

کاربرد ماتریس عدم قطعیت در تخمین مدول دگرشکلی توده سنگ

بر اساس مدل های تجربی

مهدی محمدی^۱

^۱ استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران mehdi.mohammadi@vru.ac.ir

(دریافت ۰۵ شهریور ۱۳۹۵، پذیرش ۰۳ دی ۱۳۹۷)

چکیده

یکی از مواردی که همواره مورد توجه مهندسين سنگ قرار دارد، عدم قطعیت موجود در پارامترهای مورد نیاز در تحلیل و طراحی سازه های سنگی است که ناشی از روابط توسعه داده شده و ماهیت ذاتی سنگ می باشد. مدول دگرشکلی یکی از پارامترهای ژئومکانیکی است که کاربرد فراوانی در تحلیل و طراحی ها دارد اما تخمین این پارامتر با روش های تجربی همواره با عدم قطعیت همراه است و این موضوع باعث تردید مهندسان کاربردی در تصمیم گیری ها می شود. هدف از این مقاله توسعه مفهوم جدیدی با عنوان ماتریس عدم قطعیت برای تخمین عملی مدول دگرشکلی با درجه قطعیت بالاتر است. در ابتدا روش تخمین مدول دگرشکلی با استفاده از ماتریس عدم قطعیت و روش های آماری بیان شده است و سپس با استفاده از ماتریس عدم قطعیت و توزیع t دامنه ای که مدول دگرشکلی مورد نظر در آن می تواند تغییر کند، تعیین می شود. برای مطالعه موردی و برای تشکیل درایه های ماتریس عدم قطعیت، از مدل هایی که تنها تابع سیستم طبقه بندی توده سنگ RMR هستند و از داده های شیروانی های ماسه سنگ سازند کهر استفاده شده است. نتایج بیانگر این است که پیش بینی مدول دگرشکلی توده سنگ با روش توسعه داده شده در مقایسه با روش های متداول قطعیت بیشتری دارد. همچنین مدول دگرشکلی با حد اطمینان ۹۵ درصد برای شیروانی یاد شده در دامنه $Er < 30/00 < 23/67$ گیگاپاسکال قرار دارد.

کلمات کلیدی

ماتریس عدم قطعیت، مدول دگرشکلی، ماسه سنگ سازند کهر، مدل تجربی، توزیع t

۱- مقدمه

مهندسان کاربردی در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی همواره با یک سری عدم قطعیت مواجه‌اند که ناشی از ماهیت ذاتی سنگ‌ها و روابط توسعه داده شده برای تعیین پارامترهای مورد نیاز در تحلیل و طراحی است. عدم قطعیت موجود، از منابع مختلفی شامل کمبود دانش بشری، عدم آگاهی کافی از چینه‌شناسی منطقه، منشا زمین‌شناسی و ویژگی‌های مواد زیرسطحی منشا می‌گیرد [۱]. یکی از پارامترهای ژئومکانیکی که در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی کاربرد فراوانی دارد، مدول دگرشکلی است. در واقع مدول دگرشکلی بیانگر ارتباط بین تنش اعمال شده و تغییرشکل نسبی در توده سنگ است و شامل رفتار الاستیک و شکل‌پذیر می‌شود [۲].

برای تعیین مدول دگرشکلی، دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش مستقیم با استفاده از آزمایش‌های برجا مانند جک تخت، صفحه باربر در محل پروژه و بر روی توده سنگ پارامتر مورد نظر پیش‌بینی می‌شود [۳]. اما برآورد مدول دگرشکلی با استفاده از آزمایش‌ها برجا وقت‌گیر و پرهزینه و مشکلات عملیاتی پیرامون آن زیاد است به علاوه نتایج به دست آمده، قطعیت بالایی ندارند [۲، ۴]. بنابراین امروزه پیش‌بینی مدول دگرشکلی به صورت غیرمستقیم و با استفاده از مدل‌های تجربی، کاربرد فراوانی یافته است. پارامترهای ورودی در مدل‌های تجربی عمدتاً، پارامترهای ژئومکانیکی (مانند مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری تک‌محوره) [۵-۷] و سیستم‌های مختلف رده‌بندی توده سنگ مانند طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR)، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، سیستم طبقه‌بندی بارتن (Q) و شاخص کیفی توده سنگ (RQD) است [۵-۷]. اما تخمین مدول دگرشکلی با مدل‌های مختلف پراکندگی نتایج را در بردارد و این موضوع ناشی از ماهیت مدل‌ها است که در مکان‌های مختلف توسعه داده شده‌اند. از طرفی برای تعیین پارامترهای ورودی (مانند RMR و GSI)، برداشت زمین‌شناسی مستقیماً از توده سنگ انجام می‌شود و به دلیل ناهمگن بودن ذاتی سنگ مقادیر تعیین شده نیز قطعیت ندارند. با در نظر گرفتن چنین شرایطی و نیاز به تخمین مدول دگرشکلی توده سنگ با سطح اطمینان بالا، برای تحلیل و طراحی، روش‌های آماری و احتمالاتی می‌توانند بسیار مفید واقع شوند [۸]. روش‌های آماری اولین بار توسط وایبول توسعه داده شد [۹] و تاکنون مطالعات متعددی در زمینه برآورد احتمالاتی خواص توده سنگ انجام شده است. کیم [۱۰] با در نظر گرفتن عدم قطعیت خواص مقاومت

توده سنگ، یک روش احتمالاتی توسعه داد. او برای شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی از روش مونت کارلو و برای برازش نتایج آزمایشات، از توان دوم کای برای سنگ بازالت استفاده کرد و نتایج مطلوبی به دست آورد. هوک [۱۱] در سال ۱۹۹۸، برای پیش‌بینی پارامترهای معیار هوک- براون از روش احتمالاتی برآورد نقطه‌ای استفاده کرد. برای این منظور پارامترهای ورودی مانند شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مقاومت فشاری تک‌محوره و ثابت سنگ بکر (m_i) را به عنوان متغیر تصادفی و توزیع این متغیرها را نرمال در نظر گرفت. ساری [۱۲]، برای برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ یک روش عملی احتمالاتی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو ارائه کرد. وی تابع هدف را معیار هوک- براون در نظر گرفت. در ابتدا توزیع پارامترهای مورد نیاز، مانند مقاومت فشاری تک‌محوره، فاصله‌داری، طول ناپیوستگی و دهانه ناپیوستگی (پارامترهای متغیر RMR) را تعیین و سپس بر اساس این پارامترها توزیع پارامترهای هوک- براون و پارامترهای مقاومتی توده سنگ را شبیه‌سازی کرد و نتیجه گرفت، سطح اطمینان نتایج با این روش بیشتر از روش‌های قطعی است. همچنین ساری و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۰، در ادامه تحقیقاتش، با در نظر گرفتن تاثیر عوامل موثر روی پارامترهای معیار هوک- براون مجدداً پارامترهای مقاومت توده سنگ را با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی و بررسی کردند. آیدریس [۱۴] با ترکیب روش عددی اجزا محدود و شبیه‌سازی مونت کارلو تغییرپذیری خواص توده سنگ را در پایداری طبقات معادن مطالعه کرد. وی در بررسی‌های خود توزیع پارامترهای ورودی به تحلیل را نرمال در نظر گرفت. ربیعی‌وزیری و همکاران [۱۵]، پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ معدن سنگ آهن گل‌گهر را با استفاده از روش مونت کارلو شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند که افزایش ضریب تغییرات و پراکندگی در توزیع می‌تواند ناشی از فرم روابط استفاده شده برای تعیین پارامترهای خروجی باشد. در این مقاله، با توسعه ماتریس عدم قطعیت و روش‌های آماری، ابتدا یک جامعه آماری تولید شده و سپس با استفاده از توزیع t ، دامنه‌ای که مدول دگرشکلی واقعی در آن قرار دارد با سطح اطمینان بالاتر پیش‌بینی می‌شود.

۲- روش کار

در این مقاله تمرکز بر تخمین مدول دگرشکلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ناشی از مدل‌های موجود و همچنین خواص توده سنگ است. به عبارت دیگر در ماتریس $m \times n$ (رابطه ۱)، عناصر ستون اول ماتریس بیانگر ویژگی‌های

اما برای تحلیل و طراحی تنها به یک مقدار مدول دگرشکلی نیاز است. در صورتی که ماتریس مورد نظر بیانگر این است که برای هر برداشت یک مقدار مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده است و هنوز عدم قطعیت ناشی از خصوصیات زمین‌شناسی موجود است. بنابراین با تعیین مشخصه آماری برای ماتریس مورد نظر عدم قطعیت ناشی از ماهیت ذاتی سنگ نیز به کمینه مقدار تبدیل می‌شود و ماتریس مورد نظر تبدیل به یک درایه می‌شود. از این‌رو نتیجه حاصل شده نسبت به روش‌های مرسوم قابلیت اعتماد بالاتری دارد.

از مزایای دیگر ماتریس عدم قطعیت این است که دامنه‌ای که مدول دگرشکلی واقعی در آن قرار دارد را با استفاده از توزیع t می‌توان تعیین کرد. با این عمل نتیجه به دست آمده بالاترین سطح اطمینان را دارد و عدم قطعیت کاهش می‌یابد. برای این منظور درآیه‌های ماتریس مورد نظر به عنوان نمونه‌های انتخاب شده از یک جامعه آماری با توزیع نرمال در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از توزیع t دامنه‌ای که مدول دگرشکلی واقعی در آن قرار دارد تخمین زده می‌شود (رابطه ۳).

$$t = \frac{\bar{y} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}} \quad (3)$$

که در آن:

- t مساحت زیر منحنی توزیع نرمال
- \bar{y} میانگین
- S انحراف معیار نمونه
- μ میانگین جامعه آماری
- n تعداد نمونه است [۱۶].

پس از آن که مقادیر میانگین و انحراف معیار از ماتریس عدم قطعیت تعیین شد، می‌توان با حد اطمینان ۹۵ درصد دامنه واقعی مدول دگرشکلی ($E_r, \mu(E_r)$) را تخمین زد. برای تعیین مقدار t از جدول زیر سطح منحنی توزیع t استفاده می‌شود. برای این منظور با در نظر گرفتن $t_{0.025}$ (زیرا آزمایش دو دنباله‌ای است) و همچنین درجه آزادی $d.f = n - 1$ می‌توان مقدار t را به دست آورد [۱۶].

۲-۱- مطالعه موردی

در این بخش کاربرد ماتریس عدم قطعیت، به صورت موردی بیان می‌شود.

توده سنگ که برداشت، چند دفعه تکرار شده است (A, B, C) و عناصر سطر اول ماتریس، بیانگر مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی است (a, b, c) و دیگر درایه‌های ماتریس بیانگر مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده متناظر با سطر و ستون اول است. اگر عنصر A در ستون اول ماتریس (ویژگی های توده سنگ) به تنهایی در نظر گرفته شود، مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده حاصل از مدل‌های مختلف با یکدیگر متفاوت است (E_{Aa}, E_{Ab}, E_{Ac}). به همین ترتیب چنانچه عنصر B واقع در ستون دوم ماتریس نیز در نظر گرفته شود، طبیعتاً مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده نیز تغییر می‌کند. بنابراین در روش‌های موجود و متداول هر یک از نتایج پیش‌بینی شده (درایه ماتریس) به تنهایی می‌توانند در تحلیل‌ها به عنوان مدول دگرشکلی استفاده شوند اما نتایج قطعیت بالایی ندارند. در چنین شرایطی، ماتریس عدم قطعیت (رابطه ۱)، برای تخمین مدول دگرشکلی با درجه قطعیت بالاتر می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

$$E_{ij} = \begin{bmatrix} & A & B & C \\ a & E_{Aa} & E_{Ba} & E_{Ca} \\ b & E_{Ab} & E_{Bb} & E_{Cb} \\ c & E_{Ac} & E_{Bc} & E_{Cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

برای تشکیل عناصر سطر اول ماتریس عدم قطعیت، مدل‌های تجربی مختلفی که برای تخمین مدول دگرشکلی توسعه داده شده جمع‌آوری می‌شود و باید از مدل‌هایی استفاده شود که پارامتر ورودی آن‌ها یکسان باشد. همچنین برای تشکیل عناصر ستون اول ماتریس عدم قطعیت، تعداد برداشت پارامترهای ورودی را چندین دفعه باید تکرار کرد تا عدم قطعیت ناشی از ماهیت ذاتی سنگ در نظر گرفته شود. هر چه تعداد عناصر ماتریس افزایش یابد دقت نتایج بیشتر است.

پس از تشکیل ماتریس عدم قطعیت، تعدادی مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده در درایه‌های ماتریس عدم قطعیت متناظر با عناصر ستون و سطر اول تولید شده است. بنابراین با استفاده از روش‌های آماری می‌توان، مشخصه آماری شامل میانگین و انحراف معیار را برای هر عنصر ستون‌های ماتریس تعیین کرد. به عبارت دیگر ماتریس $m \times n$ به یک ماتریس $1 \times n$ تبدیل می‌شود که هر ستون دارای یک عنصر است و بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده برای هر مقدار پارامتر ورودی (A, B, C) است (رابطه ۲). با این عمل مقادیر پیش‌بینی شده، از مدل‌های مختلف به یک مقدار برای هر پارامتر ورودی تبدیل می‌شود و نتایج حاصل شده قطعیت بیشتری دارند.

$$E_{ij} = [E_{11} \quad E_{22} \quad E_{33}] \quad (2)$$

۲-۱-۱- مدل‌های استفاده شده برای تشکیل عناصر سطرهای ماتریس عدم قطعیت

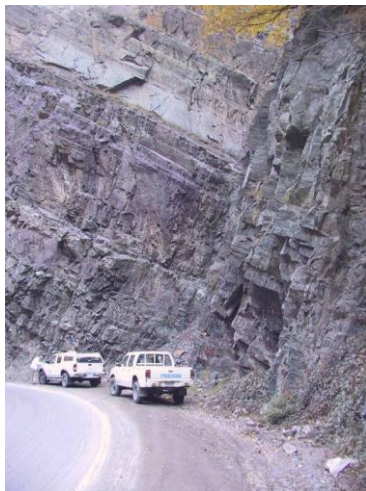
در این مطالعه برای تشکیل عناصر سطرهای ماتریس عدم قطعیت و تخمین مدول دگرشکلی از مدل‌هایی استفاده شده است که پارامتر ورودی آن‌ها تنها سیستم امتیازدهی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) است زیرا در ابتدای فرآیند طراحی، شناخت مشخصات مکانیکی توده سنگ محل پروژه، در قالب طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ مانند RMR ضروری است. در مرحله بعد تعیین خصوصیات مکانیکی توده سنگ مانند مدول دگرشکلی توده اجتناب‌ناپذیر است. در فاز اولیه طراحی از آنجا که تعیین مدول دگرشکلی به روش مستقیم از نظر هزینه مقرون به صرفه نیست، بنابراین روش‌های غیرمستقیم مانند مدل‌های تجربی که پارامتر ورودی آن‌ها RMR است، برای پیش‌بینی استفاده می‌شود [۱۷]. در صورتی که رابطه‌ای بومی برای تعیین این پارامتر وجود نداشته باشد، مدول دگرشکلی با استفاده از تعدادی رابطه تجربی پیش‌بینی می‌شود و سپس برای کاهش عدم قطعیت از آن‌ها میانگین گرفته می‌شود [۱۸]. برای این منظور تعداد ۱۶ مدل از مدل‌های توسعه داده شده به وسیله محققان مختلف، جمع‌آوری شد. مدل‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. طبق جدول پارامتر ورودی کلیه مدل‌ها، RMR است.

۲-۱-۲- داده‌های مورد نیاز برای تشکیل عناصر ستون‌های ماتریس عدم قطعیت

برای تشکیل درایه‌ها، از داده‌های مطالعه شده شیروانی‌های ماسه‌سنگ سازند کهر- جاده چالوس استفاده شد. منطقه مورد

بررسی، در رشته کوه البرز و یک کمر بند چین‌خورده- رانده در شمال ایران قرار دارد که بخشی از پهنه وسیع برخوردی اوراسیا- عربستان را تشکیل می‌دهد و در بخش میانی البرز مرکزی قرار دارد. از نظر ریخت‌شناسی، این بخش از البرز بیشترین ناهمواری‌ها و بلندترین ارتفاعات را به خود اختصاص می‌دهد. از نظر زمین‌شناختی، دامنه گسترده‌ای از واحدهای سنگ‌شناختی پیش از پالئوزویک تا عهد حاضر در منطقه رخنمون دارند. بر پایه اطلاعات ارایه شده در نقشه زمین‌شناختی مرزن‌آباد، ویژگی‌های واحدهای سنگ‌شناختی منطقه مورد نظر مربوط به دوره پرکامبرین است که کهن‌ترین سنگ‌های منطقه به دو سازند کهر و سلطانیه محدود می‌شود و پوشش گسترده‌ای در بخش‌های میانی منطقه دارند.

سازند کهر عمدتاً شامل ماسه‌سنگ، لای‌سنگ، کوارتزیت و میان لایه‌هایی از شیل و دولومیت است [۲۱]. شاهراه تهران- چالوس در البرز مرکزی، یکی از مهم‌ترین راه‌های ارتباطی شمال کشور در دره دو رودخانه کرج و چالوس ساخته شده است که قسمتی از این جاده از ناحیه مورد مطالعه عبور کرده است. تعداد ده شیروانی مشرف به جاده، برای بررسی دقیق رفتار مهندسی و شناخت ویژگی‌های توده‌سنگ ساختگاه بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی نسخه ۱۹۸۹ [۲۲] مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج به دست آمده در جدول ۲ نمایش داده شده است [۲۳]. نمای عمومی دو شیروانی در مسیر جاده در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای عمومی شیروانی با سنگ‌شناختی ماسه‌سنگ کهر [۲۳]

جدول ۱- مدل‌های تجربی ارائه شده توسط محققان مختلف برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ [۴، ۶، ۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰]

مدل	شماره	نام محقق (سال)	
$RMR > 50$ $E_r = 2RMR - 100, (GPa)$	(۴)	Bieniawski(1978)	بینی‌اوسکی (۱۹۷۸)
$E_r = 10^{(RMR-10)/40} (GPa)$	(۵)	Serafim and Pereira(1983)	سرافیم و پیرا (۱۹۸۳)
$E_r = 10^{(RMR-20)/38} (GPa)$	(۶)	Mehrotra(1992)	مهروترا (۱۹۹۲)
$E_r = 300 \exp(0.07RMR) \times 10^{-3} (GPa)$	(۷)	Kim(1993)	کیم (۱۹۹۳)
$E_r = 0.1(RMR / 10)^3 (GPa)$	(۸)	Read et al.(1999)	رد و همکاران (۱۹۹۹)
$E_r = 7 + 3\sqrt{10^{RMR-44}/21} (GPa)$	(۹)	Diederichs and Kaiser (1999)	دیدریچ و کیاسر (۱) (۱۹۹۹)
$E_r = 7 - 3\sqrt{10^{RMR-44}/21} (GPa)$	(۱۰)	Diederichs and Kaiser(1999)	دیدریچ و کیاسر (۲) (۱۹۹۹)
$E_r = 0.0736 \exp(0.0755RMR) (GPa)$	(۱۱)	Gokceoglu et al.(2003)	گکاغلو و همکاران (۲۰۰۳)
$E_r = 147.28e^{(RMR-100)/24} - 0.202RMR (GPa)$	(۱۲)	Galera et al.(2005)	گالرا و همکاران (۱) (۲۰۰۵)
$E_r = \exp(RMR - 10) / 18 (GPa)$	(۱۳)	Galera et al.(2005)	گالرا و همکاران (۲) (۲۰۰۵)
$E_r = 0.0876RMR + 1.056(RMR - 50) + RMR > 50$ $0.015(RMR - 50)^2 (GPa)$	(۱۴)	Galera et al.(2005)	گالرا و همکاران (۳) (۲۰۰۵)
$E_r = 1.3326 \exp(0.0364RMR) (GPa)$	(۱۵)	Chun et al.(2009)	چان و همکاران (۲۰۰۹)
$E_r = 0.0003RMR^3 - 0.0193RMR^2 + 0.3157RMR + 3.4064 (GPa)$	(۱۶)	Mohammadi and Rahman nejad(2009)	محمدی و رحمان‌نژاد (۲۰۰۹)
$E_r = 110 \exp[-(RMR - 100) / 37]^2 (GPa)$	(۱۷)	Shen et al.(2012)	شن و همکاران (۲۰۱۲)
$E_r = 9 \times 10^{-7} RMR^{3.868} (GPa)$	(۱۸)	Khabbazi et al.(2013)	خبازی و همکاران (۲۰۱۳)
$E_r = 0.058e^{0.0785RMR} (GPa)$	(۱۹)	Alemdag et al.(2015)	المداغ و همکاران (۲۰۱۵)

جدول ۲- نتایج حاصل از طبقه‌بندی ژئومکانیکی برای ده شیروانی با سنگ‌شناختی ماسه سنگ [۲۳]

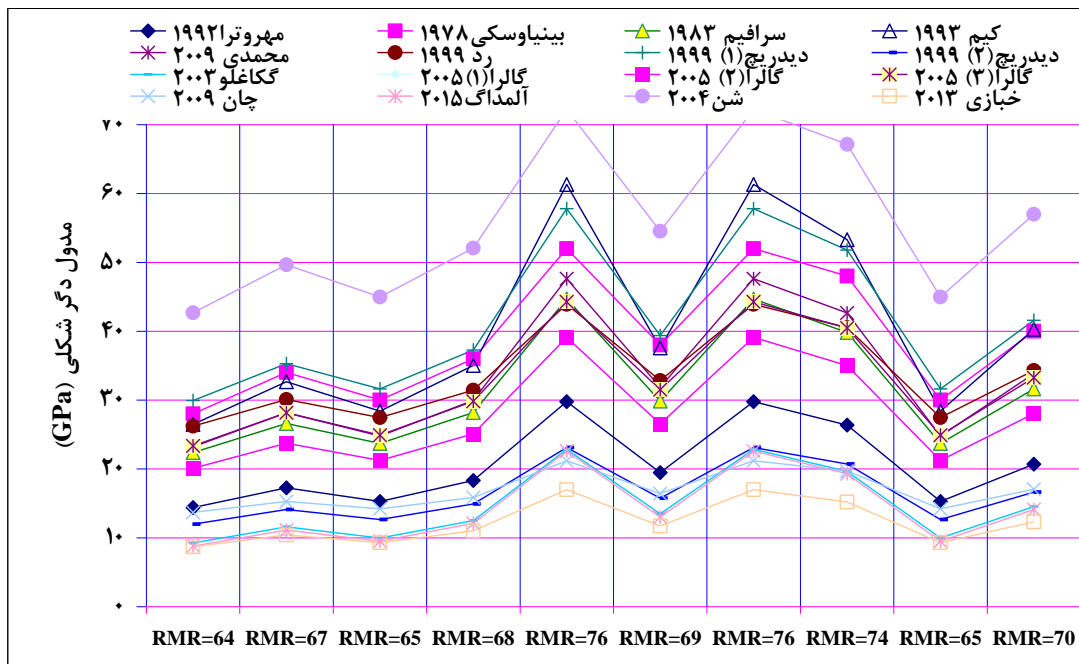
رده سنگ	RMR	ردیف
II	۶۴	۱
II	۶۷	۲
II	۶۵	۳
II	۶۸	۴
II	۷۶	۵
II	۶۹	۶
II	۷۶	۷
II	۷۴	۸
II	۶۵	۹
II	۷۰	۱۰

تشکیل‌دهنده سطر اول که بیانگر تعداد مدل‌هایی که مدول دگرشکلی را پیش‌بینی می‌کنند ۱۶ و همچنین ستون اول نیز که بیانگر تعداد مقادیر RMR برداشت شده است ۱۰ است. در مجموع تعداد ۱۶۰ درایه از ماتریس عدم قطعیت برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی اختصاص دارد. شکل ۲ نتایج حاصل از ماتریس عدم قطعیت را نمایش می‌دهد.

مقادیر به دست آمده از جدول ۲ نشان می‌دهد، اگرچه منطقه از نظر سنگ‌شناختی، زمین‌شناختی و ریخت‌شناختی یکسان است اما پراکندگی نتایج، ناشی از عدم قطعیت و ناهمگنی ذاتی سنگ‌ها است. همچنین از میان ۱۰ برداشت، مقادیر $RMR=۶۵$ و $RMR=۷۶$ دو مرتبه تکرار شده‌اند.

۲-۲- تشکیل ماتریس عدم قطعیت و تخمین مدول دگرشکلی

با در نظر گرفتن داده‌های موجود در بخش ۳، ماتریس عدم قطعیت ۱۶×۱۰ تشکیل شده است. به عبارت دیگر عناصر



شکل ۲- تعیین مدول دگرشکلی بر اساس ماتریس عدم قطعیت ۱۶×۱۰

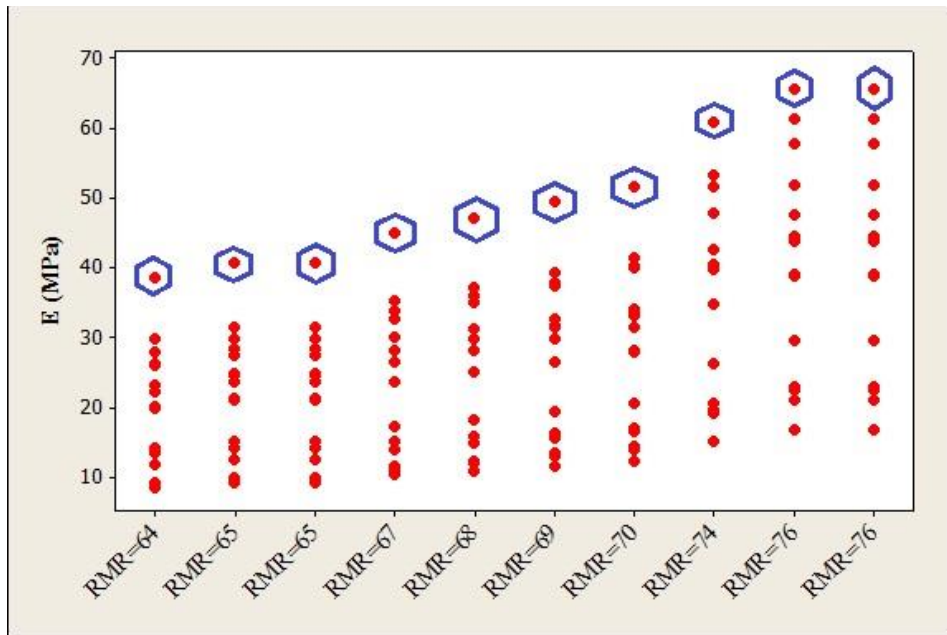
داشته باشد. این موضوع نیز ناشی از عدم قطعیت در برآورد RMR است و تعیین قطعی آن نیز غیرقابل اجتناب است. بنابراین برای استفاده از مدل‌های تجربی باید احراز شرایط مربوط در هر منطقه مشخص شود.

همچنین مدل شن و همکاران^۳ (۲۰۱۲) بیشترین تخمین و اختلاف را نسبت به سایر نتایج نشان می‌دهد. این موضوع در شکل ۳ دقیق‌تر نشان داده شده است. در هر یک از مقادیر RMR مدل یاد شده بیشترین مقدار مدول دگرشکلی را پیش‌بینی می‌کند. بنابراین برای پیش‌بینی مدول دگرشکلی دقیق‌تر، نتایج حاصل از مدل شن و همکاران از محاسبات حذف می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که همگرایی، بین نتایج پیش‌بینی شده از مدل‌ها در $RMR < 70$ بیشتر است.

محور افقی و عمودی به ترتیب بیانگر ستون‌ها و سطرهای ماتریس عدم قطعیت‌اند. شکل ۲ نشان می‌دهد که برای مقادیر RMR، دامنه نتایج پیش‌بینی شده به وسیله مدل‌ها، تغییرات قابل توجهی دارد و همچنین نتایج بعضی از مدل‌ها مانند مدل‌های گالرا و دیگران^۱ (۲۰۰۵) و رد و دیگران^۲ (۱۹۹۹) با هم، هم‌پوشانی دارند. این پراکندگی ناشی از عدم قطعیت در مدل‌ها است زیرا نتایج پیش‌بینی شده به وسیله هر مدل، تابع فراوانی داده‌های استفاده شده در شرایط محیطی مختلف، در توسعه مدل است. از این‌رو برای استفاده از آن‌ها در پروژه‌های خاص باید شرایط و انطباق با محیط در نظر گرفته شود. همچنین اساس مدل‌های تجربی بر همگن و همسانگرد بودن محیط است در صورتی که شکل ۲ نشان می‌دهد که تغییرات پارامتر RMR (پارامتر ورودی مدل‌ها) می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی مقدار مدول دگرشکلی توده سنگ

تواند در تحلیل‌ها استفاده شود اما نتایج قطعیت قابل قبولی ندارند.

اگر از روش‌های متداول برای تعیین مدول دگرشکلی استفاده شود، هر یک از نتایج پیش‌بینی شده در شکل ۲ می



شکل ۲- همگرایی مدول دگرشکلی تخمین زده شده با هر مدل در ماتریس عدم قطعیت

۳- نتایج و بحث

مختلف، با استفاده از روش‌های آماری، مشخصه هر پارامتر ورودی (هر عنصر برای ستون اول) تعیین می‌شود. نتایج در جدول ۳ نشان داده است.

با توجه به نتایج حاصل شده از ماتریس (شکل ۲) و برای کاهش عدم قطعیت ناشی از نتایج پیش‌بینی شده با مدل‌های

جدول ۳- مشخصه آماری مدول دگرشکلی (GPa) برای هر مقدار RMR

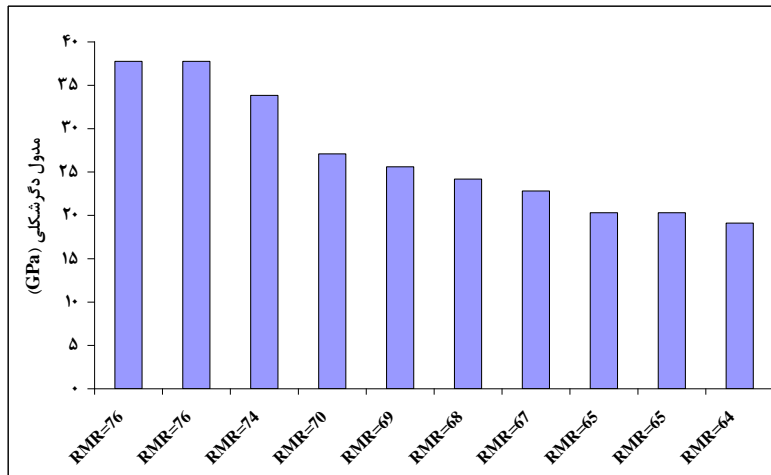
متغیر	کمینه	بیشینه	دامنه	میانگین	میانه	نما	انحراف معیار	تعداد مدل
RMR=64	۸٫۷۰	۲۹٫۹۴	۲۱٫۲۴	۱۹٫۱۰	۲۰٫۱۰	۰	۷٫۳۸	۱۵
RMR=65	۹٫۳۰	۳۱٫۶۲	۲۲٫۳۲	۲۰٫۲۹	۲۱٫۳۰	۰	۷٫۸۳	۱۵
RMR=65	۹٫۳۰	۳۱٫۶۲	۲۲٫۳۲	۲۰٫۲۹	۲۱٫۳۰	۰	۷٫۸۳	۱۵
RMR=67	۱۰٫۴۰	۳۵٫۲۹	۲۴٫۸۹	۲۲٫۸۱	۲۳٫۸۰	۰	۸٫۸۰	۱۵
RMR=68	۱۱٫۰۰	۳۷٫۲۸	۲۶٫۲۸	۲۴٫۱۸	۲۵٫۲۰	۰	۹٫۳۰	۱۵
RMR=69	۱۱٫۷۰	۳۹٫۳۹	۲۷٫۶۸	۲۵٫۶۰	۲۶٫۷۰	۰	۹٫۸۳	۱۵
RMR=70	۱۲٫۳۰	۴۱٫۶۰	۲۹٫۳۰	۲۷٫۰۹	۲۸٫۲۰	۰	۱۰٫۳۷	۱۵
RMR=74	۱۵٫۲۰	۵۳٫۳۰	۳۸٫۱۰	۳۳٫۸۳	۳۵٫۰۱	۰	۱۲٫۸۰	۱۵
RMR=76	۱۷٫۰۰	۶۱٫۳۲	۴۴٫۳۲	۳۷٫۷۵	۳۹٫۱۲	۰	۱۴٫۲۰	۱۵
RMR=76	۱۷٫۰۰	۶۱٫۳۲	۴۴٫۳۲	۳۷٫۷۵	۳۹٫۱۲	۰	۱۴٫۲۰	۱۵

مدل‌ها بیشتر می‌شود. همچنین نما در همه نتایج برابر با صفر است و بیانگر این است که هیچ‌کدام از مدل‌ها در نتایج

جدول ۳ نشان می‌دهد، با افزایش مقدار RMR انحراف معیار افزایش می‌یابد، در نتیجه پراکندگی نتایج حاصل از

است. نتایج حاصل از ماتریس عدم قطعیت در شکل ۴ نشان داده شده است.

هم‌پوشانی ندارند. بنابراین با تعیین میانگین، برای مقادیر RMR، عدم قطعیت ناشی از مدل‌ها به کمینه مقدار نزدیک شد و ماتریس عدم قطعیت به یک ماتریس 1×10 تبدیل شده



شکل ۴- نتایج حاصل از ماتریس عدم قطعیت 1×10

مشخصه آماری مدول دگرشکلی توده سنگ مورد نظر و RMR را نمایش می‌دهد.

برای کاهش عدم قطعیت ناشی از ماهیت ذاتی سنگ و تعیین یک مقدار مدول دگرشکلی برای سنگ مورد نظر، مشخصه آماری ماتریس 1×10 تعیین می‌شود. جدول ۴

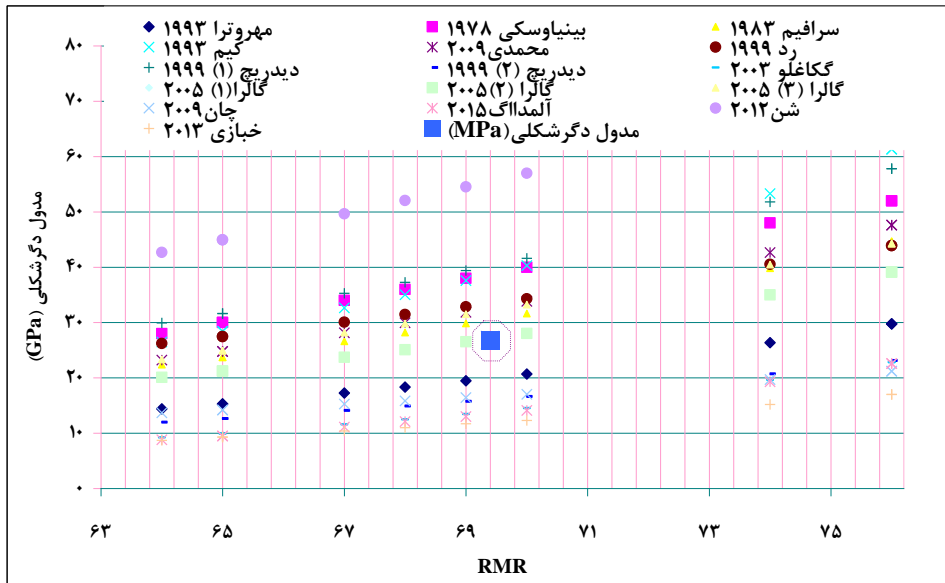
جدول ۴- مشخصه آماری برای توده ماسه سنگ سازند کهر

متغیر	کمینه	بیشینه	دامنه	میانگین	میانه	نما	انحراف معیار	تعداد نمونه
RMR	۶۴	۷۶	۱۲	۶۹٫۴۰	۶۸٫۵۰	۲	۴٫۵۳	۱۰
$E_r (GPa)$	۱۹٫۰۰	۳۷٫۸۰	۱۸٫۸۰	۲۶٫۸۷	۲۴٫۹۰	۲	۷٫۱۵	۱۰

توده سنگ از روش‌های تجربی (بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت استفاده شود)، هر کدام از نتایج موجود با قابلیت اعتماد کمتری در تحلیل‌ها می‌تواند استفاده شود اما نتیجه حاصل شده از روش مورد نظر، کاربردی‌تر و از همه پیش‌بینی روش‌های تجربی تأثیرپذیر بوده است و در نتیجه با قابلیت اعتماد بالاتری می‌توان در تحلیل‌ها از آن استفاده کرد.

جدول ۴ نشان می‌دهد که مدول دگرشکلی برای ماسه سنگ سازند کهر با استفاده از ماتریس عدم قطعیت $26.87 (GPa)$ با انحراف معیار $7.15 (GPa)$ پیش‌بینی شده است. همچنین میانگین مقدار RMR نیز برای توده سنگ 69.40 تخمین زده شد.

مقایسه بین نتایج پیش‌بینی شده حاصل از روش‌های تجربی و ماتریس عدم قطعیت در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق شکل در صورتی که برای تخمین مدول دگرشکلی



شکل ۵- مقایسه مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده با روش توسعه داده شده و روش‌های تجربی

H_1 : توزیع داده‌های مربوط به هر یک از متغیرها نرمال نیست.

نتایج حاصل از آزمون نرمالیت در جدول ۵ نمایش داده شده است. طبق نتایج جدول، چولگی و کشیدگی به ترتیب برابر با ۰/۶۵ و ۰/۰۴ است. هم‌چنین سطح معناداری حاصل از آزمون شاپیرو ویلک بزرگتر از ۰/۰۵ است، بنابراین با اطمینان بالایی داده‌ها را می‌توان نرمال فرض کرد. شکل ۶ سطح معناداری داده‌ها در آزمون و شکل ۷ هیستوگرام فراوانی تجمعی داده‌های مورد بررسی را نمایش می‌دهد. بنابراین با توجه به توزیع نرمال و با استفاده از رابطه ۳ و نتایج جدول ۴، با حد اطمینان ۹۵ درصد دامنه‌ای که مدول دگرشکلی در آن تغییر می‌کند، $30100 < E_T < 2367$ گیگاپاسکال است.

جدول ۵- نتایج آزمون نرمال بودن داده‌های آماری

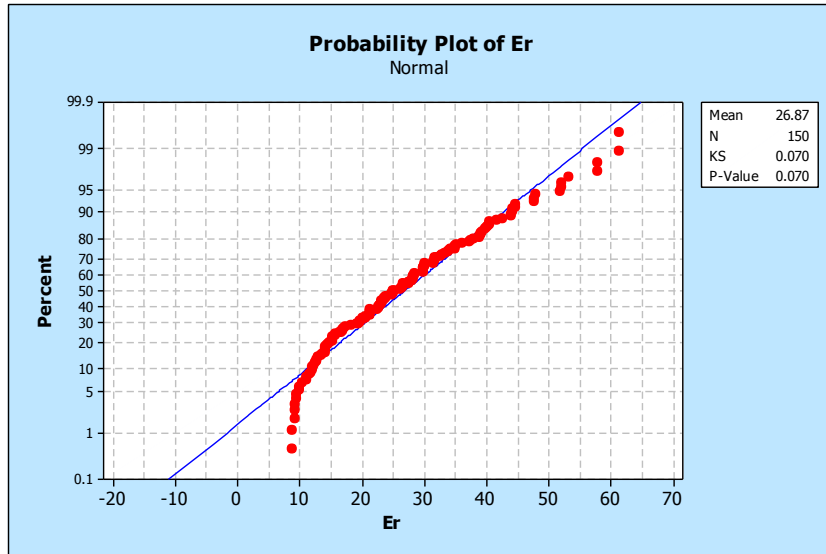
چولگی	کشیدگی	آزمون شاپیرو و ویلک
۰/۶۵	۰/۰۴	۰/۰۷

با استفاده از ماتریس عدم قطعیت و توزیع t ، دامنه‌ای که مدول دگرشکلی واقعی در آن قرار دارد تخمین زده می‌شود. برای این منظور نتایج حاصل از ماتریس عدم قطعیت که از ۱۶۰ درایه تشکیل می‌شود، به عنوان جامعه آماری در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی داده‌ها که از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، باید آزمون نرمال بودن داده‌ها در دو مرحله به شرح زیر انجام شود:

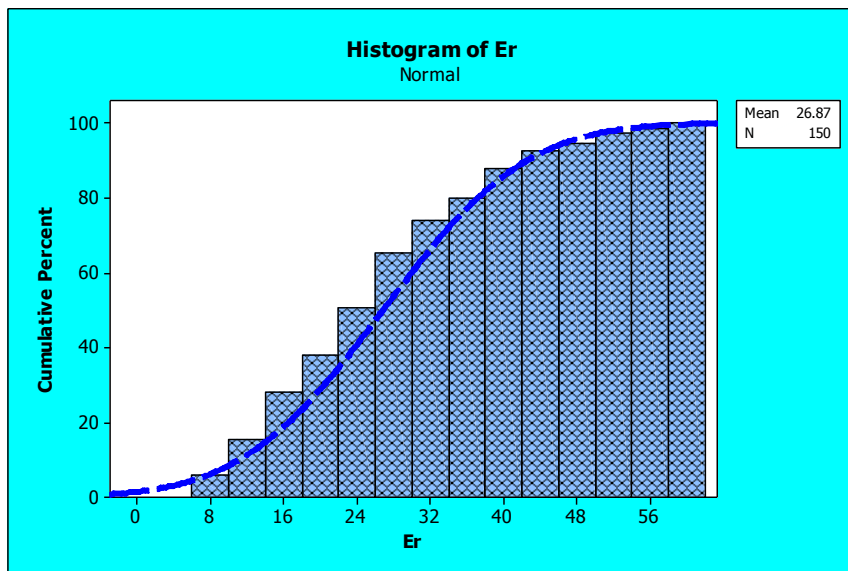
۱- بررسی چولگی و کشیدگی داده‌ها، چنانچه چولگی و کشیدگی نمونه‌ها در دامنه $+2$ تا -2 قرار داشته باشد، مرحله دوم قابل بررسی است [۲۴].

۲- استفاده از آزمون شاپیرو ویلک، در این آزمون برای بررسی نرمال بودن داده‌ها فرض صفر مبتنی بر اینکه توزیع داده‌ها نرمال است را در سطح خطای ۵ درصد آزمایش می‌شود، بنابراین اگر آماره آزمون بزرگ‌تر مساوی ۰/۰۵ تعیین شود، توزیع داده‌ها نرمال خواهد بود. برای آزمون نرمالیت فرض‌های آماری به صورت زیر تنظیم می‌شود [۲۴].

H_0 : توزیع داده‌های مربوط به هر یک از متغیرها نرمال است.



شکل ۶- نرمال بودن داده بر اساس آزمون شاپیرو ویلک



شکل ۷- هیستوگرام فراوانی تجمعی برای جامعه آماری مدول دگرشکلی پیش‌بینی شده از ماتریس عدم قطعیت

[4] 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, pp. 55–63.

[5] Hoek, E., & Diederichs, M.S.; 2006; "Empirical estimation of rock mass modulus". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp. 203–215.

[6] Shen, J., Karakus, M., & Xu, C.; 2012; "A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses". Tunneling and Underground Space Technology, 32, pp. 245–250.

[7] Feng, X., & Jimenez, R.; 2015; "Estimation of deformation modulus of rock masses based on Bayesian model selection and Bayesian updating approach". Engineering Geology, 199, pp. 19–27.

[8] Sari, M., Karpuz, C., & Ayday, C.; 2010; "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites". Computers & Geosciences, 36, PP. 959–969.

[9] Weibull, W.; 1939; "A statistical theory of the strength of materials". Ingeniorsvetenskap Akadmiens Handlingar 151, pp. 5–44.

[10] Kim, K., & Gao, H.; 1995; "Probabilistic approaches to estimating variation in the mechanical properties of rock masses". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences Geomech Abstr, 34, pp. 111–120.

[11] Hoek, E., & Brown, E.T.; 1997; "Practical estimates of rock mass strength". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 34(8), pp. 1165–1186.

[12] Sari, M.; 2009; "The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46, pp. 613–626.

[13] Sari, M., Karpuz, C., & Ayday, C., 2010, "Estimating rock mass properties using Monte Carlo

۴- نتیجه‌گیری

وجود عدم قطعیت در پارامترهای ژئومکانیکی اجتناب‌ناپذیر است و محققان همواره در تلاش برای توسعه روش‌هایی‌اند که نتایج برای تحلیل و طراحی قطعیت بالاتری داشته باشد. مدول دگرشکلی، پارامتری است که در تحلیل و طراحی‌ها کاربرد فراوانی دارد اما عدم قطعیت ناشی از مدل‌های توسعه داده شده و ماهیت ذاتی سنگ باعث می‌شود که نتایج پیش‌بینی شده مورد تردید مهندسان کاربردی قرار گیرد. در این مقاله با توسعه ماتریس عدم قطعیت و روش‌های آماری، سعی شد مدول دگرشکلی با قطعیت بالاتری تخمین زده شده و دامنه‌ای که مدول دگرشکلی در آن قرار دارد تخمین زده شود. در مطالعه موردی، برای تشکیل عناصر ستون اول ماتریس عدم قطعیت از ده مقدار داده شيروانی‌های ماسه‌سنگ سازند کهر استفاده شد و برای تشکیل عناصر سطر اول ماتریس ۱۶ مدل که تنها تابع RMR هستند در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد مدول دگرشکلی حاصل از ماتریس عدم قطعیت که از ۱۶۰ درایه تشکیل شده است، نسبت به نتایج حاصل از مدل‌های تجربی دقیق‌تر و با قابلیت اعتماد بالاتری قرار دارد. همچنین برای تعیین دامنه‌ای که مدول دگرشکلی واقعی در آن قرار دارد، درایه‌های ماتریس به صورت یک جامعه آماری در نظر گرفته شد و با توجه به اینکه این جمعیت از توزیع نرمال پیروی می‌کند، با استفاده از توزیع t و با حد اطمینان ۹۵ درصد مدول دگرشکلی در دامنه‌ی $Er < 30/100 < 23/67$ گیگاپاسکال قرار دارد.

منابع و مراجع

- [1] Dodagoudar, G.R., & Venkatachalam, G.; 2000; "Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory". Computers and Geotechnics, 27, pp. 101–115.
- [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] Kavur, B., Štambuk Cvitanović, N., & Hrženjak, H.; 2015; "Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 73, pp. 102–114

[۲۳] بلورچی، م. ج.، انتظام، ا.، محمودپور، م.، کریم‌نژاد، س.، شمشکی، ا.، «گزارش بررسی خطر سنگ ریزش در جاده چالوس، سازمان زمین‌شناسی کشور»، ۱۳۸۵. گزارش شماره: 1- 85-1-En Geo

[۲۴] آریانژاد، م.، ذهبیون، م.، ۱۳۹۲، «مقدمه‌ای بر احتمالات و آمار کاربردی»، دانشگاه علم و صنعت، چاپ بیست و دوم، تهران.

پی‌نوشت‌ها

1-Galera et al.
2-Read et al.
3-Shen et al.

simulation: Ankara andesites” Computers & Geosciences, 36, pp. 959–969.

[14] Idris, M. A, Saiang, D; Nordlund, E; 2011; “Numerical Analyses of the Effects of Rock Mass Property Variability on Open Stope Stability”, American Rock Mechanics Association.

[۱۵] ربیعی‌وزیری، م.، کریمی‌نسب، س.، محمدی، ح. ر.، ۱۳۹۴، «تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ با استفاده از روش مونت کارلو»، نشریه مهندسی معدن، دوره دهم، شماره ۲۷، صفحه ۶۹–۸۰.

[۱۶] بهبودیان، ج.، ۱۳۹۰، «آمار و احتمال مقدماتی»، آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا، چاپ سیزدهم، مشهد.

[17] Okay Aksoy, C., Geniş, M., Uyar Aldaş, G., Özacar, V., Özer, S., Yılmaz, O., 2012, “A comparative study of the determination of rock mass deformation modulus by using different empirical approaches”, Engineering Geology, 131, 19–28.

[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, pp. 75–80.

[19] 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 2005 International Symposium, Madrid, Spain, pp. 1–25.

[۲۰] علامی، م.، حسینی، م.، ۱۳۹۱، «توسعه روابط تجربی برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ‌های جنوب غربی ایران»، نشریه مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره شانزدهم، صفحه ۷۹–۸۷.

[۲۱] قاضی‌پور، ن.، ارومیه‌ای، ع.، انتظام، ا.، انصاری، ف.، پیروز، م.، ۱۳۸۶، «استفاده از نظریه مخروط افت در ارزیابی خطر سنگ ریزش در مسیر جاده چالوس (پل زنگوله مرزن‌آباد)»، نشریه علوم زمین، سال هفدهم، شماره ۶۶، صفحات ۱۶۰–۱۶۹.

[22] Bieniawski, Z.T.; 1989; “Engineering Rock Mass Classifications”, Wiley, New York.