

پیشنهاد روشی برای تعیین محل حفاری‌های جدید، بر اساس کریجینگ شاخص؛ (مطالعه موردی سد سمیلان)

امین حسین مرشدی^{۱*} حسین معاریان^۲

پذیرش مقاله: ۸۸/۱۲/۵

دریافت مقاله: ۸۸/۸/۶

چکیده

به منظور طبقه‌بندی داده‌ها در ساختگاه سد سمیلان، شاخص‌گذاری بر اساس حد آستانه و تبدیل داده‌های کیفی به کمی، مورد استفاده قرار گرفت. یکی از مبانی کاربردی شاخص‌گذاری در تخمین، کریجینگ شاخص است. در بررسی حاضر، پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ)، به همراه سازه‌های مختلف سد، مطالعه شد. بر اساس توابع شاخص‌گذاری، پارامتر لوژون به چهار شاخص، پارامتر شاخص کیفی سنگ به سه شاخص و سازه‌های مختلف سد به چهار شاخص تقسیم شد. سپس واریوگرام شاخص برای هر یک از پارامترهای مذکور محاسبه و خصوصیات واریوگرام استخراج شد. با استفاده از کریجینگ، پارامترهای مذکور به صورت سه‌بعدی تخمین زده شد. بر اساس میانگین خطای تخمین کریجینگ نیز پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ به چهار شاخص تقسیم شد. تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه بر اساس پیشینه سازی شاخص‌های لوژون، میانگین خطای تخمین و سازه‌های مختلف سد و کمینه سازی شاخص کیفی سنگ صورت گرفت و به صورت حاصل ضرب مقدار کریجینگ شاخص لوژون در مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد در شاخص خطای تخمین، تقسیم بر مقدار کریجینگ شاخص خصوصیت کیفی سنگ، تعریف شد. در مطالعه حاضر، بر اساس تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، دو گمانه جدید برای تکمیل حفاری‌های این سد پیشنهاد شد. نکته قابل توجه این است که تأثیر گمانه‌ها بر کاهش خطای تخمین در مراحل اولیه به مراتب بیش‌تر از مراحل بعد است و افزایش دو گمانه در برابر بیست و هفت گمانه موجود نمی‌تواند خطای تخمین را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد ولی عدم قطعیت را در آن مناطق کاهش می‌دهد.

کلید واژه‌ها: شاخص‌گذاری، کریجینگ شاخص، لوژون، *RQD*، تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، سد سمیلان

۱- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده فنی دانشگاه تهران morshedy82@gmail.com

۲- استاد مهندسی زمین، دانشکده فنی دانشگاه تهران memarian@ut.ac.ir

*مسئول مکاتبات

مقدمه

تعیین شاخص (indicator) در اکثر مواقع به منظور طبقه‌بندی داده‌ها، و در بعضی از موارد به منظور تبدیل داده‌ها از حالت کیفی به کمی، به کار می‌رود. روش‌های تخمین بر پایه شاخص‌گذاری، احتمال مقادیر کم‌تر یا بیش‌تر از حد آستانه (threshold) را محاسبه می‌کنند. تعداد حدهای آستانه برابر با تعداد شاخص‌ها منهای یک است و هدف اصلی، محاسبه احتمال رخداد برای هر یک از شاخص‌ها (کلاس‌ها) است. بنابراین محدوده هر شاخص بر اساس حدود آستانه تعریف می‌شود. شاخص‌گذاری، یکی از راهبردهای مناسب برای تحلیل داده‌های فضایی است، که با تعیین توزیع فضایی در اطراف حدود آستانه، تعیین می‌شود. تابع تبدیل یافته بر اساس شاخص‌بندی، دارای توزیع دودویی است. یکی از فواید شاخص‌گذاری این است که به عنوان یک روش ناپارامتری، نیازی به تعیین توزیع داده‌ها ندارد (Knudsen & Baafi, 1987).

یکی از کاربردهای شاخص‌گذاری در امر تخمین‌های زمین‌آماری (کریجینگ) است. کریجینگ شاخص (indicator kriging) یک روش تخمین غیرخطی است که بر اساس تابع شاخص‌گذاری و واریوگرام شاخص انجام می‌شود و مستقل از تابع توزیع است. اولین بار کریجینگ شاخص به منظور تخمین منابع معدنی و تعیین مرز ماده معدنی از باطله به کار رفته است (Gossage, 1998).

در نمونه‌برداری، معمولاً دو مقوله یا پرسش بحث‌انگیز مطرح است: یکی تعداد نمونه‌ها و دیگری نحوه آرایش و موقعیت محلی نمونه‌ها است. در مناطقی که قبلاً نمونه‌برداری صورت گرفته است، این دو پرسش به این صورت مطرح می‌شود که چند نمونه اضافی لازم است برداشته شود و آرایش نمونه‌های جدید در بین نمونه‌های قبلی چگونه باید باشد. اولین راهکار در مورد بهینه‌سازی تعداد و موقعیت نمونه‌ها، بر اساس مدیریت خطای زمین‌آماری است که برای جمع‌آوری نمونه‌های زیست‌محیطی استفاده شده است (Myers, 1997). در مقاله حاضر، ابتدا به مطالعه نحوه شاخص‌گذاری پارامترهای ژئوتکنیکی (شاخص کیفی

سنگ و لوژون)، خطای تخمین کریجینگ شاخص و سازه‌های مختلف سد پرداخته و سپس روشی برای تعیین محل حفاری‌های اضافه پیشنهاد شده است.

ساختگاه مورد مطالعه

سد سمیلان در جنوب ایران و در شهرستان رودان استان هرمزگان واقع شده است. با در نظر گرفتن شرایط ریخت‌شناختی و زمین‌شناسی مهندسی گستره طرح، ساختگاه سد در ۲/۵ کیلومتری پایین دست پیوستگاه رودخانه‌های کندر و دزدی با مختصات "۱۹'۲۱'۵۷° طول شرقی و "۴۱'۳۷'۲۷° عرض شمالی انتخاب شده است. محدوده ساختگاه در مجموعه سنگ‌های دگرگونی بجگان قرار گرفته است. این مجموعه به طور عمده از شیست پلیتی، آهک‌های باز تبلور یافته و سنگ‌های آذرین دگرگون شده، تشکیل یافته است. در محدوده محور سد، سنگ‌پی را شیست‌های پلیتی تشکیل می‌دهد که شامل نوارهای سبز تیره و رگه‌های شیری رنگ تا سفید می‌باشد. علاوه بر آن، نهشته‌های رودخانه‌ای و پادگانه‌های آبرفتی در بستر رودخانه و واریزه‌های پوششی در دامنه‌ها دیده می‌شود. در محدوده ساختگاه سه گسل وجود دارد. دو گسل F1 و F2، دارای روند شمال شرقی - جنوب غربی هستند. گسل F1 از نوع عادی (نرمال) و با طول تقریبی ۲۰۰ متر است، که طبقات شیستی را قطع کرده است و دارای شیب حدود ۵۰ درجه به سمت جنوب شرقی است. گسل F2 دارای مؤلفه امتداد لغز و چپگرد است که طول آن حدود ۱۵۰ متر است. شیب این گسل ۵۸ درجه به سمت جنوب شرقی اندازه‌گیری شده است. گسل F3 دارای شیب نزدیک به قائم بوده و از نوع گسل‌ها عادی است. در شکل ۱ موقعیت گسل‌های منطقه، محل گمانه‌ها و سازه‌های مختلف سد نمایش داده شده است.

نحوه شاخص‌گذاری

شاخص‌گذاری برای تقسیم‌بندی داده‌ها، بر اساس حدود آستانه به کار می‌رود. زمانی که داده‌ها دارای حد بالا و پایین

حداکثر و حداقل دامنه تعیین نموده و از روی تعداد بسط داده و به صورت معادله ۴ نمایش داد که گروه C_i معادل شاخص‌هایی است که با استفاده از حد آستانه مشخص می‌شود:

$$C_i = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(X) \leq Z_1 \\ 2, & \text{if } Z_1 < Z(X) \leq Z_2 \\ \dots \\ K, & \text{if } Z_{K-1} < Z(X) \leq Z_K \\ K+1, & \text{if } Z(X) > Z_K \end{cases} \quad (4)$$

$$I(X;C) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(X) = C_i \\ 0, & \text{if } Z(X) \neq C_i \end{cases}$$

تابع متغیر تصادفی متغیر $Z(X)$ را می‌توان به تابع متغیر تصادفی شاخص $I(X;Z_K)$ تبدیل نمود و گشتاور مرتبه اول تبدیل شاخص را در معادله ۵ محاسبه کرد:

$$E\{I(X;C_i)\} = 1 \times P\{Z(X) = C_i\} + 0 \times P\{Z(X) \neq C_i\} = P\{Z(X) = C_i\} \quad (5)$$

در شکل ۲ نحوه شاخص‌گذاری بر اساس حد آستانه نمایش داده شده است که داده‌ها براساس یک مقدار حد آستانه (در این شکل میانگین)، مقادیر بیش‌تر از حد آستانه به یک و مقادیر کم‌تر از حد آستانه به صفر تبدیل شده‌اند.

معنی باشند می‌توان تابع تصادفی را بر اساس مقادیر شاخص‌ها، حدود آستانه را تعیین کرد. برای حالتی که تعداد حدود آستانه K و تعداد شاخص‌ها برابر $K+1$ باشد، تابع تصادفی به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود (Wingle, 1997).

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

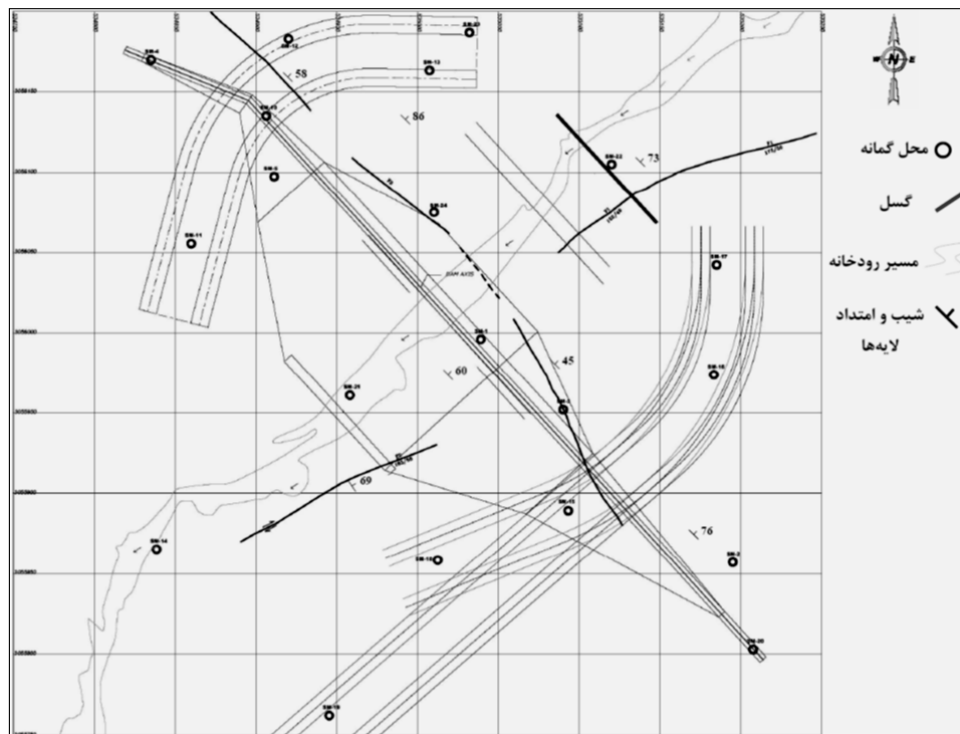
تابع متغیر تصادفی $Z(X)$ را می‌توان به تابع متغیر تصادفی شاخص $I(X;Z_K)$ به صورت رابطه ۲ تبدیل نمود:

$$I(X;Z_K) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(X) \leq Z_K \\ 0, & \text{if } Z(X) > Z_K \end{cases} \quad K = 1, \dots, K \quad (2)$$

گشتاور مرتبه اول تبدیل شاخص، در معادله ۳ محاسبه شده است:

$$E\{I(X;Z_K)\} = 1 \times P\{Z(X) \leq Z_K\} + 0 \times P\{Z(X) > Z_K\} = P\{Z(X) \leq Z_K\} \quad (3)$$

که $E\{I(X;Z_K)\}$ امید ریاضی (expectation) تابع $I(X;Z_K)$ است که بر اساس توابع احتمال بیش‌تر یا کم‌تر از حد آستانه تعریف می‌شود. معادله (۳) هم ارز تابع توزیع تجمعی (CDF) برای تابع $Z(X)$ است. در صورتی که از تعداد شاخص‌های بیشتری استفاده شود می‌توان معادله ۲ را

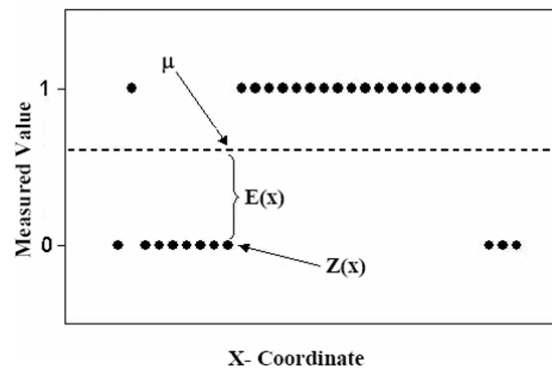


شکل ۱- نقشه خلاصه شده موقعیت سد سمیلان

داده‌های مورد بررسی

تعداد گمانه‌های حفاری شده در این ساختگاه ۲۷ عدد است که به صورت شبکه‌ای نامنظم توزیع شده‌اند (شکل ۱). تراکم شبکه نمونه‌برداری در محدوده بدنه سد و تونل‌ها چگال‌تر است. تمام گمانه‌ها به صورت قائم حفاری شده‌اند و عمق گمانه‌ها بین ۱۲۰-۲۵ متر متغیر است.

اکثر گمانه‌ها در موقعیت‌های محور و تکیه‌گاه‌های سد طراحی شده است. برای آگاهی از شرایط زیرسطحی پی، در تمامی گمانه‌های حفاری شده آزمایش‌های لازم درون‌چاهی (از جمله نفوذپذیری به روش‌های لوژون و لوفران و نفوذ استاندارد به روش SPT) صورت گرفته است. هم‌چنین برای ارزیابی شاخص کیفی توده سنگ هم‌زمان با حفاری گمانه‌های اکتشافی، شاخص کیفی سنگ (RQD) برای همه گمانه‌ها اندازه‌گیری شده است. در مطالعه حاضر، از مقادیر RQD و لوژون به عنوان پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ، در تعیین محل بهینه حفاری‌های جدید، استفاده می‌شود.



شکل ۲- کریجینگ شاخص با مقادیر صفر و یک

حد آستانه ۱۰،۳۰ و ۶۰ استفاده می‌شود که در مجموع چهار شاخص را تشکیل می‌دهند (جدول ۱).

جدول ۱- نحوه شاخص گذاری پارامتر لوژون

شاخص	توصیف کیفی نفوذپذیری	دامنه لوژون
۱	نفوذ ناپذیر	۰-۱۰
۲	کم	۱۰-۳۰
۳	متوسط	۳۰-۶۰
۴	زیاد	۶۰-۱۰۰

در نگرش کلی، شیست‌های بیجان به‌عنوان سنگ بستر اصلی ساختگاه مطرح هستند. این‌گونه سنگ، به‌طور کلی از نفوذپذیری پایینی برخوردار است. در راستای محور سد و در تکیه‌گاه چپ، نفوذپذیری قطعات غالباً زیر ۳ لوژون بوده و تنها در مقاطع سطحی تراوایی تا بیش از ۳۰ واحد لوژون ثبت شده است. در تکیه‌گاه راست در مقاطع عمیق‌تر (۴۰ تا ۵۵ متری) در اکثر گمانه‌های حفاری شده تراوایی در رده متوسط تا زیاد است. برای قطعاتی که در ژرفاهای کم‌تر از ۴۵ متر قرار دارند، مقدار تراوایی در حد متوسط تا بالا است. اما در قطعات واقع در اعماق بیشتر از ۴۵ متر، تراوایی عموماً پایین است و به‌لحاظ تراوایی، از قطعات بالاتر و پایین‌تر متمایز نمی‌شود. محدوده پی سد، بر پایه نتایج آزمایش‌های لوژون عموماً از تراوایی بین ۸ تا ۲۰ لوژون برخوردار است. در اعماق بیش از ۲۰ متر نیز اکثر تراوایی‌ها زیر ۱۰ لوژون بوده است.

شاخص گذاری پارامتر RQD

شاخص کیفی سنگ (RQD) بر اساس تعیین کیفیت توده سنگ، بر پایه مغزه بازیافتی از عملیات حفاری توسط متهماسی، استوار است. بر طبق این تعریف، RQD عبارت است از درصدی از کل مغزه بازیافت شده است که در آن قطعات سنگ، طولی برابر یا بیش از ده سانتی‌متر دارند. در تکیه‌گاه چپ سد سمیلان، میانگین شاخص کیفی سنگ در حدود ۶۳٪ می‌باشد که در بخش میانی سنگ‌های رده متوسط قرار می‌گیرد. از میان ۳ گمانه‌ای که در امتداد محور یا نزدیک به آن حفر شده‌اند در ۲ گمانه واقع در ترازهای

شاخص گذاری پارامتر لوژون

در ساختگاه سد سمیلان آزمایش نفوذپذیری لوژون یا آزمایش فشار آب جهت تعیین تراوایی توده سنگ، در داخل گمانه‌ها انجام شده است. آزمایش لوژون بسته به وضعیت لایه در قطعات یک تا ۵ متری انجام گردیده است. یک لوژون نماینده مقداری از نفوذپذیری است که بر طبق آن در یک دقیقه یک لیتر آب تحت فشار ۰/۹۸ Mpa و از طریق یک چال یک متری در توده سنگ تزریق می‌شود (Clayton et. al., 1995). برای شاخص گذاری مقادیر لوژون، از سه

با جمع مؤلفه‌های تابع توزیع احتمال تک متغیره، تابع توزیع تجمعی تک متغیره، به دست می‌آید (Wingle, 1997).

شاخص گذاری اهمیت سازه‌ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، یکی از کاربردهای شاخص گذاری، تبدیل داده‌های کیفی به کمی، به منظور مدل‌سازی و مطالعات عددی است. در یک ساختگاه سد، سازه‌ها و تاسیسات جانبی متفاوتی وجود دارد که مستلزم طراحی و اجرا هستند.

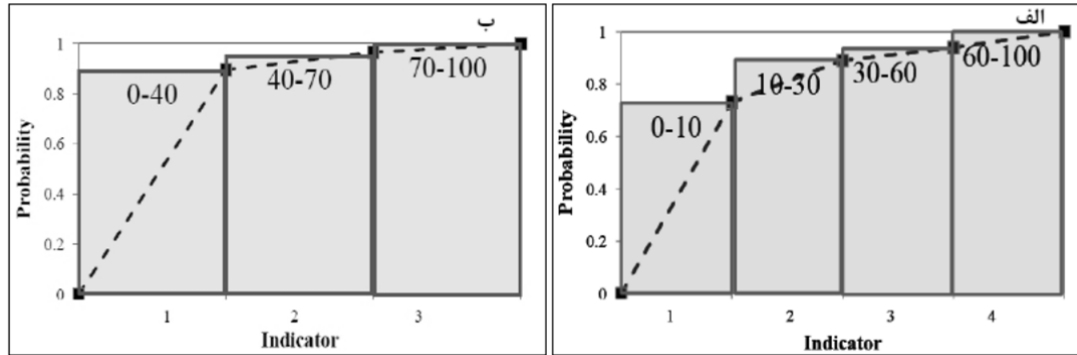
در بررسی حاضر، براساس درجه اهمیت و حساسیت سازه‌های مختلف، شاخص گذاری برای گمانه‌های حفاری شده در همان منطقه صورت گرفته است. در ساختگاه مورد مطالعه، جسم سد (بدنه اصلی سد) در درجه اول اهمیت، تاسیسات تخلیه آب (تونل‌ها، دریچه‌ها و سرریزها) در درجه دوم اهمیت، مناطق اطراف بدنه سد، هم‌چون حوضچه آرامش و مخزن سد در درجه سوم اهمیت، و مناطق خارج از ساختگاه اصلی دارای کم‌ترین اهمیت در نظر گرفته شده‌اند. این ترتیب ممکن است در ساختگاه یک سد دیگر، متفاوت باشد. به این ترتیب، با تعیین درجه اهمیت هر قسمت (سازه)، مقدار شاخص مربوطه به گمانه‌های موجود در همان قسمت، تخصیص داده می‌شود. این نکته قابل توجه است که برای گمانه‌هایی که بین دو سازه با اهمیت متفاوت مشترک‌اند، شاخص دارای اهمیت بالاتر، در نظر گرفته می‌شود. به طور مثال، گمانه‌ای که بین بدنه سد و تونل انتقال آب مشترک است، با درجه اهمیت بسیار زیاد (شاخص ۴) در نظر گرفته می‌شود (جدول ۳). بر اساس شاخص گذاری سازه‌ها، گمانه‌های موجود براساس درجه اهمیت به چهار شاخص تقسیم شدند که گمانه‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ که دارای اهمیت کم‌تری هستند و خارج از ساختگاه هستند قابل مشاهده نیست و مناطق با اهمیت بالاتر ۴، ۳ و ۲ در شکل ۴ نشان داده شده است (با شکل ۱ مقایسه شود).

پایین‌تر، و با ژرفاهای ۵۰ و ۷۸ متر، میانگین شاخص کیفی برابر ۶۲٪ است، اما در گمانه واقع در رقوم تاج که عمق آن ۱۲۰ متر بوده است این شاخص نزدیک به ۸۰٪ است که نشان می‌دهد که به‌طور کلی، با افزایش عمق گمانه، میانگین این شاخص افزایش یافته است. در تکیه‌گاه راست میانگین کل شاخص کیفی در حد ۵۴٪ است که در مقایسه با تکیه‌گاه چپ در درجه پایین‌تری قرار می‌گیرد. در محدوده بستر رودخانه میانگین شاخص کیفی برابر ۶۸٪ است. در تکیه‌گاه چپ و در گمانه‌های محدوده محور سد، به‌طور کلی با افزایش ژرفا بر مقدار میانگین شاخص کیفی افزوده شده است. در تکیه‌گاه راست در فاصله‌ای ۱۰ متری، که زون خردشده را دربر می‌گیرد، شاخص کیفی افت شدیدی را نشان می‌دهد. در شکل ۳ توزیع فضایی مقادیر شاخص کیفی سنگ و لوژون در ساختگاه سد سمیلان، به نمایش در آمده است. به منظور شاخص گذاری خصوصیت کیفی سنگ، بر اساس حدود آستانه ۴۰ و ۷۰ سه شاخص می‌توان تعریف نمود (جدول ۲).

جدول ۲- نحوه شاخص گذاری پارامتر شاخص کیفی سنگ

شاخص	توصیف شاخص کیفی	دامنه شاخص کیفی (%)
۱	کم	۰-۴۰
۲	متوسط	۴۰-۷۰
۳	زیاد	۷۰-۱۰۰

یکی از ابزارهای ساده و مناسب برای نمایش توزیع آماری مقادیر RQD و لوژون، رسم نمودار ستونی است. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، فراوانی مقادیر RQD و لوژون نزدیک به صفر، زیاد است. مقادیر کم RQD با مناطق هوازده سطحی مرتبط است. در مقابل، مقادیر کم لوژون مرتبط با مناطق با آبگذری پایین واقع در عمق است. برای هر یک از پارامترهای ژئوتکنیکی، احتمال رخداد بر اساس هر شاخص محاسبه شد و تابع توزیع تجمعی ترسیم شد (شکل ۳). در بررسی صورت گرفته، هیچ‌گونه روندی در داده‌های مورد مطالعه، مشاهده نشد. در این مطالعه از تابع توزیع تجمعی تک متغیره (CDF) به جای تابع توزیع احتمال تک متغیره (PDF) استفاده می‌شود.



شکل ۳- نمایش تابع توزیع تجمعی احتمال رخداد هر شاخص پارامترهای ژئوتکنیکی در ساختگاه سد سمیلان.

الف) لوژون، ب) شاخص کیفی سنگ

است که واریوگرافی بر اساس تابع شاخص گذاری و حد آستانه Z_c صورت می‌پذیرد. در بررسی حاضر، تابع شاخص گذاری برای پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ تعریف شد و بر اساس آن واریوگرافی صورت گرفت.

$$C_i(Lu) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(Lu) \leq 10 \\ 2, & \text{if } 10 < Z(Lu) \leq 30 \\ 3, & \text{if } 30 \leq Z(Lu) \leq 60 \\ 4, & \text{if } Z(Lu) > 60 \end{cases} \quad C_i(RQD) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(Lu) \leq 40 \\ 2, & \text{if } 40 < Z(Lu) \leq 70 \\ 3, & \text{if } Z(Lu) > 70 \end{cases} \quad (7)$$

بر اساس تابع شاخص گذاری، واریوگرافی شاخص برای پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ انجام شد و دامنه تأثیر واریوگرام در حدود ۱۰۰ متر است و بخش ساختاردار آن بزرگ‌تر از قسمت بی‌ساختار (اثر قطعه‌ای) واریوگرام است (شکل ۵).

جدول ۳- نحوه شاخص گذاری بر اساس سازه‌ها و

قسمت های مختلف سد

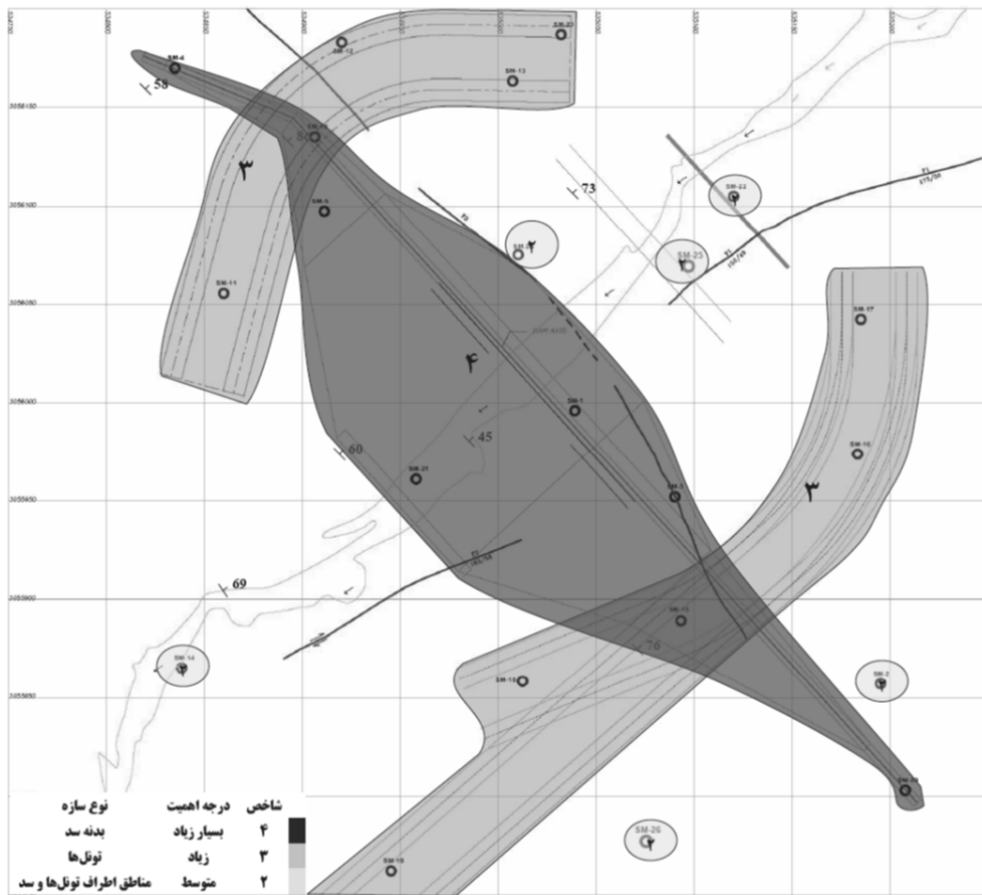
نوع سازه	درجه اهمیت	شاخص	گمانه‌ها
بدنه سد	بسیار زیاد	۴	۱۳،۴،۵،۱۰،۱۵،۲۰،۲۱،۲۲،۲۷
تونل‌ها	زیاد	۳	۱۱،۱۲،۱۳،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۳،۲۴
مناطق اطراف تونل‌ها و سد	متوسط	۲	۲،۱۴،۲۵،۲۶
مناطق خارج از ساختگاه	کم	۱	۶،۷،۸،۹

واریوگرام شاخص

واریوگرام یکی از ابزارهای زمین آماری است که برای مدل‌سازی همبستگی فضایی داده‌ها به‌کار می‌رود. در واقع واریوگرام، میانگین مربعات تفاضل دو مقدار را به‌عنوان تابعی از نمو فاصله h بین آن‌ها، بیان می‌کند. تفاوت واریوگرام شاخص (indicator variogram) با واریوگرام معمولی در این است که از مقادیر تبدیل شده بر اساس تابع شاخص گذاری شده، برای واریوگرافی شاخص، استفاده می‌شود. یکی از روش‌های تجزیه و تحلیل برای مدل‌سازی ساختار فضایی، توسط واریوگرام انجام می‌شود و وابستگی مقادیر نقاط نزدیک به هم بیش تر از وابستگی مقادیر نقاط دور از هم است. خروجی مدل واریوگرام در تخمین پارامترها و توزیع خطای مربوط به آن، به‌کار می‌رود. بنابراین چنین واریانسی می‌تواند معیاری برای نمایش تأثیرگذاری و یا تأثیرپذیری مقدار یک نمونه روی مقادیر محیط مجاور خود باشد. این واریانس وابسته به فاصله را واریوگرام می‌نامند و با نماد $\gamma(h)$ نشان می‌دهند (Webster & Margaret, 2007).

$$\gamma_{z_c}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h; Z_c) - Z(x; Z_c)]^2 \quad (6)$$

در رابطه فوق، h فاصله در جهت مشخص بین موقعیت x و $x+h$ ، $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌ها به فاصله h از یک‌دیگر، $\gamma(h)$ مقدار واریوگرام برای فاصله h ، مقدار $Z(x)$ نمونه در نقطه x و $Z(x+h; Z_c)$ مقدار نمونه در نقطه $x+h$



شکل ۴- نمایش شاخص گذاری سازه‌ها و گمانه‌های موجود در سد سمیلان

تفاوت کریچینگ شاخص با کریچینگ معمولی این است که بر خلاف کریچینگ معمولی، انباشتگی مقدار پارامتر بدست نمی‌آید، بلکه این روش بخشی از بلوک را که دارای مقادیر بالاتر از حد آستانه است، مشخص می‌کند. یکی از کاربردهای اصلی کریچینگ شاخص، تعیین مرز ماده معدنی و باطله در معادن است (Gossage, 1998).

جدول ۴- پارامترهای بیضوی ناهمسانگردی پارامترهای

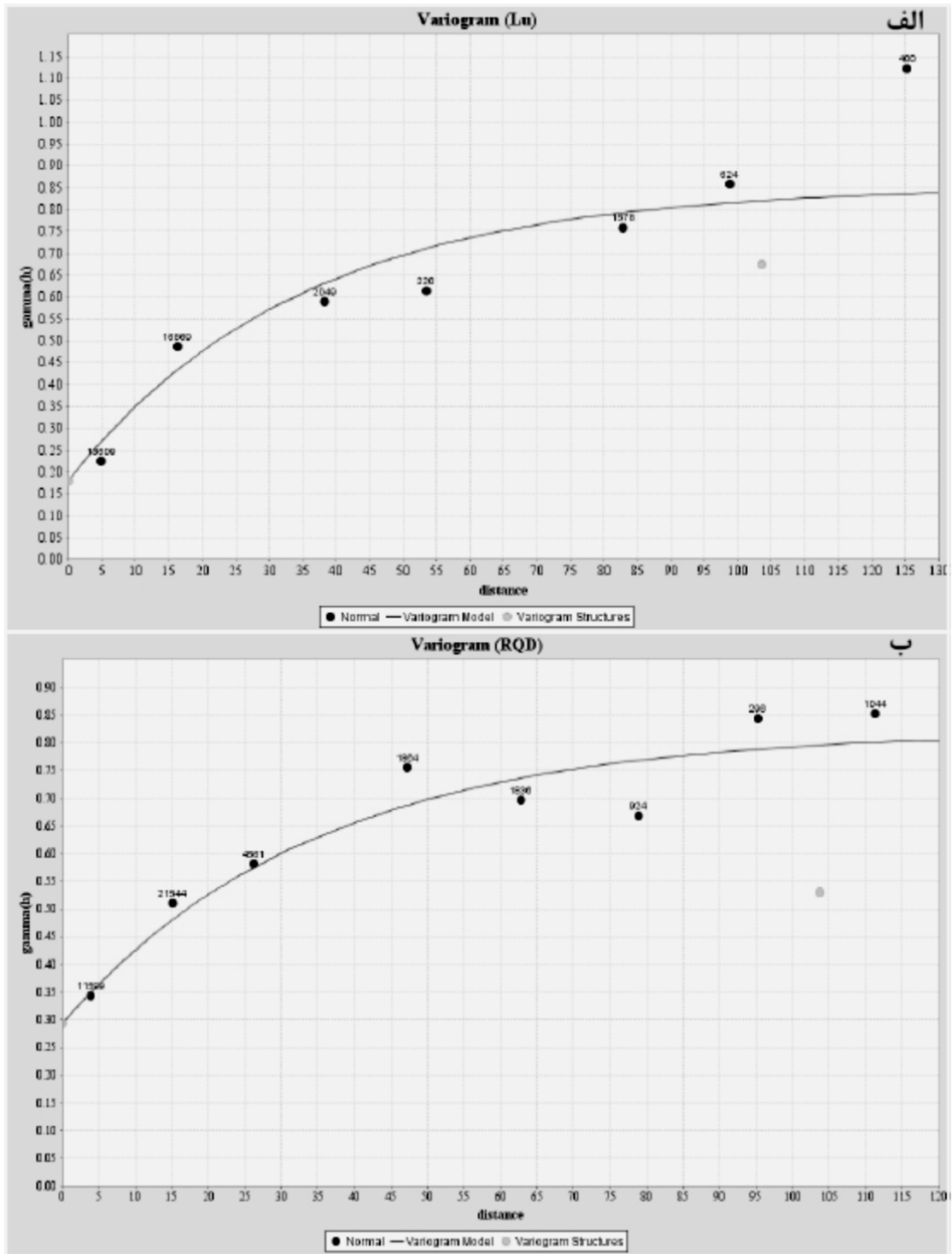
ژئوتکنیکی مورد مطالعه

پارامتر مورد مطالعه	پسین محور اصلی	پسین محور متوسط	پسین محور کوچک	آزیموت	بزرگ	کوچک
لوژون	۱/۴۲	۱/۷۶	۳۱۵	۵/۳	۲۵	
شاخص کیفی	۱/۳۵	۱/۵۲	۳۲۵	۷/۵	۲۵	

در مرحله بعد، برای تعیین ناهمسانگردی داده‌ها، واریوگرافی در جهات مختلف ترسیم شد. خصوصیات بیضی ناهمسانگردی، بر اساس سه زاویه (آزیموت، شیب و پلانچ) و نسبت‌های قطر بزرگ بیضی ناهمسانگردی به قطر کوچک آن و قطر بزرگ بیضی ناهمسانگردی به قطر متوسط آن تعیین شد (جدول ۴).

کریچینگ شاخص

کریچینگ شاخص بر اساس واریوگرام شاخص انجام می‌شود که مقادیر، در حالتی که تنها یک حد آستانه داشته باشیم، بر اساس دو شاخص (کلاس) صفر و یک طبقه‌بندی می‌شود (Gossage, 1998). کریچینگ شاخص، اصطلاحی است که برای کریچینگ مقادیر کدهای فرضی در بلوک‌های معدنی به کار می‌رود.



شکل ۵- واریوگرافی شاخص غیرجهتی پارامترهای ژئوتکنیکی در ساختگاه سد سمیلان (الف) لوژون، (ب) شاخص کیفی سنگ

می شود. امتیاز این روش در این است که فرآیند تخمین، مستقل از تابع توزیع داده‌ها است. برای انجام کریجینگ

در این روش کریجینگ احتمال آنکه عیار بلوک مورد تخمین، کوچک تر از عیار حد مفروض باشد تخمین زده

حد آستانه ۱۰، ۳۰ و ۶۰؛ ترسیم گردید (شکل ۷). هم‌چنان‌که در شکل ۷ دیده می‌شود، در قسمت الف مقادیر واقعی و تخمینی برای هر داده نمایش داده شده است و در قسمت ب نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و تخمینی لوژون نمایش داده شده است که بیشتر در مقادیر کم متمرکز شده‌اند.

در مرحله بعد، برای پارامتر شاخص کیفی سنگ کریجینگ متقابل صورت گرفت و مقادیر واقعی و تخمینی را با در نظر گرفتن دو حد آستانه ۴۰ و ۷۰ ترسیم گردید (شکل ۸). هم‌چنان‌که در شکل ۸ دیده می‌شود، در قسمت الف مقادیر واقعی و تخمینی برای هر داده نمایش داده شده است و در قسمت ب نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و تخمینی شاخص کیفی سنگ نمایش داده شده است که بیشتر در مقادیر زیاد متمرکز شده‌اند.

به منظور شاخص‌گذاری خطای تخمین، درصد تفاضل مقدار واقعی و تخمینی به مقدار واقعی برای پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ در رابطه ۹ محاسبه شده و میانگین آن محاسبه شد.

$$ER_{Lu}(\%) = \left| \frac{Z_{Lu} - Z_{Lu}^*}{Z_{Lu}} \right| \times 100 \quad (9)$$

$$ER_{RQD}(\%) = \left| \frac{Z_{RQD} - Z_{RQD}^*}{Z_{RQD}} \right| \times 100$$

$$ER_{Average}(\%) = \frac{ER_{RQD}(\%) + ER_{Lu}(\%)}{2}$$

مرحله بعد، تعیین حدود آستانه است که در این مطالعه سه حد آستانه ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ قسمت د بر اساس تابع شاخص، خطای میانگین تخمین پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ ترسیم شده است.

(۱۰)

$$C_i(ER(\%)) = \begin{cases} 1, \text{if } Z(ER(\%)) \leq 25\% \\ 2, \text{if } 25\% < Z(ER(\%)) \leq 50\% \\ 3, \text{if } 50\% < Z(ER(\%)) \leq 75\% \\ 4, \text{if } Z(ER(\%)) > 75\% \end{cases}$$

شاخص لازم است حد آستانه در نظر گرفته شود (Z_C) و سپس با استفاده از تابع دو ضابطه‌ای زیر داده‌ها تبدیل شوند. در این حالت مقدار تخمینی متغیر شاخص در هر نقطه به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$\hat{i}_k(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j \hat{i}_k(x_j) \quad (8)$$

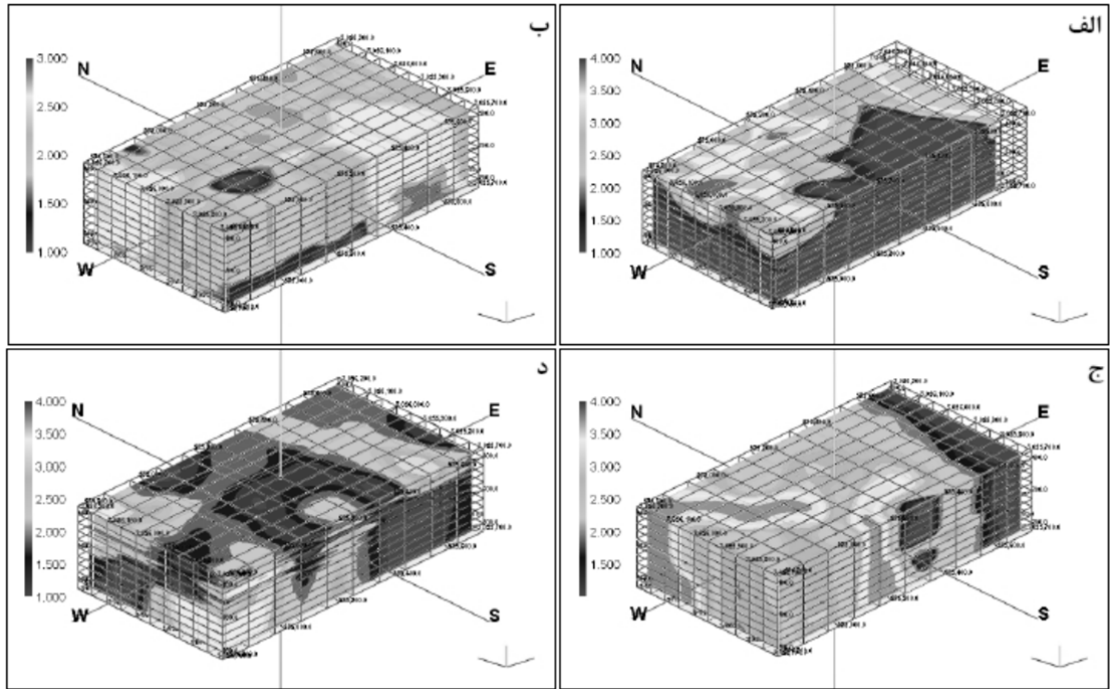
که در آن $i_k(x_j)$ مقدار شاخص نمونه k ام به مختصات X_j و λ_j وزن کریجینگ شاخص برای نمونه به مختصات X_j است که در تخمین نقطه X_0 شرکت می‌کند.

با استفاده از نتایج کریجینگ شاخص می‌توان نقشه احتمال پیدایش مقادیر بزرگتر یا مساوی یک حد آستانه یا چند حد آستانه مشخص را رسم کرد. در مطالعه حاضر، بر اساس تعریف توابع شاخص، کریجینگ شاخص پارامترهای لوژون برای چهار شاخص و شاخص کیفی سنگ برای سه شاخص در شکل ۶ قسمت الف و ب ترسیم شد و بر اساس تعریف تابع شاخص سازه‌های مختلف سد بر اساس درجه اهمیت سازه‌های سد برای چهار شاخص در شکل ۶ قسمت ج ترسیم شد.

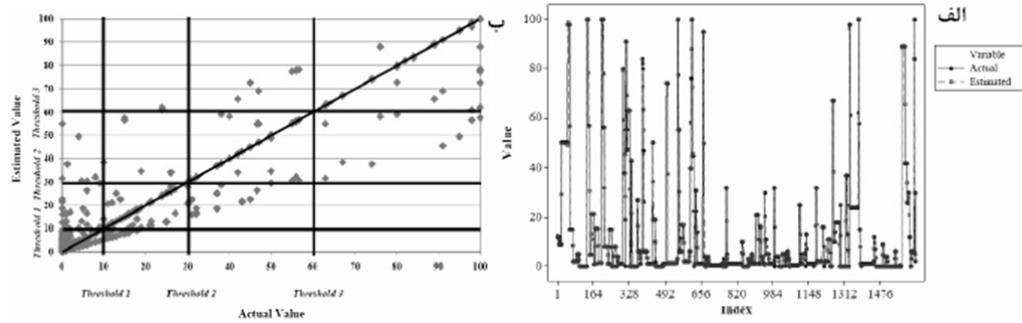
شاخص‌گذاری خطای تخمین

در این روش از کریجینگ متقابل استفاده می‌شود به گونه‌ای که از مقایسه مقادیر واقعی Z و مقادیر تخمین زده شده Z^* به دست می‌آید. در صورتی که تخمین‌گر نارایب باشد، نمودار پراکندگی مقادیر واقعی به تخمینی، بر روی یک خط ۴۵ درجه ترسیم می‌شوند و در حالت کلی در اطراف خط ۴۵ درجه پراکنده می‌شوند. نسبت خطای تخمین ایزاری مناسب برای نمایش دقت کار و میزان داده‌های موجود در منطقه است. در مناطقی که خطای تخمین زیاد باشد و مقدار واقعی با مقدار تخمینی تفاوت فاحشی داشته باشد، نمایانگر کمبود چگالی داده‌ها و نمونه‌ها برای تخمین است (Blackwell, 1998).

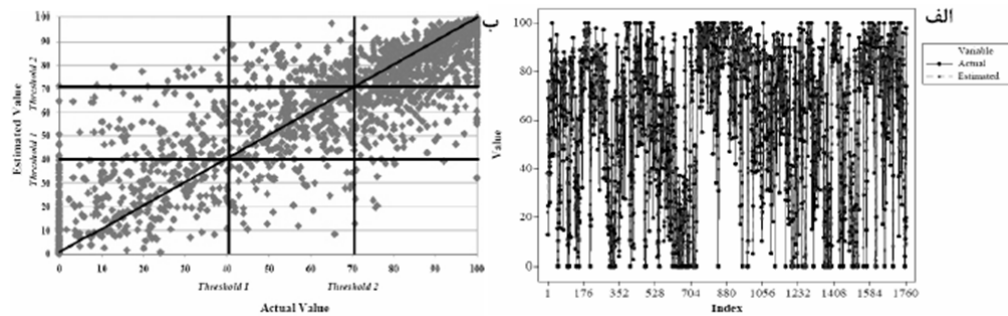
در مطالعه حاضر، ابتدا برای پارامتر لوژون، کریجینگ متقابل انجام شد و مقادیر واقعی و تخمینی؛ با در نظر گرفتن سه



شکل ۶- الف) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات لوژون، ب) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات RQD، ج) نمایش کریجینگ شاخص، شاخص سازه‌های مختلف سد، د) نمایش مقدار شاخص خطای تخمین میانگین RQD و لوژون



شکل ۷- الف) مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی پارامتر لوژون، ب) نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و تخمینی پارامتر لوژون بر اساس حدود آستانه، در ساختگاه سد سمیلان



شکل ۸- الف) مقایسه مقادیر واقعی و تخمینی پارامتر شاخص کیفی سنگ، ب) نمودار پراکندگی مقادیر واقعی و تخمینی پارامتر شاخص کیفی سنگ بر اساس حدود آستانه، در ساختگاه سد سمیلان

روش پیشنهادی برای تعیین محل حفاری‌های اضافه

در بررسی حاضر، تابع شاخص پارامترهای شاخص کیفی سنگ، لوژون و شاخص سازه‌های مختلف سد، بر اساس حدود آستانه تعریف شد؛ پارامترهای مورد نظر واریوگرافی گردید و خصوصیات مدل واریوگرام آن استخراج شد. سپس با استفاده از تخمین کریجینگ، شاخص در تمام قسمت‌های مورد بررسی مقادیر تخمینی شاخص کیفی سنگ، لوژون و شاخص سازه‌های مختلف سد به دست آمد. یکی از برتری‌های تخمین‌های زمین آماری از جمله کریجینگ، نسبت به دیگر تخمین‌گرها، نمایش توزیع خطا در فضای تخمین است. توزیع خطای تخمین نمایان‌گر محل‌هایی با کمبود اطلاعات است.

برای افزایش دقت و جامع بودن این مطالعه از پارامترهای ژئوتکنیکی موثر در تخمین زمین آماری (مقدار لوژون و RQD)، برای تعریف تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه استفاده شده است. بنابراین باید منابع افزایش ریسک و عدم قطعیت در این دو پارامتر ژئوتکنیکی و شاخص سازه‌های مختلف سد را بررسی نمود. مناطقی که لوژون آن دارای مقادیر بیشتری است، به علت مقدار تراوایی و آبگذری بیشتر و محیط درزدار، دارای ریسک و عدم قطعیت بالاتری هستند. مناطقی که دارای مقایر RQD کم‌تری هستند به معنی زون‌های خرد شده و دارای مقاومت پایینی هستند که طراحی سد بر روی این مناطق دارای ریسک بالاتری است. مناطقی که شاخص سازه‌های مختلف سد دارای مقادیر بیشتری است، به علت میزان اهمیت و اطلاعات مورد نیاز در طراحی، دارای ریسک و عدم قطعیت بالاتری هستند. میانگین خطای تخمین پارامترهای ژئوتکنیکی، شاخص مناسبی برای شناخت مناطقی با کمبود اطلاعات است، بنابراین انتخاب مناطقی با بیشینه خطای تخمین، یک راهبرد مناسب برای کاهش عدم قطعیت می‌باشد. بنابراین بر اساس این راهبرد می‌بایست تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه را تعریف کرد. در این حالت تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه عبارتست از: حاصل ضرب مقدار کریجینگ شاخص لوژون در مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد در شاخص

خطای تخمین تقسیم بر مقدار کریجینگ شاخص خصوصیت کیفی سنگ که در رابطه ۱۱ نمایش داده شده است.

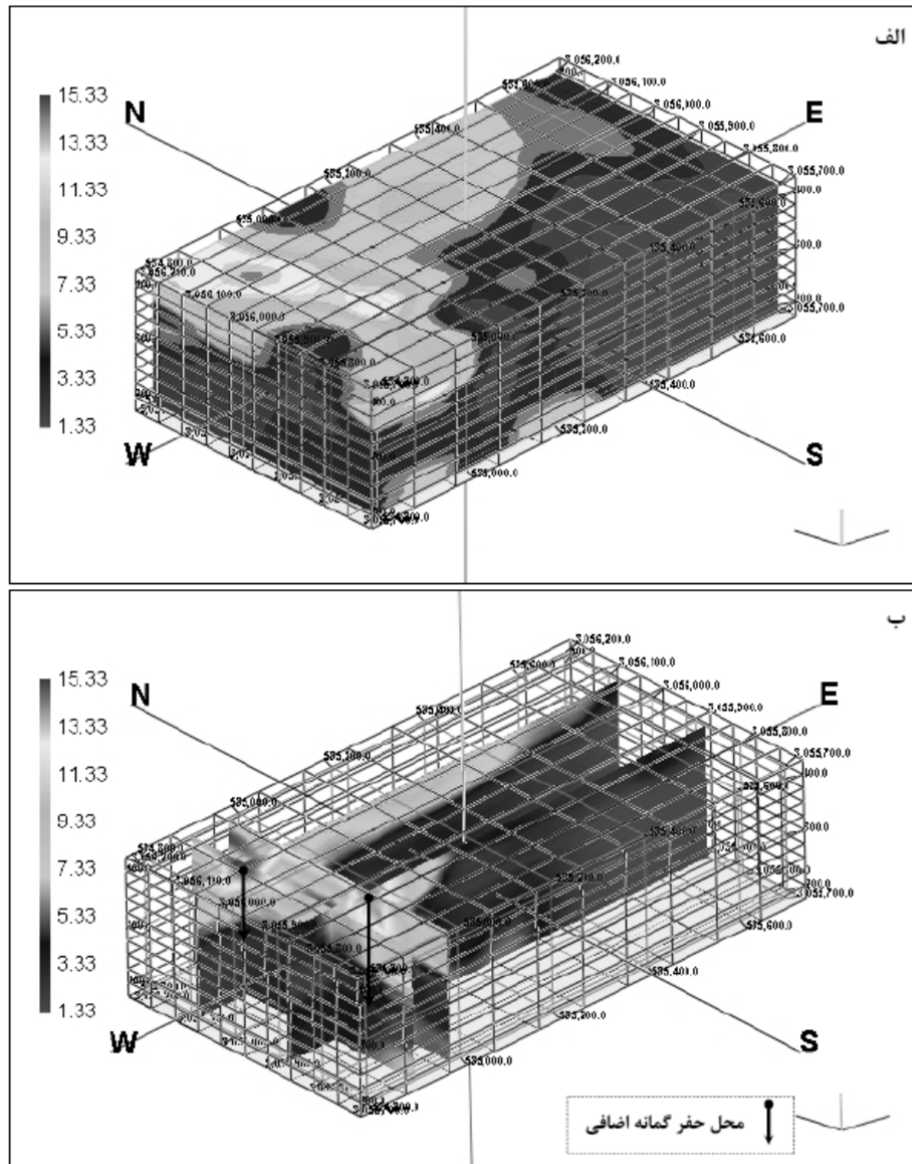
$$\text{Function} = \frac{I(Lu)^\alpha \times I(ER_{AV})^\beta \times I(SI)^\gamma}{I(RQD)^\delta} \quad (11)$$

که در آن $I(Lu)$ = مقدار کریجینگ شاخص لوژون، $I(ER_{AV})$ = شاخص خطای تخمین، $I(SI)$ = مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد، $I(RQD)$ = مقدار کریجینگ شاخص کیفی سنگ و $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ ضرائب توانی تابع است. در بررسی حاضر برای سادگی، ضرائب توانی تابع برابر یک در نظر گرفته می‌شود. اما در مواردی که یکی از مؤلفه‌های تابع دارای اهمیت بیش‌تری باشد، ضریب توانی بیش‌تری می‌پذیرد (Hassanipak & Sharafodin, 2004).

با تعیین تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه در منطقه و ترسیم آن، می‌توان مناطق با مقادیر بالای این تابع را به عنوان گزینه‌های حفاری اضافی، انتخاب نمود که دونقطه مقادیر بیشینه تابع مذکور را دارا هستند. دو گمانه به منظور حفاری در نقاط بیشینه پیشنهاد می‌شود که در شکل ۹ الف و ب نمایش داده شده است.

دو گمانه به عنوان حفاری تکمیلی پیشنهاد داده شد که در دو طرف بدنه سد قرار گرفته و نزدیک به تونل‌های سمت چپ و راست هستند. در شکل ۱۰ سعی شده نحوه آرایش دو گمانه بین گمانه‌های قبلی نمایش داده شود.

تعداد و موقعیت گمانه‌ها ابزاری لازم برای کاهش ریسک و عدم قطعیت است. در این مطالعه، چهار حالت برای حفاری گمانه‌ها در نظر گرفته شده است. در حالت اول (مرحله صفر)، فرض شده است که تعداد گمانه‌ها بسیار کم باشد و خطا بالای ۷۵٪ است، در حالت دوم (مرحله یک)، فرض شده است که گمانه‌ها بر اساس طراحی اولیه ۲۷ گمانه‌ای باشد که خطا بین ۲۵٪ تا ۵۰٪ است که این خطا با افزودن دو گمانه در حالت سوم (مرحله دو) کاهش قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد. در حالت چهارم (مرحله سه) با افزودن قابل ملاحظه گمانه، خطا به زیر ۲۵٪ تقلیل می‌یابد.

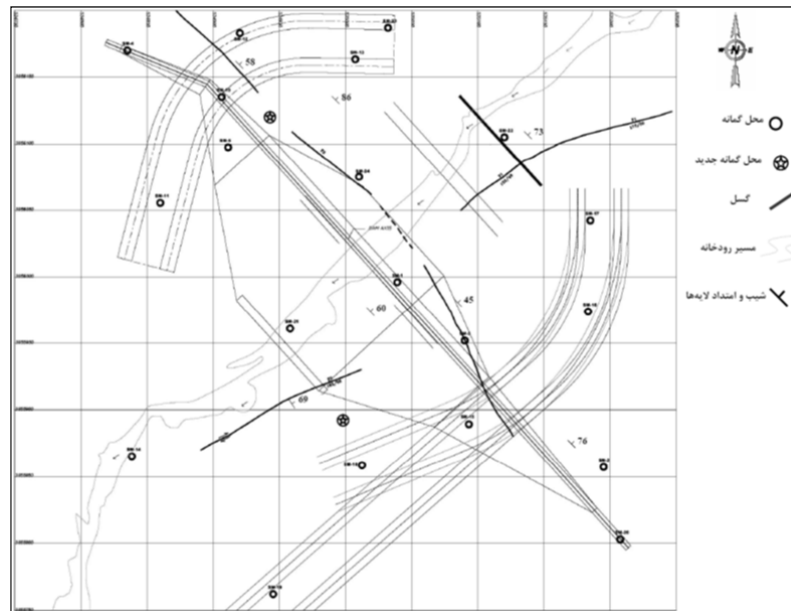


شکل ۹. الف) نمایش سه بعدی تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، ب) نمایش محل گمانه‌های اضافی مورد نیاز، بر اساس مقاطع در ساختگاه سد سمیلان

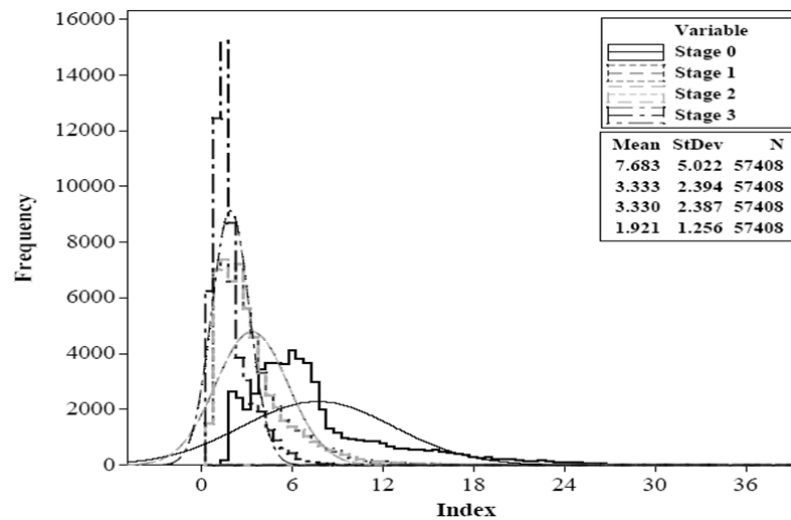
نتیجه گیری

۱- کریجینگ شاخص به‌عنوان یک روش ناپارامتری بر اساس توابع شاخص و حدود آستانه تخمین زده می‌شود و نیازمند تعیین توزیع داده‌های اولیه نمی‌باشد.
 ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ)، به همراه اهمیت سازه‌های مختلف سد مورد مطالعه قرار گرفت و بر اساس توابع شاخص‌گذاری، پارامتر لوژون به چهار شاخص، پارامتر شاخص کیفی سنگ به سه شاخص و سازه‌های مختلف سد به چهار شاخص تقسیم شدند.

توزیع فراوانی تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه با تکمیل مراحل با کاهش میانگین و انحراف معیار تابع همراه است. از مرحله صفر به یک، به علت افزایش قابل ملاحظه گمانه‌ها، کاهش خطا چشمگیر است، در حالی که از مرحله یک به دو، به علت این‌که تنها دو گمانه افزوده شده است، خطا کاهش چندانی نداشته است. شایان ذکر است که تأثیر گمانه‌های اولیه بر کاهش خطای تخمین بسیار بیش‌تر از گمانه‌های بعدی است (شکل ۱۱).



شکل ۱۰- نمایش دو گمانه جدید در بین آرایش گمانه‌های مرحله قبل



شکل ۱۱- نمایش فراوانی تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه با افزایش تعداد حفاری‌ها، در ساختگاه سد سمیلان

شاخص خطای تخمین تقسیم بر مقدار کریجینگ شاخص خصوصیت کیفی سنگ تعریف شد.

$$Function = \frac{I(Lu)^{\alpha} \times I(ER_{AV})^{\beta} \times I(SI)^{\gamma}}{I(RQD)^{\delta}}$$

۵- بر اساس تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، دو گمانه اضافی برای تکمیل حفاری‌های فاز اول پیشنهاد شد. تأثیر حفر گمانه‌های اضافی بر کاهش خطای تخمین در مراحل اولیه فرآیند اکتشاف (با تعداد گمانه‌های کم‌تر) به مراتب بیش‌تر از این دو گمانه است.

۳- بر اساس میانگین خطای تخمین کریجینگ پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ براساس حدود آستانه ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ به چهار شاخص تقسیم شد که این پارامتر، نمایانگر پراکندگی داده‌ها در منطقه است.

۴- تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه بر اساس پیشینه‌سازی شاخص‌های لوژون، میانگین خطای تخمین و سازه‌های مختلف سد و کمپنه‌سازی شاخص کیفی سنگ صورت گرفت و به صورت حاصل ضرب مقدار کریجینگ شاخص لوژون در مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد در

منابع

- Blackwell G. (1998) Relative kriging errors: a basis for mineral resource classification. *Exploration Mining Geology*, No. 7, p. 99-105.
- Clayton C.R., Matthews M.C., Simons N.E. (1995) *Site investigation: a handbook for engineers*. Blackwell, Oxford.
- Gossage B. (1998) The application of indicator kriging in the modeling of geological data. *Proceedings of a one day symposium: Beyond ordinary kriging*. October 30th, Perth Western Australia. Geostatistical Association of Australasia.
- Hassanipak A.A., Sharafodin M. (2004) GET: a function for preferential site selection of additional borehole drilling, *Exploration and Mining Geology*, No. 13(1-4), pp. 139 - 146.
- Knudsen H. P., Baafi, E.Y. (1987) Indicator kriging and other new geostatistical tools. *Proceedings of the Pacific Rim Congress*, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, pp. 859-864.
- Myers J.C. (1997). *Geostatistical Error Management: Quantifying Uncertainty for Environmental Sampling and Mapping*, New York: Van Nostrand Reinhold.
- Webster R., Margaret A. (2007) *Geostatistics for environmental scientists*, Wiley .
- Wingle W.L. (1997) *Evaluating subsurface uncertainty using modified geostatistical techniques*, PhD thesis of Geological Engineering, Colorado School of Mines.