

# بررسی رفتار منابع سنگ داغ خشک (HDR) در حین تحریک هیدرولیکی با استفاده از روش‌های عددی

محمود یزدانی\* (استادیار)

زهره ربیعی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

استخراج انرژی در سنگ‌های داغ و خشک (HDR)<sup>۱</sup>، که اغلب در همه جا در اعماق زمین یافت می‌شود، از روش‌های نوین استخراج انرژی زمین‌گرمایی است. این منابع به صورت طبیعی با رخداد‌های لرزه‌یی یا به صورت مصنوعی با تحریک هیدرولیکی می‌توانند به یک ناحیه‌ی نفوذپذیر تبدیل شوند. آگاهی از شکل، اندازه و نفوذپذیری ناحیه‌یی که توسط تحریک هیدرولیکی ایجاد می‌شود، برای ارزیابی عملی بودن پروژه و تعیین بهترین محل چاه‌های تزریق و تولید اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش عددی المان مجزا، که در برگزیده‌ی فرایندهای توأمان هیدرومکانیک نیز است، پاسخ مکانیکی سنگ به تحریک هیدرولیکی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین پارامترهای مؤثر برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی منبع همچون مقاومت جریان، اتلاف سیال و تزریق‌پذیری منبع استخراج و تحلیل می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل‌ها مؤید آن است که با افزایش فشار، مقاومت جریان کاهش، ولی اتلاف سیال افزایش یافته است. همچنین با افزایش دبی تزریق، مقاومت جریان کاهش می‌یابد. این نتایج با رفتار مشاهده‌شده در آزمایش‌های واقعی تحریک هیدرولیکی در منابع زمین‌گرمایی تطابق خوبی دارد.

واژگان کلیدی: HDR، سنگ داغ خشک، هیدرومکانیک، تحریک هیدرولیکی، UDEC.

## ۱. مقدمه

منابع زمین‌گرمایی سنگ داغ خشک به طور چشم‌گیری با منابع زمین‌گرمایی متداول که فقط در نواحی زمین‌شناختی خاص، که توسط طبیعت همراه با آب داغ یا بخار به وجود می‌آید، متفاوت است. منابع HDR منابعی مصنوعی در سنگ‌ها هستند، که به دست انسان نفوذپذیر می‌شوند و بنابراین هر حجم دلخواه از سنگ داغ خشک در پوسته‌ی زمین، در اعماق قابل دسترسی می‌تواند تبدیل به یک منبع مصنوعی شود. به طور کلی این سنگ‌ها نفوذپذیری کافی، که تضمین‌کننده‌ی گردش سیال در آن به منظور استخراج گرما باشد، ندارند. اما به صورت طبیعی با رخداد‌های لرزه‌یی یا به صورت مصنوعی با تحریک هیدرولیکی می‌توانند به یک ناحیه‌ی نفوذپذیر تبدیل شوند. ایده‌ی اولیه‌ی سنگ گرم و خشک، اولین بار در آزمایشگاه لس‌آلاموس در نیومکزیکو واقع در آمریکا (۱۹۷۰) مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش، توده‌ی سنگ کریستالی در اعماق زمین به عنوان یک بلوک همگن نفوذناپذیر فرض شده است و دو گمانه به وسیله‌ی ایجاد درزه‌های مصنوعی به یکدیگر متصل می‌شوند.

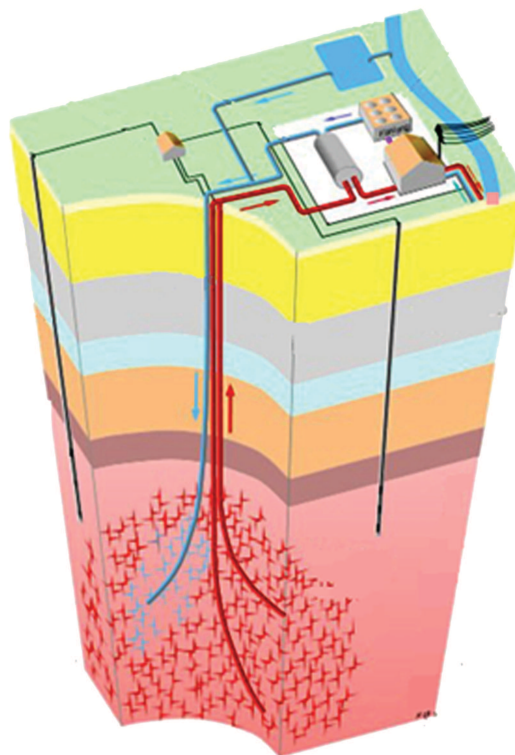
\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۲۴، اصلاحیه ۱۳۹۲/۵/۱۵، پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۲۷.

این سیستم به شیوه‌ی شکست هیدرولیکی<sup>۲</sup> ایجاد و منجر به تولید درزه‌های تقریباً قائم صفحه‌یی می‌شود. به این ترتیب از این درزه‌ها در زیر زمین به عنوان یک مبدل گرمایی استفاده کردند. سپس این روش توسط دانشمندان و مهندسان اصلاح و اولین بار در فنتون هیل آمریکا (۱۹۷۴) اجرا شد. آنها دریافته‌اند که درزه‌های طبیعی و از پیش موجود در این سنگ‌ها قابلیت اتصال دائمی به یکدیگر را داشته و توسط تحریک<sup>۳</sup> منبع قابل توسعه‌اند.<sup>[۱]</sup> به این منظور روش‌های تحریک هیدرولیکی یا شیمیایی برای افزایش اتصال هیدرولیکی بین چاه‌ها و شبکه‌ی درزه‌های منبع استفاده می‌شود. تحریک به وسیله‌ی تولید شکاف‌های گرمایی، به جز در مواردی که دمای منبع بسیار بالاست، به ندرت استفاده می‌شود.

روش تحریک شیمیایی شامل تزریق اسید در منبع با هدف برچیدن رسوبات موجود در درزه‌ها می‌شود. این روش بیش از یک قرن است که در صنعت نفت و گاز برای بهبود بهره‌وری چاه‌های نفت و گاز استفاده می‌شود.<sup>[۲]</sup>

در تحریک هیدرولیکی، از طریق تزریق یک سیال با فشار بالا در منبع، درزه‌های طبیعی تحت تنش، مجدداً باز می‌شوند یا بر روی هم می‌لغزند و در مواردی درزه‌های جدیدی شکل می‌گیرند (شکل ۱).<sup>[۳]</sup> گاهی اوقات هدف پروژه‌های



شکل ۱. شکل شماتیک از یک منبع HDR که با درزه‌های مصنوعی به وجود آورده است. آب از چاه تزریق وارد می‌شود، در منبع گردش می‌کند و از میان چاه تولید به صورت بخار یا آب داغ به سطح زمین باز می‌شود.

HDR، افزایش خروجی و عمر مفید سیستم‌های زمین‌گرمایی هیدروگرمایی موجود است.

در اواخر دهه ی ۱۹۸۰، ایده ی HWR<sup>۴</sup>، پیشنهاد شد. این روش تعمیمی از روش HDR است. به این معنا که در استخراج گرما، از هر دو سیستم درزه‌های مصنوعی و طبیعی، که در اصل با سیال طبیعی پر هستند، کمک گرفته می‌شود. منبع پروژهی شولتز یک مثال عملی از منابع HWR است.

پیش‌بینی میزان آب گرم تولیدی و ارزیابی پتانسیل منبع برای انرژی زمین‌گرمایی مسئله‌ی پیچیده است و هنوز یک چالش اساسی در صنعت زمین‌گرمایی محسوب می‌شود.<sup>[۲]</sup>

در سال‌های اخیر، مدل‌سازی تحریک هیدرولیکی و بررسی پارامترهای مؤثر در این فرایند مورد توجه تعدادی از پژوهشگران قرار گرفته است. در پژوهشی در سال ۱۹۹۸، پاسخ مکانیکی توده‌ی سنگ درزه‌دار در حین تحریک هیدرولیکی برای شرایط زمین‌شناختی مربوط به دو سایت فنتون هیل در آمریکا و شولتز در فرانسه، با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت.<sup>[۵]</sup> در سال ۲۰۰۶، نیز تأثیر اختلاف چگالی منبع و سیال تزریق شده بر توزیع فشار در منبع در حین تحریک هیدرولیکی با استفاده از کد عددی FRACAS مطالعه شد.<sup>[۶]</sup> همچنین در پژوهشی در سال ۲۰۰۷،<sup>[۷]</sup> با استفاده از کد المان محدود HEX-S آزمایش تحریک هیدرولیکی مدل و در یک بازه‌ی زمانی کوتاه رفتار هیدرولیکی و رخدادهای ریزلرزه‌یی<sup>۵</sup> مربوط به ۳ چاه واقع در منبع شولتز پیش‌بینی شد.

در سال ۲۰۱۰<sup>[۸]</sup> نیز با استفاده از کد المان مجرای ۳DEC، ناحیه‌یی گسل‌دار به صورت سه بعدی مدل و با اعمال تزریق دبی به صورت پله‌یی، تغییرات فشار و همچنین تغییرات مکانیکی در صفحه‌های مختلف گسلی به دست آورده شد.

در تمام پژوهش‌های مذکور، جزئی از رفتار یک منبع زمین‌گرمایی خاص (غالباً منبع شولتز) مورد بررسی واقع شده است، تا دقت و اعتبار کدهای عددی تولید شده با استفاده از داده‌های موجود در این سایت‌ها مورد سنجش قرار گیرد. همچنین در بیشتر پژوهش‌های انجام شده از روش عددی المان محدود استفاده شده است. با توجه به اینکه فرضیات پیوستگی کلی در فرمول‌بندی FEM لحاظ شده است، رفتار درزه‌ها و رشد آنها در مسائل مربوط به مکانیک سنگ با محدودیت‌هایی همچون مدل‌سازی چرخش بلوک‌ها، جداسازی کامل آنها و بازشدگی‌های بزرگ مقیاس درزه‌ها مواجه می‌شوند.

در این مطالعه، هدف روی یک منبع خاص نیست و سعی شده است تا تأثیر پارامترهای دخیل در رفتار منابع HDR به صورت جامع مورد ارزیابی قرار گیرند. از این رو علاوه بر دریافت پاسخ هیدرومکانیکی منبع به تحریک هیدرولیکی همچون توزیع دبی و فشار در سیستم و در محل چاه تولید، پارامترهای مؤثری چون مقاومت سیال، اتلاف سیال و تزریق‌پذیری و ارتباط آنها با بازشدگی درزه‌ها نیز استخراج شده‌اند. دستیابی به این پارامترها در انتخاب محل منبع، محل‌یابی چاه‌ها، انتخاب تجهیزات لازم برای استخراج گرما مانند ظرفیت مورد نیاز برای پمپ آب و در کل ارزیابی عملکرد هیدرولیکی منبع اهمیت ویژه‌یی دارند.

به این منظور، مقطعی افقی در عمق در نظر گرفته شده است و ۳ چاه، یکی در مرکز به عنوان چاه تزریق و ۲ چاه در طرفین چاه تزریق به عنوان چاه تولید مدل شده‌اند. تحریک هیدرولیکی سیستم با تزریق پله‌یی سیال در بازه‌های زمانی مختلف صورت گرفته است و مسیر جریان، مسیر نفوذ سیال، پروفیل‌های فشار و بازشدگی هیدرولیکی در بین چاه تزریق و چاه‌های تولید مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## ۲. خواص مهندسی منابع زمین‌گرمایی

به منظور ایجاد منبع، باید عملکرد مورد انتظار آن مورد ارزیابی قرار گیرد و با معیارهای اقتصادی سنجیده شود. این معیارها، دست‌کم ۲۰ سال پیش بنا نهاده شده است و تا حد زیادی تاکنون معتبر باقی مانده‌اند. این اهداف عبارت‌اند از:

- نرخ دبی کلی جریان: در حدود  $1/s$ ؛<sup>۱۰</sup>
- میزان اتلاف کلی سیال: کمتر از ۱۰٪؛
- مقاومت در برابر رانده شدن سیال به درون سیستم: در حدود  $0.1 \text{ MPa/Kg/s}$ ؛
- دمای منبع: بیش از  $190^\circ \text{C}$ ؛
- عمر بهره‌برداری از منبع بدون تحریک هیدرولیکی مجدد: ۲۰-۱۵ سال و افت دمایی معادل ۱۰٪ در پایان بهره‌برداری از آن؛
- سطح انتقال گرمایی مؤثر: بزرگ‌تر از  $2 \text{ Km}^2$ ؛
- حجم سنگ منبع: بیشتر از  $10^8 \text{ m}^3$ .<sup>[۹]</sup>

به زبان ساده‌تر برای اینکه یک سیستم HDR اقتصادی باشد، باید ظرفیت گرمایی ۱۰ تا ۱۰۰ مگاوات را دست‌کم در طول ۲۰ سال تولید کند. چنین اندازه‌یی از سیستم نیاز به یک سطح مبدل حرارتی معادل ۳ تا ۱۰ کیلومتر مربع و گردش سیالی در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ لیتر بر ثانیه دارد.<sup>[۱]</sup>

هدف از تحریک منبع یا ایجاد منبع، آغاز فرایندی است که طی آن ارتباط بین مسیرهای جریان مابین چاه تزریق‌کننده و چاه تولیدکننده باز می‌شود یا بهبود می‌یابد. این مسیرها باید مناطقی با سطوح به اندازه‌ی کافی بزرگ را برای انتقال گرمایی مورد نیاز به آب تزریق‌شده فراهم آورد. برای استخراج گرما در یک دمای قابل استفاده و در

تولیدی است. اگر بنا باشد که توان پمپ آب در میان منبع، از کسری از توان تولید شده توسط منبع تجاوز نکند، باید  $Z < 1 \text{ MPa.s/lit}$  باشد.<sup>[۱۰]</sup> مقادیر مقاومت بالاتر نیاز به ظرفیت پمپ بیشتری برای گردش سیال دارند. واضح است که گردش سیال با سطح فشار بالاتر موجب اتلاف وسیع سیال<sup>۷</sup> خواهد شد. این هدررفت ممکن است با نفوذ سیال به بافت سنگ رخ دهد.<sup>[۱۱]</sup> گروه تحقیقاتی مدرسه‌ی کامپورن، میزان  $Z$  را به منظور برآورده کردن مقاصد اقتصادی در یک منبع تجاری،  $0.1 \text{ MPa.s/lit}$  تخمین زده‌اند.

### ۲.۳. اتلاف سیال

یکی دیگر از پارامترهای مهم در منبع، اختلاف میزان سیال تزریق شده در یک چاه و تولید شده در چاه دیگر یا به عبارت دیگر نرخ آبی است که باید به سیستم اضافه شود. هدررفت آب به اندازه‌ی منبع، فشار عملیاتی و نفوذپذیری سنگ محیطی و همچنین احتمال اتصال به یک سیستم گسل مجاور بستگی دارد. هدر رفت منبع به ۳ جزء اصلی تقسیم می‌شود، که البته همه‌ی آنها در یک منبع وجود ندارد، ولی به درک بهتر رفتار هدررفت آب کمک می‌کند:

۱. اتلاف آب وابسته به زمان، از قسمت‌های پیرامونی منبع تحت فشار. این اتلاف در حین عملیات تحریک هیدرولیکی از میان بافت سنگی احاطه‌کننده‌ی منبع دچار اتساع و تحت فشار رخ می‌دهد و تابع دبی سیال در گردش<sup>۸</sup> از میان منبع نیست.

۲. جریان آب در میان گسل‌های نفوذپذیر یا در مجموعه‌ی درزه‌هایی که با یکدیگر یا با محل منبع تقاطع دارند. این حالت در هر دو سایت شولتز<sup>۹</sup> و هیجی‌اوری<sup>۱۰</sup> رخ داده است. پژوهشگران تفاوت‌هایی بین ساختارهای آب - زمین‌شناختی شولتز و هیجی‌اوری را در مقایسه با فنتون هیل خاطر نشان ساخته‌اند. به نظر می‌رسد که فنتون هیل از لحاظ هیدرولوژیکی از گسل‌های اصلی و منابع سنتی و هیدروگرمایی در نزدیک آن در امان است؛ در حالی که شولتز و هیجی‌اوری تقریباً عایق نیست و امکان اتصال منابع مصنوعی به منابع طبیعی، که به عنوان منابع داغ مرطوب (HWR) معرفی شده است، را فراهم می‌آورند.

۳. اتلاف آب به علت ذخیره‌ی آب در یک منبع منبسط شده. در واقع این یک اتلاف آب نیست؛ چرا که در نهایت قسمت اعظمی از این ذخیره‌ی آب، زمانی که فشار از روی منبع برداشته می‌شود<sup>۱۱</sup>، قابل برگشت خواهد بود. با این حال قسمتی از این ذخیره‌ی آب به علت اتساع دائمی ایجاد شده در درزه‌ها، مثلاً به علت لغزش، ممکن است غیر قابل برگشت باشد. در طول یک آزمایش در فنتون هیل (۱۹۸۶)، زمانی که در یک منبع با عمق  $3.5 \text{ Km}$  و فشار  $30 \text{ MPa}$  تزریق انجام شد، اتلاف آبی معادل  $5 \text{ lit/s}$  وجود داشت.

در منابعی که مقادیر اتلاف آب قابل توجه است، مجریان پروژه، فشاری را در منبع مدنظر قرار می‌دهند، که بهترین حالت تعادل بین مقاومت جریان پایین حاصل از افزایش فشار و اتلاف آب پایین حاصل از کاهش فشار را برقرار سازند.

### ۴. شبیه‌سازی فرایند توآمان<sup>۱۲</sup> هیدرومکانیکی - گرمایی<sup>۱۳</sup>

از آنجایی که آزمایش‌های تحریک هیدرولیکی که در اعماق زیاد انجام می‌شوند، بسیارگران هستند، مدل‌سازی عددی نقش بسیار مهمی را ایفاء می‌کند. عوامل حاکم بر رفتار یک منبع HDR عبارت‌اند از:

یک دوره‌ی زمانی مفید نیاز است تا یک سیستم جریان حلقه‌ی بسته برقرار شود. حجم سنگی که باید مورد تحریک قرار گیرد، بستگی به دمای متوسط منبع، دامنه‌ی دمای طرح مربوط به نیروگاه در سطح و کمینه‌ی دمای مجاز آن، عمر طرح نیروگاه و منبع، میزان سیالی که در میان سیستم گردش می‌یابد و درنهایت، چاه‌ها دارد.<sup>[۹]</sup>

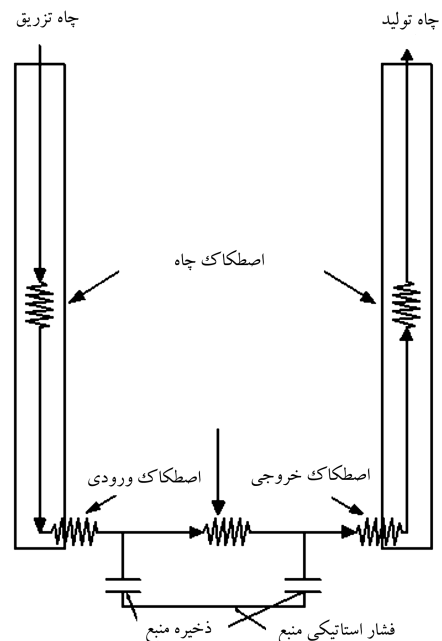
### ۳. پارامترهای هیدرولیکی منبع زمین‌گرمایی

پارامترهای هیدرولیکی منابع مهندسی به ۲ دسته تقسیم می‌شوند: پارامترهای عملیاتی و پارامترهای علمی وابسته به خواص آب. پارامترهای عملیاتی مستقیماً اندازه‌گیری می‌شوند، در حالی که پارامترهای علمی از پارامترهای عملیاتی و عموماً با کمک مدل‌ها حاصل می‌شوند. پارامترهای عملیاتی کلیدی در شکل ۲ نشان داده شده است. به منظور بررسی عملکرد هیدرولیکی منبع نیاز است تا عواملی چون مقاومت جریان منبع و میزان اتلاف آب در منبع به تفصیل مورد بررسی قرار گیرد.

### ۱.۳. مقاومت منبع

فشار سیال بحرانی برای به کارگیری در سیستم زیرسطحی تابعی از میدان تنش در عمق است، که از یک محل به محل دیگر متفاوت خواهد بود. مثلاً، برای یک منبع HDR، که در عمق  $5 \text{ Km}$  قرار گرفته است، فشار کمینه‌ی پمپ  $40 \text{ MPa}$  مورد نیاز است. اما عوامل اقتصادی، فشار اجرایی را محدود می‌کند.<sup>[۱]</sup> هدف از بهبود هدایت‌پذیری توده‌ی سنگ، فقط استخراج گرما از سطح تماس با آب نیست، بلکه کاهش مقاومت هیدرولیکی سیستم نیز مدنظر است. نیرویی که نیاز است تا سیال را در درون سیستم براند، در میان آن دچار افت می‌شود و این میزان افت باید به میزان کمینه برسد.<sup>[۹]</sup>

بنابراین، یکی از پارامترهای عملیاتی مهم، مقاومت جریان<sup>۶</sup> ( $Z$ ) خواهد بود. مقاومت جریان، اختلاف بین فشار تزریقی و فشار تولیدی در سر چاه، تقسیم بر دبی



شکل ۲. مدل شماتیک یک سیستم ساده تولید انرژی در منابع سنگ داغ خشک.<sup>[۱۰]</sup>

با تغییر شکل پذیر، که توسط درزه‌ها جدا شده‌اند، مدل می‌کند. این بلوک‌ها می‌توانند در میان ناپیوستگی‌ها متقابلاً بر یکدیگر اثر داشته باشند. دبی از یک دامنه با فشار  $P_1$  به دامنه‌ی دیگر با فشار  $P_2$  از طریق رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$q = k_c \cdot \Delta p \quad (1)$$

که در آن،  $k_c$  ضریب نفوذپذیری اتصال نقطه‌ی است و  $\Delta p$  از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \quad (2)$$

که در آن،  $\rho_w$  چگالی سیال،  $g$  شتاب جاذبه و  $y_1$  و  $y_2$  مختصات  $y$  مراکز دامنه‌هاست. قانون مکعب در درزه‌ی صفحه‌ی را می‌توان از رابطه‌ی ۳ به دست آورد:

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \quad (3)$$

که در آن،  $k_j$  ضریب نفوذپذیری درزه که مقدار تئوریک آن  $\frac{1}{12\mu}$  و  $\mu$  لزجت دینامیکی سیال است،  $a$  بازشدگی هیدرولیکی و  $l$  طول اختصاص داده شده به درزه بین دو دامنه است.<sup>[۱۶]</sup>

#### ۲.۴. رفتار هیدرولیکی جریان در درزه‌های سنگی

جریان در درزه‌های صفحه‌ی سنگ را می‌توان به صورت ایده‌آل با استفاده از مدل صفحات موازی بیان کرد. با حل تحلیلی جریان لزوج لایه‌ی، بین صفحات موازی، سرعت متوسط مطابق رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود:

$$V = k_f \cdot J \quad (4)$$

که در آن،  $J$  گرادیان هیدرولیکی و  $k_f$  هدایت پذیری هیدرولیکی درزه است، که از رابطه‌ی ۵ حاصل می‌شود:

$$k_f = \frac{a^3 \cdot g}{12\nu} \quad (5)$$

که در آن،  $a$  عرض درزه،  $\nu$  لزجت سینماتیکی سیال و  $g$  شتاب جاذبه است. بنابراین، دبی در واحد عرض را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۶ (قانون مکعب<sup>۱۶</sup>) بیان کرد:

$$q = V \cdot a = \frac{a^5 \cdot g}{12\nu} J \quad (6)$$

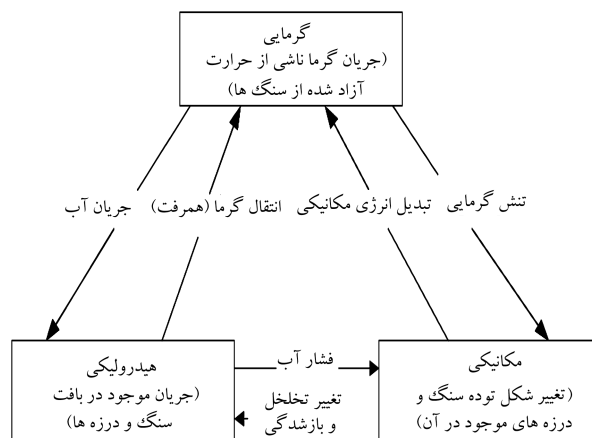
از آنجایی که فشار  $p$  برابر با  $\rho_w g h$  (هد:  $h$ ) و لزجت دینامیکی  $\mu$  برابر با  $\nu \rho_w$  است، بنابراین رابطه‌ی دبی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۷ نوشت:

$$q = -\frac{a^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta p}{l} \quad (7)$$

آزمایش‌های انجام شده در پژوهشی در سال ۱۹۶۹ نشان داد که این قانون برای جریان لایه‌ی در درزه‌های سنگی به اندازه‌ی کافی معتبر است.<sup>[۱۶]</sup>

بازشدگی اولیه در طول یک ناپیوستگی مقدار ثابتی نیست. لذا در تحلیل مسائل هیدرولیکی و مکانیکی معمولاً از یک بازشدگی متوسط و معادل استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۴، بازشدگی مکانیکی معادل در طول ناپیوستگی طبق رابطه‌ی تجربی ۸ محاسبه می‌شود (بارتون - بندیس ۱۹۸۵):

$$e_s = \frac{JRC}{\Delta} \left( \frac{\sigma_c}{JCS} - \sigma_{\nu} \right) \quad (8)$$



شکل ۳. فرایندهای توأمان گرمایی - هیدرولیکی - مکانیکی در توده‌ی سنگ درزه‌دار.<sup>[۱۱]</sup>

-- جریان هیدرولیکی در درزه‌ها و در توده‌ی سنگ پیرامونی (H).

-- انتقال انرژی گرمایی از طریق همرفت و هدایت (T).

-- تغییر شکل ارتجاعی سنگ ناشی از تغییرات گرمایی و هیدرولیکی و تغییر در میدان تنش طبیعی سنگ (M).

یک مدل سازی کامل این منابع شامل: فرایندهای توأمان بین انتقال گرما، جریان سیال و تنش - تغییر شکل در سنگ درزه‌دار می‌شود.<sup>[۱۲]</sup> عبارت «فرایندهای توأمان» بیان کننده‌ی آن است که پاسخ توده‌ی سنگ به آشفتگی‌های طبیعی و یا ساخت دست بشر مانند ساخت و اجرای محل دفن زباله‌های اتمی را نمی‌توان با در نظر گرفتن هر کدام از این فرایندها به صورت مستقل پیش بینی کرد.<sup>[۱۳]</sup> در شکل ۳، این مفهوم نمایش داده شده است.

مدل‌های توأمان THM بر اساس گرما و جریان سیال چند فاز در محیط‌های تغییر شکل پذیر و متخلخل بنا نهاده شده‌اند و اساساً بر پایه‌ی دو جزء اصلی مکانیزم توأمان توسعه یافته‌اند: تئوری حرارتی کشسانی جامدات و تئوری متخلخل کشسانی توسعه یافته توسط بایوت، که بر پایه‌ی قانون کشسانی هوک، قانون جریان داری در محیط‌های متخلخل و قانون هدایت گرمایی فوریه شکل گرفته‌اند.<sup>[۱۳]</sup> در این مدل‌ها، تخمین بازیابی گرمایی در سنگ درزه‌دار، نیاز به درک صحیحی از انتقال گرما به شکل هدایت در بافت سنگ، انتقال گرمایی همرفت در درزه‌ها و انتقال گرمایی بین بافت سنگ و سیال دارد. بعضی روش‌های حل بر اساس روش‌های پیوسته هستند. امروزه با پیشرفت‌های صورت گرفته، امکان مدل سازی درزه‌های مجزا نیز فراهم شده است.<sup>[۱]</sup>

در روش‌های پیوسته می‌توان از روش اجزاء محدود (FEM)<sup>۱۴</sup> و روش المان مجزاء (DEM)<sup>۱۵</sup> بدون در نظر گرفتن جریان در بافت سنگ استفاده کرد.<sup>[۱۳]</sup>

#### ۱.۴. تحلیل غیرخطی در UDEC

UDEC، یک کد المان مجزای دو بعدی است که در سال ۱۹۸۰ توسعه یافت و بعد از سال ۱۹۸۴ به صورت تجاری در دسترس قرار گرفت.<sup>[۱۴]</sup> این کد، قابلیت تحلیل فرایند توأمان گرمایی - مکانیکی (یک طرفه) برای سیستم بلوک‌های مجزا و تحلیل فرایند توأمان هیدرومکانیکی در میان ناپیوستگی‌ها را دارد. جریان سیال فقط در میان ناپیوستگی‌ها وجود دارد و برای بافت سنگ اثر پوروالاستیسیته در نظر گرفته نشده است.<sup>[۱۵]</sup> UDEC، محیط سنگی را به صورت مجموعه‌ی بلوک‌های صلب

دامنه‌ها حاصل می‌شود. دبی عبوری از اتصالات از روابط ۱ و ۳ محاسبه می‌شود. سپس فشارهای جدید در دامنه‌ها، با در نظر گرفتن جریان خالص ورودی به دامنه و تغییرات ممکن در حجم دامنه به دلیل حرکت‌های جزئی بلوک‌های مجاور محاسبه می‌شود. این فشار جدید از رابطه‌ی ۱۱ حاصل می‌شود:

$$p = p_0 + K_w Q \frac{\Delta t}{V} - K_w \frac{\Delta V}{V_m} \quad (11)$$

که در آن،  $p$  فشار دامنه در گام قبلی،  $Q$  حاصل جمع دبی‌های ورودی به دامنه از همه‌ی اتصالات اطراف،  $K_w$  مدول بالک سیال،  $\Delta V$  برابر  $V - V_0$ ،  $V_m$  برابر  $(V + V_0)/2$  که در آن  $V_0$  و  $V$  به ترتیب حجم جدید و قدیمی دامنه‌ها هستند. با به دست آوردن مقادیر جدید فشارهای دامنه، نیروهای اعمالی از طرف سیال بر لبه‌های بلوک‌های اطراف حاصل می‌شود. سپس این نیروها به سایر نیروهای مکانیکی در نقاط اتصال و نیروهای حاصل از بارهای خارجی، که به نقاط شبکه اعمال می‌شوند، اضافه می‌شوند. در نتیجه، تنش‌های کل در درون بلوک غیرنفوذپذیر و تنش نرمال مؤثر برای نقاط اتصال مکانیکی به دست خواهد آمد.

به منظور پایداری عددی الگوریتم جریان سیال صریح نیاز است که گام زمانی به مقدار  $\Delta t_f$  محدود شود (رابطه‌ی ۱۲):

$$\Delta t_f = \min \left[ \frac{V}{K_w \sum_i K_i} \right] \quad (12)$$

که در آن،  $V$  حجم دامنه و جمع ضریب نفوذپذیری، و  $K_i$  از نفوذپذیری همه‌ی نقاط اتصال احاطه‌کننده‌ی دامنه حاصل می‌شود.

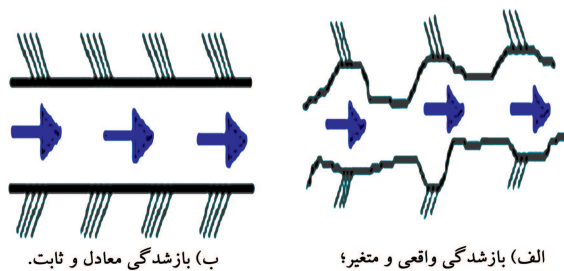
## ۵. تحلیل عددی یک منبع زیرزمینی

از آنجا که ساخت هندسی مدل در یک محیط سه بعدی درزه‌دار نسبتاً پیچیده است و تفسیر نتایج را مشکل می‌سازد، لذا به منظور درک بهتر نتایج و تفسیر آنها، مدل‌سازی در یک محیط دو بعدی صورت گرفته است. ضمن اینکه استفاده از یک مدل سه بعدی نیز در آینده مدنظر است.

در این مطالعه با استفاده از روش المان مجزاء و با به کارگیری نرم‌افزار UDEC، مقطعی افقی از یک منبع HDR، واقع در عمق زمین مورد بررسی قرار گرفته است. تزریق سیال از طریق چاه تزریق انجام شده و در حالات مختلف پارامترهای هیدرولیکی منبع مورد مطالعه قرار گرفته است.

### ۱.۵. هندسه‌ی مدل

در این مطالعه، مقطعی افقی به طول ۵۰ متر و عرض ۲۰ متر، که در مدل به عنوان یک بلوک تعریف شده در نظر گرفته شده است. دو دسته درزه‌ی عمود بر هم که با فواصل یکسان ۲/۵ متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند، در مدل تعریف شده‌اند. این مقطع در عمق ۳۰۰۰ متری از سطح زمین واقع است و ۳ چاه با قطر ۴۰ سانتی‌متر، یکی به عنوان چاه تزریق در مرکز و دو چاه دیگر به عنوان چاه تولید به فاصله‌ی ۱۰ متر از مرکز و در طرفین چاه تزریق تعریف شده‌اند (شکل ۵). بهترین ابعاد مورد استفاده برای مقطع، ۲۰ تا ۵۰ برابر فاصله‌ی درزه‌هاست، که با توجه به وضعیت تنش موجود، که در جهت  $X$  بیشتر از جهت  $Y$  است، انتظار می‌رفت که میزان تغییرات و آشفتنگی‌ها در جهت  $Y$  در مقایسه با جهت  $X$  کمتر باشد و با انجام تعدادی تحلیل این اطمینان حاصل شد. بنابراین به منظور کاهش زمان تحلیل‌ها، بعد



شکل ۴. شکل ناپیوستگی.

که در آن،  $e_0$  بازشدگی اولیه‌ی مکانیکی معادل بر حسب میلی‌متر و  $JRC$  و  $JCS$  به ترتیب ضریب زبری درزه و مقاومت فشاری جداره‌ی ناپیوستگی بر طبق معیار بارتون - بندیس و  $\sigma_c$  مقاومت فشاری بلوک سنگی سالم است.

بازشدگی اولیه‌ی هیدرولیکی معادل برای محاسبات هیدرولیکی ناپیوستگی‌ها را می‌توان از رابطه‌ی تجربی ۹ به دست آورد:

$$a_0 = \frac{e_0^2}{JRC^{2.5}} \quad (9)$$

که در آن،  $a_0$  و  $e_0$  به ترتیب بازشدگی اولیه‌ی هیدرولیکی و بازشدگی اولیه‌ی مکانیکی بر حسب میکرومتر هستند.

هنگامی که ناپیوستگی‌ها با مواد سست و ضعیف پر می‌شوند، انتخاب صحیح پارامترهای هیدرولیکی و مکانیکی برای ناپیوستگی‌های موجود در توده‌ی سنگ کار بسیار مشکلی است. در این حالت، خواص هیدرولیکی و مقاومتی ناپیوستگی‌ها به خصوصیات مواد پرکننده، جابجایی برشی ایجادشده، ماهیت سطح درزه و ضخامت مواد پرکننده بستگی دارد. برای مثال، نفوذپذیری ناپیوستگی، که با خاک رس پر شده است، برابر با نفوذپذیری رس است. هر دامنه، بیانگر حجم سیالی است که به عنوان تابعی از تغییر مکان قائم اتصال در دو انتهای دامنه تغییر می‌کند. به هراتصال، بازشدگی هیدرولیکی  $a$  نسبت داده می‌شود، که از طریق رابطه‌ی ۱۰، به جابجایی قائم  $u_n$  مرتبط می‌شود:

$$a = a_0 + u_n \quad (10)$$

که در آن،  $a_0$  بازشدگی درزه در تنش نرمال صفر و  $u_n$  جابجایی نرمال درزه است (علامت مثبت نشانگر بازشدگی درزه است).

۳.۴. فرایند توأمان دو طرفه‌ی هیدرولیکی - مکانیکی  $M \leftrightarrow H$   
آنچه که در فرایند توأمان هیدرومکانیکی رخ می‌دهد به صورت خلاصه به این قرار است:

فشار سیال در درزه‌ها بر اساس قانون ترواقی،  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + p\delta_{ij}$ ، در محاسبات مکانیکی اثر می‌گذارد. در این رابطه:  $p$  فشار سیال و  $\delta_{ij}$ ، دلتای کرونکر و  $\sigma'_{ij}$  و  $\sigma_{ij}$  تنش مؤثر و تنش کل هستند.

متقابلاً، بازشدگی هیدرولیکی ( $a$ ) بر اساس رابطه‌ی  $a = a_0 + u_n$  به تغییر شکل مکانیکی وابسته است. در این رابطه،  $u_n$  همان بازشدگی مکانیکی است. این تذکر لازم است که مقدار کمی‌یابی برای  $a$  در نظر گرفته می‌شود، که از آن با عنوان بازشدگی باقیمانده ( $a_{res}$ ) نام برده می‌شود.<sup>[۱۶]</sup> به طور کلی، این روند در UDEC طی می‌شود:

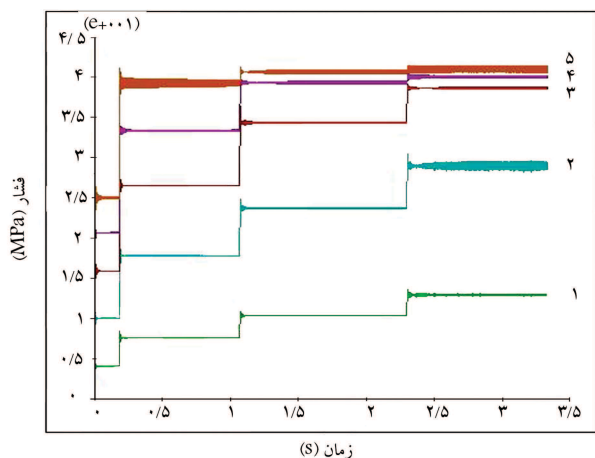
در هر گام محاسبات مکانیکی در UDEC، هندسه‌ی جدید سیستم مشخص می‌شود. بنابراین، مقادیر جدید بازشدگی‌ها برای همه‌ی نقاط اتصال و حجم همه‌ی

### ۳.۵. تحریک هیدرولیکی مدل

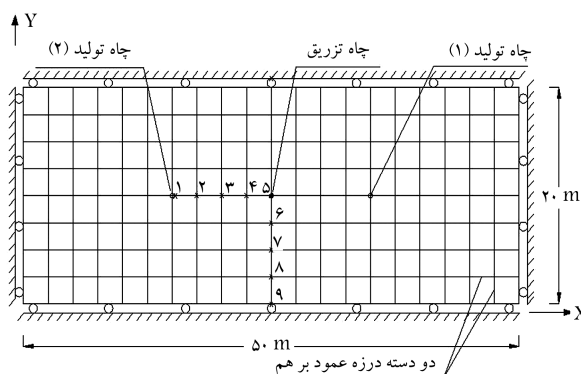
برای مدل‌سازی رفتار درزه‌ها از مدل تماس صفحه‌یی با معیار شکست لغزشی کولمب استفاده شده است. شرایط مرزی استفاده شده (شکل ۵) به گونه‌یی است که از جابجایی افقی مرزهای مدل جلوگیری به عمل آمده و تغییر فشار در مرزها آزاد گذاشته شده است. به دلیل عمق زیاد مدل، از حالت کرنش صفحه‌یی در آنالیز استفاده شده است. در ابتدا، مدل را تحت تنش‌های برجا آنالیز و سپس کلیه‌ی جابجایی‌های ناشی از تنش‌های برجا حذف شده است (جابجایی‌ها را معادل صفر قرار می‌دهیم)، تا به شرایط زمان کنونی بلوک دست یابیم. در آنالیز هیدرومکانیکی انجام شده، تحلیل جریان ناپایدار<sup>۲۰</sup> مورد استفاده قرار گرفته و فرض شده است که سیال تراکم‌ناپذیر است. به دلیل آنکه محیط مدل در واقع سنگ داغ خشک فرض شده است، فشار اولیه‌ی سیال در کل درزه‌های مدل، صفر منظور شده است. فرایند هیدرومکانیکی با محاسبه‌ی متناوب جریان سیال و پاسخ مکانیکی در برنامه اجرا شده است. گام زمانی در تحلیل جریان سیال ۱s-۰/۵ است و در هر گام زمانی ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ چرخه‌ی تحلیل مکانیکی انجام شده است. فرایند تزریق پله‌یی سیال به این شرح انجام و آنالیزهای هیدرومکانیکی با مشخصات فوق‌الذکر در همه‌ی مراحل اجرا شده است: در محل چاه تزریق، دبی با مقادیر ۱۰ l/s به مدت ۲۰۰ ثانیه، ۳۰ l/s به مدت ۱۲۰۰ ثانیه، ۱۲۰۰ l/s به مدت ۷۰ ثانیه و ۱۲۰۰ l/s به مدت ۱۲۰۰ ثانیه اعمال و در مجموع سیال در طول ۳۸۰۰ ثانیه در محل چاه تزریق شده است. در ابتدا بازشدگی اولیه برای کل درزه‌ها برابر با ۰/۲ mm قرار داده شده و سپس فقط در مسیر اصلی جریان (حد فاصل چاه تزریق و چاه‌های تولید)، بازشدگی اولیه از ۰/۲ mm تا ۰/۸ mm تغییر داده شده و با انجام فرایند فوق، مسیر جریان، مسیر نفوذ سیال، پروفیل‌های فشار و بازشدگی هیدرولیکی در بین چاه تزریق و چاه‌های تولید مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، مقاومت جریان و اتلاف سیال نیز ارزیابی شده است.

### ۴.۵. بررسی تغییرات پارامترهای هیدرولیکی

در طی ۴ مرحله‌ی تغییر دبی، فشار آب نیز در ۴ گام افزایش می‌یابد. تغییرات فشار آب در نقاط ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ (این نقاط در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند) ثبت شده و در طول زمان، تزریق سیال در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶. تغییرات فشار آب حفره‌یی در ۵ نقطه در طول زمان تزریق (بازشدگی اولیه در مسیر جریان = ۰/۲ mm).



شکل ۵. هندسه‌ی مدل: دو دسته درزه‌ی عمود بر هم، چاه تزریق، چاه‌های تولید و شرایط مرزی.

#### جدول ۱. مشخصات مکانیکی مدل.

مشخصات	مقدار
چگالی	۲۵۰۰ Kg/m <sup>۳</sup>
مدول یانگ	۶۰ GPa
ضریب پواسون	۰/۲
سختی نرمال	۲۰۰ GPa/m
سختی برشی	۲۰۰ GPa/m
زاویه‌ی اصطکاک	۳۵°
چسبندگی	۰
بازشدگی هیدرولیکی باقیمانده	۰/۲ mm
ضریب نفوذپذیری درزه	۸۳/۳۳ Pa <sup>-۱</sup> .s <sup>-۱</sup>

#### جدول ۲. وضعیت تنش‌های برجا.

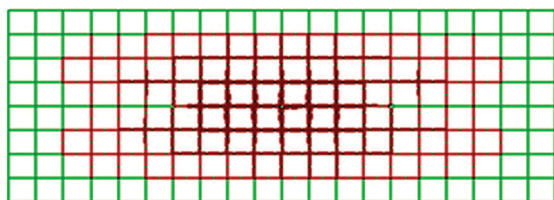
$\sigma_x$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_z$ (MPa)
۷۴/۲	۳۸/۲	۷۶/۲

مقطع در جهت Y کمتر در نظر گرفته شده است. همچنین علت انتخاب فاصله‌ی ۱۰ متر بین چاه تزریق و چاه‌های تولید، فقط محدود کردن ابعاد مدل عددی برای کاهش زمان محاسبات بوده است.

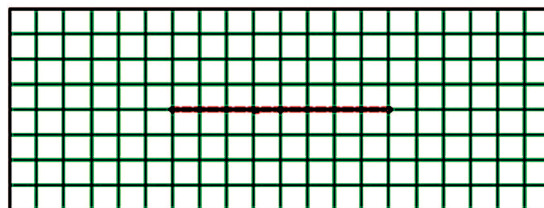
### ۲.۵. مشخصات مصالح و تنش‌های برجا

مقادیر لحاظ شده برای چگالی، مدول کشسانی، ضریب پواسون و زاویه‌ی اصطکاک داخلی سنگ و همچنین مقادیر سختی نرمال و برشی، زاویه‌ی اصطکاک درزه‌ها، ضریب نفوذپذیری درزه<sup>۱۸</sup> و بازشدگی هیدرولیکی باقیمانده<sup>۱۹</sup>، برای درزه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.<sup>[۱۷]</sup>

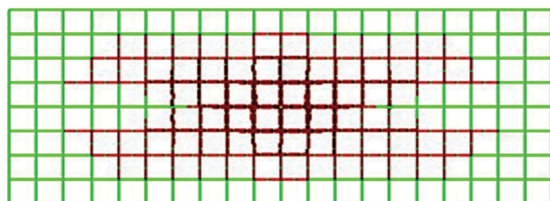
تنش‌های افقی در مقطع در جهت x و y با نسبت  $\sigma_y/\sigma_x = ۰/۵۲$  وارد شده است. علاوه بر تنش‌های افقی  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$ ، تنش قائم  $\sigma_z$  نیز اعمال شده است، که تقریباً برابر با وزن سربار بر روی مقطع است. وضعیت تنش‌های برجا نیز در جدول ۲ ارائه شده است.



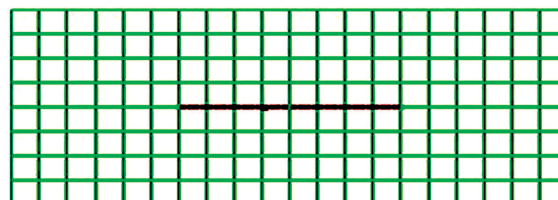
$a = 0.2 \text{ mm}$   
حد اکثر فشار حفره یی =  $40.91 \text{ MPa}$



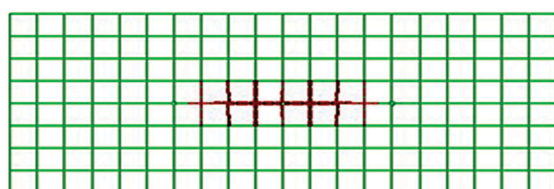
$a = 0.2 \text{ mm}$   
حد اکثر دبی جریان =  $33.35 \text{ l/s}$



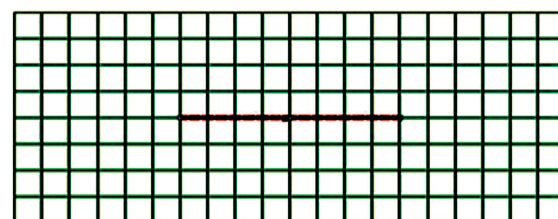
$a = 0.3 \text{ mm}$  (در مسیر بین چاه تزریق و چاه تولید)  
حد اکثر فشار حفره یی =  $40.86 \text{ MPa}$



$a = 0.3 \text{ mm}$  (در مسیر بین چاه تزریق و چاه تولید)  
حد اکثر دبی جریان =  $33.35 \text{ l/s}$



$a = 0.8 \text{ mm}$  (در مسیر بین چاه تزریق و چاه تولید)  
حد اکثر فشار حفره یی =  $6.85 \text{ MPa}$



$a = 0.8 \text{ mm}$  (در مسیر بین چاه تزریق و چاه تولید)  
حد اکثر دبی جریان =  $35 \text{ l/s}$

شکل ۸. میزان فشار آب حفره یی پس از  $3800$  ثانیه با بازشدگی اولیه یی  $0.2$ ،  $0.3$  و  $0.8$  میلی متر در مسیر غالب جریان.

شکل ۷. مسیر جریان در سیستم پس از  $3800$  ثانیه با بازشدگی اولیه یی  $0.2$ ،  $0.3$  و  $0.8$  میلی متر در مسیر غالب جریان.

در شکل های ۹ و ۱۰، پروفیل تغییرات دبی و فشار سیال در مسیر اصلی جریان بین چاه تزریق و تولید نشان داده شده است. با توجه به اینکه در قانون مکعب فشار آب حفره یی و بازشدگی اولیه یی درزه ها رابطه یی عکس دارند، این نمودارها نیز قابل توجیه خواهند بود.

#### ۲.۴.۵. مقاومت جریان و اتلاف سیال

در شکل ۱۱، تزریق پذیری (معکوس مقاومت جریان) به عنوان تابعی از دبی تزریق نشان داده شده است. همان گونه که انتظار می رفت، با افزایش نرخ تزریق سیال مقاومت جریان کاهش و در نتیجه تزریق پذیری افزایش یافته است. توجه به تغییرات تزریق پذیری در برابر دبی جریان نشان می دهد که با افزایش دبی، تزریق پذیری بسته به مقدار بازشدگی تا چند برابر افزایش یافته و بنابراین هدف از افزایش دبی به صورت پله یی، که همان افزایش اتصال بین درزه هاست؛ حاصل شده است. وابستگی مقاومت جریان و اتلاف سیال به فشار تزریق در شکل های ۱۲ و ۱۳ کاملاً آشکار است.

مثلاً با یک فشار تزریق در حدود  $35 \text{ MPa}$ ، اتلاف سیال فقط  $1 \text{ l/s}$ ، ولی در فشار  $40 \text{ MPa}$  اتلاف سیال در حدود  $11 \text{ l/s}$  بوده است، در حالی که در همین فشار، مقاومت جریان فقط  $1 \text{ MPa.s/l}$  و در فشار  $35 \text{ MPa}$ ، مقاومت جریان در حدود  $5.5 \text{ MPa.s/l}$  بوده است.

در شکل ۱۴، پارامترهای عملکرد هیدرولیکی به دست آمده از آزمایش های تحریک هیدرولیکی انجام شده در چاه های رزمانوس<sup>۲۱</sup> انگلستان در مقابل فشار تزریق نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، روند کلی تغییرات

#### ۱.۴.۵. تغییرات دبی و فشار سیال

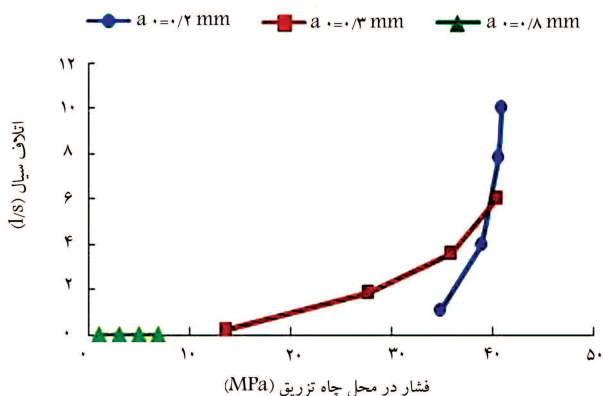
دبی تزریق تا  $70 \text{ l/s}$  رسانده شده و پس از گذشت زمان  $3800$  ثانیه از تزریق، دبی مسیر جریان استخراج شده است. مسیرهای به دست آمده از ۳ آنالیز در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در این شکل ها مشاهده می شود، با گذشت زمان و انجام تزریق پله یی، بازشدگی هیدرولیکی رخ داده است. به دلیل آنکه افزایش بازشدگی اولیه فقط بین مسیر چاه تزریق و تولید صورت پذیرفته است، عمده یی جریان نیز از همین مسیر عبور کرده است.

همان گونه که مشاهده می شود، در حالتی که بازشدگی اولیه یی تمام درزه ها  $0.2$  میلی متر باشد، مقدار دبی چاه های تولید جمعاً برابر  $66.7 \text{ l/s}$  ( $2 \times 33.35$ ) است، که حدود  $5\%$  اتلاف را نشان می دهد.

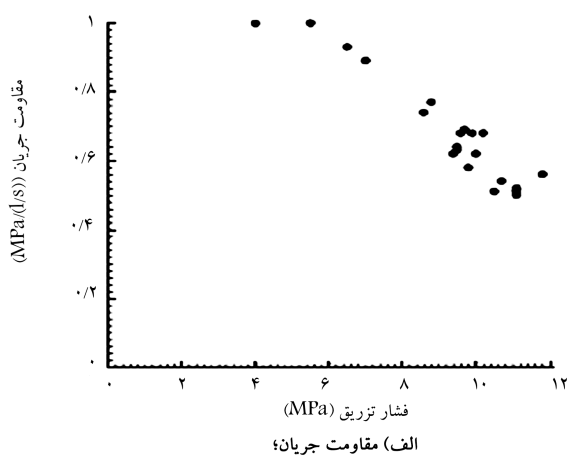
حال آنکه وقتی بازشدگی اولیه یی درزه ها در مسیر اصلی بین چاه تزریق و چاه های تولید به  $0.8$  میلی متر افزایش یافته است، مجموع دبی چاه های تولید  $70 \text{ l/s}$  شده است، که بیانگر اتلاف سیال صفر است. در شکل ۸، توزیع فشار آب حفره یی درزه ها در بازشدگی های اولیه یی مختلف نشان داده شده است.

همان طور که مشاهده می شود، وقتی بازشدگی اولیه یی درزه ها کم (حدود  $0.2 \text{ mm}$ ) است، فشار سیال در بسیاری از مسیرهای فرعی دورتر از مسیر اصلی جریان بین چاه تزریق و چاه های تولید افزایش یافته است. در حالتی که بازشدگی اولیه در مسیر اصلی به  $0.8 \text{ mm}$  رسانده شود، نه فقط سیال دیگر به درزه های فرعی وارد نمی شود، بلکه مقدار کلی فشار سیال در مسیر اصلی نیز بسیار کاهش می یابد (از حدود  $41$  به  $6.85$  مگاپاسکال می رسد).

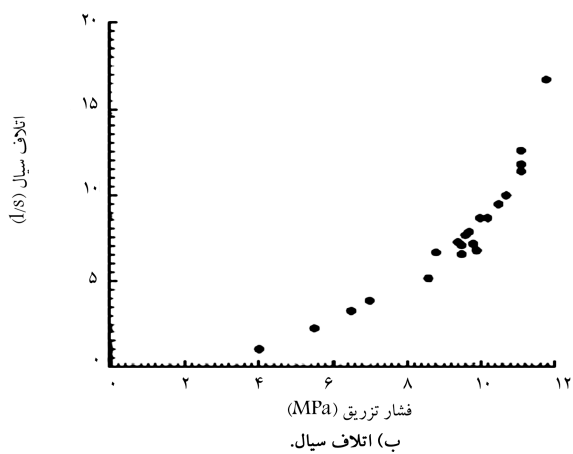




شکل ۱۳. اتلاف سیال به عنوان تابعی از فشار تزریق.



الف) مقاومت جریان؛



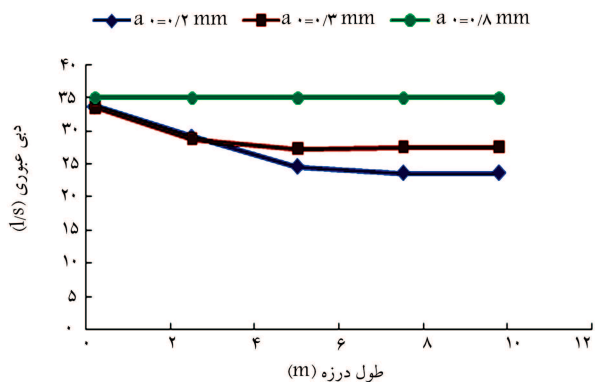
ب) اتلاف سیال.

شکل ۱۴. پارامترهای عملکرد هیدرولیکی در چاه‌های رُزمانوس در انگلیس به عنوان تابعی از فشار. [۱۰]

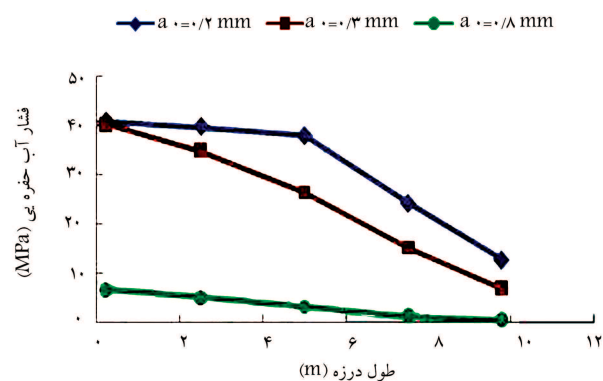
نمودارهای حاصل از تحلیل‌ها در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ هم خوانی خوبی با نمودارهای به دست آمده از آزمایش‌های واقعی در شکل ۱۴ دارد.

### ۵.۵. تحلیل حساسیت بازشدگی اولیه درزه‌ها

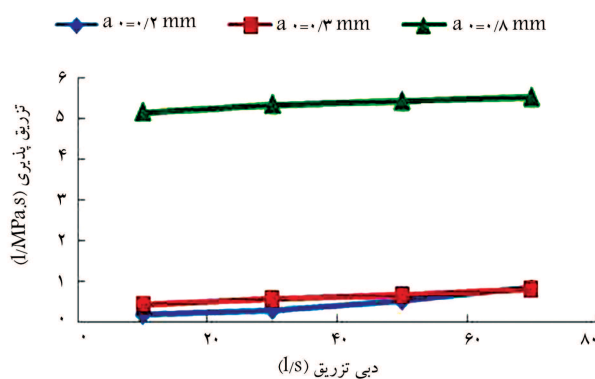
در این بخش تأثیر مقدار بازشدگی اولیه درزه‌ها بر روی سایر پارامترهای هیدرولیکی مانند بیشینه بازشدگی، بیشینه دبی خروجی از چاه تولید، بیشینه فشار آب و مقاومت جریان بررسی شده است. برای مطالعه اثر بازشدگی اولیه درزه‌ها،



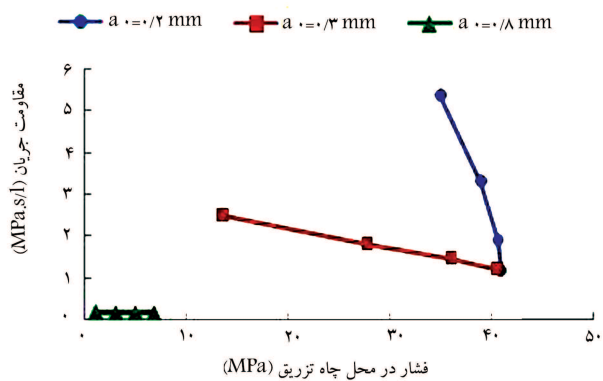
شکل ۹. تغییرات دبی عبوری در فاصله‌ی بین چاه تزریق و چاه تولید.



شکل ۱۰. تغییرات فشار آب حفره‌ی در فاصله‌ی بین چاه تزریق و چاه تولید.

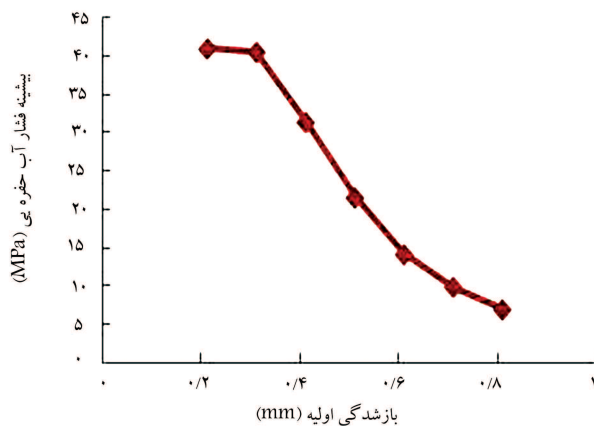


شکل ۱۱. تزریق پذیری به عنوان تابعی از دبی تزریق به ازاء بازشدگی‌های مختلف.

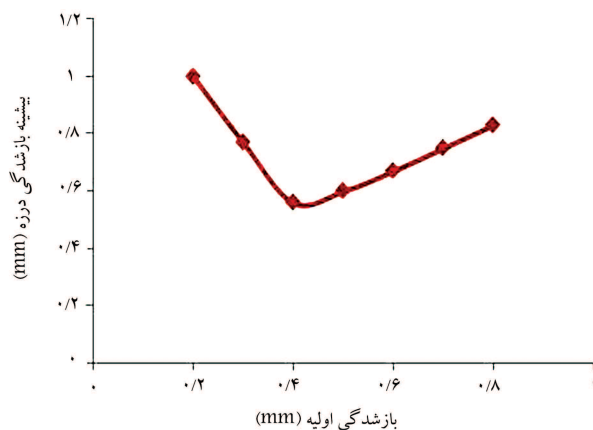


شکل ۱۲. مقاومت جریان به عنوان تابعی از فشار تزریق.

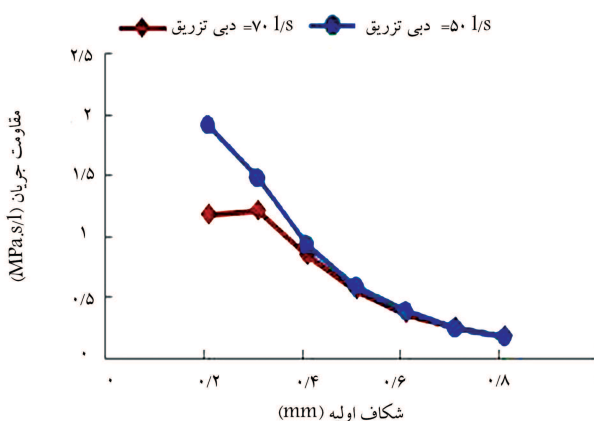




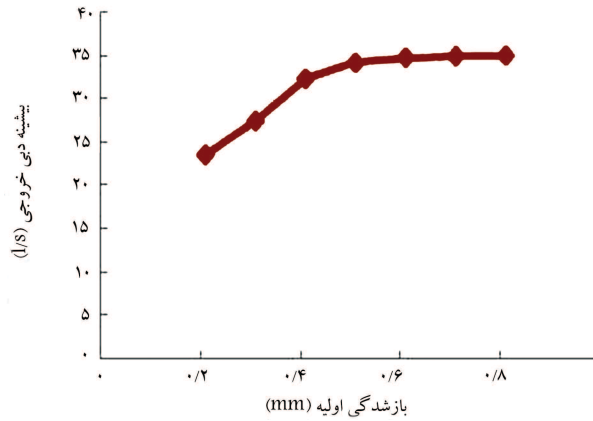
شکل ۱۵. بیشینه‌ی بازشدگی هیدرولیکی به‌عنوان تابعی از بازشدگی اولیه.



شکل ۱۶. بیشینه‌ی دبی خروجی به‌عنوان تابعی از بازشدگی اولیه.



شکل ۱۷. مقاومت جریان به‌عنوان تابعی از بازشدگی اولیه.



شکل ۱۸. مقاومت جریان به‌عنوان تابعی از بازشدگی اولیه.

شکل ۱۷ نشان داده شده است. در این نمودار نیز با افزایش بازشدگی اولیه، فشار آب حفره‌ی کاهش یافته است؛ چرا که در مقادیر بازشدگی کم، سیال برای جریان یافتن فشار زیادی به دیواره‌ها وارد کرده است و به عبارتی فشار آب حفره‌ی در درزه‌ی بالاتر است. اما هرچه بازشدگی اولیه افزایش یابد سیال راحت‌تر از قبل جریان یافته و فشار وارد شده به درزه‌ها از طرف سیال کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۸، با افزایش بازشدگی اولیه، مقاومت جریان کاهش می‌یابد. همچنین مقادیر بیشتر دبی در چاه تولید باعث کاهش مقاومت جریان می‌شود و این اختلاف برای مقادیر کمتر بازشدگی اولیه مشهودتر است. علت آن است که افزایش دبی در چاه تولید باعث افزایش دبی در چاه خروجی نیز می‌شود، در حالی که افت فشار به ویژه در مقادیر بازشدگی اولیه بالاتر، تقریباً نزدیک به مقادیر مرحله‌ی قبل است.

## ۶. نتیجه‌گیری

پژوهش انجام شده، پاسخ هیدرومکانیکی توده‌ی سنگ درزه‌دار را به تزریق سیال نشان می‌دهد. آنالیزهای مربوط به روند تحریک هیدرولیکی روی یک مدل دو بعدی و آنالیزهای حساسیت بازشدگی اولیه نیز انجام شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، مسیر غالب جریان در مدل‌های تحلیل شده در جهتی نزدیک به جهت عمود بر تنش کمینه است. با افزایش دبی تزریق مقاومت جریان کاهش یافته است و این اثر در بازشدگی‌های

کلیدی خواص مصالح ثابت بوده و مقادیر بازشدگی اولیه‌ی درزه‌ها تغییر کرده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود، تا حدی مشخص از مقادیر اولیه‌ی بازشدگی درزه‌ها، با افزایش آن مقادیر شاخص بیشینه‌ی بازشدگی نهایی کاهش یافته است. با توجه به حساسیت پدیده‌ی هیدرومکانیکی نسبت به مقادیر بازشدگی کم، هر چه بازشدگی اولیه‌ی درزه‌ها کوچک‌تر باشد، نسبت بازشدگی نهایی درزه‌ها به بازشدگی اولیه‌ی آنها بیشتر شده است و نهایتاً شاهد بیشینه‌ی مقادیر بازشدگی بیشتری هستیم.

به عبارتی در درزه‌های با بازشدگی کم، برای اینکه جریان آب مسیر خود را پیدا کند، به جداری درزه‌ها فشار زیادی اعمال می‌کند که باعث کاهش تنش‌های مؤثر و افزایش میزان بازشدگی آنها می‌شود. در ادامه، با افزایش میزان بازشدگی اولیه، جریان آب راحت‌تر از قبل در محیط جریان می‌یابد و به همین دلیل آب افزایش فشار زیادی پیدا نمی‌کند و لذا در این حالت میزان بازشدگی نهایی تغییرات کمتری می‌کند. تغییرات بیشینه‌ی دبی خروجی به ازاء مقادیر مختلف بازشدگی اولیه در شکل ۱۶ نمایش داده شده است. افزایش بازشدگی اولیه منجر به افزایش دبی در چاه خروجی شده است.

سیال در درزه‌های عرض‌تر راحت‌تر جریان می‌یابد و در نتیجه با فشار کمتری در سیستم گردش می‌کند. در چنین حالتی که بازشدگی اولیه‌ی درزه‌ها فقط بین چاه تولید و تزریق افزایش می‌یابد، اتلاف سیال کمتر است و در نتیجه دبی خروجی افزایش می‌یابد.

تغییرات بیشینه‌ی فشار آب حفره‌ی به ازاء مقادیر مختلف بازشدگی اولیه در

تطابق خوبی با رفتار مشاهده شده در آزمایش‌های واقعی تحریک هیدرولیکی در منابع زمین‌گرمایی دارد. نتایج آنالیز حساسیت روی بازشدگی اولیه نیز نشان می‌دهد که مقادیر بالاتر بازشدگی اولیه منجر به کارایی بالاتر سیستم شده است.

اولیه پایین‌تر مشهودتر است؛ چراکه افزایش دبی تزریق به افزایش دبی خروجی منجر شده است، ضمن آنکه به کاهش افت فشار در بین دو چاه نیز کمک کرده است. با افزایش فشار، مقاومت جریان کاهش و اتلاف سیال افزایش یافته است. این نتایج

### پانوشتها

1. hot dry rock
2. hydraulic fracturing
3. stimulation
4. hot wet rock
5. microseismic events
6. flow impedance
7. fluid loss
8. circulation flowrate
9. Soultz-sous-forets
10. Hijiori
11. depressurized
12. coupling
13. thermo-hydro-mechanical (THM)
14. finite element method
15. discrete element method
16. Cubic flow law
17. two-way hydraulic-mechanical coupling
18. joint permeability factor
19. residual hydraulic aperture
20. transient flow analysis
21. Rosemanowes

### منابع (References)

1. Tenzer, H. "Development of hot dry rock technology", *GHC Bulltin*, **32**, pp. 14-22 (2001).
2. Portier, S. and Vuataz, F.-D. "Chemical stimulation techniques for geothermal wells: experiments on the three well EGS system at Soultz-sous-Forets, France", *Geothermics*, **38**(4), pp. 349-359 (2009).
3. Nemoto, K. and Moriya, H. "Mechanical and hydraulic coupling of injection-induced slip along pre-existing fractures", *Geothermics*, **37**(2), pp. 157-172 (2008).
4. Shaik, A.R. and Rahman, S. "Numerical simulation of Fluid-Rock coupling heat transfer in naturally fractured geothermal system", *Applied Thermal Engineering*, **31**(10), pp. 1600-1606 (2011).
5. Vychytilc, J. and Horii, H. "Micromechanics-based continuum model for hydraulic fracturing of jointed rock masses during HDR stimulation", *Mechanics of Material*, **28**(1-4), pp. 123-135 (1998).
6. Baujard, C. and Bruel, D. "Numerical study of the impact of fluid density on the pressure distribution and stimulated volume in the Soultz HDR reservoir", *Geothermics*, **35**(5-6), pp. 607-621 (2006).
7. Kohl, T. and Megel, T. "Predictive modeling of reservoir response to hydraulic stimulations at the European EGS site Soultz-Sous-Forets", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **44**(8), pp. 1118-1131 (2007).
8. Rachez, X. and Gentier, S. "3D- hydromechanical behavior of a stimulated fractured rock mass", *World Geothermal Congress*, Bali, Indonesia, pp. 25-29 (April 2010).
9. Baria, R., Baumgartner, J. and Rummel, F. "HDR/HWR reservoirs: Concepts, understanding and creation", *Geothermics*, **28**(4-5), pp. 533-552 (1999).
10. Murphy, H. and Brown, D. "Hydraulics and well testing of engineered geothermal reservoirs", *Geothermics*, **28**(4-5), pp. 491-506 (1999).
11. Jing, L., Tsang, C.-F. and Stephansson, O. "DECOVALEX- An international co-operative research project on mathematical models of coupled THM processes for safety analysis of radioactive waste repositories", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **32**(5), pp. 389-398 (1995).
12. Kohl, T. and Evans, K. "Modelling of coupled hydraulic thermal and mechanical processes in the simulation of hot dry rock reservoir behavior", Balkema, Rotterdam: Fractured and Jointed Rock Masses, Myer, Cook, Goodman & Tsang (1995).
13. Hudson, J.A. and Jing, L. "Numerical methods in rock mechanics", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **39**(4), pp. 409-427 (2002).
14. Abdallah, G. and Thoraval, A., Sfeir, A. and Piguet, J.P. "Thermal convection of fluid in fractured media", *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomesh Abstr*, **32**(5), pp. 435-52 (1995).
15. Chan, T., Khair, K., Jing, L., Ahola, M., Noorishad, J. and Vuillod, E. "International comparison of coupled thermo-hydro-mechanical models of a multiple fracture bench mark problem: DECOVALEX phase 1, Bench mark test 2", *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences and Geomesh Abstr*, **32**(5), pp. 435-52 (1995).
16. *Itasca Consulting Group Universal Distinct Element Code*, Itasca Con, UDEC Reference Manual, Version 4, Minneapolis, MN, USA (2004).
17. Jupe, A.J., Willis-Richards, J. and Nicholls, J.D. "Approaches to the modelling of HDR reservoirs: A review", *Geothermics*, **24**(3), pp. 307-332 (1995).