

## طراحی مرحله‌ای شبکه نمونه‌برداری، بر اساس پارامترهای ژئوتکنیکی و خصوصیات کیفی ساختگاه سد سمیلان، با استفاده از کریجینگ و شبکه عصبی

امین حسین مرشدی<sup>۱</sup>؛ حسین معاریان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، morshedy82@gmail.com

۲- استاد دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی معدن، memarian@ut.ac.ir

(دریافت ۱۲ آذر ۱۳۸۸، پذیرش ۱۷ خرداد ۱۳۸۹)

### چکیده

از مهم‌ترین مراحل طراحی شبکه اکتشافات ژئوتکنیکی، تعیین تعداد و موقعیت گمانه‌های اکتشافی است، که به‌منظور کسب اطلاعات و نمونه‌برداری، حفر می‌شوند. یکی از مسائل چالش برانگیز در نمونه‌برداری، تعیین تعداد و موقعیت نمونه‌ها است. منطق طراحی نمونه‌برداری بهینه، منطق نمونه‌برداری مرحله‌ای است. در این بررسی، به مقایسه نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و چند مرحله‌ای در ساختگاه سد سمیلان، پرداخته شده است. در مرحله اول، نمونه‌برداری تک مرحله‌ای، با استفاده از اطلاعات ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ) ۲۳ گمانه، و با به کارگیری تابع شاخص، مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس تابع شاخص، پارامتر لوژون به چهار شاخص و شاخص کیفی به سه شاخص طبقه‌بندی شد. از دیگر کاربردهای تابع شاخص، تبدیل داده‌های کیفی به کمی است که به‌منظور شاخص گذاری درجه اهمیت سازه‌های مختلف ساختگاه سد سمیلان و سنگ‌شناسی منطقه، مورد استفاده قرار گرفت. سپس، بر اساس توابع شاخص، واریوگرافی در جهات مختلف انجام شده و با استفاده از پارامترهای واریوگرام، کریجینگ شاخص انجام شد. واریانس کریجینگ برای پارامترهای لوژون، شاخص کیفی سنگ و شاخص سنگ‌شناسی منطقه محاسبه و میانگین‌گیری و سپس به چهار شاخص تقسیم شد. به این ترتیب، تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، بر اساس رابطه هر یک از پارامترها با ریسک و خطای طراحی، تعریف شد. این تابع عبارتست از: حاصلضرب مقدار کریجینگ شاخص لوژون در مقدار شاخص اهمیت سازه‌های مختلف سد در شاخص خطای تخمین؛ تقسیم بر حاصلضرب مقدار کریجینگ شاخص خصوصیت کیفی سنگ در شاخص سنگ‌شناسی منطقه.

در ادامه بررسی‌ها، از نمونه‌برداری دو مرحله‌ای استفاده شد که در مرحله اول، تعداد ۱۲ گمانه از ۲۳ گمانه، بر اساس چگالی نمونه‌ها، انتخاب شدند. در اینجا نیز تمام مراحل قبل تکرار شد و طبق تابع شاخص تعیین محل حفاری‌های اضافه، تعداد ۸ گمانه برای مرحله دوم انتخاب شد. بر اساس تخمین‌گرهای کریجینگ و شبکه عصبی، با استفاده از مقادیر نرمال شده، پارامترهای مورد نظر تخمین زده شد و تمام مراحل قبل تکرار گردید. در بررسی حاضر، واریانس کریجینگ و خطای تخمین در حالت دو مرحله‌ای نسبت به تک مرحله‌ای کاهش یافته؛ با وجود آنکه تعداد گمانه‌ها از ۲۳ عدد به ۲۰ عدد کاهش یافته است. عامل مهم در کاهش خطای تخمین، نحوه آرایش گمانه‌های مرحله اول، در بین گمانه‌های مرحله دوم بوده است.

### کلمات کلیدی

راهبرد نمونه‌برداری، تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، واریانس کریجینگ، شاخص گذاری، شبکه عصبی، سد سمیلان

\* نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات

## ۱- مقدمه

برای افزایش کیفیت داده‌ها و کاهش هزینه‌ها در اغلب موارد نمونه‌برداری‌های چند مرحله‌ای توصیه می‌شود. در طراحی پروژه نمونه‌برداری چند مرحله‌ای لازم است تعداد مراحل مورد نیاز و تعداد نمونه‌ها در هر مرحله، و راهبرد نمونه‌برداری برای هر مرحله، مشخص شود. در عملیات اکتشافی می‌بایست از سمت داده‌های کم به سمت داده‌های زیاد پیش رفته و عملیات را مرحله به مرحله انجام داد؛ بدون اینکه نتایج مراحل اولیه ناسازگار با نتایج عملیات بعدی باشد. بدیهی است در مراحل اولیه دقت محاسبات و تخمین‌ها کمتر از مراحل بعدی است و با پیشرفت عملیات، دقت تخمین افزایش می‌یابد. حال باید روشی را برای تعیین تعداد بهینه مراحل و تعداد نمونه‌ها در هر یک از مراحل ارائه کرد [۱].

برای تخمین پارامترهای نمونه‌برداری شده، ابتدا از شاخص گذاری استفاده می‌شود. تعیین شاخص<sup>۱</sup> در اکثر مواقع به منظور طبقه بندی داده‌ها، و در بعضی موارد به منظور تبدیل داده‌ها از حالت کیفی به کمی، به کار می‌رود. روش‌های تخمین بر پایه شاخص گذاری، احتمال مقادیر کمتر یا بیشتر از حد آستانه<sup>۲</sup> را محاسبه می‌کنند. تعداد حدهای آستانه برابر با تعداد شاخص‌ها منهای یک است. هدف اصلی نیز محاسبه احتمال رخداد برای هر یک از شاخص‌ها (کلاس‌ها) است. یکی از کاربردهای شاخص گذاری در زمینه تخمین‌های زمین‌آماري (کریجینگ) است. کریجینگ شاخص<sup>۳</sup> یک روش تخمین غیرخطی است و بر اساس تابع شاخص گذاری و واریوگرام شاخص انجام می‌شود و مستقل از تابع توزیع است [۲]. در مقاله حاضر، کاهش عدم قطعیت و ریسک ناشی از نمونه‌برداری مرحله‌ای، مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، بر اساس طراحی نمونه تک مرحله‌ای با ۲۳ گمانه به مطالعه نحوه شاخص گذاری پارامترهای ژئوتکنیکی (شاخص کیفی سنگ و لوژون)، واریانس تخمین کریجینگ، سنگ شناسی منطقه و سازه‌های مختلف سد سمیلان پرداخته شده است. در مرحله بعد با طراحی دو مرحله‌ای، که مرحله اول شامل ۱۲ گمانه است، و بر اساس اطلاعات گمانه‌های مرحله اول، تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه صورت گرفت و بر اساس آن ۸ گمانه اضافی برای مرحله دوم پیشنهاد شده است.

## ۲- ساختگاه مورد مطالعه

ساختگاه سد سمیلان در جنوب ایران و در شهرستان رودان استان هرمزگان واقع شده است. با در نظر گرفتن شرایط ریخت‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی گستره طرح، ساختگاه

سد در ۲/۵ کیلومتری پایین دست پیوستگاه رودخانه‌های کندر و دزدی، با مختصات "۱۹' ۲۱' ۵۷" طول خاوری و "۴۱' ۳۷' ۲۷" عرض شمالی، انتخاب شده است.

محدوده ساختگاه در مجموعه سنگ‌های دگرگونی بچگان 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، سنگ پی 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 به نامهای F1 و F2، که 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. این گسل دارای شیب حدود ۵۰ درجه به سمت جنوب شرقی است. گسل F2 از نوع امتداد لغز و چپگرد است و 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 گسل عادی است. در شکل ۱ موقعیت گسل‌های منطقه، محل گمانه‌ها و سازه‌های مختلف سد نمایش داده شده است [۳].

## ۳- راهبرد نمونه‌برداری

به منظور بهینه سازی نمونه‌برداری لازم است به مواردی چون تعداد نمونه‌های لازم برای دستیابی به خطای مجاز در سطح اعتماد معین، نحوه توزیع (محل و موقعیت) نمونه‌ها در فضای واحد نمونه‌برداری، و بزرگی (جرم) نمونه‌ها، توجه کرد. از آنجا که طراحی نمونه‌برداری، به منظور دستیابی به سطح اعتماد معین، نیاز به داشتن اطلاعات کافی در زمینه نحوه تغییر پذیری در واحد نمونه‌برداری دارد، لذا بدون اطلاع از طبیعت تغییرپذیری نمونه‌ها، به سختی می‌توان به طراحی نمونه‌برداری پرداخت. از این رو باید با تکیه بر مشاهدات و تغییر پذیری‌های بزرگ مقیاس در واحد نمونه‌برداری، به طراحی اولیه برای برداشت نمونه‌های مرحله اول، پرداخت. سپس، با استفاده از داده‌های حاصل از آن‌ها، و تخمین تغییر پذیری و شناخت توزیع فضایی متغیر، به طراحی مرحله بعد اندیشید. این توالی را باید تا دستیابی به دقت از پیش تعیین یافته، ادامه داد [۴].

واضح است که افزایش تعداد نمونه‌ها باعث تخمین دقیق‌تر از روی اجزای آن می‌شود. بنابراین باید بین خطای قابل قبول و

خطای تصمیم‌گیری است، که توسط خطای تخمین صورت می‌پذیرد.

۷. طراحی بهینه روش به‌دست آوردن داده‌ها: که با استفاده از تابع تعیین محل حفاری‌های اضافی، محقق می‌شود.

بنابراین، منطق طراحی نمونه‌برداری بهینه، نوعی منطق مرحله‌ای<sup>۵</sup> است. خلاصه اینکه، برای دستیابی به اطلاعات دقیق در مورد ویژگی‌های زمین آماری واحد نمونه‌برداری، باید عملیات نمونه‌برداری به‌صورت مرحله‌ای، انجام شود. روش مرحله‌ای بر این اصل استوار است که نمونه‌برداری از یک واحد باید در دو یا چند مرحله صورت پذیرد و داده‌های حاصل از هر مرحله اساس طراحی مرحله بعد را تشکیل دهد. در این روش، با انجام هر مرحله، شناخت از محیط نمونه‌برداری افزایش می‌یابد و در نتیجه می‌توان عملیات را فقط در نقاطی متمرکز کرد که تغییر پذیری در اطراف آن نقاط بیشتر است، و برای تخمین در یک سطح اعتماد معین به‌برداشت نمونه‌های بیشتری نیاز می‌باشد. بدیهی است که منطق این روش با نوعی بهینه‌سازی همراه است.

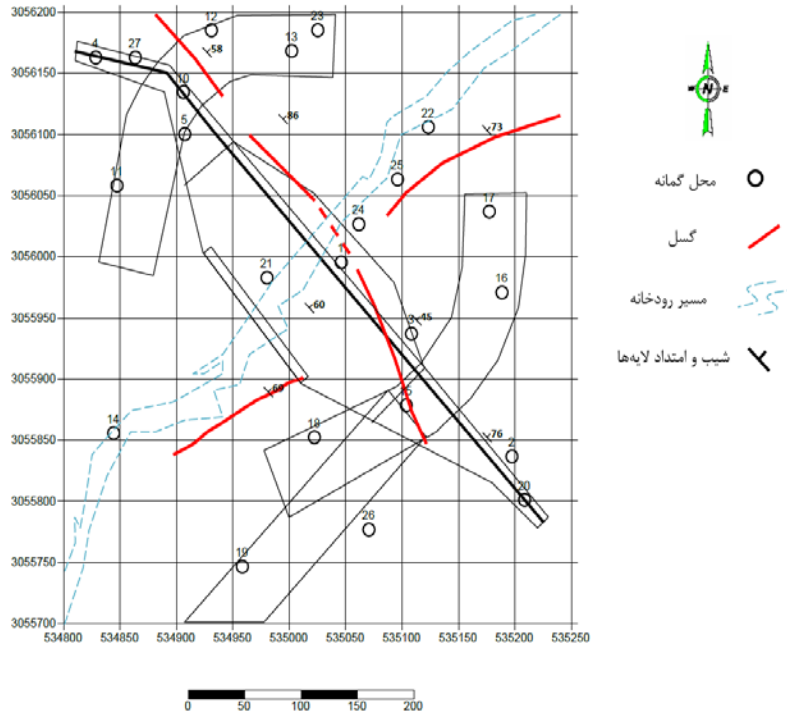
#### ۴- داده‌های مورد بررسی

تعداد گمانه‌های حفاری شده در ساختگاه مورد بررسی ۲۳ عدد است که به‌صورت شبکه‌ای نامنظم، توزیع شده اند (شکل ۱). شبکه نمونه‌برداری در قسمت جنوب غربی و شمال شرق منطقه چگال‌تر است و بقیه گمانه‌ها در قسمت مرکزی و جنوب ساختگاه مورد مطالعه، حفاری شده‌اند. تمام گمانه‌ها به‌صورت قائم حفاری شده‌اند و عمق گمانه‌ها بین ۲۵ تا ۱۲۰ متر، متغیر است. اکثر گمانه‌ها در موقعیت‌های محور و تکیه گاه‌های سد طراحی شده است. برای آگاهی از شرایط زیرسطحی، در تمامی گمانه‌های حفرشده آزمایش‌های درون‌چاهی؛ از جمله نفوذپذیری به‌روش‌های لوژون و لوفران و نفوذ استاندارد به‌روش 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، مقادیر RQD و لوژون به‌عنوان پارامترهای ژئوتکنیکی سنگ، در تعیین محل بهینه حفاری‌های جدید، استفاده می‌شود [۶]. خصوصیات آماری و نمودار ستونی پارامترهای لوژون و RQD در ساختگاه مورد بررسی، در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است.

ریسک ناشی از آن، و هزینه‌های نمونه‌برداری، تعادل برقرار کرد. در نمونه‌برداری، هزینه‌های مرتبط با گردآوری داده‌ها، باید بهینه شود. بدین جهت باید از جمع‌آوری داده‌های غیر ضروری، تکراری و یا داده‌هایی که دقت را بیش از حد لازم بالا می‌برند، پرهیز کرد. در اجرای این دیدگاه، کارشناسان مدیریت تضمین کیفیت، به ابزاری مجهزند که اصطلاحاً هدف مندی کیفیت داده‌ها<sup>۴</sup> (DQO) نامیده می‌شود. هدف مندی کیفیت داده‌ها به‌مجموعه ملاک‌هایی گفته می‌شود که بر اساس آن بتوان تصمیم‌گیری نظام‌دار را، به‌منظور طراحی روش صحیح جمع‌آوری داده‌ها و تضمین کیفیت لازم، به انجام رساند. روش DQO گزاره‌های کمی و کیفی هستند و بعد از انجام فرآیند باید از قابلیت‌های چندی برخوردار باشند: از جمله، اهداف پروژه را مشخص کنند، مناسب‌ترین نوع داده‌هایی را که باید جمع‌آوری شوند، معرفی کنند، مناسب‌ترین شرایط جمع‌آوری داده‌ها را مشخص کنند، و بالاخره دامنه تغییرپذیری مجاز خطای تصمیم‌گیری را تعیین کنند [۵].

هدف مندی کیفیت داده‌ها دارای هفت مرحله است. در شش مرحله اول، ملاک‌های تصمیم‌گیری برای استفاده از آن‌ها در طراحی مناسب جمع‌آوری اطلاعات، تولید می‌شود. مرحله آخر، مرحله بهینه‌سازی طراحی، با توجه به محدودیت‌های زمانی و بودجه است. هفت مرحله DQO مرتبط با این مطالعه به‌شرح زیر است:

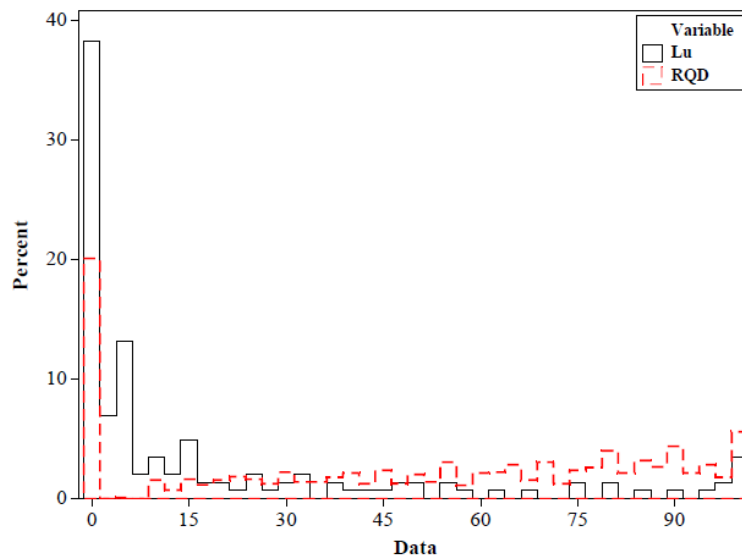
۱. تشریح مسئله: که مرتبط با طراحی نمونه‌برداری بهینه است.
۲. مشخص کردن هدف بررسی: که بهینه‌سازی تعداد و موقعیت گمانه‌های اکتشافی ژئوتکنیکی است.
۳. معرفی ورودی‌ها برای پاسخ به گزاره‌های تصمیم‌گیری: که شامل پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ)، شاخص اهمیت سازه‌های مختلف ساختگاه سد سمیلان، شاخص سنگ شناسی و خطای کریجینگ است و بر اساس تعریف تابع شاخص مورد استفاده قرار می‌گیرد.
۴. شناسایی مرزهای زمانی و مکانی مسئله: در این مرحله مرزهای زمانی و مکانی مربوط به نمونه‌برداری و همچنین مقیاس تصمیم‌گیری و تعداد مراحل نمونه‌برداری، مشخص می‌شود.
۵. بسط قواعد تصمیم‌گیری: که در مورد مطالعات آماری و حدود آستانه پارامترهای مورد مطالعه، صورت می‌پذیرد.
۶. تعیین اثر دامنه تغییرپذیری: هدف این مرحله، تعیین حدود تغییرپذیری پارامترهای موثر در تصمیم‌گیری در



شکل ۱: نقشه خلاصه شده موقعیت سد سمیلان و شبکه گمانه های اکتشافی

جدول ۱: خصوصیات آماری مربوط به پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ

| پارامتر | تعداد | بیشینه | کمینه | میانگین | نما(مد) | میانه | انحراف معیار | چولگی | کشدگی | %۲۵ | %۵۰  | %۷۵   |
|---------|-------|--------|-------|---------|---------|-------|--------------|-------|-------|-----|------|-------|
| Lu      | ۱۴۴   | ۱۰۰    | ۰     | ۱۷/۸۸   | ۰       | ۴/۸۵  | ۲۷/۷۱        | ۱/۸۴  | ۲/۳۲  | ۰/۴ | ۴/۸۵ | ۲۳/۳۵ |
| RQD     | ۱۳۴۴  | ۱۰۰    | ۰     | ۵۱/۵۰   | ۰       | ۵۷    | ۳۴/۹۱        | -۰/۲۴ | -۱/۳۶ | ۱۹  | ۵۷   | ۸۳    |



شکل ۲: نمایش توزیع آماری پارامتر لوژون و شاخص کیفی سنگ

### ۵- نحوه شاخص گذاری

شاخص گذاری، برای تقسیم‌بندی داده‌ها، بر اساس حدود آستانه، به کار می‌رود. زمانی که داده‌ها دارای حد بالا و پایین معینی باشد، تابع تصادفی را می‌توان بر اساس مقادیر حداکثر و حداقل دامنه، تعیین نموده؛ و از روی تعداد شاخص‌ها، حدود آستانه را تعیین کرد. برای حالتی که تعداد حدود آستانه  $K$  و تعداد شاخص‌ها برابر  $K+1$  باشد، تابع تصادفی به صورت زیر تعریف می‌شود [۷].

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

متغیر تصادفی  $Z(X)$  را می‌توان به تابع متغیر تصادفی شاخص  $I(X:Z_K)$ ، تبدیل نمود:

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

در صورتی که از تعداد شاخص‌های بیشتری استفاده شود، می‌توان معادله ۲ را به صورت معادله ۳ بسط داد، که گروه‌ها  $(C_i)$  معادل شاخص‌هایی است که با استفاده از حد آستانه مشخص می‌شود:

$$I(X:C) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(X) \leq Z_1 \\ 2, & \text{if } Z_1 < Z(X) \leq Z_2 \\ \dots & \\ K, & \text{if } Z_{K-1} < Z(X) \leq Z_K \\ K+1, & \text{if } Z(X) > Z_K \end{cases} \quad (3)$$

### ۵-۱- 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 ۱ تا ۵ متری انجام گردیده است. یک لوژون نماینده مقداری از نفوذ پذیری است که بر طبق آن در یک دقیقه یک لیتر آب تحت فشار  $0.98 \text{ Mpa}$  و از طریق یک گمانه یک متری در توده سنگ تزریق می‌شود. برای شاخص گذاری مقادیر لوژون، از سه حد آستانه ۱۰، ۳۰ و ۶۰ استفاده می‌شود که مجموعاً چهار شاخص را تشکیل می‌دهند (جدول ۲).

جدول ۲: 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 بجگان به‌عنوان سنگ بستر اصلی ساختگاه مطرح هستند. این‌گونه سنگ، به‌طور کلی از نفوذپذیری پایینی برخوردار است. در راستای محور سد و در تکیه‌گاه چپ، تراوایی 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 ژرفتر (۴۰ تا ۵۵ متری) در اکثر گمانه‌های حفر شده، تراوایی در رده متوسط تا بسیار زیاد است. برای قطعاتی که در عمق 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. 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.

### ۵-۲- شاخص گذاری پارامتر RQD

شاخص کیفی سنگ (RQD)، عبارت است از درصدی از کل مغزه بازیافت شده است که در آن قطعات سنگ طولی برابر با بیش از ده سانتی متر 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 گمانه ای که در امتداد محور سد، یا نزدیک به آن حفر شده‌اند؛ در ۲ گمانه واقع در ترازهای پایین‌تر، و با عمق‌های 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. این امر 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، با افزایش عمق به‌طور کلی بر مقدار میانگین شاخص کیفی افزوده شده است. در تکیه‌گاه راست در فاصله‌ای ۱۰ متری، که زونی خردشده را دربر می‌گیرد، شاخص کیفی افت شدیدی را نشان می‌دهد. در شکل ۲ توزیع فضایی مقادیر شاخص کیفی سنگ و لوژون در ساختگاه سد سمیلان، به‌نمایش درآمده است. به‌منظور شاخص گذاری خصوصیت کیفی سنگ، بر اساس حدود آستانه ۴۰ و ۷۰ سه شاخص می‌توان تعریف نمود (جدول ۳).

بررسی حاضر، بر اساس درجه اهمیت و حساسیت سازه‌های مختلف، شاخص‌گذاری 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؛ و مناطق اطراف بدنه سد، چون حوضچه آرامش و مخزن سد در درجه سوم اهمیت، در نظر گرفته شده است. 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. برای گمانه‌هایی که بین دو سازه با اهمیت متفاوت مشترک اند، شاخص دارای اهمیت بالاتر، در نظر گرفته شده است. به طور مثال، گمانه‌ای که بین بدنه سد و تونل انتقال آب مشترک بوده است، با درجه اهمیت زیاد (شاخص ۳) در نظر گرفته شده است (جدول ۴).

بر اساس شاخص‌گذاری سازه‌ها، گمانه‌های موجود، با توجه به اهمیتی که دارند، به چهار شاخص تقسیم شدند. گمانه‌های ۶، ۷، ۸ و ۹، که دارای اهمیت بسیار کم هستند و خارج از ساختگاه قرار دارند، مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. مناطق سه گانه با اهمیت بالاتر، در شکل ۴ نشان داده شده است (با شکل ۱ مقایسه شود).

جدول ۳: نحوه شاخص‌گذاری پارامتر شاخص کیفی سنگ

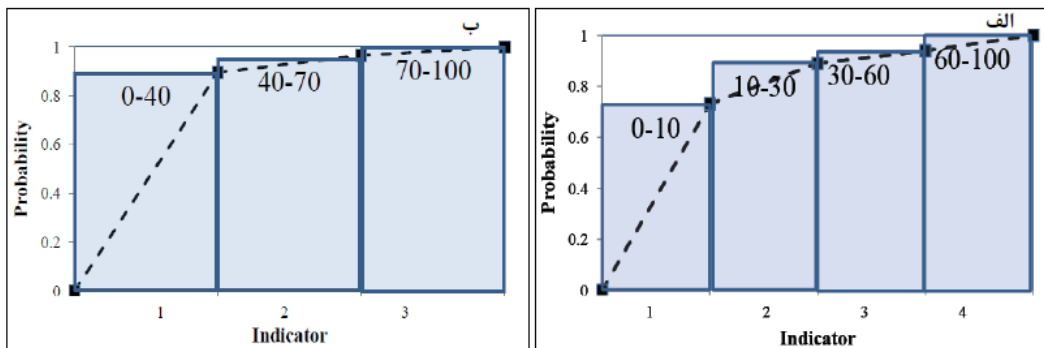
| شاخص | توصیف RQD | دامنه RQD |
|------|-----------|-----------|
| ۱    | کم        | ۰-۴۰      |
| ۲    | متوسط     | ۴۰-۷۰     |
| ۳    | زیاد      | ۷۰-۱۰۰    |

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 این مطالعه از تابع توزیع تجمعی تک متغیره<sup>۶</sup> (CDF) به جای تابع توزیع احتمال تک متغیره<sup>۷</sup> (PDF) استفاده می‌شود. تابع توزیع تجمعی تک متغیره، با جمع مولفه‌های تابع توزیع احتمال تک متغیره، به دست می‌آید.

### ۳-۵- شاخص‌گذاری اهمیت سازه‌ها

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



شکل ۳: نمایش تابع توزیع تجمعی احتمال رخداد هر شاخص پارامترهای ژئوتکنیکی (الف) لوژون، (ب) شاخص کیفی سنگ.

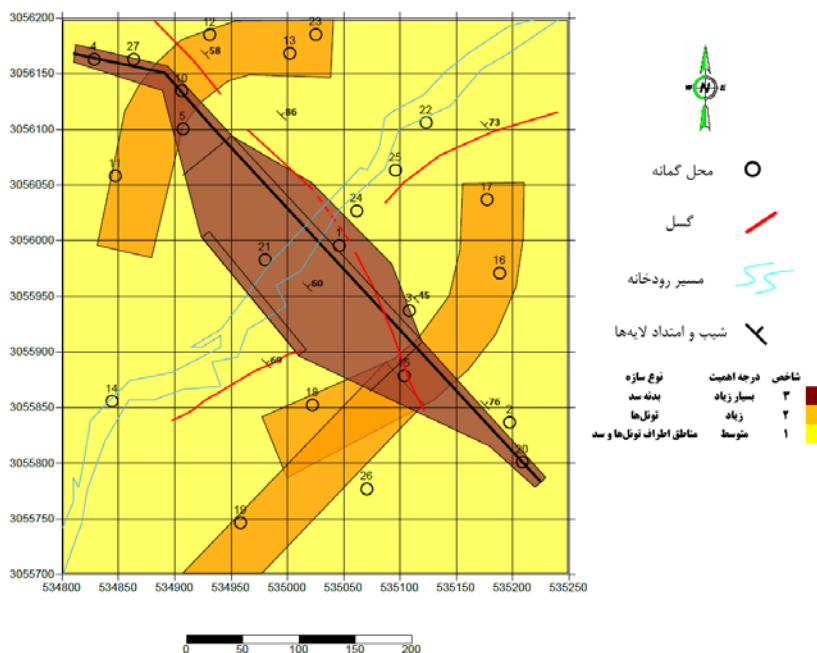
جدول ۴: نحوه شاخص‌گذاری، بر اساس سازه‌ها و قسمت‌های مختلف سد

| نوع سازه                 | درجه اهمیت | شاخص | گمانه‌ها                   |
|--------------------------|------------|------|----------------------------|
| بدنه سد                  | زیاد       | ۳    | ۱،۳،۴،۵،۱۰،۱۵،۲۰،۲۱،۲۲،۲۷  |
| تونل‌ها                  | متوسط      | ۲    | ۱۱،۱۲،۱۳،۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۳،۲۴ |
| مناطق اطراف تونل‌ها و سد | کم         | ۱    | ۲،۱۴،۲۵،۲۶                 |

در بستر رودخانه و واریزه‌های پوششی در دامنه‌ها دیده می‌شود (جدول ۵).

### ۴-۵- شاخص‌گذاری سنگ شناسی

محدوده ساختگاه در مجموعه دگرگونی بجگان قرار گرفته است. علاوه بر آن، نهشته‌های رودخانه‌ای و پادگانه‌های آبرفتی



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

## جدول ۵: چهار گروه اصلی سنگ‌های ساختگاه سد سمیلان [۳]

**شیست:** محدوده ساختگاه در درون مجموعه دگرگونی بچگان، که در مقیاس منطقه‌ای نیز از گسترش زیادی برخوردار است، واقع شده است. شیست‌های بچگان به‌عنوان سنگ بستر اصلی ساختگاه مطرح هستند. در محدوده محور، سنگ پی را شیست‌های پلیتی تشکیل می‌دهد که شامل نوارهای سبز تیره و رگه‌های شیری رنگ تا سفید می‌باشد. نوارهای تیره‌تر به لحاظ ترکیب از نوع میکا شیست، کلریت شیست و گرونا شیست می‌باشد. نوارهای شیری رنگ شامل رگه‌های نازک آهکی است که ضخامت آنها در مواردی به چند سانتی متر می‌رسد. هوازگی سطحی در توده سنگ، در بخش عمده‌ای از رخنمون‌های سنگی ساختگاه، از گسترش اندکی برخوردار است. از این رو، ضخامت واریزه‌های دامنه‌ای، که حاصل تخریب مکانیکی سنگ بستر است، ناچیز می‌باشد. در ترازهای بالای تکیه‌گاه چپ و نزدیک به محور سد، اثرات هوازگی در توده سنگ، به تغییرات رنگ ظاهری سنگ و کاهش پارامترهای مقاومتی سنگ منجر شده است. ترکیب چیره شیست‌های ساختگاه شامل آمفیبول- اپیدوت شیست، اپیدوت- کلریت شیست و کلریت شیست آهکی است. شایان ذکر است در واریزه‌های دامنه‌ای قطعات شیست حاوی گرونا نیز مشاهده شده است.

**متادایوریت:** در پی مرکزی ساختگاه، توده سنگ‌های آذرین با ترکیب درحد دیوریت، که آثار دگرگونی در آن مشهود است (متادایوریت)، دیده می‌شود. در این توده سنگ‌ها، ضمن حفظ بافت اولیه آذرین، نوعی جهت یافتگی حاصل از تاثیر فرآیند دگرگونی، دیده می‌شود. آثار این سیستم شبیه تورق، در مغزه‌های حفاری نیز مشهود است. این سنگ‌ها، در گمانه‌های حفاری شده در پی مرکزی، تا عمق نزدیک به ۳۰ متر مشاهده می‌شوند. این سنگ‌ها افزون بر رخنمون‌های کف دره، در برخی گمانه‌های تکیه‌گاه‌ها نیز دیده شده است.

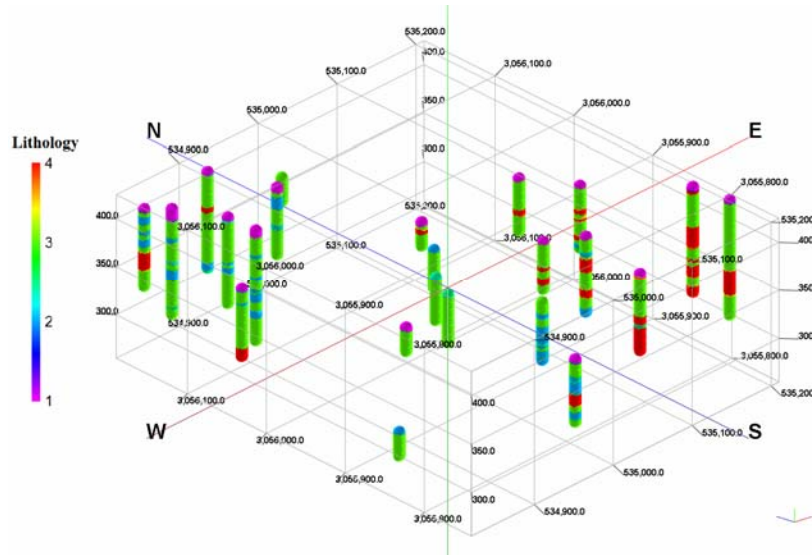
**کنگلوامرای چند آمیختگی:** گسترش این واحد، به ویژه در تکیه‌گاه چپ و به‌سوی بالادست، چشمگیر است. به طوری که بخش زیادی از گستره دریاچه در شاخه کندر را این واحد تشکیل می‌دهد. در محدوده دایک‌های تکیه‌گاه چپ، ضخامت این واحد در گمانه‌های اکتشافی، تا ۲۵ متر ثبت شده است. چون این واحد در پلیوسن، و در پی یک وقفه طولانی رسوبگذاری و برروی یک سطح فرسایشی، ایجاد شده است؛ سطح همبری آن با واحد بچگان بسیار ناهموار است و از این رو ضخامت آن بسیار متغیر می‌باشد. این کنگلوامرا از نوع چند آمیختگی<sup>۸</sup> است، که به‌طور عمده از خرده‌سنگ‌های دگرگونی با اندازه‌های گوناگون تشکیل شده است که باسیمان کربناته کاملاً سخت نشده به‌هم متصل شده‌اند.

**روپاره:** شامل پادگانه‌های آبرفتی، واریزه‌های دامنه‌ای و نهشته‌های آبرفتی و سیلابی است. پادگانه‌های آبرفتی، که از گسترش جانبی اندکی برخوردارند در بالادست محور و در ساحل راست رودخانه با اختلاف تراز نزدیک به ۵ متر نسبت به بستر رودخانه، دیده می‌شود و مشتمل بر قطعات درحد قله سنگ تا شن می‌باشد، که به‌شدت سیمان شده است. ضخامت این واحد در حد ۲ تا ۳ متر است. به‌طور کلی بخش عمده سطوح دامنه‌ای عاری از پوشش واریزه‌ای است و تنها در برخی نواحی قشری از مواد واریزه‌ای، که از جنس سنگ بستر است سطوح دامنه‌ای را پوشانده است. این مصالح، که حاصل تخریب مکانیکی سنگ‌های شیستی ساختگاه هستند، معمولاً ضخامت کمتر از ۱ متر دارند و اجزای آن بیشتر دانه درشت و در حد قله سنگ تا شن است. نهشته‌های آبرفتی و سیلابی، بیشتر دانه درشت هستند و تنها در برخی جاها تخته سنگ-های در ابعاد بیش از ۰.۵ متر در آنها دیده شده است. این نهشته‌ها حاصل فرآیند حمل رودخانه، و نیز آوردهای سیلابی هستند. ضخامت این نهشته‌ها غالباً کمتر از ۳ متر است.

جدول ۶: نحوه شاخص گذاری جنس سنگ

| جنس سنگ              | شاخص |
|----------------------|------|
| روباره و قسمت هوازده | ۱    |
| کنگلوما              | ۲    |
| شیست                 | ۳    |
| متادیوریت            | ۴    |

در بررسی حاضر، بر اساس چهار نوع جنس سنگ‌شناسی روباره و هوازده، کنگلومرا، شیست و متادیوریت، مندرج در جدول ۵، شاخص‌بندی صورت گرفت. به طور کلی می‌توان گفت که عدم قطعیت و ریسک‌پذیری از سنگ‌های روباره و هوازده به سمت متادیوریت کاهش پیدا می‌کند. این شاخص بیانگر تغییر سنگ‌شناسی سطح به عمق است (جدول ۶ و شکل ۵).



شکل ۵: نمایش گمانه‌ها بر اساس شاخص گذاری سنگ‌شناسی

شاخص گذاری برای پارامترهای لوژون و شاخص کیفی سنگ، به نحو زیر، تعریف شد.

$$C_i(Lu) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(Lu) \leq 10 \\ 2, & \text{if } 10 < Z(Lu) \leq 30 \\ 3, & \text{if } 30 < Z(Lu) \leq 60 \\ 4, & \text{if } Z(Lu) > 60 \end{cases}, C_i(RQD) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(RQD) \leq 40 \\ 2, & \text{if } 40 < Z(RQD) \leq 70 \\ 3, & \text{if } Z(RQD) > 70 \end{cases} \quad (5)$$

بر اساس واریوگرام‌های غیرجهتی ترسیم شده، مدل برازش شده برای پارامتر لوژون و شاخص سنگ‌شناسی مدل کروی، برای پارامتر شاخص کیفی سنگ مدل نمایی، و برای شاخص اهمیت سازه‌های مختلف ساختگاه، مدل گوسی است. شعاع تاثیر در واریوگرافی‌های صورت گرفته بین ۶۰ تا ۹۰ متر متغیر بوده و داده‌ها بر اساس نسبت قسمت ساختار دار (سقف) به قسمت تصادفی (اثر قطعه‌ای)، دارای ساختار فضایی مناسبی هستند (شکل ۶).

در مرحله بعد، برای تعیین ناهمسانگردی داده‌ها، واریوگرافی در ۲۴ جهت مختلف با تغییر ۱۵ درجه‌ای، انجام شد. خصوصیات بیضوی ناهمسانگردی، براساس سه زاویه (آزیموت، میل و شیب) و نسبت‌های قطر بزرگ بیضوی ناهمسانگردی به قطر کوچک آن و قطر بزرگ بیضوی ناهمسانگردی به قطر متوسط آن تعیین شد (جدول ۷).

## ۶- واریوگرام شاخص

واریوگرام یکی از ابزارهای زمین آماری است که برای نمایش همبستگی فضایی داده‌ها به کار می‌رود. تفاوت واریوگرام شاخص<sup>۱</sup> با واریوگرام معمولی در این است که از مقادیر تبدیل شده، بر اساس تابع شاخص گذاری شده، برای واریوگرافی شاخص، استفاده می‌شود. خروجی مدل واریوگرام، در تخمین پارامترها و توزیع خطای مربوط به آن، به کار می‌رود [۸].

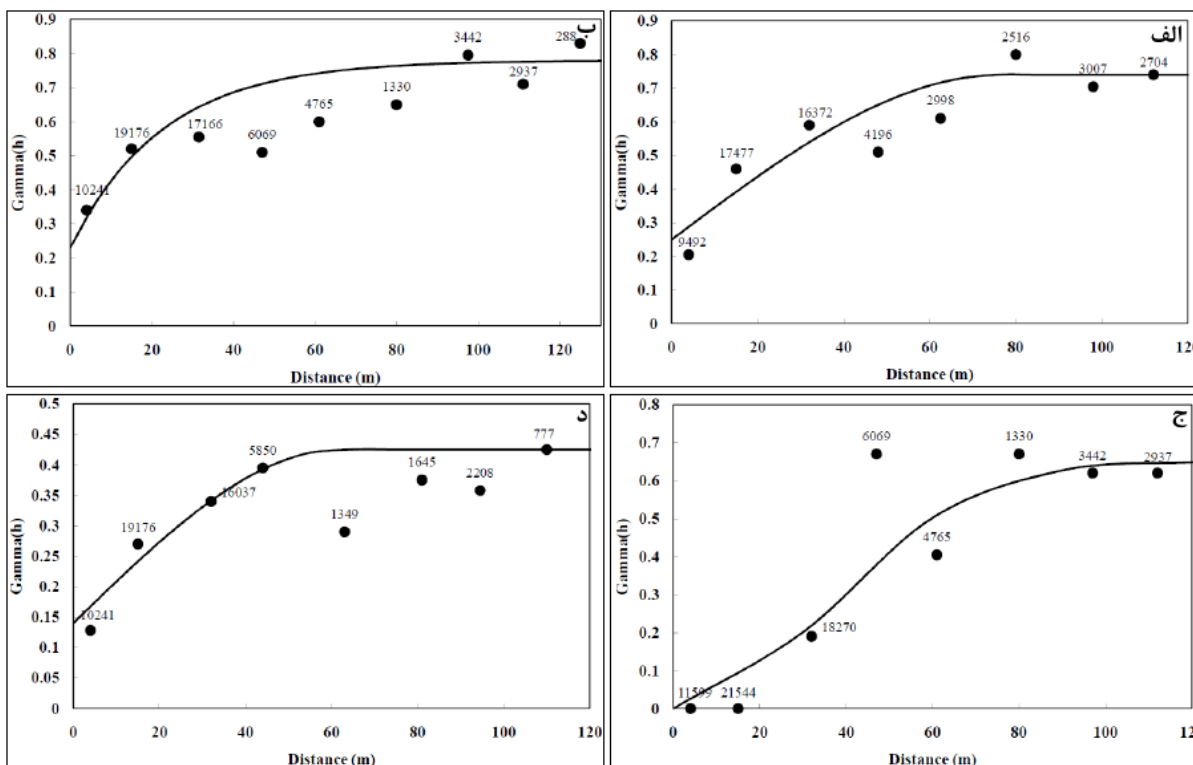
$$2\gamma_{Z_C}(h) = \frac{1}{N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x+h; Z_C) - Z(x; Z_C)]^2 \quad (4)$$

در رابطه فوق،  $h$  فاصله در جهت مشخص بین موقعیت  $x$  و  $x+h$  و  $N(h)$  تعداد جفت نمونه‌ها به فاصله  $h$  از یکدیگر،  $\gamma(h)$  مقدار واریوگرام برای فاصله  $h$ ، مقدار نمونه در نقطه  $x$  و  $Z(x+h)$  مقدار نمونه در نقطه  $x+h$  است، واریوگرافی بر اساس تابع شاخص گذاری و حد آستانه  $Z_C$  صورت می‌پذیرد. بر اساس محاسبه واریوگرافی در جهات مختلف (آزیموت، میل و شیب) و با تغییر شعاع تاثیر، بیضوی ناهمسانگردی برای هر یک از پارامترهای مذکور، تعیین گردید. در بررسی حاضر، تابع



جدول ۷: پارامترهای بیضوی ناهمسانگردی پارامترهای مورد مطالعه

| پارامتر مورد مطالعه    | نسبت محور اصلی به محور متوسط | نسبت محور اصلی به محور کوچک | آزیموت | شیب | پلانچ |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------|--------|-----|-------|
| لوژون                  | ۱/۱۳                         | ۱/۷۳                        | ۱۲۵    | ۳/۷ | ۲۲    |
| شاخص کیفی              | ۱/۲۴                         | ۱/۷۱                        | ۱۳۲    | ۷/۴ | ۲۴    |
| شاخص سازه‌های مختلف سد | ۱/۵۹                         | ۲/۶۶                        | ۱۴۵    | ۹/۳ | ۱۷/۵  |
| شاخص سنگ شناسی         | ۱/۱۱                         | ۱/۵۲                        | ۱۷۵    | ۱/۶ | ۲۲/۷  |



شکل ۶: الف) واریوگرافی پارامتر لوژون بر اساس مدل کروی، ب) واریوگرافی پارامتر شاخص کیفی سنگ، بر اساس مدل نمایی، ج) واریوگرافی پارامتر شاخص سازه‌های مختلف سد، بر اساس مدل گوسی، د) واریوگرافی پارامتر شاخص، بر اساس سنگ شناسی بر اساس مدل کروی

#### ۷- کریجینگ شاخص

کریجینگ شاخص، بر اساس واریوگرام شاخص انجام می‌شود؛ و مقادیر، در حالتی که تنها یک حد آستانه داشته باشیم، بر اساس دو شاخص (کلاس) صفر و یک طبقه‌بندی می‌شود. کریجینگ شاخص، اصطلاحی است که برای کریجینگ مقادیر کدهای فرضی در بلوک‌های معدنی به‌کار می‌رود. تفاوت کریجینگ شاخص با کریجینگ معمولی این است که برخلاف کریجینگ معمولی، انباشتگی مقدار پارامتر بدست نمی‌آید، بلکه با این روش بخشی از بلوک را که دارای مقادیر بالاتر از حد آستانه است، مشخص می‌کند. یکی از کاربردهای اصلی کریجینگ شاخص، تعیین مرز ماده معدنی و باطله در معادن است [۹]. در این روش کریجینگ، احتمال آنکه عیار بلوک مورد

تخمین، کوچکتر از عیار حد مفروض باشد تخمین زده می‌شود. امتیاز این روش در این است که فرآیند تخمین، مستقل از تابع توزیع داده‌ها است.

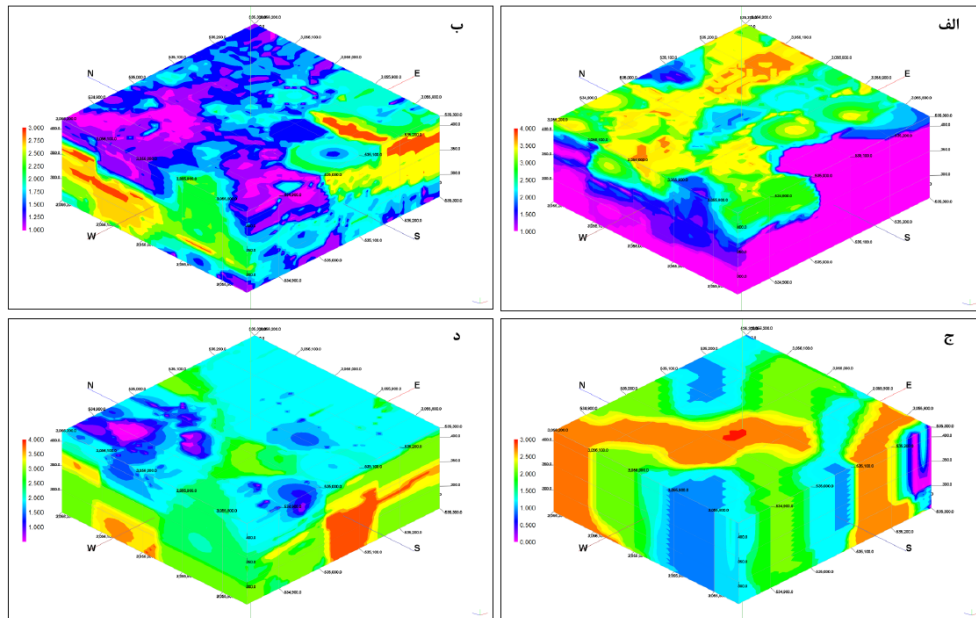
برای انجام کریجینگ شاخص لازم است حد آستانه‌ای در نظر گرفته شود ( $Z_C$ )؛ و سپس با استفاده از تابع دو ضابطه‌ای، داده‌ها تبدیل شوند. در این حالت مقدار تخمینی متغیر شاخص در هر نقطه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i_k(x_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j i_k(x_j) \quad (6)$$

که در آن  $i_k(x_j)$  مقدار شاخص نمونه  $k$ م به مختصات  $X_j$  و  $\lambda_j$  وزن کریجینگ شاخص برای نمونه به مختصات  $X_j$  است که در تخمین نقطه  $X_0$  شرکت می‌کند [۱۰].

منظور تبدیل داده‌ها، از حالت کیفی به کمی، تابع شاخص سازه‌های مختلف سد، بر اساس درجه اهمیت سازه‌های سد، برای سه شاخص؛ و شاخص سنگ شناسی ساختگاه سد سمیلان برای چهار شاخص، در شکل ۷ قسمت ج و د نشان داده شده است.

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 و به منظور طبقه بندی داده‌ها، کریجینگ شاخص پارامترهای لوژون، برای چهار شاخص؛ و شاخص کیفی سنگ برای سه شاخص، در شکل ۷ قسمت الف و ب، ترسیم شد. به



شکل ۷: الف) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات لوژون، ب) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات RQD، ج) نمایش کریجینگ شاخص سازه‌های مختلف سد، د) نمایش مقادیر شاخص بر اساس سنگ شناسی

$$ER_{Average} = \frac{ER_{Lu} + ER_{RQD} + ER_{GI}}{3} \quad (8)$$

برای شاخص گذاری میانگین واریانس کریجینگ از سه حد آستانه ۰،۴، ۰،۸ و ۱،۲، استفاده می‌شود، که چهار شاخص تشکیل می‌دهد. در شکل ۸ الف ابتدا مقادیر واریانس کریجینگ بدون شاخص گذاری و قسمت ب مقادیر واریانس کریجینگ بر اساس شاخص گذاری نمایش داده شده است که بیشترین فراوانی مربوط به شاخص واریانس کریجینگ ۳ (بین ۰/۴ تا ۰/۸) است.

$$C_i(ER_{Average}) = \begin{cases} 1, & \text{if } Z(ER) \leq 0.4 \\ 2, & \text{if } 0.4 < Z(ER) \leq 0.8 \\ 3, & \text{if } 0.8 < Z(ER) \leq 1.2 \\ 4, & \text{if } Z(ER) > 1.2 \end{cases} \quad (9)$$

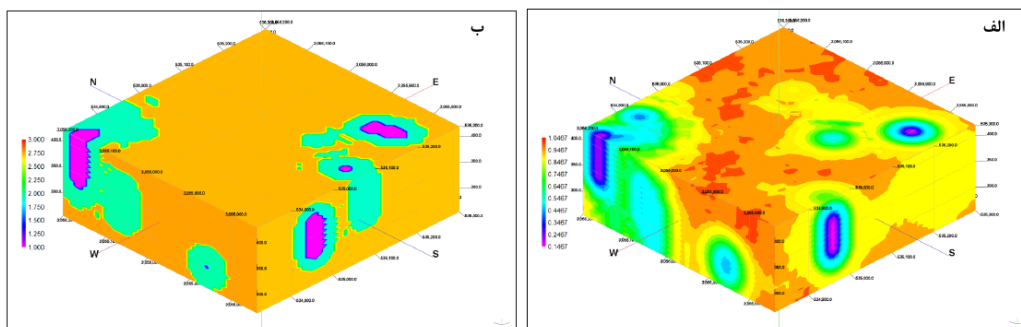
۸- روش پیشنهادی برای تعیین محل حفاری‌های اضافه در بررسی حاضر، شاخص پارامترهای شاخص کیفی سنگ، لوژون و شاخص سازه‌های مختلف سد، بر اساس حدود آستانه

#### ۷-۱- شاخص گذاری خطای تخمین

یکی از برتری‌های تخمین‌های زمین آماری از جمله کریجینگ نسبت به دیگر تخمین گرها، نمایش توزیع خطا در فضای تخمین است. خطای تخمین به مقادیر داده‌ها بستگی ندارد، بلکه به توزیع فضایی داده‌ها بستگی دارد. خطای تخمین کریجینگ معمولی از رابطه زیر به دست می‌آید، که بر اساس توزیع خطای تخمین می‌توان مناطقی را که دارای کمبود اطلاعات است، تعیین کرد. 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 [۱۱].

$$\text{Var}[\hat{i}_k(x_0)] = E\{(\hat{i}_k(x_j) - i_k(x_j))^2\} \quad (7)$$

در ادامه، مقادیر واریانس کریجینگ برای پارامترهای لوژون، شاخص کیفی سنگ و شاخص سنگ شناسی تعیین شده و میانگین مقادیر محاسبه شد:



شکل ۸: نمایش مقادیر واقعی واریانس کریجینگ، (الف) نمایش مقادیر شاخص گذاری واریانس کریجینگ (ب)

• 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. براساس این راهبرد می‌توان تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه را تعریف کرد. در این حالت تعیین محل حفاری‌های اضافه بخشی به نحو زیر عبارتست از: حاصلضرب مقدار کریجینگ شاخص لوژون در مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد در شاخص خطای تخمین؛ تقسیم بر حاصلضرب مقدار کریجینگ شاخص خصوصیت کیفی سنگ در شاخص سنگ‌شناسی منطقه.

$$\text{Function} = \frac{I(Lu) \times I(ER_{AV}) \times I(SI)}{I(RQD) \times I(LI)} \quad (10)$$

که در آن  $I(Lu)$  مقدار کریجینگ شاخص لوژون،  $I(ER_{AV})$  شاخص میانگین خطای تخمین،  $I(SI)$  مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد،  $I(RQD)$  مقدار کریجینگ شاخص کیفی سنگ و  $I(LI)$  شاخص سنگ‌شناسی منطقه است.

با در نظر گرفتن تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه در منطقه، بر اساس ۲۳ گمانه موجود و ترسیم آن، می‌توان مناطق با مقادیر بالای این تابع را که نمایانگر عدم قطعیت و ریسک است، تعیین نمود. تابع مذکور برای نمونه‌برداری تک مرحله‌ای بین مقادیر ۱ تا ۳۶ متغیر است (شکل ۹).

#### ۹- نمونه‌برداری مرحله‌ای

منطق طراحی نمونه‌برداری بهینه، منطق مرحله‌ای است، به طوری که داده‌های هر مرحله، راهنمایی برای طراحی مناسب‌تر در مرحله بعد خواهند بود. طراحی در هر مرحله، نسبت به مرحله قبل دقیق‌تر انجام می‌شود و جزئیات بیشتری از تغییرپذیری پارامترهای مورد مطالعه، آشکار می‌گردد. به

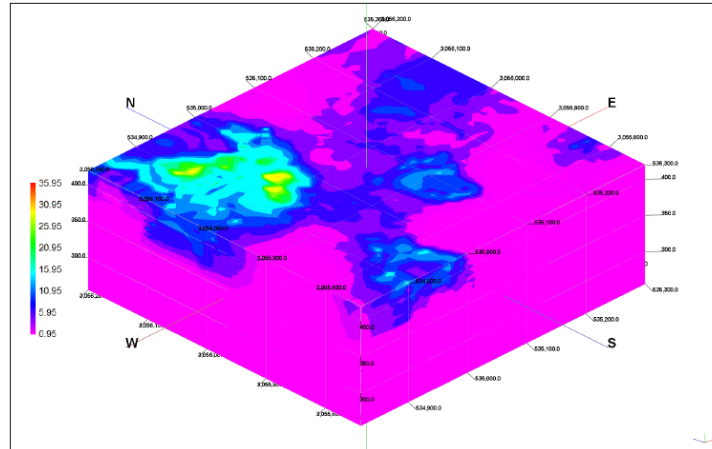
تعریف شد. سپس، پارامترهای مورد نظر واریوگرافی گردید و خصوصیات مدل واریوگرام آن استخراج شد. در ادامه، با استفاده از تخمین کریجینگ شاخص در تمام قسمت‌های مورد بررسی، مقادیر تخمینی شاخص کیفی سنگ، شاخص لوژون، و شاخص سازه‌های مختلف سد، به دست آمد. یکی از برتری‌های تخمین‌های زمین آماری، از جمله کریجینگ، نسبت به دیگر تخمین‌گرها، نمایش توزیع خطا در فضای تخمین است. توزیع خطای تخمین نمایانگر محل‌هایی با کمبود اطلاعات است [۱۲].

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 همچنین شاخص سازه‌های مختلف سد و شاخص سنگ‌شناسی 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 مقادیر RQD کمتری هستند به منزله 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.
- شاخص گذاری سنگ‌شناسی ساختگاه بر اساس تغییرات عمقی انجام شده و بیشترین مقدار شاخص را سنگ متادیوریت به خود اختصاص داد که دارای مقاومت بالاتری است و در عمق بیشتری قرار دارند و در مقابل، سنگ‌های روبراه و هوازده که دارای کمترین پایداری هستند و در سطح واقع شده‌اند کمترین مقدار شاخص را به خود اختصاص داده است، بنابراین با افزایش شاخص سنگ‌شناسی میزان ریسک کاهش می‌یابد.

[۱]. از طرفی چنین شناختی با استفاده از بررسی‌های زمین آماري حاصل می‌شود. در بررسی حاضر سعی شده خطای حاصل از نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای با هم مقایسه شود.

خصوصاً، توزیع فضایی متغیر مربوطه در واحد نمونه‌برداری، معمولاً در مراحل آغازین به طور دقیق مشخص نمی‌شود ولی با تکرار نمونه‌برداری می‌توان به ساختار مناسبی دست یافت. برای دستیابی به اهداف مذکور، شناخت ساختار فضایی متغیر مربوطه در واحد نمونه‌برداری از اهمیت خاصی برخوردار است

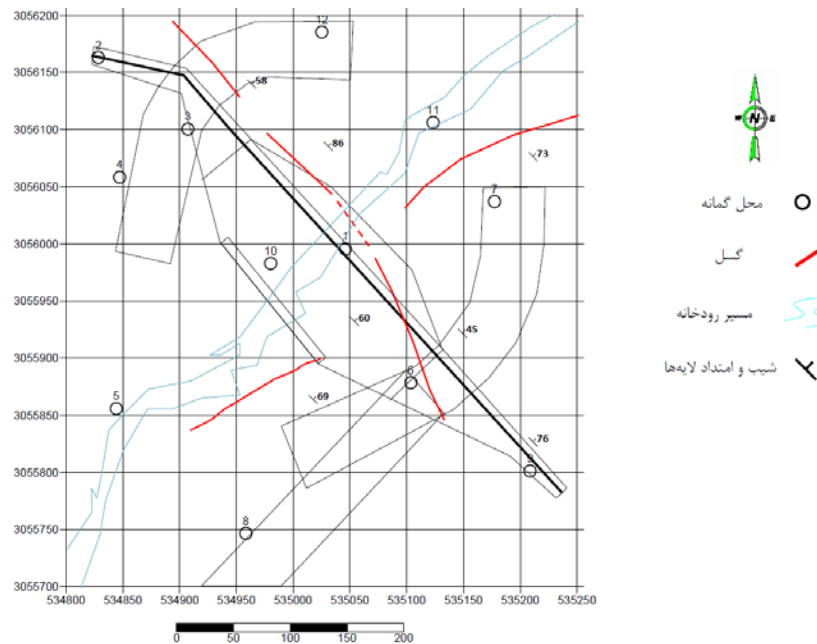


شکل ۹: نمایش سه بعدی تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه

دیگر نمونه به اندازه کافی موجود نباشد و یا اینکه موجب نتایج تکراری و غیر ضروری شود. گمانه‌های ۱، ۴، ۵، ۱۱، ۱۴، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲ و ۲۳ از بین ۲۳ گمانه نمونه‌برداری تک مرحله‌ای بر مبنای چگالی نمونه‌برداری انتخاب شد و گمانه‌های ۱ تا ۱۲، طراحی مرحله اول را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۰).

#### ۹-۱- مرحله اول

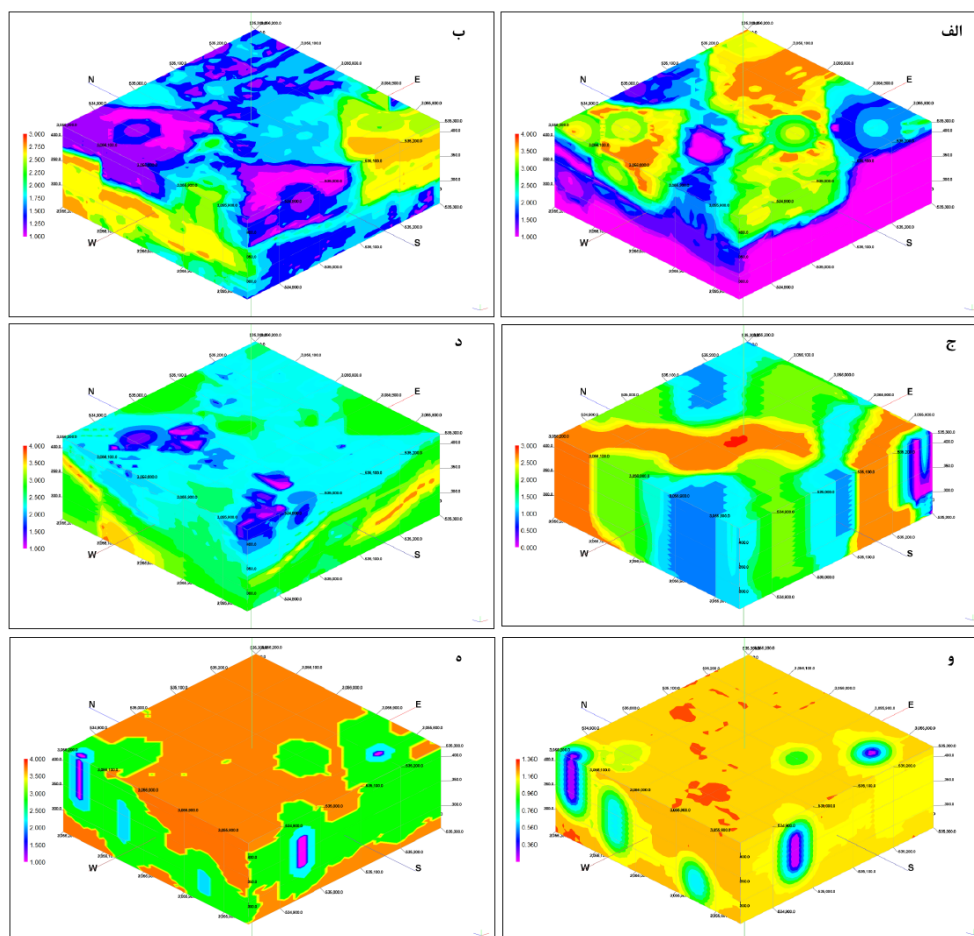
برای مرحله اول تعداد ۱۲ گمانه از ۲۳ گمانه طراحی تک مرحله‌ای انتخاب شد و ملاک انتخاب گمانه‌های مرحله اول، چگالی نمونه‌ها است. چگالی نمونه‌برداری بر اساس تعداد نمونه‌ها در واحد حجم یا سطح تعیین می‌شود. در صورتی که در یک منطقه نمونه‌برداری متراکم باشد ممکن است که در مناطق



شکل ۱۰: نمایش موقعیت گمانه‌های مرحله اول و سازه‌های موجود در ساختگاه سد سمیلان

شدند. در شکل ۱۱ الف و ب کریجینگ شاخص پارامترهای ژئوتکنیکی، در شکل ۱۱ ج و د کریجینگ شاخص درجه اهمیت سازه‌های مختلف سد و شاخص سنگ شناسی، نمایش داده شده است. علاوه بر نتایج کریجینگ، خروجی دیگر آن، یعنی واریانس کریجینگ که برای پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ) و شاخص سنگ‌شناسی محاسبه و میانگین گرفته شده است. واریانس کریجینگ به چهار شاخص تقسیم می‌شود که در شکل ۱۱ قسمت و و ه بر اساس مقادیر واقعی و شاخص گذاری شده، به تصویر کشیده شده‌اند.

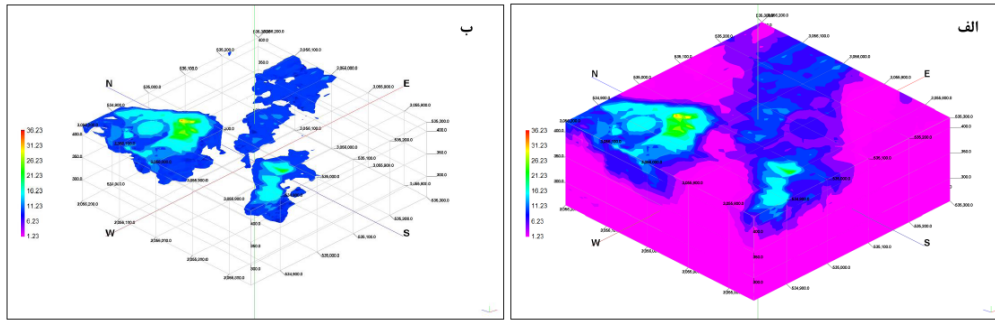
بعد از تعیین محل و داده‌های مورد نیاز در مرحله اول، می‌بایست بر اساس توابع شاخص و حدود آستانه، مقادیر شاخص مربوط به هر یک از پارامترها را محاسبه کرد. مطالعه واریوگرام شاخص در جهات مختلف، برای پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ)، پارامتر شاخص درجه اهمیت سازه‌های مختلف سد، و شاخص سنگ شناسی انجام شد، سپس خصوصیات ناهمسانگردی (مشابه جدول ۷) مرتبط با هر یک از پارامترهای ساختگاه سد سمیلان محاسبه شد. در مرحله بعد، پارامترهای مذکور بر اساس کریجینگ شاخص، تخمین زده



شکل ۱۱: الف) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی مرحله اول تغییرات لوژون، ب) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات RQD، ج) نمایش کریجینگ شاخص سازه‌های مختلف سد، د) نمایش مقادیر شاخص بر اساس سنگ شناسی، و) نمایش مقادیر واقعی واریانس کریجینگ، ه) نمایش مقادیر شاخص گذاری شده واریانس کریجینگ

میانگین به علاوه دو برابر انحراف معیار  $(\bar{X} + 2S)$ ، استفاده می‌شود (شکل ۱۲).

همانطور که قبلاً اشاره شد تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه طبق معادله ۱۰ محاسبه می‌شود. برای جدایش مقادیر ناهنجاری<sup>۱</sup> از مقادیر زمینه این تابع از مقادیر بزرگتر از

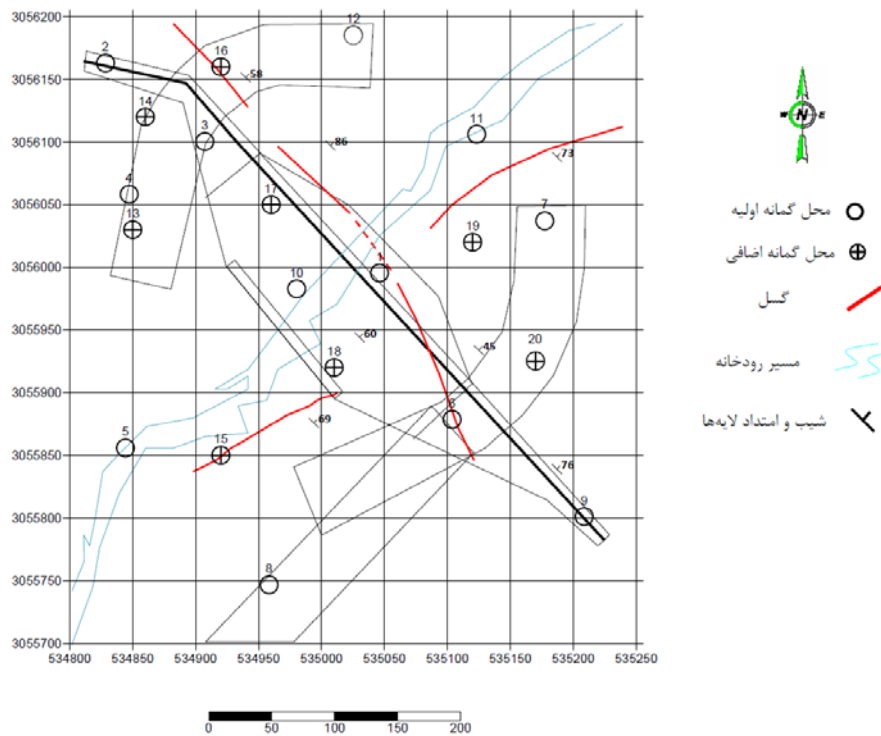


شکل ۱۲: الف) نمایش تابع تعیین محل حفاری اضافه، ب) نمایش موقعیت و مقادیر ناهنجاری تابع تعیین محل حفاری اضافه

### ۲-۹- مرحله دوم

بر اساس مقادیر بیشینه تابع تعیین محل حفاری‌های اضافی و موقعیت ۱۲ گمانه در مرحله اول، موقعیت و تعداد گمانه‌های مرحله دوم تعیین می‌شود. به این منظور، تعداد ۸

گمانه برای مرحله دوم انتخاب شد که تعداد مجموع گمانه‌های حفاری شده در دو مرحله را به ۲۰ عدد می‌رساند. به این ترتیب، ۶۰٪ گمانه‌ها در مرحله اول و ۴۰٪ آن در مرحله دوم حفاری شده است (شکل ۱۳).



شکل ۱۳: نمایش موقعیت گمانه‌های مرحله اول و دوم سازه‌های موجود در ساختگاه سد سمیلان

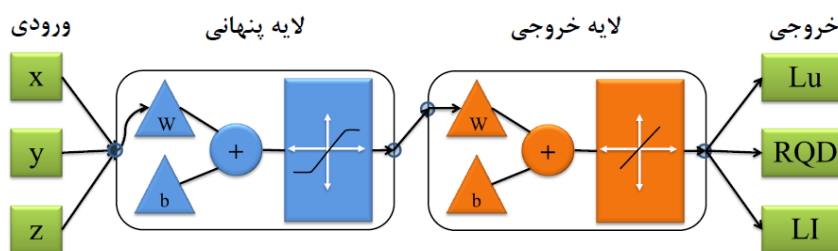
### ۳-۹- تخمین مقادیر پارامترها در گمانه‌های مرحله دوم با استفاده از شبکه عصبی و زمین آمار

شبکه عصبی برای حل مسائل غیر خطی و پیچیده در زمینه‌های گوناگون، که قوانین ساده قادر به حل مسائل نیستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر شبکه عصبی شامل سه مرحله آموزش، تعمیم و اجرا می‌باشد. در مرحله آموزش، شبکه الگو-

های موجود در داده‌های ورودی را یاد می‌گیرد. مرحله تعمیم، قدرت شبکه عصبی در ایجاد پاسخ‌های قابل قبول برای ورودی‌هایی که در مجموعه سری آموزشی نبوده‌اند را نشان می‌دهد. در مرحله اجرا نیز شبکه عصبی برای عملکردی که به آن منظور طراحی گردیده است، استفاده می‌شود.

$$\text{Normalized Value} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (11)$$

در این مطالعه، از روش تغذیه پیشروپس انتشار<sup>۱۱</sup> استفاده می‌شود، که اولین مرحله لایه ورودی است که مختصات داده‌های مربوط به هر گمانه است و در سه لایه پنهان برای آموزش از توابع سیگموئید و وزن‌دهی استفاده می‌شود. نتیجه لایه‌های پنهان، به عنوان تغذیه کننده لایه خروجی استفاده می‌شود و در لایه پنهانی تحت برازش توابع خطی و وزن‌دهی ثانویه قرار می‌گیرد و در نهایت مقادیر خروجی تعیین می‌شود (شکل ۱۴).



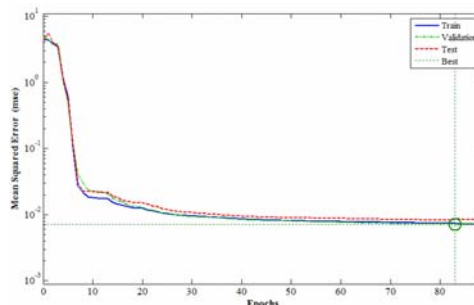
شکل ۱۴: ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در بررسی حاضر

بر اساس مطالعات واریوگرام شاخص جهت‌ی مختلف، برای پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ)، پارامتر شاخص درجه اهمیت سازه‌های مختلف سد و شاخص سنگ شناسی انجام شد. در مرحله بعد، بر اساس کریجینگ شاخص، پارامترهای مذکور تخمین زده شدند. در شکل ۱۶ الف و ب کریجینگ شاخص پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس ۲۰ گمانه (دو مرحله)، در قسمت ج و د کریجینگ شاخص درجه اهمیت سازه‌های مختلف سد و شاخص سنگ شناسی بر اساس ۲۰ گمانه (دو مرحله) نمایش داده شده است. علاوه بر نتایج کریجینگ، خروجی دیگر آن، یعنی واریانس کریجینگ، که برای پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ) و شاخص سنگ شناسی محاسبه و میانگین گرفته شده است و به چهار شاخص تقسیم می‌شود. میزان شاخص کریجینگ، به علت افزایش تعداد گمانه‌ها، دارای کاهش چشمگیری است، که در شکل ۱۶ و و ه بر اساس مقادیر واقعی و شاخص گذاری شده نمایش داده شده است.

با استفاده از تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه در منطقه بر اساس ۲۰ گمانه موجود و ترسیم آن، می‌توان مناطق با مقادیر بالای این تابع را که نمایانگر عدم قطعیت و ریسک بیشتر است، مشخص کرد. مقادیر تابع مذکور بر اساس نمونه‌برداری دو مرحله‌ای بین مقادیر ۱ تا ۱۵ متغیر است، که نسبت

شبکه‌های عصبی ساختار لایه‌ای دارند، اولین لایه، لایه ورودی است که در این بررسی مختصات جغرافیایی گمانه‌ها (x,y,z) است و لایه آخر نیز لایه خروجی است که در این بررسی پارامترهای شاخص گذاری شده لوژون، شاخص کیفی سنگ و شاخص سنگ شناسی است. لایه‌های بین لایه ورودی و لایه خروجی را لایه‌های میانی (داخلی یا پنهان) می‌نامند. تمام محاسبات در لایه‌های میانی، انجام می‌شود [۱۳]. بهترین وضعیت برای ورودی‌های شبکه‌های عصبی هنگامی است که تمام ورودی‌ها و خروجی‌ها بین صفر و یک باشند، بنابراین باید از تابع نرمال کننده استفاده کرد:

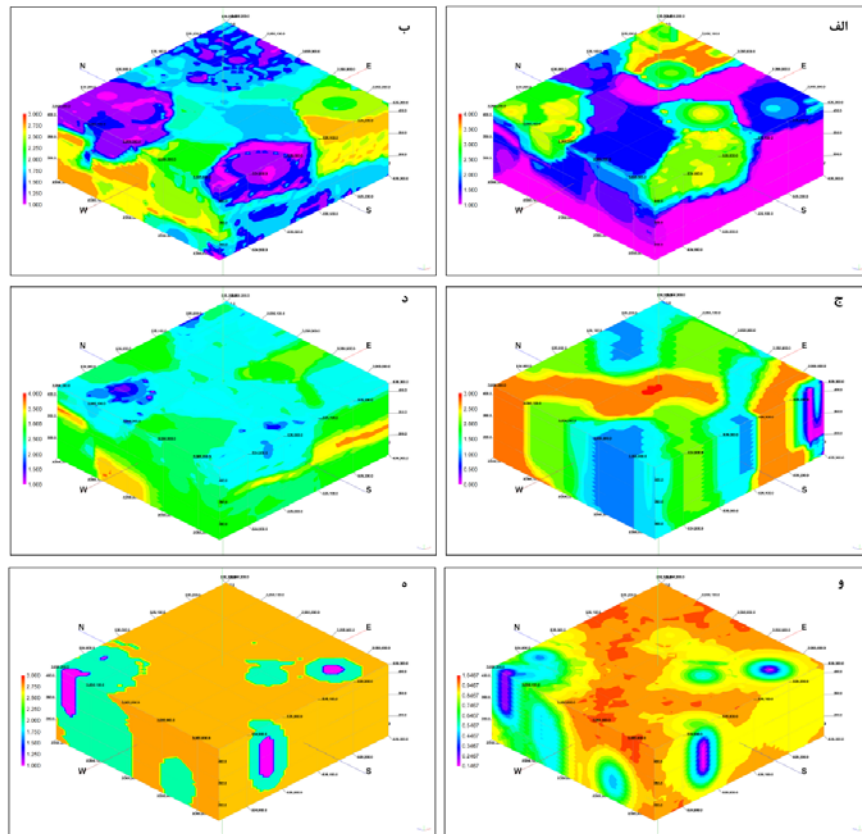
آموزش در شبکه عصبی فرآیندی است که منجر به دستیابی به وزن‌های بهینه برای ورودی هر سلول شبکه عصبی می‌شود. بهترین معیار برای پایان آموزش، رسیدن به مقدار کمینه خطا است، که پس از آن خطا دوباره شروع به افزایش می‌کند. به منظور اعتبار سنجی آموزش، ۱۵٪ داده‌ها برای آزمایش و ۱۵٪ دیگر برای اعتبار سنجی استفاده می‌شود و در صورتی که خطا قابل قبول باشد، می‌توان از شبکه حاصل برای تعمیم و اجرا استفاده نمود (شکل ۱۵).



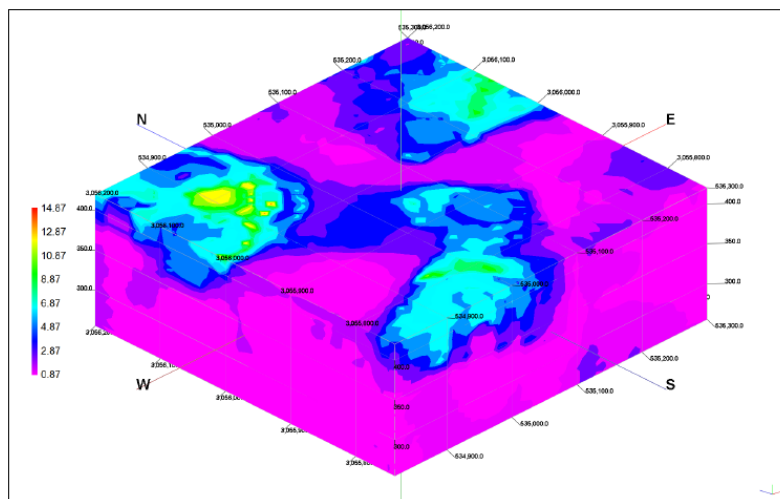
شکل ۱۵: نمودار اعتبارسنجی آموزش و آزمایش شبکه عصبی

با استفاده از مقادیر خروجی شبکه عصبی و خطای آموزش و مقایسه آن با تخمین کریجینگ و خطای حاصل از آن، پارامترهای مورد نیاز برای ۸ گمانه مرحله دوم محاسبه شد. پس از تخمین پارامترهای مورد نظر در هر گمانه، مانند مرحله قبل، واریوگرافی شاخص برای هر ۲۰ گمانه انجام شده و

به نمونه برداری تک مرحله‌ای دارای کاهش چشمگیری می‌باشد (شکل ۱۷).



شکل ۱۶: الف) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات لوژون بر اساس طراحی دو مرحله‌ای، ب) نمایش تخمین کریجینگ شاخص سه بعدی تغییرات RQD، ج) نمایش کریجینگ شاخص سه بعدی سازه‌های مختلف سد، د) نمایش مقادیر شاخص بر اساس سنگ شناسی، و) نمایش مقادیر واقعی واریانس کریجینگ



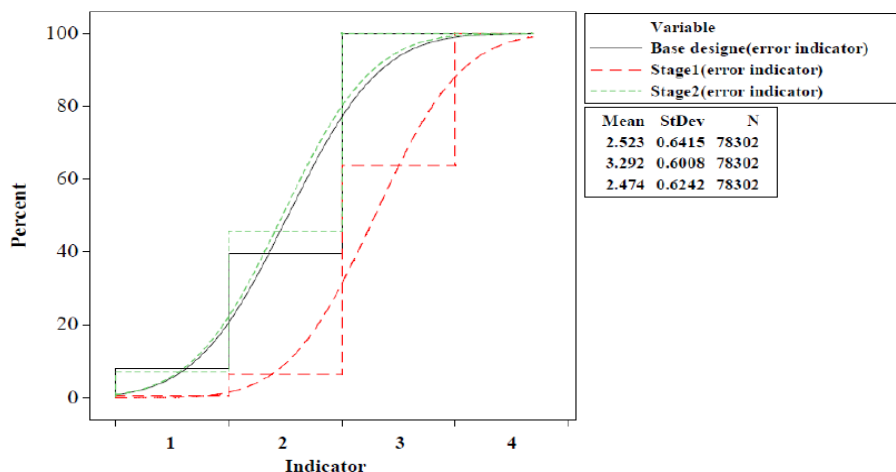
شکل ۱۷: نمایش سه بعدی تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه برای نمونه برداری دو مرحله‌ای



## ۹-۴- مقایسه نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای

بهترین ملاک برای بررسی و مقایسه طرح‌های نمونه‌برداری مختلف، مقدار واریانس کریجینگ است که بیانگر خطای تخمین و خطای نمونه‌برداری است. بر اساس سه حالت

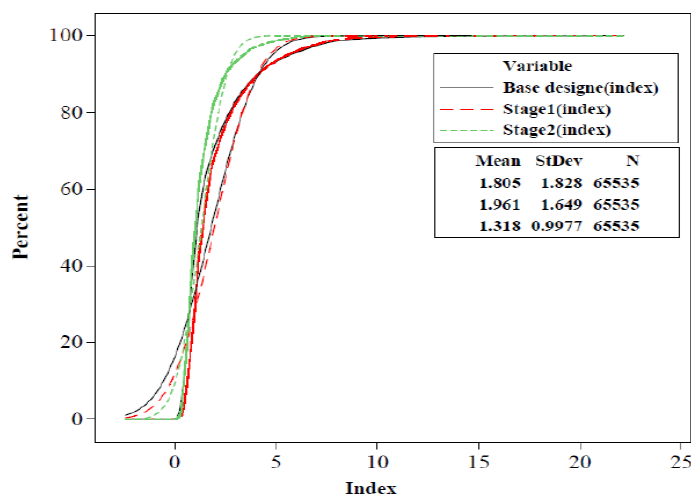
نمونه‌برداری، بیشترین مقادیر خطا به ترتیب مرحله اول نمونه‌برداری دو مرحله‌ای، نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و نمونه‌برداری دو مرحله‌ای، وابسته است (شکل ۱۸).



شکل ۱۸: تابع توزیع تجمعی مقادیر شاخص واریانس کریجینگ در سه حالت طراحی نمونه‌برداری

نمونه‌برداری نمایانگر این واقعیت است که بیشترین مقادیر این شاخص به ترتیب در حالت مرحله اول نمونه‌برداری دو مرحله‌ای (۱۲ گمانه)، تک مرحله (۲۳ گمانه) و نمونه‌برداری دو مرحله (۲۰ گمانه) است و علت اصلی کاهش شاخص، کاهش خطای تخمین و افزایش دقت تخمین پارامترها است (شکل ۱۹).

در این مطالعه، برای سه حالت بر اساس نمونه‌برداری تک مرحله‌ای (طراحی پایه)، مرحله اول نمونه‌برداری دو مرحله‌ای و نمونه‌برداری دو مرحله‌ای، مقادیر تابع تعیین محل حفاری‌های اضافی محاسبه شد. مقادیر تابع مذکور برای نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و دو مرحله‌ای تعیین شد. تابع توزیع تجمعی شاخص تعیین محل حفاری‌های اضافی برای سه حالت طراحی



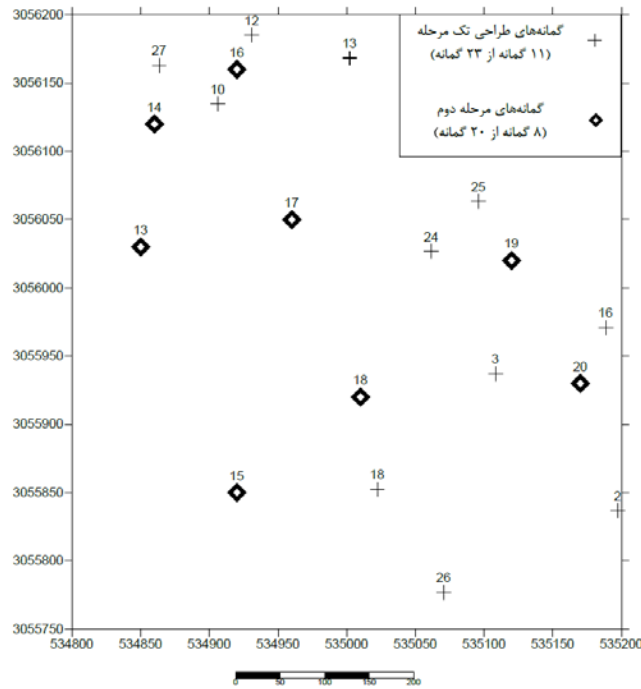
شکل ۱۹: تابع توزیع تجمعی مقادیر شاخص تعیین محل حفاری‌های اضافه

کمتر از حالت نمونه‌برداری تک مرحله‌ای است؛ اما به علت قرارگیری مناسب گمانه‌ها در مرحله دوم، بر اساس تابع تعیین محل حفاری اضافه، واریانس کریجینگ کاهش یافته است. به

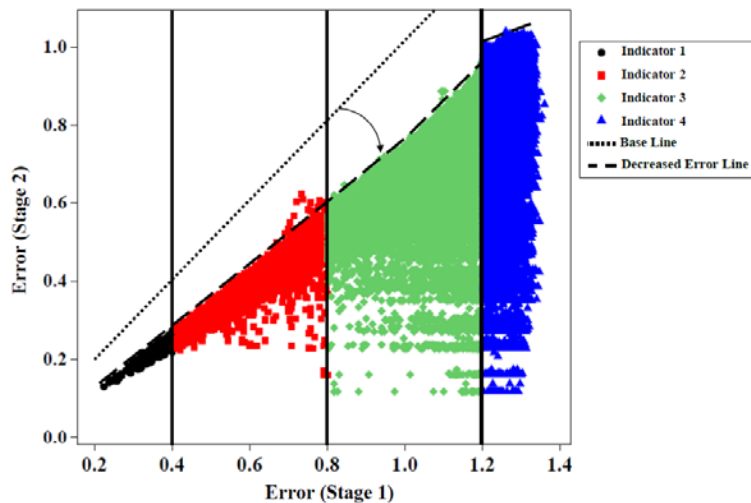
بر اساس بررسی‌های انجام شده، تفاوت نمونه‌برداری تک مرحله با دو مرحله‌ای به موقعیت و تعداد گمانه‌ها وابسته است. اگرچه تعداد گمانه‌های در نمونه‌برداری دو مرحله‌ای ۳ عدد

کریجینگ و خطای تخمین می‌شود. افزایش تعداد گمانه‌ها، خطای کریجینگ را کاهش می‌دهد. کاهش خطای تخمین بر پایه افزایش نمونه‌ها، در مقادیر بزرگتر خطا اثر بیشتری داشته و گرادیان کاهش مقدار خطا بیشتر است، بنابراین بیشترین کاهش خطا در مقادیر خطا بزرگتر از ۱,۲ (شاخص ۴) مشاهده می‌شود (شکل ۲۱).

علت اینکه ۱۲ گمانه مرحله اول، بر اساس چگالی نمونه‌ها، از بین ۲۳ گمانه نمونه‌برداری تک مرحله‌ای انتخاب شده است، تفاوت این دو طرح نمونه‌برداری وابسته به ۱۱ گمانه باقی مانده از نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و ۸ گمانه نمونه‌برداری مرحله دوم است (شکل ۲۰). نتیجه اینکه، نمونه‌برداری مرحله‌ای، باعث کاهش واریانس



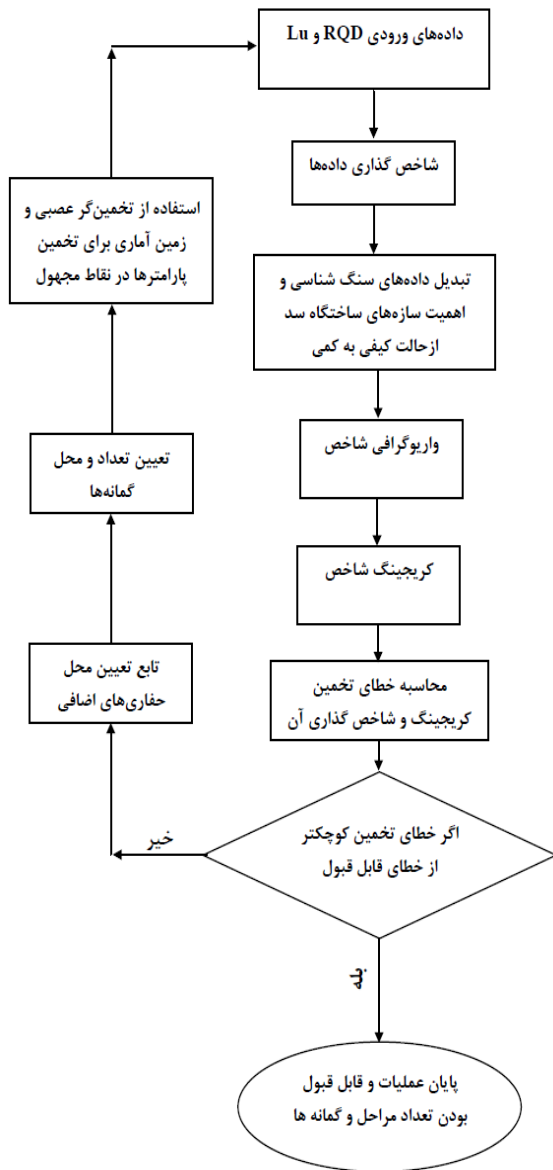
شکل ۲۰: تفاوت موقعیت گمانه‌های غیر مشترک نمونه‌برداری تک مرحله‌ای و دومرحله‌ای



شکل ۲۱: مقایسه خطای تخمین مرحله اول و مرحله دوم بر اساس شاخص بندی و روند کاهش خطا

سپس داده‌های کیفی برای کمی‌سازی، شاخص‌گذاری می‌شوند. سپس پارامترهای مورد مطالعه واریوگرافی شده و بر اساس کریجینگ شاخص تخمین صورت می‌پذیرد که علاوه بر

کلیه مراحل طراحی نمونه‌برداری چند مرحله‌ای را می‌توان به طور مختصر به صورت الگوریتم نمایش داد. در این فرآیند ابتدا داده‌های کمی مورد مطالعه بررسی و شاخص‌گذاری شده،



شکل ۲۲: فرآیند انجام نمونه‌برداری مرحله‌ای و تعیین تعداد مراحل و تعداد نمونه‌ها در هر مرحله

بررسی حاضر نشان داد که:

- الف) انجام نمونه‌برداری چند مرحله‌ای نسبت به تک مرحله‌ای، باعث کاهش خطای تخمین و افزایش دقت تخمین شد.
- ب) در نمونه‌برداری دومرحله‌ای، اگرچه تعداد گمانه‌ها ۳ عدد کمتر از حالت در نمونه‌برداری تک مرحله‌ای است، اما به‌علت قرارگیری مناسب گمانه‌ها در مرحله دوم بر اساس تابع تعیین محل حفاری اضافه، باعث کاهش واریانس کریجینگ شده است.

تخمین، خطای تخمین نیز قابل محاسبه است. معیار پایان این فرآیند، کمتر بودن خطای محاسبه شده از خطای قابل قبول است. در صورتی که این شرط صادق نباشد دوباره این مرحله ادامه پیدا می‌کند. با استفاده از تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، تعداد و موقعیت نمونه‌های مرحله بعد تشخیص داده می‌شود، سپس پارامترهای مورد مطالعه در محل حفاری‌های اضافه با استفاده از تخمین‌گرهای زمین آماری و شبکه عصبی تخمین زده شده و به داده‌های مرحله اول اضافه می‌شود، این چرخه تا زمانی که خطای تخمین بزرگ‌تر از خطای مورد نظر باشد، ادامه پیدا می‌کند (شکل ۲۲).

### ۱۰- نتیجه گیری

در این بررسی برای بهینه سازی تعداد و محل گمانه‌های اکتشافی اقدامات زیر صورت گرفت:

۱. پارامترهای ژئوتکنیکی (لوژون و شاخص کیفی سنگ)، به همراه اهمیت سازه‌های مختلف سد و شاخص سنگ شناسی مورد مطالعه قرار گرفت و بر اساس توابع شاخص گذاری، پارامتر لوژون به چهار شاخص، پارامتر شاخص کیفی سنگ به سه شاخص، سازه‌های مختلف سد به سه شاخص و شاخص سنگ شناسی به چهار شاخص تقسیم شدند.
۲. بر اساس میانگین واریانس تخمین کریجینگ پارامترهای لوژون، شاخص کیفی سنگ و شاخص سنگ شناسی به چهار شاخص تقسیم شد و نمایانگر پراکندگی داده‌ها در منطقه است.
۳. تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه بر اساس بیشینه سازی شاخص‌های لوژون، میانگین خطای تخمین و سازه‌های مختلف سد؛ و کمینه سازی شاخص کیفی سنگ و شاخص سنگ شناسی صورت گرفت و به‌صورت حاصلضرب مقدار کریجینگ شاخص لوژون در مقدار شاخص سازه‌های مختلف سد در شاخص خطای تخمین تقسیم بر حاصلضرب مقدار کریجینگ شاخص خصوصیت کیفی سنگ در شاخص سنگ شناسی منطقه تعریف شد.

$$Function = \frac{I(Lu) \times I(ER_{AV}) \times I(SI)}{I(RQD) \times I(LI)}$$

۴. برای نمونه‌برداری چند مرحله‌ای از داده‌های نمونه‌برداری تک مرحله‌ای استفاده شد و ۱۲ گمانه از ۲۳ گمانه نمونه‌برداری تک مرحله‌ای بر اساس چگالی نمونه‌برداری انتخاب شد.
۵. با استفاده از تابع تعیین محل حفاری‌های اضافه، تعداد ۸ گمانه برای مرحله دوم انتخاب شد و با استفاده از تخمین‌گر-های زمین آماری و شبکه عصبی، پارامترهای مورد نیاز در ۸ گمانه، تخمین زده شد.

## منابع

- techniques*", PhD thesis of Geological Engineering, Colorado School of Mines.
- [8] Webster R., Margaret A., 2007, *Geostatistics for environmental scientists*, Wiley .
- [9] 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.
- [10] Chiles J.P., Delfiner P., 1999, *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, Wiley, New York, 695 pp.
- [11] Blackwell G., 1998, "*Relative kriging errors: a basis for mineral resource classification*", *Exploration Mining Geology*, No. 7, pp. 99-105.
- [12] 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.
- [13] Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M.H., 1996, *Neural Network Design*, Boston, MA: PWS Publishing.
- [1] Myers J. C., 1997, "*Geostatistical Error Management: Quantifying Uncertainty for Environmental Sampling and Mapping*", New York: Van Nostrand Reinhold, 594pp.
- [2] 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.
- [۳] مهندسین مشاور مهتاب قدس؛ ۱۳۸۷؛ زمین شناسی ساختگاه سد سمیلان.
- [4] De Geoffroy J., Wignall T.K., 1985, "*Designing Optimal Strategies for Mineral Exploration*", Plenum Press, (New York).
- [5] U.S. Environmental Protection, 1994, "*Guidance for the Data Quality Objectives Process (QA/G-4)*", EPA/600/R-96/055, Office of Research and Development Washington, D.C. 20460.
- [6] Clayton C.R., Matthews M.C., Simons N.E., 1995, *Site investigation: a handbook for engineers*. Blackwell, Oxford.
- [7] Wingle W.L., 1997, "*Evaluating subsurface uncertainty using modified geostatistical*

## پی نوشت

- 
1. Indicator
  2. Threshold
  3. Indicator Kriging
  4. Data Quality Objectives
  5. Stage Logic
  6. Cumulative Distribution Function
  7. Probability Distribution Function
  8. Polymictic
  9. Indicator Variogram
  10. Anomaly
  11. Feed-Forward Backpropagation Network