

## استفاده از رگرسیون چندمتغیره برای ارزیابی تراوایی توده‌سنگ‌های ساخت‌گاه سد خرسان ۲ با استفاده از ویژگی‌های سیستم ناپیوستگی

مجتبی رحیمی‌شهید<sup>۱</sup>، مهدی کریمی<sup>\*</sup> و غلامرضا لشکری‌پور<sup>۲</sup>

۱ و ۲- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

نویسنده مسئول: [Geotechnical47@gmail.com](mailto:Geotechnical47@gmail.com)\*

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱

دریافت: ۹۹/۱۲/۱۲

### چکیده

یکی از ویژگی‌هایی مهم در بررسی ژئومکانیکی توده‌سنگ‌ها ارزیابی تراوایی است که از آزمون لوژون تعیین می‌گردد و از آن در ارزیابی تزریق‌پذیری ساخت‌گاه سد، تونل و سایر سازه‌های مهندسی مرتبط با آب استفاده می‌شود. به دلیل وجود الگوهای پیچیده‌ی ناپیوستگی، در صورت عدم استفاده از روش آزمایش مناسب، تعیین تراوایی توده‌سنگ‌ها دشوار است. در این پژوهش، برای تخمین تراوایی توده‌سنگ مدل‌های مختلف رگرسیون چندمتغیره توسعه داده شده است. برای این منظور، از ۲۸ داده مربوط به نتایج آزمایش لوژون، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و شرایط سطح درزه (SCR) در ساخت‌گاه سد خرسان ۲ واقع در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شد. سه مدل مختلف برای تخمین تراوایی توده‌سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. ورودی‌های مدل اول RQD و SCR (مدل ۱)، ورودی‌های مدل دوم فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR (مدل ۲) و ورودی‌های مدل سوم فاصله‌داری ناپیوستگی و RQD (مدل ۳) است. تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده نشان می‌دهد که رابطه آماری معنی‌داری بین مقادیر لوژون با SCR وجود ندارد. باین‌حال، بین مقادیر لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی رابطه آماری معنی‌دار برقرار است. تجزیه و تحلیل رگرسیون چندمتغیره غیرخطی برای دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته به دلیل روابط غیرخطی بین ورودی و خروجی انجام شد. در نهایت، اعتبارسنجی نتایج حاصله با استفاده از شاخص‌های آماری نشان می‌دهد، دقت رابطه پیشنهادی رگرسیون غیرخطی چندمتغیره بین لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی بالاتر از سایر روابط است و تطابق آن با داده‌های واقعی بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد متغیرهای رگرسیون، دقت مقادیر لوژون پیش‌بینی‌شده افزایش می‌یابد و روابط تجربی با ضریب همبستگی بالاتری حاصل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تراوایی توده‌سنگ، لوژون، رگرسیون چندمتغیره، ناپیوستگی، RQD، سد خرسان ۲

### ۱- پیشگفتار

فیزیکی و دینامیکی (دیامانتیس و همکاران، ۲۰۰۹؛ سویک و همکاران، ۲۰۱۱؛ لشکری‌پور و همکاران، ۲۰۱۸) و خصوصیات ژئوتکنیکی (رحیمی‌شهید و همکاران، ۲۰۱۶-الف؛ رحیمی‌شهید و رحیمی، ۲۰۲۰) ارائه کرده‌اند. به‌طور کلی تخمین تراوایی به‌عنوان رابطه موجود بین تراوایی ذاتی و تراوایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تراوایی ذاتی یک سنگ یا خاک میزان توانایی آن برای انتقال سیالات در هنگام جریان آن است و تراوایی مشخصه‌ای است که سهولت جریان سیال از طریق یک محیط متخلخل را نشان می‌دهد (اسچوارتز و ژانگ، ۲۰۰۳). تراوایی (k) در قانون داری به‌عنوان ثابت تناسب در ارتباط با تخلیه ویژه به‌گرایان هیدرولیکی معرفی شده است. در این قانون طبق معادله‌های (۱) و (۲) میزان

تعیین تراوایی توده‌سنگ یک ویژگی مهم برای سازه‌های مهندسی مانند سد، تونل و دیگر طرح‌های مهندسی مرتبط با سنگ است. زیرا نشت از پی، باعث از دست دادن آب، بروز فشار بالا برنده و به خطر انداختن پایداری سازه می‌گردد. لذا مهندسی جهت دستیابی به یک دید جامع از شرایط حاکم بر ساخت‌گاه و همچنین محاسبه و برآورد دقیق ویژگی‌های مربوطه، از ابزار و آزمایش‌های گوناگون و گسترده‌ای استفاده می‌کنند. برخی محققان روش‌های تجربی برای برآورد خصوصیات مختلف توده‌سنگ و ماده سنگ مانند مدول تغییر شکل‌پذیری (گوکسولگو و همکاران، ۲۰۰۳؛ کاپاشی و همکاران، ۲۰۰۳؛ دینسر و همکاران، ۲۰۰۸؛ شین و همکاران، ۲۰۱۲)، خصوصیات

در این معادله،  $e$  بازشدگی درزه،  $b$  فاصله بین درزه،  $K_f$  ثابت تراوایی برای پرکننده و  $K_r$  تراوایی سنگ بکر است. لوژون (۱۹۳۳) روشی به نام آزمون لوژون را معرفی کرد که میزان تراوایی توده‌سنگ را تعیین می‌کند. این آزمایش بر اساس فشار آب در یک گمانه حفاری شده در یک توده سنگ و ثبت هدر رفت آب در طی یک بازه زمانی است. طبقه‌بندی تراوایی توده سنگ براساس فاصله ناپیوستگی‌ها در جدول (۱) ارائه شده است (ترزاقی و پک، ۱۹۶۷؛ ISRM, 1981). لی و فارمر (۱۹۹۰) یک روش ساده برای برآورد تخلخل شکستگی و تراوایی با استفاده از روابط تجربی بین بازشدگی<sup>۱</sup>، ضریب زبری درزه (JRC<sup>۲</sup>) و مقاومت فشاری درزه (JCS<sup>۴</sup>) پیشنهاد کرده است. تقریب معتبر از تخلخل شکستگی و تراوایی از مقدار بازشدگی درزه ( $e_c$ )، JRC و JCS می‌تواند برای یک ساختار ایده‌آل ساخته شود. فویو و همکاران (۲۰۰۵) پیشنهاد کردند که شاخص تراوایی ثانویه<sup>۵</sup> (SPI) که مبتنی بر جریان آب از طریق درزه‌ها است، پی‌سده را در طبقات مختلف باکیفیت مختلف قرار می‌دهد. این شاخص با استفاده از ناپیوستگی‌های مورد بحث در بخش آزمون، کیفیت توده سنگ را تعیین می‌کند. رتبه‌بندی شرایط سطح درزه<sup>۶</sup> (SCR) از یک هسته مرکزی با مقادیر متناظر با لوژون می‌تواند برای تعیین تراوایی توده‌سنگ مورد استفاده قرار گیرد (سنمز و الوسای، ۱۹۹۹). SCR یک ویژگی ناپیوستگی است که شامل مجموع رتبه‌بندی‌های متفاوتی از زبری، هوازدهی و پرشدگی درزه است (جدول ۲). تخمین مقادیر لوژون با استفاده از ویژگی‌های ژئومکانیکی در سال‌های اخیر مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است. ابراهیمی (۱۳۹۳)، رحیمی‌شهید (۱۳۹۴)، کاپاباشی و همکاران (۲۰۱۵)، چمن‌زاده و همکاران (۲۰۱۶)، فرید و رضوان (۲۰۱۷)، اوگ و سیرک (۲۰۱۹) از شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD) به منظور تخمین لوژون استفاده کردند. مطالعات این محققین نشان می‌دهد که در اکثر موارد، تخمین دقیقی از مقادیر لوژون ارائه نمی‌شود. کراری و اجل‌لوئیان (۱۳۹۷) با استفاده از طبقه‌بندی توده‌سنگ به روش شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) به ارزیابی تراوایی و تزریق‌پذیری توده‌های سنگی پرداختند. کاپاباشی

جریان ( $Q$ ) در هر واحد سطح متناسب با شیب هیدرولیکی ( $i$ ) در جهت جریان اندازه‌گیری می‌شود:

$$V = K \times i \quad (1)$$

$$Q = V \times A = A \times K \times i \quad (2)$$

در این معادله،  $K$  تراوایی،  $A$  مساحت و  $Q$  نرخ یا دبی جریان است.

سنگ‌های بکر<sup>۱</sup> تقریباً ناتراوا هستند اما توده‌سنگ‌های درزه‌دار بسته به خاصیت ناپیوستگی آن‌ها قابلیت تراوایی دارند. افزایش سامانه‌های ناپیوستگی همانند کانال منجر به جاری شدن آب می‌شود. اگر توده‌سنگی دارای یک دسته‌درزه یک‌طرفه موازی با بازشدگی ( $e$ ) و فاصله‌داری ( $d$ ) باشد، می‌توان تراوایی ( $k$ ) را به شرح زیر تعریف کرد (سرافیم، ۱۹۶۸):

$$K = (e^3 \times \gamma_w) / 12d\mu \quad (3)$$

در این معادله،  $\gamma_w$  وزن واحد آب و  $\mu$  ویسکوزیته است. جریان آب از طریق شکستگی‌ها توسط محققین مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که از آن جمله می‌توان به مطالعات هویت (۱۹۵۶)، اسنو (۱۹۶۸)، لویز (۱۹۶۹)، شارپ (۱۹۷۰)، ماینی (۱۹۷۱) و دیویس (۱۹۶۹) اشاره کرد. پس‌از آن، تعیین تراوایی ( $k$ ) معادل سطوح ناپیوستگی موازی، صاف و تمیز مورد مطالعه قرار گرفت (دیویس، ۱۹۶۹). مطابق این مطالعات، تراوایی با استفاده از رابطه محاسبه می‌شود:

$$K = (e^3 \times g) / 12du \quad (4)$$

در این معادله،  $g$  شتاب گرانشی زمین برابر با  $981 \text{ cm/s}^2$  و  $u$  ضریب گرانشی سینماتیک برابر با  $0.101 \text{ cm}^2/\text{s}$  در دمای ۲۰ درجه برای آب خالص، است. این معادله بالاترین میزان تراوایی معادل برای سامانه‌های شکستگی را نشان می‌دهد (هوک و بری، ۲۰۰۴).

معادله (۵) برای جریان ورقه‌ای و دسته‌درزه‌های موازی و از نوع جریان Capillary پیشنهاد شده است (لویز، ۱۹۶۹). اگر جریان چندلایه باشد و سامانه درزه‌ها اشباع شود، می‌توان تراوایی یک توده‌سنگ را با استفاده از معادله (۷) تعیین کرد. کم‌ترین تراوایی ( $k$ ) معادل برای ناپیوستگی‌های پرشده رخ می‌دهد و به شرح زیر است:

$$K = \left(\frac{e}{b}\right) \times K_f + K_r \quad (5)$$

<sup>4</sup> Joint Compressive Strength

<sup>5</sup> Secondary Permeability Index

<sup>6</sup> Surface Condition Rating

<sup>1</sup> Intact rock

<sup>2</sup> Aperture

<sup>3</sup> Joint Roughness Coefficient

همکاران (۱۳۹۰)؛ کریم‌دوست و همکاران (۱۳۹۶)؛ اجل‌لوئیان و محمدی (۲۰۱۴)؛ لشکری‌پور و همکاران (۲۰۱۸)؛ رحیمی‌شهید و رحیمی (۲۰۲۰ - الف و ب)؛ رحیمی‌شهید و هاشمیان (۲۰۲۱) می‌باشد؛ اما در هیچ یک از این مطالعات برآورد تراوایی با روش‌های چندمتغیره انجام نشده است. به همین خاطر در این مطالعه، از مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی جهت ارزیابی و برآورد تراوایی توده‌سنگ در ساخت‌گاه سد خرسان ۲ استفاده شده است. هدف اصلی، بررسی ویژگی‌های کنترل و تهیه مدل‌هایی برای برآورد تراوایی توده‌سنگ است. مدل‌های ارائه شده برای محاسبه تراوایی شامل شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و شرایط سطح درزه (پرشدگی، هوازدگی و زبری سطح درزه) است.

و همکاران (۲۰۱۵) ابتدا رابطه بین لوژون با ویژگی‌های RQD، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و شرایط سطح درزه (SCR) در پروژه‌های مختلف را برآورد کردند. سپس برای افزایش دقت برآورد لوژون از رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از رگرسیون چندمتغیره نسبت به رگرسیون تک‌متغیره، مقادیر لوژون دقیق‌تری را برآورد می‌کند. اوگ (۲۰۱۷) یک رابطه نمایی برای برآورد لوژون با استفاده از شرایط سطح درزه و RQD ارائه داد. اوگ و سیراک (۲۰۱۹) لوژون را با استفاده از RQD و شرایط سطح ناپیوستگی در سیستم طبقه‌بندی (RMR) تخمین زدند.

پیرامون ساخت‌گاه سد خرسان ۲، جنبه‌های مختلفی از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک با روش‌های گوناگون توسط محققین مختلفی انجام شده که از جمله آن‌ها مطالعات اجل‌لوئیان و محمدی (۱۳۹۰)؛ ذولفقاری و

جدول ۱. اندازه‌های تراوایی برای توده‌سنگ‌های درزه‌دار (ترزاقی و پک، ۱۹۶۷؛ ISRM, 1981)

توصیف توده‌سنگ	وضعیت تراوایی	ضریب تراوایی (k) (m/s)
فاصله درزه‌ها خیلی کم	زیاد	۱-۱۰ <sup>-۲</sup>
فاصله درزه‌ها متوسط	متوسط	۱۰ <sup>-۲</sup> -۱۰ <sup>-۵</sup>
فاصله درزه‌ها زیاد	کم	۱۰ <sup>-۵</sup> -۱۰ <sup>-۹</sup>
بدون درزه یا توده‌ای	نفوذناپذیر	<۱۰ <sup>-۹</sup>

جدول ۲. رتبه‌بندی زبری، هوازدگی و پرشدگی برای تعیین SCR (سنمز و الوسای، ۱۹۹۹)

ضریب زبری	خیلی زبر	زبر	کمی زبر	هموار	صیقلی
	۶	۵	۳	۱	۰
هوازدگی	بدون هوازدگی	کم	متوسط	زیاد	تجزیه شده
	۶	۵	۳	۱	۰
پرشدگی	بدون پرشدگی	سخت (>5mm)	سخت (<5mm)	نرم (>5mm)	نرم (<5mm)
	۶	۴	۲	۲	۰

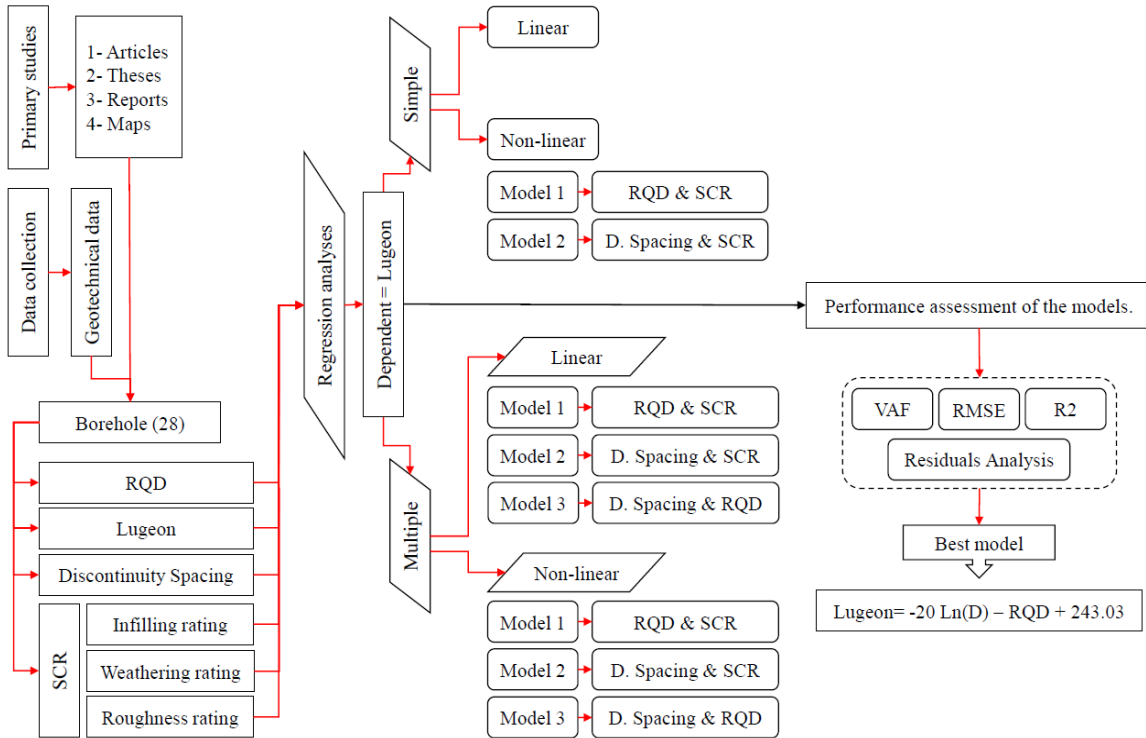
سنگ (عدد لوژون) از آنالیزهای رگرسیون ساده و چند متغیره استفاده شد. در آنالیز رگرسیون ساده، روابط خطی و غیرخطی بین لوژون و سایر ویژگی‌ها بررسی شد. بررسی رابطه بین RQD و SCR نشان داد که رابطه فیزیکی خاصی بین این دو پارامتر وجود ندارد. به همین دلیل می‌توان از این دو ویژگی به عنوان ورودی در مدل پیش‌بینی استفاده کرد (کایاباشی و همکاران، ۲۰۱۵). در آنالیز رگرسیون چند متغیره، روابط خطی و غیرخطی بین لوژون و سه مدل مختلف، اولی با استفاده از RQD و SCR (مدل ۱)، دومی با استفاده از فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR (مدل ۲) و سومی با استفاده از فاصله‌داری ناپیوستگی و RQD (مدل

## ۲- روش‌ها و مراحل پژوهش

در این پژوهش برای گردآوری اطلاعات پایه از مطالعات دفتری، صحرایی و آزمایشگاهی استفاده شد. از نقشه‌های زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای، گزارش‌های موجود و منابع مرتبط جهت انجام مطالعات اولیه استفاده شد. ویژگی‌های مورد نیاز جهت تهیه مدل‌های مختلف از اطلاعات ۲۸ گمانه حفاری شده در ساخت‌گاه سد خرسان ۲ استخراج شد. این ویژگی‌ها شامل عدد لوژون، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و شرایط سطح درزه (پرشدگی، هوازدگی و زبری سطح درزه) است. سپس برای برآورد مدل‌های پیش‌بینی تراوایی توده

باقیمانده‌ها استفاده شد. در نهایت بر اساس مطالعات و ارزیابی‌های صورت گرفته، مدل نشان داده شده در شکل ۱ ارائه شد.

۳) به عنوان متغیرهای مستقل، بررسی شد. سپس برای ارزیابی مدل‌های مختلف از سه شاخص ارزیابی عملکرد مختلف شامل ضریب همبستگی<sup>۱</sup>، جذر میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> (RMSE) و مقدار VAF<sup>۳</sup> و همچنین تحلیل



شکل ۱. روش و نمودار جریان پژوهش

ایران قرار گرفته است. روند ساختمانی و زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه از روند حاکم بر پهنه زاگرس پیروی می‌کند. با توجه به روند زمین‌ساختی زاگرس (شمال‌غربی - جنوب‌شرقی)، روند ساختاری محدوده مورد مطالعه نیز با این روند منطبق است؛ به عبارت دیگر گسل‌ها و روند زمین‌ساختی منطقه دارای روند کلی شمال‌غربی - جنوب شرقی هستند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، در بالادست محل سد سازندهای زمین‌شناسی شامل سازندهای آسماری، گچساران، آغاچاری، بختیاری و رسوبات آبرفتی عهد حاضر رخمون دارند (شکل‌های ۵ تا ۷). ساخت‌گاه سد بر روی سازند آسماری واقع شده است (شکل‌های ۵ و ۶). از نظر سنگ‌شناسی شامل آهک کرم تا قهوه‌ای رنگ با درزه و شکاف فراوان در سطح است. سازند آسماری در بخش زیرین خود، عموماً شیل‌ها و مارن‌های

## ۲-۱- گستره مورد مطالعه

سد خرسان ۲ بر روی رودخانه‌ی خرسان یکی از سرشاخه‌های مهم رودخانه‌ی کارون با مختصات ۳۱ درجه و ۲۵ دقیقه درجه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۶ دقیقه درجه طول خاوری در استان چهارمحال و بختیاری در فاصله‌ی حدود ۶۰ کیلومتری جنوب باختری شهر لردگان و در ناحیه جنوب باختری ایران در ارتفاعات زاگرس احداث شده است. این سد با ارتفاع ۲۴۰ متر از پی و طول تاج حدود ۵۵۵ متر از نوع بتنی دو قوسی است. در شکل ۲ موقعیت جغرافیایی و در شکل ۳ نقشه زمین‌شناسی سد نشان داده شده است. همچنین نمایی از محل احداث سد در شکل ۴ ارائه شده است.

گستره مورد مطالعه در پهنه زمین‌ساختی زاگرس و در زیر پهنه زمین‌ساختی چین‌خورده از تقسیمات زمین‌شناسی

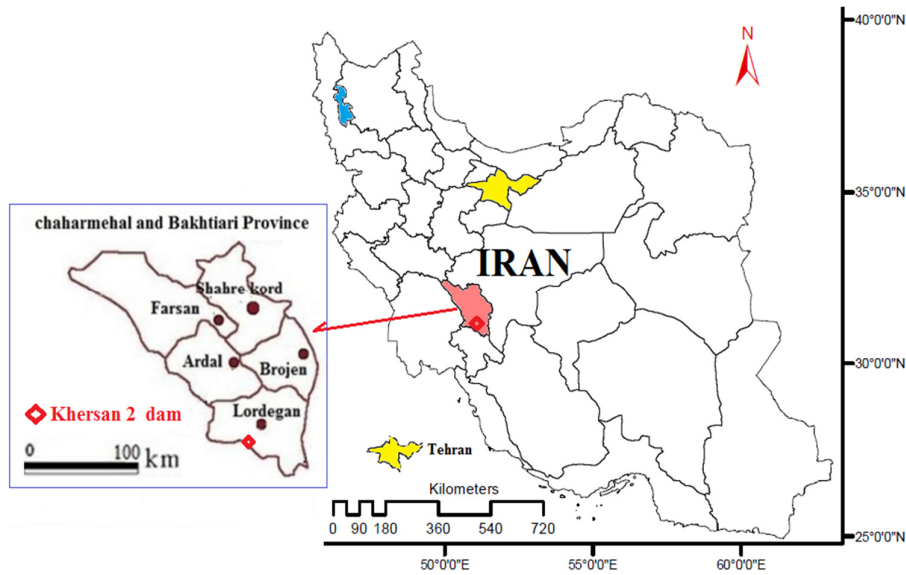
<sup>3</sup> Variance Account for

<sup>1</sup> Correlation Coefficient

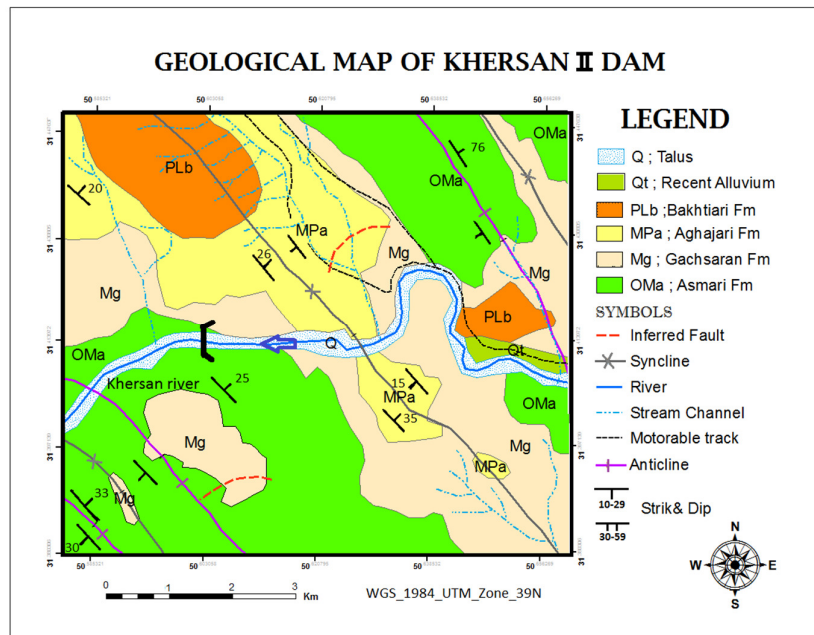
<sup>2</sup> Root Mean Square Error

دارای تناوبی متشکل از آهک‌های خاکستری تا کرم‌رنگ، متوسط تا نازک لایه، آهک مارنی و مارن بوده و ضخامت آن حدود ۱۵۰-۱۲۰ متر است. رخنمون بخش زیرین آسماری در پایین دست مجموعه سازه‌های جانبی طرح مشاهده شده است که شامل حدود ۱۶۰-۱۴۰ متر از آهک‌های ضخیم لایه تا توده‌ای به رنگ نخودی روشن است.

سازند پابده را به‌طور هم‌شیب می‌پوشاند و خود نیز توسط سازند گچساران به‌طور هم‌شیب پوشیده شده است (شکل ۷). این سازند به لحاظ خصوصیات زمین‌شناختی به سه واحد آسماری بالایی، آسماری میانی و آسماری زیرین قابل تفکیک است. بخش بالای آسماری که بدنه اصلی سد را در بر گرفته است (شکل ۵) از آهک‌های ضخیم تا متوسط لایه، با لایه‌بندی منظم و درصد کمی از آهک‌های نازک لایه تا آهک‌های مارنی تشکیل شده است. واحد آسماری میانی



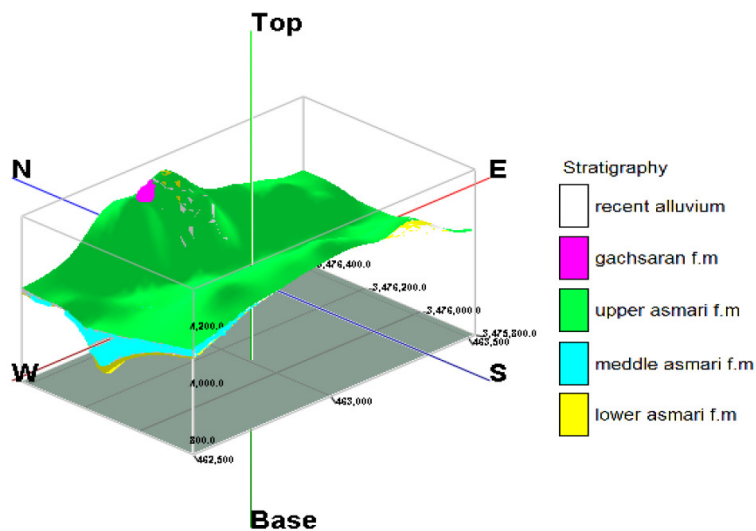
شکل ۲. موقعیت محل مورد مطالعه



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه سد خرسان ۲ (رحیمی‌شهید و همکاران، ۲۰۱۶-ب)



شکل ۴. نمایی از سد خرسان ۲ (دید به سمت جنوب) (رحیمی شهید، ۱۳۹۴)



شکل ۵. مدل سه‌بعدی توپوگرافیک ساخت‌گاه سد خرسان ۲ به همراه سازندهای زمین‌شناختی (رحیمی شهید و مشرفی‌فر، ۱۳۹۳)



شکل ۶. رخنمون سازند آسماری (As) در (الف). تکیه‌گاه‌ها (دید به سمت شمال خاوری) و (ب) مخزن سد (دید به سمت خاور) (رحیمی شهید، ۱۳۹۴)

## ۲-۲- داده‌ها

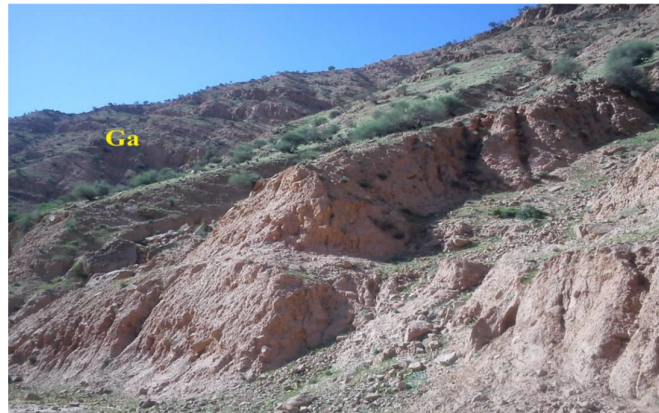
سطح درزه) است که از تعداد ۲۸ گمانه حفاری شده در سازند آسماری در ساخت‌گاه سد خرسان ۲ انتخاب شده است. موقعیت این گمانه‌های اکتشافی در شکل ۸ نمایش داده شده است. توزیع مقادیر اولیه RQD و لوژون در

داده‌های این پژوهش ویژگی‌های مورد بررسی شامل عدد لوژون (Lu)، شاخص کیفی توده‌سنگ (RQD)، فاصله‌داری درزه‌ها و شرایط سطح درزه (پرشدگی، هوازدگی و زبری

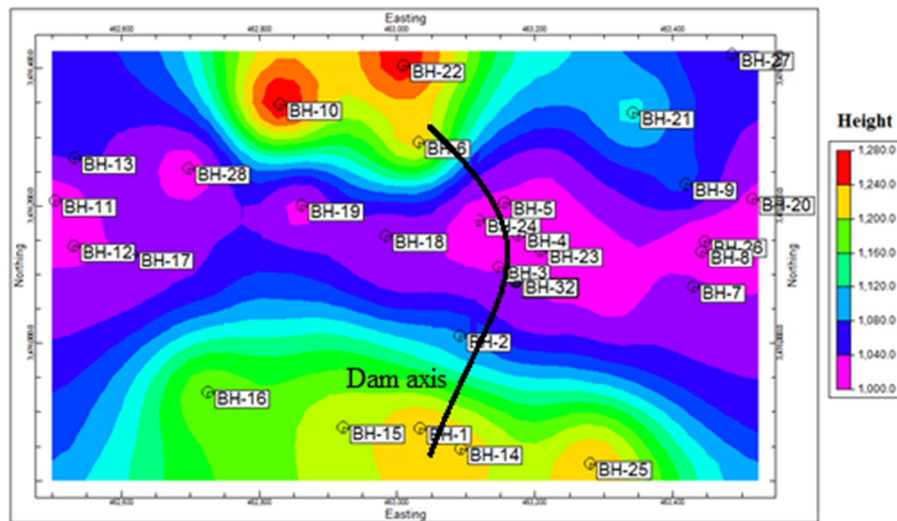


ندارد. همچنین بر اساس عدد لوژون هیچ گمانه‌ای نفوذناپذیری مشاهده نمی‌شود.

جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است. در ساخت‌گاه سد خراسان ۲، در هیچ گمانه‌ای RQD ضعیف و خیلی ضعیف وجود



شکل ۷. رخنمون سازند گچساران (Ga) در ساحل راست ساخت‌گاه سد (دید به سمت غرب) (رحیمی شهید، ۱۳۹۴)



شکل ۸. پلان تهیه‌شده از موقعیت گمانه‌های حفاری‌شده (رحیمی شهید و همکاران، ۲۰۱۶-ب)

جدول ۳. توزیع RQD در ساخت‌گاه سد خراسان ۲

RQD	کیفیت توده سنگ	سد خراسان ۲ (درصد)
۲۵-۰	خیلی ضعیف	۰
۵۰-۲۵	ضعیف	۰
۷۵-۵۰	متوسط	۲۸/۶
۹۰-۷۵	خوب	۵۷/۱
۱۰۰-۹۰	عالی	۱۴/۳

جدول ۴. توزیع لوژون در ساخت‌گاه سد خراسان ۲

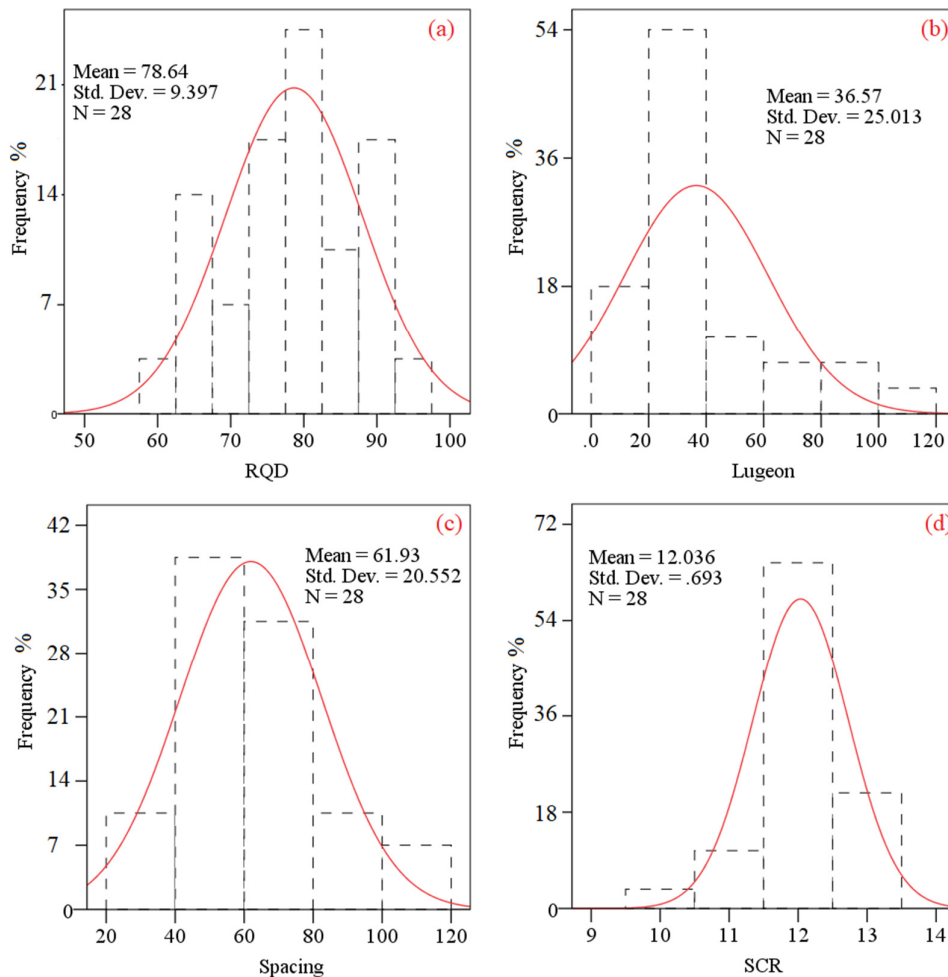
لوژون	توصیف تراوایی	سد خراسان ۲ (درصد)
<۳	نفوذناپذیر	۷/۱
۱۰-۳	کم	-
۳۰-۱۰	متوسط	۵۳/۶
۶۰-۳۰	زیاد	۲۱/۴
>۶۰	خیلی زیاد	۱۷/۹

RQD، فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR با (Sig.=0.2) است. میانگین مقادیر لوژون، RQD، فاصله‌داری (m) و SCR در ۲۸ گمانه به ترتیب برابر با ۳۶/۷۳، ۷۸/۷۳، ۰/۶۲ و ۱۲/۵ است. مقادیر لوژون بین ۲۰ تا ۴۰ بیشترین فراوانی را دارد درحالی‌که بیشترین فراوانی RQD مربوط به مقادیر ۸۰ درصد است.

آمار توصیفی داده‌های اولیه در جدول ۵ و نمودار ستونی فراوانی هر ویژگی در شکل ۹ نمایش داده شده است. بر اساس جدول ۵، مقادیر لوژون توده‌سنگ بین ۲ تا ۱۰۰، RQD بین ۶۰ تا ۹۳ درصد، فاصله‌داری ناپیوستگی بین ۰/۲۵ تا ۱/۱۶ متر و SCR بین ۱۰/۸۵ تا ۱۳/۷ (امتیازدهی بر اساس جدول ۲) است. نتایج آزمون کمولوگرو-اسمیرنو<sup>۱</sup> در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ حاکی از نرمال بودن توزیع

جدول ۵. آمار توصیفی اولیه ویژگی‌های توده سنگ

متغیرها	تعداد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	کمولوگرو - اسمیرنو
RQD, %	۲۸	۶۰	۹۳	۷۸/۷۳	۹/۳۹	۰/۲
فاصله‌داری (m)	۲۸	۰/۲۵	۱/۱۶	۰/۶۲	۰/۲	۰/۲
SCR	۲۸	۱۰/۸۵	۱۳/۷	۱۲/۵	۰/۶۹	۰/۲
لوژون	۲۸	۲	۱۰۰	۳۶/۷۳	۲۵	۰/۰۰۲



شکل ۹. نمودارهای ستونی (a) RQD، (b) لوژون، (c) فاصله‌داری ناپیوستگی (cm) و (d) SCR

<sup>1</sup> Kolmogorov - Smirnov

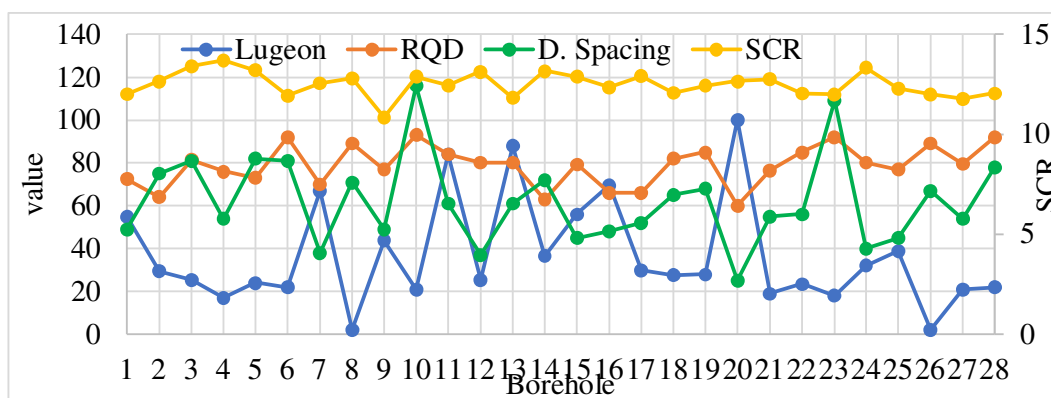


## ۳- نتایج

## ۳-۱- تحلیل رگرسیون

برای مقایسه و بررسی تغییرات ویژگی‌های مختلف در شکل ۱۰ مقادیر لوژون، RQD، فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR در هر گمانه نمایش داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود با توجه به ماهیت شاخص RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی، رابطه معکوس بین این دو ویژگی با لوژون در اکثر گمانه‌ها مشهود است. همان‌گونه که انتظار می‌رود با توجه به ماهیت فاصله‌داری ناپیوستگی، رابطه معکوسی بین این ویژگی با لوژون در ۵۳/۵۷ درصد گمانه‌ها مشهود است (گمانه‌های ۱، ۲، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱، ۱۴، ۱۶، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۲۶، ۲۸). همچنین در ۴۶/۴۳ درصد گمانه‌ها، رابطه‌ی بین لوژون و RQD معکوس است (گمانه‌های ۳، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۳، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۳، ۲۵، ۲۷). درحالی‌که در اکثر گمانه‌ها رابطه‌ای بین عدد لوژون و SCR مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۰). علی‌رغم RQD

بالای ۶۰ درصد در تمامی گمانه‌ها، مقادیر لوژون در ۸۲/۱۴ درصد گمانه‌ها بیش از ۲۰ می‌باشد و تنها در گمانه‌های BH08 و BH26 عدد لوژون کم‌تر از ۵ است. دلیل اصلی این تراوایی بالا، سیمان ضعیف سنگ‌های آهکی سازند آسماری و جنس مواد پرکننده‌ی درزه‌ها می‌باشد که طی عملیات آزمون لوژون و در اثر فشار آب شسته می‌شود. در ابتدا، تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده (با سطح اطمینان ۹۵ درصد) برای مقدار لوژون و متغیرهای مستقل دیگر (با حذف داده‌های خارج از رده) با استفاده از توابع خطی، نمایی، توان و لگاریتمی انجام شد (جدول ۶). نتایج رگرسیون ساده نشان می‌دهد که از نظر آماری بین لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها رابطه‌ی معناداری وجود دارد ( $Sig < 0.05$ ) درحالی‌که بین لوژون و SCR رابطه معناداری وجود ندارد ( $Sig > 0.05$ ). رابطه بین عدد لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها منفی و به ترتیب از نوع نمایی و توانی است (شکل ۱۱ و جدول ۷).



شکل ۱۰. مقایسه مقادیر لوژون، RQD، فاصله‌داری (cm) و SCR در گمانه‌های مختلف

جدول ۶. ضرایب همبستگی ( $R^2$ ) بین مقدار لوژون با سایر متغیرها

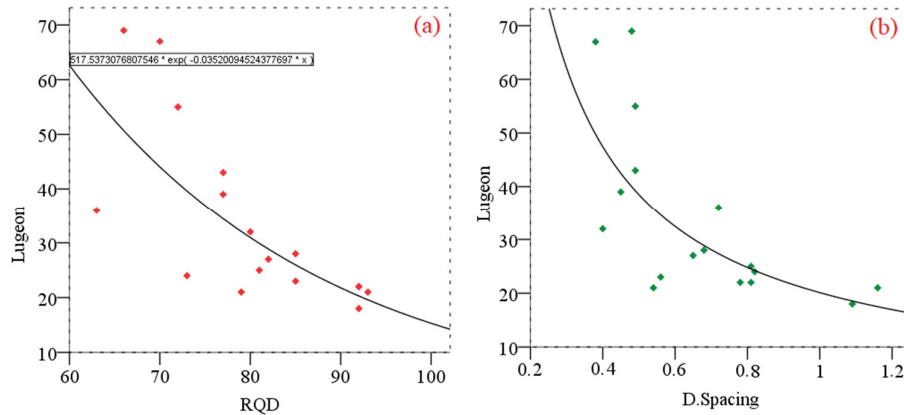
SCR		فاصله‌داری		RQD		متغیر وابسته	مدل
Sig.	$R^2$	Sig.	$R^2$	Sig.	$R^2$		
۰/۷۶۱	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۴۲	۰/۰۰۱	۰/۵۴	لوژون	خطی
۰/۸۱۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۵۰	.	۰/۶۰	لوژون	نمایی
۰/۸۱۰	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۰/۵۴	.	۰/۵۹	لوژون	توانی
۰/۷۶۳	۰/۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۴۷	۰/۰۰۱	۰/۵۴	لوژون	لگاریتمی

این دو ویژگی به‌عنوان ورودی در مدل پیش‌بینی استفاده کرد (کایاباشی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین به‌طور مشابه بین فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR رابطه معناداری وجود ندارد ( $Sig > 0.05$ ). عوامل متعددی در مقادیر لوژون مؤثر هستند و ضروری است که نقش این عوامل به‌صورت

ماتریس‌های همبستگی برای ارزیابی همبستگی چندگانه در بین ویژگی‌های ورودی ساخته شده‌اند (جدول ۸). ضریب همبستگی بین RQD و SCR، ۲۰/۸ درصد است که نشان‌دهنده این است که رابطه معناداری بین این دو ویژگی وجود ندارد ( $Sig > 0.05$ ). به همین دلیل می‌توان از

لوژون، از سه مدل استفاده شد. در مدل اول رابطه لوژون با RQD و SCR، در مدل دوم رابطه لوژون با فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR و در مدل سوم رابطه لوژون با فاصله‌داری ناپیوستگی و RQD مورد ارزیابی قرار گرفت.

تجمعی در برآورد لوژون مدنظر قرار گیرد. استفاده از رگرسیون چندمتغیره یک ابزار قدرتمند برای برآورد لوژون با استفاده از ویژگی‌های مختلف است. در این پژوهش برای تهیه مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره پیش‌بینی عدد



شکل ۱۱. تجزیه و تحلیل رگرسیون ساده بین لوژون و (a) RQD و (b) فاصله‌داری ناپیوستگی (m)

جدول ۷. معادلات رگرسیون ساده

R <sup>2</sup>	معادله
۰/۶۰	Lu = 517.54 × exp (-0.03 × RQD)
۰/۵۴	Lu = 20.11 × (Discontinuity spacing) <sup>-0.94</sup>
۰/۰۰۶	Lu = -1.89 SCR + 57.3

جدول ۸. ضرایب همبستگی روابط بین متغیرهای مستقل

متغیرها	RQD	فاصله‌داری (m)	SCR
RQD	۱	۰/۶۰ (Sig. = 0.003)	۰/۲۰ (Sig. = 0.423)
فاصله‌داری (m)		۱	۰/۱۹ (Sig. = 0.451)
SCR			۱

همکاران، ۲۰۱۱؛ خرمی و همکاران، ۲۰۱۱) و تراوایی (کاپاشی و همکاران، ۲۰۱۵) استفاده شده است. در این پژوهش تحلیل رگرسیون چندمتغیره با استفاده از نرم‌افزار SPSS V. 22 با سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد که نتایج آن در جدول ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی لوژون با استفاده از RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی بیشترین دقت را دارد.

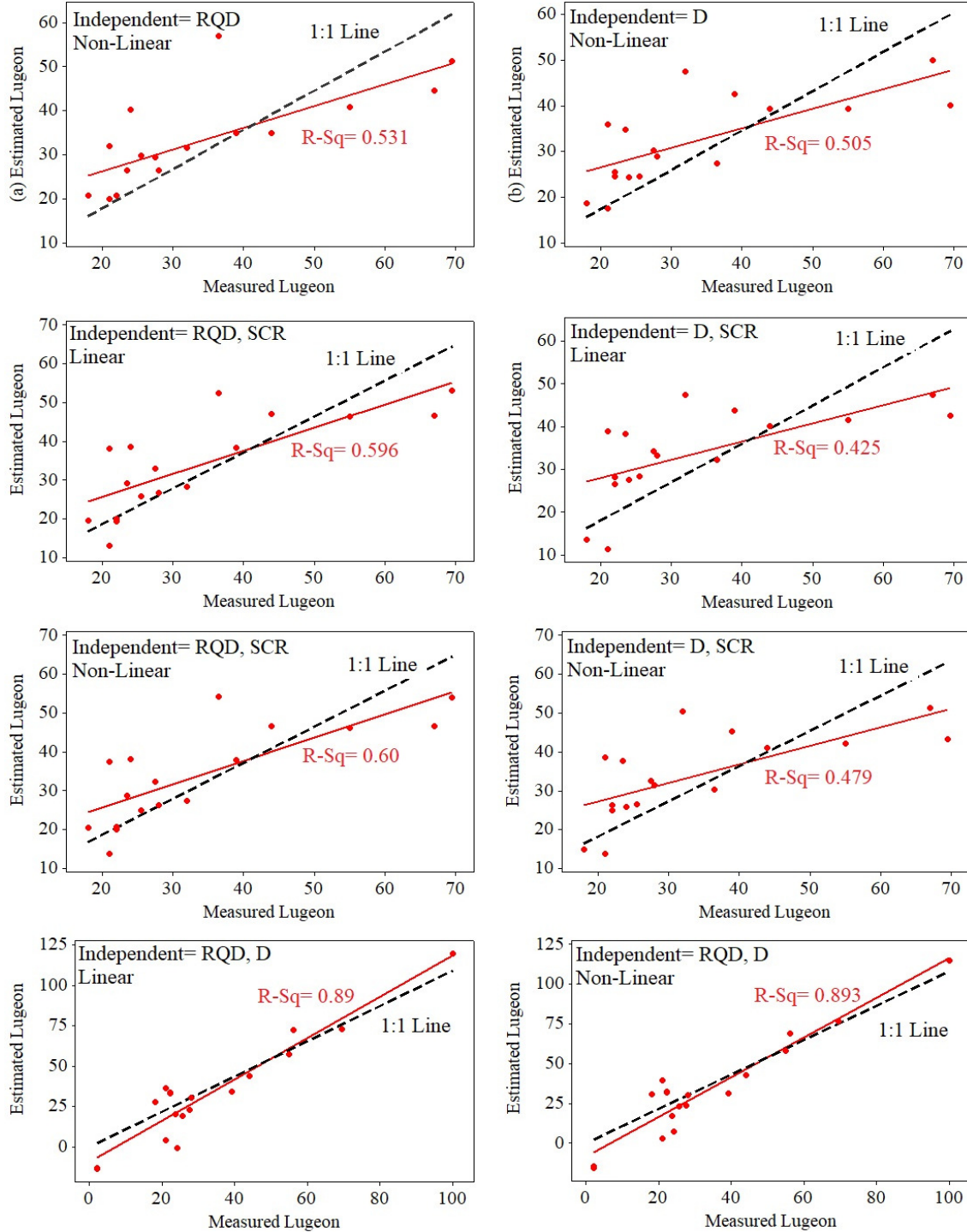
### ۳-۲- ارزیابی مدل‌های پیشنهادی

در اولین گام جهت ارزیابی مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل‌های مختلف، در شکل ۱۲ نمودار مقادیر لوژون

با استفاده از ویژگی‌های ورودی، معادله‌های رگرسیون چند متغیره خطی و غیرخطی در جدول ۹ ارائه شده است. رگرسیون غیرخطی یک روش آماری است که برای یافتن یک رابطه غیرخطی بین متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل استفاده می‌شود. از این روش در مطالعات مختلفی برای حل مسائل زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی مانند مقاومت فشاری تک‌محوره (گوکسگلو و همکاران، ۲۰۰۹؛ یانگیز و همکاران، ۲۰۱۲؛ یسیلوکلو و همکاران، ۲۰۱۳ الف و ب)، مدول الاستیسیته و مقاومت (یلماز و یوکسک، ۲۰۰۹)، شکنندگی توده سنگ (یانگیز و گوکسگلو، ۲۰۱۰)، شاخص تورم (چلگانی و

و مقادیر پیش‌بینی‌شده لوژون وجود دارد. در رگرسیون‌های تک‌متغیره، کمترین انطباق بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده‌ی لوژون وجود دارد.

اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده، ترسیم شد. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، در رابطه غیرخطی بین لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی بیش‌ترین انطباق ( $R^2=0.89$ ) بین مقادیر اندازه‌گیری شده



شکل ۱۲. اندازه‌های واقعی لوژون در برابر اندازه‌های پیش‌بینی شده لوژون

جدول ۹. معادلات رگرسیون چند متغیره خطی و غیر خطی برای هر مدل

R2	معادله	مدل	رگرسیون چندمتغیره
۰/۵۹	Lu= -1.37 RQD - 5.91 SCR + 216.75	۱	خطی
۰/۴۲	Lu= -46.8 (D) + 1.20 SCR + 50.15	۲	
۰/۷۲	Lu= -2.01RQD -0.09D +203	۳	
۰/۶۰	Lu= -108.24 Ln(RQD) - 6.11 SCR + 583.09	۱	غیرخطی
۰/۴۷	Lu= - 34.04 Ln(D) + 1.03 SCR + 5.49	۲	
۰/۷۵	Lu= -RQD -20 Ln(D) +243.03	۳	

جدول ۱۰. ارزیابی معادلات مدل‌های پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های آماری

	معادله	RMSE	VAF	R <sup>2</sup>
a	Lu= 517.54 × exp (-0.03 × RQD)	10.78	45.92	0.60
b	Lu= 20.11 × (D) <sup>-0.94</sup>	11.24	36.27	0.54
c	Lu= -1.37 RQD - 5.91 SCR + 216.75	9.95	59.65	0.59
d	Lu= -46.80 (D) + 1.20 SCR + 50.15	11.86	42.51	0.42
e	Lu= -108.24 Ln(RQD) - 6.11 SCR + 583.09	9.9	60.07	0.60
f	Lu= - 34.04 Ln(D) + 1.03 SCR + 5.49	11.30	47.89	0.47
g	Lu= -2.01RQD -0.09D +203	12.45	71.92	0.72
h	Lu= -RQD -20 Ln(D) +243.03	11.76	74.95	0.75

در جدول ۱۰ نتایج ارزیابی معادلات مدل‌های پیشنهادی با استفاده از شاخص‌های آماری ارائه شده است. بر اساس شاخص‌های ارزیابی آماری مقدار VAF و ضریب همبستگی (R<sup>2</sup>)، رگرسیون غیرخطی چندمتغیره بین لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی (D) و بر اساس شاخص آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، رگرسیون غیرخطی چندمتغیره بین لوژون با SCR و RQD نسبت به سایر معادلات از دقت بیش‌تری برخوردار هستند. بر اساس شاخص‌های آماری مختلف نیز رگرسیون‌های تک متغیره کمترین دقت را دارند. تحلیل باقیمانده‌ها (اختلاف مقادیر واقعی و مقادیر تخمینی) یکی از روش‌های معتبر و پرکاربرد برای ارزیابی روابط تخمینی است (حسینی‌پاک، ۱۳۸۹) که در مطالعات مهندسی ژئوتکنیک نیز به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد (جبین‌پور و همکاران، ۱۳۹۷؛ رحیمی‌شهید و هاشمیان، ۲۰۲۱؛ کرمی و همکاران، ۱۴۰۰). هر چه میانگین باقیمانده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد، اعتبار روابط تجربی بیشتر است (حسینی‌پاک، ۱۳۸۹). همچنین نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها بیان‌گر اعتبار بالای روابط است. در شکل ۱۳ توزیع باقیمانده‌های روابط تک و چندمتغیره لوژون نمایش داده شده است. میانگین باقیمانده‌ها برای رگرسیون‌های تک متغیره لوژون به‌مراتب بیش‌تر از رگرسیون چندمتغیره

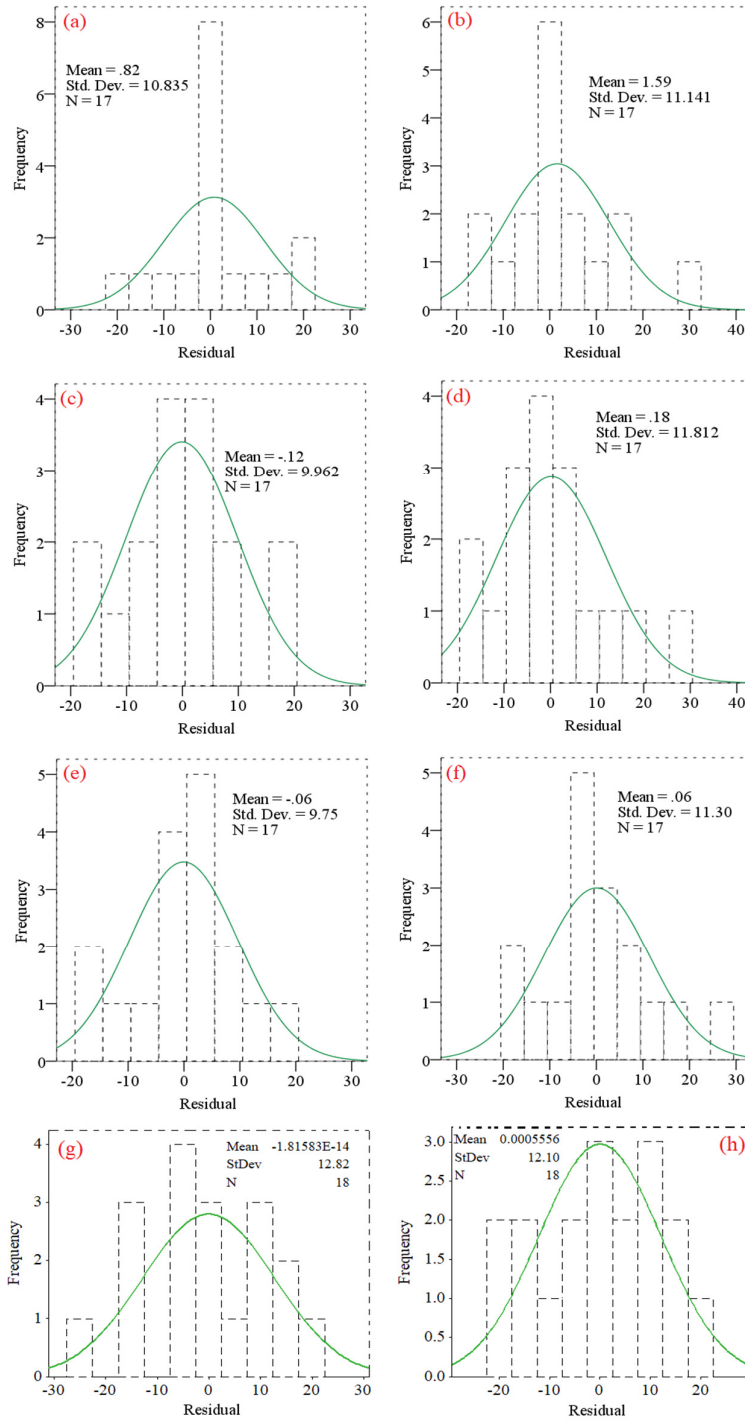
برای ارزیابی دقیق‌تر مدل‌های پیشنهادی بین ویژگی‌های مختلف در این پژوهش، از سه شاخص ارزیابی عملکرد مختلف شامل ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار VAF استفاده شد (معادله‌های ۶ و ۷). ضریب همبستگی یکی از شاخص‌های آماری مهم برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها است که هر چه مقدار آن برای یک مدل خاص به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالای آن مدل است. از طرف دیگر، هر چه مقدار شاخص میانگین جذر مربعات خطا هم به صفر نزدیک‌تر باشد معرف دقت بالای مدل و انطباق بیشتر آن با مقادیر واقعی است. علاوه بر این، مقدار VAF هم برای تعیین قابلیت اعتماد و میزان خطای روش‌ها و مدل‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. هر چه مقدار این شاخص برای یک مدل خاص به ۱۰۰ درصد نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت و اعتبار بیشتر آن است. معادله جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقدار VAF در زیر آورده شده است. در این معادله‌ها،  $y$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $y'$  مقادیر پیش‌بینی شده و  $N$  تعداد داده‌ها است (هکینگ، ۱۹۷۶).

$$VAF = [1 - (\text{var}(y - y')/\text{var}(y))] \times 100$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \times \sum_{i=1}^N (y - y')^2}$$

درصد است که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها است (شکل ۱۳-h). همچنین توزیع باقیمانده‌های این رگرسیون نشان می‌دهد که فراوانی مقادیر صفر و نزدیک به صفر بالا است (شکل ۱۳-h).

است. میانگین باقیمانده‌ها برای رگرسیون غیرخطی چند متغیره لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی تقریباً صفر (۰/۰۰۰۵) است و درصد باقیمانده‌هایی که در بازه مثبت و منفی دو برابر انحراف معیار باقیمانده‌ها قرار می‌گیرد ۱۰۰



شکل ۱۳. نمودارهای ستونی توزیع باقیمانده‌ها (a)  $L = -1.37 RQD - (c) .Lu = 20.11 \times (D)^{-0.94}$  (b)  $.Lu = 517.54 . e^{(-0.03 RQD)}$  (d)  $.5.91 SCR + 216.75 Lu = (f) .Lu = -108.24 Ln (RQD) - 6.11 SCR + 583.09$  (e)  $.Lu = -46.80 (D) + 1.20 SCR + 50.15$  (g)  $-34.04 Ln (D) + 1.03 SCR + 5.49 Lu = -RQD - 20 Ln(D) + 243.03$  (h) و  $.Lu = -2.01RQD - 0.09D + 203$

## ۴- بحث

بازشدگی تمامی درزه‌های ثبت شده در توده‌سنگ‌های ساخت‌گاه سد خرسان ۲، در بازه ۰/۵ تا ۲/۵ میلی‌متر قرار می‌گیرد که عمدتاً توسط مواد پرکننده شامل ذرات کلسیت ثانویه، سیلت و رس، مواد آلی و به میزان کم ژئوپس پرشده‌اند. با توجه به ترکیب سنگ‌های ساخت‌گاه (آهک آسماری) و فراوانی کلسیت در محیط، این ماده به‌عنوان مهم‌ترین ماده پرکننده درزه‌ها، تقریباً در بازشدگی نیمی از درزه‌ها مشاهده می‌شود. در گمانه‌های BH08 و BH26 به ترتیب ۷۸/۹ و ۱۰۰ درصد جنس مواد پرکننده از مواد سیلیکاتی است و مقادیر لوژون این گمانه‌ها کمتر از ۵ است. درحالی‌که علی‌رغم RQD بالای ۶۰ درصد در تمامی گمانه‌ها، مقادیر لوژون در ۸۲/۱۴ درصد گمانه‌ها بیش از ۲۰ می‌باشد که علت آن سیمان ضعیف و جنس مواد پرکننده درزه‌ها در این نوع توده سنگ است. در واقع با اعمال فشار آب در طی آزمون لوژون، مواد پرکننده شسته شده و باعث افزایش تراوایی توده‌سنگ می‌شود. در مطالعات اجل لوئیان و همکاران (۱۳۹۲) نیز سیمان ضعیف توده‌سنگ‌های با شاخص کیفی متوسط تا خوب باعث افزایش تراوایی شده است. در سال‌های اخیر استفاده از رگرسیون در مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک برای برآورد پارامترهای مختلف به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. البته استفاده از رگرسیون برای برآورد مقادیر لوژون کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه پسندی و همکاران (۱۳۹۱) یک رابطه توانی ( $R^2=0.465$ ) میان لوژون و خوردن سیمان برقرار شده است. در مطالعات چمن‌زاده و همکاران (۲۰۱۶ - الف و ب) رابطه‌ی معناداری بین لوژون و RQD به دست نیامد. اوگ (۲۰۱۷) یک رابطه‌ی نمایی برای برآورد لوژون با استفاده از شرایط سطح درزه و RQD پیشنهاد کرد. اوگ و سیراک (۲۰۱۹) برآورد لوژون با استفاده از RQD و شرایط سطح ناپیوستگی در سیستم طبقه‌بندی (RMR) را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس مطالعات آن‌ها روابط خطی با همبستگی پایینی بین لوژون با RQD و شرایط سطح ناپیوستگی به دست آمد (جدول ۱۱). فرید و رضوان (۲۰۱۷) یک رابطه‌ی نمایی با همبستگی بالا ( $R^2=0.769$ ) بین تراوایی و RQD برقرار کردند. البته در این مطالعه همبستگی بین RQD کمتر از ۵۰ درصد با تراوایی برابر با ۴۲/۵ درصد و همبستگی بین RQD بیش‌تر از ۵۰ درصد

با تراوایی برابر با ۴۴/۳ درصد به دست آمد (جدول ۱۱). کایاباشی و همکاران (۲۰۱۵) به‌منظور برآورد لوژون از ویژگی‌های RQD، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (D) و شرایط سطح درزه (SCR) در پروژه‌های مختلف استفاده کردند. این محققین ابتدا رابطه بین لوژون با هر یک از ویژگی‌ها را برآورد کردند. سپس برای افزایش دقت برآورد لوژون از رگرسیون چندمتغیره استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از رگرسیون چندمتغیره (میانگین  $R^2=0.637$ ) نسبت به رگرسیون تک‌متغیره (میانگین  $R^2=0.50$ )، مقادیر لوژون دقیق‌تری را برآورد می‌کند. در جدول ۱۱ نتایج مطالعات پیشین با مطالعه‌ی حاضر مقایسه شده است. در این جدول لوژون و RQD برحسب درصد و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (D) برحسب سانتی‌متر است. نتایج این مطالعه و مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در توده‌سنگ‌های درزه‌دار با جنس مواد پرکننده‌ی ضعیف، تخمین لوژون با استفاده از RQD و SCR کم‌ترین اعتبار را دارد. معمولاً در چنین توده‌سنگ‌هایی رابطه‌ی معناداری بین لوژون و SCR وجود ندارد. نتایج مطالعه حاضر نیز نشان می‌دهد که استفاده از رگرسیون چندمتغیره نتایج به‌مراتب دقیق‌تری از لوژون ارائه می‌دهد. درحالی‌که در رگرسیون تک‌متغیره رابطه معناداری بین لوژون و SCR وجود ندارد، در حالت رگرسیون چندمتغیره، وجود SCR در معادلات هر مدل باعث افزایش درصد واریانس VAF و کاهش خطای مجذور مربعات (RMSE) شده است (جدول ۱۰). با وجود برابر بودن ضریب همبستگی معادلات لوژون با RQD و لوژون با SCR، معادله لوژون با RQD و SCR کم‌ترین خطای مجذور مربعات (۹/۹) و درصد VAF (۶۰/۰۷) را دارد. همچنین تحلیل باقیمانده‌ها نشان می‌دهد که میانگین باقیمانده‌ها برای رگرسیون‌های چندمتغیره لوژون نسبت به رگرسیون تک‌متغیره به‌مراتب کم‌تر است. به‌عنوان نمونه میانگین باقیمانده‌ها برای رگرسیون لوژون با RQD برابر با (۰/۸۲) و لوژون با RQD و SCR برابر (۰/۰۶-) محاسبه شد. علاوه بر دقت بیشتر شاخص‌های آماری رگرسیون چندمتغیره لوژون، استفاده از ویژگی‌های متعدد برای برآورد لوژون، از بعد ژئوتکنیکی نیز نتایج واقع‌بینانه‌تری را ارائه می‌نماید. با توجه به موارد بیان‌شده نتیجه می‌شود که در تفسیر تغییرات مقادیر لوژون جهت دستیابی به نتایج مناسب‌تر می‌بایست عوامل مؤثر را به‌صورت تجمعی مورد بررسی قرار داد.

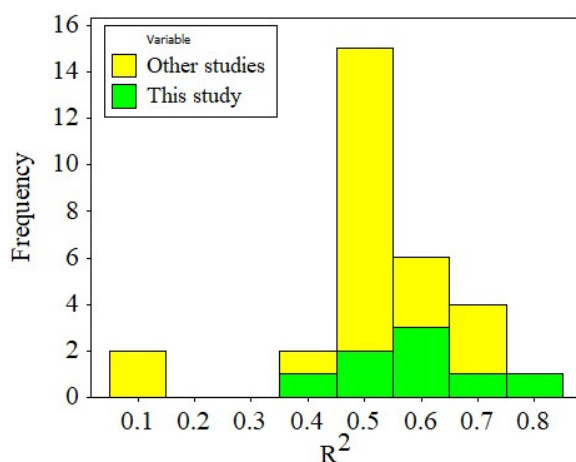


جدول ۱۱. مقایسه روابط تخمینی تراوایی توده‌سنگ بر حسب لوزون در این مطالعه با مطالعات پیشین

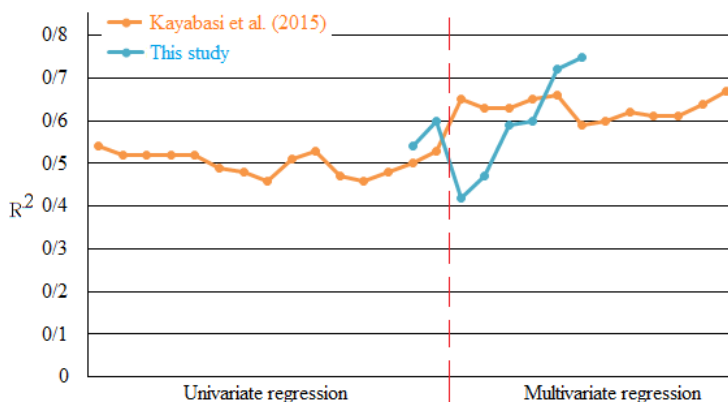
معادله	R <sup>2</sup>	منابع
$Lu = e^{[5.5+(16.5 \ln \text{cond}-165)/\text{RQD}]-1}$	Close to 1	Öge (2017)
$Lu = 14 + 0.20 \text{ RQD}$	0.13	Öge & Çırak, (2019)
$\text{Lugeon} = 7.72 + 2.7 \text{ Dc}$	0.10	Öge & Çırak, (2019)
$\text{Permeability} = 3447 \cdot e^{-0.06 \text{ RQD}} \text{ (RQD} > 50\%)$	0.44	Farid & Rizwan (2017)
$\text{Permeability} = 1015 \cdot e^{-0.02 \text{ RQD}} \text{ (RQD} < 50\%)$	0.43	Farid & Rizwan (2017)
$\text{Permeability} = 1950 \cdot e^{-0.05 \text{ RQD}}$	0.76	Farid & Rizwan (2017)
$Lu = -0.22 \ln (\text{RQD}) + 0.08$	0.54	Kayabasi et al., (2015)
$Lu = -0.23 \ln (\text{RQD}) + 0.08$	0.52	
$Lu = -0.22 \ln (\text{RQD}) + 0.08$	0.52	
$Lu = -0.21 \ln (\text{RQD}) + 0.09$	0.52	
$Lu = -0.22 \ln (\text{RQD}) + 0.09$	0.52	
$Lu = 517.54 \cdot e^{(-0.03 \text{ RQD})}$	0.60	این مطالعه
$Lu = -0.73 \text{ SCR} + 0.71$	0.49	Kayabasi et al., (2015)
$Lu = -0.73 \text{ SCR} + 0.71$	0.48	
$Lu = -0.73 \text{ SCR} + 0.7$	0.46	
$Lu = -0.77 \text{ SCR} + 0.72$	0.51	
$Lu = -0.8 \text{ SCR} + 0.75$	0.53	
$Lu = -1.9 \text{ SCR} + 57.3$	0.006	این مطالعه
$Lu = -0.2 \ln (D) - 0.03$	0.47	Kayabasi et al., (2015)
$Lu = -0.2 \ln (D) - 0.03$	0.46	
$Lu = -0.20 \ln (D) - 0.04$	0.48	
$Lu = -0.2 \ln (D) - 0.03$	0.50	
$Lu = -0.21 \ln (D) - 0.04$	0.53	
$Lu = 20.11 \times (D)^{-0.94}$	0.54	این مطالعه
$Lu = -0.15 \ln (\text{RQD}) - 0.43 \text{ SCR} + 0.41$	0.65	Kayabasi et al., (2015)
$Lu = -0.15 \ln (\text{RQD}) - 0.43 \text{ SCR} + 0.41$	0.63	
$Lu = -0.15 \ln (\text{RQD}) - 0.43 \text{ SCR} + 0.41$	0.63	
$Lu = -0.13 \ln (\text{RQD}) - 0.48 \text{ SCR} + 0.45$	0.65	
$Lu = -0.14 \ln (\text{RQD}) - 0.50 \text{ SCR} + 0.47$	0.66	
$Lu = -1.37 \text{ RQD} - 5.91 \text{ SCR} + 216.75$	0.59	این مطالعه
$Lu = -108.24 \ln (\text{RQD}) - 6.11 \text{ SCR} + 583.09$	0.60	Kayabasi et al., (2015)
$Lu = -0.12 \ln (D) - 0.48 \text{ SCR} + 0.38$	0.62	
$Lu = -0.13 \ln (D) - 0.48 \text{ SCR} + 0.37$	0.61	
$Lu = -0.13 \ln (D) - 0.46 \text{ SCR} + 0.35$	0.61	
$Lu = -0.12 \ln (D) - 0.49 \text{ SCR} + 0.38$	0.64	
$Lu = -0.13 \ln (D) - 0.5 \text{ SCR} + 0.39$	0.67	این مطالعه
$Lu = -46.80 (D) + 1.20 \text{ SCR} + 50.15$	0.42	
$Lu = -34.04 \ln (D) + 1.03 \text{ SCR} + 5.49$	0.47	
$Lu = -2.01 \text{ RQD} - 0.09 \text{ D} + 203$	0.72	
$Lu = -\text{RQD} - 20 \ln(D) + 243.03$	0.75	

افزایش می‌یابد و روابط تجربی با ضریب همبستگی بالاتری حاصل می‌شود. بر اساس نتایج این مطالعه، پیش‌بینی لوژون با استفاده از RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی بیش‌ترین دقت را دارد و در سایر پروژه‌های سدسازی به‌خصوص در سازند آسماری، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در واقع در توده‌سنگ‌های درزه‌دار با جنس مواد پرکننده‌ی ضعیف و متغیر، تخمین لوژون با استفاده از RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی معتبرترین نتایج را ارائه می‌دهد.

بررسی روابط مختلف ارائه شده برای برآورد لوژون نشان می‌دهد که در تمامی مطالعات، ضریب همبستگی ( $R^2$ ) معادلات کمتر از ۰/۸ است (جدول ۱۱). میزان همبستگی بین لوژون با متغیرهای مختلف در این مطالعه با مطالعات مشابه گذشته نزدیک بوده و از ۰/۵ تا ۰/۷۵ متغیر بوده است (شکل ۱۴). در شکل ۱۵ تغییرات ضریب همبستگی روابط این مطالعه و مطالعه‌ی کایاباشی و همکاران (۲۰۱۵) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد متغیرهای رگرسیون، دقت مقادیر لوژون پیش‌بینی شده



شکل ۱۴. مقایسه فراوانی ضریب همبستگی ( $R^2$ ) در روابط رگرسیون تک و چند متغیره این مطالعه و مطالعات پیشین



شکل ۱۵. تغییرات ضریب همبستگی ( $R^2$ ) در روابط رگرسیون تک و چندمتغیره

۵- نتیجه‌گیری  
در این پژوهش، برای تخمین تراوایی توده‌سنگ مدل‌های مختلف رگرسیون چندمتغیره توسعه داده شده است. با استفاده از نتایج گمانه‌های ژئوتکنیکی در ساخت‌گاه سد خرسان ۲، ارتباط بین عدد لوژون با شاخص کیفی توده سنگ (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی و شرایط سطح درزه (SCR) با استفاده از رگرسیون ساده و چندمتغیره ارزیابی شد. نتایج پژوهش به‌صورت خلاصه به شرح زیر است:  
از نظر آماری بین لوژون با RQD (با ضریب همبستگی ۰/۶۰) و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (با ضریب همبستگی ۰/۵۴) رابطه‌ی معناداری وجود دارد ( $Sig < 0.05$ ) درحالی‌که بین لوژون و SCR (با ضریب همبستگی

۰/۶۰) و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها (با ضریب همبستگی ۰/۵۴) رابطه‌ی معناداری وجود دارد ( $Sig < 0.05$ ) درحالی‌که بین لوژون و SCR (با ضریب همبستگی

می‌گردد. همچنین از داوران محترم به دلیل ارائه پیشنهادهای کلیدی و مؤثر تشکر می‌گردد.

### منابع

ابراهیمی، م (۱۳۹۳) تخمین لوژون در توده‌سنگ‌های درزه‌دار بر اساس مدل هندسی ناپیوستگی‌ها با استفاده از روش زمین‌آمار (مطالعه موردی: سد غدیر، استان چهارمحال و بختیاری)، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، ۱۰۰ ص.

اجل‌لوئیان، ر، محمدی، م (۱۳۹۰) ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های آهکی سازند آسماری در ساختگاه سدهای خرسان ۱ و ۲، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، دوره ۵، شماره ۱، ص ۱۰۵۹-۱۰۷۶.

اجل‌لوئیان، ر، عظیمیان، ع، حافظی مقدس، ن، بهرامی سامانی، ف (۱۳۹۲) ارزیابی نفوذپذیری و تزریق‌پذیری نهشته‌های کواترنری و توده‌سنگ‌های رسوبی ساختگاه سد نرگسی، نشریه انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۶، شماره ۱ و ۲، ص ۱۳-۳۲.

پسندی، م، اجل‌لوئیان، ر، فروغی ابری، ر (۱۳۹۱) تخمین خوردن سیمان پرده آب‌بند با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی، مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۲، شماره ۴، ص ۳۲-۴۳.

حسینی‌پاک، ع (۱۳۸۹) زمین‌آمار (ژئواستاتستیک)، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۳۱۴ ص.

ذولفقاری، ع، سهرابی بیدار، ع، ملکی جوان، م، هفتانی، م (۱۳۹۰) ارزیابی رفتار هیدروژئومکانیکی توده‌سنگ با استفاده از نتایج آزمایش لوژون در ساختگاه سد خرسان ۲، هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط‌زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، ص ۱-۹.

رحیمی‌شهید، م (۱۳۹۴) ارزیابی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی و ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های بستر سد خرسان ۲ با تأکید بر آزمون دیلاتومتری، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، ۱۶۶ ص.

رحیمی‌شهید، م، مشرفی‌فر، م، ر (۱۳۹۳) مقایسه مدول‌های تغییرشکل‌پذیری برآورد شده از آزمون‌های دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای در ساختگاه سد خرسان ۲، همایش ملی زمین‌شناسی و اکتشاف منابع، شیراز، ایران، ص ۷.

کراری، س، س، اجل‌لوئیان، ر (۱۳۹۷) کاربرد رده‌بندی توده سنگ جهت تخمین تزریق‌پذیری (مطالعات موردی). مجله زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۸، شماره ۳، ص ۴۳-۵۰.

۰/۰۰۶) رابطه معناداری برقرار نیست ( $\text{Sig} > 0.05$ ). رابطه بین لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها منفی و به ترتیب از نوع نمایی و توانی است.

با وجود RQD بالا (بیش از ۶۰) در تمامی گمانه‌ها، تراوایی توده‌سنگ نیز بالا (لوژون بیش از ۲۰) است که علت آن سیمان ضعیف و جنس مواد پرکننده‌ی درزه‌ها است.

برای تهیه مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره پیش‌بینی عدد لوژون، از سه مدل استفاده شد. در مدل اول رابطه لوژون با RQD و SCR، در مدل دوم رابطه لوژون با فاصله‌داری ناپیوستگی و SCR و در مدل سوم رابطه لوژون با فاصله‌داری ناپیوستگی و RQD مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس شاخص‌های ارزیابی آماری، رگرسیون غیرخطی چندمتغیره بین لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی با ضریب همبستگی ( $R^2 = 0.75$ ) و ( $\text{VAF} = 74.95\%$ ) نسبت به سایر معادلات از دقت بیش‌تری برخوردار است.

میانگین باقیمانده‌ها برای رگرسیون‌های تک‌متغیره لوژون به‌مراتب بیش‌تر از رگرسیون چندمتغیره است.

میانگین باقیمانده‌ها برای رگرسیون چندمتغیره غیرخطی لوژون با RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی تقریباً صفر ( $0.005$ ) است و درصد باقیمانده‌هایی که در بازه مثبت و منفی دو برابر انحراف معیار باقیمانده‌ها قرار می‌گیرد ۱۰۰ است که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها است. همچنین توزیع باقیمانده‌های این رگرسیون نشان می‌دهد که فراوانی مقادیر صفر و نزدیک به صفر زیاد است.

در توده‌سنگ‌های درزه‌دار با جنس مواد پرکننده‌ی ضعیف و متغیر، تخمین لوژون با استفاده از RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی معتبرترین نتایج را ارائه می‌دهد.

نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که استفاده از رگرسیون چند متغیره نتایج به‌مراتب دقیق‌تری از لوژون ارائه می‌دهد. با افزایش تعداد متغیرهای رگرسیون، دقت مقادیر لوژون پیش‌بینی‌شده افزایش می‌یابد و روابط تجربی با ضریب همبستگی بالاتری حاصل می‌شود.

### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از جناب آقای دکتر محمد هفتانی به خاطر همکاری صمیمانه و همچنین مدیریت محترم شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران به خاطر در اختیار گذاشتن داده‌ها جهت انجام این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری

- Journal of Geotechnical and Geological Engineering, 11: 887-890.
- Foyo, A., Sánchez, A. M., Tomillo, C (2005) A proposal for a secondary permeability index obtained from water pressure test in dam. Eng. Geol., 77: 69-82.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Kayabasi, A (2003) Predicting the deformation moduli of rock asses. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40: 701-710.
- Gokceoglu, C., Sonmez, H., Zorlu, K (2009) Estimating the uniaxial compressive strength of some clay-bearing rocks selected from Turkey by nonlinear multivariable regression and rule-based fuzzy models. Expert. Syst., 26: 176-190.
- Hocking, R (1976) A Biometrics Invited Paper. The Analysis and Selection of Variables in Linear Regression. Biometrics, 32: 1 - 49.
- Hoek, E., Bray, J (2004) Rock Slope Engineering Civil and Mining", In: Wyllie, D.C., Mah, C.W. (Eds.), 4th edition Spon Press, New York, pp. 431.
- Huitt, J. L (1956) Fluid flow in simulated fracture. J. Am. Inst. Chem. Eng., 2: 259-264.
- ISRM (1981) International Society for Rock Mechanics (ISRM) Suggested Method: Rock Characterization, Testing and Monitoring. In: Brown, E.T. (Ed.), Pergamon Press, London.
- Kayabasi, A., Gokceoglu, C., Ercanoglu, M (2003) Estimating the deformation moduli of rock masses—a comparative study. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 40: 55-63.
- Kayabasi, A., Yesiloglu-Gultekin, N., Gokceoglu, C (2015) Use of non-linear prediction tools to assess rockmass permeability using various discontinuity parameters. Engineering Geology, 185: 1-9.
- Khorami, M. T., Chelgani, S. C., Hower, J. C., Jorjani, E (2011) Studies of relationships between free swelling index (FSI) and coal quality by regression and adaptive neuro fuzzy inference system. Int. J. Coal Geol., 85: 65-71.
- Lashkaripour, G. R., Rastegarnia, A., Ghafoori, M (2018) Assessment of brittleness and empirical correlations between physical and mechanical parameters of the Asmari limestone in Khersan 2 dam site in southwest of Iran. Journal of African Earth Sciences, 138: 124-132.
- Lee, H. C., Farmer, W. L (1990) A simple method of estimating rock mass porosity and permeability. Int. J. Rock Mech. Min. Geol. Eng., 8: 57-65.
- Louis, C (1969) A Study of Groundwater Flow in Jointed Rock and its Influence on the Stability of Rock Masses. Doctorate thesis, University of Karlsruhe.
- Lugeon, M (1933) Barrages et Géologie. Méthodes de recherches. Terrassement et Imperméabilisation. Lausanne (Suisse), pp. 139.
- کرمی، م، رحیمی‌شهید، م، لشکری‌پور، غ (۱۴۰۰) پیش‌بینی شاخص شکنندگی و تعیین همبستگی تجربی بین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ‌آهک سازند تله‌زنگ در ساخت‌گاه سد هواسان، مجله یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۵، شماره ۳۰، ص ۱۲۵-۱۴۵.
- کریم‌دوست، س، مهرنهاد، ح، نجاتی، ح (۱۳۹۶) ارائه مدل تجربی جدید برای تخمین مدول دگرشکل‌پذیری توده سنگ (مطالعه موردی: سد خرسان ۲)، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳ و ۴، ص ۴۳-۵۳.
- Ajalloeian, R., Mohammadi, M (2014) Estimation of limestone rock mass deformation modulus using empirical equations. Bull Eng Geol Environ, 73: 541-550.
- Barton, N (2002) Some new Q-value correlations to assist in rock masses for the design of tunnel design. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 39: 185-216.
- Cevik, A., Seze, E. A., Cabalar, A. F., Gokceoglu, C (2011) Modelling of the uniaxial compressive strength of some clay-bearing rocks using neural network. Appl. Soft Comput, 11: 2586-2593.
- Chamanzadeh, A., Moshrefy-Far, M. R., Rahimi Shahid, M., Moosavi, S. M (2016-a) Statistical analysis of the rock masses permeability in Shahid dam site. International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment in the Third Millennium, Rasht, Iran, p.12.
- Chamanzadeh, A., Moshrefy-Far, M. R., Rahimi Shahid, M., Moosavi, S. M (2016-b) Grout curtain optimum position design of Shahid dam using RockWork 15 software. International Conference on Civil Engineering, Architecture, Urban Management and Environment in the Third Millennium, Rasht, Iran, p.16.
- Chelgani, S. C. Hower, J. C. Hart, B (2011) Estimation of free-swelling index based on coal analysis using multivariable regression and artificial neural network. Fuel Process. Technol., 92: 349-355.
- Davis, S. N (1969) Porosity and permeability of natural materials. In: de Weist, R. (Ed.), Flow through Porous Media. Academic Press, London (54d. R).
- Dincer, I., Acar, A., Ural, S (2008) Estimation of strength and deformation properties of quaternary caliche deposits. Bull. Eng. Geol. Environ., 67: 353-366.
- Farid, A. T., Rizwan, M (2017) Prediction of in situ Permeability for Limestone Rock Using Rock Quality Designation Index. International

- Terzaghi, K., Peck, R (1967) Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 729.
- Yagiz, S., Gokceoglu, C (2010) Application of fuzzy inference and non-linear regression methods for predicting rock brittleness. *Expert Syst. Appl.*, 37: 2265–2272.
- 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. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 36: 1636–1650.
- Yesiloglu-Gultekin, N., Gokceoglu, C., Sezer, E. A (2013-a) Prediction of uniaxial compressive strength of some granitic rocks selected from Turkey by various nonlinear tools and comparison of their performances. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 62: 113–122.
- Yesiloglu-Gultekin, N., Sezer, E. A., Gokceoglu, C., Bayhan, H. (2013-b) An application of adaptive neuro fuzzy inference system for estimating the uniaxial compressive strength of certain granitic rocks from their mineral contents. *Expert Syst. Appl.*, 40: 921–928.
- Yilmaz, I., Yuksek, A. G. (2009) Prediction of the strength and elasticity modulus of gypsum using multiple regression, ANN, ANFIS models and their comparison. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 46: 803–810.
- Maini, Y. N (1971) In-situ Parameters in Jointed Rock—Their Measurement and Interpretation. Ph. D. Thesis. University of London (Imperial College).
- Oge, I (2017) Assessing Rock Mass Permeability Using Discontinuity Properties. *Procedia Engineering*, 191: 638-645.
- Oge, I., Cirak, M. (2019) Relating rock mass properties with Lugeon value using multiple regression and nonlinear tools in an underground mine site. *Bull Eng Geol Environ*, 78: 1113-1126.
- Rahimi Shahid, M., Hashemian, N. S (2021) Evaluation of Kriging method on estimation of Lugeon data. 39th National Congress and 4th International Congress of Earth Sciences, Tehran, Iran, 1-12.
- Rahimi Shahid, M., Kargaranbafghi, F., Moosavi, S. M., Rahimi, N (2016-a) Engineering geological assessment of the Shahid dam site (Semirom, Iran). *Journal of Geotechnical Geology*, 2: 193-205.
- Rahimi Shahid, M., Moshrefy-far, M. R., Rahimi, N (2016-b) Three-dimensional modeling of the permeability of the rock masses of Khersan 2 dam using geostatistical methods. *The Specialty Journal of Architecture and Construction (SJAC)*, 2: 21-42.
- Rahimi Shahid, M., Rahimi, N. (2020-a) Engineering Geology Characterization of Khersan 2 Dam. *Journal of New Approaches*, 9: 113-130.
- Rahimi Shahid, M., Rahimi, N (2020-b) Assessment permeability of rock mass of the Asmari formation (Khersan 2 dam). *Journal of New Approaches in Researches of Basic Science, Engineering and Technical*, 7: 38-52.
- Schwartz, F. W., Zhang, H (2003) Fundamentals of Groundwater. John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 583.
- Serafim, J. L (1968) Influence of interstitial water on rock masses. In: Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C. (Eds.), *Rock Mechanics in Engineering Practice*. Wiley, London, 55–97.
- Sharp, J. C (1970) Fluid Flow through Fissured Media. Ph. D. Thesis. University of London (Imperial College).
- Shen, J., Karakus, M., Xu, C (2012) A comparative study for empirical equations in estimating deformation modulus of rock masses. *Tunn. Undergr. Space Technol.*, 32: 245–250.
- Snow, D. T (1968) Rock fracture spacings, openings and porosities. *J. Soil Mech. Found. Div. Proc. ASCE*. 94: 73–91.
- Sonmez, H., Ulusay, R (1999) Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 36: 743–760.

## Use of multivariate regression for assessing rock mass permeability in Khersan 2 dam site using discontinuity system parameters

M. Rahimi Shahid<sup>1</sup>, M. Karami<sup>2\*</sup>, and G. R. Lashkaripour<sup>3</sup>

1, 2- Ph. D. student. Engineering of Geology, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

3- Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

\* Geotechnical47@gmail.com

Received: 2021/3/2 Accepted: 2021/5/21

### Abstract

Permeability assessment is one of the important properties in geomechanical investigation of rock mass determined from water pressure test (WPT) and Lugeon number. Results of these tests are used to determine the amount of groutability in tunnel, dam site and other water related constructions. Due to complex discontinuity patterns, it is almost impossible to determine the permeability of rock mass without a proper testing method. The purpose of this study is to develop various multivariate regression models to estimate the rock mass permeability in Khersan 2 dam site. To do this, a dataset including 28 cases with Lugeon test results and corresponding RQD (Rock Quality Designation), spacing of discontinuities and SCR (Surface Condition Rating) properties are employed. Three different models were developed to estimate the rock mass permeability. The inputs of the first model are RQD and SCR (Model 1), the inputs of the second model are discontinuity spacing and SCR (Model 2) and those of the third model are discontinuity spacing and RQD (Model 3). Simple regression analyses indicate that there is no statistically meaningful relationship between the Lugeon values and SCR. There is a statistically meaningful relationship, however, between the Lugeon values with discontinuity spacing and RQD. Non-linear multivariate regression analyses was conducted for two independent variables and one dependent variable because of nonlinear relationships between input and output. Finally, the validation of the results using statistical indicators shows that the accuracy of the proposed multivariate nonlinear regression relationship between Lugeon with RQD and the discontinuity spacing is higher than other relationships and it is more consistent with real data. The results show that with increasing the number of regression variables, the accuracy of the predicted Lugeon values increases and the experimental relationships are obtained with a higher correlation coefficient.

**Keywords:** Rock mass permeability, Lugeon, Multivariate regression, Discontinuity, RQD, Khersan 2 dam.