



## بررسی کیفیت توده سنگ و نفوذپذیری ساختگاه سد معشوره با استفاده از تخمین گریجینگ

بهزاد سبزواری ده کبود<sup>۱</sup>، سعید نجفی قوشه بلاغ<sup>۲</sup>

۱- کارشناسی ارشد، زمین شناسی مهندسی، دانشگاه یزد، [sabzevari.9692@gmail.com](mailto:sabzevari.9692@gmail.com)

۲- کارشناسی ارشد، ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، [sng71@gmail.com](mailto:sng71@gmail.com)

### چکیده

از مهمترین مراحل طراحی شبکه اکتشاف ژئوتکنیکی، تعیین تعداد و موقعیت گمانه‌های اکتشافی به منظور کاهش هزینه و کسب اطلاعات از ساختار موجود در ناحیه مورد مطالعه می‌باشد. از مهمترین چالش‌ها در نمونه‌برداری تعیین موقعیت نمونه‌ها است. برای طراحی نمونه‌برداری بهینه منطقی‌ترین روش نمونه‌برداری مرحله‌ای می‌باشد. در این مقاله، دو پارامتر ژئوتکنیکی (شاخص کیفی توده سنگ و لوژان) سد معشوره مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نمودارهای فروانی و جی‌های و Q-Q Plot داده‌های موجود را میتوان در یک جامعه آماری مورد بررسی قرار داد. با توجه به در نظر گرفتن تابع شاخص در مرحله اول 21 گمانه، مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس شاخص کیفی توده سنگ و لوژان در مرحله اول تقسیم شد. نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌های آماری برای این دو شاخص نشان میدهد که میزان همبستگی برای شاخص RQD برابر با 600 متر و برای شاخص لوژان برابر با 500 متر می‌باشد. همچنین نقشه گریجینگ منطقه نشان میدهد که فقط در قسمت شمال غربی (سازند کشکان) شاخص کیفی توده سنگ در رده متوسط و بد قرار میگیرد. شاخص لوژان نیز در قسمت غربی و شرقی ساختگاه، دارای نفوذپذیری کم می‌باشد.

### کلمات کلیدی

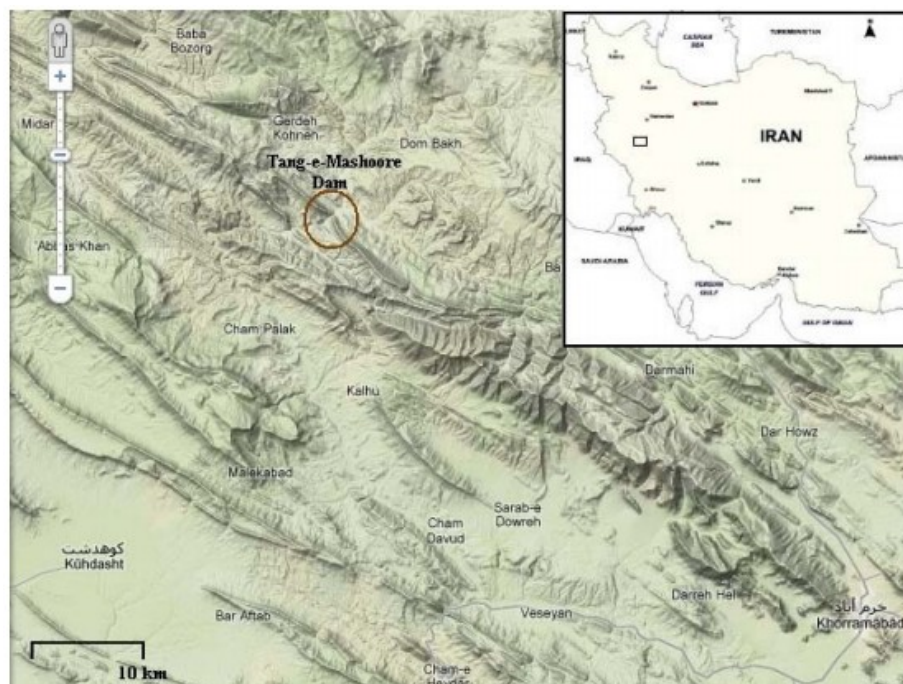
- شاخص کیفی توده سنگ
- لوژان
- نرم افزار +GS
- تخمین گریجینگ
- زمین آمار

<sup>۱</sup> نام نویسنده مسئول: بهزاد سبزواری ده کبود به نشانی، لرستان، شهرستان دلفان، میدان بسیج، کوچه شهید حسینی پلاک 1.

## 1 مقدمه

برای افزایش کیفیت داده‌ها و همچنین کاهش هزینه در بسیاری از پروژه‌های بزرگ از نمونه‌برداری‌های چند مرحله استفاده یا توصیه می‌شود [1]. نمونه‌برداری چند مرحله در چندین فاز اجرا می‌شود، تعداد مراحل مورد نیاز و تعداد نمونه‌ها در هر مرحله و روش‌های نمونه‌برداری در هر مرحله باید مشخص و تدوین شده باشد. در اغلب نمونه‌برداری‌ها در مرحله اکتشافی، داده باید از سمت داده‌های کم به سمت داده‌های بزرگتر پیش رفته و عملیات مرحله به مرحله انجام شود. دقت محاسبات و تخمین در هر مرحله از مرحله قبل بیشتر می‌باشد به‌طوری‌که باید در مرحله آخر تخمین با دقت بالا حاصل شود. برای تخمین پارامترهای نمونه‌برداری شده در مرحله اول، باید از شاخصگذاری استفاده شود. تعیین شاخص برای بیشتر موقعیتها برای تبدیل داده‌ها از حالت کیفی به عددی به کار می‌رود [1]. روش‌های تخمین در پایه شاخصگذاری، احتمال مقادیر کمتر به بیشتر از حد آستانه را محاسبه می‌کند [2]. تعداد حد آستانه نیز برابر با تعداد شاخصها منهای یک است. هدف اصلی نیز محاسبه احتمال رخداد هر یک از شاخصها و یا کلاسها است. یکی از مهمترین کاربرد شاخصگذاری، در زمینه تخمینهای زمین امار (کریجینگ) است [3]. روش کریجینگ یک روش تخمین غیرخطی است که بر اساس دو تابع شاخصگذاری و واریوگرام شاخص انجام می‌شود و مستقل از تابع توزیع است. هدف از این مقاله، کاهش عدم قطعیت و کاهش احتمال ریسکپذیری ناشی از نمونه‌برداری مرحله‌ای، در ساختگاه سد معشوره می‌باشد. بر این اساس طراحی نمونه تک مرحله‌ای با 21 گمانه بر پایه مطالعه نحوه شاخصگذاری پارامترهای ژئوتکنیکی (شاخص کیفی توده سنگ و نفوذپذیری (لوژان)) کریجینگ، سنگشناسی در سازه‌های مختلف سد معشوره که شامل تونل آببر، تونل انحراف این ساختگاه پرداخته شده است. بر این اساس در مرحله دوم بر اساس تلفیق نقشه‌های زمینشناسی منطقه و نقشه دو بعدی حاصل از داده‌های مورد مطالعه، تعداد 10 گمانه برای مرحله دوم واقع در سازه‌های جانبی و بستر این سد پیشنهاد گردیده است [2].

سد معشوره واقع در استان لرستان چهل کیلومتری جنوب شهرستان دلفان قرار دارد. این سد بتنی قوسی بر روی رودخانه کشکان که یکی از سرشاخه اصلی کرخه می‌باشد، بنا نهاده شده است. موقعیت ساختگاه این سد کمی پایینتر از محل تلاقی دوشاخه تشکیلدهنده رودخانه کشکان یعنی کاکارضا و چمزرکریا (حدود 500 متر) و در طول جغرافیایی 47 درجه و 60 دقیقه شرقی و عرض 33 درجه و 48 دقیقه شمالی می‌باشد. راه دسترسی به محدوده از طریق جاده اصلی خرمآباد به دلفان با طی چهل کیلومتر جاده فرعی روستایی منشعب شده از روستای زالی صورت می‌گیرد (شکل شماره یک) [3].



شکل 1: موقعیت ساختگاه و نیروگاه سد معشوره واقع در تنگه معشوره (گاوشمار)

## 2 ساختگاه مورد مطالعه

ساختگاه سد معشوره بر روی یال شمالی تاق‌دیس منگنیکوه واقع شده است. از نظر ریختشناسی، شکل دره به صورت ۷ شکل می‌باشد. شیب عمومی تکیه‌گاه راست ۴۰ درجه و در تکیه‌گاه چپ تا ارتفاع ۱۳۲۰ از سطح دریا شیب برابر با ۵۰ درجه و بعد از آن شیب ملایم‌تر شده و به ۳۰ درجه می‌رسد. در محدوده محور سد عرض رودخانه ۳۰ متر و در تاج سد برابر با ۳۲۵ متر می‌باشد. در این محدوده، رودخانه کشکان با ارتفاع ۱۲۸۴ متر از سطح دریا جریان دارد. این رودخانه ساختارهای زمینشناسی منطقه را به صورت عرضی قطع کرده است که دلیل آن قرار گرفتن رودخانه در امتداد درزهایی است که راستای آنها عمود بر محور تاق‌دیس منگنیکوه می‌باشد. به لحاظ زمینشناسی ساختمانی، محدوده در زاگرس چینخورده و نزدیک به مرز زاگرس مرتفع قرار دارد. راستای چین‌خوردگی از راستای عمومی چین‌خوردگی زاگرس یعنی شمال غربی- جنوب شرقی پیروی می‌کند. برجسته‌ترین ساختار در این محدوده ساختار تاق‌دیس منگنیکوه می‌باشد. ساختارهای تاق‌دیس و ناودیس خرم‌آباد و کوه کوسه نیز در پایین دست سد مشاهده شده است. تاق‌دیس منگنیکوه از نوع تاق‌دیس برگشته است که داری روند محوری شمال غربی- جنوب شرقی بوده و محور آن حدوداً ۳۰۰ متر می‌باشد. به طور کلی چهار نوع سازند امیران، تاربور، کشکان و گوری در محدوده مشاهده شده است. بدنه و دریاچه سد شامل سه سازند امیران و تاربور و کشکان می‌باشد و مغار نیروگاه سد نیز در سازند گوری تشکیل شده است. گسل‌های منطقه عبارتند از گسل کوه سفید، گسل کوه ماول، گسل مانگا و گسل فیروزآباد و گسل کوه قوبله می‌باشد، که با توجه به عمق و فاصله که دارند تاثیری بر ساختگاه سد ندارند[۳].

## 3 روش نمونه‌برداری

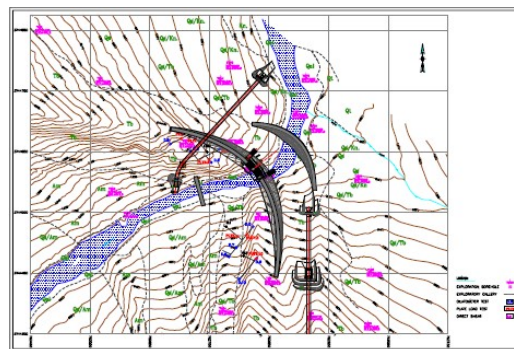
به منظور بهینه‌سازی نمونه‌برداری لازم است به مواردی همچون تعداد نمونه‌ها لازم برای دستیابی به خطاهای مجاز در سطح اعتماد معین، نحوه توزیع (محل و موقعیت نمونه‌ها در فضا) و جرم نمونه‌ها توجه کرد. از آنجاکه طراحی نمونه‌برداری، به منظور دستیابی به سطح اعتماد معین، نیازمند داشتن اطلاعات کافی و دقیق در زمینه تغییرپذیری در واحد نمونه‌برداری است. بر این اساس بدون اطلاع از ساختار تغییرپذیری در واحد نمونه‌برداری، به سختی می‌توان به طراحی نمونه‌برداری پرداخت. در نتیجه باید با تکیه بر داده‌های موجود و مشاهده تغییرات در این داده‌ها در مقیاس بزرگ، به طراحی اولیه برای برداشت نمونه‌های مرحله اولیه پرداخت. در ادامه با استفاده از داده‌های اولیه و نتایج حاصل از مرحله اول و همچنین تخمین تغییر شکل‌پذیری و شناخت از توزیع متغیرها در فضا، به طراحی گام دوم پرداخت. این مراحل را باید تا دستیابی به دقتی که از پیش تعیین شده است، ادامه یابد[۲].

در هر پروژه تعداد داده‌های اولیه مهم و تعیین‌کننده است. با افزایش تعداد داده‌ها دقت تخمین افزایش می‌یابد. بر این اساس باید بین خطای قابل قبول و همچنین ریسک ناشی از آن، و هزینه نمونه‌برداری، تعادل برقرار کرد. بهینه‌سازی هزینه نمونه‌برداری نیز نکته دیگری است که باید مورد توجه قرار بگیرد. برای بهینه‌سازی هزینه نمونه‌برداری، باید از جمع‌آوری داده‌های غیرضروری و یا داده‌های که دقت را بیش از حد لازم بالا می‌برند، خودداری شوند. با توجه به این نکات باید داده‌ها هدفمند شوند. هدفمندی کیفیت داده‌ها به ملاک‌های گفته می‌شود که بر اساس آن بتوان تصمیم‌گیری نظام‌دار را، به منظور طراحی روش صحیح جمع‌آوری داده‌ها و تضمین کیفیت داده‌ها به انجام رساند[۴].

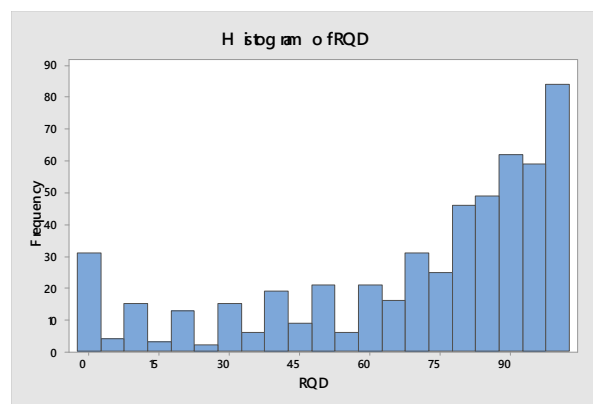
## 4 داده‌های مورد بررسی

تعداد گمانه‌های حفاری شده موجود در ساختگاه مورد مطالعه، ۲۱ حلقه می‌باشد (شکل شماره ۲). این گمانه‌ها به‌صورت شبکه نامنظم، توزیع شده‌اند. تمامی گمانه‌ها به صورت قائم حفاری شده‌اند و بین ۳۰ تا ۱۷۰ متر عمق دارند. در برخی از گمانه‌ها نظیر گمانه TM-13 به علت داده‌های نامقعود در حفاری و همچنین عدم قطعیت در تشخیص واقعی‌بودن داده‌ها، ناچار به حفر گمانه جدید در اطراف همان گمانه، ترجیح داده شده است (گمانه TM-13A). بیشتر گمانه‌ها در موقعیت و محور سد و در دو گالری اصلی G1 و G2 حفر شده است. تونل اصلی آبر و همچنین تونل انحراف در این بخش قرار گرفته است. برای آگاهی از شرایط زیر سطحی در تمامی گمانه‌ها آزمایشات درون چاهی لوژان، دیلاتومتری و بارگذاری صفحه‌ای انجام گرفته است. در این مقاله با توجه به داده‌های قطعی و موجود در این ساختگاه شاخص کیفی توده سنگ (RQD) و لوژان به عنوان داده‌های قابل اطمینان برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ، در تعیین محاسبات

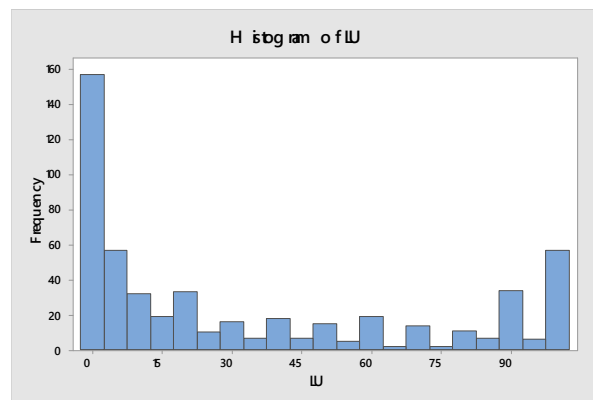
حفریهای جدید استفاده میشود. خصوصیات آماری (توزیع فراوانی) لوژان و RQD در جدول شماره یک و شکل شماره 3 آمده است [6].



شکل 2: موقعیت گمانههای اکتشافی ساختگاه سد



(الف)



(ب)

شکل 3: نمایش توزیع آماری پارمترهای شاخص کیفی توده سنگ (الف) و لوژان (ب)  
جدول 1: خصوصیات آماری مربوط به پارمترهای لوژان و شاخص کیفی توده سنگ

| پارامتر | تعداد | بیشینه | کمینه | میانگین | مد  | میان | چولگی | کشیدگی |
|---------|-------|--------|-------|---------|-----|------|-------|--------|
| LU      | 537   | 100    | 0     | 33.85   | 1   | 16   | 0.73  | 01.06  |
| RQD     | 537   | 100    | 0     | 69.73   | 100 | 81   | -1.04 | 0.07-  |

## 5 شاخصگذاری

شاخصگذاری، برای تقسیمبندی دادهها، بر اساس حدود آستانه، بهکار میرود. زمانی که دادهها دارای حد بالا و پایین معینی باشند، تابع تصادفی را میتوان بر اساس مقادیر حداکثر و حداقل دامنه تعیین کرد و از روی حدود تعداد شاخصها، حدود آستانه را تعیین کرد. برای حالتی که تعداد حدود آستانه برابر با  $K$  و تعداد شاخصها برابر با  $K+1$  باشد، تابع تصادفی را به صورت زیر تعریف میکنند [2]:

$$Z_1 < Z_2 < Z_3 < Z_4 < \dots < Z_{K-1} < Z_K \quad (1)$$

متغیر تصادفی را  $Z_{(X)}$  را میتوان به تابع متغیر تصادفی شاخص  $I(X:Z_K)$  تبدیل نمود:

$$I(X:Z_K) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z_{(X)} \leq Z_K \\ 0, & \text{if } Z_{(X)} > Z_K \end{cases} \quad K=1, \dots, K$$

در صورتی که از شاخصهای بیشتری استفاده شود، میتوان معادله بالا را به صورت زیر نوشت که در این معادله  $C_i$  معادل شاخصهایی است که با استفاده از حد آستانه مشخص میشود [2]:

$$C_i = \begin{cases} 1, & \text{if } Z_X \leq Z_i \\ 2, & \text{if } Z_i < Z_X \leq Z_2 \\ \dots \\ K, & \text{if } Z_{K-1} < Z_X \leq Z_K \\ K+1, & \text{if } Z_X > Z_K \end{cases} \quad I(X:C) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z_X = C_i \\ 0, & \text{if } Z_X \neq C_i \end{cases} \quad (3)$$

## 1-2 شاخصگذاری پارامتر لوزان

شاخص کیفی توده سنگ (RQD) عبارت است از درصد مغزه بازیافتی با طول بیشتر از ده سانتیمتر به طول کل. در ساختگاه سد معشور در مجموع 21 گمانه در مرحله اولیه حفر شده است که میانگین کلی این شاخص برابر با 69.73 درصد میباشد. میانگین این شاخص در تکیهگاه راست برابر با 87.2 درصد میباشد. باید توجه داشت که در این تکیهگاه فقط گمانه TM-15 با متوسط 39.7 RQD درصد دارای کیفیت بد و گمانههای MT-10 و MT-13A با متوسط 67.8 RQD و 71.2 درصد دارای کیفیت متوسط و خوب بوده و بقیه گمانهها دارای کیفیت عالی میباشند. در تکیه گاه چپ نیز این روند حفظ شده است و میانگین شاخص کیفی در این بخش نیز برابر با 85.9 درصد میباشد که توده سنگ در این بخش را در رده خوب قرار میدهد. حد تغییرات در گمانه این جناح از 44.6 درصد در گمانه TM19 تا 95.8 درصد در گمانه TM-22 میباشد. اما با توجه به کلیه دادههای موجود حاصل از گمانه میانگین شاخص کیفی توده سنگ در کل ساختگاه که برابر با 69.73 درصد میباشد، کیفیت توده سنگ در رده متوسط قرار میگیرد. شایان ذکر است که دلیل اصلی کاهش شاخص کیفی توده سنگ (RQD) در این ساختگاه حفر گمانه در سازند گنگلومرای کشکان است که نسب به سازندهای موجود در ساختگاه نظیر امیران و گورپی به مراتب دارای شاخص کیفی توده سنگ پایینتری میباشد. به منظور شاخص-گذاری کیفیت توده سنگ، بر اساس حدود آستانه میتوان 30 تا 90 میتوان چهار شاخص تعریف کرد (جدول شماره 2).

جدول شماره 2: شاخص گذاری پارامتر شاخص کیفی توده سنگ

| شاخص | توصیف RQD        | دامنه RQD |
|------|------------------|-----------|
| 1    | کم               | 0-30      |
| 2    | متوسط مایل به کم | 30-60     |
| 3    | خوب              | 60-80     |

|     |      |   |
|-----|------|---|
| 80< | عالی | 4 |
|-----|------|---|

## 2-2 شاخصگذاری پارامتر لوژان

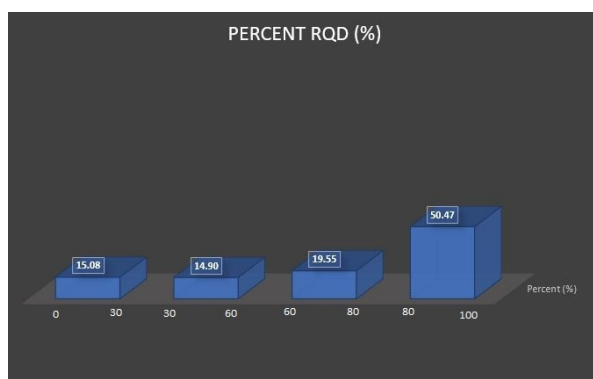
در ساختگاه سد معشوره پارمتر لوژان جهت ارزیابی میزان تروابی توده سنگ در داخل گمانه‌های اکتشافی انجام شده است. این آزمایش با توجه به شرایط نفوذپذیری توده سنگ از عمق 1 تا 5 متری انجام میشود. یک لوژان نماینده مقدار نفوذپذیری است که بر طبق آن در هر یک دقیقه میزان یک لیتر آب تحت فشار 0.98 Mpa و از طریق یک گمانه یک متری در توده سنگ تزریق میشود. برای شاخصگذاری میزان لوژان چهار حد آستانه در نظر گرفته شده است (جدول شماره 3). در نگاه کلی به ساختگاه سد معشوره با توجه به سه سازند امیران، گوری و همچنین کشکان و ماهیت توده سنگ-های تشکیلدهنده این سه سازند میتوان ساختگاه را در رده کم قرار داد. توده سنگ گوری و امیران که بخش اصلی تکیه گاه‌های چپ و راست را تشکیل میدهند در رده نفوذپذیری کم قرار میگیرند، اما سازند کشکان داری طیف گسترده از داده‌ها میباشد که از نفوذپذیری کم تا نفوذپذیری زیاد تغییر می-کند. در تکیهگاه چپ غالباً نفوذپذیری بین 27 تا 30 لوژان قرار میگیرد که دارای نفوذپذیری کم می-باشد. در تکیهگاه راست نیز نفوذپذیری در رده 20 تا 30 قرار میگیرد. با توجه به شرایط موجود می-تواند ساختگاه سد معشوره را با نفوذپذیری کم در نظر گرفت.

جدول شماره 3: نحوه شاخصگذاری پارامتر لوژان

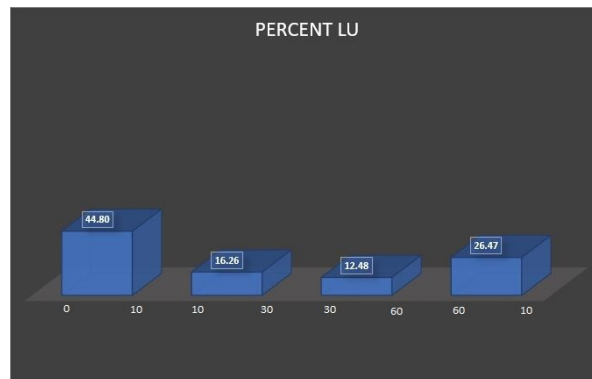
| شاخص | توصیف کیفی<br>نفوذپذیری | دامنه لوژان |
|------|-------------------------|-------------|
| 1    | نفوذناپذیر              | 0-10        |
| 2    | کم                      | 10-30       |
| 3    | متوسط                   | 30-60       |
| 4    | زیاد                    | 60-100      |

## 3-2 شاخصگذاری اهمیت سازه‌ها

با توجه با این نکته که یکی از کاربردهای شاخصگذاری، تبدیل داده‌های کیفی به کمی برای مدلسازی و مطالعات عددی میباشد، لازم است که داده‌ها بر اساس محل حفر گمانه‌ها و اهمیت هر کدام از سازه‌ها تفکیک شده و درجه اهمیت آن نیز مشخص شود [4]. در شکل شماره 3 تابع توزیع تجمعی احتمال رخداد برای هر یک از پارامترهای شاخص کیفی توده سنگ و لوژان آمده است [5]. بر این اساس بدنه اصلی سد که شامل تکیهگاه‌های چپ و راست میباشد با اهمیت درجه 4 مشخص می-شوند. با توجه به اهمیت تونل آببر و جانمایی آن در تکیهگاه راست سد این سازه نیز با شاخص درجه 4 مشخص شده است همچنین با بررسی سازندهای موجود در منطقه سد که جز این سه سازند (امیران، گوی، کشکان) سازند دیگری مشاهده نشده است، مناطق اطراف سد نیز با همین درجه از اهمیت بررسی شده‌اند. دریاچه اصلی سد نیز از سازند کشکان تشکیل شده است که اهمیت آن زیاد در نظر گرفته شده است. تونل آببر و انحراف در سازندهای امیران، گوری و کشکان (12 متر از انتهای دهانه خروجی تونل آببر) تشکیل شده است. در شکل شماره 4 الف 50.47 درصد از شاخص کیفی توده سنگ در بازه 80 تا 100 درصد قرار میگیرد که نشان میدهد شاخص کیفی توده سنگ در رده خوب و عالی میباشد و 44.80 درصد از داده‌های شاخص لوژان نیز در بازه 1 تا 10 قرار میگیرد که نشان دهند نفوذپذیری کم میباشد.



(الف)



(ب)

شکل 4: نمایش تابع توزیع تجمعی احتمال رخداد هر شاخص پارامتر ژئوتکنیکی شاخص کیفیت توده سنگ (الف) لوزان (ب)

جدول 4: نحوه شاخصگذاری، بر اساس سازه‌ها و قسمت‌های مختلف سد

| نوع سازه                        | درجه اهمیت | گمانه ها                               |
|---------------------------------|------------|----------------------------------------|
| بدنه سد                         | زیاد       | 4,5,5A,6,13,20,21                      |
| بدنه سد، تونل آببر، تونل انحراف | زیاد       | 1,2,3,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19 |

### 3 شاخصبندی سنگ ساختگاه

محدوده مورد مطالعه در تاق‌دیس خرما‌آباد واقع شده است. این مجموعه از تاق‌دیس و ناودیس خرم-آباد و تاق‌دیس و ناودیس کوه کوسه تشکیل شده است. ساختگاه سد در یال شمالی تاق‌دیس خرما‌آباد قرار دارد. در این بخش سازندها از جنس ماسه‌سنگ (امیران)، آهک توده‌ای نفوذناپذیر یا با نفوذپذیری کم (سازند گوری) و کنگلومرا (سازند کشکان) تشکیل شده است [3].

در تحقیق حاضر، با توجه به جنس سنگ تشکیل‌دهنده هر سازند محدوده به سه شاخص، شاخصبندی میشود. به دلیل اینکه هر سه سازند در ساختگاه سد جزء اصلی تشکیل‌دهنده پی و تکیه‌گاه سد قرار دارند، هر سه سازند در شاخص 3 قرار میگیرند (جدول شماره 4).

جدول 5: نحوه شاخصبندی سازند ساختگاه سد

| سازند              | شاخص |
|--------------------|------|
| امیران (ماسه-سنگ)  | 3    |
| گوری (آهک توده‌ای) | 3    |
| کشکان (کنگلومرا)   | 3    |

### 4 تجربه تحلیل زمین آماری

برخلاف تجزیه تحلیلهای آمار کلاسیک، روشهای زمین آمار ضمن در نظر گرفتن موقعیتهای مکانی نقاط و ارتباط بین داده‌های که از کارایی بیشتری برخوردار هستند، برای تجزیه و تحلیل توزیع داده‌ها استفاده میکند [4]. همچنین این روش قادر به مدلسازی مناسب مکانی و زمانی جهت توصیف متغیر ناحیه‌ای، با در نظر گرفتن مولفه‌های تغییرپذیری ساختاری و تصادفی میباشد. اساس این روشهای تخمین مقدار نامعلوم متغیر مکانی Z به عنوان یک عدد تصادفی با یک توزیع احتمال مشخص در نقطه‌های دلخواه از منطقه را مورد مطالعه قرار میدهد. در زمین آمار تخمین و تجزیه و تحلیل ساختارهای مکانی با استفاده از وایوگرام صورت میگیرد [4]. وایوگرام، تغییرات مکانی و ساختاری که قابلیت تغییرپذیری را دارند، نشان میدهد و از ابزارهای که اساس آنها بر پایه‌های زمین آماری استوار

است، جهت بررسی تغییرات مکانی استفاده میکند. برای محاسبه واریوگرام از معادله زیر استفاده میشود[4]:

(4)

$$\gamma_i(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2$$

در این معادله  $\gamma_i(h)$  نیمواریوگرام،  $N(h)$  عداد زوج نمونههایی که به فاصله  $h$  از هم جدا میشوند،  $z(x_i)$  نقطه  $z$  در موقعیت  $x$  و  $z(x_i+h)$  موقعیت نقطه  $z$  در فاصله  $h$  است. آنالیزهای همبستگی مکانی نیز بر اساس واریوگرامهای صورت میگیرد که همبستگی مکانی را بین متغیرها تعیین میکند. به عبارت دیگر از واریوگرام برای تعیین همبستگی و دامنه همبستگی مکانی استفاده میشود. واریوگرام را میتوان با سه پارامتر اثر نقطه‌ای، آستانه و دامنه توصیف کرد[4].

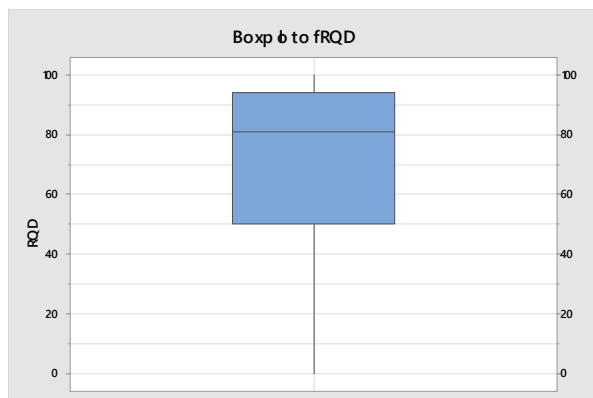
آمار توصیفی داده‌ها به منظور بررسی چگونگی توزیع داده‌ها و دستیابی به خلاصه‌ای از اطلاعات آماری حاصل از داده‌های مورد نظر استفاده میشود. فراوانی و توزیع داده‌ها با توجه به تأثیری که بر تخمین به روش زمین آماری دارد، دارای اهمیت زیادی هستند. با توجه به تحلیلهای زمین آماری باید نمونه‌ها از توزیع نرمال تبعیت کنند[5].

## 1-4 پیش پردازش و نرمالسازی داده‌ها

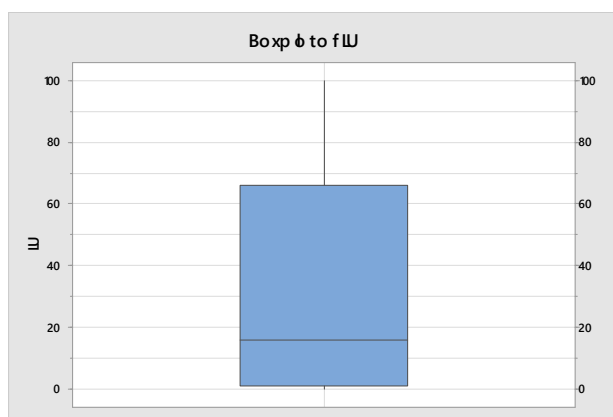
پیش‌پردازش داده‌ها شامل جایگزینی داده‌های سنسورد و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف است. داده‌ها سنسورد به داده‌های اطلاق میشود که به مقادیر کمتر و بیشتر از حد حساسیت دستگاهی گزارش شده‌اند. این داده‌ها با توجه به مقادیر بسیار زیاد و یا بسیار کم داده‌ها با توجه به حد تشخیص دستگاه گزارش میشوند. روش جایگزینی ساده شامل جایگزینی نصف یا  $\frac{3}{4}$  حد حساسیت برای مقادیر کوچکتر و  $\frac{3}{4}$  حد حساسیت برای داده‌های بزرگتر از حد حساسیت دستگاهی است. در این مقاله  $\frac{3}{4}$  تشخیص دستگاهی جهت جایگزینی داده‌های سنسورد لحاظ میشود[2].

مقادیر خارج از ردیف شامل مقادیری است که بنا بر دلایلی به گونه چشمگیری خارج از جامعه اصلی قرار گرفته و خود را جدا از بقیه نمونه‌ها قرار داده‌اند. روشهای گوناگونی برای شناسایی این مقادیر وجود دارد، که میتوان به نمودار جعبه‌ای، نمودار Q-Q Plot، روش محاسباتی و نمودار دورفل اشاره کرد[4].

در این مقاله مقادیر خارج از ردیف با نمودار جعبه و نمودار Q-Q Plot مشخص شده‌اند. در نمودار جعبه‌ای RQD های 537 داده (شکل شماره 5 الف)، حد پایینی (Q1) برای RQD برابر با 50 میباشد و حد بالای (Q3) برابر با 93.95 میباشد و همچنین میانه این شاخص برابر با 81 میباشد. داده خارج از ردیف برای این شاخص وجود ندارد. در شاخص LU نیز داده خارج از ردیف نبوده و حد پایینی آن برابر با 1 و حد بالای آن برابر با 66 میباشد همچنین میانه این شاخص برابر با 16 با تعداد 528 داده میباشد. بر این اساس میتوان تمامی داده‌ها را به عنوان جامعه اصلی در نظر گرفت و حدود مشخص در هر کدام از شاخصها (RQD, LU) از صفر تا صد در نظر گرفت بر اساس این نمودارها شاخص حدود برای تقسیمبندی و شاخصگذاری هر کدام از پارامترهای RQD و LU را تقسیمبندی و شاخصگذاری کرد. در شکل شماره 6 نمودار نرمال فراوانی داده برای شاخص کیفی توده سنگ (الف) و لوژان (ب) را نشان میدهد. همانطور که نشان داده شده است، 60 درصد از داده‌ها برای شاخص کیفی توده سنگ در شاخص 4 (کیفیت عالی) قرار میگیرد و همچنین 50 درصد از داده‌های شاخص لوژان در شاخص 2 یا نفوذپذیری کم قرار میگیرند.

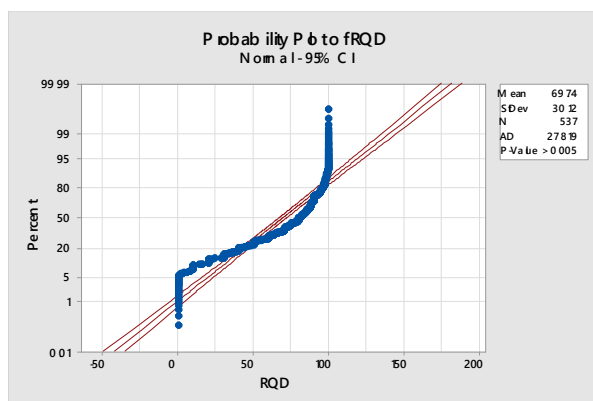


(الف)

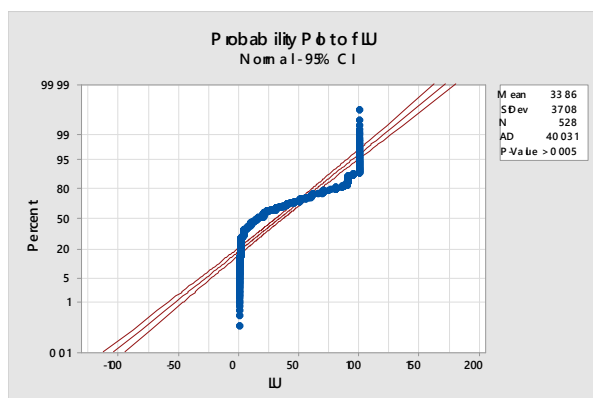


(ب)

شکل 5: نمودار جعبه‌ای RQD (الف) و LU (ب).

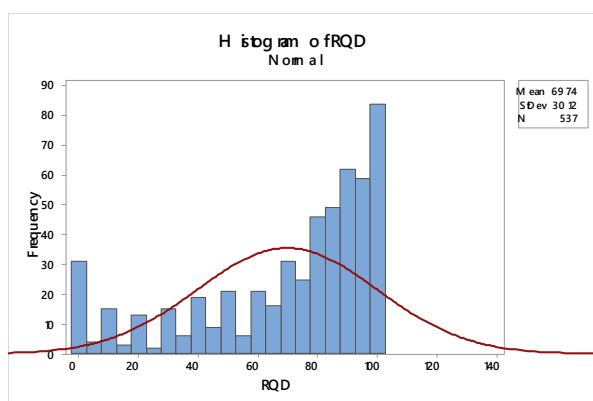


(الف)

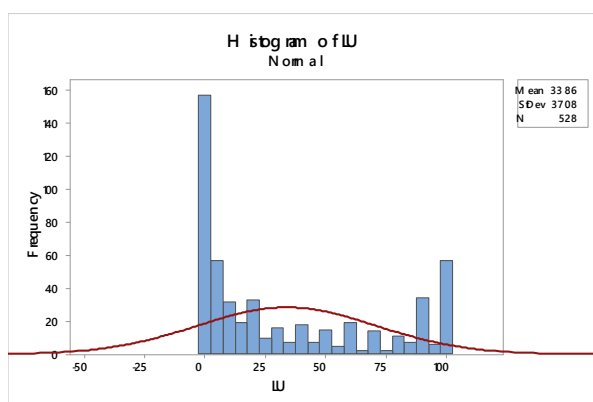


(ب)

شکل 6: نمودار Q-Q Plot شاخص کیفی توده سنگ (الف) و LU (ب).



(الف)



(ب)

شکل 7: نمودار فراوانی شاخص کیفی توده سنگ (الف) RQD و LU (ب).

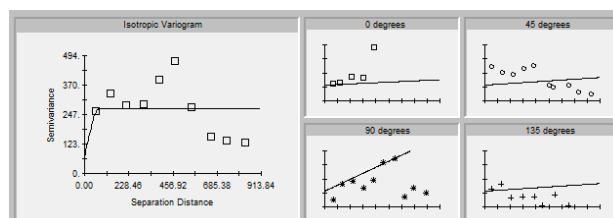
## 2-4 واریوگرام

بعد از نرمالسازی دادهها، اولین گام برای تجزیه و تحلیل و بررسی ساختار مکانی بین دادهها از واریوگرام استفاده میشود [5]. به منظور بررسی پیوستگی مکانی کمی متغیر به وسیله واریوگرام لازم است تا مجموع مربع تفاضل زوج نقاطی که به فاصله  $h$  از یکدیگر قرار دارند، محاسبه و در

مقابل  $h$  ترسیم شوند. اجزای یک واریوگرام عبارت است از: 1) دامنه تاثیر: فاصله‌های که در آن واریوگرام به حد ثابتی میرسد و به حالت افقی نزدیک میشود. این دامنه محدودهای را مشخص میکند که پیوستگی در خارج از این فاصله بین داده‌ها وجود نداشته باشد [4].. 2) حد آستانه: به مقدار ثابتی که واریوگرام در دامنه تاثیر به آن میرسد حد آستانه میگویند. این مقدار برابر با واریانس کل داده-هاست. 3) اثر قطعه‌ای: مقدار واریوگرام در میدا مختصات یعنی  $h=0$  را اثر قطعه‌ای میگویند. این اثر جزو تصادفی یا غیرتصادفی ساختاردار متغیر را نشان میدهد [4,5]. در حالت ایده‌آل باید مقدار باید صفر باشد [4,5]. اما در بیشتر مواقع بزرگتر از صفر میباشد. واریوگرام بر اساس مقادیر زوج نقاطی ترسیم میشود که در یک راستا و یک فاصله مشخص باشند. در این مقاله برای برآورد متغیرهای موجود که تغییرات زمانی و مکانی را نشان میدهد از روش کریجینگ استفاده شده است [4]. کریجینگ تخمینگری است که مقادیر متغیر را در نقاط نمونهداری نشده به صورت ترکیبی خطی از مقادیر همان متغیر در نقاط اطراف آن در نظر میگیرد و برای برآورد نقاط ناشناخته به هر یک از نمونه‌ها، وزنی نسبت میدهد. روش کریجینگ بهترین روش تخمینگر نارب خطی با کمترین مقدار واریانس است. در این مقاله تجزیه و تحلیل آماری با نرم افزار GS+ انجام شده است. واریوگرام متغیرها در شکل 7 برای دو شاخص RQD و LU آمده است. با توجه به این شکل بهترین روش برای تخمین و برازش داده‌ها مدل کروی میباشد. در این برای شاخص RQD تا فاصله 600 متری ساختار وابسته به مکان را نشان میدهد و برای شاخص LU تا فاصله 500 متر نیز ساختار وابسته به مکان را نشان میدهد. این امر میتواند ناشی از وجود سازندهای یکسان در منطقه باشد.

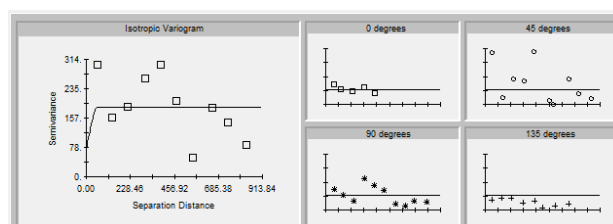
نسبت بخش ساختاری واریانس به کل واریانس داده‌ها را با  $C/(C_0+C)$  نشان میدهند. هرچه این مقدار به یک نزدیک باشد، بهتر و نشاندهنده همبستگی قویتر بین اعداد است. با توجه به شکل شماره 5 بخش الف و ب بیشترین همبستگی داده‌ها با مدل کروی به دست آمده است.

| Model                                      | Nugget<br>Co | Sill<br>Co + C | Range<br>Parameter Ao | Effective<br>Range | Proportion<br>C/(Co+C) | r2    | RSS     |
|--------------------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-------|---------|
| <input checked="" type="radio"/> Spherical | 69.70000     | 272.90000      | 78.0000               | 78.0000            | 0.745                  | 0.002 | 111812. |
| <input type="radio"/> Exponential          | 229.80000    | 459.70000      | 2110.0000             | 6330.0000          | 0.500                  | 0.264 | 140668. |
| <input type="radio"/> Linear               | 271.41378    | 271.41378      | 835.0967              | 835.0967           | 0.000                  | 0.000 | 111994. |
| <input type="radio"/> Linear to sill       | 118.30000    | 273.00000      | 66.0000               | 66.0000            | 0.567                  | 0.002 | 111813. |
| <input type="radio"/> Gaussian             | 257.60000    | 515.30000      | 2110.0000             | 3654.6272          | 0.500                  | 0.438 | 130561. |



(الف)

| Model                                      | Nugget<br>Co | Sill<br>Co + C | Range<br>Parameter Ao | Effective<br>Range | Proportion<br>C/(Co+C) | r2    | RSS    |
|--------------------------------------------|--------------|----------------|-----------------------|--------------------|------------------------|-------|--------|
| <input checked="" type="radio"/> Spherical | 69.40000     | 186.50000      | 60.0000               | 60.0000            | 0.628                  | 0.000 | 62887. |
| <input type="radio"/> Exponential          | 157.90000    | 315.90000      | 2110.0000             | 6330.0000          | 0.500                  | 0.355 | 79409. |
| <input type="radio"/> Linear               | 186.49200    | 186.49200      | 835.0967              | 835.0967           | 0.000                  | 0.000 | 62887. |
| <input type="radio"/> Linear to sill       | 56.10000     | 186.50000      | 60.0000               | 60.0000            | 0.699                  | 0.000 | 62887. |
| <input type="radio"/> Gaussian             | 177.00000    | 354.10000      | 2110.0000             | 3654.6272          | 0.500                  | 0.382 | 71791. |

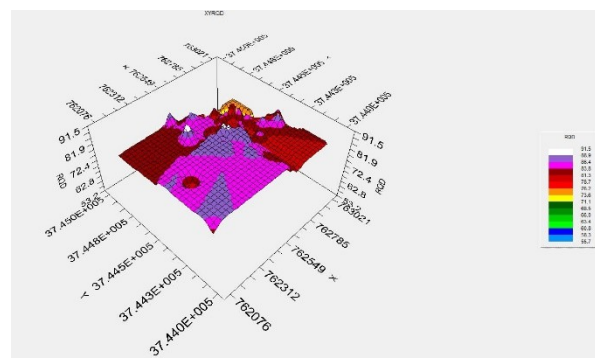
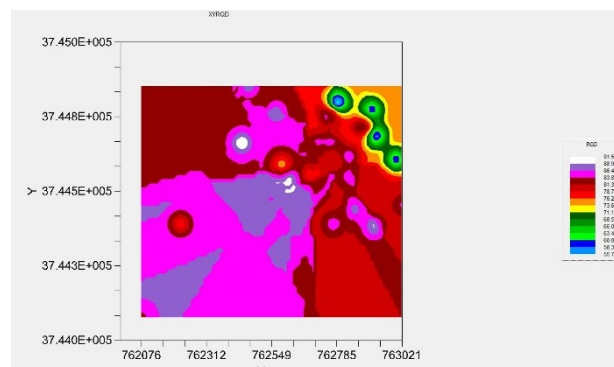


(ب)

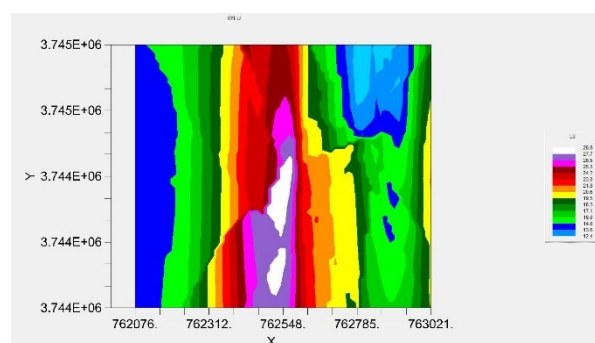
شکل 8: واریوگرام و داده‌های حاصل از ترسیم واریوگرام برای شاخص کیفی توده سنگ (RQD) (الف) و (ب) LU

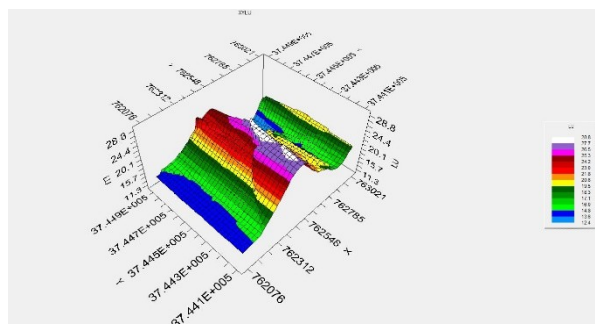
### 3-4 تهیه نقشه کریجینگ

پهنه‌بندی و تهیه نقشه‌های شاخص کیفی توده سنگ و لوژان یکی از مراحل مهم در راستای تصمیم‌گیری برای تخمین و جداسازی توده سنگ از نظر شاخص کیفی و لوژان و یا تعیین محدوده با شاخص متناسب می‌باشد [4]. از تخمینگر کریجینگ بر اساس واریوگرام همسانگرد برای تخمین مقادیر هر یک از عناصر مورد مطالعه در نقاط نمونه‌برداری نشده، استفاده شد [5]. پارامترهای کریجینگ بر اساس نتایج حاصل از اعتبارسنجی متقابل بهینه‌سازی شدند. با استفاده از نرم افزار GS+ رسم شده است (شکل 8 الف و ب). پراکندگی نقاط در موقعیت مکانی یکسان برای شاخص کیفی توده سنگ در حالت دوبعدی نشان می‌دهد که بیشترین داده‌ها در 81 تا 88 درصد RQD را نشان می‌دهد. دلیل این امر می‌تواند این باشد که بیشتر داده‌های واقعی به دست آمده در سازند امیران و تاربور می‌باشد که دارای شاخص کیفی توده سنگ بالای هستند. داده‌های واقعی به دست آمده در سازند کشکان نیز محدوده 55 تا 60 قرار می‌گیرد که دارای شاخص کیفی متوسط می‌باشد. داده‌های یکسان نیز برای لوژان در سازند امیران و تاربور با توجه به ژنز سنگ و ساختارهای زمینشناسی در بین 12 تا 15 لوژان قرار می‌گیرد که نفوذپذیری کم را نشان می‌دهد و سازند کشکان دارای نفوذپذیری بین 15 تا 28 قرار می‌گیرد که نفوذپذیری بیشتر نسبت به سازند امیران و تاربور را نشان می‌دهد. داده‌های واقعی به دست آمده برای شاخص کیفی توده سنگ و نفوذپذیری در سازندهای تشکیل‌دهنده ساختگاه نشان می‌دهد که خود ساختگاه و سازه‌های جانبی مانده تونل آبر از لحاظ نفوذپذیری و شاخص کیفی مشکلی ندارند.



(الف)





(ب)

شکل 9: نقشه کریجینگ در حالت دو بعدی و سه بعدی برای شاخص RQD (الف) لوژان (ب)

## 5 نتیجه گیری

نتایج به دست آمده حاصل از نمودارهای جبهه‌ای و Q-Q Plot نشان می‌دهد که داده‌های حاصل واقعی اعمال شده برای شاخصهای شاخص کیفی توده سنگ و لوژان داده پرتی وجود ندارد و میتوان کلیه داده‌های حاصل از گمانه‌های اکتشافی را در یک جامعه‌ای داده‌ی بررسی کرد (شکل شماره 5 و 6). همچنین در شکل شماره 7 فراوانی داده‌ها نشان می‌دهد که بیشتر داده‌ها برای شاخص، شاخص کیفی توده سنگ بین 80 تا 100 درصد میباشد که نشان می‌دهد که در مجموع ساختگاه سد معشوره دارای شاخص کیفی خوب میباشد و فروانی داده‌های حاصل از برداشت لوژان نیز نشان می‌دهد که ساختگاه سد نیز دارای نفوذپذیری کم میباشد.

نقشه‌های کریجینگ و داده‌های حاصل از تحلیلهای زمین آمار نیز نشان می‌دهد که در بخش جنوب غربی ساختگاه (تکیه‌گاههای سد) که عمدتاً شامل سازند کربناته تاربور و سازند ماسه‌سنگی امیران است شاخص کیفی توده سنگ در رده خوب قرار دارد و در بخش شمال غربی که عمدتاً از سازند کنگلومرای کشکان تشکیل شده است این شاخص در رده متوسط و بد قرار می‌گیرد و در قسمت غربی و شرقی نشان‌دهنده نفوذپذیری کم و تنها در بخش جنوبی نفوذپذیری زیاد دیده شده است. با توجه به نتایج حاصل میتوان چنین نتیجه گرفت که ساختگاه از لحاظ شاخص کیفی در رده خوب و با توجه به شرایط موجود از لحاظ نفوذپذیری نیز در رده کم قرار می‌گیرد. همچنین داده‌های شاخص لوژان نشان می‌دهد که با افزایش عمق و تغییر در سازند (کتناکت بین سازند تاربور و کشکان) نفوذپذیری افزایش پیدا کرده است.

لازم به ذکر است با توجه به نقشه‌های کریجینگ در ساختگاه سد، برای شاخص کیفی توده سنگ تا فاصله 600 متری و برای شاخص لوژان تا فاصله 500 متری، همبستگی را نشان میدهد.

## منابع

- [1]. Myers, J, C. 1997. "Gostatistical Error Managment". Quantifying Uncertainty for Environmental Sampling and Mapping, New York, Van Nostrand Reinhold, 594pp.
- [2] Knudsen, H,P. 1987. "Indicator kriging and other new geostatistical tools". Proceedings of the pacific Rim Congress. Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 859-864 pp.
- [3] سبزواری ده کیود، بهزاد، فلاح، امین، مشرفی فرد، محمدرضا و امامی، عنایت الله. 1396. "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل آبر سد معشوره"، نشریه زمین شناسی مهندسی ایران، دوره 10 شماره 1 و 2، 97-111.
- [4]- مرشدی، امین حسین، معماریان، حسین. 1389. "طراحی مرحله‌های شبکه نمونه برداری، بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی و خصوصیات کیفی ساختگاه سد سیملان، با استفاده از کریجینگ و شبکه عصبی"، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره 5 شماره 10، 1-20.
- [5]- نخعی سرودانی، بهشته، جهانشاهی، رضا و عصاری، امین. 1397. "شبیه سازی زمین آماری شاخص کیفیت مغزه حفاری، با بررسی پیوستگی مکانی در لایه متراکم آبرفت کواترنری و سازند سخت معدن گهرزمین، جهت تعیین زونهای تراوا"، فصلنامه کواترنری ایران، دوره 10 شماره 2، 177-189.



## Investigation of rock mass quality and permeability of Mashoureh dam site using Kriging estimate

Behzad sabzevari<sup>1</sup>, Saeed Najafi Ghoshe Bolagh<sup>2</sup>

1 M.Sc., Engineering Geology, Yazd University, [sabzevari.9692@gmail.com](mailto:sabzevari.9692@gmail.com)

2 M.Sc., Geophysics, Shahrood University of Technology, [sngeo71@gmail.com](mailto:sngeo71@gmail.com)

### ABSTRACT

One of the most important steps in designing a geotechnical exploration mesh, determine the number and location of exploratory boreholes in order to reduce costs and obtain information about the structure in the study area. One of the most important challenges in sampling is determining the location of samples. For optimal sampling design, the most logical method is step sampling. In this paper, two geotechnical parameters (qualitative index of rock mass and Logan) of Mashoureh dam have been studied. Existing data can be analyzed in a statistical population according to the frequency and volume charts and Q-Q Plot. Considering the index function in the first stage, 21 boreholes were studied. Based on this, the quality index of rock mass and Logan was divided in the first stage. The results of the analysis of statistical data for these two indices show that the correlation rate for the RQD index is equal to 600 meters and for the Logan index is equal to 500 meters. Also, the kriging map of the region shows that only in the northwestern part (Kashkan Formation) the rock mass quality index is in the middle and bad category. Logan index has low permeability in the western and eastern part of the site..

### KEYWORDS

- Rock Quality Designation
- Lugeon
- GS + software
- Kriging estimates
- Geostatistics