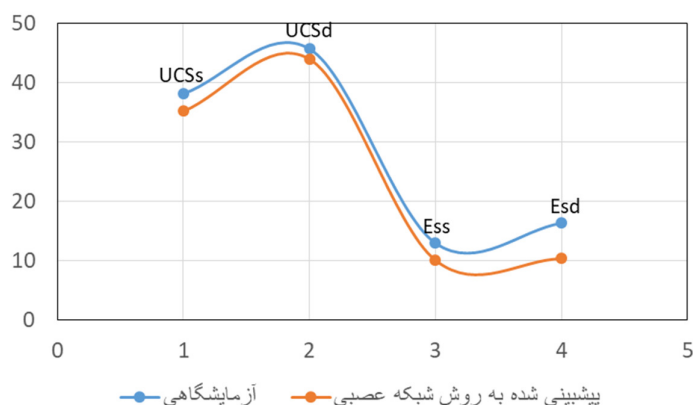
ادامه شکل ۱۱. اثر  $n$ ،  $T_{sd}$ ،  $T_{ss}$ ،  $J_{sd}$  بر مقاومت تراکم تک‌محوری در حالت خشک (سمت چپ) و بر مقاومت تراکم تک‌محوری در حالت اشباع (سمت راست)



شکل ۱۲. تاثیر  $n$ ،  $T_{sd}$ ،  $T_{ss}$ ،  $J_{sd}$  بر مدول الاستیسیته در حالت خشک (سمت چپ) و بر مدول الاستیسیته در حالت اشباع (سمت راست)

مقادیر پیش‌بینی شده به روش شبکه عصبی و مقادیر اندازه‌گیری شده (آزمایشگاهی) مربوط به UCS و Es در شرایط خشک و اشباع، در شکل ۱۳ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود مقادیر پیش‌بینی شده به روش شبکه عصبی از مقادیر اندازه‌گیری شده UCS و ES کمتر می‌باشد.

با مقایسه نتایج شبکه عصبی با رگرسیون ساده برای برآورد شاخص مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته می‌توان اظهار داشت که شبکه عصبی دقیق‌تر از رگرسیون ساده می‌باشد. برتری عملکرد شبکه عصبی در مقایسه با روش رگرسیون توسط سایر محققین تایید شده است (مهرگینی و همکاران، ۲۰۱۹؛ برهام و همکاران، ۲۰۲۰؛ عبدی و قاسمی‌دهنوی، ۱۳۹۸).



شکل ۱۳. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از شبکه عصبی

نتایج شبکه عصبی نشان داد که متغیرها تاثیر بالایی بر مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته سنگ دارند بطوریکه با دقت بالایی می‌توان خواص استاتیک را تخمین زد. تأثیر رطوبت بر روابط ارائه شده برای تخمین مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته نشان داد که دقت مدل‌ها در شرایط خشک بالاتر از شرایط اشباع می‌باشند. بدین معنی که وقتی ورودی‌ها و خروجی‌ها در حالت خشک باشند همبستگی مدل‌ها و روابط بیش‌تر از حالتی است که ورودی‌ها و خروجی‌ها در حالت اشباع باشند. مقایسه مقادیر آزمایشگاهی و مقادیر حاصل از شبکه عصبی نشان داد که روش شبکه عصبی مقادیر کمتری را جهت تخمین خصوصیات استاتیک سنگ‌آهک ارائه می‌کند و بنابراین محافظه کارانه عمل می‌کند.

#### تقدیر و تشکر

نویسندگان از مهندسین شرکت مه‌اب قدس که اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش را فراهم کردند نهایت قدردانی و سپاسگذاری را به عمل می‌آورند.

#### نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پتروگرافی، تخلخل، شاخص بارنقطه‌ای، مقاومت کششی، مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته ۵۶ نمونه مغزه آهکی از سازند آسماری در ساختگاه سد خرسان دو در شرایط خشک و اشباع مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون ساده اثر متغیرها در شرایط خشک و اشباع بر مقاومت تراکم تک‌محوری و مدول الاستیسیته در شرایط خشک و اشباع بررسی شد. بررسی میکروسکوپی نمونه‌های سنگ‌آهک نشان داد که کلسیت کانی اصلی تشکیل‌دهنده سنگ‌آهک است که در سنگ‌آهک به شکل کلسیت ثانویه و میکریت وجود دارد. نمونه‌ها بر اساس طبقه‌بندی بافت از مادستون تا گرینستون طبقه‌بندی شدند. نتایج واسنجی روابط ارائه شده محققین قبلی بر اساس نتایج آزمایشگاهی این تحقیق و با استفاده از معیارهای ضریب تعیین و خطای جذر میانگین مربعات نشان داد که اکثر روابط سایر می‌توانند جهت تخمین خصوصیات سنگ‌آهک آسماری مورد استفاده قرار گیرند. بررسی نمودارهای همگنی واریانس باقی مانده‌ها در سطوح مقادیر پیش‌بینی شده، میزان خطا و ضریب همبستگی



## منابع

- ASTM (2001a) 08 Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. D3967. 95(a).
- ASTM (2001b) Standard method for determination of the point load strength index of rock. ASTM Standards on Disc 04.08. Designation D5731.
- ASTM D 2938-95, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, 2002. 10.1520/D2938-95R02.
- Atzeni, C., U. Sanna, N. Spanu (2006) Some mechanisms of microstructure weakening in high-porous calcareous stones, *Materials and structures*. 39: 525-531.
- Azimian, A., Ajallooian, R., Fatehi, L (2014) An empirical correlation of uniaxial compressive strength with p-wave velocity and point load strength index on marly rocks using statistical method. *Geotechnical and Geological Engineering*. 32 (1): 205e214.
- Barham, W., S. Rababah, S., R. Aldeeky, H., H. and Al Hattamleh, O. H (2020) Mechanical and Physical Based Artificial Neural Network Models for the Prediction of the Unconfined Compressive Strength of Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5): 4779-4792.
- Basu, A. and Kamran, M (2010) Point load test on schistose rocks and its applicability in predicting uniaxial compressive strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 47(5): 823-828,
- Dunham, R. J (1962) Classification of carbonate rocks according to their depositional texture. In: Ham, W. E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks*, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 1: 108-121.
- Ebrahimi Fard, H. and Jabbari, M. M (2017) The Effect of Magnesium Oxide Nano Particles on the Mechanical and Practical Properties of Self-Compacting Concrete. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(2): 77-87.
- Esparham, A., Moradikhoh, A. B. and Avnaki, M. J (2020) effect of Various Alkaline Activator Solutions on Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4(2): 115-123. Doi:10.22034/JCEMA.2020.224071.1018.
- Emadi, M., Pouraghajan, M., Gharavi, H., Saghii, H., Ghaffari, A. R., Mazaheri, A. R., Zeinolebadi Rozbahani, M., Beiranvand, B., Abbasi Dezfouli, A., Mehralian, H. and Azarbakht, A (2020) Investigating the effect of rubber powder and nano silica on the durability and strength characteristics of geopolymeric concretes. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4(4).
- اسماعیلی، م.، پسندی، م.، هاشمی اصفهانیان، م (۱۳۹۵) تخمین مدول الاستیسیته سنگ بکر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون غیرخطی، نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۲۱.
- عبدی، ی.، قاسمی‌دهنوی، آ (۱۳۹۸) پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیک ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و آنالیز رگرسیون چندمتغیره. نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۳، شماره ۲۶، ص ۴۵-۵۴.
- حق‌نژاد، ع.، آهنگری، ک.، نورزاد، ع (۱۳۸۹) 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، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۴، شماره ۸، ص ۴۴-۵۳.
- عبدی، ی (۱۳۹۹) کاربرد آنالیز رگرسیون چندمتغیره برای پیش‌بینی مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از خصوصیات پتروگرافی، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، ص ۱۴۷-۱۵۷.
- پسندی، م.، اجل‌لوییان، ر.، فروغی‌ابری، ر (۱۳۹۲) تخمین خوردند سیمان پرده آبند با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۷.
- Abbasi Dezfouli, A (2020) Effect of eggshell powder application on the early and hardened properties of concrete. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 4 (4). Doi: 10.22034/JCEMA.2020.241853.1036.
- Abdi, Y., Khanlari, G. R. and Jamshidi, A (2018) Correlation between mechanical properties of sandstones and P-wave velocity in different degrees of saturation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-10.
- Aligholi, S., Lashkaripour, G. R., & Ghafouri, M (2017) Strength/Brittleness Classification of Igneous Intact Rocks Based on Basic Physical and Dynamic Properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50(1): 45-65.
- Andriani, G. F. and Walsh, N (2010) Petrophysical and mechanical properties of soft and porous building rocks used in Apulian monuments (south Italy). *Geological Society, London, Special Publications*, 333(1): 129-141.
- Ansari, Y. and Hashemi, A (2017) Neural Network Approach in Assessment of Fiber Concrete Impact strength", *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(3): 88-97.

- Behavior of Rock Materials. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 1(2): 39-44.
- Nia, A., R., Lashkaripour, G., R. and Ghafoori, M (2017) Prediction of grout take using rock mass properties, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(4): 1643-1654.
- Oshnavieh, D. and Bagherzadeh Khalkhali, A. (2019) Use of shear wave velocity in evaluation of soil layer's condition after liquefaction. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(3): 119-135.
- Rahmouni, A., Boulanouar, A., Boukalouch, M., Géraud, Y., Samaouali, A., Harnafi, M. and Sebbani, J (2013) Prediction of porosity and density of calcarenite rocks from P-wave velocity measurements. *International Journal of Geosciences*, 4(9): 1292-1299.
- Rastegarnia, A., Teshnizi, E. S., Hosseini, S., Shamsi, H. and Etemadifar, M (2018) Estimation of punch strength index and static properties of sedimentary rocks using neural networks in south west of Iran. *Measurement*, 128: 464-478.
- Sachpazis, C. I (1990) Correlating Schmidt hardness with compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 42 (1): 75-83.
- Saghi, H., Behdani, M., Saghi, R., Ghaffari, A. R. and Hirdaris, S (2019) Application of Gene Expression Programming Model to Present a New Model for Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer and Concrete, *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(1): 15-29.
- Sekhavati, P. and Jafarkazemi, M (2019) Investigating durability behavior and compressive strength of lightweight concrete containing the nano silica and nano lime additives in the acid environment. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(2): 103-117.
- Selçuk, L., and Nar, A (2016) Prediction of uniaxial compressive strength of intact rocks using ultrasonic pulse velocity and rebound-hammer number. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49(1): 67-75.
- Shakoor, A. and Barefield, E. H (2009) Relationship between unconfined compressive strength and degree of saturation for selected sandstones. *Environmental & Engineering Geoscience*, 15 (1): 29-40.
- Shamsashtiany, R. and Ameri, M (2018) Road Accidents Prediction with Multilayer Perceptron MLP modelling Case Study: Roads of Qazvin, Zanjan and Hamadan. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 2(4): 181-192.
- Taheri, M., Zamani, S. and Ramazani, A (2018) Ferentinou, M, Fakir, M (2017) An ANN approach for the prediction of uniaxial compressive strength, of some sedimentary and igneous rocks in Eastern KwaZulu-Natal. *International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, Ostrava.
- Heidari, M., Khanlari, G. R., Kaveh, M. T. and Kargarian, S (2012) Predicting the uniaxial compressive and tensile strengths of gypsum rock by point load testing. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(2): 265-273.
- Hubick, K. T (1992) Artificial neural networks in Australia. Department of. Industry, Technology and Commerce, Commonwealth of Australia, Canberra.
- ISRM (1981) Rock characterization testing and monitoring. In: Brown, E. T. (Ed.), *ISRM Suggested Methods*. Pergamon Press, Oxford.
- Jahed Armaghani, D., Tonnizam, E., Hajihassani, M (2015) Application of several non-linear prediction tools for estimating uniaxial compressive strength of granitic rocks and comparison of their performances, 32 (2): 189-206. doi.org/10.1007/s00366-015-0410-5.
- Karakul, H (2016) Investigation of saturation effect on the relationship between compressive strength and Schmidt hammer rebound. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(3): 1143-52.
- Karakul, H., & Ulusay, R (2013) Empirical correlations for predicting strength properties of rocks from P-wave velocity under different degrees of saturation. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(5): 981-999.
- Lotfollahi, S., Ghorji, M. and Hoseini Toodashki, V (2018) An Investigation into the Effect of Foliation Orientation on Displacement of Tunnels Excavated in Metamorphic Rocks. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 2(3):138-145.
- Mahdiabadi, N. and Khanlari, G (2019) Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity in Calcareous Mudstones using Neural Networks, Fuzzy systems, and regression analysis. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(1):104-114.
- Mehrgini, B., Izadi, H., Memarian, H (2019) Shear wave velocity prediction using Elman artificial neural network. *Carbonates Evaporites*, 34 (1): 1281-1291.
- Mokhberi, M. and Khademi, H (2017) The Use of Stone Columns to Reduce the Settlement of Swelling Soil Using Numerical Modeling. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 1(2): 45-60.
- Montgomery, D., C. Peck, E., A. Vining, G. G (2012) Introduction to linear regression analysis. John Wiley & 518 Sons.
- Naseri, F., Lotfollahi, S. and Bagherzadeh Khalkhali, A (2017) Dynamic Mechanical

- Design and Optimization of Mechanical Properties of Reduced-Graphene Oxide-Loaded Cement." *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 159-164.
- Török, Á., and Vásárhelyi, B (2010) The influence of fabric and water content on selected rock mechanical parameters of travertine, examples from Hungary. *Engineering Geology*, 115(3): 237-245.
- Vasanelli, E., Colangiuli, D., Calia, A., Sileo, M., & Aiello, M. A (2015) Ultrasonic pulse velocity for the evaluation of physical and mechanical properties of a highly porous building limestone. *Ultrasonics*, 60: 33-40.
- Vásárhelyi, B (2003) Some observations regarding the strength and deformaUCS و Eslity of sandstones in dry and saturated conditions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(3): 245-249.
- Vásárhelyi, B (2005) Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 38(1): 69-76.
- Yagiz, S (2009) Predicting uniaxial compressive strength, modulus of elasticity and index properties of rocks using the Schmidt hammer, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68 (1): 55-63.
- Yousefvand, M., Sharifi, Y. and Yousefvand, S (2019) An Analysis of the Shear Strength and Rupture Modulus of Polyolefin-Fiber Reinforced Concrete at Different Temperatures. *Journal of civil Engineering and Materials Application*, 3(4): 238-254.

## The effect of index parameters on the static properties of limestone in dry and saturated conditions using artificial neural network

M. R. Motahari

Assist. Prof., Dept., of Civil Engineering, University of Arak, Arak

\* M-Motahari@araku.ac.ir

Received: 2020/12/11 Accepted: 2021/3/2

### Abstract

Previous studies have shown that moisture has a special effect on the static properties (uniaxial compressive strength (UCS) and elastic modulus ( $E_s$ ) of the rock. In this study, thin section, X-ray diffraction (XRD), porosity, UCS and  $E_s$ , point load index, and Brazilian tensile strength of the limestone specimens were determined in Khersan 2 dam site, in south west of Iran. Then, using artificial neural network and simple regression, the effect of dry point load index, dry and saturated tensile strength, and porosity on UCS,  $E_s$  were assessed. Microscopic studies of the samples showed that calcite is the main mineral and samples classified from the Mudstone to the Grainstone. The effect of water on the static properties showed that prediction models in dry conditions are more accurate. Calibration of the relationships presented by previous researchers based on the experimental results of this study and using the criteria of coefficient of determination and root mean square error (RMSE) showed that most of the relationships can be used to estimate the properties of Asmari limestone. Also, investigation of heteroscedasticity graphs of residual variance at predicted levels, determination coefficient and RMSE of the methods showed that the neural network has higher accuracy than simple regression. As compared to the regression method, the neural network is conservative in estimating these properties.

**Keywords:** Mechanical properties, Porosity, Dry and saturated conditions, Artificial neural network, Regression, Limestone.