

# مدل سازی جریان سیال در محیط ناپیوسته‌ی سنگی با استفاده از شبکه‌ی شکستگی مجزا

مرتضی جوادى اصطهباناتى (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مصطفی شریفزاده\* (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی معدن، دانشگاه کورنیل استرالیا

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۳)  
دوره ۲-۳، شماره ۳، ص. ۱۰۷-۱۱۶

در این نوشتار، ضمن تشریح مبانی جریان سیال و روش‌های مدل‌سازی رفتار هیدرولیک در محیط‌های سنگی، مطابق‌ترین روش برای مدل‌سازی جریان سیال در محیط ناپیوسته‌ی سنگی و برای مسائل میدان نزدیک، انتخاب و توسعه داده شده است. بدین منظور، یک کد محاسباتی به نام FNETF برای ساخت شبکه‌ی شکستگی مجزا و تحلیل عددی جریان سیال در شبکه‌ی شکستگی توسعه داده شده است. در ادامه، این کد محاسباتی با استفاده از داده‌های میدانی مربوط به وضعیت شکستگی‌ها و آب زیرزمینی در اطراف مغار نیروگاه پروژه تلمبه‌ی ذخیره‌ی سیاه‌بیشه اعتبارسنجی و درنهایت، با استفاده از این کد محاسباتی و داده‌های میدانی، رفتار جریان آب ورودی به داخل مغار نیروگاه مدل‌سازی شده است. نتایج این مدل‌سازی با نتایج میدانی تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی شکستگی مجزا، شبیه‌سازی جریان، شکستگی‌های سنگی، دهانه‌ی هیدرولیک، سیاه‌بیشه، FNETF.

## ۱. مقدمه

رابطه با توزیع نامنظم شکستگی‌ها در توده‌ی سنگ، شرایط مرزی و تفسیر نتایج همراه هستند.<sup>[۷-۵]</sup> روش‌های غیرمستقیم برای تعیین خواص معادل، شامل روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی،<sup>[۸-۱۴]</sup> است. روش‌های تحلیلی برای مدل‌سازی محیط، سابقه‌ی طولانی دارد و برای سیستم‌های ساده و مدل‌های هندسی ساده‌ی شکستگی ارائه شده است.<sup>[۹،۸]</sup> مطالعات پژوهشگران مختلف نشان می‌دهد که روش‌های پیوسته‌ی مرسوم نسبت به اعمال صحیح تأثیر هندسه‌ی شکستگی‌ها در رفتار جریان دارای محدودیت‌های زیادی هستند،<sup>[۱۴-۱۶]</sup> و فقط در حالتی معتبر هستند که توده‌ی سنگ حاوی تعداد قابل توجهی شکستگی متقاطع باشد و فاصله‌داری شکستگی‌ها بسیار کوچک‌تر از ابعاد ناحیه‌ی آزمایش (برای آزمایش‌های برجا) و یا سازه‌ی زیرزمینی (برای بررسی جریان در اطراف سازه) باشد.<sup>[۱۴]</sup> در حقیقت تداخل مؤثر هیدرولیکی تحت تأثیر ارتباط و تقاطع شکستگی‌های موجود در دامنه است،<sup>[۱۷،۱۵]</sup> و تقاطع بین شکستگی‌ها تابع پیچیده‌ی از فراوانی شکستگی‌داری (تعداد شکستگی در واحد سطح یا حجم)، اندازه (طول یا سطح) و جهت‌داری شکستگی‌های موجود در دامنه است.<sup>[۱۸،۱۶]</sup> در روش‌های ناپیوسته تلاش بر این است که عوارض مؤثر در رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ به نوعی مدل‌سازی شوند.<sup>[۵]</sup> در این حالت با ایجاد یک مدل‌سازی هندسی از شکستگی‌ها که نشان‌دهنده‌ی مشخصات هندسی، تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در محیط است،<sup>[۱۹]</sup> و اعمال قوانین جریان در شکستگی‌ها، رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ مدل‌سازی می‌شود.<sup>[۲۰،۲۱]</sup>

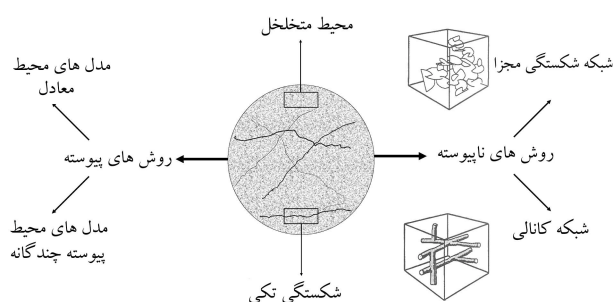
یکی از روش‌های مدل‌سازی هندسی شکستگی‌های توده‌ی سنگ روش شبکه‌ی شکستگی مجزا (DFN)<sup>۱</sup> است. این روش برای مدل‌سازی توده‌ی سنگ دارای

خواص هیدرولیکی توده‌ی سنگ، در فعالیت‌های عمرانی، معدنی، انرژی و زیست محیطی مثل دفن زباله‌های خطرناک، نفت و انرژی زمین‌گرمایی اهمیت زیادی دارد. مطالعه‌ی رفتار جریان سیال در توده‌ی سنگ با هدف افزایش کارایی مطالعات طراحی، اجرا و ایمنی در حفاریات زیرزمینی و روباز به عنوان یک موضوع مهم تحقیقاتی مطرح می‌شود.

ساده‌سازی و کاربردی‌سازی مسائل پیچیده عموماً با استفاده از روش‌های مدل‌سازی انجام می‌شود. برای مدل‌سازی رفتار پیچیده‌ی هیدرولیکی توده‌ی سنگ ابتدا لازم است که پارامترها و عوامل مؤثر در رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ بررسی شود. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری ماتریکس سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده‌ی سنگ بسیار ناچیز است و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند.<sup>[۲-۱]</sup> در این حالت رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ به وسیله‌ی شکستگی‌ها کنترل می‌شود و برآورد آن نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیکی شبکه‌ی شکستگی‌هاست. برای مدل‌سازی و بیان رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ از دو روش پیوسته و ناپیوسته استفاده می‌شود.<sup>[۴]</sup> در روش پیوسته با استفاده از خواص معادل توده‌ی سنگ، یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ ارائه می‌شود. خواص معادل را می‌توان با آزمایش‌های برجا و اندازه‌گیری مستقیم به دست آورد، ولی این روش‌ها زمان‌بر، گران‌قیمت و با عدم قطعیت‌هایی در

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۹، اصلاحیه ۱۳۹۱/۱۱/۸، پذیرش ۱۳۹۲/۲/۷.



شکل ۱. روش‌های مختلف بررسی و مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ به صورت شماتیک.

توده‌ی سنگ را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. در روش پیوسته با استفاده از خواص معادل توده‌ی سنگ، یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ و به صورت کاربردی ارائه می‌شود. خواص معادل تخلخل و شکستگی‌های موجود در توده‌ی سنگ با استفاده از آزمایش‌های برجا و یا به صورت غیرمستقیم با استفاده از روش‌های عددی و یا روش‌های تحلیلی ساده تعیین می‌شوند. با وجود سادگی روش‌های پیوسته مثل تخلخل دوگانه و نفوذپذیری دوگانه در بعد کاربرد عملی، این روش‌ها محدودیت‌هایی در رابطه با اعمال صحیح تأثیر هندسه شکستگی‌ها در رفتار جریان دارند. در حقیقت تخلخل مؤثر هیدرولیکی، که پارامتر اساسی مدل‌سازی است، تحت تأثیر ارتباط و تقاطع شکستگی‌های موجود در دامنه است و تقاطع بین شکستگی‌ها تابع پیچیده‌ی از فراوانی شکستگی‌داری (تعداد شکستگی در واحد سطح یا حجم)، اندازه (طول یا سطح) و جهت‌داری شکستگی‌های موجود در دامنه است.

در روش‌های ناپیوسته تلاش بر این است که پیچیدگی هندسی توزیع فضایی شکستگی‌ها در توده سنگ و تأثیر آنها در رفتار هیدرولیکی محیط سنگی به صورت صریح مدل‌سازی شود. در این حالت با ایجاد یک مدل‌سازی صریح هندسی از شکستگی‌ها (همانند روش شبکه‌ی شکستگی مجزا)، که نشان‌دهنده مشخصات هندسی، تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در محیط است، و اعمال قوانین جریان در شکستگی‌ها، رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ مدل‌سازی می‌شود.

### ۳. مدل‌سازی جریان در شبکه‌ی شکستگی مجزا

هدف از ایجاد شبکه‌ی شکستگی تصادفی، ایجاد یک مدل‌سازی هندسی و یا عددی از شکستگی‌هاست که در مقیاس دو بعدی و یا سه بعدی ایجاد می‌شود و نشان‌دهنده مشخصات هندسی، تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در محیط است.<sup>[۱۹]</sup> به منظور ساخت و تحلیل جریان در شبکه‌ی شکستگی یک کد محاسباتی به نام FNETF در محیط برنامه‌نویسی Matlab توسعه داده شده است. فرایند ساخت و تحلیل جریان در این کد محاسباتی در دو مرحله‌ی مختلف انجام می‌شود، که الگوریتم کلی این کد محاسباتی در شکل ۲ نشان داده شده است. در ادامه، هر یک از این مراحل توضیح داده شده است.

#### ۱.۳. ساخت شبکه‌ی شکستگی

در حالت کلی ساخت شبکه‌ی شکستگی مجزا با استفاده از مشخصات هندسی شکستگی‌های موجود در دامنه و با استفاده از شیوه‌ی شبیه‌سازی مونت کارلو انجام می‌شود. در این روش برای هر دسته شکستگی اصلی، تعدادی شکستگی مجزا با

شکستگی و با کاربردهای متنوعی مورد استفاده قرار گرفته است.<sup>[۲۰-۲۸]</sup> در این روش از آنالیزهای آماری و توزیع احتمالاتی مشخصات هندسی شکستگی‌ها استفاده می‌شود. تصادفی بودن خواص شکستگی‌های موجود در توده‌ی سنگ، لزوم استفاده از آنالیزهای آماری را نشان می‌دهد.<sup>[۲۹]</sup> برای ساخت مدل شبکه‌ی شکستگی مجزا از روش‌های آماری و شیوه‌ی شبیه‌سازی مونت کارلو برای ایجاد شکستگی‌ها در دامنه استفاده می‌شود.<sup>[۳۰، ۳۱]</sup> روش شبکه‌ی شکستگی مجزا یک ابزار غیرقابل جایگزین برای مدل‌سازی جریان سیال و پدیده‌های انتقال در موقعیت میدان نزدیک<sup>۲</sup> است، که تسلط و غلبه‌ی هندسه‌ی شکستگی به طور صریح و با جزئیات تقریب زده می‌شود. در موقعیت میدان نزدیک، بیش از یک شکستگی در دامنه‌ی مسئله وجود دارد، ولی این تعداد از شکستگی شرط لازم برای استفاده از محیط معادل را ایجاد نمی‌کند و باید از شبکه‌ی شکستگی استفاده کرد.<sup>[۳۲، ۳۳]</sup> نکته‌ی کلیدی استفاده از شبکه‌ی شکستگی مجزا برای مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ، برآورد مناسب خواص هندسی شکستگی‌هاست.<sup>[۳۴، ۳۵]</sup> مهم‌ترین مشخصه‌ی هندسی شکستگی‌ها از نظر هیدرولیکی، مقدار دهانه‌ی شکستگی است؛ که عموماً دسترسی مستقیم به این مشخصه ممکن نیست.<sup>[۳۶، ۳۷]</sup> ولی می‌توان با استفاده از نتایج مربوط به اندازه‌گیری‌های حین اجرا، آزمایش‌های برجا و یا نتایج میدانی این مشخصه را برای شکستگی‌ها تقریب زد.<sup>[۳۸، ۳۹]</sup> با وجود این، این روش‌ها با عدم قطعیت‌هایی در رابطه با اندازه‌گیری، توزیع فضایی شکستگی، شرایط مرزی و تفسیر نتایج همراه هستند.<sup>[۷-۵]</sup> در این نوشتار، برای محاسبه‌ی دهانه‌ی هیدرولیک معادل شبکه‌ی شکستگی از مقادیر جریان آب ورودی به مغار نیروگاه و تکنیک کمیته‌سازی مجموع مربع خطا استفاده شده است.

هدف از این پژوهش افزایش فهم رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ و برآورد تأثیر خصوصیات هندسی شکستگی‌ها در رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ و مدل‌سازی مطلوب آن است. بدین منظور، ابتدا کد محاسباتی به نام FNETF برای ساخت شبکه‌ی شکستگی مجزا و تحلیل جریان آرام در شبکه‌ی شکستگی توسعه داده شده است. فرایند ساخت و تحلیل جریان در این کد محاسباتی در دو مرحله‌ی مختلف ساخت و تحلیل شبکه‌ی شکستگی مجزا و حل معادلات جریان سیال در شبکه (با استفاده از روش المان محدود) انجام شده است. در ادامه، داده‌های میدانی مربوط به وضعیت شکستگی‌ها و آب زیرزمینی در پروژه‌ی سد و نیروگاه سیاه‌بیشه مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از کد محاسباتی FNETF رفتار جریان آب ورودی به مغار نیروگاه مطالعه شده است.

### ۲. مدل‌سازی رفتار هیدرولیکی محیط‌های سنگی

برای مدل‌سازی رفتار پیچیده‌ی هیدرولیکی توده‌ی سنگ ابتدا لازم است عوامل مؤثر در رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ بررسی شود. به طور کلی در محیط‌های سنگی مسائل مربوط به انتقال و جریان سیال در این چهار فرایند فیزیکی بررسی می‌شود:

- الف) انتقال و جریان سیال در داخل یک درزه یا شکستگی،
- ب) انتقال و جریان سیال از طریق شبکه‌ی شکستگی،
- ج) انتقال و جریان سیال از طریق محیط سنگی متخلخل،
- د) عکس‌العمل بین محیط متخلخل و شکستگی‌ها.

برای مدل‌سازی و بیان رفتار هیدرولیکی توده‌ی سنگ از دو روش پیوسته و ناپیوسته استفاده می‌شود. شکل ۱، روش‌های مختلف بررسی رفتار هیدرولیکی

انجام می‌شود. در ابتدا یک نقطه در داخل دامنه به‌عنوان مرکز شکستگی و معمولاً با استفاده از توزیع پواسون انتخاب می‌شود. وجود مراکز شکستگی در نزدیکی گوشه‌های دامنه فیزیکی مسئله باعث خارج شدن شکستگی از دامنه فیزیکی می‌شود. برای در نظر گرفتن چگالی صحیح تعداد شکستگی، مدل مورد بررسی باید قسمتی از یک مدل ساخته‌شده بزرگ باشد تا چگالی تعداد شکستگی در گوشه‌ها و مرکز مدل مورد بررسی، با هم برابر باشند. در نتیجه معمولاً یک حاشیه‌ی خارجی<sup>۲</sup> در اطراف دامنه اصلی (شکل ۳ الف) در نظر گرفته می‌شود.

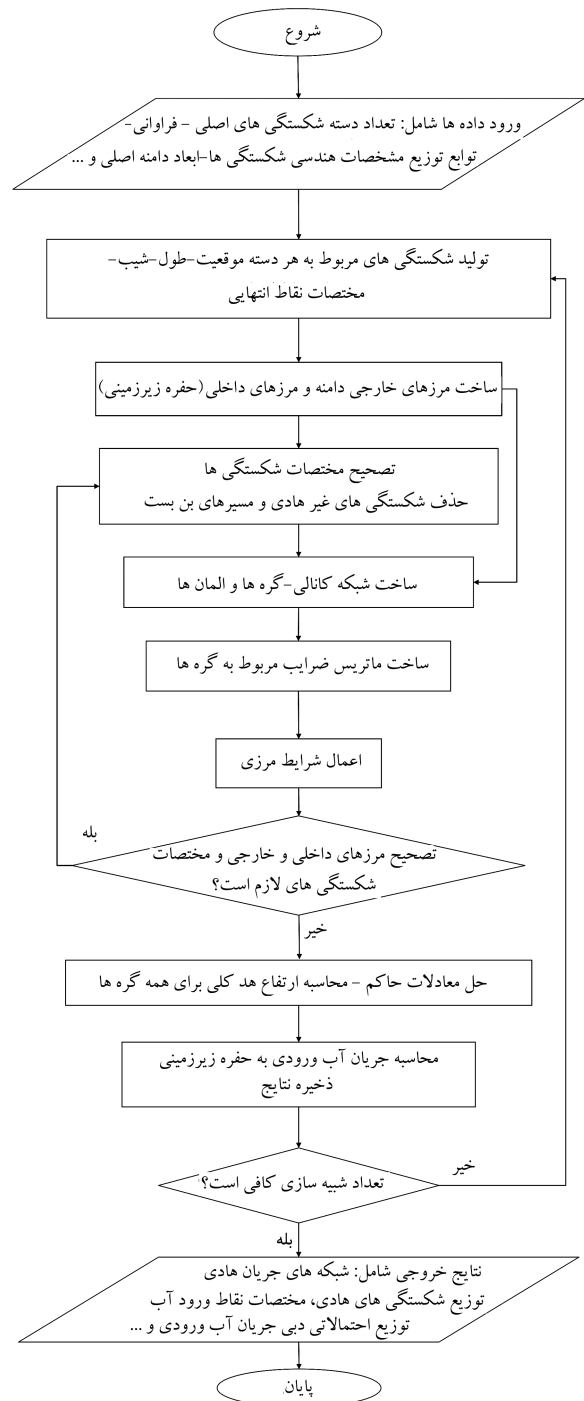
با استفاده از شیب و جهت شیب معرف دسته‌ی شکستگی، بردار عمود بر دسته‌ی شکستگی با استفاده از روابط هندسی محاسبه می‌شود. برای تعیین جهت‌داری شکستگی تصادفی، با استفاده از تابع توزیع فشر یک مقدار  $\theta$  به‌عنوان زاویه‌ی انحراف بردار عمود بر شکستگی تصادفی از مقدار متوسط جهت‌داری معرف دسته‌ی شکستگی به صورت رابطه‌ی ۱ انتخاب می‌شود:

$$\theta = \text{Arc cos}\left(\frac{\text{Ln}(\lambda - R_{U,1}^i)}{K} + 1\right) \quad (1)$$

که در این رابطه،  $R_{U,1}^i$  یک عدد تصادفی بین  $0^\circ$  و  $1$  از تابع توزیع یکنواخت و  $K$  ضریب فشر مربوط به دسته‌ی شکستگی است. زاویه‌ی انحراف  $\theta$  یک مقدار یک بعدی ارائه می‌کند که برای بیان جهت‌داری شکستگی تصادفی در فضای سه بعدی به تنهایی کافی نیست و باید به فرم سه بعدی تبدیل شود.<sup>[۱۹]</sup> یک زاویه‌ی فضایی برای چرخش از بردار عمود بر دسته‌ی شکستگی از توزیع یکنواخت در بازه‌ی صفر تا  $2\pi$  استخراج می‌شود. این فرایند با استفاده از مختصات فضایی و انتقال محورها انجام می‌شود. با استفاده از تابع توزیع تجمعی مربوط به طول رخنمون شکستگی یک مقدار تصادفی برای طول رخنمون در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از موقعیت مرکز شکستگی مختصات، دو نقطه‌ی انتهایی شکستگی محاسبه می‌شود. تولید شکستگی‌ها در دامنه تا زمانی ادامه می‌یابد که تعداد شکستگی موجود در دامنه به حد قابل انتظار برسد. برای هر شکستگی با توجه به تابع توزیع یک دهانه‌ی هیدرولیک انتخاب می‌شود. این فرایند برای هر یک از دسته‌های شکستگی به طور جداگانه و مستقل انجام و در نهایت کلیه‌ی شکستگی‌های موجود در دامنه ساخته می‌شوند. در مرحله‌ی بعد مرزهای داخلی مربوط به حفره زیرزمینی ساخته و شکستگی‌هایی که کاملاً در داخل حفره قرار دارند، حذف می‌شوند. سپس هندسه‌ی شکستگی‌هایی که مرزهای خارجی و یا داخلی را قطع کرده‌اند، اصلاح می‌شود. برای این منظور مختصات نقاط انتهایی شکستگی به گونه‌ی اصلاح می‌شوند که یکی از نقاط انتهایی شکستگی روی مرز خارجی و یا مرز داخلی واقع شود (شکل ۳).

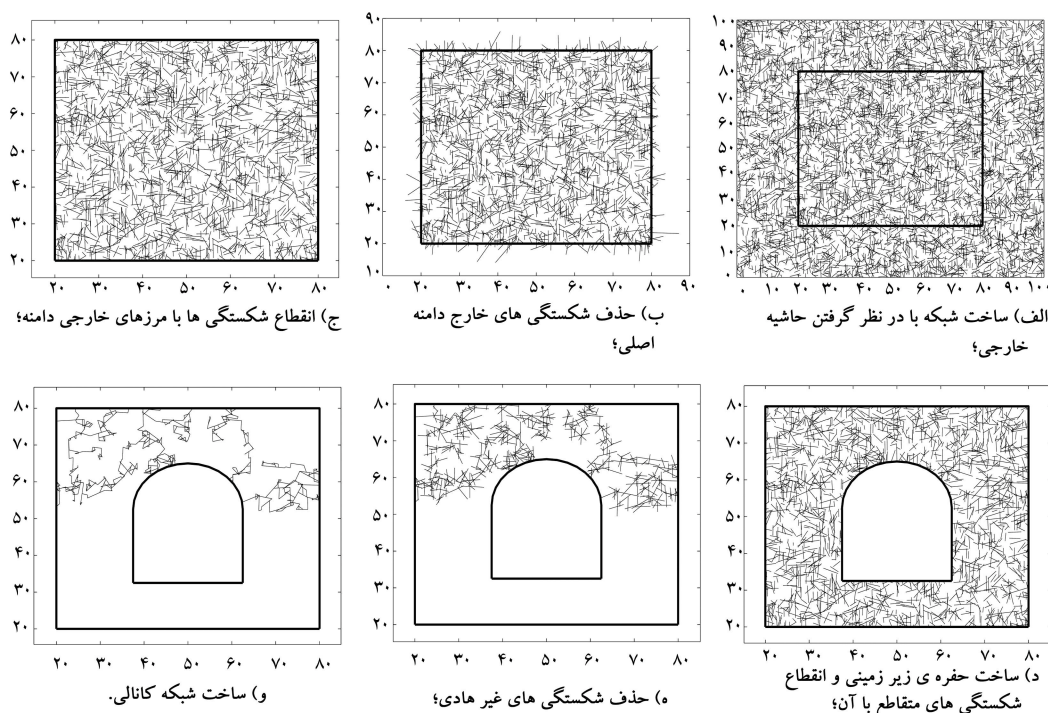
بعد از تصحیح هندسه‌ی شکستگی‌های موجود در دامنه، فصل مشترک (تقاطع) هر شکستگی با شکستگی‌های دیگر و مرزهای داخلی و خارجی تعیین می‌شود. محدود بودن طول شکستگی‌های موجود در دامنه باعث می‌شود که تعدادی از شکستگی‌ها به صورت غیرهادی ظاهر شوند و در محاسبات جریان نقشی نداشته باشند. این شکستگی‌ها به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- شکستگی‌هایی که هیچ فصل مشترکی با مسیرهای جریان (شبکه‌ی جریان) و مرزهای خارجی و داخلی ندارند. این شکستگی‌ها ممکن است به صورت تکی و یا در زیر شبکه‌های ایزوله‌شده ظاهر شوند.
- شکستگی‌هایی که فقط یک فصل مشترک با شبکه‌ی جریان دارند، که در اصطلاح به آنها مسیرهای بن بست اطلاق می‌شود.
- شکستگی‌هایی که در یک شبکه‌ی متصل به هم ظاهر می‌شوند، ولی بین مرزهای داخلی و خارجی ارتباط ندارند (زیر شبکه‌ی میانی<sup>۴</sup>) و یا فقط یک اتصال با یکی



شکل ۲. الگوریتم کد FNETF برای ساخت و تحلیل جریان از شبکه‌ی شکستگی‌ها به داخل حفریات زیرزمینی.

استفاده از توابع توزیع مربوط به مشخصات هندسی ساخته می‌شود. برای این منظور مشخصات هندسی مربوط به هر یک از دسته‌های شکستگی اصلی در ناحیه‌ی مورد بررسی به‌عنوان ورودی‌های اولیه به کد محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از ابعاد دامنه‌ی مورد بررسی، که معمولاً به صورت یک چهارضلعی در نظر گرفته می‌شود، یک دامنه‌ی کلی از محیط مورد بررسی ساخته می‌شود. فرایند تولید شکستگی‌ها در داخل دامنه‌ی مورد نظر به صورت تک به تک و برای هر دسته شکستگی مستقلاً



شکل ۳. مراحل ساخت و تحلیل هندسی شبکه ی شکستگی.

$$Q_{ij} = -\frac{wb_h^3 \Delta H}{12\mu \Delta l} = c_{ij} (H_i - H_j) \quad (2\text{الف})$$

$$c_{ij} = \frac{wb_h^3}{12\mu l_{ij}} \quad (2\text{ب})$$

از مرزهای داخلی یا خارجی دارند، که به اصطلاح به زیر شبکه های بن بست<sup>۵</sup> تعبیر می شوند.

در این روابط،  $H_i$  ارتفاع معادل انرژی (هد کللی) در گره  $i$ ،  $Q_{ij}$  دبی جریان عبوری از کانال (شکستگی) حد فاصل بین گره های  $i$  و  $j$  (که جریان از  $i$  به سمت  $j$  مثبت در نظر گرفته می شود)،  $c_{ij}$  ضریب هدایت هیدرولیکی کانال حد فاصل گره های  $i$  و  $j$ ،  $b_h$  دهانه ی هیدرولیکی کانال،  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال،  $l_{ij}$  طول کانال و  $w$  عرض کانال است، که برای مدل های دو بعدی برابر با ۱ در نظر گرفته می شود. در روابط مذکور ارتباط بین دبی جریان و دهانه ی کانال به صورت توان سوم (مکعب) است، که به قانون مکعب<sup>۶</sup> تعبیر می شود.<sup>[۲۲]</sup> برای هر گره از شبکه ی کانالی، رابطه ی تعادل جرم با در نظر گرفتن جریان ورودی به صورت مثبت و جریان خروجی به صورت منفی اعمال می شود. در این حالت، مسئله ی جریان در شبکه به صورت ماتریسی و به شکل رابطه ی ۳ بیان می شود:

$$[E] \{H\} = 0 \quad (3)$$

ماتریس ضرایب ( $E$ ) در معادله ی ۳، یک ماتریس متقارن است؛ که معمولاً هدایت گره<sup>۸</sup> نامیده می شود و بردار  $H$  بیان کننده ی هد کللی در گره هاست. مقدار آمین درایه ی قطری در ماتریس  $E$  برابر با حاصل جمع هدایت همه ی کانال های متصل به گره ی  $i$  و مقدار درایه های غیر قطری  $z_j$  برابر با منفی هدایت کانال حد فاصل بین گره ی  $i$  و  $j$  است. در صورتی که بین گره ی  $i$  و  $j$  یک کانال مستقیم وجود نداشته باشد، مقدار درایه ی  $z_j$  در ماتریس  $E$  برابر با صفر در نظر گرفته می شود. معادله ی ۳، براساس درجه ی آزادی گره ها گسسته سازی شده، که در نتیجه معادله ی ماتریسی به فرم رابطه ی ۴ تبدیل می شود:<sup>[۲۱]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_{ff} & E_{fc} \\ E_{cf} & E_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} H_f \\ H_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_f \\ Q_c \end{Bmatrix} \quad (4)$$

با حذف شکستگی های غیر هادی از شبکه ی شکستگی اولیه (شکل ۳ه)، مسیرهای پایه<sup>۶</sup> (خوشه ی نامحدود) جریان حاصل می شود که یک مفهوم توپولوژیکی را تداعی می کند.<sup>[۲۹]</sup> بعد از حذف شکستگی های غیر هادی، با توجه به فصل مشترک شکستگی ها، شبکه ی کانالی مسیرهای جریان در داخل دامنه ساخته می شود (شکل ۳و). در حقیقت، در این مرحله هر شکستگی دست کم دو فصل مشترک با سایر شکستگی ها و یا مرزهای داخلی و خارجی خواهد داشت، که قطعه ی شکستگی موجود بین دو فصل مشترک روی هر شکستگی به عنوان یک کانال جریان در نظر گرفته می شود. مختصات رئوس هر کانال محاسبه و دهانه ی شکستگی متناظر به عنوان دهانه ی کانال در نظر گرفته می شود.

رئوس هر کانال به عنوان یک گره ی جریان در نظر گرفته شده است و کانال ارتباطی بین دو رأس هر کانال به عنوان یک المان لحاظ می شود. مراحل ساخت و تحلیل هندسی شبکه ی شکستگی در شکل ۳ نشان داده شده است. در نهایت، همه ی کانال ها و گره های متناظر به عنوان دامنه ی محاسباتی در نظر گرفته شده است و معادلات جریان سیال برای این دامنه ی محاسباتی حل شده است.

### ۲.۳. حل معادلات جریان سیال در شبکه ی کانالی

ساده ترین مدل برای بیان رفتار جریان سیال درون شکستگی (کانال)، فرض صفحات موازی به عنوان دیواره های شکستگی است. با استفاده از این فرض و ساده سازی معادلات حاکم، دبی جریان عبوری از شکستگی به صورت رابطه های ۲الف و ۲ب محاسبه می شود:

#### ۲.۴. زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی ناحیه‌ی طرح

محل قرارگیری دو مغار نیروگاه و ترانسفورمر از لحاظ زمین‌شناسی متعلق به دوره‌ی پرمین زیرین بوده است و هر دو مغار در سازند درود متشکل از سنگ‌های رسوبی و آذرین قرار گرفته‌اند. لایه بندی‌های در سنگ‌های رسوبی به وضوح قابل رؤیت‌اند، که متوسط ضخامت لایه‌ها در حدود ۳۲ سانتی‌متر تخمین زده می‌شود. سنگ‌های رسوبی عمدتاً شامل ماسه‌سنگ کوارتزیتی، لای‌سنگ شیلی و سنگ آهک سیاه و سنگ‌های آذرین موجود عمدتاً از داسیت با معادل درونی کوارتزیدیوریت، بازالت اسپیلیتی و لاتیت با معادل درونی مونونیت تشکیل شده‌اند. تخلخل سنگ‌ها از کمینه‌ی ۰/۸٪ برای ماسه‌سنگ خاکستری (متوسط دانه) تا بیشینه‌ی ۳/۳٪ برای سیلتستون رسی متغیر است.<sup>[۳۴]</sup>

#### ۳.۳. شرایط مرزی

معمولاً در محاسبات جریان در شبکه‌ی شکستگی از سه نوع شرایط مرزی برای مرزهای جریان استفاده می‌شود. بر روی مرزهای خارجی معمولاً دو نوع شرایط مرزی متفاوت به صورت هد معلوم یا مرز نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود. برای مرزهای داخلی (مثل تونل یا حفاریات زیرزمینی) از شرط مرزی جریان آزاد استفاده می‌شود. عموماً هد کلی فشار ( $H$ ) به عنوان مؤلفه‌ی اصلی شرط مرزی معادلات جریان روی مرزهای خارجی با شرط مرزی هد معلوم اعمال و به صورت رابطه‌ی ۶ تعریف می‌شود:

$$H = h + z + w \quad (6)$$

که در این رابطه،  $h$  هد فشار به صورت ارتفاع ستون قائم سیال با وزن مخصوص  $\gamma$  است، که فشار  $p_0$  را ایجاد می‌کند.  $z$  هد ارتفاع است و به صورت ارتفاع قائم از یک سطح مبنا اندازه‌گیری می‌شود که مقادیر  $z$  در بالا و پایین سطح مبنا به ترتیب به صورت مثبت و منفی لحاظ می‌شود.  $w$  بیان‌کننده‌ی هد سرعت است که با استفاده از سرعت متوسط جریان ( $\bar{v}$ ) محاسبه می‌شود و معمولاً به دلیل کوچک بودن از معادلات حذف می‌شود. روی مرزهای داخلی با شرط مرزی جریان آزاد، هد فشار ( $h$ ) صفر در نظر گرفته می‌شود و مقدار هد کلی فقط شامل ترم هد ارتفاع ( $z$ ) خواهد بود.

#### ۴. نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌ی سیاه‌بیشه

##### ۱.۴. ساختار کلی و موقعیت طرح

ساختگاه طرح سد و نیروگاه تلمبه‌ی ذخیره‌ی سیاه‌بیشه واقع در ۱۲۵ کیلومتری شمال تهران و در ۱۰ کیلومتری شمال تونل کندوان در استان مازندران و در مسیر رودخانه‌ی چالوس قرار گرفته است. محل ساختگاه در نزدیکی روستای سیاه‌بیشه واقع و لذا طرح به همین نام خوانده شده است. این طرح در محدوده‌ی سد بالا بر روی رودخانه‌ی چالوس و در محدوده‌ی سد پایین در محل تلاقی رودخانه‌های چالوس و گرم‌رودبار در مجاورت روستای ورکلو واقع شده است.<sup>[۳۴]</sup> نیروگاه سیاه‌بیشه از نوع زیرزمینی و در حد فاصل سد‌های بالا و پایین در فاصله‌ی سه کیلومتری پایین دست سد بالا قرار گرفته است. مغار نیروگاه (PHC) با طول ۱۳۱ متر، عرض ۲۵ متر و ارتفاع ۴۰ متر و مغار ترانسفورماتور (TC) با طول ۱۶۰ متر، عرض ۱۶ متر و ارتفاع ۲۸ متر به عنوان بزرگ‌ترین سازه‌های زیرزمینی این طرح محسوب می‌شوند.

#### ۵. شبیه‌سازی جریان در شبکه‌ی شکستگی اطراف

##### مغارها

به منظور ساخت شبکه‌ی شکستگی مجزا، مشخصات هندسی مربوط به هر یک از دسته‌های شکستگی اصلی در ناحیه‌ی مورد بررسی به عنوان ورودی‌های اولیه به کد محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. بعد از ساخت شبکه‌ی شکستگی و تحلیل آن، با اعمال شرایط مرزی محاسبات جریان در شبکه انجام می‌شود. بر روی مرزهای خارجی از دو نوع شرایط مرزی متفاوت به صورت هد معلوم و یا مرز نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود که اعمال شرط مرزی به صورت هد معلوم نیازمند برآورد سطح آب زیرزمینی است. در نتیجه قبل از انجام شبیه‌سازی جریان باید مشخصات اولیه‌ی موردنیاز ارزیابی شود. مشخصات موردنیاز برای شبیه‌سازی جریان به دو دسته مشخصات هندسی شکستگی‌ها و سطح آب زیرزمینی (شرایط مرزی هیدرولیکی) تقسیم‌بندی شده است، که این پارامترها از داده‌های میدانی قابل دسترس به دست آمده است. در ادامه، هر یک از این مشخصات موردنیاز بررسی شده است.

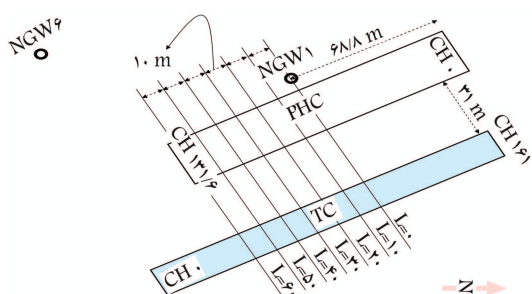
##### ۱.۵. مشخصات هندسی شکستگی‌ها

برای به دست آوردن مشخصات هندسی شکستگی‌ها، از ناپیوستگی‌های ثبت شده روی دیواره‌های حفاریات زیرزمینی (مغار نیروگاه) استفاده شده است. در حدود ۷۳۸۰ شکستگی ثبت شده بر روی دیواره‌های مغار نیروگاه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است؛ که در نهایت، تعداد ۳ دسته شکستگی اصلی  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$  و یک مجموعه شکستگی‌های تصادفی  $M_4$  به عنوان الگوی شکستگی داری توده‌ی سنگ درون‌گیر مغار نیروگاه در نظر گرفته شده است. مشخصات ۳ دسته شکستگی اصلی  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$  و مجموعه‌ی شکستگی‌های تصادفی  $M_4$  از قبیل فراوانی، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، ثابت فیشر ( $h$ ) و فراوانی شکستگی‌داری در جدول ۱ نشان داده شده است. برای هر یک از دسته‌های شکستگی  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$  و مجموعه‌ی شکستگی‌های تصادفی  $M_4$ ، طول رخنمون شکستگی‌های برداشت شده روی دیواره‌های مغار به عنوان یکی از مشخصه‌های اصلی هندسی دسته‌ی شکستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است، که برای طول رخنمون هر ۳ دسته‌ی شکستگی اصلی و مجموعه‌ی شکستگی‌های تصادفی، تابع توزیع احتمال لوگ نرمال پیشنهاد شده است.<sup>[۳۵]</sup>

جدول ۱. مشخصات آماری جهت داری و طول رخنمون دسته‌ی شکستگی‌های اصلی در محدوده‌ی مغار نیروگاه. [۳۵]

مشخصات آماری	دسته‌ی شکستگی			
	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$
فراوانی نسبی (%)	۳۷٫۸	۲۳٫۶	۱۱٫۸	۲۶٫۷
شیب/جهت شیب (درجه/درجه)	۵۷٫۰۱۶	۶۳٫۳۱۵	۵۷٫۱۹۸	—
ثابت فیشر (k)	۱۲٫۳۴	۲٫۶۴	۱۶٫۳۴	—
فراوانی شکستگی داری در واحد سطح *	۰٫۲۰۷	۰٫۱۲۹	۰٫۰۶۳	۰٫۱۴۴
میانگین طول رخنمون (متر)	۰٫۹۳	۰٫۹۳	۱٫۰۲	۱٫۰۰
انحراف استاندارد طول رخنمون (متر)	۰٫۴۴	۰٫۴۶	۰٫۴۲	۰٫۴۲

\* کل مساحت برداشت: ۱۳۴۷۴ مترمربع و تعداد کل دسته‌ی شکستگی‌های جزئی برداشت شده: ۷۳۸۰.



شکل ۴. مقاطع قائم مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان به همراه موقعیت گمانه‌های پیژومتر نسبت به مغارها.

## ۲.۵. سطح آب زیرزمینی

برای تعیین وضعیت آب زیرزمینی در محدوده‌ی مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر و برآورد سطح آب زیرزمینی، سه گمانه‌ی پیژومتری NGW۱، NGW۵ و NGW۶ در محدوده‌ی طرح بررسی شده است که موقعیت این گمانه‌ها در شکل ۴ الف نشان داده شده است. با استفاده از پیژومترهای نصب شده در این گمانه‌ها، قرانت سطح آب زیرزمینی در بازه‌های مختلف زمانی و در طول ماه‌های مختلف سال انجام شده است. داده‌های مربوط به سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های NGW۱ و NGW۵ از ژانویه‌ی ۲۰۰۶ به بعد و داده‌های گمانه‌ی NGW۶ از دسامبر ۲۰۰۷ به بعد اندازه‌گیری شده و قابل دسترس است. بیشینه‌ی اختلاف بین سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ به ترتیب در سامبر و مارس ۲۰۰۷ ثبت شده است، که مقادیر اختلاف به ترتیب ۲۰ متر و ۱٫۸- متر و متوسط اختلاف بین سطح آب زیرزمینی بین این دو گمانه ۹٫۵ متر است. بین گمانه‌های NGW۱ و NGW۵، بیشینه‌ی اختلاف بین سطح آب زیرزمینی به ترتیب در نوامبر ۲۰۰۸ و آگوست ۲۰۰۷ مشاهده شده است، که مقادیر اختلاف به ترتیب ۱۳۰ متر و ۸۰ متر و متوسط اختلاف بین سطح آب زیرزمینی بین این دو گمانه ۱۱۵ متر ثبت شده است. این تذکر لازم است که فاصله‌ی بین گمانه‌های NGW۱ و NGW۵ در راستای محور مغار نیروگاه در حدود ۹۵ متر و فاصله‌ی بین گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ در راستای محور مغار نیروگاه در حدود ۹۰ متر است.

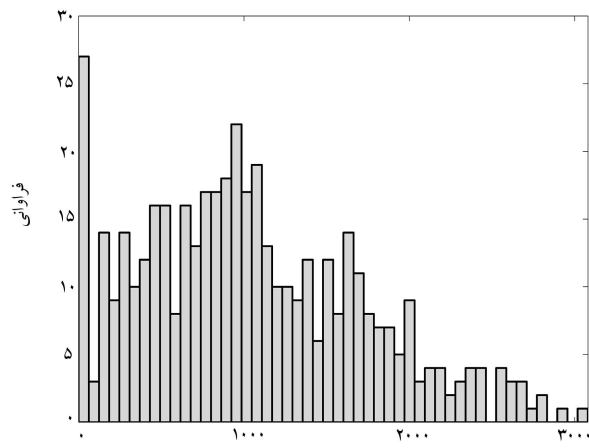
با توجه به سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های NGW۱ و NGW۵ و تراز سقف مغار نیروگاه (۱۸۷۵٫۲۵ متر بالای سطح دریا) مغار نیروگاه کاملاً زیر سطح آب زیرزمینی قرار دارد. سطح آب زیرزمینی در قسمت شمالی مغارهای نیروگاه و ترانسفورمر با گمانه‌ی NGW۵ و در قسمت‌های جنوبی با گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ کنترل می‌شود. بین تراز آب زیرزمینی در گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ اختلاف زیادی وجود ندارد، ولی اختلاف بین تراز آب زیرزمینی در گمانه‌های NGW۱ و NGW۵ نسبت به اختلاف بین تراز آب زیرزمینی در گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ بسیار قابل توجه است، که در فاصله‌ی بین گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ یک افت ناگهانی شدید در سطح آب زیرزمینی (ناپوستگی در سطح آب زیرزمینی) قابل انتظار است. [۳۶]

## ۳.۵. شبیه‌سازی جریان

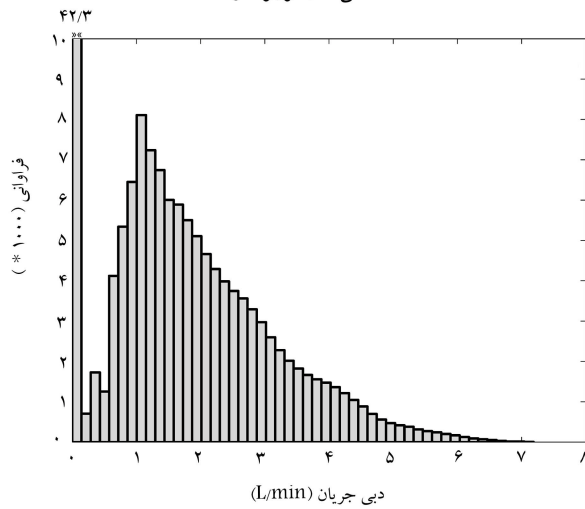
برای ساخت شبکه‌ی شکستگی در داخل دامنه از داده‌های میدانی مربوط به دسته‌ی شکستگی‌های اصلی موجود در جدول ۱ استفاده شده است. تعداد ۳ دسته شکستگی اصلی  $M_1$ ،  $M_2$  و  $M_3$  و یک دسته شکستگی تصادفی  $M_4$  به‌طور جداگانه در داخل دامنه ساخته شده است. مقادیر دهانه‌ی مکانیکی برای شکستگی‌های برداشت شده روی دیواره‌های مغار نیروگاه به صورت ۱ تا ۳ میلی‌متر ثبت شده است. به‌طور کلی دهانه‌ی هیدرولیکی از دهانه‌ی مکانیکی شکستگی‌ها کمتر است، [۳۷] در نتیجه، مقدار دهانه‌ی هیدرولیکی در مرحله‌ی اول شبیه‌سازی برای همه‌ی دسته‌ها یکسان و برابر با مقدار ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به طبیعت آماری هندسه‌ی شکستگی‌ها (شکستگی‌ها)، برای یک تحلیل مناسب لازم است که فرایند شبیه‌سازی جریان در اطراف حفریات برای حالت‌های مختلفی از آرایش شکستگی‌های موجود در دامنه به گونه‌ی انجام شود که افزایش تعداد شبیه‌سازی‌ها در مقادیر میانگین و انحراف استاندارد نتایج خروجی تغییر چندانی (در این نوشتار ۱٪) ایجاد نکند. شبیه‌سازی برای حدود ۴۵ مدل هندسی متفاوت برای شبکه‌ی شکستگی اطراف مغارها انجام شده است.

با توجه به پایین بودن سطح داده‌های میدانی مربوط به سطح آب زیرزمینی، شبیه‌سازی جریان فقط برای قسمت جنوبی مغار نیروگاه انجام شده است. برای شبیه‌سازی جریان در شبکه‌ی شکستگی اطراف مغارها تعداد ۷ مقطع قائم به فاصله‌ی ۱۰ متر (در راستای محور مغارها) از یکدیگر و عمود بر محور مغارها در نظر گرفته شده است. فاصله‌ی این مقاطع در امتداد محور مغارها به‌عنوان شاخص مقطع در نظر گرفته شده است، که این مقاطع به صورت  $L = 0, 10, 20, \dots, 60$  نام‌گذاری شده‌اند (شکل ۴).

برای بررسی جریان در اطراف مغارها از یک دامنه‌ی جریان با عرض ۱۲۲ متر و ارتفاع ۱۲۹٫۷۵ متر استفاده شده است، که مغار نیروگاه با عرض ۲۵ متر و ارتفاع ۴۰ متر در گوشه‌ی پایین و سمت چپ دامنه و مغار ترانسفورماتور با عرض ۲۵ متر و ارتفاع ۲۸ متر در گوشه‌ی بالا و سمت راست دامنه‌ی جریان در نظر گرفته شده است (شکل ۵). برای مرزهای داخلی (دیواره‌های مغار) شرط مرزی جریان آزاد و مرزهای خارجی به‌صورت هد معلوم نظر گرفته شده است. شرایط مرزی اعمالی به دامنه و موقعیت مغارها نسبت به مرزهای دامنه در شکل ۵ نشان داده شده است. در قسمت جنوبی مغارها می‌توان سطح آب زیرزمینی را با استفاده از گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ تقریب زد. برای ارزیابی سطح آب زیرزمینی و تغییرات آن در محدوده‌ی جنوبی مغارها، تغییرات سطح آب زیرزمینی بین گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ به‌صورت خطی فرض شده است.



الف) تعداد شکستگی های فعال  
ب) تعداد شکستگی فعال موجود در دامنه؛

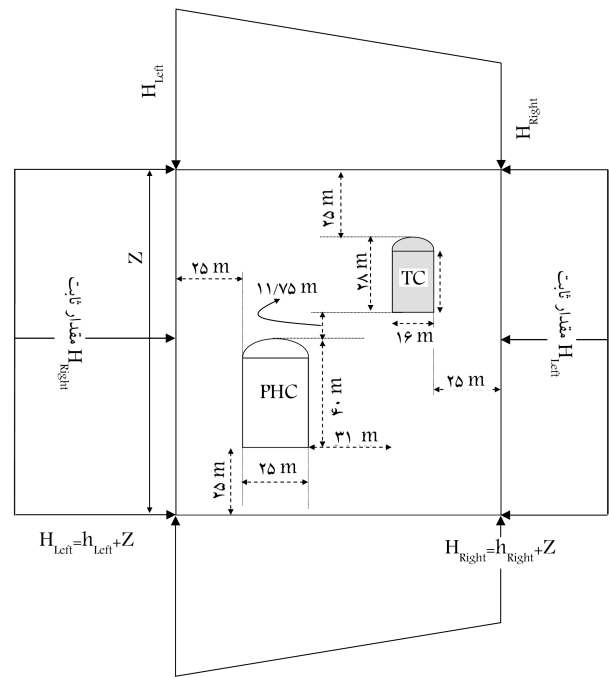


ب) دبی جریان آب ورودی به مغار نیروگاه (جریان آب ورودی برای یک متر از مغار بیان شده است).

شکل ۶. نمودار فراوانی نتایج شبیه‌سازی.

تعداد خاصی از نظر هیدرولیکی فعال هستند. این شکستگی‌های فعال به صورت یک خوشه‌ی نامحدود از شکستگی‌ها در دامنه‌ی جریان ظاهر می‌شوند و در حالتی که دست‌کم یکی از شکستگی‌های عضو خوشه‌ی نامحدود با دیواره‌های مغار تقاطع داشته باشد، مغار از نظر هیدرولیکی تراوا خواهد بود. همچنین در تعدادی از مدل‌های شبیه‌سازی شده هیچ شکستگی فعالی در دامنه وجود نداشته است. در این حالت مغار نیروگاه تراوا نیست و دبی جریان آب ورودی به مغار صفر خواهد بود.

از حدود ۴۵۰ مدل هندسی ساخته‌شده، تعداد ۳۳۱ مدل (۷۴٪ از کل مدل‌های هندسی) برای مغار نیروگاه، تراوایی نشان داده‌اند. بیشینه‌ی تعداد شکستگی فعال موجود در دامنه برابر با ۳۰۷۹ شکستگی است، که این موضوع نشان می‌دهد بیشینه‌ی ۳۸٪ از کل شکستگی‌های موجود در دامنه از نظر هیدرولیکی فعال هستند و مابقی شکستگی‌های موجود در توده‌ی سنگ در برگیرنده‌ی مغار نیروگاه عملاً از نظر هیدرولیکی غیرفعال‌اند و هیچ جریانی را از خود عبور نمی‌دهند، که این شکستگی‌ها در محل تقاطع با دیواره‌های مغار کاملاً خشک و بدون جریان آب خواهند بود. همچنین دامنه‌ی تغییرات مقادیر جریان آب ورودی به مغار نیروگاه برای همه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی شده (با دهانه‌ی ۱ میلی‌متر) از صفر تا ۷٫۱۸ Lit/Min و مقدار متوسط جریان ورودی به مغار نیروگاه ۱٫۵ Lit/Min است.



شکل ۵. مقطع قائم مغارها نسبت به یکدیگر به همراه شرایط مرزی مورد استفاده برای شبیه‌سازی جریان.

برای محاسبه‌ی شرایط مرزی در هر مقطع، سطح پیزومتریک گمانه‌ی NGW۱ به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و با استفاده از فاصله‌ی دو گمانه‌ی NGW۱ و NGW۶ در راستای عمود و موازی محور مغار نیروگاه، سطح آب زیرزمینی برای هر یک از مقاطع محاسبه شده است.

با توجه به تغییرات سطح پیزومتریک، گمانه‌ی NGW۱ در طول فصول مختلف سال، تعداد ۷ سطح مبنا با ترازهای ۱۹۹۵، ۱۹۹۷٫۵، ۲۰۰۰، ۲۰۰۲٫۵، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷٫۵، ۲۰۱۰ (از سطح دریا) در نظر گرفته شده است. برای هر سطح مبنا، شیب سطح آب زیرزمینی با توجه به تغییرات سطح آب زیرزمینی بین گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ محاسبه شده است. بدین منظور تعداد ۷ مقدار برای اختلاف سطح آب زیرزمینی در این دو گمانه با مقادیر ۵، ۷٫۵، ۱۰، ۱۲٫۵، ۱۵، ۱۷٫۵ و ۲۰ متر در نظر گرفته شده است، که در نهایت، نوع شرایط مرزی خارجی با هد معلوم به دست آمده است (۷ مقطع  $\times$  ۷ سطح مبنا  $\times$  ۷ شیب آب زیرزمینی).

برای تمام مدل هندسی ساخته شده این ۳۴۳ نوع شرایط مرزی مختلف اعمال و جریان آب ورودی به مغار محاسبه شده است. در نهایت، بیش از ۱۵۰۰۰۰ حالت ممکن هندسی و هیدرولیکی برای قسمت جنوبی مغارهای نیروگاه و ترانسفورماتور حاصل شده است.

#### ۴.۵. نتایج شبیه‌سازی

نمودار فراوانی تعداد شکستگی‌های فعال و دبی جریان آب ورودی (با فرض دهانه‌ی ۱ میلی‌متر) به درون مغار نیروگاه برای همه‌ی مدل‌های شبیه‌سازی شده به ترتیب در شکل‌های الف و ب نشان داده شده است. در هر مدل هندسی به طور متوسط تعداد ۸۶۷۲ شکستگی ساخته شده است، که با حذف شکستگی‌های موجود در داخل مغارهای نیروگاه و ترانسفورماتور، در هر مدل هندسی به طور متوسط تعداد ۷۹۷۵ شکستگی وجود خواهد داشت. از این شکستگی‌های موجود در دامنه، فقط

## ۵.۵. مقایسه‌ی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های میدانی

استفاده از روش شبکه‌ی شکستگی برای ارزیابی رفتار جریان در توده‌ی سنگ نیازمند برآورد مشخصات هندسی شکستگی‌های موجود در توده‌ی سنگ است. یکی از مهم‌ترین مشخصات هندسی شکستگی‌ها، مقدار دهانه‌ی شکستگی است که عموماً دسترسی به این پارامتر ممکن نیست. با وجود این، می‌توان با استفاده از نتایج مربوط به آزمایش‌های برجا و یا نتایج میدانی این پارامتر را برای شکستگی‌ها تقریب زد. در این مطالعه مقدار دهانه‌ی شکستگی با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده و با استفاده از داده‌های میدانی مربوط به دبی جریان آب ورودی به مغار نیروگاه تقریب زده شده است.

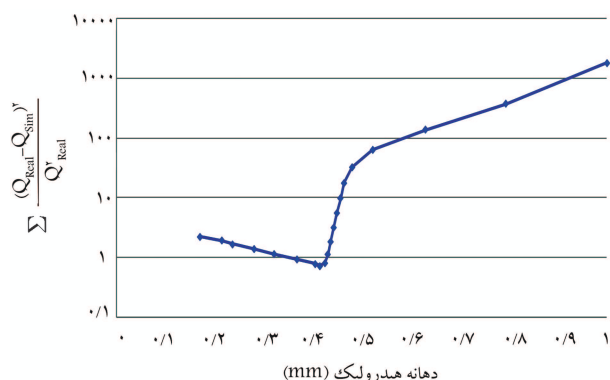
همان‌گونه که در قسمت قبل توضیح داده شد، برای محاسبه‌ی شرایط مرزی در هر دو حالت شبیه‌سازی از داده‌های سطح پیزومتریک گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ استفاده شده است. با توجه به اینکه داده‌های مربوط به گمانه‌ی NGW۶ از دسامبر ۲۰۰۷ به بعد اندازه‌گیری شده و قابل دسترس است، برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی، برای هر یک از مقاطع مختلف مغارها، نتایج شبیه‌سازی جریان، برای آن دسته از شرایط مرزی که با مقطع موردنظر و مقادیر سطح پیزومتریک گمانه‌های NGW۱ و NGW۶ در بازه‌ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ مطابقت دارند، از کل نتایج شبیه‌سازی استخراج شده و با داده‌های میدانی مربوط به دبی جریان آب ورودی به مغار نیروگاه مقایسه شده‌اند.

در فاصله‌ی بین کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵ مغار نیروگاه و در بازه‌ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸، متوسط دبی جریان آب ورودی به هر متر از مغار نیروگاه برای شبیه‌سازی جریان (دهانه‌ی ۱ میلی‌متر) و برای داده‌های میدانی به ترتیب ۲/۰۴ و ۰/۱۶۵ لیتر بر دقیقه است. برای این قسمت از مغار نیروگاه، نسبت بین دبی متوسط شبیه‌سازی به دبی متوسط واقعی ۱۲/۴ است. برای محاسبه‌ی دهانه‌ی هیدرولیک معادل برای شبکه‌ی شکستگی مقادیر جریان آب ورودی به کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵ مغار نیروگاه از تکنیک کمینه‌سازی مجموع مربع خطا استفاده شده است. بدین منظور مقادیر جریان آب ورودی در بازه‌ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ برای مقادیر مختلف دهانه‌ی معادل از ۰/۲ تا ۱ میلی‌متر محاسبه شده است. برای هر یک از مقادیر دهانه‌ی معادل، مجموع مربع خطا بین جریان آب ورودی شبیه‌سازی‌شده و مقادیر واقعی با استفاده از رابطه‌ی ۷ محاسبه و مقادیر آن در شکل ۷ نشان داده شده است:

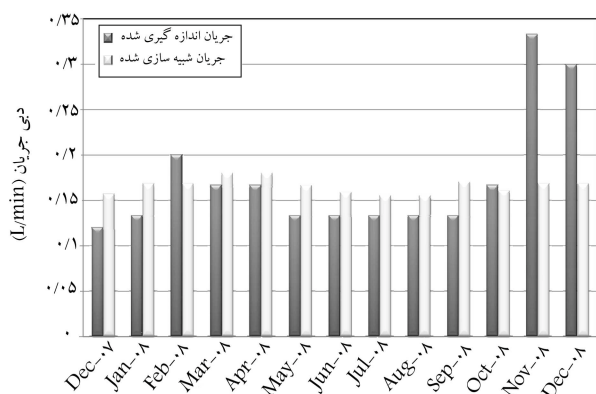
$$ERROR = \sum \frac{(Q_{Real} - Q_{Sim})^2}{Q_{Real}^2} \quad (7)$$

در این رابطه،  $Q_{Sim}$  و  $Q_{Real}$  به ترتیب مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده‌ی جریان آب ورودی به مغار نیروگاه برای ماه‌های مختلف در بازه‌ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ هستند. با توجه مقادیر خطای نشان داده‌شده در شکل ۷ مشاهده می‌شود که

کمترین خطای بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر واقعی جریان برای دهانه‌ی هیدرولیک ۰/۴۴ میلی‌متر حاصل شده است. در نتیجه، متوسط دهانه‌ی هیدرولیک برای شبکه‌ی شکستگی ۰/۴۴ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود. مقادیر دبی جریان شبیه‌سازی جریان آب ورودی به کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵ مغار نیروگاه در بازه‌ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ با استفاده از دهانه‌ی هیدرولیک ۰/۴۴ میلی‌متر محاسبه و با مقادیر واقعی دبی جریان در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین مقادیر دبی شبیه‌سازی‌شده با استفاده از دهانه‌ی هیدرولیک ۰/۴۲ میلی‌متر و مقادیر واقعی جریان آب در بازه‌ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ به همراه خطای نسبی نتایج شبیه‌سازی در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۷. مجموع مربع خطا بین مقادیر واقعی و نتایج شبیه‌سازی جریان ورودی به مغار نیروگاه برای کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵.



شکل ۸. دبی جریان ورودی به مغار نیروگاه برای مقادیر واقعی و نتایج شبیه‌سازی برای کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵ (مقادیر دبی بر حسب لیتر بر دقیقه و عرض یک متر از مغار بیان شده است).

جدول ۲. دبی جریان آب واقعی و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از دهانه‌ی هیدرولیک ۰/۴۲ میلی‌متر به همراه خطای نسبی نتایج شبیه‌سازی.

زمان												
Dec.	Nov.	Oct.	Sep.	Aug.	Jul.	Jun.	May.	Apr.	Mar.	Feb.	Jan.	Dec.
۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۸	۲۰۰۷
۰/۳۰۰	۰/۳۳۳	۰/۱۶۷	۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰/۱۳۳	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷	۰/۲۰۰	۰/۱۳۳	۰/۱۲۰
۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۴۵	۰/۱۵۴	۰/۱۴۰	۰/۱۴۰	۰/۱۴۳	۰/۱۵۰	۰/۱۶۲	۰/۱۶۲	۰/۱۵۲	۰/۱۵۲	۰/۱۴۱
۴۹/۴	۵۴/۵	۱۳/۱	۱۵/۲	۴/۸	۴/۸	۷/۴	۱۲/۶	۲/۶	۲/۶	۲۴/۱	۱۳/۹	۱۷/۹

مقادیر دبی بر حسب لیتر بر دقیقه و عرض یک متر از مغار بیان شده است.



## ۶. نتیجه گیری

استفاده شده است. همچنین الگوی شکستگی داری اطراف مغار با استفاده از داده های برداشت شده روی دیواره های مغار، برآورد شده و پارامترهای توزیع مربوط به خواص هندسی شکستگی های موجود در دامنه تعیین شده است. با توجه به طبیعت آماری هندسه ی شکستگی ها، برای یک تحلیل مناسب لازم است که فرایند شبیه سازی جریان در اطراف حفریات برای حالت های مختلفی از آرایش شکستگی های موجود در دامنه انجام شود، که در نتیجه شبیه سازی برای حدود ۴۵° مدل هندسی متفاوت برای شبکه ی شکستگی اطراف مغارها انجام شده است. با استفاده از ارزیابی نتایج شبیه سازی های انجام شده برای رفتار هیدرولیکی شبکه ی شکستگی برای شرایط مختلف، این نتایج ارائه شده است:

الف) روش شبکه ی شکستگی مجزا برای آنالیز جریان در حالت ناپیوسته و در موقعیت میدان نزدیک قابل استفاده است. با استفاده از مدل های هندسی شبکه ی شکستگی و آنالیز ناپیوسته ی جریان در توده ی سنگ، نتایج مناسبی از مدل سازی رفتار هیدرولیکی حاصل می شود. البته استفاده از این روش در میدان های بزرگ مقیاس با محدودیت های محاسباتی همراه است.

ب) با توجه به مقایسه ی داده های میدانی و نتایج شبیه سازی، برای شبکه ی شکستگی اطراف مغارهای نیروگاه، متوسط دهانه ی هیدرولیک ۰/۴۴ میلی متر پیشنهاد می شود.

ج) با استفاده از این مقدار، دهانه ی هیدرولیک ۰/۴۲ میلی متر، جریان آب ورودی به کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵ مغار نیروگاه شبیه سازی شده است، که نتایج این شبیه سازی های با نتایج میدانی تطابق خوبی را نشان می دهد، به گونه یی که مقادیر خطای نسبی بین نتایج شبیه سازی و مقادیر واقعی دبی جریان آب ورودی به مغار نیروگاه در بازه ی زمانی دسامبر ۲۰۰۷ تا دسامبر ۲۰۰۸ از ۲/۶٪ تا ۵۴/۵٪ تغییر می کند.

در این نوشتار، مدل سازی رفتار هیدرولیک توده ی سنگ دارای شکستگی با استفاده از مفهوم شبکه ی شکستگی مجزا مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک کد محاسباتی به نام FNETF برای ساخت شبکه ی شکستگی مجزا و تحلیل جریان آرام در شبکه ی شکستگی توسعه داده شده است. فرایند مدل سازی جریان در این کد محاسباتی در دو مرحله ی ساخت و تحلیل شبکه ی شکستگی مجزا و حل معادلات جریان سیال در شبکه (با استفاده از روش المان محدود) انجام می شود. در ادامه، داده های میدانی مربوط به وضعیت شکستگی ها و آب زیرزمینی در پروژه ی سد و نیروگاه سیاه پشته مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از کد محاسباتی FNETF رفتار جریان آب ورودی به مغار نیروگاه مطالعه شده است.

تخلخل ماتریکس سنگی توده ی سنگ در برگزیده ی مغارهای نیروگاه دارای مقادیر بسیار کوچکی است، که در نتیجه نفوذپذیری ماتریکس سنگی دارای مقادیر کوچک خواهد بود. در این حالت، رفتار هیدرولیکی توده ی سنگ به طور عمده با شکستگی ها کنترل می شود، که در نتیجه برای بررسی رفتار هیدرولیکی باید از روش ناپیوسته استفاده کرد. نکته ی کلیدی مدل سازی شبکه ی شکستگی در توده ی سنگ، برآورد مناسب خواص هندسی شکستگی هاست. یکی از مهم ترین مشخصات هندسی شکستگی ها، مقدار دهانه ی شکستگی است، که عموماً دسترسی به این پارامتر ممکن نیست. با وجود این می توان با استفاده از نتایج مربوط به آزمایش های برجا و یا نتایج میدانی این پارامتر را برای شکستگی ها تقریب زد. برای محاسبه ی دهانه ی هیدرولیک معادل برای شبکه ی شکستگی مقادیر جریان آب ورودی به کیلومتر ۰+۰۷۱ تا ۰+۰۸۵ مغار نیروگاه از تکنیک کمینه سازی مجموع مربع خطا

## پانویس ها

1. distinct fracture network
2. near field
3. buffer margin
4. post-network
5. dead end sub-network
6. backbone
7. cubic law
8. node conductance

## منابع (References)

1. Zimmerman, R.W. and Bodvarsson, G.S. "Hydraulic conductivity of rock fractures", *Transport in Porous Media*, **23**(1), pp. 1-30 (1996).
2. Billi, A. "Attributes and influence on fluid flow of fractures in foreland carbonates of southern Italy", *Journal of Structural Geology*, **27**(9), pp. 1630-1643 (2005).
3. Rapantova, N., Grmela, A., Vojtec, D., Halir, J. and Michalek, B. "Ground water flow modelling applications in mining hydrogeology", *Mine Water and the Environ.*, **26**(4), pp. 264-270 (2005).
4. Eaton, T.T. "On the importance of geological heterogeneity for flow simulation", *Sedimentary Geology*, **184**(3-4), pp. 187-201 (2006).
5. Lee, C.H. and Farmer, I., *Fluid Flow in Discontinuous Rocks*, Chapman & Hall, New York, 169 P. (1993).
6. Min, K. "Fractured rock masses as equivalent continua—a numerical study", PHD thesis, University of Stockholm, 187 P. (2005).
7. Novakowski, K., Bickerton, G., Lapcevic, P., Voralek, J. and Ross, N. "Measurements of groundwater velocity in discrete rock fractures", *Journal of Contaminant Hydrology*, **82**(1-2), pp. 44-60 (2006).
8. Snow, D.T. "Anisotropic permeability of fractured media", *Water Resour. Res.*, **5**(6), pp. 1273-1289 (1969).
9. Parsons, R.W. "Permeability of idealized fractured rock", *Soc. Pet. Eng. J.*, **10**, pp. 126-136 (1966).

10. Wittke, W., *Rock Mechanics Theory and Applications with Case Histories*, Springer, New York, 1075 P. (1990).
11. Long, J.C.S., Remer, J.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A. "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures", *Water Resour. Res.*, **8**(3), pp. 645-658 (1982).
12. Baghbanan, A. and Jing, L. "Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **45**(8), pp. 1320-1333 (2008).
13. Oda, M. "An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses", *Water Resour. Res.*, **22**(13), pp. 1845-1856 (1986).
14. Bear, J., Tsang, C.F. and De Marsily, G., *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, Academic Press, San Diego, 432 P. (1993).
15. Endo, H.K., Long, J.C.S., Wilson, C.R. and Witherspoon, P.A. "A model for investigating mechanical transport in fracture networks", *Water Resources Research*, **20**(10), pp. 1390-1400 (1984).
16. Long, J.C.S. and Witherspoon, P.A. "The relationship of the degree of interconnection to permeability in fracture networks", *Journal of Geophysical Research*, **90**(B4), pp. 3087-3098 (1985).
17. Zhou, Q., Salve, R., Liu, H., Wang, J.S.Y. and Hudson, D. "Analysis of a mesoscale infiltration and water seepage test in unsaturated fractured rock: Spatial variabilities and discrete fracture patterns", *Journal of Contaminant Hydrology*, **87**(1-2), pp. 96-122 (2006).
18. Xu, C., Dowd, P.A., Mardia, K.V. and Fowell, R.J. "A connectivity index for discrete fracture networks", *Mathematical Geology*, **38**(5), pp. 611-634 (2006).
19. Priest, S., *Discontinuity Analysis of Rock Engineering*, CHAPMAN & HALL, London, 473 P. (1993).
20. Andersson, J. and Deverstop, B. "Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures", *Water Resources Research*, **23**(10), pp. 1876-1886 (1987).
21. Rouleau, A. and Gale, J.E. "Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, **24**(2), pp. 99-112 (1987).
22. Baghbanan, A. and Jing, L. "Stress effects on permeability in a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture", *Int J Rock Mech Min Sci*, **45**(1), pp. 1320-1334 (2008).
23. Ubertosi, F., Delay, F., Bodin, J. and Porel, G. "A new method for generating a pipe network to handle channelled flow in fractured rocks", *C.R. Geoscience*, **339**(10), pp. 682-691 (2007).
24. Pouya, A. and Fouché, O. "Permeability of 3D discontinuity networks: New tensors from boundary-conditioned homogenization", *Adv. Water Resour.*, **32**(3), pp. 303-314 (2009).
25. Min, K.B., Jing, L. and Stephansson, O. "Determining the equivalent permeability tensor for fractured rock masses using a stochastic REV approach: Method and application to the field data from Sellafield", *Hydrogeol. J.*, UK, **12**(5), pp. 497-51 (2004).
26. Nam, H.T., Ravoof, A., Nguyen, T. and Kien, T. "Modelling of type I fracture network: Objective function formulation by fuzzy sensitivity analysis", *Mathematical and Computer Modelling*, **49**(7-8), pp. 1283-1287 (2009).
27. Bogatkov, D. and Babadagli, T. "Fracture network modeling conditioned to pressure transient and tracer test dynamic data", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **75**(1-2), pp. 154-167 (2010).
28. Huang, Y., Zhou, Z-F. and Dong, Z-G. "Simulation of solute transport in fractured network with a probability method", *Journal of Hydrodynamic*, **21**(5), pp. 714-721 (2009).
29. Adler, P. and Thovert, J., *Fractures and Fracture Network*, Kluwer academic Publisher, Dordrecht. 428 P. (1999).
30. Deverstop, B. and Andersson, J. "Application of the discrete fracture network concept with field data: Possibilities of model calibration and validation", *Water Resources Research*, **25**(3), pp. 540-550 (1989).
31. Long, J.C.S. and Billaux, D.M. "From field data to fracture network modeling: An example incorporating spatial structure", *Water Resources Research*, **23**(7), pp. 1201-1216 (1987).
32. Witherspoon, P.A., Wang, J.S.Y., Iwai, K. and Gale, J.E. "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture", *Water Resources Research*, **16**(6), pp. 1016-1024 (1980).
33. Iran Water and Power Resources Development Co. Website: <http://fa.iwpc.ir>
34. Basirgonbadi Report on Geology and Engineering Geology of Powerhouse Cavern. Lahmeyer-IWPCO, Document number: SBP-500-2000-BR-GT-RT-001-B0. (2005).
35. Javadi, M. "Modeling of water flow in rock mass using probabilistic method, case study of Siahbisheh Pumped-storage project", Master thesis, Amirkabir University of Technology, 128 P. (2009).
36. Javadi, M., Sharifzadeh, M., Shahriar, K. and Maleki, M. "Evaluating the complicated behavior of groundwater table and water inflow into Siahbishe Pumped-Storage caverns", *published at 6th IREG Conference*, pp. 545-554 (2009).
37. Barton, N., Bandis, S. and Bakhtar, K. "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, **22**(3), pp. 121-40 (1985).