

ارائه مدل تجربی جدید برای تخمین مدول دگرشکل پذیری توده سنگ

(مطالعه موردی: سد خراسان ۲)

سمیه کریم دوست^۱، حمید مهرنهاد^{۲*}، حمیدرضا نجاتی^۳

دریافت مقاله: ۹۶/۰۹/۰۸ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۱/۲۷

چکیده

مدول تغییر شکل پذیری سنگ‌ها در طراحی بسیاری از سازه‌های سنگی مثل پی‌ها و یا حفاریات زیرزمینی استفاده می‌شود؛ تعیین این ویژگی از جمله مباحث مهم در زمین‌شناسی مهندسی محسوب می‌شود. حضور ناپیوستگی‌ها در سنگ به‌عنوان عاملی مهم و تأثیرگذار در مدول تغییر شکل پذیری سنگ شناخته شده است. روش‌هایی که جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری به‌صورت مستقیم استفاده می‌شوند، عمدتاً پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند، از این رو سعی بر تخمین مدول تغییر شکل پذیری با استفاده از روش‌های غیرمستقیم می‌شود. در اکثر پژوهش‌هایی که تعیین مدول تغییر شکل پذیری به‌صورت غیرمستقیم انجام گرفته است، از سیستم‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ به‌منظور تخمین مدول تغییر شکل پذیری استفاده شده است. در این پژوهش سعی بر ارائه رابطه‌ای جهت تخمین مدول تغییر شکل پذیری توسط پارامترهای ژئومکانیکی سنگ است، بدین منظور روی ۸۸ نمونه از داده‌های آزمایش دیلاتومتری در ساختگاه سد خراسان ۲ با استفاده از نرم‌افزار SPSS مطالعات آماری انجام شده و برای انتخاب مدل رگرسیونی مناسب از شاخص‌های آماری متداول استفاده شده است. از این رو، ابتدا داده‌های موجود در نرم‌افزار SPSS تحلیل حساسیت و مهمترین پارامترهای تخمین گر مدول‌های دیلاتومتری، شناسایی شدند. سپس، از روش‌های مختلف تخمین، برای تخمین این مدول‌ها کمک گرفته شد. نتایج حاصله حاکی از برتری نسبی اعتبار مدل‌های برازش شده رگرسیون غیر خطی نسبت به نوع خطی می‌باشد. به دنبال مدل چند متغیره غیر خطی ترکیبی به همراه مدول الاستیسیته دینامیکی، مدل چند متغیره غیر خطی توانی، مدل چند متغیره غیر خطی ترکیبی، مدل چند متغیره غیر خطی نمایی و مدل چند متغیره خطی، در مراحل بعدی اعتبار قرار گرفته شد. در نهایت با استفاده از رگرسیون گیری چندمتغیره رابطه‌ای متشکل از پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ و مدول الاستیسیته دینامیکی، با ضریب تعیین ۰/۸۶۵، به‌عنوان رابطه بهینه جهت تخمین مدول تغییر شکل پذیری برگزیده شد.

واژه‌های کلیدی: مدول تغییر شکل پذیری، تحلیل آماری، رگرسیون چندمتغیره.

^۱. کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه یزد sm_karimdoost@yahoo.com

^۲. دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه یزد hmehrnhad@yazd.ac.ir

^۳. استادیار گروه مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس h.nejati@modares.ac.ir

۱. مقدمه

آگاهی از پارامترهای ژئوتکنیکی خاک و سنگ در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی از موارد حائز اهمیت است. این پارامترها توسط انجام آزمایش‌های برجا و آزمایشگاهی تعیین می‌گردند. پارامتر مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ از جمله پارامترهای مهم در طراحی انواع سازه‌ها است. امروز با توجه به اهمیت پارامتر مدول تغییر شکل پذیری در توصیف رفتار مکانیکی توده‌سنگ تحت فشار، از این پارامتر به‌عنوان پارامتر ورودی در اکثر آنالیزهای عددی المان محدود و المان مرزی، به‌منظور مطالعه توزیع تنش و جابجایی در اطراف حفاریات زیرزمینی استفاده می‌شود (Bieniawski, 1989).

این پارامتر توسط آزمایش‌های برجا نظیر آزمایش دیلاتومتری، بارگذاری شعاعی و آزمایش جک صفحه‌ای و انواع آزمایش‌های دیگر قابل اندازه‌گیری است. آزمایش‌های برجا به علت شرایط غیرقابل پیش‌بینی سازند، هزینه بالا، مشکلات عملیاتی و زمان‌بر بودن، در اجرا با مشکل مواجه می‌شوند. بدین علت بسته به نوع و اهمیت پروژه و یا در مراحل ابتدایی مطالعات پروژه‌های مهم، می‌توان با روشهای غیرمستقیم و به کمک پارامترهای ژئوتکنیکی توده‌سنگ، مدول تغییر شکل پذیری را تخمین زد.

امروزه روشهایی چون رگرسیون تک متغیره، رگرسیون چند متغیره و روشهای هوشمندی نظیر شبکه‌های عصبی، روشهای عددی، منطق فازی و الگوریتم ژنتیک در مهندسی سنگ از مهمترین روشهای غیر مستقیم اندازه‌گیری پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ می‌باشند. برخی محققین مانند یاگیز و همکاران (Yagiz et al., 2012) و همچنین ان جی و همکاران (Ng et al., 2015)، سعی بر پیش‌بینی مقاومت تک

محوره سنگ با تکیه بر خصوصیات فیزیکی سنگ (سرعت موج در سنگ، تخلخل) و شاخص توده سنگ نموده‌اند. محققین دیگری به کمک روشهای آماری و با استفاده از رگرسیون گیری چند متغیره و همزمان استفاده از روش شبکه عصبی، مطالعه مقایسه‌ای را جهت برآورد مدول تغییر شکل انجام داده‌اند (اجل لوثیان و همکاران، ۱۳۹۲، Alemdage et al., 2015, Gholamnejad et al., 2013).

نجاتی و همکاران (Nejati et al., 2014)، چون و همکاران (Chun et al., 2008) نیز از سیستم طبقه بندی RMR برای پیش‌بینی مدول تغییر شکل پذیری سنگ استفاده نموده‌اند. نوریان و همکاران (Noorian et al., 2013)، جهت تعیین خصوصیات مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ از روش‌های عددی دوبعدی و مدل اجزاء محدود استفاده کرده‌اند. ساری (Sari, 2009)، به کمک تکنیک مدل‌سازی تصادفی جهت کمی‌سازی پارامترهای مهندسی توده‌سنگ مانند مدول تغییر شکل‌پذیری و مقاومت در سنگ‌های آذرآواری، سعی بر تخمین مدول تغییر شکل نموده‌است.

در این تحقیق سعی بر این بوده‌است که ضمن ارائه روابط موجود (جدول ۱)، معادلات جدیدی با استفاده از آزمایش دیلاتومتری و انطباق مدول تغییر شکل‌پذیری حاصل از آن با خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه که در شرایط مختلف و سازندهای گوناگون انجام شده‌است، ارائه گردد. بدین منظور از نرم‌افزار SPSS، برای تحلیل‌های آماری استفاده شده‌است. شایان ذکر است در جدول مذکور بعلت استفاده از پارامترهای RMR در تحقیق حاضر جهت تخمین مدول، به معادلاتی که مبنای کار آنها کاربرد RMR است، اشاره شده‌است.

جدول ۱. روابط ارائه شده به کمک پارامتر RMR جهت تخمین مدول تغییر شکل

منابع	پارامترهای مورد نیاز	روابط
Bieniawski (1978)	RMR	$E_m = 2RMR - 100, \text{ For } RMR > 50$
Serafim and pereira (1983)	RMR	$E_m = 10^{(RMR-10)/40}, \text{ For } RMR < 50$
Nicholson and Bieniawski (1990)	RMR و E_i	$E_m = \frac{E_i}{100 \left(0.0028RMR^2 + 0.9 \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right) \right)}$
Mitri et al. (1994)	RMR و E_i	$E_m = \frac{E_i}{0.5 \left(1 - \cos\left(\frac{nRMR}{100}\right) \right)}$
Read et al. (1999)	RMR	$E_m = 0.1 \left(\frac{RMR}{10} \right)^3$
Hoek et al. (2002)	σ_{ci} و D, RMR	$E_m = \left(1 - \frac{D}{2} \right) \left(\frac{\sigma_{ci}}{100} \right)^{0.5} \times 10^{\left(\frac{RMR-10}{40} \right)}$
Nejati et al. (2014)	R_5 و R_4 , R_3 , R_2 , R_1	$E_{rm} = -7.192 + 0.06469R_1 + 0.20481R_2 + 0.30974R_3 + 0.38384R_4 + 0.01716R_5$

کیلومتر به روستای شملک در ساحل راست رودخانه و محور سد امکان پذیر است.

چینه شناسی ساختگاه خرسان ۲، شامل ۳ واحد سنگ چینه‌ای (سازند) مختلف از پایین به بالا شامل آسماری (پائینی، میانی و بالایی)، گچساران، آجاجاری و نهشته‌های کواترنری شامل آبشست‌های دامنه‌ای، سنگ ریزش‌ها و ابرفت‌های رودخانه‌ای است. تقریباً تمام سازه‌های ساختگاه سد به جز نیروگاه سطحی، در آسماری بالایی قرار دارد که از آهک‌های ضخیم تا متوسط لایه، با لایه‌بندی منظم و درصد کمی از آهک‌های نازک لایه تا آهک‌های مارنی تشکیل یافته است. رنگ هوازده این سنگ‌ها قهوه‌ای روشن و رنگ مقاطع تازه و غیر هوازده از نخودی روشن تا خاکستری است. موقعیت سازه نیروگاه سطحی بر روی آسماری میانی طراحی شده است. این بخش از آسماری شامل تناوبی از آهک‌های خاکستری متمایل به سبز تا کرم رنگ (در آهک‌های کریستالین)، متوسط تا نازک لایه، آهک مارنی و مارن است. رخنمون آسماری زیرین که از آهک ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ نخودی روشن تشکیل شده است در پائین دست مجموعه سازه‌های طرح و سازند گچساران که شامل تناوبی از رسوبات تبخیری (انیدریت و ژیپس) و میان لایه‌های مارن‌های قرمز تا خاکستری، همراه با لایه‌های نازک آهک ماسه‌ای است، در بالادست جانمایی سازه

که در روابط فوق: E_m (GPa)، مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ؛ RMR، سیستم طبقه‌بندی توده سنگ بیناوسکی، σ_{ci} (MPa)، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر؛ D، فاکتور آتشیاری؛ R_1 امتیاز مربوط به UCS؛ R_2 امتیاز مربوط به RQD؛ R_3 امتیاز مربوط به فاصله درزه‌ها؛ R_4 امتیاز مربوط به شرایط درزه‌ها و R_5 امتیاز مربوط به آب زیرزمینی می باشد.

۲. زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

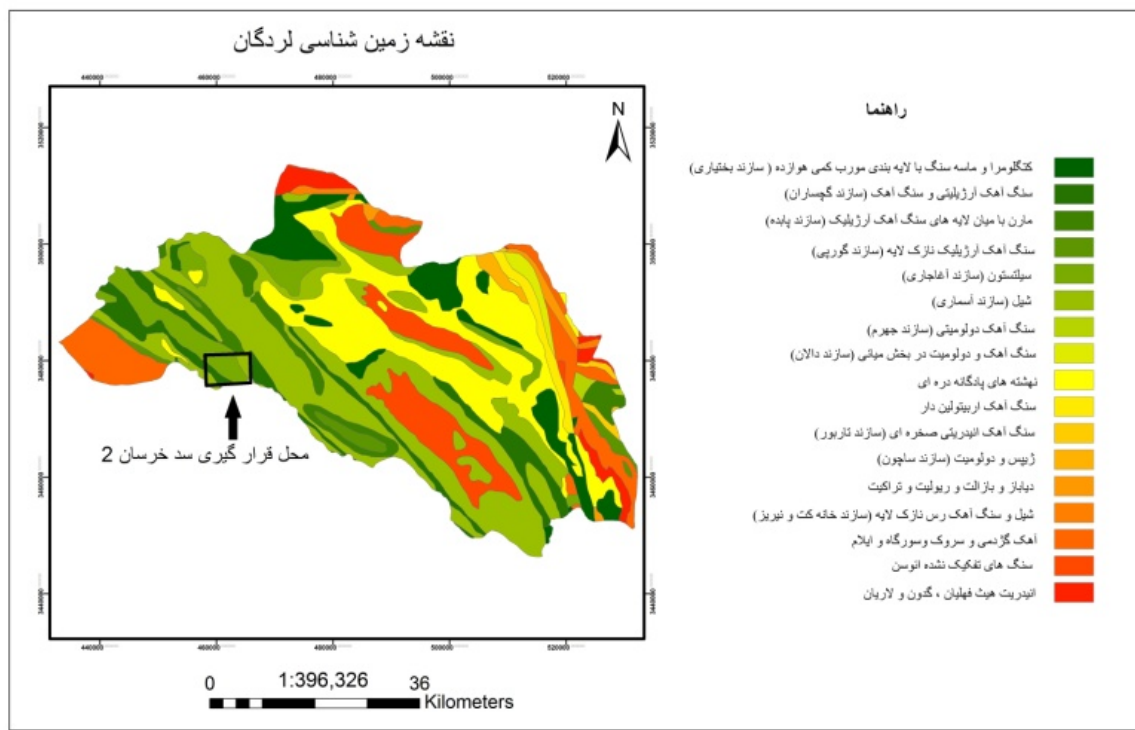
محل سد خرسان ۲ در فاصله حدود ۶۰ کیلومتری جنوب باختری شهرستان لردگان در استان چهارمحال و بختیاری و

بر روی رودخانه خرسان واقع می‌گردد. ساختگاه سد خرسان ۲، بر روی رودخانه خرسان به مختصات ۳۱/۲۵ درجه عرض شمالی و ۵۰/۳۶ درجه طول خاوری در ناحیه جنوب باختری ایران در ارتفاعات زاگرس واقع شده است.

نقشه زمین شناسی سد مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. دستیابی به محل سد از طریق جاده آسفالت لردگان به روستاهای قلعه مدرسه و آبچنار به طول حدود ۵۰ کیلومتر و از روستای آبچنار از طریق جاده خاکی به طول حدود ۹

سیمان رسی تا ماسه‌ای بوده، در ابتدای ورود به دره و در شمال روستای شملک (هسته ناودیس سرخ) قرار دارد.

فرازبند و در حد فاصل آهک‌های آسماری و سازند آغاچاری دیده می‌شود و تشکیلات آغاچاری که شامل تناوبی از مارن قرمز و ماسه سنگ ریزدانه با میان لایه‌هایی از کنگلومرای با



شکل ۱. نقشه زمین شناسی ساختگاه سد خرسان ۲

سپس با وارد کردن هوای فشرده به فضای حدفاصل بخش میانی فلزی و روکش لاستیکی، به جداره گمانه با مقادیر حداکثر ۳، ۷ و ۱۰ مگا پاسکال و به صورت پله‌ای فشار اعمال و مقادیر تغییر شکل پذیری جداره گمانه در هر مرحله ثبت می‌گردد.

از مجموع ۱۴۹ داده حاصل از آزمایش دیلاتومتری که مقدار مدول تغییر شکل را در جناح چپ و راست سد مشخص می‌کنند، تنها امکان تطابق ۸۸ مورد از نتایج آزمایش دیلاتومتری با دیگر اطلاعات حاصل از گمانه‌های اکتشافی و برداشت‌های صحرائی وجود داشت. نتایج به دست آمده از آزمایشات آزمایشگاهی و صحرائی را می‌توان به دو صورت کمی و کیفی تقسیم‌بندی نمود (جدول ۲)، منظور از داده‌های کمی پارامترهای مدول تغییر شکل پذیری، مدول الاستیسیته و RQD، مقاومت فشاری تک‌محوره می‌باشند که به صورت مطلق دارای مقدار می‌باشند و منظور از داده‌های کیفی مقادیر اختصاص یافته به پارامترهای شرایط ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری

۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی توده سنگ‌های ساختگاه عملیات اکتشافی انجام‌شده در مطالعات مرحله اول طرح سد و نیروگاه خرسان ۲ شامل حفر گمانه‌ها و گالری‌های اکتشافی، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل آزمایش مقاومت تراکمی تک محوری (UCS) و آزمایش تعیین سرعت امواج فشاری و برشی در سنگ (V_p, V_s) و صحرائی شامل دیلاتومتری، تعیین شاخص کیفی توده سنگ (RQD)، بررسی وضعیت ناپیوستگی‌ها (J_c)، فاصله داری ناپیوستگی‌ها (J_s) و بررسی وضعیت آب زیرزمینی (W_c) جهت تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده‌سنگ از طریق سیستم طبقه بندی توده سنگ RMR، است.

در این پروژه جهت تعیین مدول‌های تغییر شکل پذیری توده‌سنگ از دیلاتومتر انعطاف‌پذیر و روش اندازه‌گیری تغییر حجم استفاده شده است. بدین صورت که درون گمانه‌هایی با قطر ۱۰۱ میلی‌متر و عمق از پیش تعیین شده‌ای، دیلاتومتر بصورت یک استوانه فلزی با روکش لاستیکی فرستاده شده،

مدل‌های احتمالاتی، تمامی داده‌های مورد مطالعه، تصحیح شده‌اند و مقادیر خارج از ردیف که فاصله غیرمنطقی با سایر داده‌ها داشتند، تا حد امکان از محاسبات نهایی تخمین حذف شدند (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۸).

نایبوستگی‌ها و هیدرولوژی محیط است که مقدار اختصاص یافته به آن‌ها بر اساس امتیاز در نظر گرفته شده مطابق طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) است. لازم به ذکر است در این قسمت از تحقیق پس از انجام آزمایشات و جمع آوری نتایج که به منظور بالا رفتن اعتبار

جدول ۲. معرفی پارامترهای آزمایشگاهی و صحرایی توده سنگ ساختگاه سد خرسان ۲ (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۸)

تعداد داده‌ها	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	پارامترهای مورد مطالعه
۸۸	۰/۶۸	۱۲/۰۰	۵/۴۱	۲/۹۰	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)
۸۸	۱/۲۴	۱۹/۴۵	۷/۴۹	۳/۷۵	مدول الاستیسیته دینامیکی (GPa)
۸۸	۵۹/۰۰	۲۳۰/۰۰	۱۰۰/۳۴	۳۰/۷۳	مقاومت فشاری تک محوری (MPa)
۸۸	۱۹	۱۰۰/۰۰	۶۲/۱۷	۲۴/۷	(RQD%)
۸۸	۹/۰۰	۳۰/۰۰	۱۹/۷۱	۶/۲۲	شرایط نایبوستگی‌ها
۸۸	۵	۲۰	۱۲/۰۴	۵/۱۳	(فاصله نایبوستگی‌ها (m))

۳) بررسی معناداری رابطه و عدم تصادفی بودن مقادیر پارامترهای مستقل به کمک آزمون F و t و بررسی این آزمون‌ها با آماره Sig.

۴) بررسی عامل تورم واریانس (VIF) و ضریب حداقل تحمل (Telorance) به منظور مشخص نمودن سهم تعیین هر متغیر توسط پارامترهای دیگر.

۵) تحلیل جدول ANOVA به منظور اطمینان معناداری ضریب تعیین گزارش شده از این جدول استفاده شد، به این صورت که با مقایسه مجموع مربعات رگرسیون با مجموع مربعات باقیمانده، سهم هم معادله در بیان تغییرات مدول دگرشکلی مقایسه می‌شود.

۶) بررسی نمودار P-P و هیستوگرام خطاهای باقی مانده. در پایان از تعداد ۵۸ داده برای ارائه مدل و از تعداد ۳۰ داده برای اعتبار سنجی آن استفاده و نتایج مقایسه شد.

۵. بحث و نتایج

در ابتدا به منظور بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه بر مدول تغییر شکل پذیری، پارامترها به صورت جداگانه (مدل

۴. تجزیه و تحلیل آماری و پردازش داده‌ها

به منظور ارائه رابطه‌ای جهت تخمین مدول تغییر شکل پذیری، از نرم افزار SPSS استفاده شد که علاوه بر سهولت در کاربرد، یکی از قدرتمندترین ابزارها جهت تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها به شمار می‌آید. یادگیری آسان، سادگی استفاده و قدرت بالا در انجام محاسبات پیچیده، SPSS را به یکی از رایج‌ترین بسته‌های نرم‌افزاری مورد استفاده در تجزیه و تحلیل داده‌های آماری، مبدل نموده است. یکی از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌تواند به انجام عملیات محاسباتی مثل رگرسیون چند متغیره، آنالیز مؤلفه‌های اصلی و آنالیز تابع تشخیص اشاره کرد (هوشنگ، ۱۳۹۴).

در ابتدای تحلیل، از مدل‌سازی رگرسیونی تک‌متغیره و چند-متغیره استفاده شده و سپس جهت پردازش داده‌ها، آزمون‌های زیر جهت تعیین اعتبار مدلها به کار گرفته شده است.

۱) ضریب همبستگی، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته برای تحلیل وابستگی رابطه ارائه شده با مقادیر آزمایش شده.

۲) آزمون دوربین واتسون برای بررسی عدم همبستگی خطاها

رگرسیون تک متغیره غیر خطی (مورد بررسی قرار گرفتند که امکان تخمین مدول تغییر شکل پذیری قابل قبول وجود نداشت. سپس با تشکیل مدل های رگرسیونی به صورت چند متغیره غیر خطی، به مطالعه اثرات پارامترها جهت تعیین بهترین معادله برای تخمین مدول تغییر شکل پذیری پرداخته شد که مهمترین آنها عبارتند از توانی، نمایی، ترکیبی، ترکیبی به همراه مدول الاستیسته دینامیکی. معادلات ارائه شده توسط توسل پور (۱۳۸۴)، در مقایسه با معادلات سرافیم و پریا، بیناوسکی، رد و همکاران، از دقت بالاتری در پیش بینی مدول تغییر شکل پذیری برخوردار می باشند با میانگین نسبت خطای $ER=1/4$ از دقت پیش بینی بسیار بالاتری نسبت به معادله بیناوسکی با میانگین نسبت خطای $ER=1/5$ برخوردار می باشد. همچنین دادی (۱۳۸۷) نیز پس از مدل های شبکه عصبی مصنوعی، مدل های رگرسیونی چند متغیره غیر خطی را که کاربرد مهندسی و اجرایی بیشتری نسبت به سایر مدل ها حتی مدل های شبکه عصبی مصنوعی دارد، در اولویت قرار می دهد.

۱-۵ مدل رگرسیونی چند متغیره غیر خطی توانی نتایج رگرسیون گیری در جدول ۳ گزارش داده شده است. مقدار ضریب همبستگی برابر $0/907$ و مقادیر ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته به ترتیب برابر $0/823$ و $0/806$ است. مقدار آماره آزمون دوربین-واتسون برابر $1/787$ می باشد، این بدان معنی است که خطاها فاقد همبستگی می باشند. از مقدار آماره Sig. در این جدول می توان نتیجه گرفت که رابطه ارائه شده به صورت تصادفی نیست و از این حیث معنادار است. با توجه به تحلیل واریانس ها در جدول ۴ می توان دریافت که پارامترهای مستقل مورد استفاده در رابطه، توانایی تبیین و توجیه تقریباً 80% از واریانس مدول تغییر شکل پذیری را دارا هستند و مابقی آن به پارامترهای دیگر وابسته است (که البته 80% مقدار قابل قبولی می باشد). ضرایب پارامترها و نتایج تحلیل حساسیت در جدول ۵ آورده شده است. در نهایت رابطه ارائه شده به صورت رابطه (۱) است.

$$E_m = 0.0014 \times RQD^{0.157} \times UCS^{0.845} \times W_c^{-0.025} \times J_s^{0.529} \times J_c^{0.802} \quad (\text{Gpa}) \quad (1)$$

$$R_2 = 0.823$$

جدول ۳. نتایج رگرسیون گیری چند متغیره مدل توانی

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل یافته	خطای استاندارد تخمین	دوربین-واتسون
۱	۰/۹۰۷	۰/۸۲۳	۰/۸۰۶	۰/۳۲۶۲۹	۱/۷۸۷

جدول ۴. گزارش تحلیل واریانس (ANOVA)

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربع میانگین	آماره F	آماره Sig
رگرسیون	۲۵/۷۷۸	۵	۵/۱۵۶	۴۸/۴۲۳	۰/۰۰۰
باقی مانده	۵/۵۳۶	۵۲	۰/۱۰۶		
کل	۳۱/۳۱۴	۵۷			

جدول ۵. نتایج مدل سازی رگرسیونی و تحلیل حساسیت مدل توانی

مدل	B	خطای استاندارد	بتا	آماره t	آماره Sig
ثابت	-۶/۵۷۱	۰/۷۷۷		-۸/۴۵۳	۰/۰۰۰
ln Js	۰/۵۲۹	۰/۱۴۲	۰/۰۹۷	۳/۷۳۱	۰/۰۰۰
ln Wc	-۰/۰۲۵	۰/۰۲۵	-۰/۰۶۳	-۱/۰۰۹	۰/۳۱۸
ln Jc	۰/۸۰۲	۰/۱۷۷	۰/۳۷۱	۴/۵۳۲	۰/۰۰۰
ln UCS_MPa	۰/۸۴۵	۰/۲۰۰	۰/۳۱۳	۴/۲۲۵	۰/۰۰۰
ln RQD_per	۰/۱۵۷	۰/۱۲۵	۰/۱۴۰	۱/۲۵۵	۰/۲۱۵

۲-۵ مدل رگرسیونی چند متغیره غیر خطی ترکیبی

در بررسی ها مشخص شد مدل نمایی که فاقد همبستگی خطاها است، ضریب تعیین کمتری (۰/۷۵۹) نسبت به مدل های خطی داراست، از این رو تحقیقات بر روی مدل های ترکیبی متمرکز شد. در مدل ترکیبی برای تشکیل معادله با توجه به نوع متغیرها، از تابع توانی برای متغیرهای کمی و از تابع نمایی برای مدل کردن متغیرهای کیفی استفاده شده است. با توجه به مقدار گزارش شده در جدول ۶، مقدار ضریب همبستگی ۰/۸۸۵، مقدار ضریب تعیین و ضریب تعیین

تعدیل یافته به ترتیب برابر ۰/۷۸۴ و ۰/۷۶۳ است، در این مدل فرض عدم همبستگی خطاها (مقدار آماره دوربین-واتسون بین ۱/۵ و ۲/۵) برقرار است. با توجه به جدول ۷ پارامترهای مستقل در تعیین پارامتر وابسته مؤثر است همچنین با توجه به آماره Sig رابطه ارائه شده معنادار است و نتیجه گرفته می شود که رابطه به صورت تصادفی انتخاب نشده است. نتایج تحلیل حساسیت مدل منظور در جدول ۸ آمده است. در نهایت رابطه ارائه شده به صورت رابطه (۲) می باشد.

$$E_m = 0.0054 \times RQD^{0.288} \times UCS^{0.935} \times 1.018^{W_c} \times 1.025^{J_s} \times 1.040^{J_c} \quad (\text{Gpa}) \quad (2)$$

$$R_2 = 0.784$$

جدول ۶. نتایج رگرسیون گیری چند متغیره مدل ترکیبی

مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل یافته	خطای استاندارد تخمین	دوربین-واتسون
۱	۰/۸۸۵	۰/۷۸۴	۰/۷۶۳	۰/۳۶۱۰۲	۱/۷۰۵

جدول ۷. گزارش تحلیل واریانس (ANOVA) در رگرسیون گیری چند متغیره با مدل ترکیبی

مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربع میانگین	آماره F	آماره Sig
رگرسیون	۲۴/۵۳۶	۵	۴/۹۰۷	۳۷/۶۵۱	۰/۰۰۰
باقی مانده	۶/۷۷۷	۵۲	۰/۱۳۰		
کل	۳۱/۳۱۴	۵۷			

جدول ۸. نتایج مدل سازی رگرسیونی و تحلیل حساسیت مدل ترکیبی

مدل	B	خطای استاندارد	بتا	آماره t	آماره Sig
ثابت	-۵/۲۳۲	۰/۸۹۵		-۵/۸۴۸	۰/۰۰۰
Js	۰/۰۲۵	۰/۰۱۳	۰/۱۸۰	۱/۸۹۴	۰/۰۶۴
Jc	۰/۰۳۹	۰/۰۱۱	۰/۳۲۸	۳/۵۸۴	۰/۰۰۱
Wc	۰/۰۱۸	۰/۰۱۲	۰/۱۱۲	۱/۵۳۴	۰/۱۳۱
ln_UCS_MPa	۰/۹۳۵	۰/۲۱۴	۰/۳۴۷	۴/۳۷۳	۰/۰۰۰
ln_RQD_per	۰/۲۸۸	۰/۱۳۳	۰/۱۷۸	۲/۱۷۳	۰/۰۳۴

بدین منظور مقادیر سرعت عرضی و طولی حاصل از آزمایشات آزمایشگاهی بر روی نمونه ها به کار گرفته شده و با استفاده از رگرسیون گیری خطی و غیرخطی روابطی جهت تخمین مدول تغییر شکل ارائه شده است. در ابتدای امر به منظور مطالعه تغییرات مدول دینامیکی نسبت به مدول دگرشکل پذیری، تحلیل رگرسیون به حالت خطی و غیرخطی انجام شده و نتیجه گرفته می شود که بیشترین ضریب تعیین در این مدل سازی برابر با ۰/۸۲۳ مربوط به مدل توانی است. با توجه به جدول ۹ مقادیر ضریب همبستگی، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل یافته به ترتیب برابر با ۰/۹۵۲، ۰/۹۰۵ و ۰/۸۹۴ است. مقدار آماره دوربین-واتسون نیز کاملاً فاقد همبستگی می باشد. با توجه به جدول ۱۰ دریافت می شود که پارامترهای مستقل مورد استفاده نقش اساسی در تخمین مدول تغییر شکل دارا می باشند. همچنین، مقدار آماره Sig نیز برابر با صفر است و این به معنی عدم تصادفی بودن و معناداری رابطه ارائه شده، است. نمودارهای P-P و هیستوگرام خطا در شکل ۲ و میزان پراکندگی مقادیر مدول اندازه گیری شده تعداد ۳۰ داده ای که جهت اعتبارسنجی در نظر گرفته شده بود و مقادیر مدول تخمینی در این سه مدل، در شکل ۳ آمده است. نتایج تحلیل حساسیت مدل منظور در جدول ۱۱ آمده است و مدل ارائه شده به صورت رابطه (۶) می باشد.

۳-۵ مدل رگرسیونی چند متغیره غیر خطی با استفاده از مدول الاستیسیته دینامیکی

یکی از روش های غیرمستقیم، استفاده از سرعت موج در سنگ برای تخمین مدول الاستیسیته است. برای تعیین ویژگی های دینامیکی ماده سنگ توسط سرعت انتشار موج الاستیسیته از روابط (۳)، (۴) و (۵) استفاده می شود.

$$\nu = \frac{\frac{1}{2}(V_s / V_p)^2 - 1}{(V_s / V_p)^2 - 1} \quad (۳)$$

$$G_{dyn} = \rho V_s^2 \quad (۴)$$

$$E_{dyn} = 2G_{dyn} (1 + \nu) \quad (۵)$$

که ρ جرم مخصوص نمونه بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، G مدول برشی دینامیکی بر حسب پاسکال، E_{dyn} مقدار مدول الاستیسیته دینامیکی بر حسب پاسکال و ν نسبت پواسون نمونه می باشد.

لازم به ذکر است مدول الاستیسیته دینامیک که با استفاده از روابط بالا محاسبه می شود، بزرگ تر از مدول الاستیسیته استاتیک است و برای رسیدن به یک نتیجه مطمئن، این روابط باید با استفاده از تعدادی آزمایش برجا کالیبره شود. در ادامه تحقیق سعی بر استخراج معادله ای جهت تخمین مدول تغییر شکل توسط مقدار مدول الاستیسیته دینامیکی شده است.

$$E_m = 0.0600 \times RQD^{-0.040} \times UCS^{0.528} \times E_{dyn}^{0.666} \times 1.015^{W_c} \times 1.019^{J_s} \times 1.023^{J_c} \quad (\text{Gpa}) \quad (۶)$$

$$R_2 = 0.905$$

جدول ۹. نتایج رگرسیون گیری چند متغیره با اضافه کردن مدول الاستیسیته دینامیکی

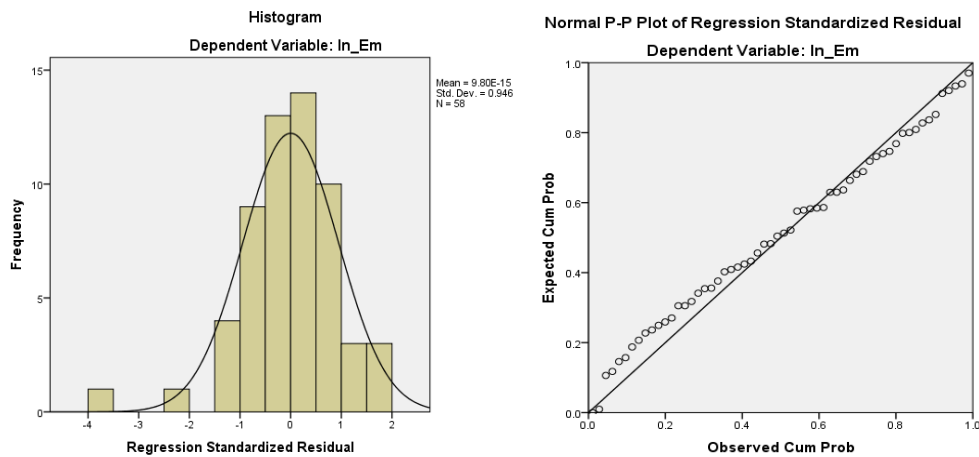
مدل	ضریب همبستگی	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل یافته	خطای استاندارد تخمین	دوربین-واتسون
۱	۰/۹۵۲	۰/۹۰۵	۰/۸۹۴	۰/۲۴۱۰۶	۱/۸۴۹

جدول ۱۰. گزارش تحلیل واریانس (ANOVA) با اضافه کردن مدول الاستیسیته دینامیکی

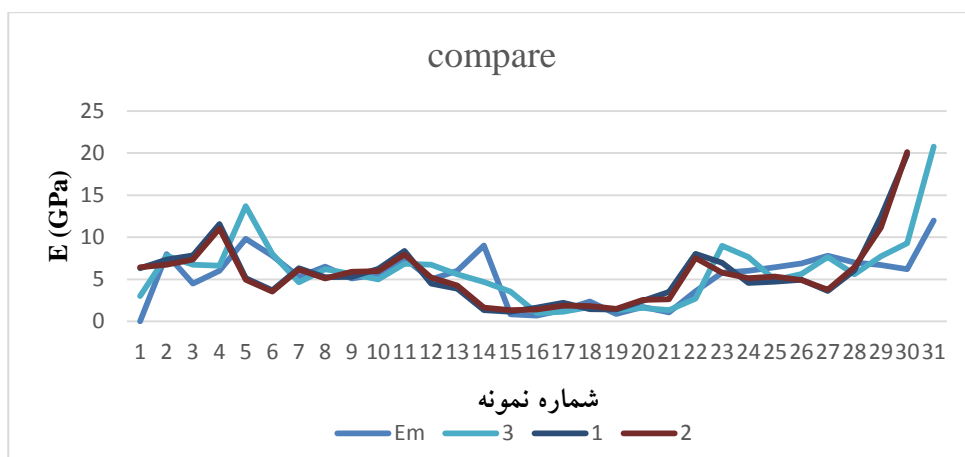
مدل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربع میانگین	F آماره	Sig آماره
رگرسیون	۲۸/۳۵۰	۶	۴/۷۲۵	۸۱/۳۱۰	۰/۰۰۰
باقی مانده	۲/۹۶۴	۵۱	۰/۰۵۸		
کل	۳۱/۳۱۴	۵۷			

جدول ۱۱. نتایج مدل سازی رگرسیونی و تحلیل حساسیت با اضافه کردن مدول الاستیسیته دینامیکی

مدل	B	خطای استاندارد	بتا	t آماره	Sig آماره
ثابت	-۲/۸۱۳	۰/۶۶۸		-۴/۲۱۱	۰/۰۰۰
ln_RQD_per	-۰/۰۴۰	۰/۰۹۷	-۰/۰۲۵	-۰/۴۱۴	۰/۶۸۱
ln_UCS_MPa	۰/۵۲۸	۰/۱۵۱	۰/۱۹۶	۳/۴۸۹	۰/۰۰۱
Jc	۰/۰۱۹	۰/۰۰۸	۰/۱۶۴	۲/۵۴۷	۰/۰۱۴
Js	۰/۰۲۳	۰/۰۰۹	۰/۱۶۵	۲/۶۰۹	۰/۰۱۲
Wc	۰/۰۱۵	۰/۰۰۸	۰/۰۹۳	۱/۹۰۷	۰/۰۶۲
ln_Edyn	۰/۶۶۶	۰/۰۸۲	۰/۵۵۹	۸/۱۰۱	۰/۰۰۰



شکل ۲. نمودار P-P و هیستوگرام خطاهای باقی مانده در رابطه ارائه شده به وسیله رگرسیون چند متغیره با اضافه کردن مدول دینامیکی



شکل ۳. میزان پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمینی مدول دگرشکلی در سه مدل توانی، ترکیبی، ترکیبی همراه با مدول دینامیکی

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق، به منظور ارائه رابطه‌ای جهت تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری ساختگاه سد خرساں از فاکتورهای معیار طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ و مدول الاستیسیته دینامیکی استفاده شد. بدین جهت مطالعات آماری روی ۸۸ داده که شامل نتایج مدول تغییر شکل بدست آمده از آزمایش دیلاتومتری و خواص ژئومکانیکی سنگ که حاصل از برداشت‌های صحرائی و مطالعات آزمایشگاهی و همچنین مدول الاستیسیته دینامیکی که از سرعت امواج طولی و عرضی موج در سنگ حاصل شده بود، انجام شد.

به جهت یافتن رابطه‌ای که به بهترین نحو توانایی محاسبه مدول تغییر شکل را داشته باشد، مدل‌سازی رگرسیونی ساده و چندگانه به صورت خطی و غیرخطی با نرم افزار SPSS انجام شد.

از نتایج آزمون‌ها مشخص می‌شود که مدل رگرسیونی که شامل مدول الاستیسیته دینامیکی می‌شود، بهترین رابطه جهت

منابع

- اجل لوئیان ر.، منصوری ح.، محمدی م.، ۱۳۹۲. پیش بینی مدول الاستیک سنگ آهک با استفاده از رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی مصنوعی. مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد پنجم، شماره ۳ و ۴، صفحات ۳۸-۳۳.
- توسل پور ا.، ۱۳۸۴. تخمین مدول تغییر شکل‌پذیری با استفاده از پارامتر ژئومکانیکی توده‌سنگ، دانشگاه تربیت مدرس.
- دادی ع.، ۱۳۸۷. بررسی دامنه خواص تغییر شکل‌پذیری سازند آماری توسط داده‌های آزمون برجا، در محدوده سدهای زاگرس، دانشگاه تهران.

تخمین مدول دگرشکلی است. در بین مدل‌هایی که مدول الاستیسیته دینامیکی در آن‌ها وارد نشده است، مدل توانی بیشترین مقدار ضریب تعیین جهت برآورد مقدار مدول تغییر شکل را دارا می‌باشد و فاقد همبستگی بین خطاها می‌باشد.

در مدل ترکیبی با ضریب تعیین ۰/۷۸۴، از لحاظ تمامی آزمون‌های آماری انجام شده معنادار است، ولی میزان ضریب تعیین آن از مدل توانی کمتر است. با توجه به این نتایج می‌توان بیان نمود که در صورتی که امکان تعیین مدول الاستیسیته دینامیکی وجود نداشته باشد، رابطه بهینه برای تعیین ضریب رگرسیون، رابطه ارائه شده توسط مدل توانی است. همانطور که اشاره شد در محاسبات آماری چند متغیره، لزوماً دستیابی به ضریب همبستگی بالاتر نمی‌تواند دلیل بر برتری روابط برازش شده باشد، بلکه در این گونه موارد می‌بایست به معنی دار بودن ضرایب رگرسیونی و اعتبار روابط برازش شده نیز توجه شود.

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۸. گزارش زمین شناسی مهندسی و مکانیک سنگ طرح سد و نیروگاه خرسان ۲ (مطالعات مرحله اول-فاز توجیهی).

هوشنگ ن.، ۱۳۹۴. آمار پیشرفته کاربردی همراه با SPSS.

- Alemdag, S., Gurocak, Z., Gokceoglu, C., 2015. A simple regression based approach to estimate deformation modulus of rock masses, *J. African Earth Sci.*, vol. 110:75–80.
- Bieniawski, Z. T., 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons.
- Chun, B.S., Ryu, W.R., Sagong, M., Do J.N., 2008. Indirect estimation of the rock deformation modulus based on polynomial and multiple regression analyses of the RMR system. *Int Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.*, Vol. 46:649-658.
- Hoek, E., Carranza, C., Corkum, B., 2002. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, *Proc. NARMS-Tac*, vol. 1, pp. 267–273.
- Nicholson, G. A., Bieniawski, Z. T., 1990. A nonlinear deformation modulus based on rock mass classification, *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 181–202.
- 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*. Vol.4, No1:35-43.
- Mitri, H. S., Edrissi, R., Henning, J. G., 1995. Finite-element modeling of cable-bolted stopes in hard-rock underground mines, *Trans. Min. Metall. Explor. Inc.*, vol. 298, pp. 1897–1902.
- Serafim, J. L., Perira, J. P., 1983. Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski, in *International symposium on engineering geology and underground construction*, p. II--33.
- Nejati, H. R., Ghazvinian, A., Moosavi, S. A., and Sarfarazi, V., 2014. On the use of the RMR system for estimation of rock mass deformation modulus, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, vol. 73, no. 2: 531–540.
- Ng, L.T., Yuen, K.V., Lau, C.H., 2015. Predictive model for uniaxial compressive strength for Grade III granitic rocks from Macao. *International journal for Engineering Geology*, 199:28-37
- Noorian, B.M., Zhao, ZH., Jing, L., 2013. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. *Int Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.*, Vol. 5:419-430.
- Read, S. A. L., Perrin, N. D., Richards, L. R., 1999. Applicability of the Hoek-Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks, in *9th ISRM Congress*, pp. 655–660.
- Sari, M., 2009. The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 46, No. 3:613–626.
- Yagiz, S., Sezer, E.A., Gokceoglu, C., 2012. Artificial neural networks and nonlinear regression techniques to assess the influence of slake durability cycles on the prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for carbonate rocks. *International journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(14):1636-1650.

