

## ارزیابی کارایی مدل‌های تجربی بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR) در پیش‌بینی مدول دگرشکلی توده‌سنگ و توسعه مدلی بر اساس سیستم فازی

مه‌دی محمدی\*

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

(دریافت: مرداد ۱۳۹۵، پذیرش: تیر ۱۳۹۷)

### چکیده

پیش‌بینی مدول دگرشکلی توده‌سنگ برای تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی از اهمیت خاصی برخوردار است. زیرا مدول دگرشکلی بیانگر رفتار توده‌سنگ تحت تاثیر تنش‌ها است. تاکنون مدل‌های تجربی و هوش مصنوعی مختلفی برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی توسعه داده شده است. از میان این مدل‌ها مدلی بهینه است که کم‌ترین پارامتر ورودی (زیرا هزینه‌ها و زمان برای تعیین پارامترهای ورودی کاهش پیدا می‌کند) و قابلیت پیش‌بینی مدول دگرشکلی در بهترین حالت را داشته باشد. در این مقاله ابتدا کارایی ۱۹ مدل مختلف، که پارامتر ورودی آنها تنها طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (RMR) است؛ ارزیابی و دو مدل که بهترین تقریب را دارند، تعیین می‌شود. سپس به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر مدول دگرشکلی، یک مدل بر اساس سیستم فازی توسعه داده شده (پارامتر ورودی آن RMR است) و نتایج با دو مدل انتخاب شده مقایسه گردید. برای این منظور ۳۳ مجموعه داده از ساختگاه سدهای مختلف در کشور ایران جمع‌آوری شده است. برای ارزیابی مدل‌ها و همچنین اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده، از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ ) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد، پیش‌بینی مدول دگرشکلی با استفاده از مدل فازی توسعه داده شده نسبت به مدل‌های تجربی دقیق‌تر است.

### کلمات کلیدی

مدول دگرشکلی توده‌سنگ، مدل تجربی، مدل فازی، طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ

\* عهده دار مکاتبات: mehdi.mohammdi@vru.ac.ir

## ۱- مقدمه

توده‌سنگ فقط بر اساس پارامتر RMR توسعه داده شده است [۱۹-۱۱]. اما در عمل پیش‌بینی مدول دگرشکلی با استفاده از مدل‌ها، با مدول دگرشکلی واقعی متفاوت است و این موضوع، مهندسان را در تصمیم‌گیری و انتخاب مدل بهینه دچار تردید می‌کند [۱۱].

با گسترش روش‌های هوش مصنوعی در علم ژئوتکنیک، تحقیقات فراوانی برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی توده‌سنگ انجام شده است. کایاباسی و همکاران [۱]، رضایی و همکاران [۲۰] با استفاده از روش منطق فازی، بشری و همکاران [۲۱]، اسراری و همکاران [۸]، آلمداگ و همکاران [۵] با استفاده از روش سیستم استنتاج فازی عصبی (انفیس) مدول دگرشکلی را پیش‌بینی کردند. محمدی و رحمان نژاد [۲۲]، اسدی زاده و حسینی [۲۳]، نجاتی و همکاران [۱۶]، غلام نژاد و همکاران [۲۴] با استفاده از روش شبکه عصبی و فزاحی [۲] با استفاده از سیستم بردار پشتیبان، مدل‌هایی برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی توسعه دادند. در مطالعه‌های اخیر علاوه بر روش مختلف هوش مصنوعی که برای توسعه مدل استفاده شده است، تعداد پارامترهای ورودی مدل‌ها نیز متفاوت است. منطقی است که تعیین پارامترهای ورودی در مدل‌ها مستلزم هزینه و افزایش زمان است. از میان روش‌های مختلف هوش مصنوعی، سیستم فازی قادر به استفاده از قواعد زبانی است و می‌تواند از تجربیات بشری و افراد متخصص برای تولید مدل استفاده نماید [۲۰]. در حالی که سایر روش‌ها با استفاده از مجموعه داده‌ها، قابلیت خودآموزی دارند. در این مقاله با استفاده از سیستم فازی مدلی توسعه داده شده است که، RMR تنها پارامتر ورودی آن است. برتری مدل ارائه شده، کاهش تعداد پارامترهای ورودی و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و زمان تعیین پارامترهای ورودی است. همچنین در این مقاله علاوه بر توسعه مدل فازی، کارایی ۱۹ مدل تجربی نیز که پارامتر ورودی آنها RMR است، بررسی شده (جدول ۱) و در نهایت مقایسه‌ای بین مدل‌های تجربی انتخاب شده با نتایج مدل فازی انجام شده است.

## ۲- داده‌های استفاده شده در پژوهش

در این پژوهش تمرکز بر ارزیابی مدل‌هایی است که بهترین تقریب را در تعیین مدول دگرشکلی دارند. بنابراین نیاز به مجموعه داده‌هایی استاندارد است که قابلیت ارزیابی

تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، برای تحلیل و طراحی سازه‌های سطحی و زیر سطحی امری اجتناب‌ناپذیر است. یکی از مهمترین پارامترهای ژئومکانیکی، مدول دگرشکلی توده‌سنگ است. مدول دگرشکلی بیانگر رفتار توده‌سنگ تحت تاثیر تنش‌های القایی است [۱، ۲].

برای تعیین مدول دگرشکلی روش‌های متعددی توسعه داده شده است. این روش‌ها به دو گروه مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. در روش مستقیم، آزمایش‌های برجا مانند جک تخت و بارگذاری صفحه‌ای بر روی توده‌سنگ و در ساختگاه پروژه انجام می‌شوند. اما برآورد مدول دگرشکلی به وسیله آزمایش‌های برجا وقت‌گیر و پرهزینه بوده و مشکلات عملیاتی پیرامون آن زیاد است [۵-۳]. بنابراین امروزه تخمین مدول دگرشکلی به صورت غیرمستقیم، با استفاده از مدل‌های تجربی و هوش مصنوعی انجام می‌شود. زیرا این مدل‌ها به آسانی و با صرف کمترین هزینه و زمان، مدول دگرشکلی توده‌سنگ را پیش‌بینی می‌کنند [۱]. بنابراین مدلی بهینه است که کمترین پارامتر ورودی (زیرا هزینه‌ها و زمان برای تعیین پارامترهای ورودی کاهش پیدا می‌کند) و قابلیت پیش‌بینی مدول دگرشکلی در بهترین حالت را داشته باشد. مدل‌های تجربی بر اساس روش‌های آماری نظیر رگرسیون توسعه داده شده است [۶]. پارامترهای ورودی در مدل‌های تجربی عمدتاً، پارامترهای مختلف سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ مانند طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، سیستم طبقه‌بندی بارتن (Q) و شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD) است [۷، ۸]. مدل‌های تجربی تابعی از یک تا چندین پارامتر ذکر شده هستند [۹]. در فاز اولیه پروژه‌های عمرانی و معدنی برای بررسی ساختگاه پروژه، توده‌سنگ بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR)، امتیازدهی می‌شود [۱۰]. روش RMR یک طبقه‌بندی جامع است و تقریباً همه ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها که بر روی مدول دگرشکلی توده‌سنگ تاثیرگذار است در تعیین طبقه‌بندی ژئومکانیکی دخالت دارند [۸]. به همین دلیل تاکنون حدود نوزده مدل تجربی (در میان مدل‌هایی که تاکنون توسعه داده شده است، مدل‌هایی که پارامتر ورودی آنها RMR است، بیشترین تعداد هستند) برای تعیین مدول دگرشکلی

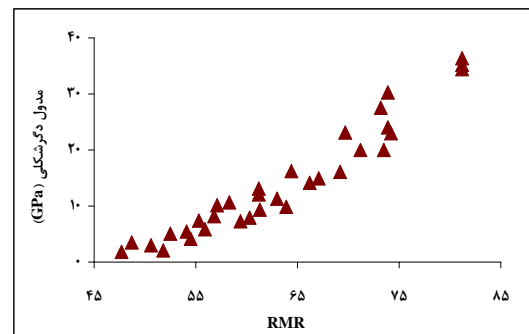
مدل‌ها را داشته باشند. برای این منظور مجموعه داده‌هایی از ساختگاه چندین سد شامل بختیاری [۲۵]، گتوند [۲۶]، سیاه‌بیشه [۲۷] و خرسان II [۲۸] جمع‌آوری شد [۲۹].

جدول ۱: مدل‌های توسعه داده شده جهت تعیین مدول دگرشکلی توده‌سنگ بر اساس RMR

نام محقق (سال)	شماره مدل	مدل
بینیاوسکی [۱۱]	(۱)	$E_{rm} = 2RMR - 100, (GPa) RMR \geq 50$
سرافیم و پیرا [۱۱]	(۲)	$E_{rm} = 10^{(RMR-10)/40} (GPa)$
مهروترا [۱۱]	(۳)	$E_{rm} = 10^{(RMR-20)/38} (GPa)$
کیم [۱۱]	(۴)	$E_{rm} = 300 \exp(0.07RMR) \times 10^{-3} (GPa)$
رد و همکاران [۱۱]	(۵)	$E_{rm} = 0.1(RMR/10)^3 (GPa)$
شن و همکاران [۶، ۱۱]	(۶)	$E_{rm} = 110 \exp[-(RMR-100)/37]^2 (GPa)$
خبازی و همکاران [۱۱]	(۷)	$E_{rm} = 9 \times 10^{-7} RMR^{3.868} (GPa)$
دیدریچ و کایسر (۱) [۱۲]	(۸)	$E_{rm} = 7 + 3\sqrt{10^{(RMR-44)/21}} (GPa)$
دیدریچ و کایسر (۲) [۱۲]	(۹)	$E_{rm} = 7 - 3\sqrt{10^{(RMR-44)/21}} (GPa)$
گکگللو و همکاران [۱۳]	(۱۰)	$E_{rm} = 0.0736 \exp(0.0755RMR) (GPa)$
گالرا و همکاران (۱) [۱۴]	(۱۱)	$E_{rm} = 147.28e^{(RMR-100)/24} - 0.202RMR (GPa)$
گالرا و همکاران (۲) [۱۴]	(۱۲)	$E_{rm} = \exp(RMR-10)/18 (GPa)$
گالرا و همکاران (۳) [۱۴]	(۱۳)	$E_{rm} = 0.0876RMR + 1.056(RMR-50) + 0.015(RMR-50)^2 (GPa) RMR \geq 50$
اجل لوییان و محمدی [۱۵]	(۱۴)	$E_{rm} = 0.043RMR^2 - 3.662RMR + 83.37 (GPa) RMR \geq 70$
نجاتی و همکاران [۱۶]	(۱۵)	$E_{rm} = 0.1627RMR - 5.17 (GPa) RMR \geq 30$
کاوور و همکاران [۱۷]	(۱۶)	$E_{rm} = 4^{(RMR-20)/20} (GPa)$
المداد و همکاران [۱۸]	(۱۷)	$E_{rm} = 0.058e^{0.0785RMR} (GPa)$
چان و همکاران [۱۹]	(۱۸)	$E_{rm} = 1.3326 \exp(0.0364RMR) (GPa)$
محمدی و رحمان نژاد [۱۹، ۲۲]	(۱۹)	$E_{rm} = 0.0003RMR^3 - 0.0193RMR^2 + 0.3157RMR + 3.4064 (GPa)$

$GPa =$  گیگاپاسکال،  $E_{rm} =$  مدول دگرشکلی توده‌سنگ،

داده‌های مورد نظر با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحه‌ای به دست آمده است [۲۹]. این آزمایش، درون گالری‌های اکتشافی در جناح چپ و راست سدها انجام می‌شود. در این روش، بار به صورت چرخه‌های بارگذاری-باربرداری، به طور مستقیم بر روی سنگ موجود در دیواره‌ها و یا سقف و کف گالری اعمال می‌شود و مقدار جابجایی در سطح و درون توده‌سنگ در پشت محدوده بارگذاری توسط کشیدگی سنج‌های مکانیکی و یا دیجیتالی اندازه‌گیری می‌شود و نهایتاً با رسم منحنی‌های تنش-تغییر شکل، مدول



شکل ۱: مجموعه داده‌های استفاده شده جهت پیش‌بینی مدول دگرشکلی توده‌سنگ [۲۹]

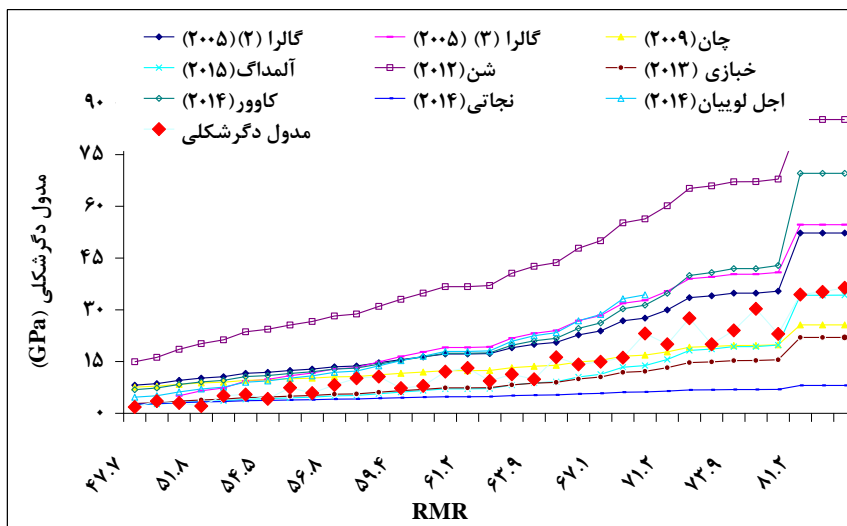
### ۳- پیش‌بینی مدول دگرشکلی توده‌سنگ با روش‌های تجربی

مدول دگرشکلی برای هر داده توسط ۱۹ مدل پیش‌بینی شده است. نتایج در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به تعداد متعدد مدل‌ها، نتایج پیش‌بینی شده در شکل الف و ب به صورت جداگانه نمایش داده شده است.

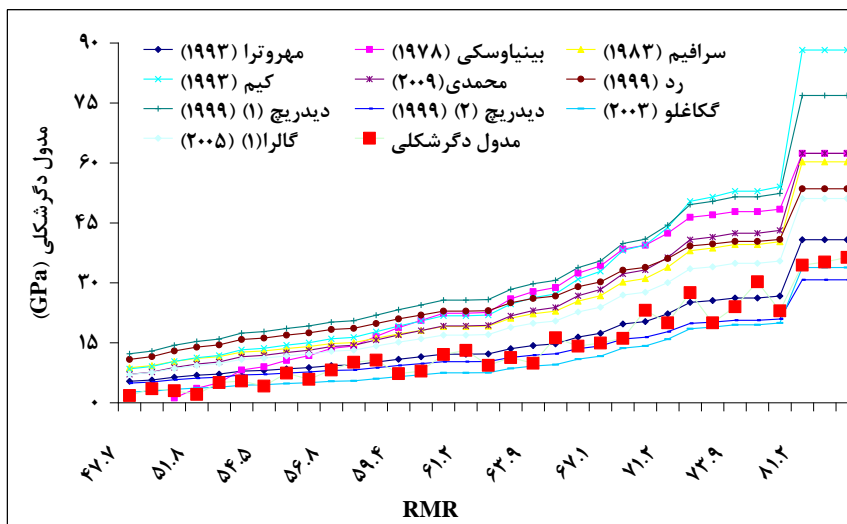
دگرشکلی توده‌سنگ تعیین می‌شود [۲۵]. جدول ۲ توصیف آماری مجموعه داده‌ها را نمایش می‌دهد.

جدول ۲: توصیف آماری مجموعه داده‌ها

پارامتر	کمینه	بیشینه	دامنه
$E_{rm} (GPa)$	۱/۸۲	۳۶/۳۶	۳۴/۵۵
$RMR$	۴۳/۷۳	۸۱/۲۸	۳۳/۵۵



الف



ب

شکل ۲: تخمین مدول دگرشکلی طبق مدل ارائه شده در جدول ۱

مورد نظر با ساختگاه مورد بررسی است. در بین مدل‌ها، بیشترین مقدار پیش‌بینی مربوط به مدل شن و همکاران [۶] است و کمترین مقدار پیش‌بینی شده مربوط به مدل نجاتی و همکاران [۱۶] است.

از طرفی شکل ۲ الف و ب نشان می‌دهد، نتایج حاصل از تعدادی مدل‌ها با داده‌های اندازه‌گیری شده برازش بهتری

شکل ۲ نشان می‌دهد، در بعضی از مدل‌ها مانند مدل گالرا (۳) [۱۴]، بین نتایج پیش‌بینی شده با نتایج اندازه‌گیری شده اختلاف قابل توجهی وجود دارد و با افزایش مقدار RMR دامنه تغییرات افزایش می‌یابد. این موضوع به علت شرایط تکتونیکی متفاوت و همچنین متغیر بودن شرایط سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی و در نتیجه عدم سازگاری مدل

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (22)$$

$y_i$  مدول دگرشکلی اندازه گیری شده و  $y'_i$  مدول پیش بینی شده از مدل ها و  $n$  تعداد مدول مورد مطالعه که در این مطالعه ۳۳ است. هر چه مقدار  $RMSE, MAPE$  به صفر نزدیک تر باشد و هر چه مقدار  $R^2$  به صد نزدیک تر باشد نتیجه حاصل از مدل به واقعیت نزدیک تر است و برعکس.

شکل ۳ ضریب تعیین ( $R^2$ ) (ضریب قطعیت) بین نتایج حاصل از مدل ها و مدول دگرشکلی اندازه گیری شده را نمایش می دهد. بر اساس نتایج نشان داده شده کمینه و بیشینه مقدار ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۱ و ۰/۹۵ است. با در نظر گرفتن نتیجه حاصل شده نمی توان قضاوت دقیقی بر عملکرد مدل ها داشت. زیرا اختلاف بین بهترین تقریب و بدترین تقریب ۰/۰۵ است. از طرفی با در نظر گرفتن شکل ۲ بعضی از نتایج مدل ها با مدول دگرشکلی اندازه گیری شده همبستگی نشان نمی دهند. اما ضریب تعیین بالایی دارند. بنابراین برای ارزیابی بایستی از شاخص های دیگر نیز استفاده کرد.

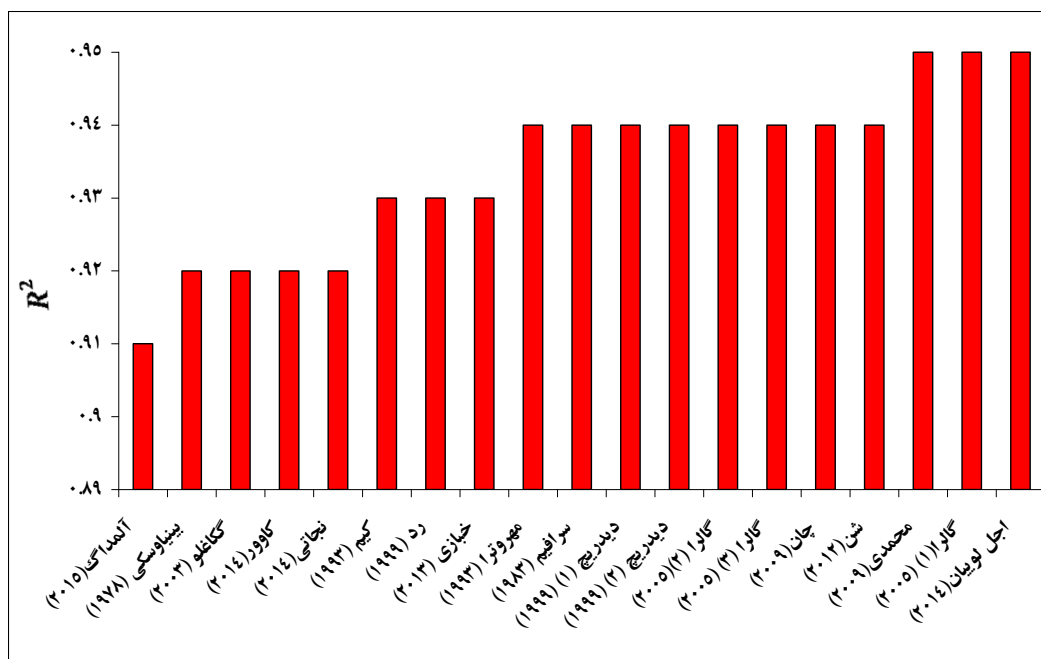
دارند. بنابراین برای انتخاب مدلی که بهینه ترین مقدار را پیش بینی می کند باید آنها را مورد ارزیابی قرار داد و بهترین مدل ها را انتخاب کرد.

#### ۴- ارزیابی کارایی مدل های تجربی در پیش بینی مدول دگرشکلی توده سنگ

برای ارزیابی کارایی مدل ها و انتخاب مدلهایی که بهترین تقریب را در تخمین مدول دگرشکلی را دارند؛ از شاخص های ضریب تعیین ( $R^2$ ) (رابطه ۲۰)، جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) (رابطه ۲۱) و میانگین درصد خطای مطلق ( $MAPE$ ) (رابطه ۲۲) استفاده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{k=1}^n y^2 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i'^2}{n}} \quad (20)$$

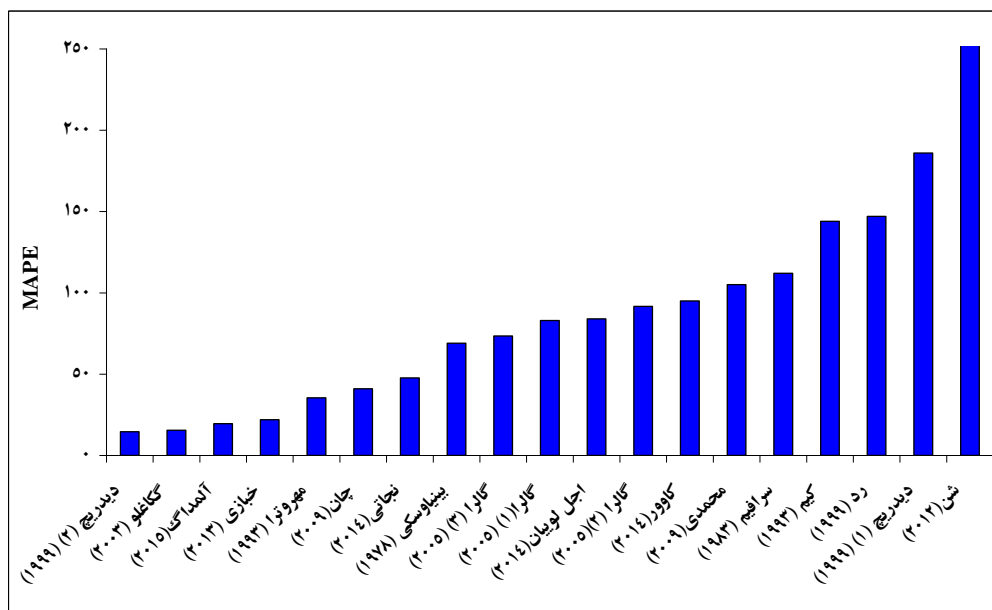
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y'_i)^2}{n}} \quad (21)$$



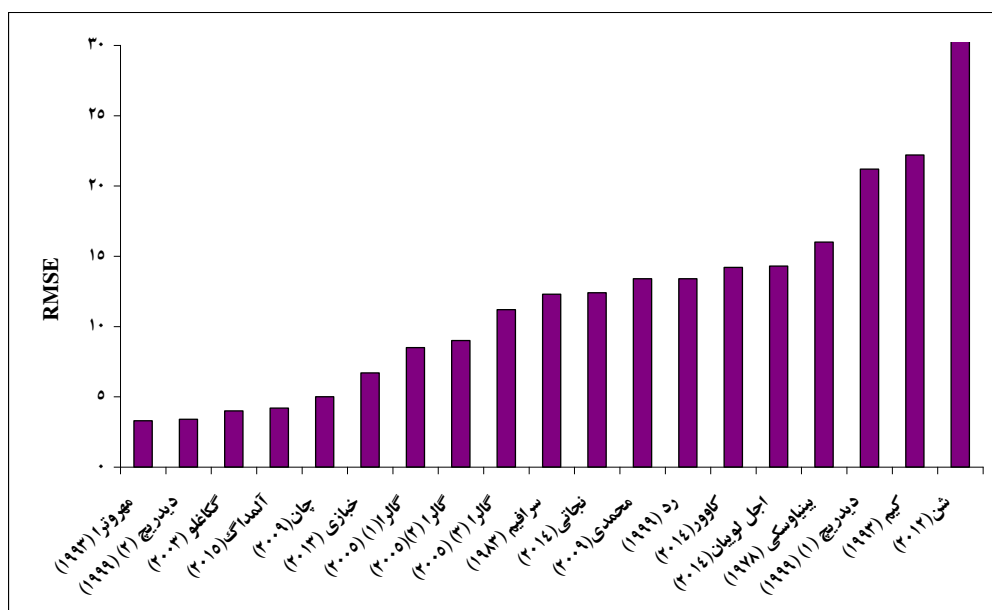
شکل ۳: ضریب تعیین، مدل پیش بینی شده و مدول دگرشکلی

این معنی است که اختلاف بین دو حالت قابل توجه است. به ترتیب مدل های دیدریچ و کایسر [۲]، گکاخلو و همکاران [۱۳]، آلمداگ و همکاران [۱۸] بهترین عملکرد را بر اساس شاخص  $MAPE$  نمایش می دهند.

شکل های ۴ و ۵ به ترتیب عملکرد مدل ها را بر اساس شاخص های  $RMSE, MAPE$  را نشان می دهد. در شکل ۴ مدل ها بر اساس، بهترین تا ضعیف ترین عملکرد مرتب و نمایش داده شده است. مقدار شاخص  $MAPE$  در بهترین و ضعیف ترین حالت به ترتیب برابر با ۱۴/۶ و ۲۸۲ است و به



شکل ۴: عملکرد مدل‌ها بر اساس شاخص MAPE



شکل ۵: ارزیابی مدل‌ها بر اساس شاخص RMSE

شکل ۶ موقعیت دو مدل انتخاب شده را نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده نمایش می‌دهد. نتایج حاصل از شاخص بیانگر این است که مدل‌های انتخاب شده مطابقت قابل قبولی با داده‌های واقعی دارند.

#### ۵- توسعه مدل فازی برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی توده‌سنگ

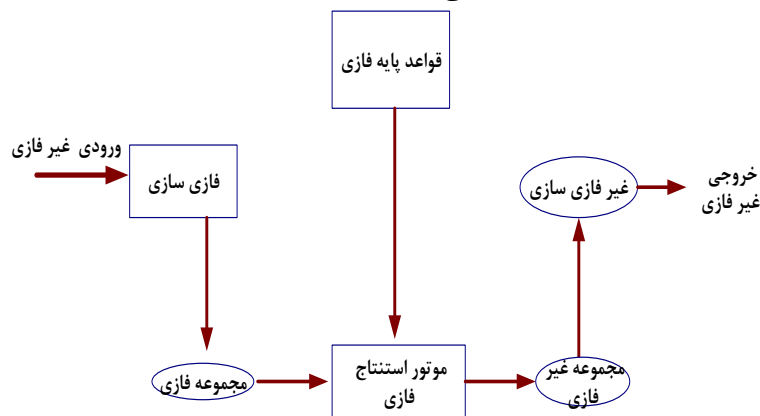
##### ۵-۱- منطق فازی

تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی اولین بار توسط لطفی‌زاده در مقاله‌ای با عنوان "مجموعه‌های فازی" معرفی

همچنین در شکل ۵ مقدار  $RMSE$  در بهترین و ضعیف‌ترین حالت به ترتیب برابر است با  $3/3$  و  $31/4$  است. به ترتیب مدل‌های مهروتزا [۱۱]، دیدریج و کایسر [۱۲]، گکگللو و همکاران [۱۳]، بهترین عملکرد را بر اساس شاخص  $RMSE$  نمایش می‌دهند. مقایسه سه شاخص ارزیابی نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از دو شاخص  $RMSE$  و  $MAPE$  به یکدیگر نزدیک‌تر هستند. در هر صورت نتایج حاصل نشان می‌دهد که، مدل‌های دیدریج و کایسر [۱۲]، گکگللو و همکاران [۱۳]، کارایی بهتری نسبت به سایر مدل‌ها در پیش‌بینی مدول دگرشکلی دارند.

نظریه کلاسیک مجموعه ها در علم ریاضیات است. در تئوری کلاسیک، عناصر از یک الگوی صفر و یک تبعیت می کنند. اما تئوری مجموعه های فازی این مفهوم را بسط می دهد و عضویت درجه بندی شده را مطرح می کند. به این ترتیب که یک عنصر می تواند تا درجاتی و نه به طور کامل عضو یک مجموعه به وسیله یک مجموعه فازی  $A$  در فضای جهانی  $U$  به وسیله یک تابع  $\mu_A(x)$  که مقادیری در بازه  $[0,1]$  اختیار می کند مشخص شود. بنابراین یک مجموعه فازی تعمیم یک مجموعه کلاسیک است که اجازه می دهد تابع  $\mu_A$  هر مقداری را در بازه  $[0,1]$  اختیار کند [۳۱].

مراحلی که برای طراحی یک سیستم فازی در نظر گرفته می شود عبارتند از: ۱- مشخص نمودن ورودی ها و خروجی ها با استفاده از متغیرهای زبانی ۲- نسبت دادن توابع عضویت به متغیرها ۳- ایجاد قواعد پایه ۴- غیرفازی سازی. شکل ۷ یک سیستم فازی را نمایش می دهد.

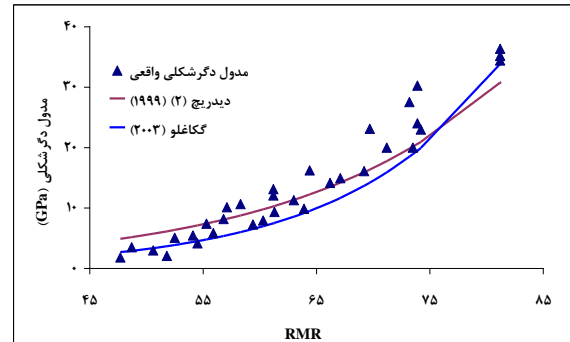


شکل ۷: نمایش یک سیستم فازی [۳۱]

توده سنگ (RMR) در نظر گرفته شد. در مدل مورد نظر از الگوریتم مددانی استفاده شده است. ساختار پیشنهاد شده سیستم فازی با پارامتر ورودی و خروجی در شکل ۸ نمایش داده شده است.

برای فازی سازی پارامترهای ورودی و خروجی در یک سیستم فازی توابع مختلفی مانند مثلثی، دوزنقه ای و گاوسی استفاده می شود [۲۰]. بنابراین برای انتخاب بهترین تابع عضویت از روش سعی و خطا استفاده شد و در نهایت تابع عضویت مثلثی در نظر گرفته شد. شکل ۹ توابع عضویت پارامتر ورودی و خروجی را برای مدل نمایش می دهد. در توابع عضویت نشان داده شده  $V$  نشانه خیلی،  $L$  کم،  $M$  متوسط و  $H$  زیاد است که معرف سطوح مختلف عضویت پارامترها است.

شد [۳۰]. هدف اولیه وی، توسعه مدلی کارآمد، برای توصیف فرآیند پردازش زبان های طبیعی بود. او مفاهیم و اصطلاحاتی همچون مجموعه های فازی، رویدادهای فازی، اعداد فازی و فازی سازی را وارد علوم ریاضیات و مهندسی کرد.



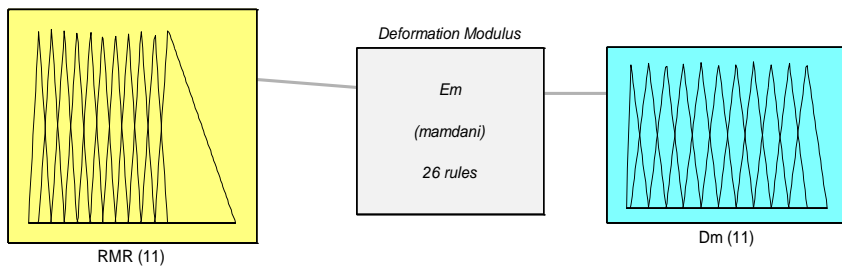
شکل ۶: پیش بینی مدل های انتخاب شده در تعیین مدول دگرشکلی

منطق فازی از جمله منطق های چند ارزشی بوده که بر نظریه مجموعه های فازی تکیه دارد. این نظریه تعمیمی از

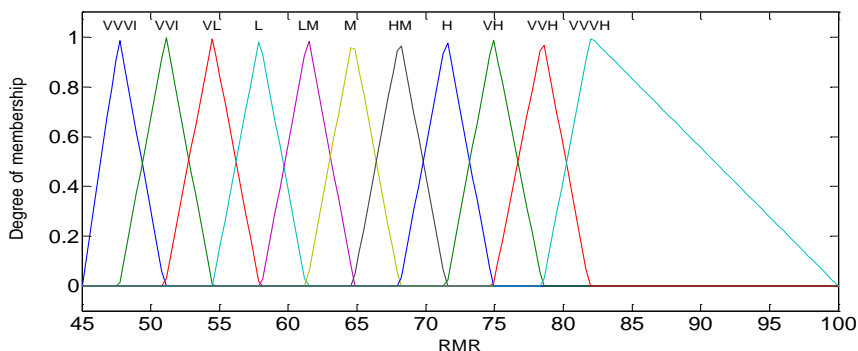
بر اساس شکل ۷، فرایند تعریف مجموعه های فازی، برای متغیرهای ورودی و خروجی را فازی سازی گویند. برای تعریف مجموعه فازی باید دانش اولیه ای از دامنه تعریف هر کدام از متغیرها وجود داشته باشد. موتور استنتاج فازی از یک سری قواعد اگر..آنگاه... تشکیل شده است که بر اساس دانش افراد خبره تعیین می شود و در مرحله غیر فازی سازی اعداد فازی به اعداد قطعی تبدیل می شوند [۳۱].

## ۵-۲- توسعه مدل

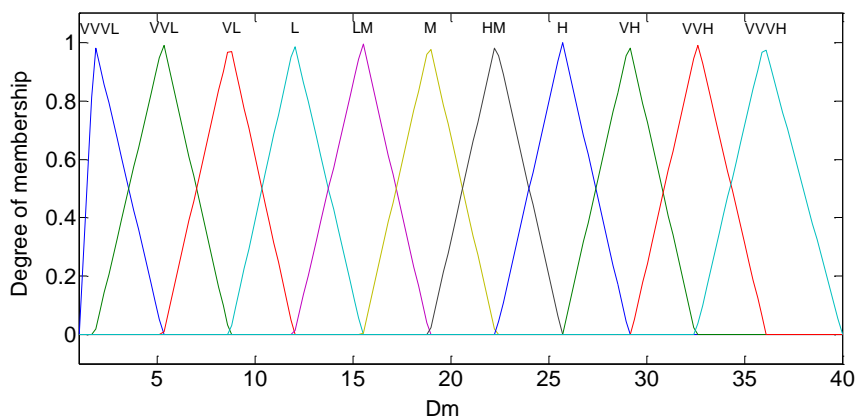
در این بخش تمرکز بر توسعه مدلی فازی است که کارایی بهتری در پیش بینی مدول دگرشکلی توده سنگ نسبت به مدل های تجربی نمایش دهد. پارامتر ورودی مدل توسعه داده شده، همانند مدل های تجربی، طبقه بندی ژئومکانیکی



شکل ۸: ساختار پیشنهادی سیستم فازی برای مدل



الف



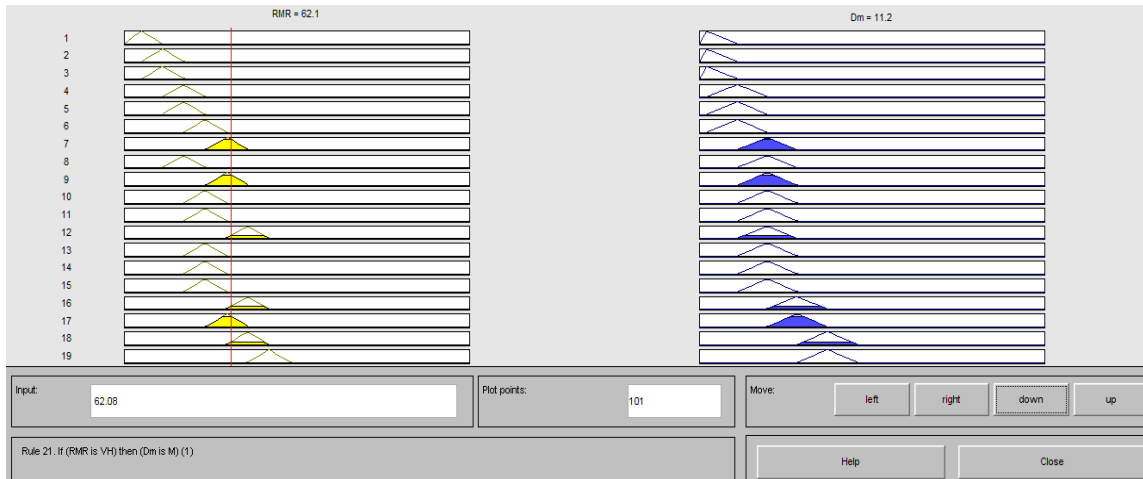
ب

شکل ۹: (الف) تابع عضویت پارامتر ورودی (سیستم امتیازدهی توده‌سنگ) و (ب) تابع عضویت پارامتر خروجی (مدول دگرشکلی توده‌سنگ)

به صورت یک کمیت است از روش گرانیگاه استفاده شد. شکل ۱۰ سیستم پیشنهادی را در محیط نرم افزار متلب وقتی که مقدار  $RMR=62/1$  مقدار  $E_{rm} = 11/2 \text{ GPa}$  را نمایش می‌دهد.

در مدل استنتاجی فازی تعداد قواعد بر اساس تجربیات افراد خبره تعیین می‌شود. معمولاً تعداد قواعد افزایش می‌یابد تا سیستم، بهینه‌ترین پاسخ را ارائه دهد. در این مطالعه بر اساس الگوریتم مدانی و بر اساس تجربیات افراد خبره تعداد ۲۶ قاعده توسعه داده شد. برای تعیین خروجی سیستم که



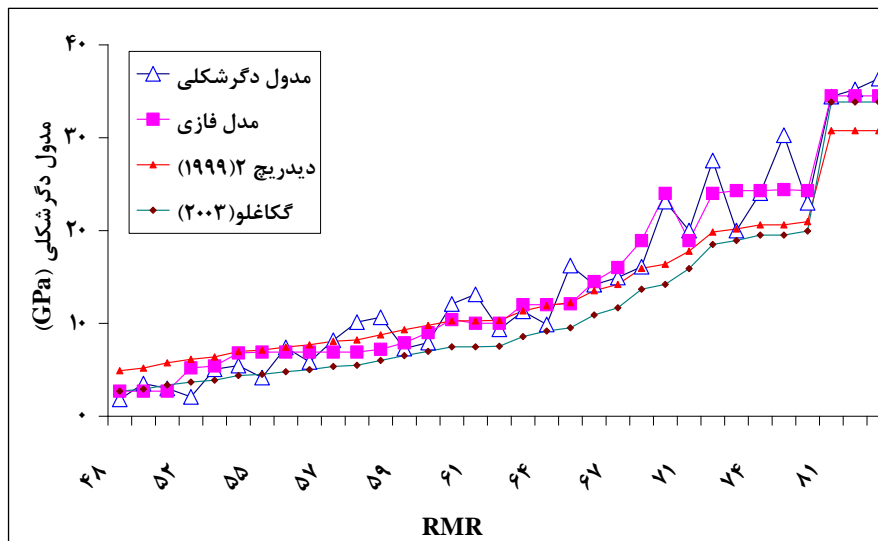


شکل ۱۰: سیستم پیشنهادی فازی برای پیش بینی مدول دگرشکلی در محیط نرم افزار متلب

مدول دگرشکلی اندازه گیری شده روند کاهشی دارد. این موضوع به دلیل عدم قطعیت موجود در ساختگاه توده سنگ است. با توجه به اینکه قواعد زبانی در مدل فازی بر اساس تجربه افراد خبره تعیین می شوند این مزیت نسبت به مدل های تجربی وجود دارد که در مدل فازی عدم قطعیت در نظر گرفته می شود و نتایج به مقدار واقعی نزدیک تر است. در صورتی که در مدل های تجربی، مدول دگرشکلی با افزایش مقدار RMR روند افزایشی نشان می دهد.

### ۶- اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده

برای ارزیابی مدل توسعه داده شده و مقایسه آن با دو مدل تجربی انتخاب شده از بخش قبل که بهترین کارآیی را در پیش بینی مدول دگرشکلی داشتند، از داده های نمایش داده شده در شکل ۱ استفاده گردید. شکل ۱۱ نتایج حاصل از مدل توسعه داده شده و مدل های انتخاب شده را نمایش می دهد. طبق شکل در بعضی نقاط با افزایش مقدار RMR،



شکل ۱۱: پیش بینی مدول دگرشکلی بر اساس مدل فازی پیشنهاد شده

نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده برای مدل فازی مقادیر  $R^2 = 0.95$ ،  $RMSE = 2.8$  و  $MAPE = 6$  به دست آمد که در مقایسه با نتایج حاصل از مدل های تجربی و در شرایط برابر، مدل فازی نتایج بهتری پیش بینی می کند.

همچنین برای ارزیابی عملکرد مدل توسعه داده شده مجدداً از شاخص های ضریب تعیین  $(R^2)$  (رابطه ۲۰)، جذر میانگین مربعات خطا  $(RMSE)$  (رابطه ۲۱) و میانگین درصد خطای مطلق  $(MAPE)$  (رابطه ۲۲) استفاده شده است. نتایج در جدول ۳ برای مدل توسعه داده شده و مدل های انتخابی

مربوط به مدل شن و همکاران [۶] و کمینه مقدار مربوط به مدل نجاتی و همکاران [۱۶] است. مقایسه مدل توسعه داده شده نسبت به مدل‌های انتخاب شده نشان می‌دهد که  $R^2 = 0.95$ ،  $RMSE = 2.8$  و  $MAPE = 6$  است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط برابر و یکسان بین مدل‌های تجربی و فازی، مدل فازی نتایج بهتر و دقیق تری پیش‌بینی می‌کند. زیرا قواعد زبانی در مدل فازی بر اساس تجربه افراد خبره تعیین می‌شود و این مزیت نسبت به مدل‌های تجربی وجود دارد که در مدل فازی، عدم قطعیت در نظر گرفته شده و نتایج به مقدار واقعی نزدیک‌تر است.

### مراجع

- [1] Kayabasi, A., Gokceoglu, C. & Ercanoglu, M., (2003). Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40 (1), 55–63.
- [2] Fattahi, H. (2016). Application of improved support vector regression model for prediction of deformation modulus of a rock mass. *Engineering with Computers*, DOI 10.1007/s00366-016-0433-6.
- [3] Hoek, E. and Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, 203–215.
- [4] Panthee, S., Singh, P. K., Kainthola, A., Das R. & Singh, T.N. (2016). Comparative study of the deformation modulus of rock mass. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, doi: 10.1007/s10064-016-0974-3.
- [5] Alemdag, S., Gurocak, Z., Cevik, C., Cabalar, A. F. & Gokceoglu, C., (2016). Modeling deformation modulus of a stratified sedimentary rock mass using neural network, fuzzy inference and genetic programming. *Engineering Geology*, 203, 70–82.
- [6] Shen, J., Karakus, M., & Xu, C. (2012). A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 32, 245–250.
- [7] Hoek, E. and Brown, E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 34 (8), 1165–1186.
- [8] Asrari, A. A., Shahriar, K., & Ataepour, M. (2015). The performance of ANFIS model for

جدول ۳: ارزیابی مدل فازی پیشنهادی نسبت به مدل‌های تجربی

مدل	RMSE	MAPE	$R^2$
فازی	۲/۸	۶	۰/۹۵
دیدریچ و کایسر [۱۲]	۳/۴	۱۴/۶	۰/۹۴
گکاغلو و همکاران [۱۳]	۴	۱۵/۵	۰/۹۲

### ۷- نتیجه‌گیری

مدول دگرشکلی یکی از مهم‌ترین پارامترها در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی است. در روش غیر مستقیم پیش‌بینی مدول دگرشکلی با استفاده از مدل‌های تجربی و هوش مصنوعی، انجام می‌شود. زیرا این مدل‌ها با صرف کم‌ترین هزینه و زمان، مدول دگرشکلی توده‌سنگ را پیش‌بینی می‌کنند. بنابراین مدلی بهینه است که کم‌ترین پارامتر ورودی را داشته باشد و قابلیت پیش‌بینی مدول دگرشکلی در بهترین حالت را داشته باشد. در مدل‌های تجربی، نتایج پیش‌بینی شده با مدول دگرشکلی اندازه‌گیری شده اختلاف دارد و این موضوع باعث کاهش اعتماد به نتایج می‌گردد. همچنین با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی نیز مدل‌های مختلفی توسعه داده شده است که پارامترهای ورودی آنها متغیر و زیاد است و منطقی است که افزایش تعداد پارامترهای ورودی، مستلزم افزایش هزینه و زمان است. در این مقاله با استفاده از سیستم فازی مددانی مدلی توسعه داده شده است که، RMR تنها پارامتر ورودی آن است. برتری مدل ارائه شده، کاهش تعداد پارامترهای ورودی و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و زمان تعیین پارامترهای ورودی است. همچنین در این مقاله علاوه بر توسعه مدل فازی، کارایی ۱۹ مدل تجربی نیز که پارامتر ورودی آنها RMR است، بررسی شده و در نهایت مقایسه‌ای بین مدل‌های تجربی انتخاب شده با نتایج مدل فازی انجام شده است.

برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها و اعتبارسنجی مدل توسعه داده شده، از سه شاخص جذر میانگین مربعات خطا، ضریب تعیین و میانگین درصد خطای مطلق استفاده شد. داده‌های جهت بررسی شامل، ۳۳ مجموعه از ساختگاه سدهای مختلف در کشور ایران جمع‌آوری و استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد، از بین ۱۹ مدل، دو مدل دیدریچ و کایسر [۱۲] و گکاغلو و همکاران [۱۳]، بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها در پیش‌بینی مدول دگرشکلی دارند. همچنین در بین نتایج پیش‌بینی شده از مدل‌ها، بیشینه مقدار پیش‌بینی

- of Iran. Iranian Journal of Mining Engineering 7(16):79-87 (In Persian).
- [20] Rezaei, M., Asadizadeh, M., Majdi, A., & Farouq Hossaini, M. (2015). Prediction of representative deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system. International Journal of Mining Science and Technology, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.11.007>.
- [21] Bashari, A., Beiki, M. & Talebinejad, A. (2011). Estimation of deformation modulus of rock masses by using fuzzy clustering-based modeling. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48, 1224–1234.
- [22] Mohammadi, H. and Rahmancejad, R. (2010). The estimation of rock mass deformation modulus using regression and artificial neural networks analysis. Arabian Journal for Science and Engineering, 35, 205- 217.
- [23] Asadizadeh M., and Farouq Hossaini M. (2016). Predicting rock mass deformation modulus by artificial Intelligence approach based on dilatometer tests. Arabian Journal of Geosciences. DOI 10.1007/s12517-015-2189-5.
- [24] Gholamnejad, J., Bahaaddini, H.R. & Rastegar, M. (2013). Prediction of the deformation modulus of rock masses using Artificial Neural Networks and Regression methods, Journal of Mining & Environment, 4(1) 35- 43.
- [25] BJVC (2009a) Bakhtiary Dam and HEPP, Engineering geology and rock mechanics report; Report No 4673/4049 Rev 1.
- [26] IWPCO (Iran water and power resources dev. Co.) (2005) Rock mechanics studies. Final report. Upper Gotvand dam and HPP.
- [27] Moshanir Consultant Engineer, (2002). The Siah Bishe Pumped Storage Project in Iran, Report No. 39.
- [28] Mahab Ghods Consulting Engineers Co. (2009) Rock mechanics report of Khersan II project. Mahab Ghods Consulting Engineers Co., Tehran
- [29] Bashari, A. (2009). Statistical reliability evaluation of existing empirical methods for determination of in situ rock mass deformation modul. M.Sc. thesis (In Persian).
- [30] Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. Information and Control, 8, 338–353.
- [31] Lee, W., (1999). Fuzzy systems and fuzzy control. Translated by: Teshneh Lab M., K.N.Toosi University of Technology pub.
- prediction of deformation modulus of rock mass. Arabian Journal of Geosciences. 8, 357–365.
- [9] 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. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, 224–235.
- [10] Aksoy, S.O., Geniş, M., Aldaş, G.U., Özacar, V., Özer, S.C. & Yılmaz, O. (2012) A comparative study of the determination of rock mass deformation modulus by using different empirical approaches. Engineering Geology, 131- 132, 19–28.
- [11] Feng, X. and Jimenez R. (2015). Estimation of deformation modulus of rock masses based on Bayesian model selection and Bayesian updating approach. Engineering Geology. 199, 19–27.
- [12] Diederichs, M.S. and Kaiser, P.K. (1999). Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 36, 69–96.
- [13] Gokceoglu, C., Sonmez, H. & Kayabasi, A. (2003). Predicting the Deformation Moduli of Rock Masses. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 40, 701–710.
- [14] Galera, J.M., Alvarez, M. & Bieniawski, Z.T. (2005). Evaluation of the deformation modulus of rock masses: comparison of pressure-meter and dilatometer tests with RMR prediction. The ISP5-PRESSIO, International Symposium, Madrid, Spain.
- [15] Ajalloeian, R., and Mohammadi, M. (2014). Estimation of limestone rock mass deformation modulus using empirical equations. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 541–550.
- [16] Nejati, H.R., Ghazvinian, A.H., Moosavi, S.A. & Sarfarazi, V. (2014). On the use of the RMR system for estimation of rock mass deformation modulus. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73, 531–540.
- [17] Kavur, B., Cvitanovic, N.S., & Hrzencak, p. (2015). Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 73, 102–114.
- [18] Alemdag, S., Gurocak, Z. & Gokceoglu, C. (2015). A simple regression based approach to estimate deformation modulus of rock masses. Journal of African Earth Sciences, 110, 75–80.
- [19] Allami, M., and Hoseini, M. (2012). Presentation of Empirical Relations for Determining Deformation Modulus in Rock Masses of Southwest