

## توسعه روابط تجربی برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ های جنوب غربی ایران

مهدی علامی<sup>۱</sup>، مهدی حسینی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت ۲۱ آذر ۱۳۸۹، پذیرش ۲۱ بهمن ۱۳۹۰)

### چکیده

مدول دگرشکلی توده سنگ یک پارامتر ورودی مهم در تجزیه و تحلیل رفتار توده سنگ در پروژه های مختلف از قبیل سدسازی است. تعیین این پارامتر با آزمایش های برجا پر هزینه و زمان بر است؛ به همین دلیل، یک سری روابط تجربی توسط برخی از محققین برای تخمین مقدار مدول دگرشکلی توده سنگ بر مبنای سیستم های رده بندی توده سنگ و اطلاعات به دست آمده از آزمایش های برجا انجام شده در نقاط مختلف جهان، پیشنهاد شده است. در این مقاله، با استفاده از داده های به دست آمده از آزمایش های دیلاتومتری انجام شده در ساختگاه هفت سد احداث شده در جنوب غرب ایران و با توجه به ضریب همبستگی، یک رابطه تجربی غیر خطی چندگانه (لجیستیک) جدید و مناسب از بین چندین رابطه از توابع مختلف، بر مبنای شاخص GSI و مدول کشسانی سنگ ( $E_i$ ) برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ ( $E_d$ ) در این ناحیه ارائه می شود.

### کلمات کلیدی

آزمایش دیلاتومتری، مدول دگرشکلی، مدول کشسانی، شاخص GSI، رگرسیون چندگانه غیر خطی و رده بندی توده سنگ.

## ۱- مقدمه

مدول دگرشکلی توده سنگ، یکی از پارامترهای مهم ژئومکانیکی است که نقش اساسی در تجزیه و تحلیل رفتار توده سنگ و آنالیز عددی حفريات زیرزمینی دارد. به همین دلیل، تعیین مقدار این پارامتر ضروری است زیرا صحت نتایج روش‌های عددی به اعتبار داده‌های ورودی آن بستگی دارد. برای تعیین مدول دگرشکلی روش‌های مختلفی وجود دارد که شامل اندازه‌گیری مستقیم با استفاده از آزمایش‌های برجا، تعمیم دادن نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی برای توده سنگ و تخمین بر اساس روابط تجربی به دست آمده از نتایج آزمایش‌های برجا انجام شده در پروژه‌های مختلف، می‌شود. به دلیل این که برآورد مدول دگرشکلی به وسیله آزمایش‌های برجا وقت گیر و پرهزینه بوده و مشکلات عملیاتی خاص خود را دارند، بنابراین استفاده از روش‌های تجربی، صحیح و منطقی به نظر می‌رسد. روابط تجربی مختلفی توسط برخی از محققین، بر مبنای پارامترهای ژئومکانیکی و سیستم‌های مختلف رده‌بندی توده سنگ از قبیل رده‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ (RMR) [۱]، شاخص توده سنگ (RMi) [۲]، شاخص مقاومت زمین شناسی (GSI) [۳]، شاخص کیفی سنگ (RQD) [۴] و سیستم رده بندی Q [۵]، و با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا انجام شده در نقاط مختلف دنیا برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ ارائه شده است. در جدول های ۱ و ۲ تعدادی از روابط تجربی مربوط به برآورد مدول دگرشکلی توده سنگ همراه با سال ارائه و نام محققین آورده شده است. در جدول ۱ از آقای گالرا چندین رابطه ارائه شده است این روابط بر اساس توابع مختلف ریاضی به دست آمده که ضریب همبستگی آنها متفاوت است از بین این روابط، رابطه ۱۶ و ۱۷ گالرا بیشترین ضریب همبستگی ( $R^2=0.8$ ) را دارند. به طور معمول داده‌هایی که برای به دست آوردن این روابط مورد استفاده قرار گرفته، به چند کشور خاص محدود می‌شود؛ که در صورت استفاده از این روابط در کشورهای دیگر از قبیل ایران، نتایج به علت شرایط تکتونیکی متفاوت و همچنین متغیر بودن شرایط سنگ‌شناسی و چینه‌شناسی، خطا دارد و شاید نتواند تخمین مناسبی از مدول دگرشکلی ارائه دهد. بنابراین لازم است که برای مناطق مختلف کشور ایران، روابط تجربی جدیدی بر اساس سیستم‌های رده بندی توده سنگ و با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا انجام شده در این کشور، برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ ارائه

شود. هدف از این تحقیق نیز ارائه یک سری روابط تجربی برای برآورد مدول دگرشکلی توده سنگ با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا انجام شده در جنوب غرب ایران است. بدین منظور از روش رگرسیون گیری چندگانه و نرم افزار TableCurve 3D در این تحقیق استفاده شده است. در جنوب غرب ایران سه رودخانه بزرگ و پر آب کارون، دز و کرخه جریان دارند. از سال‌های گذشته سرمایه گذاری‌های وسیعی از طرف دولت برای ساخت چندین سد و نیروگاه برقایی بر روی این سه رودخانه به منظور کنترل سیلاب، آبیاری مزارع، تولید برق، تأمین آب آشامیدنی و مصارف کشاورزی، انجام شده است. از آنجایی که در طراحی سد از مدول دگرشکلی توده سنگ استفاده می‌شود بنابراین در تمام این پروژه‌ها، این مدول با استفاده از روش‌ها و آزمایش‌های مختلف برجا از قبیل آزمایش دیلاتومتری تعیین شده است.

## ۲- معرفی یک مجموعه داده جدید

در این مقاله برای ارائه روابط تجربی، بیش از ۳۳۲ داده از نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری انجام شده در ساختگاه هفت سد بازفت، بختیاری، تنگ معشوره، خرسان ۲، خرسان ۳، سیمره و کارون ۱ استفاده شده است. در جدول ۳ تعداد آزمایش‌های دیلاتومتری انجام شده در هر کدام از این سدها همراه با شرکت‌های مرتبط آورده شده است. همه آزمایش‌های دیلاتومتری در این ۷ سد، با استفاده از دستگاه دیلاتومتر گمانه‌ای IF096 انجام شده است. این دستگاه توسط شرکت اینترفلز ساخته شده و از نوع دیلاتومترهای انعطاف پذیر که قابلیت اندازه‌گیری تغییرشکل‌های شعاعی را دارند، است. این دستگاه قادر است تا جابجایی‌های شعاعی را به طور مستقیم در سه جهت تعیین کند.

در شکل ۱، تغییرات مدول دگرشکلی ( $E_d$ ) نسبت به مقادیر شاخص مقاومت زمین‌شناسی ( $GSI$ ) برای محل‌های آزمایش، نشان داده شده است. در این مقاله، برای محاسبه مدول‌های دگرشکلی و کشسانی از رابطه پیشنهادی  $ISRM$  (رابطه ۴۵) استفاده شده است [۲۳]:

$$E_d = (1 + \nu_R) \times d \times \frac{\Delta P_i}{\Delta d} \quad (45)$$

در این رابطه:  $\Delta P_i$  مقدار افزایش فشار بر حسب مگا پاسکال،  $d$  قطر اولیه گمانه،  $\Delta d$  میانگین تغییرات قطر گمانه (میلی‌متر) اثر افزایش فشار  $\Delta P_i$ ،  $E$  مدول بارگذاری و یا مدول باربرداری بر حسب مگا پاسکال و  $\nu_R$  نسبت پواسون

است.

جدول ۱: برآورد تجربی مدول دگرشکلی توده سنگ با استفاده از سیستم های طبقه بندی RMR و  $Q$  [۱۸-۶]

رابطه	شماره رابطه	محققین (سال)
$E_d = 10^{(RMR-20)/38}$ (GPa)	(۱)	بنيانوسکی (۱۹۷۳)
$E_d = 2RMR - 100$ (GPa), $RMR > 50$	(۲)	بنيانوسکی (۱۹۷۸)
$E_d = 10^{(RMR-10)/40}$ (GPa), $RMR < 50$	(۳)	سرافیم و پیرا (۱۹۸۳)
$E_d = \frac{E_i}{100} (0.0028RMR^2 + 0.9 \exp(RMR/22.82))$	(۴)	نیکلسون و بنيانوسکی (۱۹۹۰)
$E_d = 300 \exp(0.07RMR) \times 10^{-3}$	(۵)	کیم (۱۹۹۳)
$E_d = 0.3H^\alpha 10^{(RMR-20)/38}$ (GPa), $0.16 < \alpha < 0.3$	(۶)	ورمن (۱۹۹۳)
$E_d = E_i (0.5 [1 - \cos(\pi \cdot RMR/100)])$	(۷)	میتري و همکاران (۱۹۹۴)
$E_d = \frac{\sqrt{q_c}}{10} 10^{(RMR-10)/40}$ (GPa), $q_c < 100$ MPa	(۸)	هوک و براون (۱۹۹۷)
$E_d = 0.1(RMR/10)^3$	(۹)	رد و همکاران (۱۹۹۹)
$E_d = (1 - D/2) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(RMR-10)/40}$ , $0 < D < 1$	(۱۰)	هوک و همکاران (۲۰۰۲)
$E_d = 0.0736 e^{0.0755RMR}$	(۱۱)	گکاگلو و همکاران (۲۰۰۳)
$E_d = E_i \exp[(RMR - 100)/17.4]$	(۱۲)	رامامورتی (۲۰۰۴)
$E_d = E_i \exp - 0.0035 [5(100 - RMR)]$	(۱۳)	رامامورتی (۲۰۰۴)
$E_d = 147.28 e^{(RMR-100)/24} - 0.202RMR$ (GPa)	(۱۴)	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = e^{(RMR-10)/18}$	(۱۵)	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = 0.0876RMR$ (GPa), $RMR \leq 50$	(۱۶)	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = 0.0876RMR + 1.056(RMR - 50)^2$ (GPa), $RMR > 50$	(۱۷)	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = E_i e^{(RMR-100)/36}$	(۱۸)	گالرا و همکاران (۲۰۰۵)
$E_d = E_i 10^{[(RMR-100)(100-RMR)/40000 \exp(-RMR/100)]}$	(۱۹)	سونمز و همکاران (۲۰۰۶)
$E_d = 1.3326 e^{0.0364RMR}$	(۲۰)	چان و همکاران (۲۰۰۹)
$E_d = 3.713 \times 10^{-5} RMR^3$	(۲۱)	امیر توسل پور (۲۰۰۵)
$E_d = 0.0003RMR^3 - 0.0193RMR^2 + 0.3157RMR + 3.4064$	(۲۲)	محمدی و رحمان نژاد (۲۰۰۹)
$E_d = H^{0.2} \cdot Q^{0.36}$ (GPa), $Q < 10$	(۲۳)	سینگ (۱۹۹۲)
$E_d = 25 \log Q$ (GPa), $Q > 1$	(۲۴)	بارتون (۱۹۹۳)
$E_d = 7(\pm 3) \sqrt{Q'}$ , $Q' = 10((RMR - 44)/21)^*$	(۲۵)	دیدریچز و کیسر (۱۹۹۹)
$E_d = E_i \exp(0.8625 \log Q - 2.875)$	(۲۶)	رامامورتی (۲۰۰۱)
$E_d = 10 Q_C^{1/3}$ , $Q_C = Q \frac{UCS}{100}$	(۲۷)	بارتون (۲۰۰۲)
$E_d = 10^{(15 \log Q + 40)/40}$ (GPa), $RMR < 50$ , $Q < 1$	(۲۸)	بارتون (۲۰۰۲)
$E_d = E_i \exp - 0.0035 [250(1 - 0.3 \log Q)]$	(۲۹)	رامامورتی (۲۰۰۴)

$Q' = [RQD/J_n][J_r/J_a]^*$  (شاخص کیفی تونل زنی اصلاح شده)،  $D$ : فاکتور آشفتنگی،  $S$  و  $a$ : ثابت هوک و براون  
 $E_i$ : مدول کشسانی سنگ بکر (MPa)،  $\sigma_{ci}$ : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (MPa)

جدول ۲: برآورد تجربی مدول دگرشکلی توده سنگ با استفاده از سیستم‌های طبقه‌بندی RMI، GSI و RQD [۸،۱۰،۱۱،۱۲،۱۴،۱۵،۱۹،۲۰،۲۱،۲۲]

رابطه	شماره رابطه	محققین (سال)
$E_d = 5.6RMI^{0.375}, RMI > 0.1$	(۳۰)	پالمستروم (۱۹۹۵)
$E_d = 7RMI^{0.4}, 1 < RMI < 30$	(۳۱)	پالمستروم و سینگ (۲۰۰۱)
$E_d = \frac{\sigma_c^i(MPa)}{100} \times 10^{(GSI-10)/40} (GPa)$	(۳۲)	هوک و براون (۱۹۹۷)
$E_d = (1 - \frac{D}{2}) \cdot \frac{\sigma_c}{100} 10^{((GSI-10)/40)} (GPa), \sigma_c < 100 MPa$	(۳۳)	هوک و همکاران (۲۰۰۲)
$E_d = 0.1451e^{0.0654GSI}$	(۳۴)	گکاگلو و همکاران (۲۰۰۳)
$E_d = E_i(s^a)^{0.4}, a = 1.2 + 1.6(\exp(-GSI/15) - \exp(-20/3)), s = \exp((GSI - 100)/9)$	(۳۵)	سونمز و همکاران (۲۰۰۴)
$E_d = E_i(s)^{1.4}, s = \exp((GSI - 100)/9)$	(۳۶)	کاروالهو (۲۰۰۴)
$E_d = 100,000(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((75+25D-GSI)/11)}}) (MPa), 0 < D < 1$	(۳۷)	هوک و دیدریچز (۲۰۰۶)
$E_d = E_i(\frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}}) (MPa), 0 < D < 1$	(۳۸)	هوک و دیدریچز (۲۰۰۶)
$E_d = 0.398 \times (1.055)^{GSI} (GPa)$	(۳۹)	گیوشاد و همکاران (۲۰۰۸)
$E_d = 0.151 \times E_i^{0.582} \times (1.039)^{GSI} (GPa)$	(۴۰)	گیوشاد و همکاران (۲۰۰۸)
$E_d = \alpha_E \cdot E_i, \alpha_E = 0.0231RQD - 1.32$	(۴۱)	گاردنر (۱۹۸۷)
$E_d = 0.1423[\frac{E_i(1 + 0.01RQD)}{WD}]^{1.1747} (GPa)$	(۴۲)	کایاباسی و همکاران (۲۰۰۳)
$E_d = 0.001[\frac{(E_i/UCS)(1 + RQD/100)}{WD}]^{1.5528} (GPa)$	(۴۳)	گکاگلو و همکاران (۲۰۰۳)
$E_d = E_i(10^{0.0186RQD-1.91})$	(۴۴)	زهانگ و اینستین (۲۰۰۴)

$E_i$ : مدول کشسانی سنگ بکر (MPa)،  $\sigma_{ci}$ : مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (MPa)  
 $D$ : فاکتور آشفستگی،  $S$  و  $a$ : ثابت هوک و براون،  $WD$ : درجه هوازدگی

$RMR \geq 18$  یا  $GSI \geq 18$   $GSI = RMR_{89} - 5$  (۴۶)

لازم به ذکر است که بنا به دلایل زیر نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری در سیکل اول نمودار بارگذاری - باربرداری مبین رفتار واقعی توده سنگ‌ها نیست [۲۴]:

الف- رهایی تنش در جداره گمانه حد فاصل زمان حفاری تا زمان انجام آزمایش

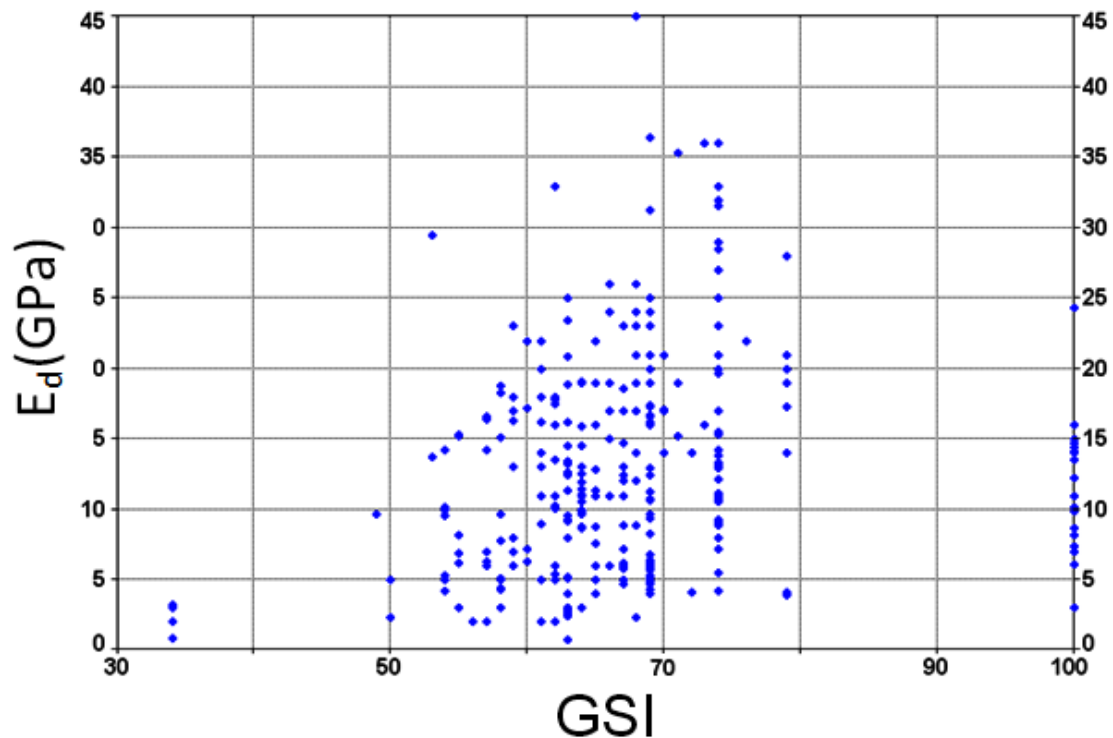
ب- بهم خوردگی احتمالی جداره گمانه

ج- در سیکل اول آزمایش، بخشی از تغییر شکل‌های ثبت‌شده مربوط به اتصال کامل پکر دستگاه به جداره گمانه است.

مهندسیین صحرایی مجرب و زمین شناسان، علاقمند به یک رده‌بندی ساده، سریع و قابل اطمینان هستند که مبتنی بر شرایط زمین‌شناسی بوده و با استفاده از آن بتوان یک توده سنگ را تنها بر اساس مشاهدات چشمی و بدون نیاز به انجام آزمون‌های آزمایشگاهی مختلف رده‌بندی کرد. از این‌رو در این مقاله، برای ارائه روابط تجربی جدید از سیستم رده‌بندی GSI که همگی این ویژگی‌ها را داشته باشد، استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که مقادیر GSI از طریق  $RMR_{89}$  (رابطه ۴۶) نیز محاسبه شده‌اند [۸].

جدول ۳: آزمایش های دیلاتومتری انجام شده در پروژه های جنوب غرب ایران [۲۹]

نام سد	تعداد آزمایش های دیلاتومتری انجام شده	کارفرما	مشاور طرح	مشاور ژئوتکنیک
بازفت	۲۹	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	قدس نیرو	شرکت آزمون فولاد
بختیاری	۷۶	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	اشتوکی پارس	شرکت خاک و سنگ
تنگ معشوره	۵۰	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	مهتاب قدس	شرکت خاک و سنگ
خرسان ۲	۶۰	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	مهتاب قدس	شرکت آزمون فولاد
خرسان ۳	۵۶	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	مهتاب قدس	شرکت خاک و سنگ
سیمره	۵۱	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	مهتاب قدس	شرکت خاک و سنگ
طرح توسعه سد کارون ۱	۱۰	سازمان آب منطقه ای خوزستان	مشانیر	-
مجموع	۳۳۲			



شکل ۱: مقادیر مدول دگرشکلی ( $E_d$ ) اندازه گیری شده در جنوب غرب ایران بر حسب مقادیر  $GSI$

زمین‌شناسی ( $GSI$ ) در حالت سه بعدی، توسط نرم-افزار TableCurve 3D و در سطح اطمینان ۹۵٪ برای برآورد مدول دگرشکلی توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران به دست آمد. پس از تعیین روابط مذکور، با محاسبه ضریب همبستگی ( $R^2$ ) هر رابطه، رابطه‌ای که دارای بیشترین ضریب همبستگی ( $0 < R^2 < 1$ ) است به عنوان نتیجه تحلیل پذیرفته شد. نتایج عملیات رگرسیون‌گیری و روابط به دست آمده در جدول ۴ آورده شده است. با توجه به جدول ۴ و مقایسه ضرایب همبستگی روابط به دست آمده با یکدیگر، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه لجیستیک (رابطه ۵۳) ( $\text{Logistic}$ ) بیشترین ضریب همبستگی ( $R^2 = 0.186$ ) را در بین سایر روابط ارائه شده، دارد. بنابراین در این مقاله، رابطه ۵۳ به عنوان بهترین رابطه برای تخمین تجربی مدول دگرشکلی توده سنگ‌های جنوب غربی ایران معرفی می‌شود. در شکل ۳ نمودار این رابطه نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در تمامی روابط ارائه شده واحد  $E_d$  و  $E_i$  گیگا پاسکال است.

#### ۴- اعتبار سنجی رابطه به دست آمده

به منظور ارزیابی اعتبار رابطه لجستیک پیشنهاد شده (رابطه ۵۳) در این مقاله و همچنین مقایسه دقت این رابطه با روابط دیگر محققین در تخمین مدول دگرشکلی توده سنگ‌های جنوب غربی ایران، از جذر متوسط مربع خطاها ( $RMSE$ ) استفاده می‌شود؛ که مقدار  $RMSE$  از رابطه ۵۴ بدست می‌آید:

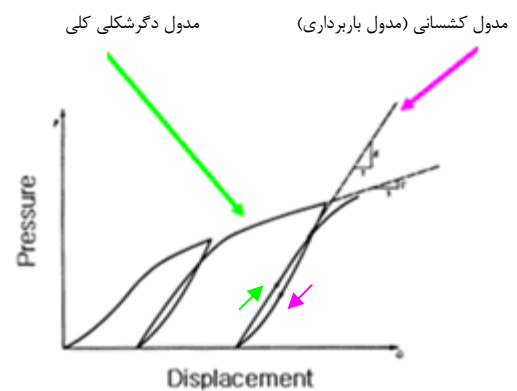
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N ((E_d)_i - (E'_d)_i)^2}{N}} \quad (54)$$

که در آن:

$E_d$ : مدول دگرشکلی اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های برجا،  $E'_d$ : مدول دگرشکلی محاسبه شده توسط روابط تجربی و  $N$ : تعداد آزمایش‌های برجا انجام شده است. بر اساس این روش هر رابطه‌ای که مقدار  $RMSE$  آن به صفر نزدیک‌تر باشد دارای دقت تخمین بالاتر و بهتری است؛ در واقع مقدار  $RMSE$  بیانگر این است که مقدار مدول محاسبه شده توسط روابط تجربی چه میزان از مقدار اندازه‌گیری شده توسط آزمایش‌های برجا انحراف دارد [۱۴]. در شکل ۴، مقدار  $RMSE$  رابطه لجستیک پیشنهاد شده (رابطه ۵۳) در این مقاله، در مقایسه با مقادیر  $RMSE$  روابط گکاگلو و همکاران (رابطه ۳۴)، سونمز و همکاران (رابطه ۳۵)، کاروالهو (رابطه

درستی این امر را منحنی‌های فشار - تغییر شکل آزمایش‌های دیلاتومتری نشان می‌دهد. از این‌رو، در این مقاله از نمودارهای بارگذاری و باربرداری سیکل سوم، برای تعیین مدول دگرشکلی و مدول کشسانی استفاده شده است. به دلیل این‌که در آزمایش‌های دیلاتومتری سه سنسور در محل آزمایش نصب شده است، بنابراین مدول دگرشکلی و مدول کشسانی که برای هر عمق در نظر گرفته شده، میانگین مدول محاسبه شده هر سه سنسور است. لازم به ذکر است که در حالت ایده‌آل مدول باربرداری در سیکل سوم، به علت تأثیر ناچیز درزه و ترک‌ها، معادل مدول کشسانی سنگ بکر فرض شده است. در روابط به دست آمده این مدول کشسانی با  $E_i$  نشان داده شده است [۲۵].

در شکل ۲ تعریفی از مدول دگرشکلی و مدول کشسانی ارائه شده است.



شکل ۲: تعریف مدول دگرشکلی و مدول کشسانی بر روی نمودار فشار - جابجایی

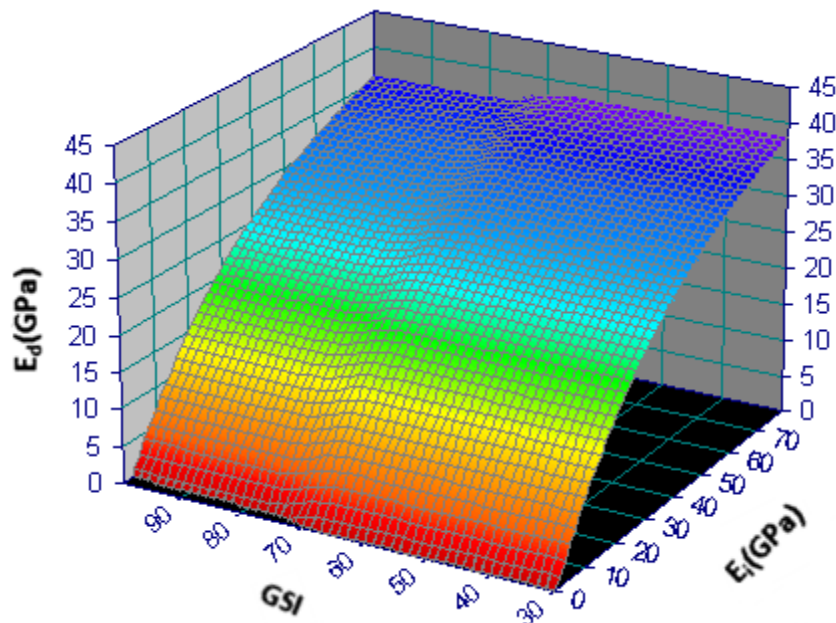
#### ۳- تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

به علت پراکندگی زیاد داده‌ها نمی‌توان رابطه‌ای مناسب و با دقت زیاد بین  $GSI$  و  $E_d$  در حالت دو بعدی به دست آورد (شکل ۱). در نتیجه، برای ارائه روابط تجربی برای توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران علاوه بر پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی از پارامتر مدول کشسانی ( $E_i$ ) نیز استفاده می‌شود و رگرسیون‌گیری در فضای سه بعدی انجام می‌شود. بر این اساس روابط مختلفی از انواع توابع خطی، لگاریتمی،  $S$  شکل، نمایی، توانی، درجه ۱ و درجه ۲ بین مقادیر مدول دگرشکلی ( $E_d$ )، مدول کشسانی ( $E_i$ ) و شاخص مقاومت

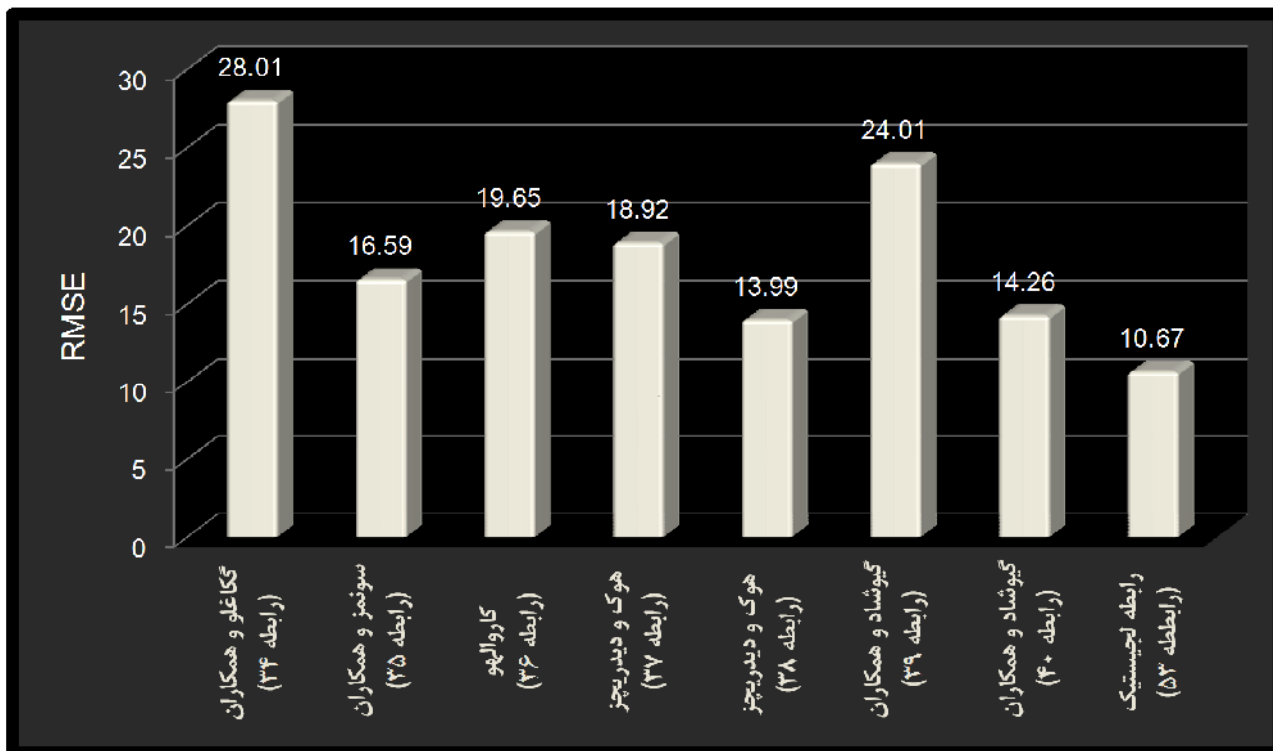
۳۶)، هوک و دیدریچز (روابط ۳۷ و ۳۸) و گیوشاد و دیگران (روابط ۳۹ و ۴۰) که بر مبنای ۳۳۲ داده جمع آوری شده از شده اند، نشان داده شده است.

جدول ۴. روابط تجربی به دست آمده به منظور پیش بینی مقدار مدول دگرشکلی توده سنگ های جنوب غربی ایران با استفاده از اندیس GSI

شماره رابطه	نوع رابطه	رابطه	ضریب همبستگی
(۴۷)	خطی	$E_d = 4.743232653 + 0.571757451E_i - 0.018074161GSI$	۰/۷۹
(۴۸)	چند جمله ای	$E_d = 2.966898963 - 0.046189981 GSI + 0.961870127E_i - 0.006659758 E_i^2$	۰/۸۵۶
(۴۹)	نمایی	$E_d = -683.8083805 + 687.8016016e^{(E_i/1242.27)} - 0.003301661e^{(GSI/16.5423)}$	۰/۷۸۸
(۵۰)	توانی	$E_d = 1.978169757E_i^{0.693494} \times (-6.1 \times 10^{-9})GSI^{2.766846}$	۰/۸۳
(۵۱)	لگاریتمی	$E_d = -0.23865373 + 2.010300189(\ln E_i)^2 - (3.18314 \times 10^{-6})GSI^3$	۰/۸۵۳
(۵۲)	S شکل	$E_d = \frac{261.0967}{1 + e^{-(E_i + 53.0643)/31.47687}} - \frac{388.919}{1 + e^{-(GSI + 478.146)/1973.887}}$	۰/۸۵۷
(۵۳)	لجیستیک	$E_d = \frac{56.34529}{1 + (E_i/41.47251)^{-1.132678}} + \frac{2.201468}{1 + (GSI/72.10346)^{42.3795}} - 2.212314715$	۰/۸۶۱



شکل ۳. نمودار رابطه لجیستیک برای تعیین مقادیر مدول دگرشکلی توده سنگ های جنوب غربی ایران



شکل ۴. مقایسه رابطه لجستیک پیشنهاد شده در این مقاله با روابط گنگالو و همکاران، سونمز و همکاران، کاروالهو، هوک و دیدریچز و گیوشاد و دیگران

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله از تحلیل آماری ۳۳۲ داده حاصل از آزمایش‌های دیلاتومتری نتایج زیر به دست آمد:

۱- پس از انجام عملیات رگرسیون گیری توسط نرم افزار TableCurve 3D، چندین رابطه تجربی از انواع توابع خطی، درجه ۲، نمایی، توانی، لگاریتمی، لجستیک و S شکل در فضای سه بعدی و سطح اطمینان ۹۵٪ ارائه شد. مقایسه ضرایب همبستگی این روابط با یکدیگر نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی مربوط به رابطه لجستیک (رابطه ۵۳) است. ( $R^2=0/۸۶$ ). از این رو در این مقاله، رابطه ۵۳ به عنوان یک رابطه مناسب برای تخمین مدول دگرشکلی توده‌سنگ‌های جنوب غربی ایران پیشنهاد می‌شود.

۲- مقایسه مقدار RMSE رابطه لجستیک با مقادیر RMSE روابط روابط گنگالو و همکاران، سونمز و همکاران، کاروالهو، هوک و دیدریچز و گیوشاد و دیگران که همگی بر مبنای شاخص  $GSI$  ارائه شده‌اند، نشان داد که بالاترین قابلیت

تخمین و دقت مربوط به رابطه لجستیک است (شکل ۴). از این رو با اطمینان بیشتری می‌توان از این رابطه برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ‌های جنوب غربی ایران استفاده کرد.

### منابع

- [1] Bieniawski Z.T., 1973, "Engineering Classification of Rock Masses", Trans S African Inst Civ Engrs, Vol.15, No. 12, pp. 335-44.
- [2] Palmstrom A., 1995, "RMI - A Rock Mass Characterization System for Rock Engineering Purpose", Ph.D. Thesis Univ.
- [3] Hoek E., Brown E.T., "Practical Estimates of Rock Mass Strength", Int J Rock Mech Min Sci, Vol. 34, No. 8, 1997, pp. 1165-86.
- [4] Deere D.U., Hendron A.J., Patton F.D., Cording E.J., 1967, "Design of Surface and Near Surface Construction in Rock", Proceedings of The Eighth US Symposium on Rock Mechanics - Failure and Breakage of Rock, Newyork. pp. 237-302.



- [15] 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.
- [۱۷] توسل پور، امیر، ۱۳۸۵، "نخمين مدول تغيير شكل پذیری برجا با استفاده از پارامتر ژئومکانیکی توده سنگ"، دانشگاه تربیت مدرس، کتابخانه مرکزی، ۲۵۶۵ ۴۱۱ ف.م.
- [18] Mohammadi Hamid., Rahmannejad Reza., January 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.
- [19] 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.
- [20] Sonmez H., Gokceogl C., Ulusay R., 2004, "Indirect Determination of The Modulus of Deformation of Rock Masses based on The GSI System", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 849-857.
- [21] Dadi Givshad A., Memarian H., Rezaei F., November 2008, "Investigation on Deformability Modulus of Asmary Formation Rock Mass, By Dilatometer tests", 5th Asian Rock Mechanics Symposium (ARMS5), Tehran, Iran, pp. 24-56.
- [22] Lianyang Zhang., Einstein H.H., 2004, "Using RQD to Estimate the Deformation Modulus of Rock Masses", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 41, pp. 337-341.
- [۲۳] فهیمی فر، احمد، سروش، حامد، ۱۳۸۲، "آزمایش های مکانیک سنگ (مبانی نظری و استانداردها)"، جلد ۲: آزمون های صحرایی"، چاپ اول، مرکز نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران).
- [۲۴] شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۸۸، "گزارش آزمایش دیلاتومتري - ساختگاه سد خرسان ۲".
- [۲۵] شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، بهمن ماه ۱۳۸۱، "گزارش مطالعات مکانیک سنگ - ساختگاه سد سیمره"، جلد ۱.
- [5] Barton N., Lien R., Lunde J., 1974, "Engineering Classification of Rock Masses for The Design of Tunnel Support", Rock Mech, Vol. 6, No. 4, pp. 189-236.
- [6] Unal E., 1997, "Determination of In situ Deformation modulus: New Approaches for Plate-Loading Tests", int. J. Rock Mech. Min. Sci, Vol. 34, No. 6, pp. 897-915.
- [7] Verman M., Singh B., Viladkar M.N, Jethwa J.L., 1997, "Effect of Tunnel Depth on Modulus of Deformation of Rock Mass", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 121-127.
- [۸] سینگ، گوئل، ترجمه اجل لوئیان، رسول و محمدی، سید داود، ۱۳۸۲، "رده بندی توده سنگ روشی کاربردی در مهندسی عمران"، انتشارات فن آوران.
- [۹] هوک، کیسر، باودن، ترجمه فارونی، مرتضی، ابیازنی، همزه، زمستان ۱۳۸۰، "نگهداری حفريات زیرزمینی در سنگ های سخت"، چاپ اول، انتشارات فن آوران.
- [10] 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.
- [11] Palmstrom A., Singh R., 2001, "The Deformation Modulus of Rock Masses: Comparisons between In Situ Tests and Indirect Estimates", Tunnelling Underground Space Technol, Vol. 16, No. 3, pp.31-115.
- [12] Hoek E., Diderichs M.S., 2006, "Empirical Estimation of Rock Mass Modulus", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 43, pp. 203-215.
- [۱۳] رحیمی، بهروز، شهریار، کوروش، ۲۹ الی ۳۱ اردیبهشت ماه ۱۳۸۸، "برآورد تجربی پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای توده سنگ: مسیر تونل شماره یک راه آهن قزوین - رشت"، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس.
- [14] 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.
- International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 46, pp. 649-658.
- [16] Sonmez H., Gokceoglu C., Nefeslioglu H.A., Kayabasi A., 2006, "Estimation of Rock Modulus: For Intact Rocks with an Artificial Neural Network and