

# بر آورد فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد آزاد کردستان با استفاده از روش زمین آماری شاخص چندگانه و مقایسه آن با مقادیر واقعی

علی عالی انوری<sup>۱\*</sup>، سعید سلطانی محمدی<sup>۲</sup> و مریم میری<sup>۳</sup>

استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

گارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۶

## چکیده

هدف اصلی این مقاله محاسبه فرار آب از مخزن سد آزاد کردستان با استفاده از تلفیق اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی و نتایج حاصل از روش زمین آماری چندمتغیره است. برداشت‌های صحرایی و نتایج حاصل از ۳۸ گمانه اکتشافی منابع اطلاعاتی در بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی سد آزاد هستند. با توجه به محدود بودن تعداد گمانه‌ها و نیاز به تفسیر دقیق از شرایط زیرسطحی زمین در نقاطی که گمانه حفر نشده است، با استفاده از روش زمین آماری چندمتغیره، تغییرات نفوذپذیری در امتداد محور و تکیه‌گاه‌های سد آزاد تخمین زده شد. بررسی نتایج حاصل از مطالعات زمین آماری مؤید این نکته است که بخش اعظمی از پی و تکیه‌گاه‌های سد آزاد نفوذپذیری پایین دارد که خطر چندان از نظر فرار آب ندارد و تنها در بخش‌هایی از تکیه‌گاه‌ها و تکیه‌گاه‌های سد آزاد نفوذپذیری بالا نشان داده شده است که تطبیق آن با نقشه‌های زمین‌شناسی مهندسی، محدوده برخورد توده نفوذی آذرین با سنگ‌های دگرگونی را نشان می‌دهد. سپس با استفاده از این نتایج و همچنین نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مقدار نشت آب از پی و تکیه‌گاه‌ها با استفاده از روش عددی المان محدود برآورد شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی، فرار آب در حدود ۴۵۰ لیتر بر دقیقه (۷/۵ لیتر بر ثانیه) از پی و تکیه‌گاه‌های سد را نشان می‌دهد. از سوی دیگر در پایین دست سد مقدار آب نشتی از سد و چشمه‌های پایین دست به‌طور مرتب اندازه‌گیری شده است که در حدود ۳۵۰ لیتر بر دقیقه را نشان می‌دهد و نشان‌دهنده ارتباط نزدیک میان مدل‌سازی انجام شده و مقادیر اندازه‌گیری شده است.

**کلیدواژه‌ها:** نفوذپذیری، زمین آمار، شاخص چندگانه، برآورد نشت، سد آزاد

\*نویسنده مسئول: علی عالی انوری

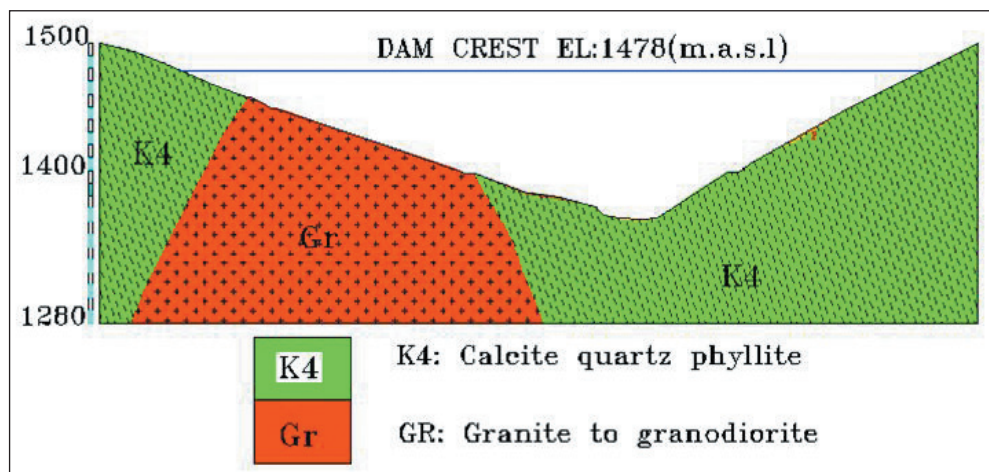
E-mail: ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

کلسیتی و کوارتزی به رنگ خاکستری تیره و سیاه به همراه رگه‌هایی از کلسیت و کوارتز تشکیل داده‌اند.

وجود لایه‌های مختلف نظیر اسلیت و فیلیت به همراه توده‌های آذرین در محور و ساختگاه سد، موجب تغییر در نفوذپذیری هر کدام از این واحدها شده است. توده سنگ‌های اسلیت و فیلیت عمدتاً دارای ماهیت نفوذپذیری کم هستند. در حالی که گرانیت‌ها و توده‌های آذرین در صورت وجود شکستگی‌ها و ناپیوستگی‌ها می‌توانند به عنوان مجراهایی برای عبور آب در نظر گرفته شوند. شکل ۱ مقطع زمین‌شناسی را در امتداد محور سد نشان می‌دهد.

سد مخزنی آزاد از نوع سنگریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع از پی ۱۲۵ متر و به گنجایش مخزن حدود ۳۰۰ میلیون متر مکعب در ۷۵ کیلومتری سندانج در استان کردستان قرار گرفته است. گستره طرح به لحاظ تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران، در محدوده زون سندانج-سیرجان قرار دارد و ساختگاه آن تحت تأثیر فازهای کوهزایی دارای ماهیت دگرگونی و متأثر از نفوذ توده‌های آذرین درونی است. وجود یک توده نفوذی با ترکیب گرانودیوریتی در تکیه‌گاه‌ها، در بخش‌های عمقی تر تکیه‌گاه راست و نیز آثار و شواهد نفوذ توده‌های آذرین به‌صورت دایک‌ها و زبانه‌های آپلیتی در گمانه‌های اکتشافی دیده شده است. سنگ بستر ساختگاه سد را عمدتاً فیلیت‌های



شکل ۱- مقطع زمین‌شناسی در امتداد محور سد (شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۶).

نکته منفی این روش به زمان لازم برای محاسبه و برازش مدل به نیمه تغییرنمای تجربی و همچنین حل سیستم کریجینگ به صورت جداگانه برای هر یک از مقادیر آستانه باز می‌گردد. از این رو استفاده از کریجینگ شاخص میانه پیشنهاد شده است که در آن تنها از نیمه تغییرنمای تجربی مرتبط با میانه برای تعریف همبستگی فضایی برای همه مقادیر آستانه استفاده می‌شود. مطالعات نشان داده است که در شرایطی که نیمه تغییرنمای تجربی محاسبه شده برای مقادیر آستانه مختلف خیلی شبیه هستند، استفاده از کریجینگ شاخص چندگانه نتایج مشابه با کریجینگ شاخص میانه (Median Indicator Kriging) خواهد داشت.

بر اساس تابع توزیع تجمعی شرطی، پارامترهای امید شرطی یا تخمین E-type  $(Z_E^*(X_0))$  و واریانس شرطی  $(S_{IK}^2(X_0))$  بر اساس روابط زیر قابل محاسبه است:

$$Z_E^*(X_0) = \sum_{k=2}^K z_k [F^*(X_0; z_c^k) - F^*(X_0; z_c^{k-1})] \quad (4)$$

$$S_{IK}^2(X_0) = \sum_{k=2}^K [z_k - Z_E^*(X_0)]^2 [F^*(X_0; z_c^k) - F^*(X_0; z_c^{k-1})] \quad (5)$$

که  $z_k$  مقدار میانگین بازه  $(z_{k-1}, z_k)$  است.

## ۲-۲. جمع آوری داده‌ها

به منظور آگاهی از وضعیت هیدروژئولوژیکی و مقدار نفوذپذیری واحدهای سنگی و قشر روپاره محدوده سد آزاد و سازه‌های وابسته، در مرحله اول مطالعاتی سد، ۲۳ گمانه به متراژ کلی ۱۵۰۰ متر و در مرحله دوم ۱۵ حلقه گمانه اکتشافی در محدوده سد به طول مجموع ۶۴۷/۵ متر حفاری شد و تمام گمانه‌ها تحت آزمایش‌های صحرایی نفوذپذیری لوژن و لوفران، S.P.T. (ضربه و نفوذ استاندارد) قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها به منظور بررسی و تخمین میزان نفوذپذیری مشتمل بر مشخصات و موقعیت، شیب و آزمون، نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری و پیمایش‌های زمین‌شناسی گمانه‌ها بودند که جهت تهیه بانک اطلاعاتی برای ورودی نرم‌افزار دیتامین استودیو (Datamine Studio) تهیه و تدوین شدند.

## ۲-۳. تحلیل آماری داده‌ها

بررسی آماری داده‌هایی که در تخمین شرکت می‌کنند و شناخت ویژگی‌های آماری جامعه داده‌های خام، به خصوص ماهیت توزیع آنها کمک زیادی به نحوه صحیح به کار بردن آنها و تجزیه و تحلیل مناسب تر نتایج حاصل از تحلیل می‌کند (Aalianvari et al., 2013). در جدول ۱ و شکل ۲ به ترتیب مشخصات آماری پارامتر مورد نظر جهت تخمین نفوذپذیری (لوژن) و نمودار توزیع فراوانی پارامتر لوژن ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع فراوانی داده‌های نفوذپذیری انحراف زیادی از حالت گوسین دارد و دارای چولگی از راست است که این مسئله امکان استفاده از روش‌های تخمین زمین‌آماري معمول همچون کریجینگ ساده، عام و معمولی را محدود می‌سازد و عموماً روش جایگزین در چنین مواردی لاگ کریجینگ و کریجینگ چند شاخصه است. همچنین توزیع فراوانی داده‌های نفوذپذیری نشانگر وجود تعدادی داده خارج از رده نیز است که حضور آنها توسط آزمون آماری دورفل نیز تأیید شد. وجود داده‌های خارج از رده تأثیر بسیار زیادی بر نتایج حاصل از روش‌های تخمین زمین‌آماري متداول دارد و در چنین شرایطی نیز پیشنهاد می‌شود تا از روش کریجینگ چند شاخصه استفاده شود. (Aalianvari et al., 2013). پیش‌نیاز استفاده از روش تخمین چند شاخصه، تعریف مقادیر حد آستانه به منظور تعریف متغیرهای شاخص است که برای این منظور نیز چارچوب‌های مختلفی همچون استفاده از مقادیر دهک‌ها و استفاده از حدود آستانه مفهوم فنی دارد. در اینجا با توجه به حدود آستانه مورد استفاده در تفسیرهای ژئوتکنیکی (جدول ۲)، مقادیر ۳، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ به عنوان حدود آستانه انتخاب و متغیرهای شاخص زیر تعریف شدند:

$$I_3 = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{ifugan} \leq 3 \\ 0 & \text{if } \text{ifugan} > 3 \end{cases} \quad I_{10} = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{ifugan} \leq 10 \\ 0 & \text{if } \text{ifugan} > 10 \end{cases} \quad (6)$$

$$I_{30} = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{ifugan} \leq 30 \\ 0 & \text{if } \text{ifugan} > 30 \end{cases} \quad I_{60} = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{ifugan} \leq 60 \\ 0 & \text{if } \text{ifugan} > 60 \end{cases}$$

از آنجا که یکی از مهم‌ترین مسائل پیش رو در فعالیت‌های سدسازی، بررسی و شناسایی مسیرهای احتمالی فرار آب و تخمین مقدار فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌هاست. شناسایی دقیق پارامترهای مؤثر بر فرار آب از قبیل نفوذپذیری واحدها مستلزم حفر گمانه‌ها در یک شبکه نمونه‌برداری منظم با چگالی بالاست که این امر با توجه به هزینه‌های بالای حفاری و نمونه‌برداری به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست (Aalianvari et al., 2018). از آنجا که در پروژه‌های مهندسی حجم نمونه‌های استخراج شده برای مشخص کردن شرایط توده‌سنگ تنها جزو کوچکی از منطقه شامل می‌شود، به همین دلیل همیشه در جستجوی تخمینگرهای مناسب هستند که بتواند طراحی نقشه‌ها را بهبود بخشد و کمکی برای لحاظ عدم قطعیت‌های بزرگ و تغییرپذیری ذاتی در خواص خاک و سنگ باشد (Aalianvari et al., 2018).

تعیین عمق بهینه دیوار آب بند و یا تعیین بهترین راهکار برای کنترل نشت از موضوعات اساسی در طراحی سدهای خاکی است. همچنین توزیع فشار حفره‌ای، ناشی از نشت آب در پی - که با ایجاد نیروی برکنش احتمال لغزش و واژگونی را در ابنه بنتی ایجاد می‌کند - بسیار حائز اهمیت است (امامعلی‌زاده قناتی و همکاران، ۱۳۹۵). لذا به منظور برآورد نشت آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد آزاد، در این مقاله توزیع نفوذپذیری در امتداد پی با استفاده از روش زمین‌آماري چند متغیره و مقدار نشت از پی و تکیه‌گاه‌ها نیز با استفاده از مدل‌سازی عددی برآورد شده است.

## ۲- روش کار

### ۲-۱. تخمینگر کریجینگ شاخص چندگانه

روش‌های مختلفی برای تخمین پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی وجود دارد که در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آنها را به روش‌های زمین‌آماري و روش‌های کلاسیک تقسیم کرد (حسنی‌پاک، ۱۳۸۹). در روش‌های زمین‌آماري، فرایند تخمین بر اساس ساختار فضایی موجود در محیط مورد نظر صورت می‌گیرد. تکنیک شاخص یکی از ساده‌ترین و در عین حال ظریف‌ترین روش‌های تخمین زمین‌آماري است که می‌تواند کاربردهای بسیار زیادی در شاخه‌های مختلف علوم داشته باشد. در این روش کریجینگ، احتمال آنکه مقدار متغیر مورد نظر در بلوک یا نقطه مورد تخمین، کوچک‌تر از یک مقدار آستانه مفروض باشد، تخمین زده می‌شود (Ozturk and Nasuf, 2002). برای انجام کریجینگ شاخص (Indicator Kriging) لازم است تا داده‌های اولیه بر اساس تابع تبدیل زیر به مقادیر شاخص تبدیل شوند:

$$i(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } z(x) \leq Z_c \\ 0 & \text{if } z(x) > Z_c \end{cases} \quad (1)$$

که در آن  $Z_c$  مقدار آستانه مفروض است. در این حالت مقدار تخمینی متغیر شاخص در هر نقطه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i^*(x) = \sum_{j=1}^n \lambda_j i(x_j) \quad (2)$$

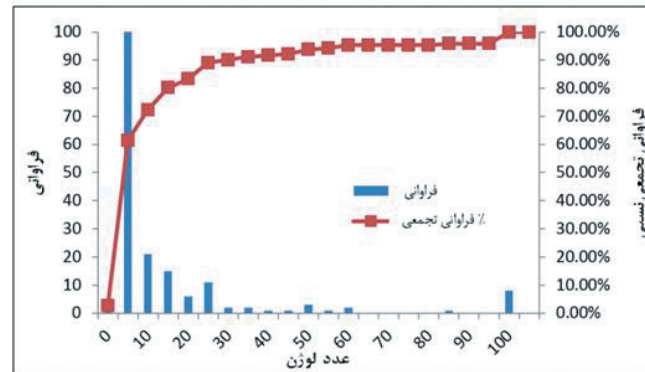
که در آن  $i(x_j)$  مقدار شاخص در مختصات  $x_j$  و  $\lambda_j$  وزن کریجینگ شاخص برای نمونه به مختصات  $x_j$  است که در تخمین نقطه  $x_0$  شرکت می‌کند. مقدار تخمینی  $i^*(x_0)$  باید بین حداقل صفر و حداکثر یک تغییر کند و معرف احتمال آن است که مقدار متغیر در بلوک مورد تخمین از حد آستانه کوچک‌تر باشد. در نتیجه احتمال اینکه مقدار متغیر در بلوک مورد نظر از حد آستانه (Threshold) تعریف شده بیشتر باشد از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$t^*(x_0) = 1 - i^*(x_0) \quad (3)$$

به جای استفاده از تنها یک حد آستانه در قالب روش کریجینگ شاخص، می‌توان چندین حد آستانه مختلف  $(Z_c^k, k=1, \dots, m; m>1)$  را تعریف و با اجرای روش کریجینگ شاخص بر روی هر یک از آنها چارچوب روش کریجینگ شاخص چندگانه (Multiple Indicator Kriging (MIK)) را پیاده کرد (Doostmohammadi et al., 2014). نتیجه نهایی تجمیع احتمالات  $k$  گانه برای هر بلوک، یک تابع توزیع تجمعی شرطی خواهد بود. در کنار مزیت‌های این روش همچون عدم وابستگی به نحوه توزیع داده‌ها و حساسیت به مقادیر خارج از ردیف،

جدول ۱- مشخصات آماری پارامتر نفوذپذیری توده سنگ.

پارامتر آماری	نفوذپذیری (LU)	پارامتر آماری	نفوذپذیری (LU)	پارامتر آماری	نفوذپذیری (LU)
تعداد آزمایش	۲۰۳	میانگین	۹/۱۲	بیشینه	۱۰۰
میانه	۱	کمینه	۱	انحراف استاندارد	۱۹/۴
پراش	۳۶۲	چولگی	۳/۳۲	کشیدگی	۱۱/۶۱



شکل ۲- نمودار توزیع فراوانی مقدار لوزن.

جدول ۲- توصیف کیفی نفوذپذیری بر حسب واحد لوزن (Aalianvari et al., 2013).

تغییرات لوزن	۳ تا ۱۰	۱۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۶۰	>۶۰
وضعیت نفوذپذیری	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد

## ۲-۴. تحلیل ساختاری

یکی از فرضیات مهم در زمین آمار فرضیه ذاتی است که بر اساس این فرضیه در یک جهت مشخص برای هر فاصله (h) واریانس اختلاف بین دو متغیر ناحیه‌ای ثابت است و بستگی به مختصات آنها دارد. واریانس عیار بین نقاطی به فاصله‌ی h از یکدیگر می‌تواند همبستگی متقابل عیارهای دو نقطه به فاصله h را بیان کند. اگر فرض شود که واریانس بین مشاهده اول z(x) در مکان x و مشاهده دوم z(x+h) در مکان x+h به h بستگی دارد، این به این معنی است که واریانس تنها تابعی از h است:

$$2\gamma(h) = \text{var} [z(x+h) - z(x)] \quad (7)$$

که در آن  $2\gamma(h)$  پراش‌نما یا واریوگرام نامیده می‌شود و چنانچه تعداد N(h) زوج نمونه به فاصله h از یکدیگر واقع باشند، تابع واریوگرام آن به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i + h) - Z(X_i)] \quad (8)$$

معمولاً هر چه h افزایش یابد؛ تعداد جفت نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به منظور کاربرد واریوگرام تجربی در تخمین لازم است تا به آن یک مدل تئوری برازش یابد (Aalianvari et al., 2017). در شکل ۳ واریوگرام‌های شاخص تجربی و مدل برازش یافته به آنها برای آستانه‌های ۳، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ نشان داده شده است. به واریوگرام‌های مرتبط با حدود آستانه ۳، ۱۰ و ۳۰ یک مدل تک‌ساختاره کروی دارای اثر قطعه‌ای برازش یافته و به واریوگرام تجربی مرتبط با آستانه ۶۰ مدل اثر قطعه‌ای محض برازش یافته است. در جدول ۳ پارامترهای مدل برازش یافته به واریوگرام‌های شاخص تجربی برای حدود آستانه مختلف آورده شده است.

## ۲-۵. برآورد مقدار نفوذپذیری به روش زمین آماری

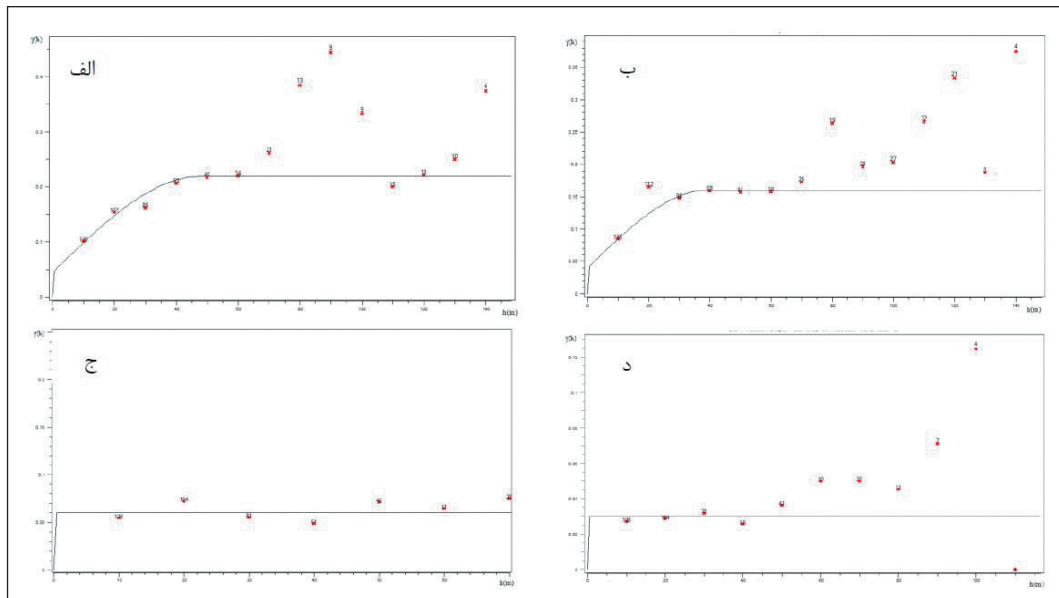
پس از ساخت مدل بلوکی ساختمانه سد با ابعاد ۱۰×۱۰×۵ متر به روش مدل‌سازی محدود، بر اساس نتایج حاصل از آنالیز ساختاری به صورت جداگانه احتمال اینکه میزان نفوذپذیری در بلوک از مقادیر آستانه ۳، ۱۰، ۳۰ و ۶۰ لوزن کوچک‌تر باشد به روش کربجینگ شاخص تخمین زده شد و پس از تجمیع آنها نمودار توزیع تجمعی شرطی و مقدار پارامترهای E-type بر اساس رابطه ۴ برای هر یک از بلوک‌ها به دست آمد. در شکل ۴ مدل بلوکی E-type برای عدد لوزن در ساختمانه سد نشان داده شده است که می‌تواند به عنوان مبنایی برای محاسبه مقدار نشت آب در ساختمانه سد مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲-۳. برآورد مقدار فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد

برای برآورد مقدار فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد از روش عددی المان محدود (نرم‌افزار Seep/w) استفاده شده است. در روش‌های عددی، به‌طور معمول از نرم‌افزارهای مختلفی می‌توان بهره برد که قابلیت کاربرد در این زمینه را دارند. در این نرم‌افزارها با ارائه شرایط مرزی (مرزهای هد ثابت، جریان ثابت و یا فاقد جریان) و معرفی ویژگی‌های هیدرودینامیکی لایه آبدار و نیز مختصات هندسی لایه‌ها و موقعیت پرده آب‌بند، مقدار بار آب زیرزمینی در نقاط مختلف یک لایه آبدار محاسبه می‌شود و میزان فرار آب نیز قابل محاسبه خواهد بود. لذا در این مقاله به منظور محاسبه مقدار فرار آب از پی و تکیه‌گاه‌های سد آزاد، با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی، چینه‌شناسی و ساختاری و همچنین مناطق با پتانسیل بالای نشت، مقاطع مختلف نشت

با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی نظیر شرایط توپوگرافی و محل‌های احتمالی فرار نشت با توجه به اختلاف گرادیان هیدرولیکی در بالادست و پایین دست سد انتخاب شده است.

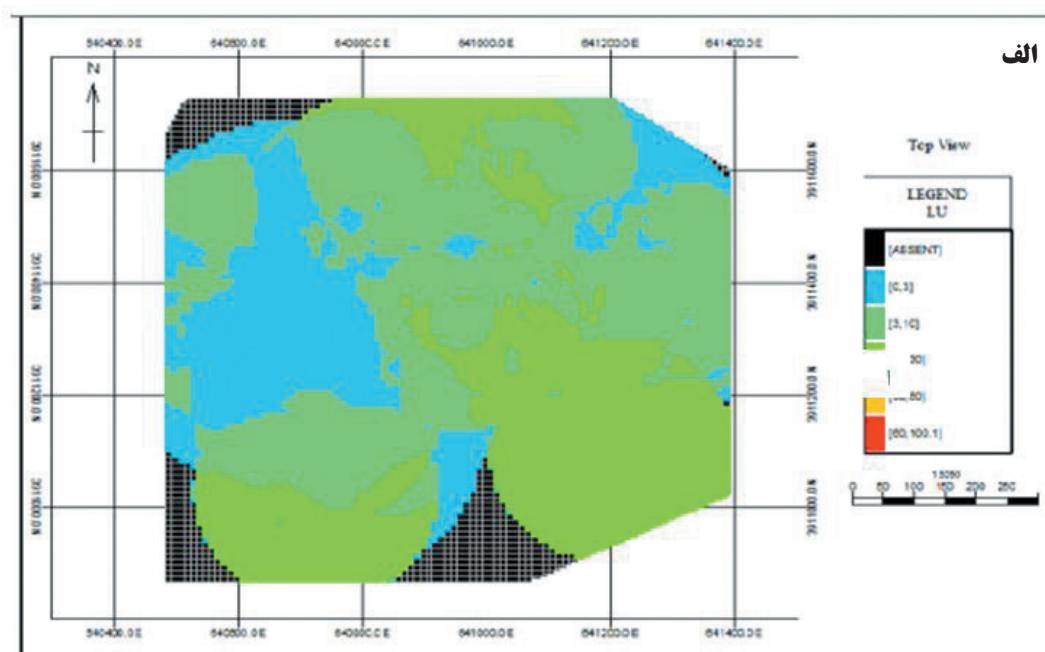
در پی و تکیه‌گاه‌ها انتخاب و بر اساس آن مدل‌سازی‌ها با استفاده از روش عددی المان محدود (نرم‌افزار Seep/w) انجام شد. موقعیت مقاطع انتخاب شده برای محاسبه نشت



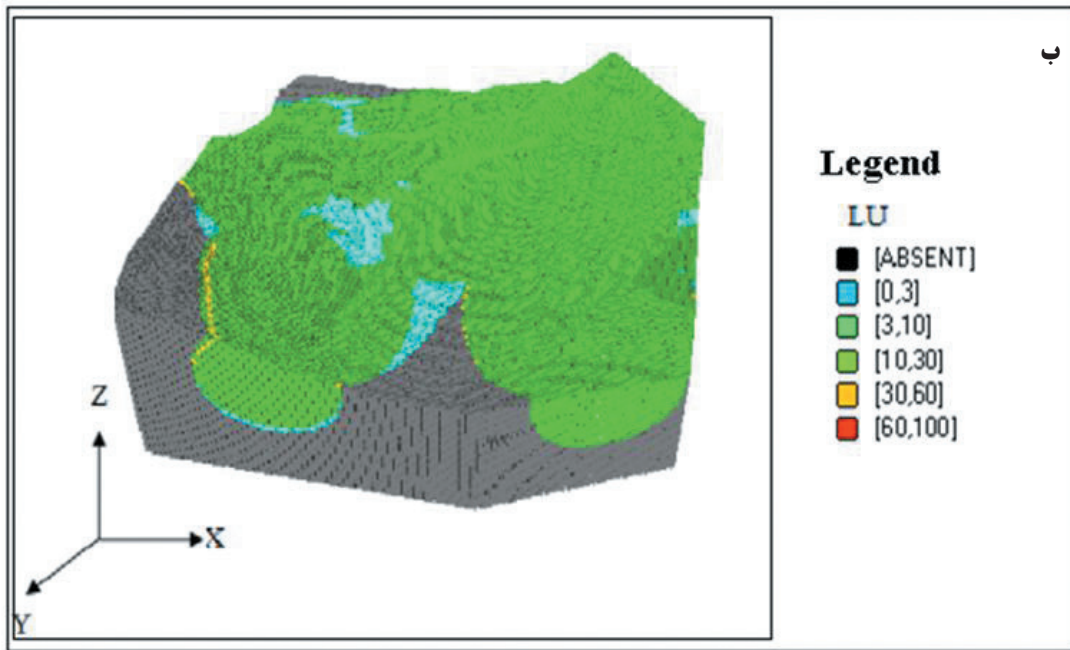
شکل ۳- واریوگرام شاخص: الف) حد آستانه‌ای ۳؛ ب) حد آستانه‌ای ۱۰؛ ج) حد آستانه‌ای ۳۰؛ د) حد آستانه‌ای ۶۰.

جدول ۳- مقادیر پارامترهای مدل واریوگرام تنوری.

پارامتر	اثر قطعه‌ای	بازه	سقف
LU <sub>3</sub>	۰/۰۴۵	۴۷	۰/۱۸
LU <sub>10</sub>	۰/۰۴	۷۱/۴	۰/۱۲
LU <sub>30</sub>	۰/۰۶	-	-
LU <sub>60</sub>	۰/۰۳	-	-



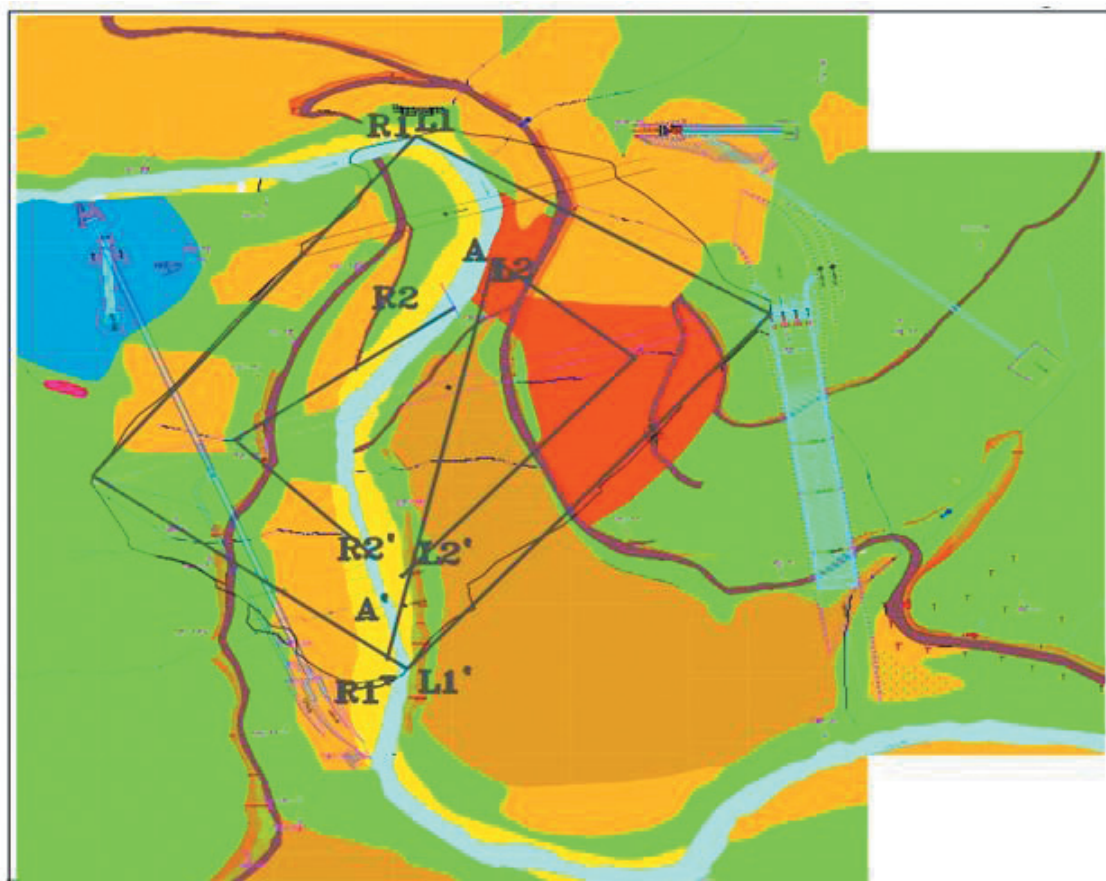
شکل ۴- مدل بلوکی تخمینی E-type (الف) نما از بالا؛



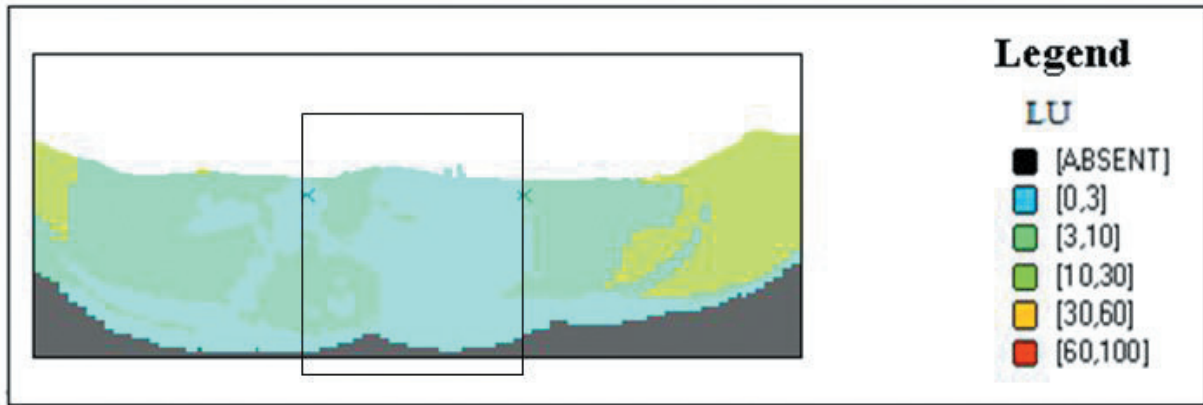
شکل ۴- مدل بلوکی تخمینی E-type. (ب) نمای سه بعدی.

شدند. شکل های ۶ تا ۹ مدل های بلوکی تهیه شده برای مقاطع مختلف را نشان می دهند (کادر مشکی نشان دهنده طولی از مقطع است که در آن محاسبات نشت انجام می شود).

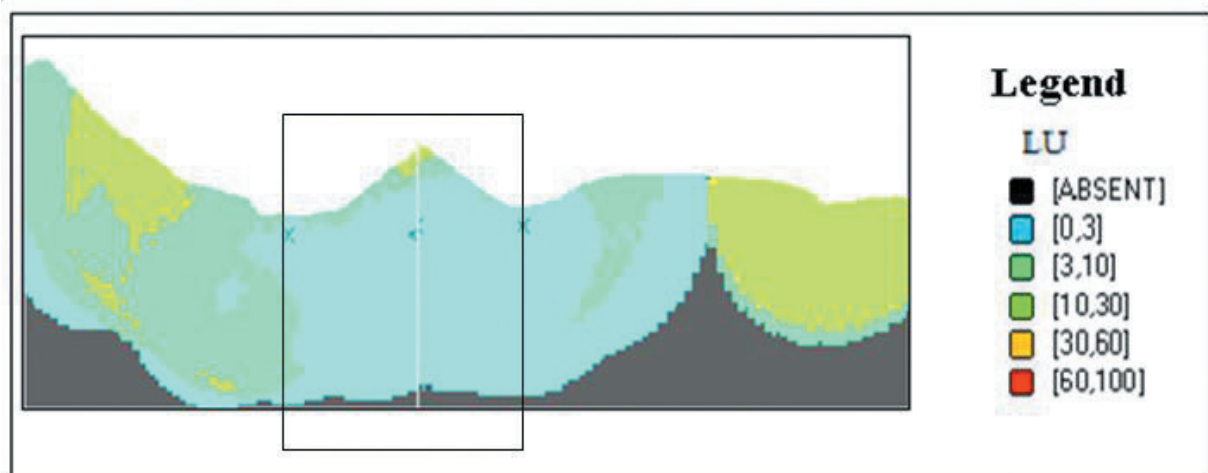
شکل ۵ موقعیت مقاطع نشت را بر روی نقشه زمین شناسی ساختگاه نشان می دهد. با توجه به مقادیر نفوذپذیری محاسبه شده از زمین آمار، مقاطع نشت تهیه و مدل ها تولید



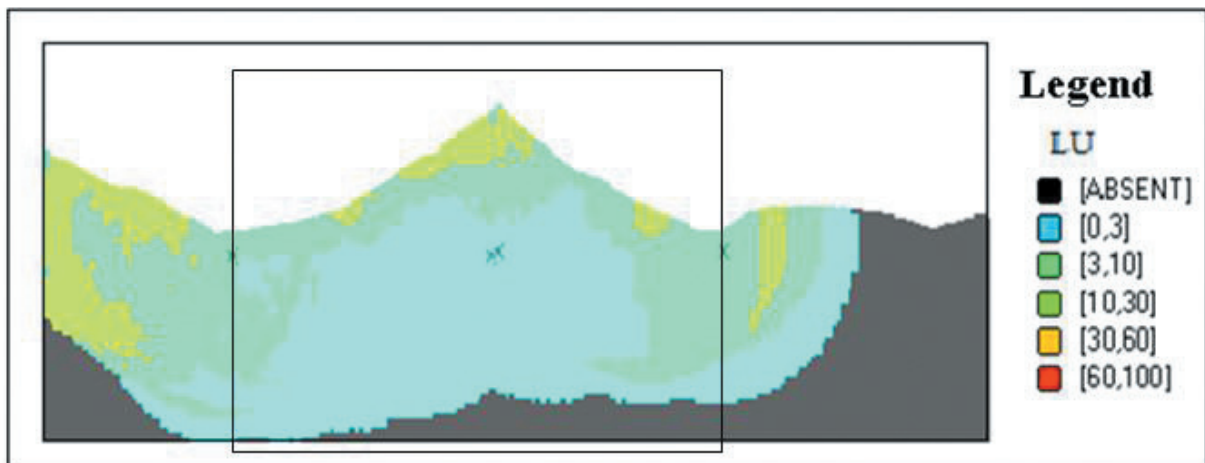
شکل ۵- محل مقاطع پی و تکیه گاه ها در ساختگاه سد (موقعیت سازه های سد بر روی نقشه مشخص شده اند).



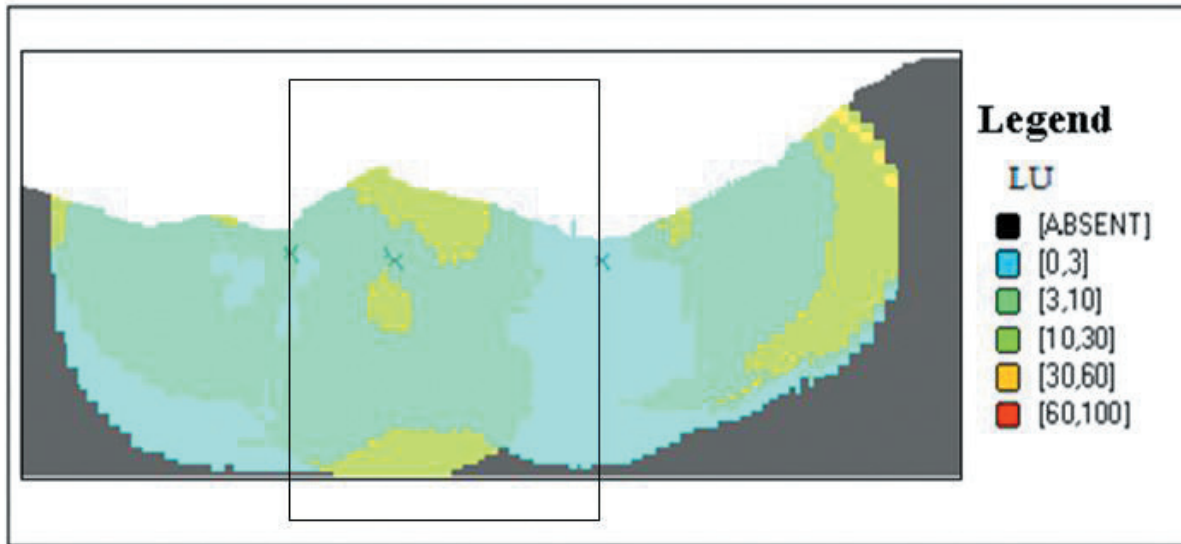
شکل ۶- مدل بلوکی میزان نفوذپذیری تخمینی مقطع A1-A1 (کادر مشکی محدوده مقطع برای محاسبه نشت است).



شکل ۷- مدل بلوکی میزان نفوذپذیری تخمینی مقطع R2-R2 (کادر مشکی محدوده مقطع برای محاسبه نشت است).



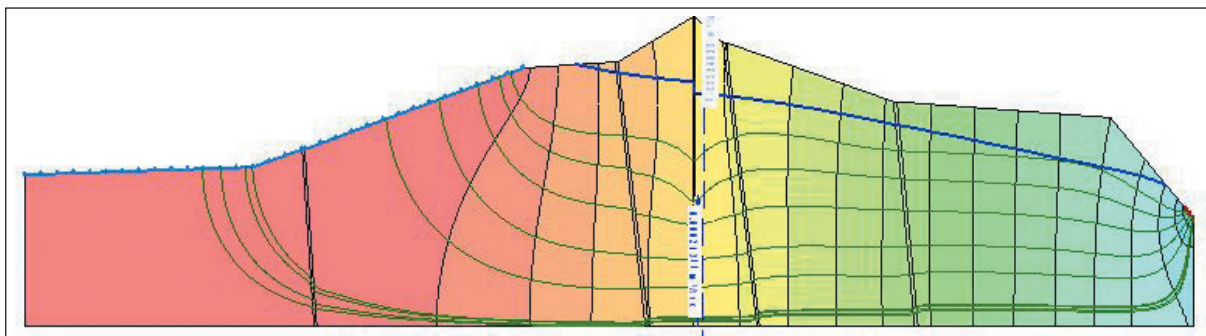
شکل ۸- مدل بلوکی میزان نفوذپذیری تخمینی مقطع R1-R1.



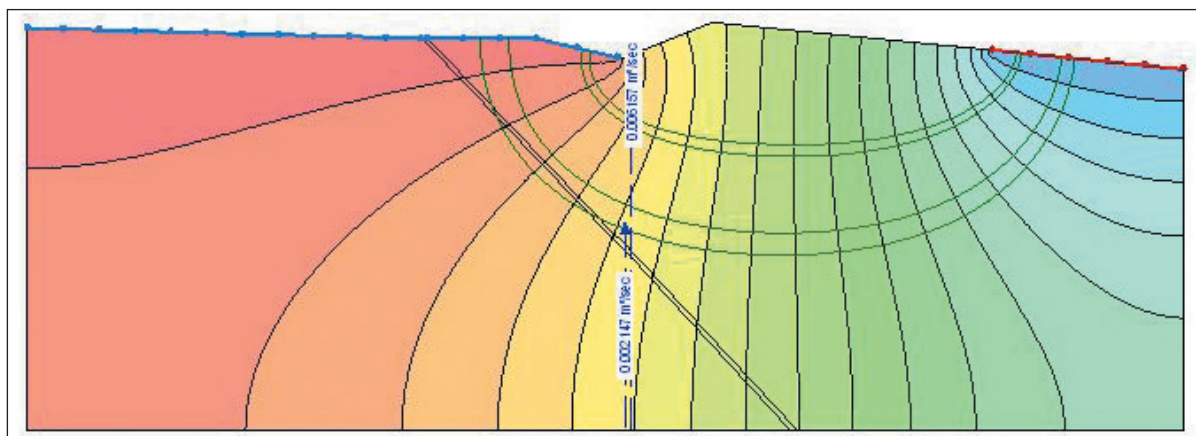
شکل ۹- مدل بلوکی میزان نفوذپذیری تخمینی مقطع I.2-I.2.

در ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی و نفوذپذیری توده سنگ ناحیه‌بندی صورت گرفته و به هر ناحیه نفوذپذیری خاص آن نسبت داده شده بود. مقاطع مورد نظر در دو حالت بدون پرده آب‌بند و همراه با پرده آب‌بند مورد مدل‌سازی و تحلیل قرار گرفتند که نمونه‌ای از مدل‌سازی انجام شده برای مقاطع در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ دیده می‌شود. در جدول ۴ به نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار اشاره شده است.

با در نظر گرفتن مقادیر تخمینی نفوذپذیری برای هر واحد و شرایط مرزی اعمال شده نظیر تراز نرمال مخزن (۱۴۷۵ متر از سطح دریا) و تراز آب پایین‌دست سد (۱۳۵۰ متر از سطح دریا)، مدل‌ها تهیه و مقدار نشت برای هر مقطع با توجه به عرض مؤثر آن برآورد شده است. انجام آنالیزهای تراوش بر اساس مقاطع ژئوتکنیکی صورت گرفته است که بر روی آن با در نظر گرفتن تفاوت‌های موجود



شکل ۱۰- مدل تهیه شده نشت برای مقطع I.



شکل ۱۱- نمونه‌ای از مدل‌های تهیه شده برای محاسبه نشت مقطع A.

جدول ۴- نتایج نشت در مقاطع مورد نظر پس از مدل‌سازی و اختصاص عرض مؤثر.

مقطع	میزان نشت بدون پرده آب بند ( Lit/min)	میزان نشت با پرده آب بند (Lit/min)
مقطع پی (A-A')	۱۸	۱۵
مقطع تکیه‌گاه چپ (L <sub>1</sub> - L <sub>1</sub> )	۱۳۵	۹۵
مقطع تکیه‌گاه چپ (L <sub>2</sub> - L <sub>2</sub> )	۱۹۸	۱۵۰
مقطع تکیه‌گاه راست (R <sub>1</sub> -R <sub>1</sub> )	۲۲	۱۶
مقطع تکیه‌گاه راست (R <sub>2</sub> -R <sub>2</sub> )	۸۰	۷۵
مجموع	۴۵۳	۳۵۱

#### ۴- نتیجه‌گیری

محدود برآورد شد. تطبیق نتایج حاصل از روش زمین‌آماري چندمتغیره با شرایط زمین‌شناسی محدوده مورد استفاده نشان‌دهنده قرابت نتایج با واقعیت است. به گونه‌ای که در تکیه‌گاه چپ در محل تماس توده سنگ آذرین و سنگ‌های با نفوذپذیری کم (اسلیت و فیلیت) تغییرات نفوذپذیری به خوبی دیده می‌شود. نتایج نشان داده شده نشت آب ثبت شده در پایین دست سد (وینوچ و ...) و پرده آب بند، نشان‌دهنده فرار آبی در حدود ۴۵۰ لیتر بر ثانیه است که ارتباط نزدیکی با نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها دارد.

مهم‌ترین پارامتر مؤثر بر جریان آب در محیط‌های سنگی، نفوذپذیری توده سنگ است. با توجه به ماهیت توده سنگ‌های ساختگاه سد آزاد، نفوذپذیری توده سنگ نیز متفاوت است. در این مقاله با توجه به محدود بودن تعداد گمانه‌های اکتشافی حفر شده در محور سد، با استفاده از روش زمین‌آماري چندمتغیره تغییرات نفوذپذیری در امتداد محور و تکیه‌گاه‌های سد آزاد کردستان تخمین زده شد و سپس با استفاده از این نتایج و همچنین نتایج حاصل از مطالعات زمین‌شناسی مهندسی، مقدار نشت آب از پی و تکیه‌گاه‌ها با استفاده از روش عددی المان

#### کتابنگاری

- امامعلی زاده قناتی، ا.، اصغری کلجاهی، ا. و گنبدی، م. ب.، ۱۳۹۵- تعیین عمق بهینه دیواره آب‌بند سد گردیان جلغا بر اساس تحلیل نشت آب با نرم افزار Seep/W، مجله هیدروژئولوژی، دانشگاه تبریز، سال اول، شماره ۱.
- حسینی پاک، ع. ا.، ۱۳۸۹- زمین‌آمار. انتشارات دانشگاه تهران.
- شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۶- گزارش زمین‌شناسی مهندسی سد مخزنی آزاد (طرح تامین آب مناطق گرمسیری).

#### References

- Aalianvari, A., Soltani-Mohammadi, S. and Rahemi, Z., 2018- Estimation of geomechanical parameters of tunnel route using geostatistical methods." *GEOMECHANICS AND ENGINEERING* 14.5: 453- 458.
- Aalianvari, A., 2017- Combination of engineering geological data and numerical modeling results to classify the tunnel route based on the groundwater seepage. *GEOMECHANICS AND ENGINEERING* 13.4: 671- 683.
- Aalianvari, A., Maleki Tehrani, M. and Soltanimohammadi, S., 2013- Application of geostatistical methods to estimation of water flow from upper reservoir of Azad pumped storage power plant." *Arabian Journal of Geosciences* 7.6: 2571- 2579.
- Doostmohammadi, M., Jafari, A. and Asghari, O., 2014- Geostatistical modeling of uniaxial compressive strength along the axis of the Behesht-Abad tunnel in Central Iran, *Bull.Eng. Geol. Environ.*, 74(3), 789- 802.
- Öztürk, C. A. and Nasuf, E., 2002- Geostatistical assessment of rock zones for tunneling, *Tunnelling and Underground Space Technology* 17(3): 275- 285.



# Estimation of water seepage from Azad dam foundation using multivariated geostatistic and comparison with observed flow

A. Aalianvari<sup>1\*</sup>, S. Soltanimohammadi<sup>2</sup> and M. Miri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>3</sup>M.Sc., Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Received: 2018 January 01

Accepted: 2018 April 15

## Abstract

The main objective of this paper is to estimate water seepage from the Azad dam foundation, based on the combined geotechnical investigations and multivariate geostatistical methods. Geological filed investigations and records at the 38 exploratory boreholes have been considered as the main source for seepage calculations. Due to expansion of reservoir and a few boreholes and limitation of geological investigations, distribution of permeability and permeability changes in the reservoir area is not an indicator for reservoir. In this research using geostatistical method (Kriging), Lugeon values have been estimated for abutments and foundation of the reservoir. Afterward, seepage was estimated for reservoir by using numerical method (FEM).results show that around 450 lit/min water was seepage from the dam. That is very close to the observed seepage from dam foundation. Based on the results, the total seepage estimated is around 450 lit/min that is relatively closed to the observed and measurements flow (350 lit/min).

**Keywords:** Permeability, Geostatistic, Multivariated geostatistic, Seepage estimation, Azad dam

For Persian Version see pages 195 to 202

\*Corresponding author: A. Aalianvari; E-mail: ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir