

## معرفی رهیافت نوین مبتنی بر ویژگی‌های ساختاری توده سنگ برای طراحی موقعیت بهینه پرده آب‌بند (مطالعه موردی سد خرسان)

جعفر عبدالهی شریف<sup>۱\*</sup>، رسول دروگری<sup>۲</sup> و عارف علیپور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار دانشکده فنی دانشگاه ارومیه

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه ارومیه

<sup>۳</sup> مربی دانشگاه صنعتی ارومیه

### چکیده

پرده آب‌بند و طراحی مناسب آن نقش انکارناپذیری در عملکرد بهینه سد ایفا می‌کند. در حال حاضر موقعیت و ویژگی‌های ژئومتری این پرده به طور عام و بدون در نظر گرفتن کامل ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ و موقعیت ناهنجاری‌های ساختاری توده سنگ و فقط با اتکا به روش‌های تجربی طراحی می‌شود. در نوشتار حاضر با نگرش متفاوتی به فرایند طراحی پرده آب‌بند و موقعیت این پرده در گستره سد خرسان III که در ادامه به اختصار خرسان نامیده می‌شود پرداخته شده و بر اساس ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ تکیه‌گاه‌ها و محور سد، نتایج حاصل از مطالعه واریوگرافی و مدل‌های بلوکی به وسیله رهیافت نوینی، این موقعیت تعیین شده است. در این رهیافت با اتکا به بررسی‌های واریوگرافی و محور ناهمسانگردی داده‌های RQD و لوژان، راستای بهینه پرده آب‌بند تعیین و سپس با تحلیل‌های ژئواستاتیستیکی و تهیه مدل‌های بلوکی، عمق، شیب و ضخامت مناسب آن تعیین شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند راستای مناسب برای احداث پرده آب‌بند سد خرسان N34W و شیب مناسب آن ۵۱ درجه است. همچنین بررسی‌های انجام شده مشخص نمود در عمق، پیکره پرده برای آب‌بندی کامل می‌بایست از ضخامت بالاتری برخوردار باشد.

**واژگان کلیدی:** پرده آب‌بند، ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ، زمین‌آمار، سد خرسان.

### ۱- مقدمه

موقعیت پرده آب‌بند آزمایش استاندارد را در این زمینه ابداع نموده است [۱]. لوژان با بررسی‌های تجربی معیاری را برای اولین بار به منظور تخمین عمق مناسب پرده آب‌بند در سال ۱۹۳۳ به جهانیان معرفی نمود [۱]. با توجه به اهمیت پرده آب‌بند و نقش انکارناپذیر کمیت و کیفیت تزریق سیمان در عملکرد بهینه آن محققین دیگری از جمله Grundy رابطه‌ای را برای تعیین فشار تزریق برحسب عمق در سال ۱۹۵۵ ارائه نمودند [۲]. به دنبال تحقیقات Grundy، زابورا نیز در همان سال رابطه اصلاح شده‌ای را برای افزایش کیفیت تزریق معرفی کرد [۳]. از نخستین سال‌های دهه هفتاد و با ابداع علم زمین‌آمار توسط Matheron در سال ۱۹۶۲ [۴] توجه محققین به اهمیت شکستگی‌ها و موقعیت فضایی آن‌ها در عملکرد بهینه پرده آب‌بند جلب شد. Grundy در سال ۱۹۶۴ با لحاظ نمودن ویژگی‌های ساختاری مطالعاتی را انجام داد و در خلال آن مقدار بهینه فشار تزریق را به اندازه دو برابر وزن رو باره مقطع بالای تزریق برآورد نمود [۵]. تحقیقات Grundy توسط پژوهشگر دیگری به نام Weaver ادامه یافت و وی در سال ۱۹۹۱ طی بررسی‌های مفصلی دریافت که فشار تزریق فزون بر عمق روباره به عمق

با توجه به قرارگیری کشورمان در کمربند خشک نیم‌کره شمالی، میانگین نزولات جوی سالیانه در آن پائین بوده و استفاده بهینه از منابع آبی و اجرای پروژه‌های سد به منظور ذخیره‌سازی آب در این اقلیم خشک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از سازه‌های مهم در عملکرد مطلوب سد، پرده آب‌بند است که مانع از فرار آب ذخیره شده در دریاچه سد به پایین‌دست آن می‌شود. احداث این پرده قبل از اجرای ساختمان بدنه اصلی سد، با اجرای عملیات تزریق انجام می‌گیرد. روش متداول برای ایجاد این پرده حفر یک یا چند ردیف گمانه قائم و تزریق دوغاب سیمان در این گمانه‌هاست. ولی این نحوه طراحی و احداث پرده به هیچ وجه عملکرد بهینه آن را تضمین نمی‌کند. محققین متعددی در زمینه طراحی موقعیت این پرده و نحوه تزریق دوغاب سیمان در آن بررسی‌ها و مطالعاتی را انجام داده‌اند. ولی اکثر آن‌ها از روابط تجربی و فقط با اتکا به نتایج حاصل از آزمایش لوژان به طراحی موقعیت این پرده پرداخته‌اند. یکی از محققین برجسته که مطالعات و بررسی‌های مبسوطی در این زمینه به عمل آورده است لوژان می‌باشد که برای طراحی

شرقی گسترده شده است. دسترسی به محل سد از طریق جاده آسفالت لردگان به روستای آتشگاه و طلایه امکان پذیر بوده و از کنار جاده مذکور تا محل سد حدود ۹۰۰ متر فاصله وجود دارد موقعیت جغرافیایی محدوده طرح و راه‌های دسترسی به آن در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی گستره طرح و راه‌های دسترسی به آن

## ۲-۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی گستره طرح

محدوده محل سد و دریاچه خرسان در زون زمین‌شناسی زاگرس چین‌خورده واقع شده است. در این محدوده، رسوبات ضخیم زاگرس در مراحل آخر کوه‌زایی آپی یعنی زمان پلیو-پلیوستوسن چین‌خورده‌اند. واحدهای چین‌های موجود در گستره طرح از قدیم به جدید شامل واحدهای سازند پابده، سازند آسماری، سازند گچساران، سازند بختیاری و رسوبات کواترنری عصر حاضر است. خطواره‌ها و گسل‌های متعددی نظیر خطواره بختیاری، گسل خمش لبه، گسل دوپلان، گسل دنا، گسل اردل، گسل دالون، گسل کوه زیتون و ... در گستره طرح رخنمون دارند.

## ۲-۳- مشخصات طرح سد مخزنی خرسان

خلاصه مشخصات سد خرسان در جدول (۱) ارائه شده است.

مسدود کننده موجود در سنگ نیز وابسته است و مقدار فشار مناسب برای هر فوت عمق را معادل یک پوند بر اینچ مربع تعیین کرد [۶]. در سال ۱۹۹۷ نیز Ewert رهیافتی را برای امکان تعمیق پرده تا عمق ۱۵۰ متری ابداع و معرفی نمود و شرایط لازم برای ایجاد پرده‌های عمیق را تشریح کرد [۷]. با آغاز هزاره سوم احداث پرده آب‌بند بیشتر با تکیه بر مدل‌های سه بعدی انجام گرفت. یکی از نخستین محققین در این زمینه Bushara است که در سال ۲۰۰۲ مدل سه بعدی را برای بررسی تراوایی شکاف‌ها در مخازن ارایه نمود [۸]. به دنبال وی در سال ۲۰۰۹ Peng و همکاران تأثیر توزیع فضایی گمانه‌ها در عملکرد تزریق را با تکیه بر مدل‌های سه بعدی موضوع پژوهش خود قرار دادند [۹] و در ادامه کار ایشان Gothäll و همکاران تأثیر فضایی ناپیوستگی‌ها را بر عملکرد تزریق طی مقاله مفصلی مورد بررسی قرار دادند [۱۰] و در تکمیل کارهای قبلی، نیکبخت و همکاران در سال ۲۰۱۰ با الهام از مدل‌های سه بعدی رهیافتی را برای جلوگیری از ایجاد شکستگی‌های ثانویه در خاک و سنگ با توزیع مناسب فضایی گمانه‌ها و فشار تزریق ارایه کردند [۱۱]. در سال‌های اخیر توجه زیادی به ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ تکیه‌گاه‌های سد و نقش آن در عملکرد بهینه پرده آب‌بند به عمل آمده است و استفاده از RQD به‌عنوان شاخص کیفی توده سنگ در کنار نتایج حاصل از آزمایش لوژان توسط برخی از این محققین مورد تأکید قرار گرفته است. در نوشتار حاضر ضمن انجام تحلیل‌های زمین‌آماری بر روی گمانه‌های ژئوتکنیکی حفر شده در گستره سد خرسان، با نگرش ویژه‌ای به فرایند طراحی موقعیت بهینه پرده آب‌بند، تلفیقی از تحلیل‌های واروگرافی، زمین‌آماری و زمین‌شناسی مهندسی به کار گرفته شده است و با تهیه مدل‌های بلوکی RQD و لوژان به روش کریجینگ، واقعیت‌های ساختاری خیره کننده‌ای از توده‌سنگ نمایان و در طراحی شیب و عمق بهینه پرده به کار گرفته شده است.

## ۲- معرفی ساختگاه سد خرسان

### ۲-۱- موقعیت جغرافیایی گستره سد

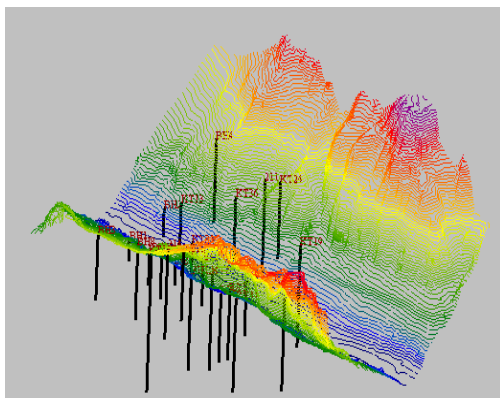
محل ساختگاه سد خرسان در فاصله ۴۶ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان لردگان از توابع استان چهارمحال و بختیاری و بر روی رودخانه خرسان که یکی از بزرگترین سرشاخه‌های رودخانه کارون به شمار می‌رود قرار دارد. سد در مختصات جغرافیایی  $31^{\circ} 14' 50''$  طول شمالی و  $50^{\circ} 58' 25''$  عرض

$$\%RQD = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{h} \times 100, \quad x_i \geq 100\text{mm} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، RQD بیانگر شاخص کیفی توده سنگ است که به طور معمول به صورت درصد بیان می‌شود.  $X_i$  معرف طول قطعات مغزه‌ها و  $h$  طول کلی گمانه‌های اکتشافی است.

به غیر از محاسبه و اندازه‌گیری مستقیم، شاخص کیفی توده سنگ را می‌توان از طریق فاصله‌داری درزه‌ها و در خلال مطالعات درزه‌نگاری نیز به دست آورد. فزون بر محاسبه RQD، آزمایش تعیین نفوذپذیری لوژان نیز در گستره طرح انجام شده است.

چنان که پیشتر نیز اشاره گردید، ۷۹ گمانه در گستره طرح حفر شده است که از این میان، ۲۶ گمانه در محدوده محور و تکیه‌گاه‌های سد واقع شده است. در تمامی این گمانه‌ها که موقعیت آن‌ها در شکل (۲) ارائه شده است، شاخص کیفی توده سنگ در قطعات پنج متری و نیز آزمایش نفوذپذیری لوژان انجام گرفته است.



شکل ۲- موقعیت گمانه‌های حفر شده در محدوده محور و تکیه‌گاه‌های سد خرسان

### ۳-۱- بررسی توزیع فراوانی RQD

مقادیر RQD در ستون گمانه‌های واقع در محور و تکیه‌گاه‌های سد برای فواصل ۵ متری محاسبه شده است. توزیع فراوانی این مقادیر (شکل (۳)) تا حدود زیادی تبعیت این داده‌ها از خصلت نرمال را نشان می‌دهد. برای مطالعه بیشتر ویژگی‌ها و توزیع آماری این داده‌ها، منحنی فرکانس تجمعی این داده‌ها و میزان انحراف آن‌ها از توزیع نرمال مطابق شکل (۴) ترسیم شد.

### جدول ۱- مشخصات کلی سد خرسان

شرح مشخصات	نوع یا مقدار
نوع سد	بتنی دو قوسی
ارتفاع سد از پی (متر)	۱۹۵
عرض دره در تراز تاج (متر)	۴۲۱
عرض بستر رودخانه (متر)	۴۰
رقوم تاج سد (متر)	۱۴۴۰
رقوم حداکثر عادی بهره‌برداری آب (متر)	۱۴۳۲
رقوم حداقل عادی بهره‌برداری آب (متر)	۱۴۰۰
رقوم کف رودخانه (متر)	۱۲۶۲
رقوم پی (متر)	۱۲۴۵
حجم دریاچه تا رقوم عادی بهره‌برداری (میلیون متر مکعب)	۱۱۵۸

### ۲-۴- مطالعات انجام شده در گستره طرح

مطالعات انجام شده در گستره طرح شامل حفر ۵۳۰۳/۷ متر گمانه و تزریق آزمایشی سیمان در توده سنگ در دو محل مختلف به طول ۱۰۴۲ متر، حفر دو گالری ژئوتکنیکی در جناح راست و دو گالری در جناح چپ جمعاً به طول ۳۸۴ متر است. هدف از انجام این مطالعات که در قالب حفر ۷۹ گمانه ژئوتکنیکی انجام گرفته است، شناخت دقیق ستون چینه‌شناسی منطقه، نمونه‌برداری به منظور تعیین ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ محور سد و تکیه‌گاه‌های آن، مطالعه وضعیت آبرفت‌ها و واریزه‌های دامنه‌ای و بررسی وضعیت آب زیرزمینی و نفوذپذیری منطقه بود. حفاری‌های ژئوتکنیکی در گستره طرح نشانگر تغییر وسیع در کیفیت و نفوذپذیری توده سنگ ساختگاه سد خرسان است. شایان ذکر است از میان گمانه‌های حفر شده در ساختگاه سد، ۱۲ گمانه ژئوتکنیکی به سفره‌های تحت فشار برخورد و به صورت آرتزین آب را به سطح زمین منتقل نمودند. مطالعه ستون چینه‌ای این گمانه‌ها حاکی از وجود طبقات نفوذناپذیر ماری در راستای آن‌هاست.

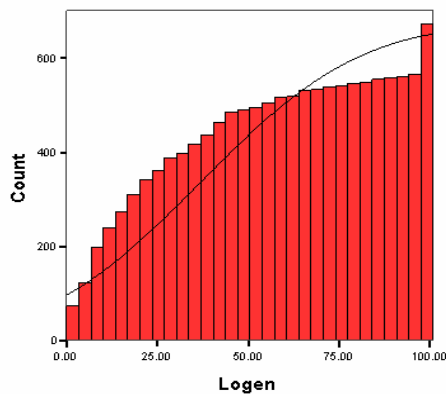
### ۳- بررسی آماری داده‌های ژئوتکنیکی حاصل از حفر گمانه‌ها

مهم‌ترین آزمایش‌های انجام شده در گستره طرح شامل آزمایش تعیین شاخص کیفی توده سنگ (RQD) و آزمایش نفوذپذیری لوژان است. شاخص کیفی توده سنگ به عنوان درصد مغزه حفاری بازیابی شده با طول‌های سالم ۱۰۰ میلی‌متری و بیشتر به شرح رابطه (۱) تعریف می‌شود.

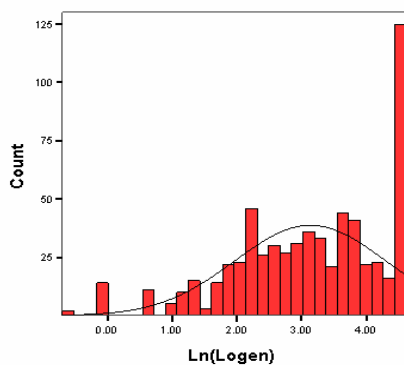
داده‌ها با توزیع نرمال که مطابق شکل (۵) انجام گرفته است، عدم انطباق این داده‌ها با توزیع نرمال و پراکندگی زیاد در آن‌ها را به اثبات می‌رساند. بررسی‌های تفصیلی بر روی این داده‌ها نشان می‌دهند که داده‌های لوژان از خصلت لاگ‌نرمال تبعیت بیشتری دارند ولی در حالت استفاده از لگاریتم نیز توزیع قابل قبولی حاصل نمی‌شود.

داده‌کاوی بیشتر نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بسیار بالای لوژان به طور عام در زون هوازه گمانه‌ها (افق‌های فوقانی گمانه‌ها) اتفاق می‌افتد. با حذف این مقادیر و استفاده از لگاریتم مقادیر تا حدودی منحنی توزیع فراوانی داده‌های لوژان مطابق شکل (۶) به منحنی نرمال نزدیک می‌شود.

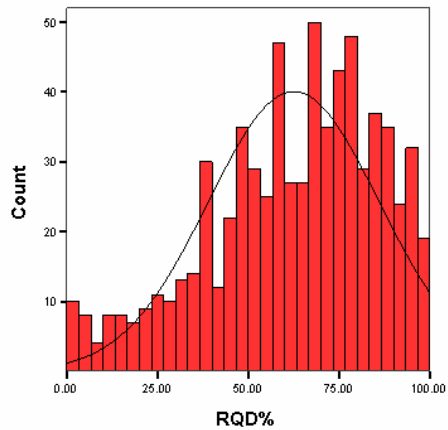
بررسی همبستگی نتایج آزمایش لوژان و RQD نیز نشانگر همبستگی نسبتاً ضعیف بین آن‌هاست. این بررسی که مطابق شکل (۷) به عمل آمده است، ضریب همبستگی را علی‌رغم اعمال تصحیح‌های لازم بر روی داده‌های لوژان، ۵۱ درصد نشان می‌دهد.



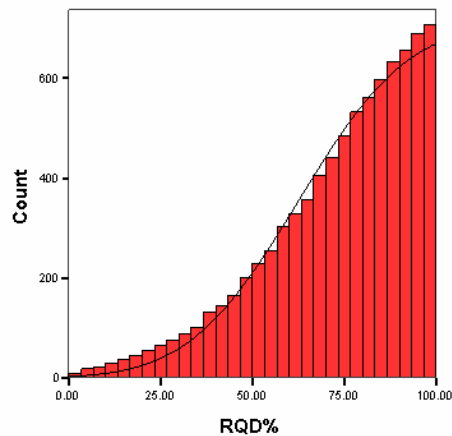
شکل ۵- بررسی انطباق داده‌های حاصل از آزمایش لوژان با توزیع نرمال



شکل ۶- توزیع فراوانی داده‌های حاصل از آزمایش لوژان پس از حذف مقادیر مربوط به زون‌های هوازه و استفاده از لگاریتم مقادیر



شکل ۳- توزیع فراوانی مقادیر RQD در نمونه‌های ژئوتکنیکی



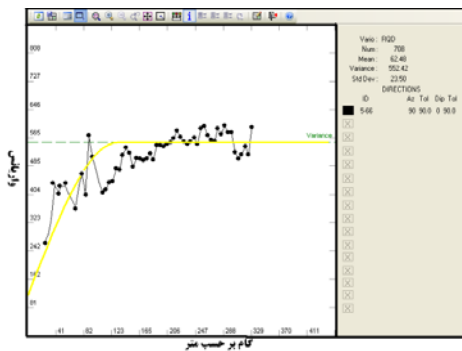
شکل ۴- منحنی فرکانس تجمعی مقادیر RQD در نمونه‌های ژئوتکنیکی گستره سد خرسان و انطباق آن با توزیع نرمال گستره سد خرسان

به طوری که ملاحظه می‌شود، با سطح اعتماد بالایی می‌توان در خصوص انطباق این توزیع با نمودار توزیع نرمال اظهار نظر نمود. بررسی تغییرات RQD در ستون گمانه‌ها نشانگر آن است که با افزایش عمق، مقدار RQD در بیشتر گمانه‌ها بهبود یافته و روند افزایشی طی می‌کند. با توجه به روند افزایشی مقادیر RQD می‌توان گفت که گستره سد خرسان، از دیدگاه تغییرات این پارامتر، محدوده نرمالی محسوب می‌گردد.

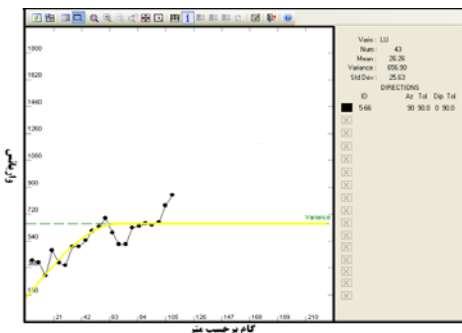
۳-۲- بررسی توزیع فراوانی داده‌های حاصل از آزمایش نفوذپذیری لوژان

داده‌های لوژان در ستون گمانه‌های ژئوتکنیکی پراکندگی بسیار زیادی را در نتایج نشان می‌دهند. بررسی انطباق این

می‌شوند. در شکل‌های (۸) و (۹) نمونه‌ای از واریوگرام‌های ترسیم شده ارائه شده است. واریوگرام شکل (۸) مربوط به داده‌های لوژان برای کل گستره طرح و واریوگرام شکل (۹) مربوط به داده‌های ستون گمانه شماره KT19 است. به طوری که از اشکال مشهود است، واریوگرام‌ها متناسب با ویژگی‌های ساختاری و تنوع داده‌های آن‌ها می‌توانند شکل‌های مختلفی داشته و از مدل‌های متفاوتی تبعیت نمایند. ولی آنچه مسلم است، رسم و تحلیل واریوگرام‌های انفرادی نمی‌تواند خصلت آنیزوتروپی منطقه را به طور دقیق مشخص نماید و برای بررسی و مطالعه آنیزوتروپی در منطقه، رسم واریوگرام‌های سطحی یا تجمعی از واریوگرام‌های جهت‌دار اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. برای نیل به این هدف، واریوگرام‌های ترسیم شده برای لوژان و RQD که دارای گام‌ها و تعداد گام یکسانی هستند و راستای بین صفر تا ۳۶۰ درجه را پوشش می‌دهند مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به نتایج حاصل از ترسیم واریوگرام‌ها، مناسب‌ترین تطابق با مدل کروی برای داده‌های جهت‌دار و بی‌جهت به طور عام در گام ۵ متری و تعداد گام ۷۰ حاصل می‌شود. روی این اصل، این مقادیر مبنای تهیه واریوگرام‌های سطحی قرار گرفتند.



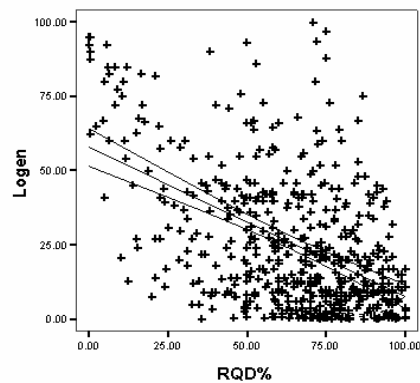
شکل ۸- واریوگرام داده‌های حاصل از آزمایش لوژان برای کل گستره طرح



شکل ۹- واریوگرام مربوط به داده‌های ستون گمانه شماره KT19

#### ۴- تحلیل‌های زمین‌آماري RQD و لوژان

در پژوهش حاضر، از تحلیل‌های زمین‌آماري که ابزار بسیار نیرومندی برای مطالعه ارتباط فضایی داده‌ها هستند استفاده شده است. این تحلیل‌ها که شامل واریوگرافی، درون‌یابی داده‌ها و تعیین محور ناهمسانگردی داده‌های ژئوتکنیکی است، در مراحل مختلف اجرای پژوهش برای تعیین راستا، شیب و عمق بهینه پرده آب‌بند به کار گرفته شده است.



شکل ۷- نمودار همبستگی بین نتایج آزمایش لوژان و RQD

#### ۴-۱- تحلیل ناهمسانگردی داده‌های ژئوتکنیکی به منظور تعیین راستای بهینه پرده آب‌بند

ناهمسانگردی (آنیزوتروپی) به تغییرات دامنه تأثیر و یا سقف تغییرنا (واریوگرام) در جهات مختلف اطلاق می‌شود و به همین دلیل واریوگرام ابزار مناسبی برای تشخیص ناهمگونی‌ها است. برای انجام تحلیل‌های آنیزوتروپی، رسم واریوگرام‌ها اجتناب‌ناپذیر است. برای انجام این تحلیل‌ها در سد خرسان، در گام نخست بررسی جامعی در خصوص گسترش و تغییرات عمقی داده‌های ژئوتکنیکی به عمل آمد و در گام‌های بعدی به منظور انجام تحلیل‌های واریوگرافی ابتدا با تغییر بسیار اندک در موقعیت مکانی گمانه‌ها، داده‌ها به گونه‌ای جفت و جور شد تا در رسم واریوگرام‌ها بیشترین تعداد زوج داده‌ها در گام‌های انتخابی مشارکت نمایند سپس تعداد زیادی واریوگرام (۱۱۲ واریوگرام) در ستون گمانه‌های ژئوتکنیکی و نیز در راستاهای مختلف گستره کلی سد خرسان ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای هر واریوگرام گام‌های متفاوتی تعریف و با برازش مدل مناسب که عمدتاً مدل کروی است، پارامترهای زون تأثیر و اثر قطعه‌ای برای آن‌ها محاسبه شد. بررسی واریوگرام ستون گمانه‌های ژئوتکنیکی حاکی از وجود نوسان‌هایی است که عمدتاً به واسطه تغییر در ساخت توده سنگ و یا عوارض ساختاری که با تغییر ناگهانی در مقادیر RQD و لوژان همراه هستند، حاصل

ولی این راستا در مقادیر واریوگرام سطحی RQD به علت تبعیت آن از توزیع نرمال با وضوح کمتری مشاهده می‌شود. با انطباق اشکال (۱۰) و (۱۱) راستای مناسب برای احداث پرده آب بند به صورت N34W حاصل می‌شود.

#### ۳-۴- کربجینگ داده‌های RQD و لوژان برای تعیین شیب بهینه پرده آب‌بند

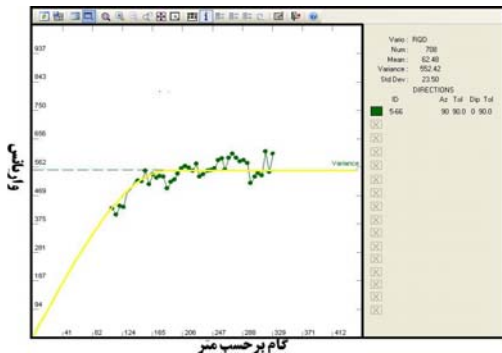
در این پژوهش از رهیافت نوینی برای تعیین شیب بهینه پرده آب‌بند استفاده شده است. بر خلاف روش‌های متداول که در آن‌ها پرده اغلب قائم در نظر گرفته می‌شود، در نوشتار حاضر با نگرش جدیدی به داده‌های حاصل از RQD و لوژان و مدل بلوکی اصلاح شده گستره طرح در حد فاصل تکیه‌گاه‌های سد تهیه، و بر اساس واقعیت‌های ساختاری عمقی، شیب مناسب پرده آب‌بند تعیین می‌شود.

#### ۳-۴-۱- عریان‌سازی موقعیت گسل‌های عمقی با استفاده از کربجینگ داده‌های ژئوتکنیکی

برای کربجینگ داده‌های ژئوتکنیکی و تهیه مدل‌های بلوکی، از واریوگرام بدون جهت مقادیر لوژان و RQD استفاده شده است. با توجه به واریوگرام این مقادیر که در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) ارائه شده است، پارامترهای آماری مورد نیاز برای تهیه مدل‌های بلوکی به شرح جدول (۲) از این واریوگرام‌ها استخراج و مبنای محاسبات قرار گرفته‌اند.

جدول ۲- پارامترهای آماری به کار رفته برای تهیه مدل‌های بلوکی

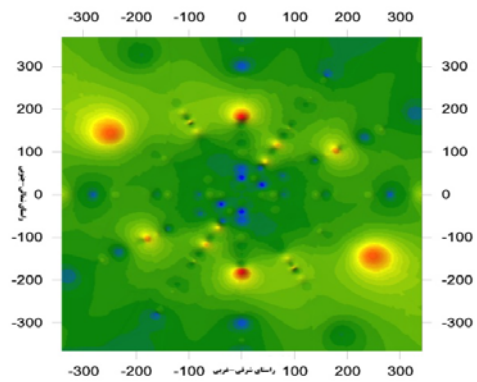
لوژان	RQD	شرح پارامتر
۳۶	۰	اثر قطعه‌ای
۱۳۶ متر	۱۸۷ متر	محدوده اثر
۱۲۰۷ متر	۵۵۲ متر	دامنه



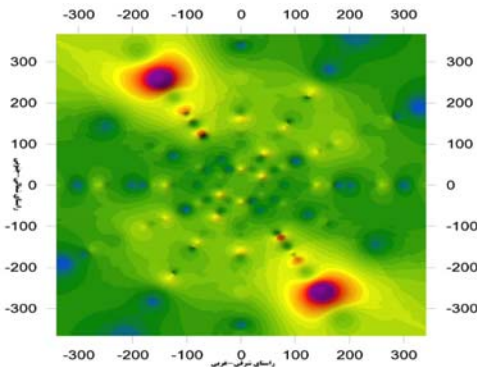
شکل ۱۲- واریوگرام بدون جهت برای تمامی داده‌های RQD موجود در گستره طرح

#### ۲-۴- تحلیل آنیزوتروپی RQD و لوژان در گستره سد خرسان برای تعیین راستای بهینه پرده آب‌بند

واریوگرام سطحی ساختار کارآمدی است که آنیزوتروپی موجود در داده‌های ژئوتکنیکی را به نمایش می‌گذارد. برای ترسیم واریوگرام سطحی داده‌های ژئوتکنیکی به طور معمول از الگوریتم کمینه Curvature استفاده می‌شود. بر اساس این الگوریتم پردازش، مقادیر واریوگرام ( $\gamma$ ) برای داده‌های جهت‌دار با گام و تعداد گام یکسان در راستای ۰ تا ۳۶۰ درجه انجام می‌گیرد و محصول فرایند به صورت خطوط تراز است که بیانگر بیشترین تغییرات واریانس در راستاهای مختلف هستند. برای تحلیل آنیزوتروپی در پژوهش حاضر نیز از ترسیم واریوگرام‌های سطحی برای مقادیر RQD و لوژان استفاده شده است. این واریوگرام‌ها که در اشکال (۱۰) و (۱۱) نمایش داده شده‌اند، به خوبی راستای ناهمسانگردی داده‌های ژئوتکنیکی RQD و لوژان را برای تمامی مقادیر مشخص می‌کنند. به طوری که مشهود است ناهمسانگردی برای مقادیر لوژان از وضوح بسیار بالایی برخوردار است.



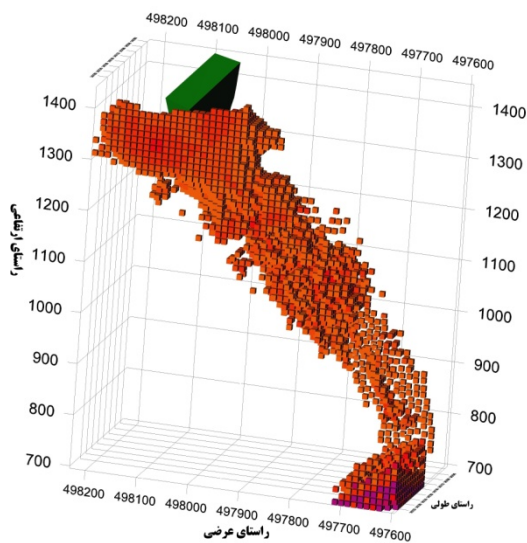
شکل ۱۰- واریوگرام سطحی جهت‌دار داده‌های حاصل از آزمایش RQD



شکل ۱۱- واریوگرام سطحی جهت‌دار داده‌های حاصل از آزمایش لوژان

بند در سنگ سالم با RQD بالا به منظور عملکرد بهینه پرده به شرح زیر انتخاب گردید.

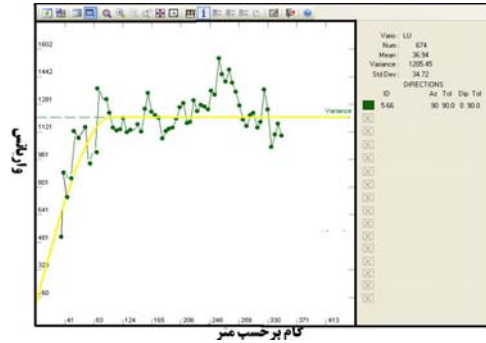
تحکیم سنگ سالم با RQD مناسب در حد فاصل دو سطح شکستگی موازی و تقویت این توده سنگی با تزریق سیمان می‌توانست ضمن جلوگیری از فرار آب از زون خرد شده گسل‌ها، دیواره مستحکمی را در مقابل فرار آب و در زیر تکیه‌گاه‌ها ایجاد نماید. این بخش از توده سنگ که با فیلتر نمودن داده‌های RQD به شرح شکل (۱۵) حاصل می‌شود، صفحه‌ای با شیب تقریبی ۵۱ درجه از سنگ سالم در زیر محور سد را که راستای آن همخوانی مناسبی با محور ناهمسانگردی عمومی منطقه دارد، نمایان می‌سازد. با تحکیم و تزریق سیمان در این پهنه، می‌توان ویژگی‌های آن را بهبود بخشید و به عنوان پرده آب‌بند به کار گرفت. بدین ترتیب پرده‌ای که راستای آن منطبق بر یافته‌های حاصل از مطالعات آنیزوتروپی است و با شیب ۵۱ درجه که موقعیت آن منطبق بر توده سالم با RQD بالای ۷۰ درصد و لوژان کمتر از ۳۰ است، به عنوان موقعیت بهینه برای پرده آب-بند تعیین شد.



شکل ۱۵- راستای تقریبی گسترش سنگ سالم موجود در زیر تکیه‌گاه‌های سد که در حد فاصل دو شکستگی عمقی قرار دارد

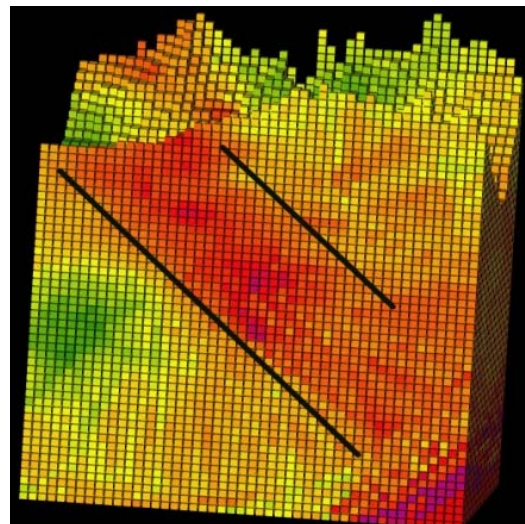
#### ۴-۴- تعیین عمق مناسب پرده آب‌بند

در پژوهش حاضر، برای تعیین عمق مناسب پرده نیز از رهیافت نوینی بهره گرفته شده است و بر خلاف روش‌های معمول که عمق پرده را با نفوذپذیری لوژان کمتر از ۳ مشخص می‌نمایند، از توانایی‌های روش کریجینگ بهره جسته و با استفاده از عوارض ساختاری موجود در منطقه و تأثیر آن‌ها بر عملکرد بهتر پرده، عمق مناسب آن تعیین شده است.



شکل ۱۳- واریوگرام بدون جهت برای تمامی داده‌های لوژان موجود در گستره طرح

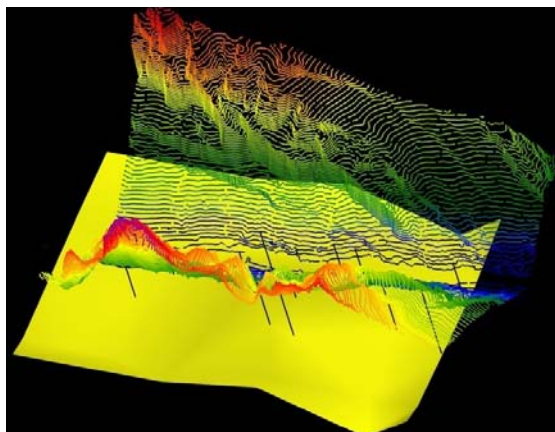
تهیه مدل بلوکی مقادیر RQD و لوژان واقعیت‌های ساختاری جالبی از ویژگی‌های تکتونیکی گستره سد خرسا را آشکار نمود که در فاز مطالعاتی به علت پوشش منطقه شناسایی نشده بودند. از نتایج جالب توجه در این قسمت از مطالعات، آشکار شدن موقعیت دو شکستگی عمقی موازی بود که در محدوده تکیه‌گاه‌های سد و دقیقاً در زیر محور سد واقع شده بود (شکل ۱۴). شناسایی این شکستگی‌ها که در مرحله اولیه مطالعات از دید تیم مطالعاتی پنهان مانده بود، موضوع تعیین شیب بهینه پرده آب‌بند را به چالشی جدی تبدیل نمود.



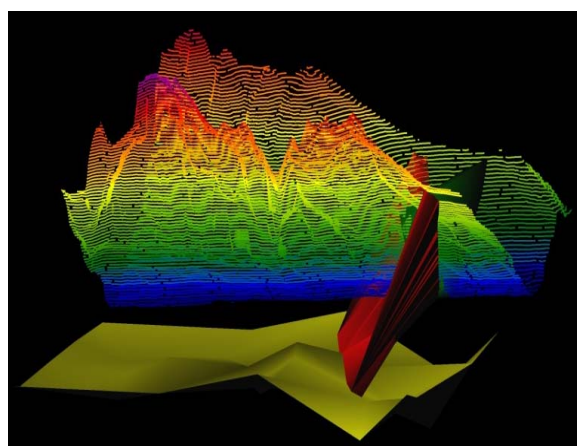
شکل ۱۴- عریان‌سازی موقعیت شکستگی‌های عمقی در مدل-سازی بلوکی مقادیر RQD گستره طرح

#### ۴-۳-۲- تعیین شیب بهینه پرده آب‌بند

به منظور استفاده از بیشینه توان توده سنگ زیر تکیه‌گاه‌ها برای مهار آب، گزینه‌های مختلفی برای طراحی شیب بهینه این پرده تدوین و از بین آن‌ها گزینه مبتنی بر قرار دادن پرده آب



شکل ۱۶- موقعیت پرده نفوذناپذیر طبیعی در زیر سطح زمین به همراه گمانه‌های آرتزین



شکل ۱۷- موقعیت کامل پرده آب‌بند سد خرسان

شایان ذکر است بدون استفاده از روش کریچینگ و بدون تخمین ویژگی‌های مهندسی سنگ، امکان دسترسی به چنین نتایج با ارزشی امکان‌پذیر نبوده و بدون این داده‌ها، ضخامت و میزان تزریق سیمان در تمامی طول پرده یکسان اجرا می‌شد که این امر ضمن تحمیل هزینه‌های هنگفت اقتصادی از کیفیت و کارایی پرده نیز می‌کاست؛ چرا که تزریق سیمان در حجم مناسب برای بخش‌های ضروری و ضعیف از نظر ساختاری، به مقدار کافی انجام نمی‌گرفت.

#### ۵- نتایج حاصل از اجرای پژوهش

نتایج حاصل از اجرای پژوهش به شرح زیر خلاصه می‌شود:  
- عملکرد بهینه پرده آب‌بند زمانی تضمین می‌شود که موقعیت آن با عوارض ساختاری موجود در منطقه بیشترین همخوانی را داشته باشد.

در گستره سد خرسان تعداد ۱۲ گمانه آرتزین به شرح جدول (۳) شناسایی شده است که با توجه به عمق قرارگیری آن‌ها و افقی که به سفره تحت فشار برخورد نموده‌اند می‌توان موقعیت لایه نفوذناپذیر طبیعی را در گستره سد خرسان به شرح شکل (۱۶) شناسایی نمود که با اتصال پرده به این صفحه طبیعی آب‌بندی مناسبی برای سد حاصل می‌گردد. بدین منظور ابتدا با استفاده از روش کریچینگ، گسترش سطحی لایه نفوذناپذیر طبیعی تعیین و عمق برخورد این لایه با راستای تعیین شده برای پرده آب‌بند به عنوان عمق بهینه انتخاب شد. در شکل (۱۷) موقعیت کامل پرده آب‌بند طراحی شده برای سد خرسان ارائه شده است.

#### جدول ۳- مشخصات گمانه‌های آرتزین موجود در گستره طرح

BHID	X	Y	Z
KT-2	497967.1	3457105	1103.2
KT-4	497752	3457025	1163.2
KT-6	497534.5	3457094	1178.1
KT-8	497683.8	3457103	1162.3
KT-11	497313.2	3457033	1182.9
KT-17	497801.2	3457064	1207.5
KT-19	497825.3	3456983	1199.4
KT-34	497863.9	3457143	1175.1
H1	498057.3	3457076	1074.6
H3	497693.2	3457136	1114
BH9	497471.6	3457023	1165
BH7	497904.3	3457147	1153

#### ۴-۵- تعیین ضخامت مناسب پرده آب‌بند

مدل بلوکی داده‌های با ارزشی از نحوه گسترش عمقی توده سنگ سالم با RQD بیش از ۷۰ درصد را ارائه می‌نماید. با توجه به شکل (۱۵) ضخامت سنگ سالم که پیکره اصلی پرده را تشکیل خواهد داد، در گذر از افق‌های فوقانی به تحتانی یکسان نبوده و می‌بایست متناسب با گستردگی سنگ سالم نسبت به ایجاد این پرده با بهره‌گیری از اندیس‌های مهندسی سنگ سالم برجا اقدام گردد. با توجه به توانایی‌های مدل‌های بلوکی و بررسی تفصیلی آن‌ها مشخص گردید که از افق ۱۱۵۰ تا ۱۰۵۰ متری، ضخامت سنگ سالم در بخش‌های داخلی توده سنگ که تشکیل دهنده پیکره اصلی پرده آب‌بند است، کاهش می‌یابد و در این افق‌ها می‌بایست تزریق سیمان با حجم و با تعداد گمانه بیشتری انجام گیرد.



- 185-190.
- [2] Grundy, C. F., "The Treatment by Grouting of Permeable Foundations of Dams", The 5<sup>th</sup> Congress on Large Dams, New York, US, 1955, pp 127-136.
- [3] Houlby, A. C., "Construction and Design of Cement Grouting: A Guide to Grouting in Rock", John Wiley & Sons, 1990.
- [4] Matheron, G., "Principles of Geostatistics", Economic Geology, 1963, 58 (8), 1246-1266.
- [5] Grundy, C. F., "Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice", International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 1964, 238-245.
- [6] Weaver, K. D., Bruce, D. A., "Dam Foundation Grouting", ASCE Publications, New York, 1991, pp 456-469.
- [7] Ewert, F. K., "Permeability, Grout Ability and Grouting of Rocks Related to Dam Sites", Dam Engineering, 1997, 123-176.
- [8] Bushara, M. N., Tawel, A., El. Borouha, H., Dabbouk, C., Qotb, M., "Effective Permeability Modeling: Geostatistical Integration of Permeability Indicators", Offshore Abu Dhabi's Society of Petroleum Engineers Inc., 2002.
- [9] Wei-hong, P., Zheng-zhu, D., Chu-wen, G., "Theoretical Study on Multiple Holes Grouting with Natural Boundary Element Method", Procedia Earth and Planetary Science, September, 2009, pp 465-470.
- [10] Gothäll, R., Stille, H., "Fracture Dilation during Grouting", Tunneling and Underground Space Technology, 2009, 24 (2), 126-135.
- [11] Nikbakht, B., Anangari, K., Rahmani, N., "Estimation of Jet Grouting Parameters in Shahriar Dam, Iran", Mining Science and Technology (China), 2010, 20 (3), 472-477.
- طراحی قائم پرده آببند به هیچ عنوان نمی‌تواند عملکرد بهینه آن را تضمین نماید.
- با استفاده از توانایی‌های روش کریجینگ و با بهره‌گیری از روش‌های زمین‌آمار می‌توان مدل بلوکی تغییرات RQD و لوژان داده‌های ژئوتکنیکی را ترسیم و گستره‌ای از توده سنگ را که از اندیس‌های مهندسی مناسبی برخوردار بوده و دارای کمترین تعداد شکستگی‌ها است برای احداث پرده مشخص نمود.
- مدل‌های بلوکی RQD و لوژان در مواردی می‌توانند ویژگی‌های پنهان تکنوتیکی منطقه و موقعیت شکستگی‌های عمقی را که تأثیر انکارناپذیری در عملکرد بهینه پرده آببند دارند مشخص نمایند.
- راستای مناسب احداث پرده راستایی است که همخوانی مناسبی با محور ناهمسانگردی منطقه داشته باشد. راستای این محور با استفاده از ترسیم واریوگرام‌های جهت‌دار تعیین می‌گردد.
- مناسب‌ترین عمق برای احداث پرده آببند عمقی است که نفوذپذیری توده سنگ به کمینه مقدار خود رسیده و یا گستره پرده به لایه‌های نفوذناپذیر طبیعی موجود در ساختگاه سد منتهی گردد.
- اطلاعات حاصل از مدل‌های بلوکی مشخص نمودند که به علت ضعف ساختاری در توده سنگ افق‌های ۱۰۵۰ تا ۱۱۵۰ متری در بخش‌های داخلی توده سنگ می‌بایست حجم تزریق سیمان و به تبع آن ضخامت پرده در این افق‌ها تقویت گردد.

## ۶- تشکر و قدردانی

از زحمات آقای مهندس گلشن، مدیریت محترم شرکت مهندسی مشاور آبان پژوه و جناب آقای مهندس مهدی آشتیانی که اطلاعات مفیدی را برای انجام این پژوهش در اختیار تیم پژوهشی قرار داده‌اند، صمیمانه سپاسگزاری می‌نماید.

## ۷- مراجع

- [1] Nonveiller, E., "Grouting, Theory, and Practice", Elsevier, Amsterdam, 1989, pp