

پیش‌بینی مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره

مهناز اصلان زاده^۱، مهدی حسینی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

۲- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۲

چکیده

آگاهی از پارامترهای ژئومکانیکی خاک و سنگ در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی از موارد حائز اهمیت می‌باشد. مدول تغییرشکل پذیری توسط آزمایش‌های برجا و روش‌های غیرمستقیم قابل تعیین می‌باشد. در تخمین این مدول به روش غیرمستقیم، روابط تجربی روشی ساده و ارزان هستند اما به دلیل تغییرات نوع سنگ و طبیعت توده‌سنگ استفاده از روابط تجربی در مناطق دیگر جهان عمدتاً با خطا همراه خواهد بود. در این مقاله سعی شده است با استفاده از پارامترهای مدول الاستیک سنگ بکر (E_i) و امتیاز توده‌سنگ (RMR) به تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ (E_m) توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران پرداخته شود. بدین منظور از روش رگرسیون خطی چند متغیره استفاده شده است. پایگاه داده‌های استفاده‌شده شامل ۳۳۳ داده می‌باشد. جهت بررسی عملکرد رابطه و ارزیابی دقت آن از ضریب R^2 (ضریب تعیین) و RMSE (جذر میانگین مربع خطا) استفاده شد. ضریب R^2 برای داده‌ها ۰/۸۱۱ و مقدار RMSE 1921/0 می‌باشد.

کلمات کلیدی

توده‌سنگ، رابطه تجربی، جنوب غربی ایران، مدول تغییرشکل پذیری، رگرسیون خطی چند متغیره

۱- مقدمه

مدول تغییرشکل پذیری توسط آزمایش‌های برجا و روش‌های غیرمستقیم قابل تعیین می‌باشد. در تخمین این مدول به روش غیرمستقیم، روابط تجربی روشی ساده و ارزان هستند اما به دلیل تغییرات نوع سنگ و طبیعت توده‌سنگ استفاده از روابط تجربی در مناطق دیگر جهان عمدتاً با خطا همراه خواهد بود [۱]. برای به دست آوردن این مدول روش‌های متفاوت مستقیم و غیرمستقیم به کار برده می‌شود [۲]. آزمایش‌های صحرایی جزو روش‌های مستقیم هستند، برای تعیین مدول تغییرشکل پذیری حتی الامکان آزمایش طوری اجرا می‌شود که از نظر مقدار بار و جهت بارگذاری شبیه به شرایط واقعی پروژه باشند. همچنین حجم سنگی که مورد آزمایش قرار می‌گیرد باید متناسب با پروژه مورد نظر باشد. به‌طور کلی این آزمایش‌ها را می‌توان به دودسته بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس تقسیم نمود. آزمایش‌های بارگذاری صفحه‌ای و شعاعی جزو دسته آزمایش‌های بزرگ‌مقیاس هستند که نتایج حاصل از آن‌ها نسبت به آزمایش‌های کوچک‌مقیاس، معرف بهتری برای توده‌سنگ می‌باشد؛ اما این روش‌ها پرهزینه بوده و بیشتر در پروژه‌های حساس مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش بارگذاری شعاعی منحصر به پروژه‌هایی است که در آن‌ها تغییرشکل هم‌زمان سنگ در جهات مختلف حائز اهمیت می‌باشد [۲]. آزمایش دیلاتومتری، جک گمانه‌ای و جک تخت جزو آزمایش‌های کوچک‌مقیاس بوده و حجم کمتری از سنگ را درگیر آزمایش می‌کنند. در این تحقیق از نتایج آزمایش دیلاتومتری برای ارائه رابطه استفاده شده است.

در این روش ویژگی‌های تغییرشکل پذیری توده‌سنگ با اعمال فشار به دیواره گمانه توسط دیلاتومتر تعیین می‌گردد. انبساط ایجادشده در گمانه مستقیماً توسط ترانس دیوسرهای کار گذاشته‌شده در دیلاتومتر اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به رابطه بین فشار و اتساع، ویژگی‌های تغییرشکل پذیری توده‌سنگ در منطقه‌ای که دیلاتومتر کار گذاشته‌شده است، محاسبه می‌گردد. با این روش می‌توان ناهمسانگردی تغییرشکل پذیری در صفحه‌ای عمود بر محور گمانه را نیز بررسی نمود. در مورد سنگ‌های با درزه‌داری کم مدول از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$E_d = (1 + V_R) \cdot D \cdot \frac{\Delta P_i}{\Delta D} \quad (1)$$

E_d : مدول تغییرشکل پذیری (MPa)

V_R : ضریب پواسن توده‌سنگ، D : قطر گمانه (m)

P_i : افزایش فشار در بخش مورد نظر (MPa)،

ΔD : میانگین تغییر قطر گمانه (m)

یکی از روش‌های مستقیم تخمین مدول تغییرشکل پذیری استفاده از طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها است. این روابط بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی و سیستم‌های مختلف رده‌بندی توده‌سنگ از قبیل رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ RMR، شاخص توده‌سنگ RMI، شاخص مقاومت زمین‌شناسی GSI، شاخص کیفی سنگ RQD و سیستم رده‌بندی Q و با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا انجام‌شده در نقاط مختلف دنیا برای تعیین مدول دگرشکلی توده‌سنگ ارائه‌شده است. در جدول ۱ تعدادی از روابط تجربی مربوط به برآورد مدول دگرشکلی توده‌سنگ همراه با سال ارائه و نام محققین آورده شده است.

در این مقاله گزارش سدهایی که در جنوب غربی ایران واقع هستند جمع‌آوری شد و مورد تحلیل اولیه قرار گرفت و مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ با استفاده از نتایج داده‌های آزمایش دیلاتومتری محاسبه شد و سپس به کمک روش آماری با استفاده از نرم‌افزار SPSS رابطه‌ای برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری از طریق مقادیر RMR و مدول الاستیسیته سنگ بکر ارائه شد.

۲- جمع‌آوری داده‌ها و ایجاد یک بانک اطلاعاتی

فرآیند آنالیز آماری کمک می‌کند تا پژوهشگر بتواند از داده‌های اولیه، اطلاعات موردنیاز خود را استخراج کند و در صورت لزوم نتایج را تعمیم دهد. اگر حجم داده‌ها زیاد باشد، استفاده از روش‌های مختلف تحلیل‌های آماری به‌صورت دستی بسیار خسته‌کننده و مشکل خواهد بود. امروزه با توجه به وجود انواع مختلف نرم‌افزارهای آماری مشکل مرتفع گردیده و انجام انواع تحلیل‌های پیچیده آماری تسهیل شده است. نرم‌افزار SPSS یکی از قدیمی‌ترین، برنامه‌های کاربردی در زمینه تجزیه و تحلیل‌های آماری است. نخستین نسخه این نرم‌افزار در سال ۱۹۶۸ منتشر شد. SPSS از جمله نرم‌افزارهایی است که برای تحلیل‌های آماری به‌صورت بسیار گسترده‌ای استفاده می‌شود. داده‌های استفاده‌شده در این تحقیق شامل ۳۳۳ نمونه می‌باشد که از آزمایش‌های دیلاتومتری انجام‌شده در پروژه‌های

۲۸ داده، بختیاری ۷۴ داده، تنگ معشوره ۵۰ داده، خرسان ۲، ۶۱ داده، خرسان ۳، ۵۷ داده، سیمره ۵۳ داده و طرح توسعه کارون ۱، ۱۰ داده است. با استفاده از نرم‌افزار SPSS خصوصیات آماری پارامترها شامل میانگین، میانه، نما، انحراف معیار، واریانس و ماکزیمم و مینیمم ۳۳۳ نمونه استفاده شده در مدل، محاسبه شد نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

جنوب غرب ایران جمع‌آوری شده است. دیلاتومتر استفاده شده در آزمایش‌های انجام شده از نوع دیلاتومتر IF096 می‌باشد. برای ارائه روابط تجربی برای توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران، از داده‌های مربوط به آزمایش‌های دیلاتومتری انجام شده در ساختگاه هفت سد بازفت، بختیاری، تنگ معشوره، خرسان ۲، خرسان ۳، سیمره و کارون ۱ که در جنوب غرب ایران واقع هستند، استفاده شده است. تعداد داده‌های مربوط به سد بازفت

جدول ۱: برآورد تجربی مدول دگرشکلی توده‌سنگ با سیستم‌های طبقه‌بندی RMR و Q [۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱]

رابطه	روش
$E_d = \frac{E_i}{100} (0/0028 RMR^2 + 0/9 \exp(\frac{RMR}{22.82}))$	نیکلسون و بیناوسکی (۱۹۹۰)
$E_d = E_i (0/5 [1 - \cos(\pi \frac{RMR}{100})])$	میتری و همکاران (۱۹۹۴)
$E_d = (1-D/2) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(RMR-10)/40}, 0 < D < 1$	هوک و همکاران (۲۰۰۲)
$E_d = 0.0736 e^{0.0755RMR}$	گکاگلو و همکاران (۲۰۰۳)
$E_d = E_i \exp[\frac{(RMR-100)}{17.4}]$	رامامورتی (۲۰۰۴)
$E_d = 3.713 \times 10^{-5} RMR^3$	توسل پور (۱۳۸۵)
$E_d = 147.28 e^{(RMR-100)/24} - 0.202RMR (GPa)$	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)*
$E_d = e^{(RMR-10)/18}$	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = 0.0876 RMR (GPa), RMR \leq 50$	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = 0.0867 RMR + 1.056 (RMR - 50)^2 (GPa), RMR > 50$	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = E_i e^{\frac{(RMR-100)}{36}}$	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = E_i 10^{\frac{((RMR-100)(100-RMR))}{4000 \exp(-\frac{RMR}{100})}}$	سونمز و همکاران (۲۰۰۶)
$E_d = 1.3326 e^{0.0364 RMR}$	چان و همکاران (۲۰۰۹)
$E_d = 0.0003 RMR^3 - 0.0193RMR^2 + 0.3157 RMR + 3.4064$	محمدی و رحمان نژاد (۲۰۰۹)

E_i : (MPa): مقاومت فشاری سنگ بکر σ_{ci} مدول کشسانی سنگ بکر

جدول ۲: ویژگی‌های آماری نمونه‌ها

E_i (GPa)	RMR	ویژگی‌ها
۳۳۳	۳۳۳	تعداد نمونه‌ها
۱۸/۲۸	۷۰	میانگین
۱۵	۷۱	میانه
۱۹	۷۹	نما
۱۴/۲۸	۸/۳۱	انحراف معیار
۲۰۳/۹۲	۶۹/۱۴	واریانس
۰/۷۹۷	۳۷	مینیمم
۸۲	۸۴	ماکزیمم

کلی، بر اساس مقادیر جدول ۵ می‌توان درباره میزان همبستگی متغیرها قضاوت کرد، البته این مقادیر یک قانون ثابت نیستند و به صورت تجربی به دست آمده است. در برخی کتاب‌ها روش‌های دیگری نیز برای تفسیر نتایج آزمون همبستگی ارائه شده است.

جدول ۳: نتایج آزمون P-value

پارامترها	RMR	E_i	E_m
نتایج p-value	۰/۱۱۳	۰/۱۵۴	۰/۱۶

جدول ۴: همبستگی دوه‌دو بین متغیرهای مستقل

متغیرهای مستقل	Log E_i	Log RMR
Log E_i	۱	۰/۱۸۵
Log RMR	۰/۱۸۵	۱

جدول ۵: تفسیر نتایج آزمون همبستگی بین متغیرهای مستقل [۱۲]

ضریب همبستگی	تفسیر
۰-۰/۱۹	خیلی اندک و قابل چشم‌پوشی
۰/۲۰-۰/۳۹	خیلی اندک تا اندک
۰/۴۰-۰/۶۹	متوسط
۰/۷۰-۰/۸۹	زیاد
۰/۹۰-۱	خیلی زیاد

صفر بودن ضریب همبستگی، تنها عدم وجود رابطه‌ی خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد، ولی نمی‌توان مستقل بودن دو متغیر را نیز نتیجه گرفت. هنگامی که ضریب همبستگی پیرسون بین دو متغیر صفر باشد، این متغیرها تنها در صورتی مستقل از یکدیگرند که توزیع متغیرها نرمال باشد [۱۲]. با توجه به اطلاعات جدول ۴ و بررسی آن‌ها با استفاده از جدول ۵، مشخص می‌شود که همبستگی بین متغیر RMR و E_i در رده خیلی اندک و قابل چشم‌پوشی قرار دارد.

برای کنترل کردن اعتبار کلی مدل ساخته شده از آزمون F استفاده می‌شود. از آنجایی که مقدار آماره F از جدول توزیع آن

۳- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در این تحقیق سعی می‌شود با استفاده از تکنیک رگرسیون خطی چند متغیره در نرم‌افزار SPSS بر روی اطلاعات و داده‌های جمع‌آوری شده آنالیزهای لازم انجام گرفته و در نهایت با بررسی ارتباط پارامترهای ورودی با مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ، یک رابطه منطقی و یک معادله جدید رگرسیونی ایجاد کرد.

رگرسیون پرکاربردترین روش آماری است که برای سنجش و ارائه مدل ارتباط متغیر وابسته با متغیر یا متغیرهای مستقل بکار می‌رود. رگرسیون خطی، ضرایب معادله خطی که بزرگ‌ترین هماهنگی با داده‌های مشاهده شده را دارا است، برآورد می‌کند. با استفاده از معادله خط امکان پیشگویی مقادیر بعدی نیز وجود دارد. در معادله رگرسیون یک متغیره، یک متغیر مستقل^۱ و یک متغیر وابسته^۲ داریم. در معادله رگرسیون چند متغیره تعداد متغیرهای مستقل بیش از یکی است.

در این تحلیل با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف، پیروی داده‌ها از توزیع نرمال بررسی شد. فرضیه صفر در این آزمون عبارت است از پیروی داده‌ها از توزیع نرمال و فرضیه مقابل آن عدم پیروی داده‌ها از توزیع موردنظر است.

مقدار p-value (سطح معنی‌داری) در این آزمون برای هر یک از متغیرها در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به این که سطح معنی‌داری برای هر پنج متغیر بیشتر از ۰/۰۵ است، فرضیه صفر پذیرفته می‌شود به این معنا که توزیع داده‌ها نرمال است.

آنالیز داده‌ها به روش رگرسیون خطی چند متغیره انجام می‌شود، برای همگرایی بیش‌تر میان متغیرهای مستقل با متغیر وابسته از لگاریتم داده‌ها برای به دست آوردن رابطه استفاده شده است. در این تحلیل متغیر وابسته لگاریتم مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ و متغیرهای مستقل مدول الاستیک و امتیاز توده‌سنگ هستند. نتایج بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل نشان می‌دهد که بین پارامترها به صورت دوه‌دو روابطی با ضریب همبستگی ۰/۱۸۵ مشاهده می‌شود. نتایج حاصل از محاسبه و بررسی همبستگی بین متغیرهای مستقل در جدول ۴ نشان داده شده است. بر اساس یک قاعده

^۱- Independent

^۲- Dependent

برابر ۲/۶۸ و میزان F محاسبه‌شده مدل ۳۱۷/۴۲۸ است (بزرگ‌تر از F جدول توزیع است) و با توجه به این که سطح معنی‌داری (P-value) در این آزمون کمتر از ۰/۰۵ است، فرضیه صفر رد و فرضیه مقابل آن پذیرفته می‌شود. بدان معنا که حداقل یکی از متغیرهای مستقل نظیر RMR و مدول الاستیسیته سنگ بکر با صفر تفاوت داشته و بر مدول تغییرشکل پذیری تأثیر دارد. پس از بررسی اعتبار کلی مدل، اعتبار هر یک از متغیرهای مستقل به‌طور جداگانه با آزمون t مشخص می‌شود. مقادیر آماره t و سطح معنی‌داری در این آزمون برای هر یک از متغیرهای مستقل در جدول زیر نشان داده شده است. بزرگ‌تر بودن آماره t یک متغیر مستقل از مقدار جدول توزیع آن و کوچک‌تر بودن سطح معنی‌داری از ۰/۰۵ نشان می‌دهد ضریب به‌دست‌آمده برای آن متغیر به لحاظ آماری معنی‌دار است. در مدل ساخته‌شده مقدار t از جدول توزیع ۱/۹۵۶ می‌باشد؛ بنابراین با توجه به اینکه قدر مطلق آماره t برای متغیرهای مستقل RMR و E_i بزرگ‌تر از t جدول توزیع است و سطح معنی‌داری در این آزمون برای هر سه متغیر با صفر تفاوت داشته و این پارامترها تأثیر معنی‌داری بر

مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ دارند. ضریب تعیین مدل نیز بیانگر آن است که ۸۱/۱ درصد تغییرات مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ با تغییر RMR و مدول الاستیک سنگ بکر قابل توجیه است. در نهایت رابطه زیر برای پیش‌بینی مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ ارائه می‌شود. نتایج آنالیز داده‌ها به روش رگرسیون خطی چند متغیره در جدول ۶ نشان داده شده است. با استفاده از مقادیر به‌دست‌آمده از جدول ۶ رابطه (۲) برای پیش‌بینی مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ ارائه شد. نمودار مقادیر مدول پیش‌بینی شده با استفاده از این رابطه در مقابل مقادیر حاصل از آزمایش دیلاتومتری در شکل ۱ نشان داده شده است.

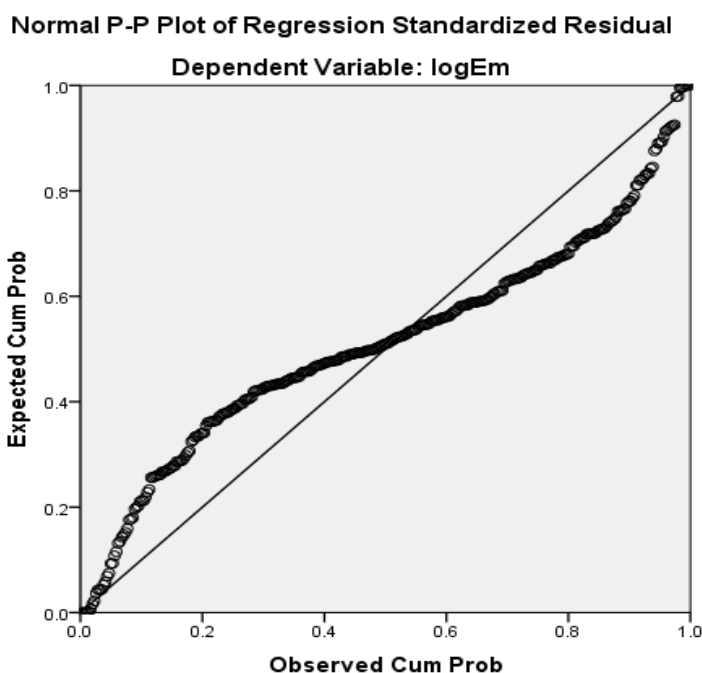
$$\text{Log } E_m = -0.674 + 0.406 \log RMR + 0.842 \log E_i \quad (2)$$

E_m : مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ (GPa)
 E_i : مدول الاستیک سنگ بکر (GPa)

جدول ۶: نتایج آنالیز داده‌ها به روش رگرسیون خطی چند متغیره

نتایج آزمون ANOVA همان آزمون F می‌باشد		آماره F	۳۱۷/۴۲۸	
		P-value	۰/۰۰	
پارامترهای مدل	ضریب	خطای معیار	آماره t	P-value
عرض از مبدأ	-۰/۶۷۴	۰/۳۶۹	-۱/۸۲۸	۰/۰۶۹
RMR	۰/۴۰۶	۰/۲۰۷	۱/۹۵۶	۰/۵۱
E_i	۰/۸۴۲	۰/۰۳۷	۲۲/۷۰۷	۰/۰۰

$R^2 = 0.811$



شکل ۱: مقادیر پیش‌بینی شده مدول تغییرشکل پذیری با استفاده از رگرسیون

N : تعداد آزمایش‌های برجای انجام شده می‌باشد.

بر اساس این روش هر رابطه‌ای که مقدار RMSE آن به صفر نزدیک‌تر باشد دارای دقت تخمین بالاتر و بهتری می‌باشد؛ در واقع مقدار RMSE بیانگر این است که مقدار مدول محاسبه شده توسط روابط ارائه شده چه میزان از مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های برجای انحراف دارد. مقدار RMSE برای مدل رگرسیون میزان $0/1921$ می‌باشد. در شکل ۲ میزان خطای رابطه ۲ و مدل‌های نیکلسون و بیناویسکی، میتری و همکاران، رامامورتی، گالرا و همکاران نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نمایان است میزان خطای رابطه ۲ برای تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران در مقایسه با مدل‌های دیگر بسیار کمتر می‌باشد.

۴- اعتبار سنجی رابطه به دست آمده

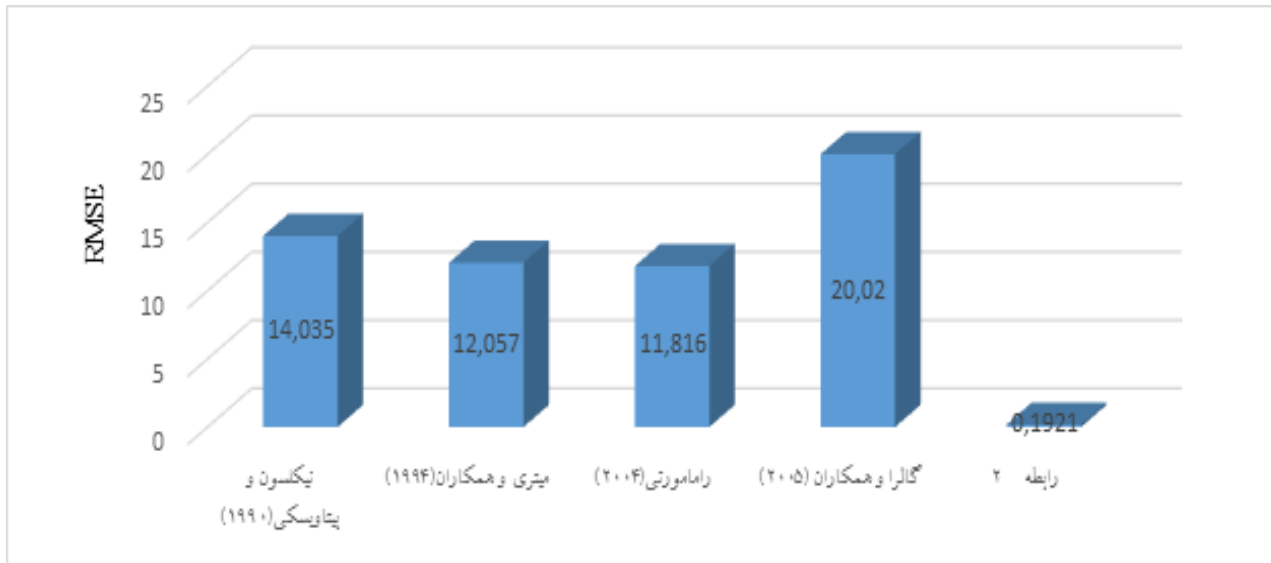
به منظور ارزیابی اعتبار رابطه ۲ در مقایسه با روابط دیگر در تخمین مدول تغییرشکل پذیری توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران، از جذر میانگین مربع خطاها (RMSE) و ضریب همبستگی استفاده می‌شود؛ مقدار RMSE از رابطه ۳ به دست می‌آید [۱۳].

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_{m_i} - E'_{m_i})^2}{N}} \quad (3)$$

که در آن:

E_{m_i} : مدول تغییرشکل پذیری اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های برجای

E'_{m_i} : مدول تغییرشکل پذیری محاسبه شده توسط مدل رگرسیون



شکل ۲: مقایسه رابطه ۲ پیشنهاد شده در این مقاله با روابط سایر محققین

۵- نتیجه‌گیری

تغییر شکل توده‌سنگ با تغییر RMR و مدول الاستیک سنگ بکر قابل توجیه است. مقدار جذر میانگین مربع خطا برای روابط مختلف و رابطه ارائه شده محاسبه شد. مقدار جذر میانگین مربع خطا برای رابطه به دست آمده در این مقاله ۰/۱۹۲۱ بوده که در مقایسه با روابط به دست آمده توسط محققین دیگر، نشان می‌دهد که مدول تغییر شکل توده‌سنگ را با استفاده از رابطه ارائه شده با خطای کمتری می‌توان تخمین زد.

در این مقاله ضمن معرفی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تعیین مدول تغییر شکل پذیری، روش‌های غیرمستقیم تعیین مدول تغییر شکل پذیری همانند استفاده از طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها، به دلیل هزینه کم‌تر و سرعت بالاتر مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از نتایج حاصل از ۳۳۳ آزمایش دیلاتومتری که در توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران انجام شده استفاده شده است. در روش رگرسیون خطی چند متغیره ضریب همبستگی رابطه بیانگر آن است که ۸۱/۱ درصد تغییرات مدول

سید داود، ۱۳۸۲، "رده‌بندی توده‌سنگ روشی کاربردی در مهندسی عمران"، انتشارات فن‌آوران.

[4] Galera Jose M., Alvarez M., Bieniawski Z.T. (2005) "Evaluation of The Deformation Modulus of Rock Masses: Comparison of Pressuremeter and Dilatometer Tests with RMR Prediction", ISP5-PRESSIO International Symposium.

[۵] رحیمی، بهروز، شهریار، کوروش، (۱۳۸۸) "برآورد تجربی پارامترهای ژئومکانیکی و تنش‌های برجای توده‌سنگ: مسیر تونل شماره یک راه‌آهن قزوین - رشت"، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس.

۶- مراجع

[۱] اسماعیلی، م. پسندی، م. هاشمی، م. شریفی، ا. (۱۳۹۲) "پیش‌بینی مدول الاستیسیته سنگ بکر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی" هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی نیک‌بخت، زاهدان، ایران.

[۲] فهیمی فر، الف. سروش، ح. (۱۳۹۰) "آزمایش‌های مکانیک سنگ (جلد دوم)" (چاپ دوم)، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۳] سینگ، گونل، ر. ک؛ (ترجمه اجل لوئیان، رسول و محمدی،

- [10] Mohammadi Hamid., Rahmannejad Reza., (2010) "The Estimation of Rock Mass Deformation Modulus Using Regression and Artificial Neural Networks Analysis", The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 35, No. 1A, pp. 205-217.
- [11] Hoek E., Carranza Torres., C.T., Corkum, B. (2002) "Hoek-Brown Failure Criterion Edition", Proceedings of the fifth North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, vol. 1, pp. 267-73.
- [۱۲] کرلینجر، پدهازر، (۱۳۸۸) " رگرسیون چند متغیری در پژوهش رفتاری " (جلد دوم)، ترجمه دکتر حسن پاشا شریفی، انتشارات آوای نور.
- [13] Minaeian, B., Ahangari, K., (2013) "Estimation of uniaxial compressive strength based on P-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method", Arab J Geosci, 6:1925-1931.
- [6] Gokceoglu C., Sonmez H., Kayabasi A. (2003) "Predicting The Deformation Moduli of Rock Masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 40, pp. 701-710.
- [7] Byung Sik Chun., Woong Ryul Ryu., Myung, Sagong., Jong NamDo. (2009) "Indirect Estimation of The Rock Deformation Modulus base on Polynomial and Multiple Regression Analyses of The RMR System" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 46, pp. 649-658.
- [8] 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, Vol. 43, pp. 224-235.
- [۹] توسل پور، امیر. (۱۳۸۵) "تخمین مدول تغییر شکل پذیری برجا با استفاده از پارامتر ژئومکانیکی توده سنگ"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

Prediction of Deformation Modulus of Rock Masses in Southwest Iran Using Multivariate Linear Regression

Aslanzadeh, M.¹, hosseini, M.²

1. M.Sc. student, Department of Mining Engineering, Imam Khomeini International University
 2. Associate Professor, Department of Mining Engineering, Imam Khomeini International University

Received: Apr. 2016

Accepted: Jan. 2017

KEYWORDS

Rock masses
 Empirical relation
 Southwest Iran
 Deformation Modulus
 Multivariate linear regression

ABSTRACT

Summary

Knowing geomechanical parameters of soil and rock is among the important items of designing and constructing engineering structures. Deformation modulus may be determined through in-situ tests and indirect methods. For indirect estimating of this module, empirical relations are simple and inexpensive methods, but their uses in other parts of the world were associated with errors due to the variation of rock type and the nature of rock mass. In the present article we attempted to estimate the deformation modulus (E_m) of the rock masses of southwestern Iran by using intact rock elastic modulus (E_i) and Rock Mass Rating (RMR) parameters. To do that, the multivariable linear

regression method was used. The database used included 333 data. In order to study the relation performance and to evaluate its accuracy, R^2 coefficient (coefficient of determination) and RMSE (root-mean-square error) were used. For this data R^2 coefficient was 0.811 and RMSE value was 0.1921.

Introduction

One of the indirect methods of estimating deformation modulus is using engineering classification of rocks. These relations are provided for determining deformation modulus of rock mass based on geomechanical parameters and various rock mass classification systems such as Rock Mass rating (RMR), Rock Mass Index (RMi), Geological Strength Index (GSI), Rock Quality Designation (RQD) and Q classification system, and by using in-place tests results done at different places of the world. Some of the empirical relations for estimation of deformation modulus of rock mass are presented in Table 1 along with the year of introduction and the researchers' names.

Table 1. Some of the empirical relations for estimation of deformation modulus of rock mass

Researchers' Names	Empirical Relation
Hoek et al.	$E_d = (1-D/2) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(RMR-10)/40}, 0 < D < 1$
Gokceoglu et al.	$E_d = 0.0736 e^{0.0755RMR}$
Galera et al.	$E_d = 147.28 e^{(RMR-100)/24} - 0.202RMR$
Sonmez et al.	$E_d = E_i 10^{\left\{ \frac{(RMR-100)(100-RMR)}{4000 \exp(-\frac{RMR}{100})} \right\}}$
Mohammadi and Rahmancejad	$E_d = 0.0003 RMR^3 - 0.0193RMR^2 + 0.3157 RMR + 3.4064$

E_d : deformation modulus of rock mass (GPa), σ_{ci} : Uniaxial compressive strength of intact rock

Methodology and Approaches

The data used in this research included 333 samples which were obtained from dilatometer tests done in the projects locating at the southwest of Iran. The dilatometer used in these tests was of IF096 Type. To introduce empirical relation for rock masses of southwestern Iran, the results of dilatometer tests performed in seven dam sites including Bazoft, Bakhtyari, Tang Mashooreh, Khersan 2, Khersan 3, Seymareh and Karoon 1, which were located at southwest of Iran, were used. The numbers of data for each of the dams were 28 data for Bazoft Dam, 74 data for Bakhtyari Dam, 50 data for Tang Mashooreh, 61 data for Khersan 2, 57 data for Khersan 3, 53 data for Seymareh, and 10 data for the development plan of Karoon 1.

In this research, we attempted to do the required analysis on the gathered data and by using multivariable linear regression technic in SPSS Software and finally, to make a logical relation and a new regression equation by studying the relation between input parameters and the deformation modulus of the rock mass.

Results and Conclusions

Equation 1 was achieved for deformation modulus of rock mass based on the statistical analysis.

$$\text{Log } E_m = -0.674 + 0.406 \log \text{RMR} + 0.842 \log E_i \quad (1)$$

Where:

E_m , E_i and RMR are deformation modulus of rock mass (in GPa), Elastic modulus of intact rock (in GPa) and rock mass rating, respectively.

In multivariable linear regression method, the correlation coefficient indicated that 81.1 percent of the rock mass deformation modulus variations might be justified by variations in RMR and elastic modulus of intact rock. The value of root-mean-square error was calculated for different relations as well as the introduced relation. The value of root-mean-square error for the relation obtained in this article was 0.1921 which showed that the deformation modulus of rock mass could be estimated with less error than by other researchers' relations.