

## مقایسه روش های شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیونی در پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری سنگ با استفاده از آزمون دیلاتومتری

سید منوچهر حسینی<sup>۱</sup>، روزبه دبیری<sup>۲\*</sup>، لاریسا خدادادی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران.

\* ۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران (rouzbeh\_dabiri@iaut.ac.ir)

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

### چکیده

امروزه روش های مختلفی برای بدست آوردن مدول شکل پذیری وجود دارد از جمله آن ها می توان به آزمایش های برجا (صفحه بار گذاری- دیلاتومتری)، آزمون های آزمایشگاهی و روابط تجربی اشاره نمود. همچنین روش های مختلفی به منظور پیش بینی و تعیین روابط بین چندین پارامتر مختلف وجود دارد که می توان به تحلیل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی اشاره نمود. هدف اصلی در تحقیق حاضر، ارائه یک رابطه جدید به منظور پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری سنگ ها قبل از انجام آزمایش دیلاتومتری، با کمترین خطا است. نتایج مطالعات نشان داده است مدل سازی شبکه عصبی نسبت به تحلیل رگرسیونی در تمامی متغیرهای مستقل ورودی از کارآمدی بالایی برخوردار بوده و تنها با ورودی پارامتر  $Q$  به معادله مورد نظر تحلیل رگرسیونی سطح اطمینان بالاتری دارد. همچنین با مقایسه این دو روش مشخص گردید هر چقدر تعداد متغیر ورودی بیشتر باشد شبکه عصبی بهتر عمل می کند.

**کلمات کلیدی:** مدول تغییر شکل پذیری، دیلاتومتری، سنگ، شبکه عصبی، تحلیل رگرسیونی.

## **Comparison of Artificial Neural Network and Regression Methods in Predicting the Modulus of Deformation of Stone using Dilatometry Test.**

Seyyed Manouchehr Hoseine <sup>1</sup>, Rouzbeh Dabiri <sup>2\*</sup>, Larissa Khodadadi <sup>3</sup>

1- M.Sc. of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Maragheh Branch, Islamic Azad University, Maragheh, Iran

\*2- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran (rouzbeh\_dabiri@iaut.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran

### **Abstract**

Today, there are various methods to obtain the deformation modulus, among which we can refer to in-situ tests (loading plate-dilatometry), laboratory tests, and practical relationships. Also, there are different methods to predict and determine the relationships between several different parameters, which can be referred to regression analysis and artificial neural network. The main goal of the present research is to provide a new relationship to predict the modulus of deformation of rocks before performing the dilatometry test with the least error. The results of the studies have shown that neural network modeling is more efficient than regression analysis in all input independent variables, and it has a higher level of confidence only with the input of Q parameter to the regression analysis equation. Also, by comparing these two methods, it was found that the more the number of input variables, the better the neural network works.

**Keywords:** Deformation modulus, Dilatometry, Rock, Neural network, Regression Analysis.

**۱- مقدمه**

مورد نظر را با اعمال پارامترهای ورودی برآورد نماید. تفاوت عمده این روش با دیگر روش‌های دیگر این است که نرون‌های عصبی ایجاد شده قادر هستند مدول تغییر شکل پذیری را با دقت نسبتاً بالایی برآورد نمایند. به همین دلیل روشی بسیار نوین و کاربردی بوده که از قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار است. البته می‌توان گفت که قبلاً از این روش برای بررسی روابط تجربی و ارائه رابطه جدید برای پیش‌بینی مدول تغییر شکل پذیری استفاده نشده است. پس در نهایت هم روش شبکه عصبی مصنوعی که یک روش جدید می‌باشد در تحقیق به کار برده می‌شود و هم عملکرد آن با دیگر روش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

**۲- مرور مطالعات گذشته**

در سالهای گذشته محققین و مهندسين بسیاری به منظور بهبود عملکرد سنگ و خاک در شرایط مختلف و گوناگون دست به تحقیق و پژوهش زده‌اند و نتایج بسیار خوبی نیز کسب نمودند. با تکیه بر مطالعات انجام یافته و نتایج کسب شده در این زمینه در سالهای اخیر نیز نرم افزارها و برنامه‌های کامپیوتری مختلفی برای شرایط مختلف و همچنین برای سازه‌های مختلف در اختیار مهندسين عمران قرار گرفته است. شناخت رفتار سنگ در مقابل عوامل طبیعی و اندرکنش آنها با یکدیگر همچون شناخت رفتارهای آب در سنگ و خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ در این حالت و یا شناخت رفتار سنگ در مواجهه با امواج لرزه‌ای از جمله زمینه‌های علم مکانیک سنگ می‌باشد. به منظور شناخت رفتارهای سنگ انجام آزمایش و نمونه برداری از سنگ در دستور کار می‌باشد روش‌های مختلفی جهت تعیین و تخمین پارامتر سنگ وجود دارد که عمدتاً در گروه‌های زیر دسته بندی می‌شوند که عبارتند از روش‌های مبتنی بر آزمون‌های آزمایشگاهی، روش‌های غیرمستقیم مبتنی بر تجربه و روش‌های مبتنی بر آزمون‌های برجا (محلی). یکی

مدول تغییر شکل پذیری ( $E_m$ ) برای کارهای مطالعاتی در اغلب پروژه‌های بزرگ مقیاس و دارای اهمیت بسیار استفاده می‌گردد. برای تعیین این مدول از آزمون‌های برجا، روش‌های ژئومکانیکی، آزمون‌های آزمایشگاهی، روابط تجربی و روش پیوسته هم ارزی استفاده می‌شود. کاربرد آزمون‌های برجا برای تعیین مدول تغییر شکل پذیری مستلزم صرف هزینه‌های زیاد و دقت زیاد می‌باشد. به همین دلیل روابط تجربی برای تخمین این متغیر ایجاد گردیده است. گرچه روابط برای تخمین غیرمستقیم مدول تغییر شکل پذیری روشی ساده و کم هزینه می‌باشد ولی اینگونه روابط از درجه اعتماد کمتری برخوردار می‌باشد. زیرا این روابط بصورت تئوری و بر مبنای شرایط ایده آل بدست می‌آیند و پارامترهای محیطی هیچ نوع تصرفی در آن ایجاد نمی‌کنند. به همین دلیل روابط تجربی موجود از سال 1978 تاکنون پیشرفت و گستردگی بسیار زیادی داشته است. بطوریکه در زمینه توده سنگ تقریباً 45 مورد رابطه تجربی برای بدست آوردن مدول تغییر شکل پذیری ارائه شده است. بنابراین ارائه یک مدل یا یک رابطه کارآمد جدید برای بدست آوردن سریع و دقیق مدول تغییر شکل پذیری برای پروژه‌های مهندسی از نقطه نظر علم مهندسی (دقت و سرعت در دست‌یابی به مدول تغییر شکل پذیری) و اقتصادی (صرفه جویی در هزینه‌های آزمایش) بسیار حائز اهمیت می‌باشد. روابط تجربی در گذشته با روش‌های مختلف مانند: برازش منحنی، معادلات رگرسیونی و غیره ارائه و معرفی می‌شدند. در تحقیقات مربوط به روابط مدول تغییر شکل پذیری، بررسی‌ها با روش‌های آماری بوده و بیشتر مربوط به رابطه رگرسیونی است ولی روشی نوین به نام شبکه عصبی برای مدل کردن این روابط وجود دارد. شبکه‌ی عصبی مصنوعی از الگوی شبکه عصبی انسان شبیه سازی شده است، به گونه‌ای که می‌تواند پس از آموزش، پارامترهای خروجی

این آزمایش در سد مسجد سلیمان و برای ارزیابی ویژگی‌های تکیه گاه‌های سنگی استفاده شد. با توجه به اینکه هر دو روش مبتنی بر تئوری الاستیسیته هستند که در آنها توده سنگ به عنوان محیطی الاستیک، ایزوتوپ و همگن در نظر گرفته می‌شود باید مدول تغییر شکل بدست آمده از هر دو روش یکسان باشند. اما معمولاً در شرایط واقعی چنین اتفاقی نمی‌افتد و مدول بدست آمده از آزمون بارگذاری صفحه‌ای بزرگتر از مقدارم نظیر در آزمایش دیلاتومتری خواهد بود. طاهریان و همکاران (2006) [4] استفاده از این آزمایش در سایت نیروگاه آبی لوارک که در پنجاه کیلومتری شمال شرقی تهران واقع شده است را گزارش نمودند. هاشمی (2008) [5] استفاده از این روش را به همراه بارگذاری صفحه‌ای در سد رودبار لرستان گزارش نموده است. فرامرزی (2008) [6] نیز در پژوهشی به تفسیر نتایج آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و دیلاتومتری پرداخته است. همچنین قارونی نیک (2008) [7] در مطالعه‌ای استفاده از دیلاتومتری و آزمایش بارگذاری صفحه‌ای را در خصوص سد چم شیر گزارش کرده است. با توجه به این موارد مشخص می‌گردد که آزمایش دیلاتومتری در ایران، تاکنون به صورت بسیار محدود و فقط در مورد سنگ‌ها استفاده شده است. با توجه به قابلیت‌های متعدد این آزمایش در تعیین ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها، لازم است تا این آزمایش در مورد سنگ‌ها نیز در ایران، مورد استفاده قرار بگیرد.

در زمینه ارائه روابط تجربی برای برآورد مدول شکل پذیری نیز مطالعات مختلف انجام گرفته است که می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط بنیواسکی در سال 1973 [8] با تحقیقاتی که بر روی پارامتر امتیاز توده سنگ (RMR) انجام داد، ارائه شد. سپس سرافیم و پیرا در سال 1983 [9] نیز بر روی امتیاز توده سنگ تحقیقاتی را انجام داد که رابطه‌ای دیگر ارائه نمود. گوکچه اوغلو و

از آزمون‌های مهم که در راستای تعیین میزان مدول شکل پذیری سنگ‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد آزمایش محلی دیلاتومتری می‌باشد. این آزمون طبق استاندارد ASTM D6635 [1] انجام می‌گیرد. یک آزمایش کامل دیلاتومتری، معمولاً شامل ثبت جابجایی و فشار اعمال شده، طی سه چرخه بارگذاری و باربرداری است که با توجه به رابطه بین فشار و اتساع، ویژگی‌های تغییر شکل پذیری توده سنگ در منطقه‌ای که دیلاتومتر کار گذاشته شده است، محاسبه می‌گردد. از مزایای عمده آزمایش دیلاتومتری می‌توان به دو مورد ذیل اشاره نمود:

الف- دیلاتومتری وسیله‌ای ساده و اقتصادی برای تعیین خصوصیات مکانیکی خاک و سنگ مانند: سختی، مقاومت و تاریخچه تنش با قابلیت تکرار بسیار بالا در اعماق متوالی در یک محل است.

ب- به دلیل هندسه و شکل دیلاتومتری، و شکل گمانه حفر شده از جمله کرنش‌های برشی و حجمی و غیر یکنواختی ناشی از قرار دادن این وسیله در هر عمق جهت تعیین خصوصیات سنگ، حداقل است که منجر به ارزیابی دقیق تری از شرایط و ویژگی‌های مکانیکی سنگ خواهد شد.

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد آزمایش دیلاتومتری در ایران تاکنون فقط برای تعیین مدول تغییر شکل سنگ‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین، تحقیقی که از این آزمایش برای ارزیابی خصوصیات سنگ‌ها استفاده شده باشد کمتر مشاهده شده است. سپس توسط هاشمی و همکاران (1387) [2] به منظور بررسی ویژگی‌های ساختگاهی برای احداث سد بر روی رودخانه جاوه که در نزدیکی شهر سنندج در استان کردستان واقع شده است از آزمایش‌های دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای که در روش مرسوم برای تعیین مدول تغییر شکل در سنگ‌ها هستند، در گالری‌های از پیش آماده شده استفاده گردید. توسط بشیری و همکاران (1388) [3] از

رگرسیون با روش شبکه عصبی می‌باشد. تحلیل رگرسیونی نیز با برنامه کامپیوتری SPSS انجام گرفته است که در ادامه به شرح آن پرداخته شده است.

### ۳- مواد و روش ها

#### 1-3- جمع آوری داده ها

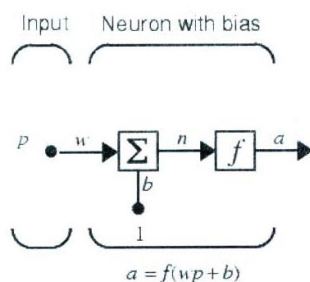
آزمون دیلاتومتری توسط شرکت آزمون فولاد که به عنوان یک شرکت فعال در زمینه ژئوتکنیک می‌باشد، در چندین سد و نیروگاه آبی کشور انجام داده است و داده‌های آن جمع آوری شده است. داده‌های مورد مطالعه مربوط به سدهای تالوار در شهرستان بیجار استان کردستان، سد بهشت آباد که در 1500 متری روستای شیخ محمود در فاصله 2700 متری از تلاقی دو رودخانه کوه‌رنگ و بهشت آباد واقع گردیده، سد خرسان 2 در بخش سفلی رودخانه خرسان در استان چهارمحال و بختیاری، سد داریان در استان کرمانشاه و 30 کیلومتری شهرستان پاره، سد و نیروگاه گتوند علیا واقع در 30 کیلومتری شمال غرب شهرستان شوشتر می‌باشد. در مجموع 127 مورد آزمایش دیلاتومتری در ساختگاههای سدهای ذکر شده انجام یافته و 721 مورد نیز آزمون‌های دیگر آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. داده‌ها جمع‌آوری گردید و با روش‌های متعدد حذف داده‌های غیر مربوط (روش میانگین، چارک، آزمون گراب) فیلتر شده و در نهایت به صورت خلاصه در جدول (1) ارائه شده است. لازم به ذکر است در این جدول تمامی پارامترها با ذکر نوع داده و واحد آورده شده است. داده‌های مورد استفاده در این مقاله شامل: امتیاز توده سنگ (RMR)، شاخص کیفی تونل‌زنی (Q)، شاخص مقاومتی سنگ (GSI)، مقاومت فشاری تک محوره (UCS)، مدول الاستیسته سنگ بکر (Ei) و مدول تغییر شکل پذیری (Em) می‌باشد.

همکاران (2003) [10] بر روی مقاومت فشاری تک محوره و مدول الاستیسته (Ei, UCS)، کایاباشی و گوکچه اوغلو (2006) [11] بر روی شاخص کیفیت توده سنگ و درجه هوازدگی سنگ (WD, RQD)، هوک و دیدریش (2006) [12] بر روی پارامتر امتیاز توده سنگ و شاخص مقاومتی سنگ (GSI, RMR)، سنایی و فرامرزی (2014) [13] و حسینی و دبیری (2015) [14] بر روی پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ حاصل از آزمایش دیلاتومتری به روش شبکه عصبی مصنوعی تحقیقی را انجام دادند. گرابار و همکاران (2024) [15] نتایج آزمون دیلاتومتری و مقاومت نفوذ مخروط لرزه ای رو بر روی خصوصیات زمین لغزش مورد مقایسه قرار دادند. نتیجه مطالعات ایشان نشان داد شبکه‌های عصبی مدول تغییر شکل پذیری را با ضرایب همبستگی و خطاهای مختلف ارائه داد است. همانطور که ذکر گردید هدف اصلی در تحقیق حاضر ارائه یک رابطه جدید به منظور پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری سنگ ها قبل از انجام آزمایش دیلاتومتری، با کمترین خطا می‌باشد. بدین منظور ابتدا همه داده‌های آزمایش دیلاتومتری و دیگر آزمایش‌های مرتبط را جمع آوری و دسته بندی شده و سپس یک مدل شبکه عصبی مصنوعی مناسب انتخاب شده تا ورودی شبکه را متغیر مورد نظر قرار داده و مد خروجی را نیز همان مدول تغییر شکل پذیری آزمایش دیلاتومتری در نظر گرفته شده است. در ادامه، مدل شبکه عصبی را در برنامه کامپیوتری متلب نوشته شده که خروجی مدل شبکه عصبی مصنوعی مدول تغییر شکل پذیری می‌باشد. معیار مناسب در این تحقیق میزان خطای شبکه و ضریب همبستگی خروجی با مدول تغییر شکل پذیری آزمون دیلاتومتری است. در ادامه بر روی داده‌ها تحلیل رگرسیون خطی و غیر خطی صورت گرفته است. هدف از این عمل ارائه یک معادله خاص برای پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری و مقایسه عملکرد تحلیل

جدول 1: مشخصات کلی پارامترهای آزمون‌ها.

Q	RMR	GSI	RQD	Em(Gpa)	Ei(Gpa)	Ucs(Mpa)	
38	43	56	116	116	116	116	True
48	28	32	0	0	0	0	out
0/981	45/23	40	22/12	1/93	6/98	10/56	min
23/91	81/19	75/05	100	25/21	83/14	146/23	max

صورت می‌گیرد. شبکه عصبی در کل به سه نوع تقسیم بندی می‌شود: پرسپترون، همینگ و هاپفیلد. کاربرد هر کدام از شبکه‌ها متفاوت می‌باشد. یکی از مهمترین شبکه‌های عصبی که در مهندسی جایگاه خاصی دارد و از زمره کاربردی ترین شبکه‌ها به شمار می‌رود، شبکه‌های پرسپترون هستند. این شبکه‌ها قادرند با انتخاب مناسب تعداد لایه‌ها و سلولهای عصبی، یک نگاشت غیر خطی را به دقت انجام دهند و این همان خواسته بسیاری از مسائل فنی مهندسی است که می‌تواند توسط این شبکه‌ها مطرح شود. در شبکه پرسپترون چون یادگیری با ناظر می‌باشد و مدول تغییر شکل پذیری حاصل از آزمایش دیلاتومتر نیز باید به عنوان ناظر شبکه مورد استفاده قرار گیرد پس با توجه به توضیحات بالا شبکه عصبی پرسپترون به عنوان شبکه مورد استفاده انتخاب گردید. شکل (1) رفتار یک شبکه پرسپترون را نشان می‌دهد.



شکل 1: عملکرد شبکه عصبی پرسپترون تک لایه.

### 2-3- معرفی شبکه عصبی مصنوعی

در شبکه‌های عصبی مصنوعی بلوکهای ساختاری و یا نرونها، دستگاههای محاسباتی خیلی ساده‌ای هستند و ارتباط بین نرونها عملکرد شبکه را تعیین می‌کند و هدف از آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی تعیین ارتباط مناسب، جهت حل مسائل مختلف است. در واقع شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز با ایده گرفتن از رفتار شبکه عصبی بیولوژیکی شکل یافته است. در این شبکه‌ها نیز عموماً لایه‌های موازی نرونها را می‌توان دید که هر لایه نقش خاصی را ایفا می‌کنند. معمولاً ورودیهایی که از خارج به شبکه عصبی داده می‌شوند، به دسته‌ای از نرونها که در یک لایه مرتب شده اند، اعمال می‌شود. این ورودی‌ها با وزنهای خاص جمع شده به تابع تحریک هر نرون فرستاده می‌شوند که این اقدام به پردازش جمع وزن دار ورودیهای اعمال شده به نرون می‌کند و خروجی نرون را به لایه‌های بعدی و نهایتاً به لایه خروجی می‌فرستد که جواب شبکه نسبت به ورودیهای اعمال شده به آن است. یک مدل ریاضی تعریف شده که مشابه دستگاه عصبی مغز کار می‌کند ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی را تشکیل می‌دهد. پس یک شبکه عصبی تشکیل شده از چندین نرون عصبی است که به هنگام نیاز فعال شده و محاسبات روی آن انجام می‌گیرد. به عبارت دیگر این نرونها تشکیل شده از گره‌ها و پاره خطهای جهت‌داری هستند که فرآیند حل مسئله در مسیر آنها

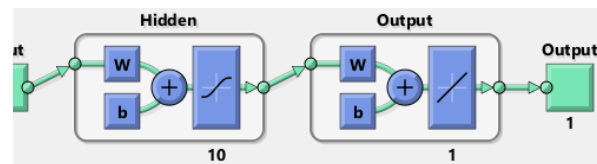
خطا در طبیعت بدرستی به فرم مربع باشد روش نیوتن تنها در یک تکرار راه حل، سیستم را پیدا می کند. بنابراین موفقیت این تکنیک بر روی چگونگی شباهت تابع خطا به تابع مربع بستگی دارد. اگر تقریب مربع صحیح نباشد الگوریتم ممکن است واگرا شود. بررسی های مختلف بر روی الگوریتم BP نشان می دهد که سرعت همگرایی آن پایین است. برای بهبود آن میتوان از روش لونیبرگ - مارکوارت یا همان LM استفاده کرد. در مدل شبکه عصبی مدول تغییر شکل پذیری به عنوان ناظر در نظر گرفته شد. الگوریتم آموزش داده ها الگوریتم لونیبرگ - مارکوارت انتخاب شد. شبکه شامل دو لایه که یکی به عنوان لایه مخفی و دیگری به عنوان لایه خروجی در نظر گرفته شد. تعداد نرون های لایه مخفی متغیر بوده و با روش سعی و خطا بدست آمد و تعداد نرون های لایه خروجی با توجه به تعداد خروجی عدد یک می باشد. توابع محرک لایه مخفی از نوع تانژانت هیپربولیک و خطی برای لایه خروجی در نظر گرفته شد. 60 درصد از کل داده ها به عنوان داده های آموزش، 20 درصد به عنوان داده های تست و 20 درصد با عنوان داده اعتبار سنجی و تعمیم در نظر گرفته شد. برای هر کدام از ورودی ها یک مدل شبکه عصبی طراحی گردید. کاتالوگ ورودی ها در جدول (2) قابل مشاهده است.

#### جدول 2: کاتالوگ بندی داده های ورودی برای تحلیل

شبکه عصبی.

داده های ورودی	کاتالوگ
GSI	1
RMR	2
Q	3
Ei و RQD	4
Ei و UCS و RQD	5
Ei و GSI	6

ساختار شبکه عصبی پرسپترون به وسیله روش سعی خطا انجام پذیرفت. در روش سعی و خطا ابتدا یک ورودی دلخواه انتخاب می گردد. بعد تعداد لایه ها را افزایش و کاهش داده می شود و با بررسی خروجی شبکه و ملاک قرار دادن ضریب همبستگی و خطا تعداد لایه های بهینه انتخاب می گردد. در مرحله بعدی تعداد نرون ها مورد بررسی قرار می گیرد. در نهایت با این روش به ساختار دلخواه بدست می آید. ساختار مورد استفاده در این پروژه به صورت شکل (2) می باشد که در آن دو لایه پنهان با توابع محرک تانژانت هیپربولیک در ابتدا و خطی در خروجی وجود دارد.



شکل 2: نمای از شبکه عصبی پرسپترون دو لایه ای.

افزایش تعداد نرون های مخفی در شبکه عصبی کاهش خطا را به دنبال خواهد داشت. این کاهش خطا به میزانی خواهد بود که یک تعداد نرون بیشتر تبدیل به افزایش خطا خواهد شد. تعداد بهینه نرون در لایه مخفی با روش سعی خطا مشخص می شود. این تعداد در بخش مدل سازی قابل مشاهده است. برای مثال در شکل (2) تعداد نرون لایه مخفی برابر با 10 عدد می باشد. در شبکه عصبی به منظور آموزش شبکه از یک نوع ساختار یادگیری یا همان الگوریتم یادگیری استفاده شده است. این الگوریتم ها متفاوت بوده میتوان به الگوریتم های BP, LM, LVQ, غیره اشاره نمود. الگوریتم لونیبرگ - مارکوارت برخلاف روش نیوتن به مشتق دوم نیاز ندارد. این روش بر اساس مفهوم تابع مربعات خطا در یک منطقه محلی می باشد. قابل توجه است اگر تابع

رگرسیون خطی طبق جدول (۴) می باشد. لازم بذکر است در تمامی تحلیل های رگرسیونی و غیر رگرسیونی از نرم افزار SPSS استفاده شده است.

**جدول 4: کاتالوگ بندی داده های ورودی برای تحلیل رگرسیون غیر خطی.**

کاتالوگ	داده های ورودی
1	Em و GSI
2	Em, RMR
3	Em و Q
4	Em و GSI
5	Em و Ei و Q
6	Em, RQD و UCS

#### ۴- نتایج حاصل از تحلیل داده ها

نتایج بدست آمده از تحلیل داده ها را می توان بصورت ذیل بیان نمود:

۱- نتایج بدست آمده از تحلیل داده ها توسط مدل شبکه عصبی بمنظور پیش بینی میزان مدول تغییر شکل (Em) با توجه به کاتالوگ داده ها که در جدول (۲) ارائه شده است طبق نمودارهای شکل (۳) قابل مشاهده می باشد. همچنین نتایج مربوط به ضریب همبستگی، متوسط خطاها و متوسط مربعات خطاها در جدول (۵) دیده می شود. از آنجایی که یکی از ملاک عمل برای این تحقیق کمترین خطا می باشد شبکه عصبی با ورودی RMR با مقدار  $MSE=3/89$  دارای کمترین متوسط مربعات خطا و بعد از آن شبکه عصبی با ورودی RMR, Ei با  $MSE=3/41$  در جایگاه دوم قرار دارد. بیشترین مقدار خطا نیز با  $MSE=14/15$  مربوط به شبکه عصبی با ورودی UCS, Ei, RQD می باشد. از دیگر ملاک های عمل، ضریب همبستگی است. با توجه به اینکه ضریب همبستگی در این نوع شبکه های عصبی بین خروجی و ناظر برنامه ریزی شده است اساس کار در تحقیق

Ei و RMR	7
----------	---

#### 3-3- رگرسیون خطی و غیر خطی

تحلیل رگرسیونی فن و تکنیکی آماری برای بررسی و مدل سازی ارتباط بین متغیر وابسته و متغیر مستقل بوده و هدف آن پیش بینی متغیر وابسته از روی متغیر و یا متغیرهای مستقل می باشد. مهم ترین تفاوت رگرسیون و همبستگی در این است که رگرسیون ماهیت پیش بینی میزان متغیر وابسته از روی مدلی که متغیر مستقل یکی از مولفه های آن است را دارد. در حالی که هم بستگی صرفاً نشان دهنده شدت رابطه متغیر (متغیرهای) مستقل و وابسته می باشد. کاتالوگهای ورودی در تحلیل رگرسیون خطی طبق جدول (۳) می باشد.

**جدول 3: کاتالوگ بندی داده های ورودی برای تحلیل رگرسیون خطی.**

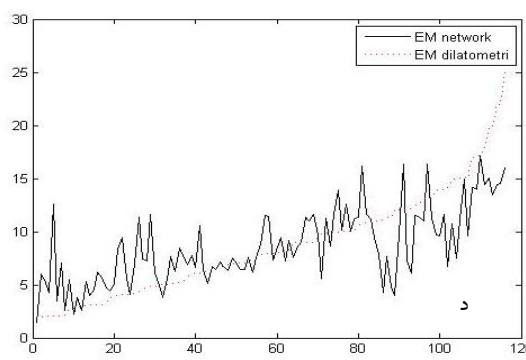
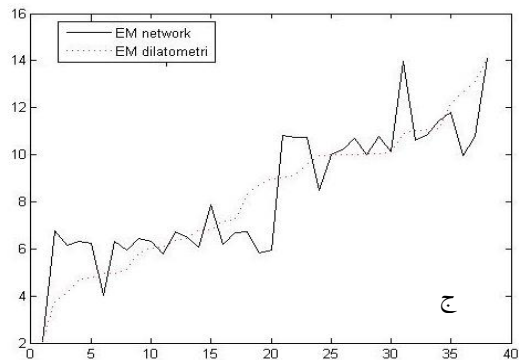
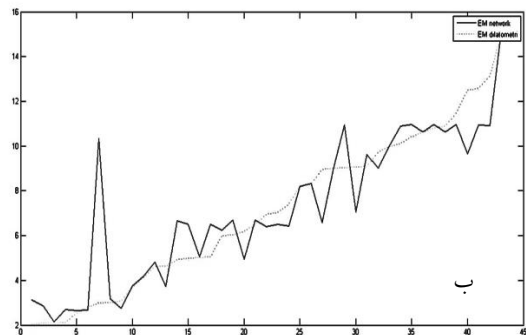
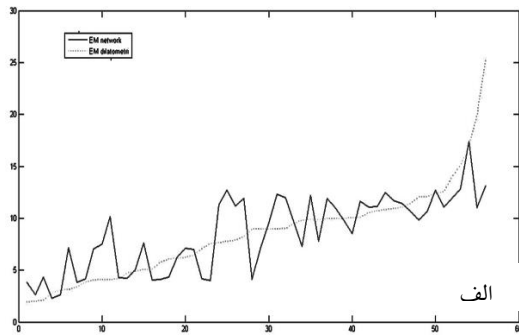
کاتالوگ	داده های ورودی
1	Em و GSI
2	RMR و Em
3	Em و Q
4	Em و Ei و RQD
5	Em و Ei و RMR
6	Em و UCS و RQD
7	Em و Ei و GSI

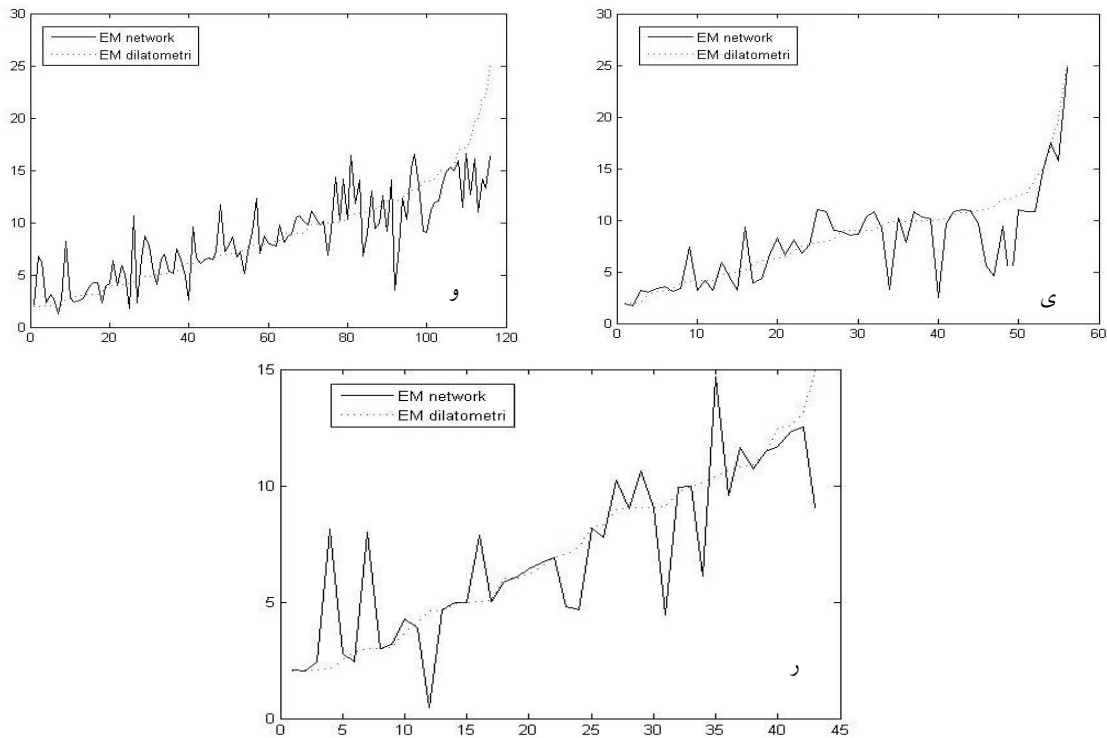
شرایط استفاده از رگرسیون غیر خطی بسیار متفاوت از رگرسیون خطی می باشد. در این روند ابتدا باید رابطه مورد نظر را وارد نرم افزار کرده و محدوده تغییرات متغیرهای مستقل نیز باید مشخص شود. سپس آنالیز رگرسیونی آغاز شده و میزان همبستگی و متوسط مربعات خطا اندازه گیری گردد. در انتها، معادله ای که بیشترین ضریب همبستگی و کمترین مربعات خطا را دارد به عنوان معادله پیشنهادی در تحقیق معرفی گردد. کاتالوگهای ورودی در تحلیل



می‌باشند. پس می‌توان نتیجه گرفت شبکه عصبی نمایان می‌سازد که مدول تغییر شکل پذیری حاصل از این دو گروه متغیر ورودی بسیار نزدیک به آنچه که توسط آزمون انجام گرفته، می‌باشد و این سه متغیر از جایگاه بسیار خوبی برای پیش‌بینی این مدول برخوردارند. از سوی دیگر گروه متغیرهای  $RQD$ ,  $E_i$  و  $RQD$ ,  $E_i$ ,  $UCS$  نیز در درجه‌ای قرار دارند که مدول تغییر شکل پذیری آنها با آزمون دیلاتومتری بسیار متفاوت می‌باشند و دارای درجه اعتبار کمتری بوده به صورتی که مدول تغییر شکل پذیری حاصل از این دو گروه متغیر از واقعیت بسیار فاصله گرفته است. دیگر متغیرها نیز دارای درجه اعتبار کمتری نسبت به گروه اول بوده و دارای ضریب اطمینان کمتری می‌باشند.

حاضر نیز ضریب همبستگی بین مدول تغییر شکل پذیری حاصل از شبکه و آزمایش می‌باشد. بنابراین بالاترین ضریب همبستگی توسط شبکه عصبی با ورودی  $RMR$  با مقدار  $89/97$  درصد در رتبه اول و شبکه  $RMR$ ,  $E_i$  با ضریب همبستگی  $89/27$  درصد در رتبه دوم قرار دارد. کمترین ضریب همبستگی نیز توسط شبکه عصبی با ورودی  $RQD$ ,  $E_i$  با مقدار  $74/66$  ارائه شده است. با توجه به شکل‌های ارائه شده می‌توان نتیجه گرفت که برای پیش‌بینی مدول تغییر شکل پذیری توسط شبکه عصبی بهترین ورودی برای انتخاب متغیرهای  $RMR$ ,  $E_i$  به طور زوج ورودی و متغیر  $RMR$  به عنوان تک ورودی بهترین گزینه می‌باشند. زیرا این دو گروه هم از نظر ضریب همبستگی دارای بالاترین مقدار و هم از نظر خطا دارای کمترین متوسط مربعات خطا





شکل 3: نمودارهای مقایسه ای بین مقادیر موجود و پیش بینی شده مدول تغییر شکل (Em) براساس آزمون نتایج دیلاتومتري و تحليل شبکه عصبی با توجه به کاتالوگ های مختلف، الف- ردیف 1، ب- ردیف 2، ج- ردیف 3، د- ردیف 4، و- ردیف 5، ی- ردیف 6، ر- ردیف 7.

جدول 5: جمع بندی کلی نتایج مدل شبکه عصبی.

مشخصات خروجی			تعداد ورودی	متغیر ورودی	ردیف
RMSE	MSE	R	43	RMR	1
1/97	3/89	89/97	38	Q	2
2/26	5/11	86/91	56	GSI	3
2/51	6/31	84/1	43*2	RMR,Ei	4
1/85	3/41	89/27	56*2	GSI,Ei	5
3/05	9/33	83/33	۱۱۶*۳	RQD,UCS,Ei	6
3/76	14/15	81/1	۱۱۶*۲	RQD,Ei	7

(Em) مربوط به داده های مربوط به کاتالوگ شماره ۲ است. زیرا در این رابطه میزان ضریب همبستگی برابر ۷۴/۴۰ و  $MSE = 2/52$  برآورد شده است.

۲- نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها بصورت رگرسیون خطی برای پیش بینی مدول تغییر شکل (Em) با توجه به کاتالوگ‌های ارائه شده در جدول (۳) بصورت روابطی می- باشد که در جدول (۶) قابل مشاهده است. با توجه به جدول (۶) می‌توان دریافت بهترین رابطه برای پیش بینی

جدول 6: روابط ارائه شده برای پیش بینی مدول تغییر شکل (Em) با توجه به تحلیل رگرسیون خطی.

MSE	ضریب همبستگی (R)	روابط	کاتالوگ
۳/۱۹	۷۰/۴۰	$E_m(GPa) = 0.353 Gsi - 13.351$	1
2/52	74/40	$E_m(GPa) = 0.264 RMR - 10.16$	2
4/97	20/81	$E_m(GPa) = 0.368 Q + 4.27$	3
4/38	0/468	$E_m(GPa) = 0.086 E_i + 0.017RQD + 3.138$	4
2/49	0/72	$E_m(GPa) = 0.024 E_i + 0.238RMR - 9.668 (GPa)$	5
4/33	0/485	$E_m(GPa) = 0.053RQD + 0.017UCS + 3.182$	6
3/133	0/723	$E_m(GPa) = 0.037 E_i + 0.309GSI - 12.54$	7

جدول (۶) می‌توان دریافت بهترین رابطه برای پیش بینی (Em) مربوط به داده‌های مربوط به کاتالوگ شماره ۵ است. زیرا در این رابطه میزان ضریب همبستگی برابر ۸۰/۹۳ و  $MSE = 1/63$  برآورد شده است.

۳- نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها بصورت رگرسیون غیرخطی برای پیش بینی مدول تغییر شکل (Em) با توجه به کاتالوگ‌های ارائه شده در جدول (۴) بصورت روابطی می‌باشد که در جدول (۷) قابل مشاهده است. با توجه به

جدول 7: روابط ارائه شده برای پیش بینی مدول تغییر شکل (Em) با توجه به تحلیل رگرسیون غیرخطی.

MSE	ضریب همبستگی (R)	روابط	کاتالوگ
۲/۷۸	۸۱/۶۱	$Em = 18.889e^{-(\frac{GSI-78.55}{3.29})^2} + 11.04e^{-(\frac{GSI-68.62}{7.775})^2} + 6.995e^{-(\frac{GSI-53.33}{7.014})^2} (GPa)$	1
1/63	73/87	$Em = (10.11).e^{-(\frac{Q-23.52}{4.352})^2} + 5.284e^{-(\frac{Q-3.469}{3.266})^2} + 10.87e^{-(\frac{Q-14.17}{7.265})^2} (GPa)$	2
2/87	80/69	$Em = 5.005 + 2.78RMR + 1.117 E_i + 0.02956RMR^2 + 0.5927 RMR E + 2.013 E_i^2 + 0.1207 E_i RMR^2 - 0.5374 RMR E_i^2 (GPa)$	3
3/78	80/93	$Em = -286.3 + 19.29 RMR - 5.51 E_i - 0.3899RMR^2 + 0.1475 RMR E_i + 0.02302 E_i^2 + 0.002515 RMR^3 - 0.001 E_i RMR^2 + 0.0003275 RMR E_i^2 (GPa)$	4
1/63	80/93	$Em = 7.107 - 0.06253 RMR - 0.1571 E_i + 0.005697RMR^2 + 0.02512 RMR E_i + 0.0005767 E_i^2 + 4.723e - 05 RMR^3 - 0.0005583 E_i RMR^2 - 8.137e - 05 RMR E_i^2 (GPa)$	5

1/53	72/63	$Em = 17.14 - 1.325 RQD + 0.9731 ucs + 0.01771 RQD^2$ $+ 0.002114 RQD \cdot UCS - 0.0144 UCS^2$ $- (9.563e - 05) RQD^3$ $- 0.0003472 UCS RQD^2$ $+ 0.0004184 RQD UCS^2 (GPa)$	6
------	-------	---	---

### ۵- جمع بندی و نتیجه گیری

آمده می توان میزان کارآمدی مدل های پیشنهادی را طبق جدول (8) با یکدیگر مقایسه نمود. با توجه به جدول ارائه شده می توان کارآمدی شبکه عصبی مصنوعی را در پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری به وضوح دید. تنها متغیر Q می باشد که تحلیل رگرسیونی از مدل شبکه عصبی سر آمد است. دلیل این امر را می توان در کم بودن تعداد متغیر مستقل جستجو نمود. بنابراین می توان بیان نمود در صورت بالا بودن تعداد متغیر مستقل استفاده از شبکه عصبی مصنوعی دقیقتر می باشد و در صورت کم بودن تعداد متغیر مستقل از تحلیل رگرسیونی باید استفاده نمود.

امروزه روش های مختلفی برای بدست آوردن مدول شکل پذیری وجود دارد که از جمله آن ها می توان به آزمایش های برجا (صفحه بارگذاری-دیلاتومتری)، آزمون های آزمایشگاهی و روابط تجربی اشاره نمود. همچنین روش های مختلفی به منظور پیش بینی و تعیین روابط بین چندین پارامتر مختلف وجود دارد که می توان به تحلیل رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی اشاره نمود. هدف اصلی در تحقیق حاضر، ارائه یک رابطه جدید به منظور پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری سنگ ها قبل از انجام آزمایش دیلاتومتری، با کمترین خطا است. با توجه به نتایج بدست

جدول 8: جمع بندی کلی خروجی های شبکه عصبی و تحلیل رگرسیونی.

کارآمدی	مدل رگرسیونی		مدل شبکه عصبی		تعداد ورودی	متغیر ورودی	رتبه	
	NN	REG	RMSE	R				RMSE
*		2/95	86/96	1/97	89/97	43	RMR	1
	*	1/86	87/73	2/26	86/91	38	Q	2
*		2/78	81/61	2/51	84/1	56	GSI	3
*		3/01	80/69	1/85	89/27	43*2	RMR,Ei	4
*		2/98	80/93	3/05	83/33	56*2	GSI,Ei	5
*		5/49	72/63	3/76	81/1	116*2	RQD,UCS	6

### ۶- مراجع

1- ASTM D6635, (2001), Standard Test Method for Performing the Flat Plate Dilatometer, Annual book of ASTM standards.

2- هاشمی، س، اصغری، ح، (1387)، بررسی رفتار توده‌های سنگ در آزمایش دیلاتومتری، دومین کنفرانس ملی نیروگاه‌های آبی کشور، 146 - 131.

3- بشری، ع، مجدی، ع، و غلامی، غ، (1388)، تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ مهمترین فاکتور طراحی سد، مجموعه مقالات دومین همایش ملی سد سازی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.

4- Taherian, A., Asari, M., and Falahat Pische, A., (2006), "Geoengineering aspects of the Lavarak hydro-power cavern in very soft rock, Iran", International Association for Engineering Geology Conference (IAEG), Nottingham, UK.

5-Hashemi, S., (2008), "A comparison of different in situ testing methods for measuring deformability characteristics of rock masses in Roudbar Lorestan, Iran" The 3rd International Conference on Site Characterization, Taipei, Taiwan.

6- Faramarzi, L., (2008), "Interpretation of plate loading test and dilatometer borehole loading test results", 3rd International Conference on Site Characterization, Taipei, Taiwan.

7- Gharouni-Nik M., (2008), "Comparison of the results of FDT and PLT in determining deformability modulus of the rock mass in Chamshir dam site in Iran", The 3rd International Conference on Site Characterization, Taipei, Taiwan.

8-8- Bieniawski, Z. T., (1973), Engineering classification of rock masses, Transactions of the South African Institution of Civil Engineers.

9-Serafim, J. L., and Pereira, J. P., (1983), "considerations on geomechanical classification of Bieniawski", in proceedings of the symposium on engineering geology and underground openings. Portugal: Lisboa, pp 1133-1144.

10-Gokceoglu, C., Sonmez, H. and Kayabasi, A., (2003), "Predicting The Deformation Moduli of Rock Masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 701-710.

11-Kayabasi, A., and Gokceoglu, C., (2006), "Estimating the deformation modulus of rock masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences , 40, 55-63.

12-Hoek, E., and Diderichs, M. S., (2006), "Empirical Estimation of Rock Mass Modulus", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 203-215.

13-Sanei, M., and Faramarzi, L., (2014), "Empirical Development of the Rock Mass Deformation Modulus", Journal of Geological Resource and Engineering, 2, 55-67.

14-Hoseini, M., and Dabiri, R., 2015, "prediction of modulus of deformation based on dilatometry test with using neural network analysis", International Conference on Architecture, Urbanism, Civil Engineering, Art, Environment, Future Horizons & Retrospect, ICAUCAE 2015, 16 Novamber 2015, Tehran, Iran, Institute of Art and Architecture (SID).

15- Grabar, K., Jug, J., Bek, A., and Strelec, S., (2024), "Comparison of the Piezocone Penetrometer (CPTU) and Flat Dilatometer (DMT) Methods for Landslide Characterisation", Geoscience, 14(3), <https://doi.org/10.3390/geosciences14030064>.