



DOI: 10.30479/jmre.2019.10143.1236

## بررسی عددی پارامترهای موثر بر نشت سیال از کارگاه‌های استخراج UCG

علی حیدری<sup>۱</sup>، سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲\*</sup>، مهدی نوروزی<sup>۳</sup>

- ۱- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود  
۳- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

(دریافت ۱۳۹۷/۱۲/۰۸، پذیرش ۱۳۹۸/۰۳/۲۹)

### چکیده

از جمله معیارها و عوامل تاثیرگذار بر امکان‌پذیری و اقتصادی بودن روش گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG)، نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف راکتور زیرزمینی UCG است. گازبند بودن راکتور UCG از نقطه نظر کنترل فرآیند و ظرفیت آلودگی آب‌های زیرزمینی، مساله بسیار مهمی است. عوامل مختلفی بر نشت گاز (سیال) از راکتور UCG موثرند. در این مقاله، عوامل فشار، دما و درزه‌داری (شامل بازشدگی، طول و شدت درزه) به عنوان مهم‌ترین عوامل موثر بر نشت گاز از شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ، با کاربرد مدلسازی عددی مورد ارزیابی قرار گرفته و به عنوان مورد مطالعاتی به زغال‌سنگ‌های منطقه مزی‌نو طبرس پرداخته شده است. از برنامه کامپیوتری DFN-FRAC3D برای شبیه‌سازی تصادفی درزه‌ها و ایجاد شبکه لوله معادل و از نرم‌افزار Water Gems برای تحلیل جریان استفاده شده است. نتایج، حاکی از آن است که افزایش فشار راکتور و افزایش درزه‌داری توده‌سنگ اطراف راکتور، باعث افزایش شدت جریان و یا افزایش نشت گاز می‌شود و منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به هر یک از این عوامل از توزیع نرمال پیروی می‌کند. از طرفی افزایش دمای راکتور تاثیر قابل توجهی بر شدت جریان خروجی ندارد. همچنین موثرترین عامل بر نشت سیال از راکتور UCG، عامل درزه‌داری است و از میان ویژگی‌های هندسی درزه‌داری شامل شدت، بازشدگی و طول درزه، عامل شدت درزه‌داری به عنوان مهم‌ترین عامل معرفی شده است.

### کلمات کلیدی

مدلسازی عددی، UCG، DFN، شبکه لوله معادل، نشت گاز، زغال‌سنگ مزی‌نو.

## ۱- مقدمه

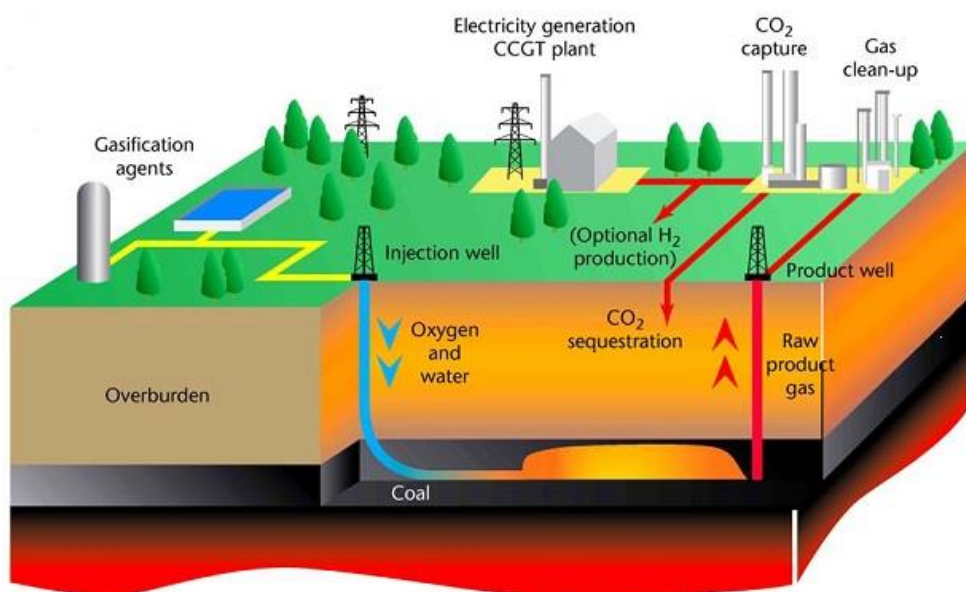
شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، تاکنون از نظر کمی به نقش و تاثیر هر یک از این عوامل بر میزان نشت گاز پرداخته نشده است. عوامل موثر در نشت گاز از راکتور UCG عبارت از ترکیب گازها، فشار، دما، سرعت گاز کردن، تخلخل، ضخامت روباره، آب محتوی، سطح آب زیرزمینی و وضعیت درزه‌داری اولیه و ثانویه است [۲]. برخی از این عوامل قابل کنترل و برخی دیگر غیرقابل کنترل‌اند. در ادامه هر یک از این عوامل و نقش آن‌ها در میزان نشت سیال به طور مختصر توصیف شده است.

## ۱-۱- ترکیب گازها

در خصوص ارتباط نشت گاز در زغال‌سنگ با ترکیب گازها دو نظریه وجود دارد. اولین نظریه، معروف به نظریه ترمیم<sup>۲</sup> است، بر اساس این نظریه، نفوذپذیری سنگ‌ها به ویژه زغال‌سنگ به اندازه مولکول گاز بستگی دارد و از جذب سطحی گاز کمتر متاثر می‌شود. بر اساس نظریه ترمیم، منافذ کوچک با ابعاد چند آنگستروم می‌توانند مانند سرنده عمل کنند و مانع عبور برخی از مولکول‌ها شوند. بنابراین سرعت جریان برای گازهای با مولکول بزرگ‌تر کاهش خواهد یافت. اگرچه برخی از محققان اظهار کردند که تفاوت نفوذپذیری با توجه به قطر مولکولی تنها باید در حدود هفت درصد باشد اما آزمایش‌ها مقداری بین ۲۰ تا ۴۰ درصد را نشان می‌دادند [۳].

تبدیل زغال‌سنگ برجا به محصولات گازی را گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ<sup>۱</sup> می‌نامند. در این فرآیند لایه‌های زغال‌سنگ بدون نیاز به عملیات معدنکاری سنتی با یک فرآیند پیشرفته مبتنی بر اندرکنش ترمومکانیکی و ترموشیمیایی، به صورت برجا و در زیرزمین و در محیطی شبیه به یک ژئوراکتور زیرزمینی به گاز سنتزی تبدیل می‌شوند. مطابق شکل ۱ در این روش در ابتدا چاه‌های تزریق و تولید از سطح زمین تا لایه زغال‌سنگ حفاری و به یکدیگر متصل می‌شوند، اکسیدان (ترکیبی از هوا، اکسیژن و بخار آب) از طریق چاه تزریق به لایه زغال‌سنگ دمیده می‌شود و باعث سوختن درجای زغال‌سنگ و تبدیل آن به گاز می‌شود و از طریق چاه تولید به تاسیسات موجود در سطح زمین انتقال می‌یابد. محصولات گازی حاصل شده ارزش حرارتی در حدود ۳۷۰۰ تا ۱۱۲۰۰ کیلوژول بر مترمکعب در شرایط متعارف و کاربرد گسترده‌ای در تولید برق، هیدروژن و سوخت مایع نظایر آن دارند. روش UCG برای آن دسته از منابع زغال‌سنگ که مصرف صنعتی ندارد و فقط ارزش حرارتی دارند از جهات بسیاری قابل توجه است [۱].

یکی از مشکلات قابل توجه در روش گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ، نشت گاز از کارگاه استخراج و رسیدن آن به سطح زمین و یا منابع آب زیرزمینی است. در این مقاله عوامل موثر بر این مهم برای ارزیابی نشت گاز و سپس کاهش آن بررسی



شکل ۱: نمایی از فرآیند استخراج منابع زغال‌سنگ به روش UCG [۴]

نشت گاز درون راکتور در مدت زمان فرآیند UCG، فشار راکتور است. اگر فشار راکتور از فشار ایستایی محدود کننده تجاوز کند، گازهای تولید شده به درون لایه‌های دربرگیرنده زغال سنگ نفوذ کرده و باعث آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی نزدیک به راکتور می‌شود [۵]. فشار راکتور یک عامل قابل کنترل است که با تنظیم سرعت تزریق اکسیدان متناسب با آهنگ استخراج و با شیر تنظیم در ابتدای چاه تولید کنترل می‌شود [۶].

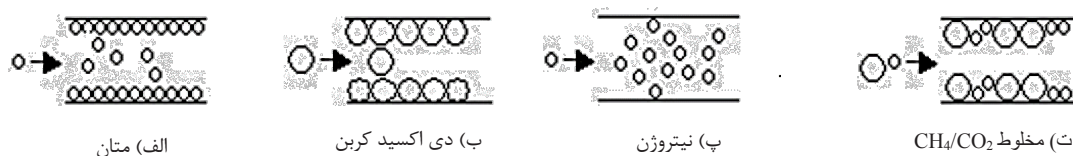
نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط سرشکی (۲۰۰۵) برای بررسی رابطه فشار گاز با نفوذپذیری محیط متخلخل تحت بار محوری وارد بر نمونه و نسبت به گازهای مختلف، در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج این آزمون‌ها برای نمونه زغال سنگ معدن دارت بوک<sup>۶</sup> با تغییر در بار محوری و فشار گاز برای نمونه‌های مختلف گاز نشان می‌دهد که نفوذپذیری گاز صرف نظر از نوع گاز با افزایش بار کاهش می‌یابد. به علاوه با افزایش متوسط فشار گاز، نفوذپذیری به طور نمایی کاهش و در فشار گاز بیش از ۳ مگا پاسکال، تغییرات نفوذپذیری ناچیز می‌شود.

به عنوان برخی نمونه‌های واقعی، در کارگاه چینچیل<sup>۷</sup> در عمق ۱۴۰ متری فشار گاز در راکتور یک مگاپاسکال، در ال ترمال<sup>۸</sup> در عمق ۵۶۰ متری فشار گاز در راکتور ۵/۲ مگاپاسکال

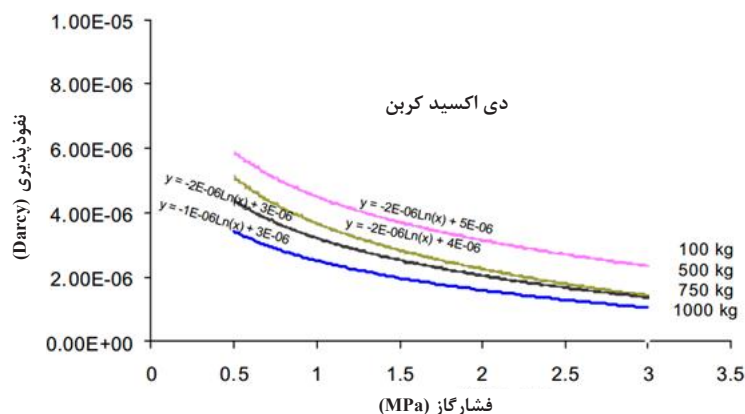
دومین نظریه به سمرتون<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۷۵) منسوب است که معتقدند نفوذپذیری در زغال سنگ را نمی‌توان تنها با اندازه مولکول توجه کرد، بلکه جذب سطحی گاز نیز تاثیرگذار است. ژاو و توماس<sup>۴</sup> پیشنهاد کردند که با توجه به باریک بودن مجاری عبور مولکول گاز، این مجاری همانند لوله‌های مویین<sup>۵</sup> در نظر گرفته شوند (شکل ۲). جذب سطحی مولکول‌ها، به ویژه دی‌اکسید کربن در دیواره‌های خلل و فرج مانند یک لایه، شعاع موثر مجاری عبور را کاهش می‌دهد و از عبور گاز از طریق مجاری، جلوگیری می‌کند و در واقع نفوذپذیری را کاهش می‌دهد. بر این اساس نفوذپذیری زغال سنگ برای عبور گاز متان بیشتر از دی‌اکسید کربن است. دلیل این مساله جذب سطحی و اندازه قطر مولکولی این گازها است که به ترتیب ۳۸ و ۴۱ آنگستروم است [۳]. بر اساس هر دوی این نظریه‌ها، به نظر می‌رسد تاثیر قطر مولکولی و جذب سطحی گازها بر نشت، در مجاری بسیار باریک و بدنه متخلخل زغال سنگ صادق باشد و در خصوص درزه‌ها و شکستگی‌ها که بازشدگی به مراتب بالاتری دارند، کمتر نقش داشته باشند.

### ۲-۱- فشار گاز

یکی از مهم‌ترین عوامل قابل کنترل برای جلوگیری از



شکل ۲: مسیر عبور مولکول گاز از طریق خلل و فرج میکروسکوپی با گازهای جاذب سطحی [۷]



شکل ۳: نفوذپذیری زغال سنگ دارت بوک تحت بار محوری در فشارهای مختلف گاز دی‌اکسید کربن [۷]

گسل‌ها، دایک‌ها، سازندهای کارستی، سنگ‌های تخریب شده و گمانه‌های رها شده است [۸].

#### ۱-۵- ضخامت روباره

تاکنون روش UCG در اعماق ۳۰ تا ۱۴۰۰ متر اجرا شده است. در راکتورهایی که به سطح زمین نزدیک‌ترند به علت پوشیده شدن با لایه‌های با نفوذپذیری زیاد، رسیدن نشست سقف راکتور به سطح زمین، ایجاد مسیرهای نشت گاز و کم بودن فشار ایستایی<sup>۱۱</sup>، امکان نشت گاز بیشتر است. در راکتورهای کم عمق که فشار ایستایی کم است، اندکی افزایش در فشار راکتور ممکن است، باعث نشت گاز شود ولی در راکتورهای با عمق زیاد، فشار ایستایی بیشتر و ایجاد یک شرایط متعادل راحت‌تر است [۱۱].

#### ۱-۶- آب محتوی

تغییر میزان آب محتوی، مقدار متان و هیدروژن تولید شده در کارگاه‌های استخراج را تغییر می‌دهد. آب محتوی و نیز آبی که از لایه‌های اطراف لایه زغالی وارد فضای راکتور می‌شود، به بیرون پمپ نمی‌شود، بلکه به عنوان بخشی از واکنش استفاده می‌شود. مقدار آب محتوی بر کیفیت گاز تولیدی تاثیر می‌گذارد. افزایش مقدار آب محتوی باعث تولید بیشتر هیدروژن، متان و دی‌اکسید کربن می‌شود. افزایش میزان آب محتوی تا حدودی می‌تواند میزان نشت گاز از میان ماتریس سنگ را افزایش دهد که مقدار آن ناچیز است [۱۲]. البته در خصوص توده سنگ درزه‌دار اطراف راکتور UCG، می‌توان از تاثیر آب محتوی بر نشت گاز از درزه و شکاف‌ها صرف نظر کرد.

#### ۱-۷- وضعیت آب‌های زیرزمینی نزدیک کارگاه استخراج

راکتور UCG معمولاً در زیر سطح ایستایی و در معرض آب‌های زیرزمینی دارد. اگر لایه زغال‌سنگ دارای نفوذپذیری زیاد و سنگ‌های در برگیرنده راکتور نفوذپذیر باشند، آب موجود در لایه‌های مجاور به درون راکتور تراوش می‌کند. تراوش آب به درون راکتور باعث کاهش عملکرد راکتور و کاهش کیفیت گاز تولید شده می‌شود.

بدیهی است اگر فشار راکتور کمتر از فشار آب‌های زیرزمینی باشد، آب‌های زیرزمینی به درون راکتور نفوذ می‌کنند. در این صورت برای جلوگیری از نفوذ آب به درون راکتور باید فشار راکتور بزرگتر یا مساوی فشار ایستایی باشد.

و در زولین<sup>۹</sup> در عمق ۸۶۰ متری فشار گاز در راکتور بیش از ۱۰ مگاپاسکال بوده است [۸]. از دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی، فشار راکتور UCG بهتر است بین ۱ تا ۵ مگاپاسکال باشد [۹]. البته مطالعات انجام شده مربوط به بدنه متخلخل زغال‌سنگ است و در خصوص نقش فشار گاز بر روی نشت آن از میان درزه و شکاف‌های توده سنگ در کارگاه استخراج UCG، تاکنون مطالعاتی انجام نگرفته است.

#### ۱-۳- دمای گاز

دما نقش مهمی در انتقال گاز از یک محیط متخلخل ایفا می‌کند. درجه حرارت راکتور گاز کردن معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۹]. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، در تمامی موارد، نفوذپذیری کل توده سنگ تحت فشار ثابت، در دماهای مختلف تقریباً برابر است. اگرچه نقش دما در انتقال گاز در محیط متخلخل پررنگ است اما عمده مسیر عبور گاز در توده سنگ درزه‌دار، ناپیوستگی‌های توده سنگ است. در مجموع، دما، تاثیر به‌سزایی بر نفوذپذیری گاز در محیط‌های پر درزه، برخلاف محیط متخلخل، ندارد [۲].

#### ۱-۴- تخلخل و نفوذپذیری زغال‌سنگ و لایه‌های اطراف آن

تخلخل لایه‌ها و اندازه خلل و فرج سنگ‌ها می‌تواند تغییرات زیادی در میزان نشت گاز از ۰٫۱ تا ۵۰ درصد را به همراه داشته باشد. البته معمولاً تخلخل زغال‌سنگ خیلی کمتر از لایه‌های در برگیرنده است اما تاثیر مشابهی بر میزان نشت گاز دارد. برای بررسی تاثیر تخلخل بر عبور گاز، مطالعاتی بر روی نمونه‌هایی از زغال‌سنگ معدن باربارا<sup>۱۱</sup> در لهستان انجام شده است [۱۰]. با توجه به تاثیر هم‌زمان متغیرهای فشار و حرارت بر میزان عبور مواد از خلل و فرج لایه‌ها، این متغیرها با هم بررسی شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، روزه‌های بزرگ در مدت زمان گاز کردن کاهش یافته و به طور هم‌زمان تعداد زیادی ریز ترک به وجود می‌آید. همچنین با افزایش قطر متوسط روزه‌ها، آهنگ حرکت گاز افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که تاثیر دما نسبت به فشار کمتر است [۱۰].

با این حال، مهم‌ترین شکستگی‌های طبیعی یا مصنوعی پیرامون راکتور UCG که باعث افزایش نفوذپذیری و نشت گاز از راکتور می‌شود؛ شامل لایه‌های ترک‌دار و نفوذپذیر اطراف، درزه‌ها و ریزترک‌های موجود در زغال‌سنگ و سنگ‌های اطراف،

با توجه به تأثیر هم‌زمان با عامل فشار و همچنین تأثیر شناخته شده و نامعلوم بر سایر عوامل، به عنوان سومین عامل تأثیرگذار در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق با تمرکز بر زغال‌سنگ‌های منطقه مزینو طبس به عنوان مورد مطالعاتی، از برنامه کامپیوتری DFN-FRAC3D و نرم‌افزار Water Gems برای بررسی نقش عوامل یاد شده بر نشت گاز استفاده خواهد شد.

## ۲- تهیه مدل عددی مرجع از توده سنگ اطراف منطقه مزینو طبس

در این بخش بر اساس مطالعات میدانی انجام شده در منطقه مزینو طبس، مدل سه بعدی شبکه شکستگی‌های مجزای توده سنگ با استفاده از برنامه کامپیوتری DFN-FRAC3D تهیه و مدل شبکه لوله معادل آن ایجاد شده است. در نهایت مدل هیدرولیکی منطقه با استفاده از نرم‌افزار Water Gems تحلیل و میزان نشت گاز تعیین شده است.

### ۲-۱- مورد مطالعاتی

ناحیه زغال‌سنگی مزینو، در ۸۵ کیلومتری غرب شهرستان طبس در استان یزد واقع شده است. زغال‌سنگ‌های ناحیه مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت با شیب لایه‌های زغالی کمتر از ۳۰ درجه و ضخامت متغیر ۰/۵ تا ۶ متر است که این خود نشان‌دهنده مناسب بودن تمام لایه‌های زغالی برای اجرای UCG در این منطقه است. از بین لایه‌های منطقه مزینو، لایه M2 به دلیل ضخامت بالا و ذخیره زیاد نسبت به سایر لایه‌های بررسی شده، دارای اولویت بالاتری برای اجرای UCG است. این لایه دارای ضخامت ۳/۵ متر و به طور میانگین در عمق ۶۰۰ متری واقع شده و دارای ۱۳۹ میلیون تن ذخیره است [۱].

برای جمع‌آوری داده‌های میدانی، دسته درزه‌های منطقه از روش برداشت خطی استفاده شده است. در این تحقیق، کانال‌های حفر شده به عمق تقریبی ۱/۵ متر و طول ۲ کیلومتر در منطقه مزینو، به عنوان تنها رخنمون در دسترس در منطقه برای برداشت درزه انتخاب شده است (شکل ۴).

در مجموع ۲۲۹ درزه با میانگین طول ۸۰ سانتی‌متر برداشت شد. با تفکیک دسته درزه و جداسازی ویژگی‌های درزه‌های مربوط به آن از جمله شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و طول، اطلاعات لازم برای مطالعات آماری فراهم می‌شود. بر

گاز با فشار، آب‌های زیرزمینی را از درزه و ترک‌های موجود در سنگ به عقب رانده و با سرعت به بیرون از ناحیه آبدار نشت می‌کند [۸]. بنابراین فشار راکتور و فشار آب زیرزمینی باید به صورت توأم در محاسبه نشت از راکتور در نظر گرفته شوند.

### ۱-۸- درزه‌داری اولیه و ثانویه

توده سنگ دارای شکستگی‌ها و درزه‌های طبیعی است. این شکستگی‌ها و درزه‌ها به صورت یک سیستم انتقال بزرگ برای جریان آب و گاز در لایه زغالی و لایه‌های اطراف عمل می‌کنند. به طور کلی در توده‌سنگ درزه‌دار، نفوذپذیری ماتریس توده‌سنگ نسبت به درزه و شکاف‌ها ناچیز است. نفوذپذیری توده‌سنگ با چگالی شکستگی‌ها، بازشدگی و گسترش شکستگی‌ها تغییر می‌یابد. ظرفیت جریان محیط درزه‌دار کاملاً به تعداد و بازشدگی درزه‌ها و تداوم<sup>۱۱</sup> آن‌ها بستگی دارد [۱۳]. لینگارد و همکاران<sup>۱۲</sup> نشان دادند که ابعاد درزه‌ها بر روی نفوذپذیری زغال‌سنگ و به دنبال آن توده‌سنگ اثر زیادی می‌گذارد. درزه‌های بزرگتر، موجب نفوذپذیری بیشتر توده‌سنگ می‌شوند [۷].

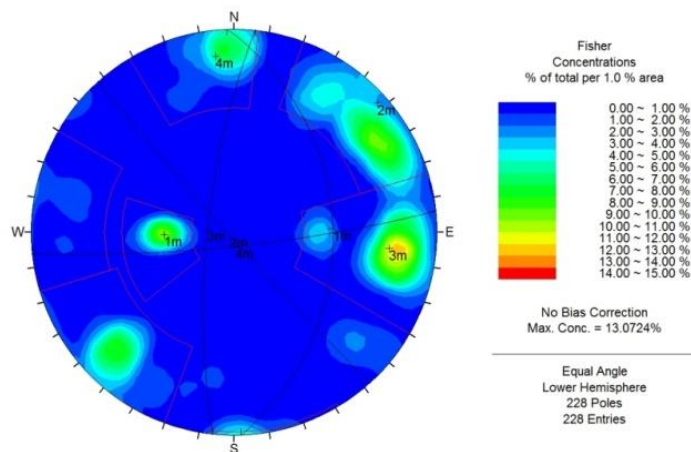
اطلاعات مرتبط با اندازه شکستگی‌ها و ریز درزه‌ها و فاصله‌داری آن‌ها در توده‌سنگ، در پیش‌بینی نفوذپذیری می‌تواند به کار رود. ریز درزه‌های ثانویه نیز در زغال‌سنگ و توده‌سنگ اطراف راکتور به عنوان نتیجه تنش اعمالی حاصل از معدنکاری و تغییر در ساختار زمین‌شناسی زغال‌سنگ رخ می‌دهد. این درزه‌ها به طور معمول باعث افزایش نفوذپذیری می‌شوند. با توجه به تحقیقات هایس<sup>۱۴</sup> نفوذپذیری در درزه‌ها و نواحی شکسته جلوی جبهه‌کار در دوره معدنکاری، بزرگتر از نفوذپذیری در نواحی زغالی و خاکی دست نخورده است [۱۴]. برای محیط درزه و شکاف‌دار که ماتریکس سنگ تأثیر چندانی بر نشت سیال ندارد و ناپیوستگی‌ها کنترل‌کننده جریان سیال‌اند، عوامل ترکیب گازها، تخلخل ماتریکس سنگی و آب محتوی نقش مهمی در نشت گاز ندارند و می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد. عوامل فشار گاز، ضخامت روباره و آب زیرزمینی به صورت هم‌زمان برای تعیین فشار لازم راکتور استفاده می‌شود که در این تحقیق عامل فشار گاز به عنوان یکی از پارامترهای موثر بر نشت بررسی شده است. دومین عامل مهم در نشت گاز از کارگاه استخراج که در این تحقیق بررسی شده، سیستم درزه‌داری اولیه منطقه است که در خصوص توده‌سنگ‌های درزه‌دار به عنوان سیستم انتقال اصلی عمل می‌کند. عامل دما،

می‌شود [۱۷، ۱۶]. نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش برای داده‌های برداشت شده طول مربوط به هر دسته درزه در رخنمون سنگی مورد مطالعه در شکل ۸ نشان داده شده است. طبق آزمون‌های بهترین برازش، تابع توزیع لاگ نرمال بیشترین سازگاری را برای توزیع طول دسته درزه‌های ۲، ۳ و ۴ از خود نشان داده است اما دسته درزه ۱ که لایه‌بندی است از تابع توزیع گاما پیروی می‌کند. توابع توزیع برازش شده بر طول درزه‌ها در هر دسته درزه، در شکل ۹ نشان داده شده و مشخصات این توابع در جدول ۱ ارایه شده است. مشخصات آماری پارامترهای هندسی دسته درزه‌های محدوده مورد مطالعه که توسط نویسندگان برداشت شده در جدول ۱ ارایه شده است.

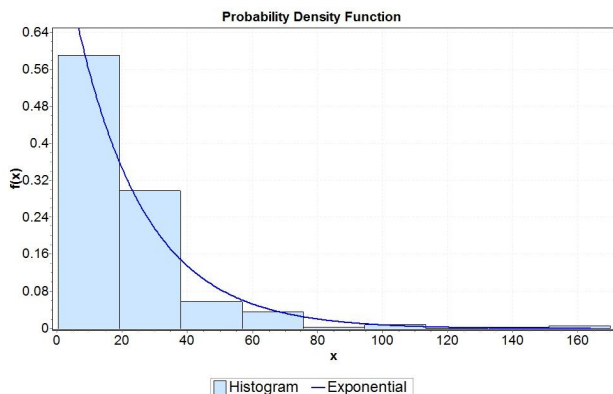
اساس مشخصات شیب و جهت شیب درزه‌ها، تعداد ۴ دسته درزه در منطقه شناسایی شده است (شکل ۵). نمودار فراوانی دسته درزه‌های تفکیک شده به همراه تعداد آن‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. جهت‌داری درزه‌ها از تابع توزیع فیشر پیروی می‌کند. ثابت فیشر برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزار Dips به دست آمده که در جدول ۱ نشان داده شده است. در خصوص توزیع فاصله‌داری درزه‌ها، بر اساس مطالعات پیشین، انواع گوناگون سنگ‌های رسوبی، آذرین و متامورفیک می‌توانند با تابع توزیع چگالی احتمالی نمایی منفی مدل شوند [۱۵]. بر این اساس، در این پژوهش، توزیع نمایی منفی برای فاصله‌داری به کار برده شده است (شکل ۷). برای توزیع طول درزه‌ها، سه تابع نمایی منفی، لاگ نرمال و گاما برای اطلاعات حاصل از پیمایش درزه‌ها به کار برده



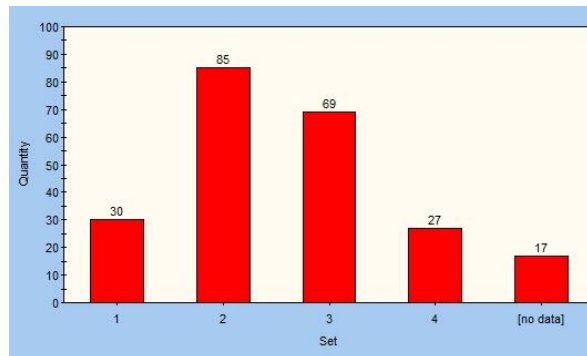
شکل ۴: رخنمون منطقه مورد مطالعه



شکل ۵: جدایش دسته درزه‌ها در شبکه اشمیت



شکل ۷: نمودار توزیع فاصله‌داری برای درزه‌ها



شکل ۶: فراوانی دسته درزه‌های برداشت شده

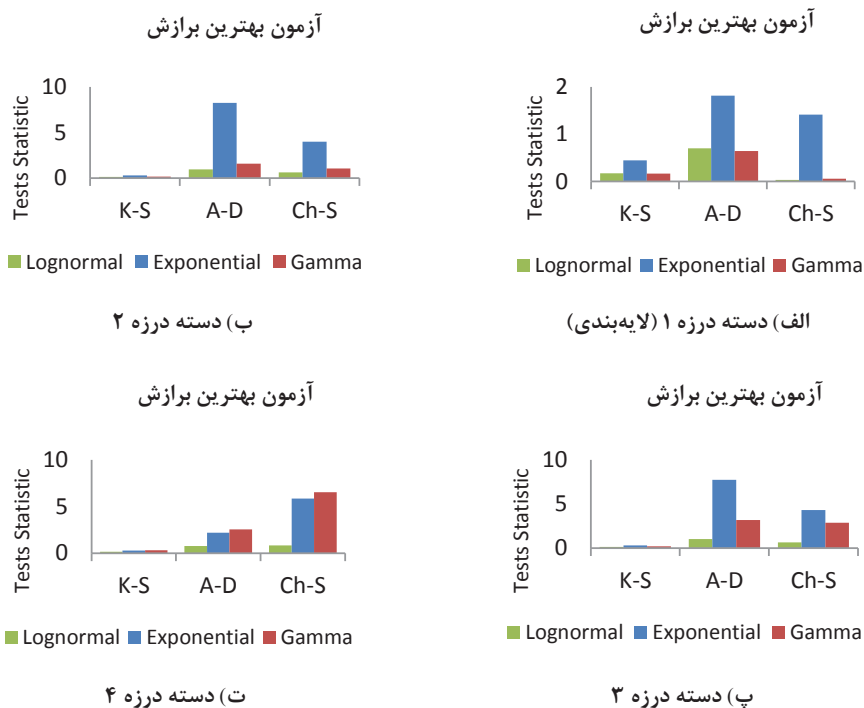
جدول ۱: پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده

دسته درزه				پارامتر	
دسته درزه ۴	دسته درزه ۳	دسته درزه ۲	دسته درزه ۱		
۱۷۴٫۸۲	۲۷۶٫۷۵	۲۲۸٫۸۷	۰٫۸۸٫۳۸	شیب/ جهت شیب	
۳۶	۲۲٫۶	۲۲٫۷	۵۸٫۶	ثابت فیشر (K)	
۰٫۰۴	۰٫۱۴	۰٫۱۸	۱٫۱۷	شدت، $P_{32} (m^{-1})$	
لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	گاما	تابع توزیع	
$\sigma = ۰٫۶۶۶$	$\sigma = ۰٫۵۶۵$	$\sigma = ۰٫۵۸۳$	$\alpha = ۲۳٫۳۴$	پارامتر تابع	
$\mu = -۱٫۲۳۹$	$\mu = -۱٫۱۰۹$	$\mu = -۱٫۱۵$	$\beta = ۰٫۱۹۶$	پارامتر تابع	
۰٫۳۶۱	۰٫۳۸۶	۰٫۳۷۵	۴٫۵۸۷	متوسط (متر)	
۰٫۲۷۰	۰٫۲۳۷	۰٫۲۳۹	۰٫۹۴۹	انحراف استاندارد (متر)	
لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	تابع توزیع	
$\sigma = ۰٫۵۷۰$	$\sigma = ۰٫۵۴۲$	$\sigma = ۰٫۵۴۲$	$\sigma = ۰٫۴۴۰$	پارامتر تابع	
$\mu = -۰٫۳۲۲$	$\mu = -۰٫۰۵۶$	$\mu = -۰٫۰۵۸$	$\mu = ۰٫۵۷۲$	پارامتر تابع	
۰٫۸۵۲	۱٫۰۹۵	۱٫۰۹۲	۱٫۹۵۳	متوسط (میلی‌متر)	
۰٫۵۲۸	۰٫۶۴۰	۰٫۶۳۹	۰٫۹۰۴	انحراف استاندارد (میلی‌متر)	

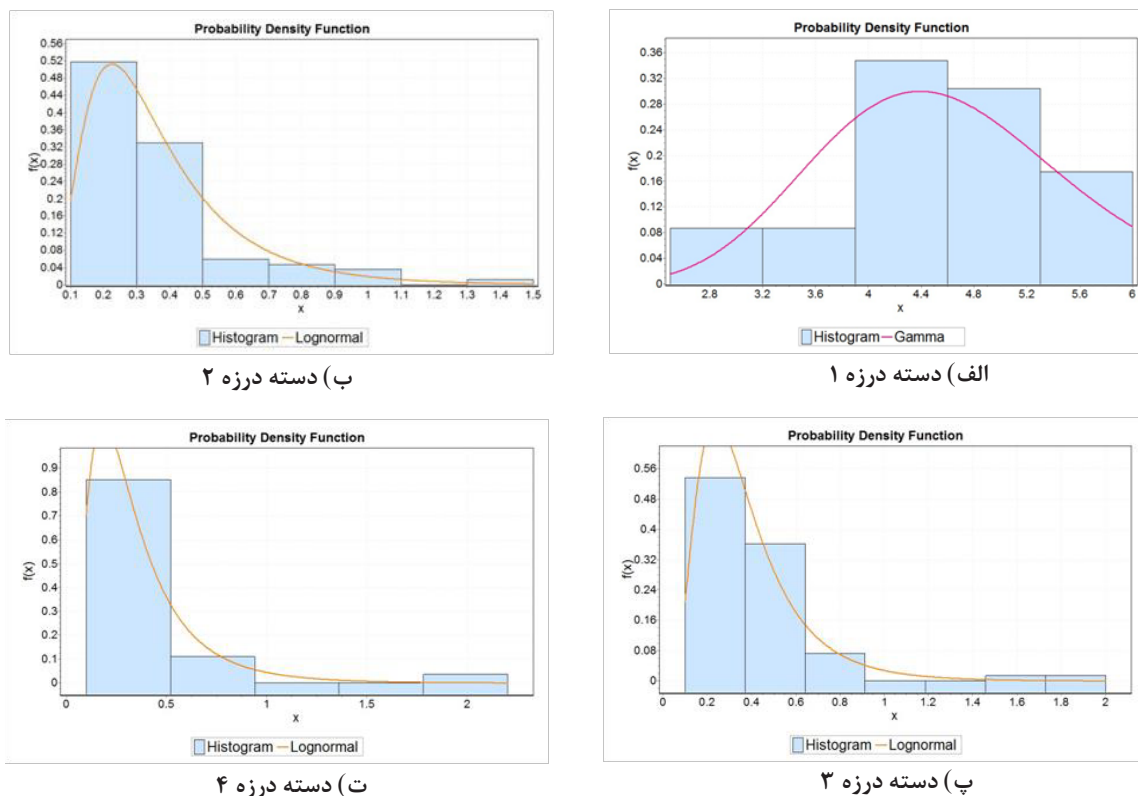
جریان سیال در محیط ارایه می‌شود. در کاربردهای عملی، این روش‌ها محدودیت‌هایی در رابطه با اعمال صحیح تاثیر هندسه شکستگی‌ها در رفتار جریان دارند. مدل جریان FPM در نظر می‌گیرد که سیال به طور هم‌زمان در داخل درزه‌ها و از میان ماتریکس بلوک سنگی جریان می‌یابد [۱۹]. این نوع مدل برای وقتی که اثرات ذخیره‌سازی یا قابلیت هدایت ماتریکس سنگی نمی‌تواند نادیده گرفته شود، بهترین انتخاب است. در روش‌های ناپیوسته تلاش بر این است که پیچیدگی هندسی توزیع فضایی شکستگی‌ها در محیط توده سنگ و تاثیر آن‌ها در رفتار هیدرولیکی توده سنگ به صورت صریح مدلسازی شود.

## ۲-۲- مدل شبکه شکستگی‌های مجزا

سه روش اصلی برای مدلسازی جریان سیال در سنگ‌های درزه‌دار به کار می‌رود که شامل مدل‌های جریان محیط متخلخل معادل<sup>۱۵</sup> پیوسته، محیط متخلخل درزه‌دار<sup>۱۶</sup> و شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN) می‌شوند [۱۸]. در روش پیوسته، مانند روش‌های تخلخل دوگانه<sup>۱۷</sup> و نفوذپذیری دوگانه<sup>۱۸</sup> با استفاده از آزمایش‌های برجا و یا به صورت غیرمستقیم با استفاده از روش‌های عددی و یا روش‌های هندسی ساده، خواص معادل تخلخل و شکستگی‌های موجود در توده سنگ تعیین و یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی برای مدلسازی

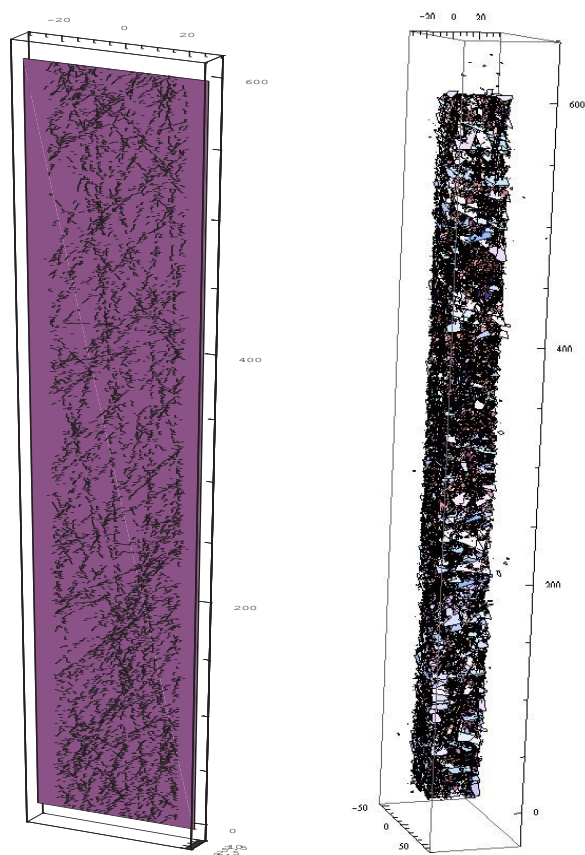


شکل ۸: نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش



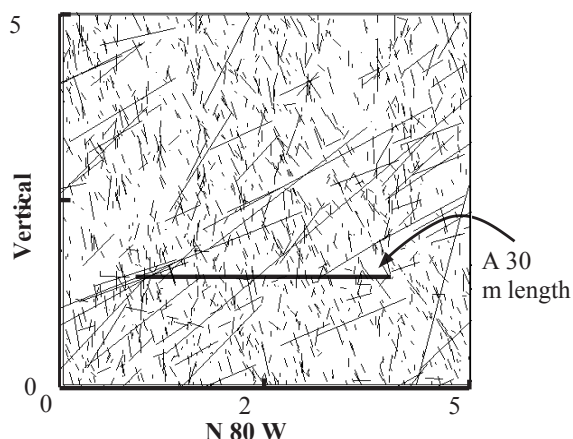
شکل ۹: توابع توزیع برازش شده بر مشخصه طول درزه‌های برداشت شده





الف) شبکه سه بعدی DFN منطقه مزینو      ب) مقطع قائم از مدل

شکل ۱۰: نمایی از شبکه سه بعدی DFN منطقه مزینو



شکل ۱۱: اثرات درزه بر روی مقطع عمودی دارای امتدادی مشابه جهت شیب خط برداشت

در این حالت با ایجاد یک مدل دقیق هندسی از شکستگی‌ها که نشان‌دهنده مشخصات هندسی، تعداد و جمعیت شکستگی‌های موجود در محیط است و اعمال قوانین جریان در شکستگی‌ها، رفتار هیدرولیکی توده سنگ مدلسازی می‌شود. معروف‌ترین روش مدلسازی رفتار ناپیوسته جریان سیال در محیط‌های سنگی درزه‌دار، روش شبکه درزه‌های مجزا (DFN) است. مدل DFN فرض می‌کند که ماتریکس سنگی نفوذناپذیر است و آب زیرزمینی فقط از طریق سیستم درزه می‌تواند جریان یابد. در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری ماتریکس سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده سنگ بسیار ناچیز است و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال‌اند [۲۱،۲۰]. بنابراین وقتی که ماتریکس سنگی نفوذپذیری کمی دارد، این شیوه مناسب‌تر است [۱۸].

مدل DFN دسته درزه‌های توده سنگ منطقه مزینو با کاربرد برنامه کامپیوتری DFN-FRAC<sup>3D</sup> [۲۳،۲۲] و با استفاده از پارامترهای هندسی برداشت شده از منطقه مزینو تهیه شده است (جدول ۱). این مدل متشکل از ۲۶۹،۶۲۳ درزه در محدوده‌ای به ابعاد  $45 \times 45 \times 600$  مترمکعب در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

برای اعتبارسنجی مدل DFN تهیه شده، درزه‌های مدل شده و برداشت شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شکل ۱۱ اثرات درزه به دست آمده از تقاطع شبکه درزه با پنجره مربعی عمودی ۵۰ متری که دارای جهتی مشابه جهت خط برداشت است و در میانه مدل مکعبی DFN واقع شده را نشان می‌دهد. خط برداشت با طول ۳۰ متر در شکل شبیه‌سازی شده است. فراوانی درزه یک بعدی بر روی این خط برداشت شبیه‌سازی شده در حدود ۱/۳ درزه بر متر است. این مقدار به خوبی با فراوانی درزه یک بعدی ۱/۶ درزه بر متر در حالت واقعی قابل مقایسه است. این نتایج نشان می‌دهد که مدل شبکه درزه تصادفی سه بعدی تولید شده به خوبی با سیستم درزه واقعی سازگار است.

### ۲-۳- مدل شبکه لوله معادل

در این روش یک شبکه لوله از یک مدل شکستگی مجزای سه بعدی ساخته می‌شود. به طور کلی اساس روش شبکه لوله معادل، جایگزین کردن شکستگی‌های سنگ با لوله‌هایی است که شدت جریان یکسانی از سیال را در مقایسه با یک شکستگی از خود عبور می‌دهند. هر صفحه شکستگی شامل خط اثر تمام شکستگی‌هایی خواهد بود که با صفحه مورد نظر متقاطع‌اند (شکل ۱۲).

نقاط تقاطع می‌شود. سپس شبکه درزه‌های باقیمانده را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند شبکه لوله به مدل شبیه‌سازی جریان تبدیل کرد.

به طور مثال، نمونه‌ای از اجرای مدل DFN، شبکه‌های درزه متصل شناسایی شده و مدل شبکه لوله آن در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مدل اصلی ۲۰×۲۰×۴۰ مترمکعب و شامل ۴ دسته درزه و تعداد ۱۹۴ درزه است (شکل ۱۳-الف). مدل هیدرولیکی در محدوده‌ای به ابعاد ۱۵×۱۵ مترمربع پایه و ۳۰ متر ارتفاع از مرکز مدل DFN انتخاب شده است. صفحات مرزی جریان، صفحات افقی پایینی (z=0) و بالایی (z=30) انتخاب شده است. پس از اجرای مدل هیدرولیکی تعداد ۷۶ درزه متصل‌کننده مرزهای جریان شناسایی شده

با وصل کردن مرکز تمام خط اثرها در صفحه، لوله‌های معادل برای آن صفحه ساخته می‌شود. لوله‌ها برای هر صفحه شکستگی در مراکز خط اثر به هم متصل خواهند شد و به این صورت شبکه لوله شکل می‌گیرد. قطر لوله معادل در هر صفحه درزه از رابطه ۱ محاسبه می‌شود. در این حالت فرض شده که کل درزه در انتقال سیال نقش دارد.

$$d = \sqrt{\frac{4 \times A \times e}{\pi \times L_{tot}}} \quad (1)$$

که در آن:

d : قطر معادل لوله‌های واقع در یک صفحه درزه

A : مساحت درزه

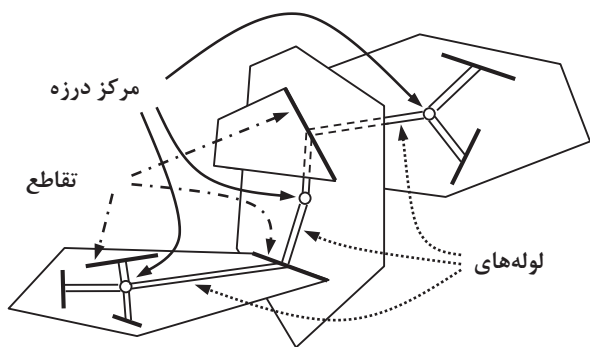
e : بازشدگی درزه

$L_{tot}$  : مجموع طول لوله‌های واقع در یک صفحه درزه است.

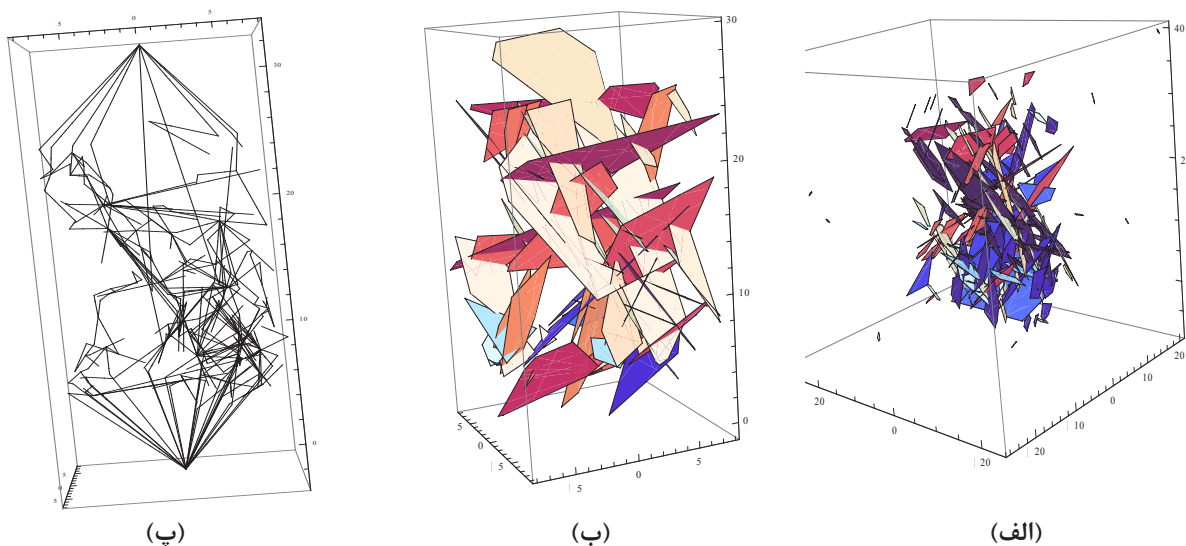
برنامه DFN-FRAC3D برای ساخت مدل DFN دقیق

برای هدف تحلیل‌های هیدرولیکی، همبستگی بین بازشدگی و طول درزه را در نظر می‌گیرد.

برای تهیه مدل شبکه لوله، درزه‌هایی که در جریان نقش دارند (شبکه درزه‌های متصل) باید در مدل DFN شناسایی شوند. درزه‌هایی که ایزوله‌اند یا به طور جزئی با دیگر درزه‌ها یا مرزهای ورود جریان و خروج جریان متصل‌اند، می‌توانند حذف شوند زیرا در جریان سیال نقشی ندارند. کاربرد دقیق فرآیند حذف منجر به شبکه‌ای ساده‌تر با تعداد قابل توجه کمتری از



شکل ۱۲: شمایی از روش تبدیل درزه‌ها به شبکه لوله



شکل ۱۳: الف) شبکه درزه با تمامی درزه‌های موجود، ب) شبکه درزه متصل (رسانا)، پ) مدل شبکه لوله معادل

۸، ۱۰ و ۱۵ متر در نظر گرفته شده است. برای هر اندازه نمونه، ابتدا مدل DFN اصلی و سپس مدل DFN هیدرولیکی (درزه‌های متصل) تهیه شده و متعاقباً مدل شبکه لوله ایجاد شده است. در نهایت مدل شبکه لوله با استفاده از نرم‌افزار تجاری Water GEMS تحلیل شده و مقدار شدت جریان محاسبه شد (شکل ۱۴). مقدار شدت جریان برای کوچکترین نمونه با ابعاد  $3 \times 3 \times 3$  متر برابر  $30.6$  لیتر در ثانیه برآورد شده است. برای نمونه‌های بزرگتر از  $8$  متر آنیزوتروپی درزه‌ها کم شده و در نتیجه تغییرات اندازه شدت جریان کاهش می‌یابد. برای مورد مطالعاتی این تحقیق، اندازه REV برابر  $8 \times 8 \times 8$  متر برآورد می‌شود. در اندازه‌های بزرگتر از این مقدار، تغییرات شدت جریان ناچیز است. بر اساس اندازه REV، آهنگ جریان متوسط توده سنگ مورد مطالعه،  $212$  لیتر در ثانیه برآورد شده است.

### ۳- تحلیل حساسیت عوامل تاثیرگذار بر نشت سیال

از جمله مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر نشت گاز از میان در توده سنگ درزه‌دار، فشار، دما و سیستم درزه‌داری است. از میان ویژگی‌های درزه، در درجه اول بازشدگی و سپس شدت (فاصله‌داری) و طول درزه از مهمترین پارامترهایی است که در نشت سیال موثرند. در این بخش، نقش هر یک از این پارامترها بر نشت گاز از کارگاه استخراج UCG مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل حساسیت پارامترها و تاثیر آن‌ها در میزان نشت گاز با انجام آزمایش‌های عددی بر روی مدل مرجع تهیه شده از مورد مطالعاتی مزینو طبس و در اندازه REV جریان (بلوک  $8 \times 8 \times 8$  مترمکعبی) به دست آمده انجام می‌گیرد.

#### ۳-۱- تحلیل حساسیت نسبت به فشار مخزن

فرآیند UCG می‌تواند در عمق کم با شرایط فشار پایین و در عمق زیاد با شرایط فشار زیاد انجام گیرد. اخیراً در تمام پروژه‌های UCG برای کاهش آلودگی سعی می‌شود، تحت فشار ایستایی کار شود. در کارگاه استخراج کم عمق مانند چین چیلدا فشار اتمسفری  $1$  مگاپاسکال و در کارگاه‌های استخراج عمیق در اروپا فشار را حدود  $6$  مگاپاسکال در نظر می‌گیرند [۲۴].

برای بررسی تاثیر فشار بر نشت سیال در منطقه مزینو سه فشار کاری کم فشار  $1$  مگاپاسکال، فشار متوسط  $3$  مگاپاسکال و پر فشار  $5$  مگاپاسکال در نظر گرفته شده و در هر فشار مقدار خروج سیال از سطح زمین بررسی شده است. شدت جریان در

است (شکل ۱۳-ب). مدل شبکه لوله معادل با این شبکه درزه‌رسانا، شامل  $364$  لوله در شکل ۱۳-پ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳-پ مشاهده می‌شود، در این مدل، لوله‌های متقاطع با مرزهای بالا و پایین به دو نقطه با لوله‌های مجازی متصل شده‌اند. این لوله‌های مجازی بدون اصطکاک فرض شده‌اند و در نتایج تحلیل‌های هیدرولیکی تاثیری ندارند. در این شیوه، فشار/هد ورودی می‌تواند به نقطه اول وارد شود و در نقطه دوم اندازه‌گیری شود.

#### ۲-۴- مدل هیدرولیکی

برای آنالیز شبکه لوله، نرم‌افزار تجاری Water GEMS انتخاب شده است. پیش از شروع فرآیند مدلسازی جریان ابتدا لازم است خروجی رقومی برنامه کامپیوتری DFN-FRAC<sup>3D</sup> (که به صورت مختصات محلی ابتدا و انتهای لوله، طول و قطر لوله‌ها است)، با نرم‌افزار ROCKWORK16 به صورت فایلی با فرمت DXF برای ورود به محیط GIS آماده‌سازی شود. در GIS قطر هر لوله به صورت یک ویژگی به آن اختصاص داده می‌شود. در نهایت فایل شکلی<sup>۱۶</sup> تولید شده در نرم‌افزار GIS وارد نرم‌افزار Water GEMS می‌شود. دو مخزن در نقاط ابتدایی و انتهایی شبکه تعریف می‌شود و یک پمپ مناسب برای تامین فشار مخزن در نقطه ابتدایی قرار می‌گیرد. خروجی نرم‌افزار یک فایل اکسل و یک فایل گرافیکی شامل مسیر و جهت جریان، فشار ورودی و خروجی، جریان ورودی و جریان خروجی برای هر لوله و همچنین کل شبکه است.

#### ۲-۵- تحلیل جریان

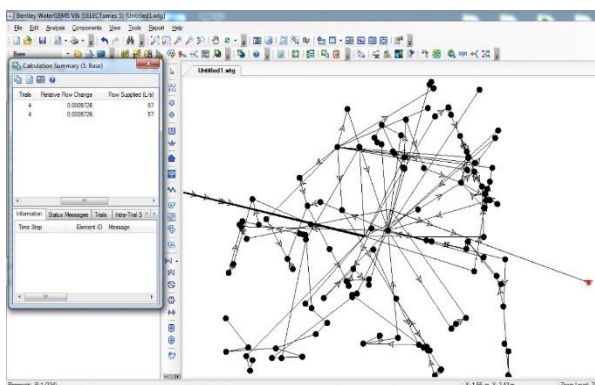
در خصوص مورد مطالعاتی منطقه مزینو طبس، با توجه به تعداد بسیار زیاد لوله تشکیل شده در مدل (بیش از یک میلیون)، برنامه DFN-FRAC<sup>3D</sup> قادر به اجرای بخش ایجاد شبکه لوله نیست. علاوه بر این هیچ نرم‌افزار تجاری نیز قادر به تحلیل چنین مدلی نیست، بنابراین تصمیم بر تهیه مدل REV گرفته شد. طبق تعریف، کوچکترین اندازه‌ای از مدل که در آن، تعداد کافی ناهمگنی‌ها برای ثابت ماندن ویژگی‌های معادل توده سنگ، تحت آزمایش‌های مکرر وجود داشته باشد، حجم بلوک معرف (REV) نامیده می‌شود. به عبارت دیگر، ویژگی خاص توده سنگ (مکانیکی یا هیدرولیکی یا گرمایی) در اندازه REV با تمامی اندازه‌های بزرگتر از REV برابر است. در این مقاله، تعداد  $5$  اندازه نمونه مکعبی با ابعاد  $3$ ،  $5$ ،

سیال تاثیرگذار باشد. بنابراین از آنجا که تاثیر دما بر نشت سیال در محیط‌های درزه و شکاف‌دار ناشناخته است، در این بخش به بررسی نقش دما بر نشت سیال پرداخته می‌شود. برای بررسی نشت سیال، با تمرکز بر منطقه مزینو، چهار دمای ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۲۵۰ و ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و در هر دما مقدار خروج سیال از سطح زمین بررسی شده است. نتایج تحلیل مدل در دماهای مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است و خلاصه نتایج در نمودار شکل ۱۸ ارائه شده است. افزایش دما تاثیری بر میزان نشت سیال ندارد. در تمام حالت‌ها شدت جریان برابر ۲۱۴ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. همان‌گونه که در بخش ۱-۳ نیز عنوان شد افزایش دمای گاز تاثیری بر سرعت خروج گاز از درزه‌های سنگ دربرگیرنده را ندارد، البته ممکن است باعث افزایشی در خروج گاز از ماتریس سنگ شود اما این تاثیر در افزایش نفوذپذیری سنگ درزه‌دار بسیار ناچیز است.

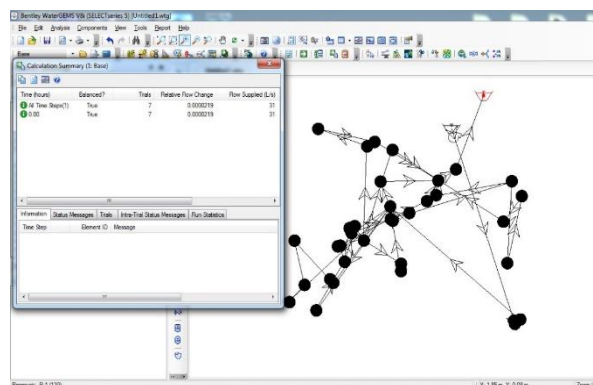
سطح زمین در این حالت‌ها به ترتیب ۲۱۴، ۲۲۷ و ۳۱۲ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. نتایج تحلیل مدل در فشارهای مختلف در شکل ۱۵ نشان داده شده است. خلاصه نتایج در نمودار شکل ۱۶ ارائه شده است که با افزایش فشار در راکتور، مقدار نشت گاز افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در بخش ۱-۲ نیز شرح داده شد افزایش فشار راکتور باعث افزایش نفوذ گاز در ماتریس سنگ و نیز افزایش سرعت فرار گاز و در واقع نشت گاز از درزه‌های اولیه و ثانویه سنگ در برگیرنده راکتور می‌شود.

### ۲-۳- تحلیل حساسیت نسبت به دمای گاز

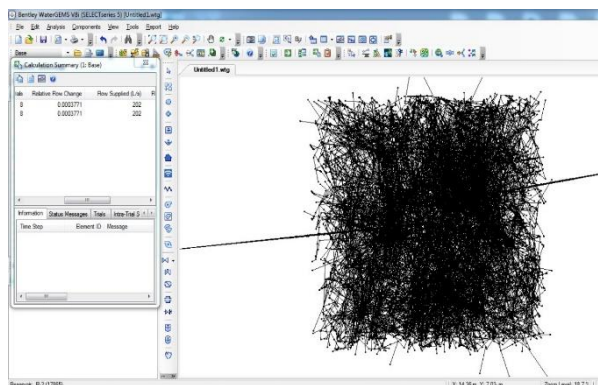
فرآیند UCG بسته به شرایط و ترکیب اکسیدان و فشار مخزن در دماهای متفاوتی معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، انجام می‌شود. اگرچه نقش دما در نشت سیال در محیط‌های درزه و شکاف‌دار کم‌رنگ است اما از طرفی دما بر ترکیب گازها موثر است و می‌تواند به طور غیرمستقیم بر نشت



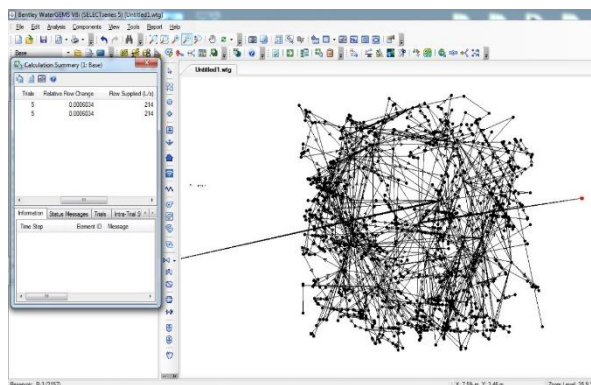
ب) مدل ۵×۵ مترمکعبی



الف) مدل ۳×۳×۳ مترمکعبی

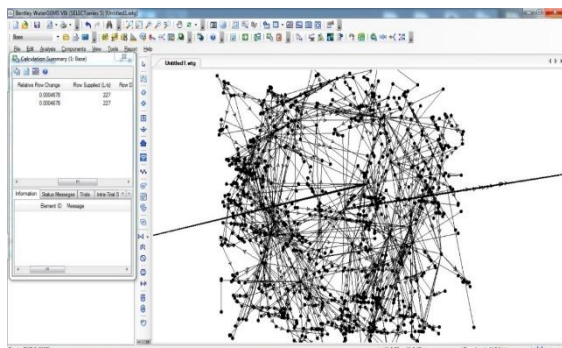


ت) مدل ۱۵×۱۵×۱۵ مترمکعبی

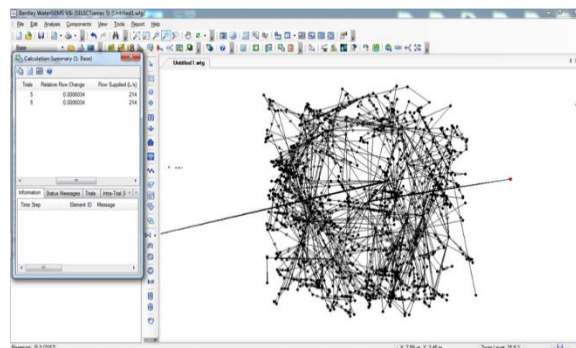


پ) مدل ۸×۸×۸ مترمکعبی

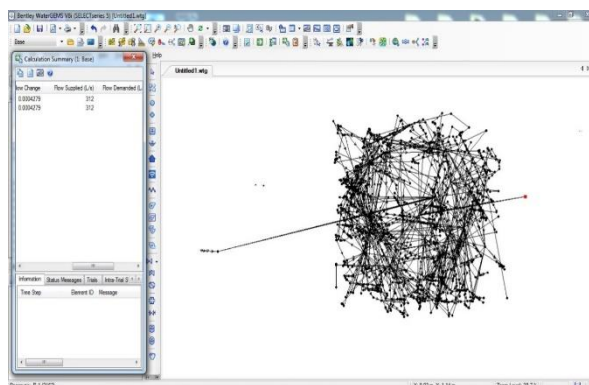
شکل ۱۴: نتایج تحلیل جریان با نرم‌افزار WaterGEMS



ب) فشار ۳ مگاپاسکال

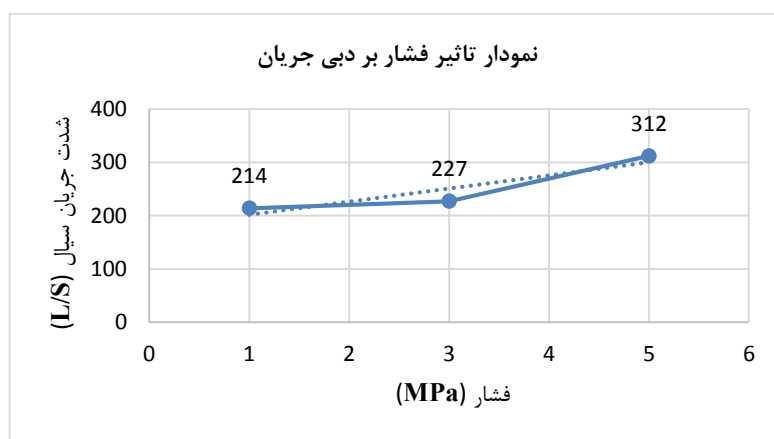


الف) فشار ۱ مگاپاسکال

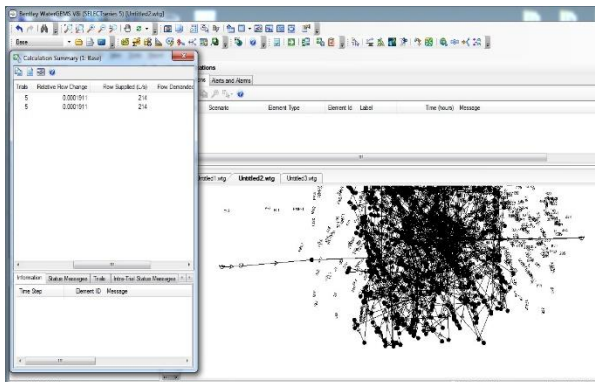


پ) فشار ۵ مگاپاسکال

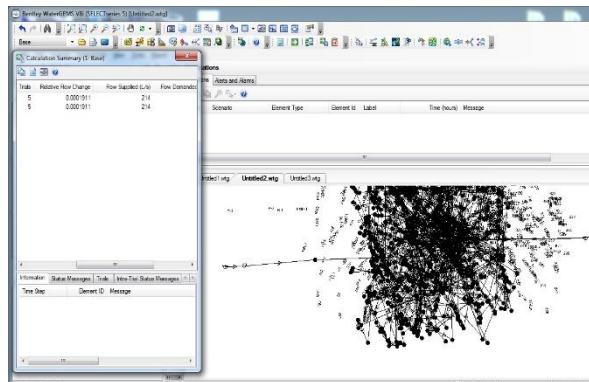
شکل ۱۵: شدت جریان در مدل مرجع با فشارهای مختلف



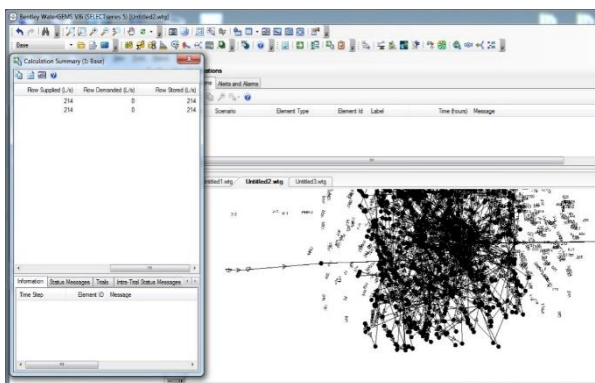
شکل ۱۶: نمودار تاثیر تغییرات فشار کارگاه استخراج UCG بر شدت جریان سیال



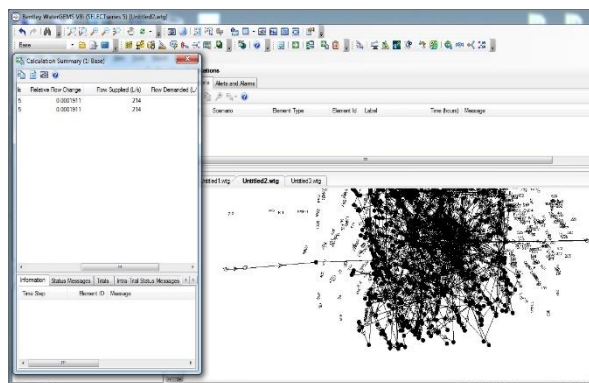
ب) دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد



الف) دمای ۸۰۰ درجه سانتی گراد

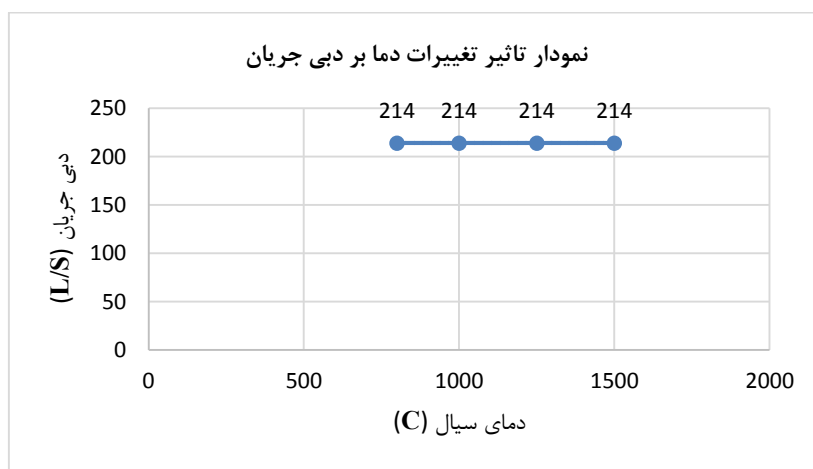


ت) دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد



پ) دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد

شکل ۱۷: شدت جریان در مدل مرجع با دماهای مختلف



شکل ۱۸: نمودار تاثیر تغییرات دما بر شدت جریان سیال

### ۳-۳- تحلیل حساسیت نسبت به ویژگی‌های درزه‌داری

در این بخش سه ویژگی درزه‌داری شامل شدت، طول و بازشدگی درزه با گام‌های افزایشی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی مدلسازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

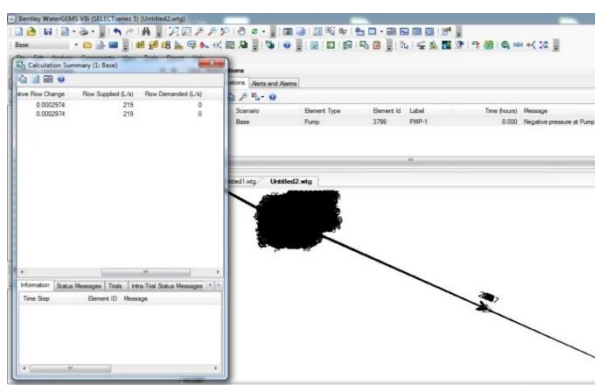
#### ۳-۳-۱- شدت درزه

با تمرکز بر مورد مطالعاتی منطقه مزینو طبس، در ابتدا شدت درزه واقعی حاصل از برداشت‌های صحرائی مدلسازی شده که مقدار شدت جریان در این حالت ۲۱۴ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. سپس، شدت درزه‌داری تا مقدار ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد افزایش یافته و کلیه مراحل ساخت مدل برای هر حالت مجدداً تکرار و در نهایت مدل‌ها تحلیل شده‌اند. نتایج تحلیل مدل در حالت‌های مختلف در شکل ۱۹ نشان داده شده است. خلاصه نتایج در نمودار شکل ۲۰ ارائه شده است. با افزایش شدت درزه‌داری، شدت جریان افزایش می‌یابد. علت

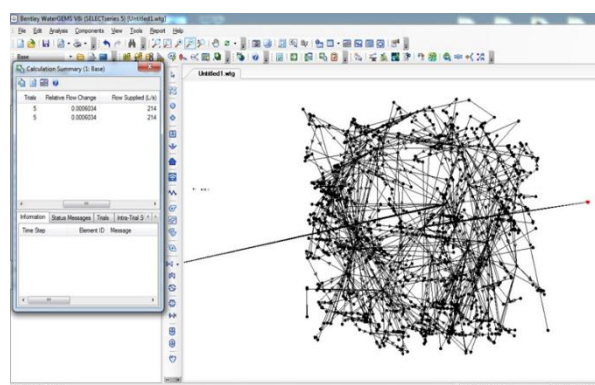
آن را می‌توان در افزایش تعداد درزه‌ها و نیز احتمال وجود نقاط تقاطع بیشتر و به وجود آمدن مسیرهای رسانای بیشتر از راکتور تا سطح زمین بیان کرد که مدل ساخته شده به خوبی این تغییرات را نشان می‌دهد.

#### ۳-۳-۲- طول درزه

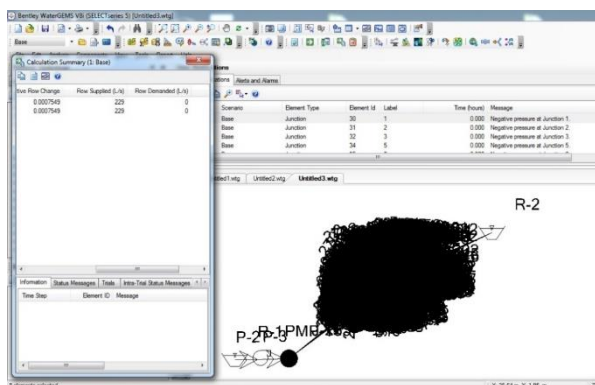
در این بخش چهار حالت، درزه‌های واقعی حاصل از برداشت‌های صحرائی، افزایش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی طول درزه‌ها نسبت به حالت واقعی، با تکیه بر مدل مرجع تهیه شده، با یکدیگر مقایسه شده است. در هر حالت، سایر ویژگی‌های مدل مرجع ثابت در نظر گرفته شده است. مقادیر شدت جریان در حالت‌های مختلف در شکل ۲۱ نشان داده شده است. خلاصه نتایج به صورت نموداری در شکل ۲۲ نمایش داده شده است. با افزایش طول درزه‌ها در شبکه درزه، شدت جریان افزایش می‌یابد. افزایش طول درزه نیز مانند شدت درزه احتمال بروز تقاطع با درزه‌های دیگر را بیشتر



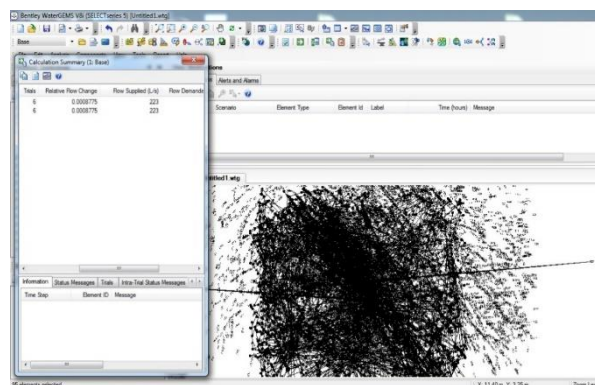
ب) افزایش ۲۰ درصدی شدت درزه‌داری نسبت به حالت واقعی



الف) شدت درزه‌داری واقعی



ت) افزایش ۶۰ درصدی شدت درزه‌داری نسبت به حالت واقعی

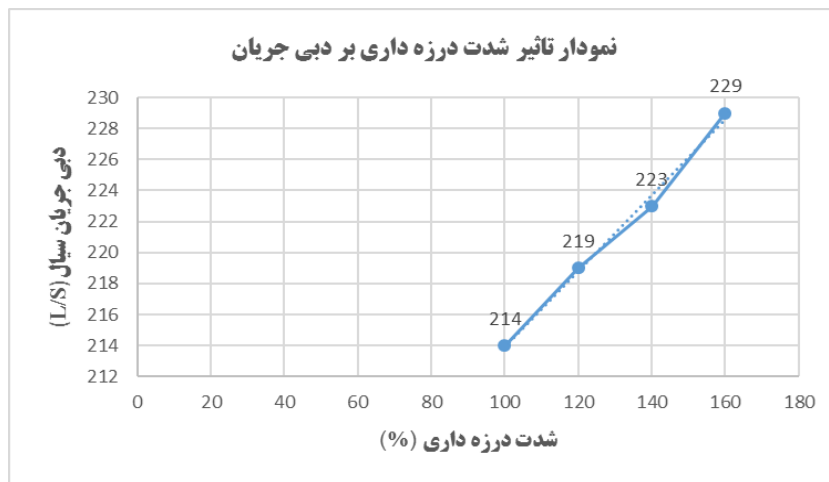


پ) افزایش ۴۰ درصدی شدت درزه‌داری نسبت به حالت واقعی

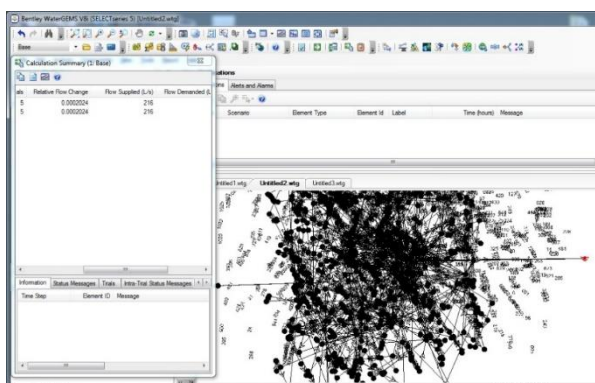
شکل ۱۹: شدت جریان در مدل مرجع با شدت درزه‌های مختلف

افزایش نشت گاز از راکتور به سطح زمین و آلودگی‌های سطحی می‌شود.

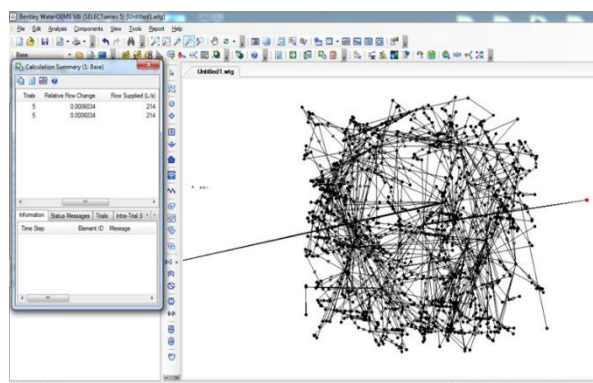
و احتمال افزایش مسیرهای رسانا از سطح راکتور تا سطح زمین را بیشتر می‌کند. این افزایش مسیرهای رسانا باعث



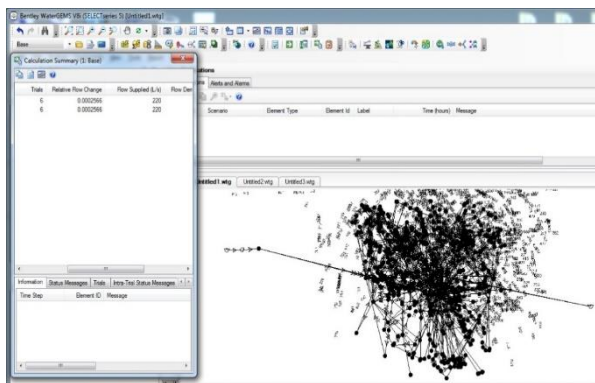
شکل ۲۰: نمودار تاثیر تغییرات شدت درزه‌داری بر شدت جریان سیال



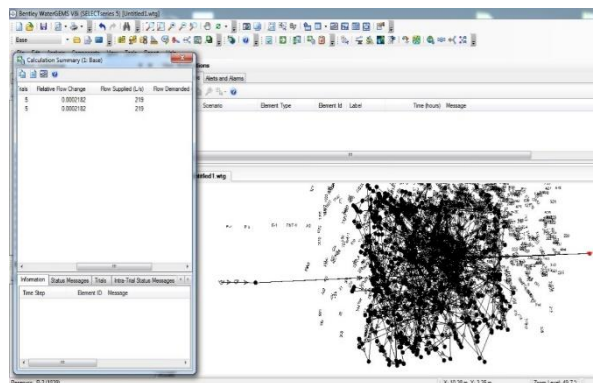
(ب) افزایش ۲۰ درصدی طول درزه‌داری نسبت به حالت واقعی



(الف) طول درزه‌داری واقعی



(ت) افزایش ۶۰ درصدی طول درزه‌داری نسبت به حالت واقعی



(پ) افزایش ۴۰ درصدی طول درزه‌داری نسبت به حالت واقعی

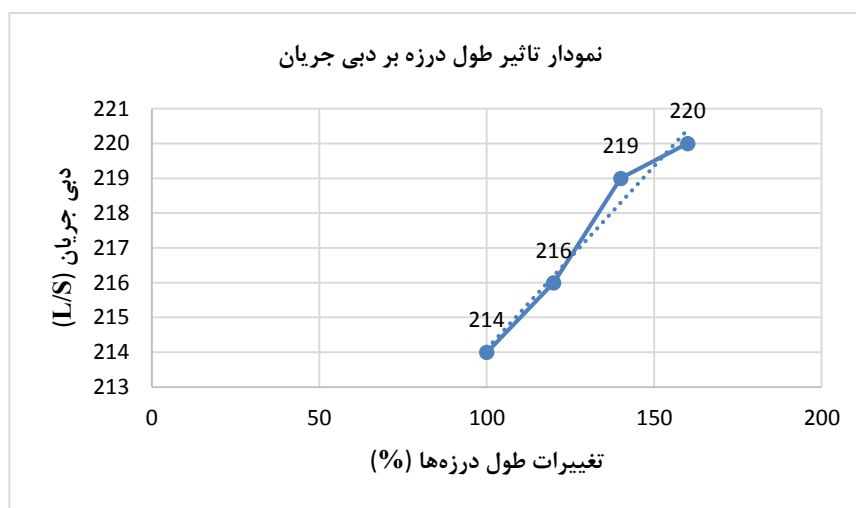
شکل ۲۱: شدت جریان در مدل مرجع با طول درزه‌های مختلف



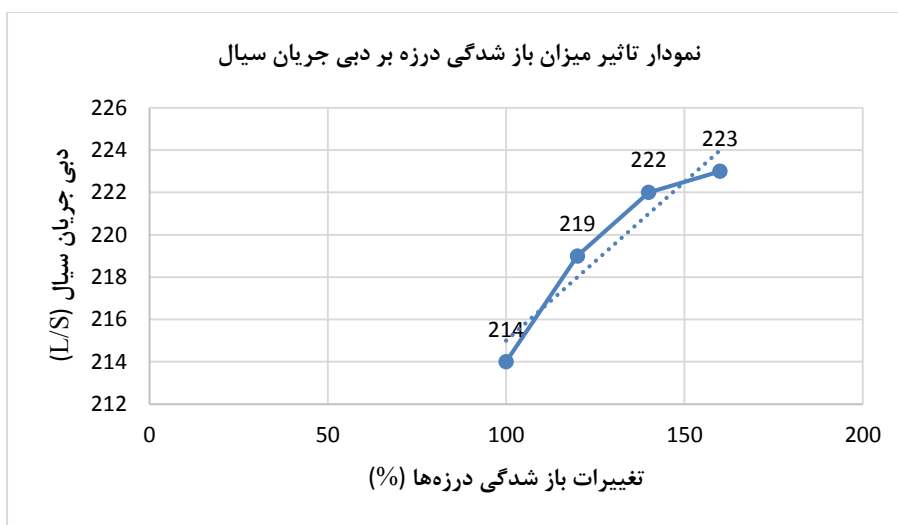
۳-۳-۳- بازشدگی درزه

جریان خروجی از مخزن افزایش می‌یابد. طبق آنچه که در بخش ۱-۸ و نیز رابطه ۱ در بخش ۲-۳ بیان شد، می‌توان نتیجه گرفت که میزان بازشدگی درزه‌ها با قطر لوله‌های معادل رابطه مستقیم دارد و با افزایش قطر لوله‌ها مقدار گاز خروجی از آن‌ها نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، افزایش میزان بازشدگی درزه‌ها باعث افزایش نشت گاز از کارگاه استخراج UCG می‌شود.

آخرین ویژگی از ویژگی‌های درزه که در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، بازشدگی درزه است. برای این منظور نیز همانند بخش‌های قبل، در حالت مدل حاصل شده از برداشت‌های واقعی درزه از منطقه مزینو و سه حالت دیگر افزایش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی بازشدگی درزه نسبت به حالت اول و با فرض ثابت ماندن سایر ویژگی‌های مدل، بررسی انجام شده است. خلاصه نتایج به صورت نموداری در شکل ۲۳ ارائه شده است. با توجه به نمودار با افزایش بازشدگی میزان شدت



شکل ۲۲- نمودار تاثیر تغییرات طول درزه بر شدت جریان سیال



شکل ۲۳: نمودار تاثیر تغییرات باز شدگی درزه بر شدت جریان سیال

## ۴- نتیجه گیری

پیروی می کند.

- موثرترین عامل بر نشت سیال از راکتور UCG، از میان عوامل موثر، عامل درزه‌داری است و از میان ویژگی‌های هندسی درزه‌داری، عامل شدت درزه‌داری به عنوان مهمترین پارامتر معرفی می شود.

## ۵- مراجع

[۱] نجفی، م.، جلالی، س. م.، ا.، خالوکاکی، ر.، لطفی آزاد، ع.؛ ۱۳۹۲؛ "انتخاب لایه امید بخش برای استخراج به روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)". مطالعه موردی منطقه زغالی مزیوی طبس، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، سال هفتم، شماره ۲۵، ص ۸۷-۷۶.

[۲] لطفی آزاد، ع.؛ ۱۳۹۱؛ "مدل سازی و تحلیل نشت گاز از کارگاه استخراج UCG". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[3] Xua, S., and Thomas, L. J. (1995). "Laboratory Investigation on the Permeability of Coal to Mixture of Methane and Carbon dioxide". Int. Symp. Cum Workshop on Management and Control of High Gas Emissions and Outbursts in Underground Coal Mines, Lama, R. D. (Ed). Wollongong, Australia, 311-315.

[4] www.bgr.bund.de/EN/, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Germany.

[5] Dennis, S. (2006). "Rocky Mountain-1 underground coal gasification test project, Hanna". U.S. Department of Energy, Morgantown, USA, 6-10.

[6] Moorhouse, J., Huot, M., and McCulloch, M. (2010). "Underground coal gasification: environmental risks and benefits". Pembina Institute. Alberta, Canada T7A 1S7, 3-10.

[7] Sereshki, F. (2005). "Improving coal mine safety by identifying factors that influence the sudden release of gases in outburst prone zones". PhD thesis, School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Australia, 65-78.

[8] Sury, M., White, M., Kirton, J., and Carr P. (2004). "Review of environmental issues of underground coal gasification". COAL R272 DTI/Pub URN 04/1880. Harwell International Business Centre. Didcot, Oxfordshire, UK, 14-G64.

[9] Perkins, G. (2005). "Mathematical modelling of underground coal gasification". PhD thesis, School of Materials Science and Engineering, The University of New South Wales, Australia, 103-162.

[10] Solcova, O., Soukup, K., Rogut, J., Stanczyk, K., and

در این پژوهش عوامل موثر بر نشت گاز از کارگاه استخراج UCG که یکی از مشکلات اساسی آن محسوب می شود، از لحاظ کمی و کیفی بررسی شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، عوامل فشار و دمای مخزن و شبکه درزه توده سنگ اطراف به عنوان مهمترین عوامل موثر بر نشت سیال از کارگاه استخراج شناخته شده است. با تمرکز بر منطقه مزیوی طبس به عنوان مورد مطالعاتی، ابتدا مدل DFN از توده سنگ منطقه تهیه و سپس مدل شبکه لوله در ابعاد REV هیدرولیکی آن ایجاد شده است. در ادامه تحلیل جریان مدل شبکه لوله تهیه شده با استفاده از نرم افزار Water Gems انجام شده و بدین ترتیب یک مدل مرجع برای تحلیل حساسیت‌های بعدی فراهم شد. نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

- افزایش فشار سیال یا به عبارت دیگر افزایش فشار راکتور باعث افزایش شدت جریان و یا افزایش نشت گاز می شود و منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به فشار از توزیع نرمال پیروی می کند. بنابراین تا حد ممکن باید سعی شود فشار راکتور کاهش یابد و به فشار ایستابی نزدیک باشد.

- افزایش دمای سیال یا افزایش دمای راکتور تاثیری بر شدت جریان خروجی نشان نمی دهد و منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به دما از توزیع یونیفرم پیروی می کند. البته ممکن است تاثیرات بسیار کمی وجود داشته باشد که به دلیل دقت یک لیتری نرم افزار، این تغییرات نمایش داده نمی شود.

- افزایش شدت درزه‌داری یا به عبارت دیگر تعداد درزه‌ها، عامل اصلی نشت سیال‌اند و افزایش شدت درزه‌داری تاثیر به سزایی بر شدت جریان سیال خروجی و نشت آن دارد. همچنین منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به شدت جریان از توزیع نرمال پیروی می کند.

- افزایش بازشدگی درزه به معنای افزایش قطر لوله‌های معادل و افزایش توان انتقال سیال است. با افزایش بازشدگی درزه‌ها، نشت جریان افزایش خواهد یافت.

- افزایش طول درزه‌ها، به معنی افزایش احتمال برخورد درزه‌ها با یکدیگر و نیز رسانا شدن تعداد بیشتری از درزه‌ها است. بر اساس مدلسازی‌های انجام شده، این نظریه به اثبات رسیده که افزایش طول درزه‌ها، باعث افزایش میزان نشت گاز می شود.

- منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به شدت درزه‌داری، بازشدگی درزه و طول درزه در هر سه مورد از توزیع نرمال

- Dreuzy, J. R. (2007). "Simulation and analysis of solute transport in 2D fracture/pipe networks: The SOLFRAC program". Journal of Contaminant Hydrology, 89 1-28. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.07.005.
- [22] نوروزی، م.؛ ۱۳۹۳؛ "برآورد مقاومت توده‌سنگ دارای ناپیوستگی‌های ناپایا با استفاده از مدل تصادفی شبکه درزه‌های مجزا (مورد مطالعاتی: توده‌سنگ ساختگاه سد و نیروگاه رودبار لرستان)". رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [23] نوروزی، م.، جلالی، س. م. ا.، خالوکاکی، ر.؛ ۱۳۹۴؛ «شبیه‌سازی هندسی سه‌بعدی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان». نشریه مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره چهارم، شماره ۱، ص ۵۳-۶۸.
- [24] Jones, N., Holloway, S., Smith, N. J., Creedy, D. P., Garner, K., and Durucan, S. (2004). "UK coal resource for new exploitation technologies". British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, pp. 231.
- Schneider, P. (2009). "Gas transport through porous strata from underground reaction source; the influence of the gas kind, temperature and transport-pore size". Fuel Processing Technology 90: 1495–1501.
- [11] Couch, G. R. (2009). "Underground coal gasification". IEA Clean Coal Center. International Energy Agency, London, UK, ISBN: 978-92-9029-471-9, 13-113.
- [12] Zamzow, K. L. (2010). "Underground Coal Gasification: History, Environmental Issues, and the Proposed Project at BELUGA, ALASKA". Center for Science in Public Participation, pp. 40.
- [13] Dabbous, M. K., Reznik, A. A., Taber, J. J., and Fulton, P. F. (1974). "The permeability of coal to gas and water". Society of Petroleum Engineers, 14(6): 563-572.
- [14] Hayes, P. J. (1982). "Factors affecting gas release form the working seam, Seam gas drainage with particular reference to the working seam". Hargraves, A. J. (ed.), University of Wollongong, Wollongong, Australia, 62-69.
- [15] Baecher, G. B. (1983). "Statistical analysis of rock mass fracturing". Journal of Mathematical Geology, 15(2): 329-347.
- [16] Priest, S. D. (1993). "Discontinuity Analysis for Rock Engineering". Published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London, pp. 473. ISBN: 9789401114981.
- [17] Kulatilake P. H. S. W., Um J., Wang M., Escandon R. F., and Varvaiz J. (2003). "Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA". Engineering Geology, 70: 131–155.
- [18] Zhang, Q. H., and Yin, J. M. (2014). "Solution of two key issues in arbitrary three-dimensional discrete fracture network flow models". Journal of Hydrology, 514: 281–296.
- [19] Blessent, D., Therrien, R., and Gable, C. (2011). "Large-scale numerical simulation of groundwater flow and solute transport in discretely-fractured crystalline bedrock". Advances in Water Resources, 34: 1539–1552.
- [20] Zimmerman, R. W., and Bodvarsson, G. S. (1996). "Hydraulic conductivity of rock fractures". Transport in Porous Media, 23: 1-30.
- [21] Bodin, J., Porel, G., Delay, F., Ubertosi, F., Bernard, S., and

<sup>1</sup> Underground Coal Gasification(UCG)

<sup>2</sup> Patching

<sup>3</sup> Somerton

<sup>4</sup> Xua and Thomas

<sup>5</sup> Capillary Tubes

<sup>6</sup> Dartbook

<sup>7</sup> Chinchilla

<sup>8</sup> El Tremedal

<sup>9</sup> Thulin

<sup>10</sup> Barbara

<sup>11</sup> Hydrostatic

<sup>12</sup> Continuity

<sup>13</sup> Lingard et al

<sup>14</sup> Hayes

<sup>15</sup> Equivalent porous medium (EPM)

<sup>16</sup> Fractured porous medium (FPM)

<sup>17</sup> Dual porosity

<sup>18</sup> Dual permeability

<sup>19</sup> Shape File



DOI:10.30479/jmre.2019.10143.1236

## Numerical Study of Effective Parameters on Fluid Leakage from UCG Extraction Stopes

Heydari A.<sup>1</sup>, Jalali S.E.<sup>2\*</sup>, Noroozi M.<sup>3</sup>

1- Ph.D student, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ali.heydari84@yahoo.com

2- Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

jalalisme@gmail.com

3- Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

mnoroozi.mine@gmail.com

(Received: 27 Feb. 2019, Accepted: 19 Jun. 2019)

**Abstract:** Gas leakage through the cracks and tracks surrounding Underground Coal Gasification (UCG) is of criteria affecting the feasibility of economic methods of the UCG reactor. In terms of process control and groundwater contamination capacity, the sealing of the UCG reactor is very important. Various factors affect the gas leakage from the UCG reactor. In this paper, the parameters of pressure, temperature and joint characteristics (including opening, length and intensity) as the most important factors affecting gas leakage through rock mass fractures are examined using numerical modeling. For this purpose, The Mazino Tabas coal area is studied as a case study. The DFN-FRAC3D computer program is used to stochastically simulate joints and create an equivalent pipe network. Also, Water Gems software is used for flow analysis. The results are shown that increasing the reactor pressure and increasing the rock mass jointing around the reactor increases the flow rate and the gas leakage. On the other hand, increasing the reactor temperature does not have a significant effect on the output flow rate. Besides, jointing is the most effective factor in fluid leakage through the UCG reactor. Among the geometrical features of the joint, including the intensity, the opening and the length of the joint, the joint intensity factor has been introduced as the most important factor.

**Keywords:** Numerical modeling, UCG, DFN, Equivalent Pipe network, Gas emission.

### INTRODUCTION

Underground coal gasification (UCG) refers to the process of converting in-situ coal to gas products. One of the most significant problems in UCG is gas leak resulting from the extraction site and its outreach to the ground surface or groundwater resources. In this paper, the factors affecting this issue are investigated to evaluate gas leak. According to the literature, so far, the contribution and effects of each of these factors on the

amount of gas leak have not been quantified. Factors affecting gas leak in UCG include: gas compositions, pressure, temperature, gasification rate, porosity, thickness of slag, water content of groundwater level, and primary and secondary joints. Some of these factors are controllable and others are not.

In this study, using research data acquired from field operation in Mazino area, a 3D model of a Discrete Fracture Network (DFN) is provided by DFN-FRAC<sup>3D</sup> software to create its equivalent pipe network model. Finally, a hydraulic model of the area is analyzed using the Water Gems software to determine the amount of gas leak. Then, sensitivity analysis of the results are performed based on pressure, temperature and joint parameters.

## METHODS

Discrete Fracture Network (DFN) is the most known method of modeling discontinuous behavior of fluid flow in the joint rock area. DFN assumes that the rock matrix is impermeable and the fluid can flow only through the joint network. When the rock matrix permeability is low, this method is preferred [1]. In many geological structures, stone matrix permeability is very small compared to the permeability of fractures in the rock mass and fractures are the mainstream of the fluid flow.

Here, the equivalent pipe network is created based on DFN model. Each fracture plate has the traces of all the intersecting fractures. Equivalent pipes are made by connecting the center of the lines in the plate. In each fracture plate, the pipes are connected from the midpoints of the line to create a pipe network. Then, diameter of the equivalent pipe is calculated for each joint (Figure 1).

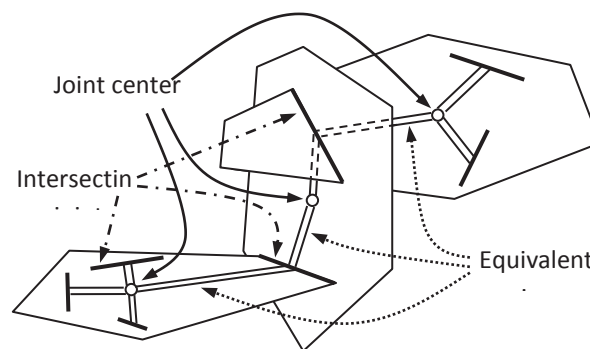


Figure 1. Schematic view of converting joints into a pipe network

As they have no effect on the fluid flow, isolated joints can be eliminated in DFN. The hydraulic model: in order to analyze the pipe network, the commercial Water Gems software is employed. Before starting the flow modeling process, numerical outputs of the DFN-FRAC<sup>3D</sup> software need to be entered into the Water GEMS software. Two reservoirs are defined at the start and end points of the network and a suitable pump is provided for supplying the reservoir pressure at the beginning point.

## FINDINGS AND ARGUMENT

Figure 2 shows an example of implemented DFN, a network of connected joints identified, and an equivalent pipe network model. In this model, intersecting pipes with upper and lower boundaries are connected to two points via the virtual pipes. These virtual pipes are assumed to have no friction so they don't effect the results of hydraulic analysis. In this way, the pressure/suction head is applied on the first point and measured at the second point.

In the case of the Mezino area in Tabas, due to large number of formed pipes, the Representative Elementary Volume (REV) modeling is performed.

Five cubic sample sizes of 3, 5, 8, 10 and 15 m are considered. Based upon REV size, the estimated average flow rate of the studied rock mass is 212 lit/s (Figure 3).

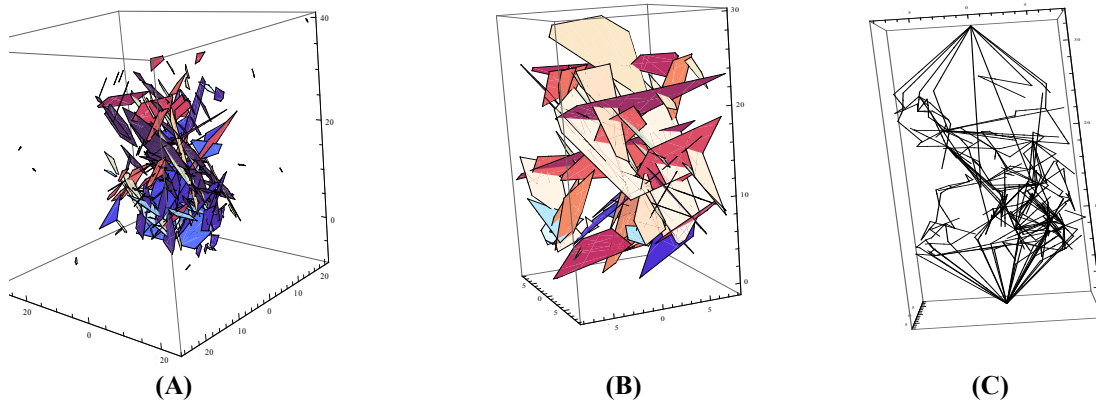


Figure 2. A) A joint network with all the available joints, B) A connected joint network (conductor), C) An equivalent pipe network

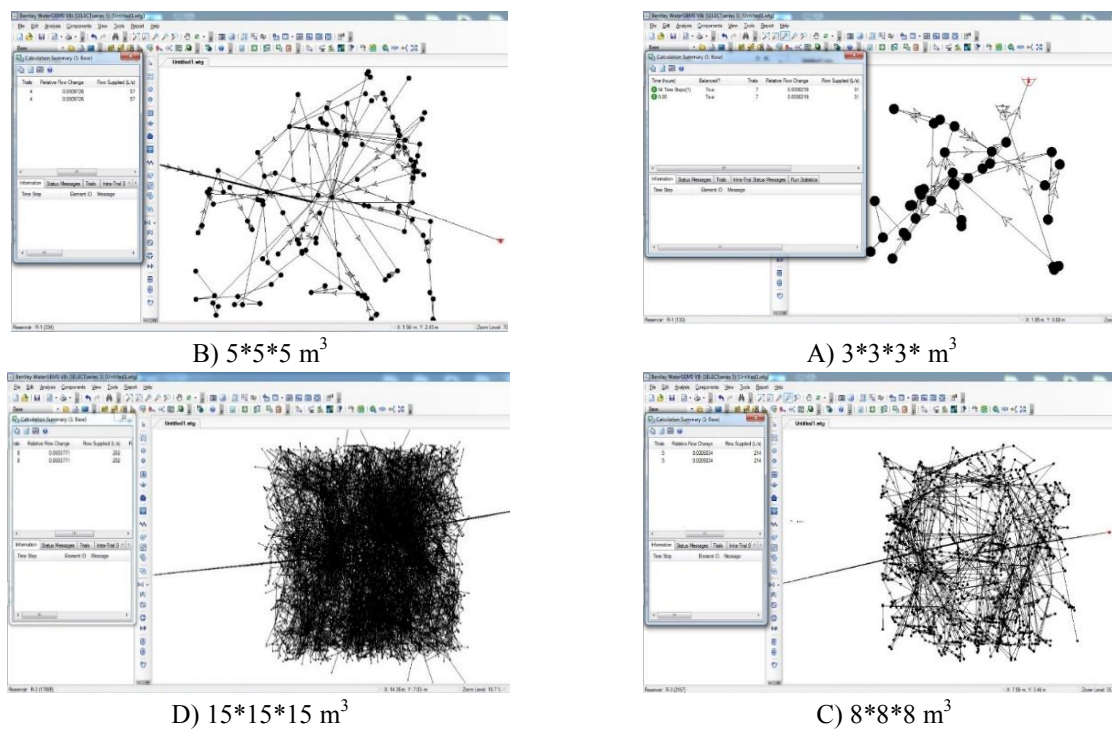


Figure 3. Results of flow analysis by Water Gems software

**FINDINGS**

According to the analysis, it is concluded that pressure, temperature, and jointing system are of most important factors contributing gas leak from the rock mass. Among the joint properties, opening in the first place, and then, (spacing) intensity and joint length are the main effective parameters in fluid leak. Results of the study are presented in Figures 4.

**CONCLUSIONS**

According to the results obtained it can be concluded that:

- Increasing in the fluid or reactor pressure increases the flow rate or gas leak so the flow rate curve varies depending on the pressure follows normal distribution.
- Increasing in the fluid or reactor temperature has no significant effect on the intensity of the outlet flow so the flow rate curve varies depending on the temperature follows uniform distribution.

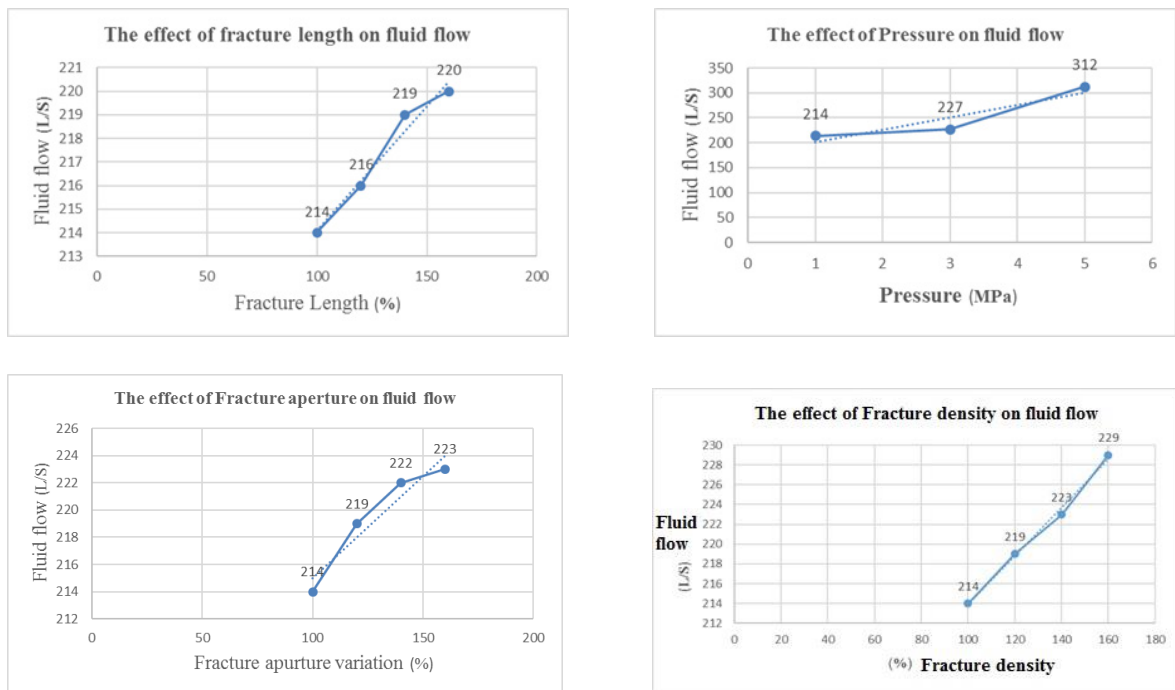


Figure 4. Derived from the research findings

- Aggravated jointing intensity (i.e. the number of joints) is the main cause of fluid leakage so it has a significant effect on the outlet flow rate and its leakage.
- Increasing in the joint opening means increases both diameter of the equivalent pipes and fluid transfer capacity. The flow leakage will be increased by increasing in the joint opening.
- Increasing the length of joints means that the joints are more likely to collide with each other and consequently more joints are included in the conductive joints. Based on the performed modeling, it has been proven that increasing the joint length increases the gas leakage rate.
- Also the curve of flow rate with respect to joint intensity, joint opening and joint length follows the normal distribution.

**REFERENCES**

[1] Bimmerman, R. W., and Bodvarsson, G. S. (1996). "Hydraulic conductivity of rock fractures". Transport in Porous Media, 23: 1-30.

[2] Bodin, J., Porel, G., Delay, F., Ubertosi, F., Bernard, S., and Dreuzy, J. R. (2007). "Simulation and analysis of solute transport in 2D fracture/pipe networks: The SOLFRAC program". Journal of Contaminant Hydrology, 89: 1-28. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.07.005.