

مدل سازی هندسی - تصادفی سه بعدی توده سنگ منطقه مزیو با هدف برآورد نشت گاز در استخراج به روش گاز کردن

علی حیدری^۱؛ سیدمحمد اسماعیل جلالی^۲؛ مهدی نوروزی^{۳*}

۱- دانشجوی دکترای استخراج معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، ali.heydari84@yahoo.com

۲- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalime@shahroodut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir

(دریافت ۱۳ مرداد ۱۳۹۵، پذیرش ۲۲ آذر ۱۳۹۶)

چکیده

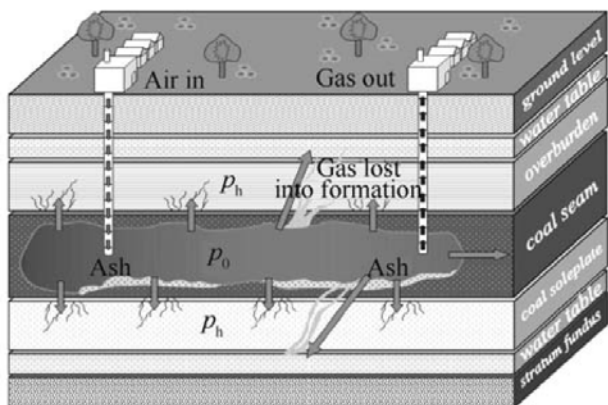
در ایران بخش زیادی از ذخایر زغال سنگ در عمق واقع شده و یا ضخامت کمی دارند که برای استحصال و استفاده از این منابع، فناوری گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) می تواند به عنوان بهترین گزینه مطرح باشد. یکی از این ذخایر زغال سنگ، زغال سنگ های منطقه مزیو طیس است. از جمله معیارها و عوامل تأثیرگذار بر امکان پذیری و اقتصادی بودن روش UCG، نشت گاز از میان درزه و شکاف های اطراف ژئوراکتور زیرزمینی و یا به عبارت دیگر عایق بودن آن است. در این مقاله، با توجه به اهمیت این موضوع، بر مدل سازی نشت گاز بر اساس مدل جریان شبکه درزه های مجزا (DFN) سه بعدی تمرکز شده است که در مطالعات پیشین تاکنون به آن پرداخته نشده است. در این راستا، با استفاده از داده های میدانی درزه های برداشت شده از منطقه مزیو، مدل هندسی-تصادفی سه بعدی شبکه ی درزه های توده سنگ با استفاده از برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} تهیه شده است. برای این منظور، این برنامه برای در نظر گرفتن توابع توزیع مختلف بازشدگی درزه و همچنین وابستگی بین طول و بازشدگی توسعه داده شده است. نتایج این مقاله می تواند ورودی های مفید برای مدل های عددی برای مطالعه رفتار هیدرولیکی و نشت گاز باشند.

کلمات کلیدی:

مدل سازی هندسی-تصادفی، گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، نشت گاز، منطقه مزیو طیس

۱- مقدمه

انتقال یا نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور UCG باید مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱: فرار گاز از ژئوراکتور UCG و انتقال آلوده‌کننده‌ها به محیط اطراف و آب‌های زیرزمینی [۹]

نخستین گام در توسعه یک مدل جریان یا مطالعه رفتار مهاجرت سیال در توده‌سنگ‌های درزه‌دار، ساخت مدلی هندسی از شبکه درزه متناسب با هندسه داده‌های برداشت شده از زمین است. چون توده‌سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده است، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله جهت، پایایی و فاصله‌داری دارای مقادیری پراکنده در توده‌سنگ باشند. بنابراین لازم است ماهیتی تصادفی برای ویژگی‌های مورد نظر در نظر گرفته شود و در مدل‌سازی توده‌سنگ به‌کار رود. از بهترین روش‌های دارای توانایی شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌های مجزا (DFN^۲) است [۱۱].

تولید شبکه درزه‌های مجزا نیازمند دانش در خصوص ویژگی‌های درزه، شامل تعداد، جهت، فاصله‌داری، پایایی و شدت درزه است. همچنین دیگر ویژگی‌های درزه مانند نفوذپذیری و بازشدگی درزه، در صورتی که نفوذپذیری خمیره در مقابل درزه‌ها پایین باشد، اساساً رفتارهای جریان و انتقال سیال را کنترل می‌کنند [۱۲]. واقعیت این است که در بسیاری از ساختارهای زمین-شناسی، نفوذپذیری خمیره سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ بسیار ناچیز است و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند. در این حالت رفتار جریان سیال در توده‌سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود و

بنا به آخرین آمار موجود، ذخایر اقتصادی زغال‌سنگ شناخته شده در سطح جهان تنها در حدود ۱۰۰۰ میلیارد تن برآورد می‌شود، در حالی که ذخیره کلی تخمین زده شده (نه لزوماً اقتصادی) بیش از ۱۸ هزار میلیارد تن است. بیشتر این ذخایر در عمق زیاد واقع شده‌اند و تنها حدود ۵ درصد آن‌ها با روش‌های معدن‌کاری کنونی قابل استخراج است [۱]. از این‌رو امروزه به‌منظور افزایش بازیابی لایه‌های زغال‌سنگ با ضخامت‌های متغیر و در اعماق زیاد، روش گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG^۱) مورد توجه قرار گرفته است [۲]. در این فرآیند لایه‌های زغال‌سنگ بدون نیاز به عملیات معدن‌کاری سنتی با یک فرآیند پیشرفته مبتنی بر اندرکنش ترمومکانیکی و ترموشیمیایی، به‌صورت برج‌ها و در زیرزمین و در محیطی شبیه به یک ژئوراکتور زیرزمینی به گاز سنتزی تبدیل می‌شوند. محصولات گازی حاصل شده دارای ارزش حرارتی در حدود ۳۷۰۰ تا ۱۱۲۰۰ کیلوژول بر مترمکعب در شرایط متعارف هستند و کاربرد گسترده‌ای در تولید برق، تولید هیدروژن، سوخت مایع و غیره دارد [۳].

برای اجرای روش UCG همانند سایر روش‌های مرسوم معدن‌کاری معیارهایی باید در نظر گرفته شود. از جمله این معیارها می‌توان به ضخامت لایه (۱ تا ۳۰ متر)، شیب لایه (صفر تا ۷۰ درجه)، نوع زغال‌سنگ، خاکستر لایه (کمتر از ۶۰ درصد)، پراکندگی گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها و ذخیره‌ی لایه (بیشتر از ۳/۵ میلیون تن) اشاره کرد [۴،۵]. در این میان، شکستگی‌ها از جمله عوامل محیطی تأثیرگذار بر اقتصادی بودن روش UCG بیان شده است [۶،۷]. واقعیت این است که در حین فرآیند UCG مقداری از گازهای تولید شده از طریق درزه‌های موجود در سنگ‌های اطراف هدر می‌رود. همچنین پس از فرآیند UCG نیز این درزه و شکاف‌ها عامل انتقال خاکستر و سایر آلوده‌کننده‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی است (شکل ۱) [۸،۹].

تعیین پارامترهایی مانند حجم و سرعت انتشار گازها برای توصیف مهاجرت گاز از ژئوراکتورهای زیرزمینی و بررسی پتانسیل آلودگی زیست‌محیطی، قبل، بعد و در طول فرآیند UCG لازم و ضروری است [۱۰]. به‌عبارت دیگر، عایق بودن ژئوراکتور UCG از نقطه نظر کنترل فرآیند و آب‌های زیرزمینی، مسأله بسیار مهمی است. بنابراین بنابراین شبیه‌سازی رفتار

DFN تقریباً به ۳۰ سال پیش، یعنی مدل دوبعدی توسعه داده شده توسط لانگ^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۲ بر می‌گردد [۱۹]. در طی زمان با به‌کارگیری تکنولوژی‌های محاسباتی، شبکه درزه سه‌بعدی شامل درزه‌های چندضلعی یا دیسک شکل ایجاد شدند. مدل‌های جریان و انتقال در یک سیستم DFN به‌طور معمول به شبکه‌های معادل تقریبی لوله‌های یک‌بعدی بر اساس مفهوم پیشنهاد شده توسط لانگ و همکاران در سال ۱۹۸۵ [۲۰] و کاکاس^۴ و همکاران در سال ۱۹۹۰ [۲۱، ۲۲]، تبدیل می‌شدند. شیوه شبکه لوله معادل برای تخمین جریان کافی است اما به‌منظور بررسی جزئیات جریان و مکانیزم انتقال در داخل درزه‌ها، شیوه‌های پیشرفته‌تر بر اساس مش‌بندی عددی درزه‌ها توسعه داده شدند [۱۲]. در جدول ۱ برخی از مدل‌های DFN ساخته شده در سال‌های اخیر به‌منظور تخمین جریان و انتقال سیال در توده‌سنگ درزه‌دار، جمع‌آوری شده است.

در خصوص نشت گاز از درزه و شکاف‌های اطراف کارگاه UCG مطالعات بسیار کمی وجود دارد و اکثر این مطالعات اندک نیز از روش‌های اندازه‌گیری [۱۰] و یا آزمایشگاهی [۳۲] برای بررسی نشت گاز در توده‌سنگ‌های اطراف استفاده کرده‌اند.

در تحقیق انجام شده توسط یانگ^۵ در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی، قوانین تحلیلی حرکت گاز در گازکردن زیرزمینی زغال تحلیل شده است. مدل‌های ریاضی نشت غیرخطی سه بعدی سیال با استفاده از روش اجزای محدود ایجاد شده است [۳۳، ۳۴]. برخی از مطالعات نیز از تأثیر درزه‌ها بر انتشار گاز حاصل از UCG که مهم‌ترین عامل انتشار گاز در این فرآیند است (بر طبق مطالعات پیشین) صرف نظر شده است و به‌طور خاص بر سایر عوامل انتشار گاز از جمله لایه زغالی [۹] و بافت متخلخل محیط اطراف [۳۵] تمرکز شده است.

در این تحقیق، با توجه به اهمیت نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور UCG و مساله آب‌های زیرزمینی، بر مدل‌سازی نشت گاز بر اساس مدل جریان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) سه‌بعدی تمرکز شده است که در مطالعات پیشین تاکنون به آن پرداخته نشده است. در این راستا به تهیه مدل هندسی-تصادفی سه بعدی شبکه‌ی درزه‌های توده‌سنگ اطراف ژئوراکتور، با هدف بررسی نشت گاز از کارگاه پرداخته می‌شود.

برآورد آن نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیکی شبکه شکستگی است.

در این مقاله، با استفاده از داده‌های میدانی درزه‌های برداشت شده از منطقه مزیو، مدل هندسی-تصادفی سه بعدی شبکه‌ی درزه‌های توده‌سنگ با استفاده از برنامه کامپیوتری DFN-^{3D} FRAC [۱۳]، با هدف بررسی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG تهیه شده است. بدین منظور برنامه DFN-FRAC^{3D} برای در نظر گرفتن توابع توزیع مختلف بازشدگی درزه و همچنین وابستگی بین طول و بازشدگی توسعه داده شده است. پردازش داده‌ها شامل تطبیق توابع توزیع احتمالی متفاوت بر ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های برداشت شده انجام شده است. در این مطالعه، فرض شده است که نفوذپذیری در درزه‌ها به‌طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از خمیره سنگی باشد. همچنین درزه‌های چندضلعی، برای تولید DFN سه‌بعدی به‌کار رفته است.

۲- پیشنهاد مطالعات

شبیه‌سازی‌های جریان و انتقال سیال در تشکیلات درزه‌دار یک موضوع گسترده در علم مکانیک سنگ است و نقش مهمی را در بررسی منابع آب، ذخیره‌سازی باطله‌های هسته‌ای، ازدیاد تولید نفت و گاز، تولید گاز شیلی غیرمعمول و ذخیره‌سازی زیرزمینی CO₂ بازی می‌کند [۱۴، ۱۵]. همچنین این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند نقش قابل توجهی در بررسی نشت گاز از کارگاه زیرزمینی گاز کردن زغال داشته باشد. جریان سیال در توده‌سنگ‌های ناپیوسته اغلب توسط ویژگی‌های درزه‌ها (بازشدگی، جهت، پایایی، فاصله‌داری و غیره) کنترل می‌شود. در این زمینه موضوعات بسیاری وجود دارد که به خوبی روشن نشده است و نیاز به مطالعات بیشتر دارد [۱۵]. همچنین در حال حاضر، توسعه و پیشرفت مدل‌های جریان DFN سه‌بعدی به‌دلیل پیچیدگی ترکیب‌بندی‌ها و ویژگی‌های نشت درزه‌های سه بعدی در سنگ‌های درزه‌دار واقعی، به‌کندی پیش می‌رود [۱۵].

در دهه‌ی اخیر تلاش‌های بسیاری برای درک رفتار جریان سیال در توده‌سنگ‌ها انجام شده است [۱۶، ۱۷]. اگرچه، تخمین دقیق نفوذپذیری در توده‌سنگ‌ها، به‌دلیل پیچیدگی‌های توزیع درزه‌ها در درشت‌ساختارها (یعنی هندسه شبکه درزه) و ریزساختارها (یعنی هندسه فضاهای خالی در داخل درزه‌های منفرد)، هنوز موضوعی چالش برانگیز است [۱۸]. تاریخچه مدل‌های جریان

جدول ۱: برخی از مدل‌های DFN ساخته شده در سال‌های اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال سیال

ردیف	پژوهشگر	موضوع و نتایج تحقیق
۱	Meyer and Einstein, 2002 [23]	با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از تعدادی از تونل‌ها در ناحیه بوستون اقدام به مدل‌سازی سه بعدی تصادفی سیستم درزه منطقه و شناسایی زیرشبکه‌های متصل در مدل کردند.
۲	Ito and Seol, 2003 [24]	با توسعه شبیه‌ساز شبکه DFN سه‌بعدی FracMesh و کاربرد نرم‌افزار عددی جریان چندفازی TOUGH2، به مطالعه انتقال جریان در محیط متخلخل درزه‌دار با در نظر گرفتن برهم‌کنش خمیره-درزه پرداختند.
۳	شریف‌زاده و همکاران، ۱۳۸۵ [۲۵]	به تحلیل هیدرولیکی- هیدرومکانیکی توده‌سنگ اطراف تونل با استفاده از روش المان مجزا در قالب برنامه UDEC پرداختند. آن‌ها نشان دادند که الگوی توزیع جریان در داخل توده‌سنگ به الگوی درزه‌داری و ارتباط درزه‌ها به یکدیگر بستگی دارد.
۴	Baghbanan and Jing, 2008 [26]	اقدام به توسعه مدل تصادفی دوبعدی به منظور بررسی اثرات وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه بر رفتار هیدرومکانیکی و مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار کردند.
۵	Bang et al., 2012 [27]	یک مدل DFN سه بعدی را به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی توده‌سنگ گرانیتهی اطراف تونل تحقیقاتی زیرزمینی KURT در کره جنوبی توسعه دادند. مدل DFN با فرض همبستگی بین طول و بازشدگی درزه‌ها و مسیر جریان دوزنقه‌ای در درزه‌ها ایجاد شد.
۶	Parashar and Reeves, 2012 [28]	روی پیچیدگی‌های محاسباتی شبیه‌سازی جریان در مدل‌های DFN بزرگ مقیاس تمرکز کردند. آن‌ها روش تکرار شونده شبه‌فضایی Krylov را به عنوان مهم‌ترین روش‌ها برای حل شبکه‌های بزرگ در نظر گرفتند.
۷	جوادی و شریف‌زاده، ۱۳۹۱ [۲۹]	برنامه کامپیوتری FNETF برای ساخت شبکه DFN و تحلیل عددی دوبعدی جریان آرام در شبکه (با روش المان محدود) توسعه دادند. با کاربرد این برنامه، جریان آب ورودی به مغار سیاه بیشه مطالعه شد.
۸	Bigi et al., 2013 [30]	با هدف تعیین مقدار نفوذپذیری گاز CO ₂ ، مدل DFN ای تحت عنوان AM تهیه کردند که توانایی مدل کردن درزه‌های مشاهده شده در میدان را داشته باشد. آن‌ها نشان دادند که مدل‌های DFN تجاری مقادیر نفوذپذیری را کمتر تخمین می‌زنند (در حدود دو برابر) و ناهمسانگردی‌های وابسته به گسل را در نظر نمی‌گیرند.
۹	Zhang and Yin, 2014 [15]	روش برش بلوک سه بعدی برای شناسایی روابط اتصال بین درزه‌ها و مسیرهای جریان در DFN های پیچیده اتخاذ کردند. آن‌ها، فرض کردند سیال از طریق مرزهای بلوک‌ها جریان می‌یابد. نسبت به روش‌های دیگر، شیوه آن‌ها، در ارتباط با تعداد نسبتاً کمتری درزه صادق است. درزه‌ها، صاف، موازی و با بازشدگی ثابت فرض شدند.
۱۰	Lee and Ni, 2015 [12]	اقدام به توسعه مدل DFN سه بعدی و مدل تولید مش ساخت‌نیافته (UMG) به منظور شبیه‌سازی جریان و انتقال CO ₂ از توده سنگ‌های درزه‌دار کردند. آن‌ها نرم افزار تجاری TOUGH2 را برای آنالیز جریان سیال بکار بردند. در این مطالعه بازشدگی درزه‌ها ثابت فرض شده است.
۱۱	Liu et al., 2015 [18]	یک مدل فراکتال برای بررسی نفوذپذیری معادل شبکه‌های درزه دوبعدی ایجاد و رابطه بین بعد فراکتال و نفوذپذیری معادل تحلیل کردند. نشان داده شد که نفوذپذیری معادل شبکه درزه، به‌طور قابل توجهی از آشفستگی جریان سیال، بازشدگی درزه‌ها و عدد تصادفی به‌کاررفته برای تولید توزیع طول فراکتال درزه‌ها تأثیر می‌پذیرد.
۱۲	Hyman et al., 2015 [31]	یک بسته محاسباتی برای تولید DFN سه‌بعدی و شبیه‌سازی جریان و انتقال به نام DFNWORKS تولید نمودند. مدل DFN با استفاده از ابزار تجاری LAGRIT، مش‌بندی می‌شود. سپس نرم افزار تجاری PFLOTRAN برای محاسبه فشار و جریان در شبکه به‌کار برده می‌شود.

۳- منطقه‌ی مزینو طبس

برای دستیابی به دیدی درست از درزه‌های برداشت شده لازم است درزه‌ها به سه گروه تقسیم شوند. درزه‌هایی که هر دو انتهای آن‌ها دیده می‌شود (n)، درزه‌هایی که فقط یک انتهای آن‌ها دیده می‌شود (m) و درزه‌هایی که هیچ یک از دو انتهای آن دیده نمی‌شود (p). سپس ضرایب R_0 ، R_1 و R_2 برای نشان دادن وضعیت پایان‌یابی درزه‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{p}{(p+m+n)} \\ R_1 &= \frac{m}{(p+m+n)} \\ R_2 &= \frac{n}{(p+m+n)} \end{aligned} \quad (1)$$

در این مقاله، کانال‌های حفر شده به عمق تقریبی ۱/۵ متر در منطقه مزینو، به‌عنوان تنها رخنمون در دسترس در منطقه، برای برداشت درزه انتخاب شده است (شکل ۳).

در جدول ۲ خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون ارایه شده است.

جدول ۲: خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون

تعداد درزه‌ها	نوع پایان‌یابی درزه‌ها (%)		
	R_2	R_1	R_0
۲۲۹	۷۹	۱۵	۶
میانگین طول درزه‌ها (m)	۰٫۸۱		

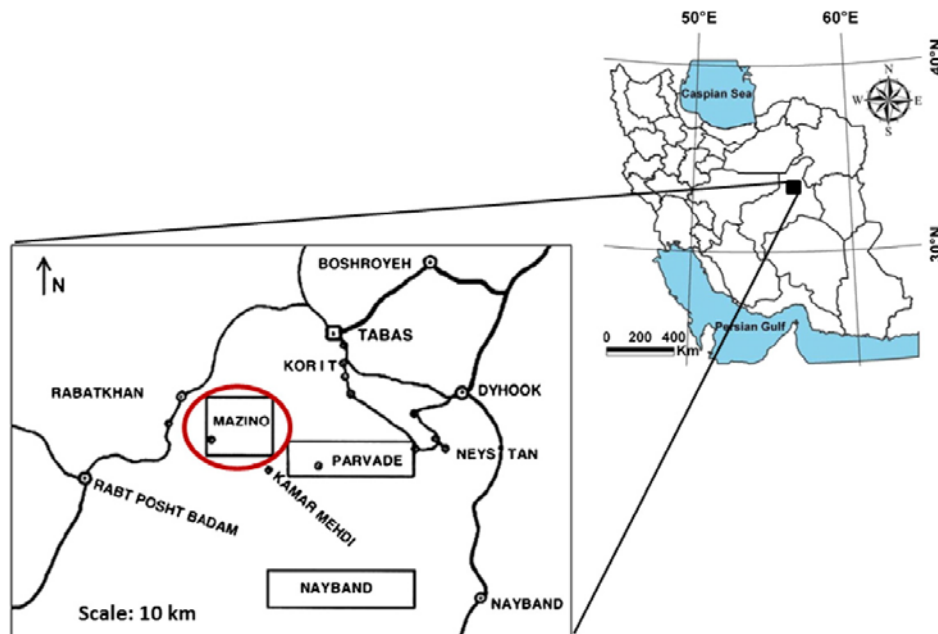
عدم توانایی ثبت درزه‌هایی که طول آن‌ها از حد اندازه‌گیری کوچک‌تر است به‌عنوان خطای فرواندازه^۶ معرفی شده است. همچنین درزه‌هایی که طول آن‌ها به‌دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی‌شود، به‌عنوان خطای فراندازه^۷ شناخته شده است. تأثیر خطای فرواندازه را با کاهش سطح اندازه در موقع برداشت درزه، می‌توان کاهش داد. در این تحقیق طول ۰٫۱ متر برای حد اندازه انتخاب شده است. رخنمون‌های سنگی انتخاب شده نیز دارای اندازه نسبتاً بزرگ در برابر اندازه درزه‌های موجود هستند، پس خطای فرواندازه مد نظر قرار نمی‌گیرد. همچنین چون درصد درزه‌هایی که هر دو انتهای آن قابل مشاهده است، یعنی پایان‌یابی R_2 بسیار بیشتر است، می‌توان در این مورد مطالعاتی از خطای فراندازه نیز چشم‌پوشی کرد [۱۱].

در ایران بخش زیادی از ذخایر زغال‌سنگ در عمق واقع شده و یا ضخامت کمی دارند که برای استحصال و استفاده از این منابع، فناوری UCG می‌تواند به‌عنوان بهترین گزینه مطرح باشد [۳۶]. یکی از این ذخایر زغال‌سنگ، زغال‌سنگ‌های منطقه مزینو طبس است. ناحیه‌ی زغال‌سنگی مزینو، ۸۸۰۰ کیلومتر مربع از حوضه-ی زغال‌دار طبس را در بر می‌گیرد. این ناحیه در ۸۵ کیلومتری غرب شهرستان طبس در استان یزد واقع شده است (شکل ۲).

در منطقه‌ی مزینو، ۷۵ لایه‌ی زغال‌سنگ شناسایی شده است. تشکیلات مزینو شامل ماسه‌سنگ، شیل و گل‌سنگ با میان لایه-هایی از زغال است. زغال‌سنگ‌های ناحیه‌ی مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت، با شیب لایه‌های زغالی کمتر از ۳۰ درجه و ضخامت متغیر ۰/۵ تا ۶ متر است. این خود نشان‌دهنده مناسب بودن تمام لایه‌های زغالی برای اجرای UCG در این منطقه است. از بین لایه‌های منطقه مزینو، لایه‌ی M2 به‌دلیل ضخامت بالا و ذخیره‌ی زیاد نسبت به سایر لایه‌های بررسی شده، دارای اولویت بالاتری برای اجرای UCG است و قادر است به مدت بیش از ۱۰۰ سال گاز سنتزی یک نیروگاه ۲۰۰ مگاواتی را تأمین کند. بنابراین این لایه به‌عنوان لایه‌ی قابل کار برای استخراج به روش UCG انتخاب شده است. این لایه دارای ارتفاع ۳/۵ متر و در عمق ۶۰۰ متری واقع شده است و ۱۳۹ میلیون تن ذخیره دارد [۳۷]. نجفی و همکاران در سال ۱۳۹۳ عرض پهنه‌های استخراجی UCG به روش CRIP در این لایه را در حدود ۴۵ متر محاسبه کردند [۳۶]. در این مقاله نیز از این پارامترها برای ساخت مدل بهره گرفته می‌شود.

۴- درزه‌نگاری

اطلاعات جمع‌آوری شده در این مقاله با استفاده از روش برداشت خطی به‌دست آمده است. در این روش تمامی درزه‌هایی که خط برداشت را در امتداد آن قطع می‌کنند، اندازه‌گیری می‌شوند. در روش برداشت خطی سطوح مسطح تمییز سنگی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که در برابر اندازه و فاصله ناپیوستگی‌ها بزرگ باشد. در این روش باید رخنمون شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل باید یک انتها از ۵۰ درصد آن‌ها قابل مشاهده باشد.



شکل ۲: موقعیت منطقه مزینو [۳۷]



شکل ۳: رخنمون مورد مطالعه

۵- تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه درزه‌ها

با تفکیک هر 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 اساس مشخصات شیب و جهت شیب درزه‌های برداشت شده از منطقه مزینو، همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، تعداد ۴ دسته درزه در

منطقه شناسایی شده است. شایان ذکر است، با توجه به تعداد دسته درزه‌های منطقه، برای انجام مطالعات آماری دقیق‌تر بهتر است، در صورت امکان، تعداد بیشتری درزه برداشت و در محاسبات وارد شود.

۴-۵- طول (پایایی)

چون برداشت مستقیم ناپیوستگی‌ها در داخل سنگ غیر ممکن است، مطالعات بسیار اندکی در خصوص پیمایش‌های سه بعدی درزه وجود دارد. بنابراین در عمل، فرض می‌شود اندازه‌های سه بعدی درزه‌ها دارای ویژگی‌های آماری مشابه با نتایج پیمایش‌های دو بعدی هستند [۴۱]. به‌طور معمول برای توزیع طول اثر واقعی درزه، سه تابع نمایی منفی، لاگ‌نرمال و گاما برای اطلاعات حاصل از پیمایش دوبعدی درزه‌ها به‌کار برده می‌شوند [۱۱].

نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش برای داده‌های برداشت شده طول مربوط به هر دسته درزه در رخنمون سنگی مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق آزمون‌های بهترین برازش، تابع توزیع لاگ‌نرمال 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 ۷ نشان داده شده و مشخصات این توابع در جدول ۳ بیان شده است.

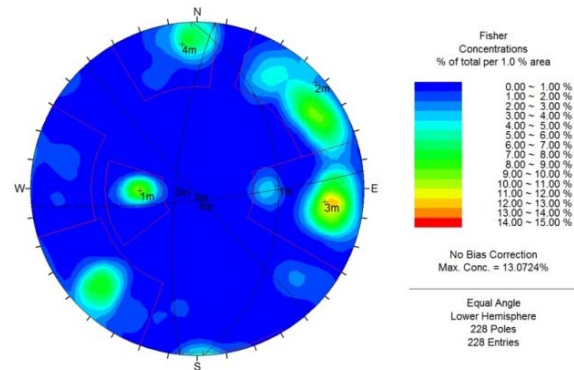
۵-۵- بازشدگی

یکی از ویژگی‌های هندسی درزه که تأثیر مهمی بر رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ دارد، بازشدگی است. وقتی ویژگی‌های سیال تغییر نکنند، یعنی سیال نامتراکم، ایزوترمال و جریان تک-فازی باشد، قابلیت هدایت هیدرولیکی و قابلیت نقل و انتقال توده‌سنگ، تابعی از بازشدگی درزه هستند. بنابراین با توجه به اهداف این مطالعه، در منطقه مورد نظر، مؤلفه بازشدگی درزه‌ها با دقت برداشت و نتایج برداشت تجزیه و تحلیل آماری شده است.

به‌طور کلی فرض می‌شود که بازشدگی درزه از توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کند [۱۷، ۲۷، ۴۲]. تابع چگالی احتمال (PDF) برای توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی‌های درزه (h) می‌تواند به شکل کلی زیر نوشته شود:

$$f_A(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln h - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

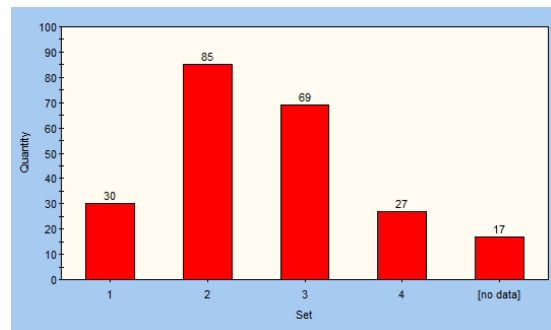
که در آن μ و σ به ترتیب متوسط و انحراف استاندارد لگاریتم طبیعی بازشدگی درزه هستند.



شکل ۴: جدایش دسته درزه‌ها در شبکه اشیمیت

۵-۱- فراوانی دسته درزه‌ها

نمودارهای ستونی دسته درزه‌های تفکیک شده به همراه تعداد در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود دسته درزه‌های ۲ و ۳ دارای تعداد خیلی بیشتری از دسته درزه‌های ۱ (لایه بندی) و ۴ هستند.



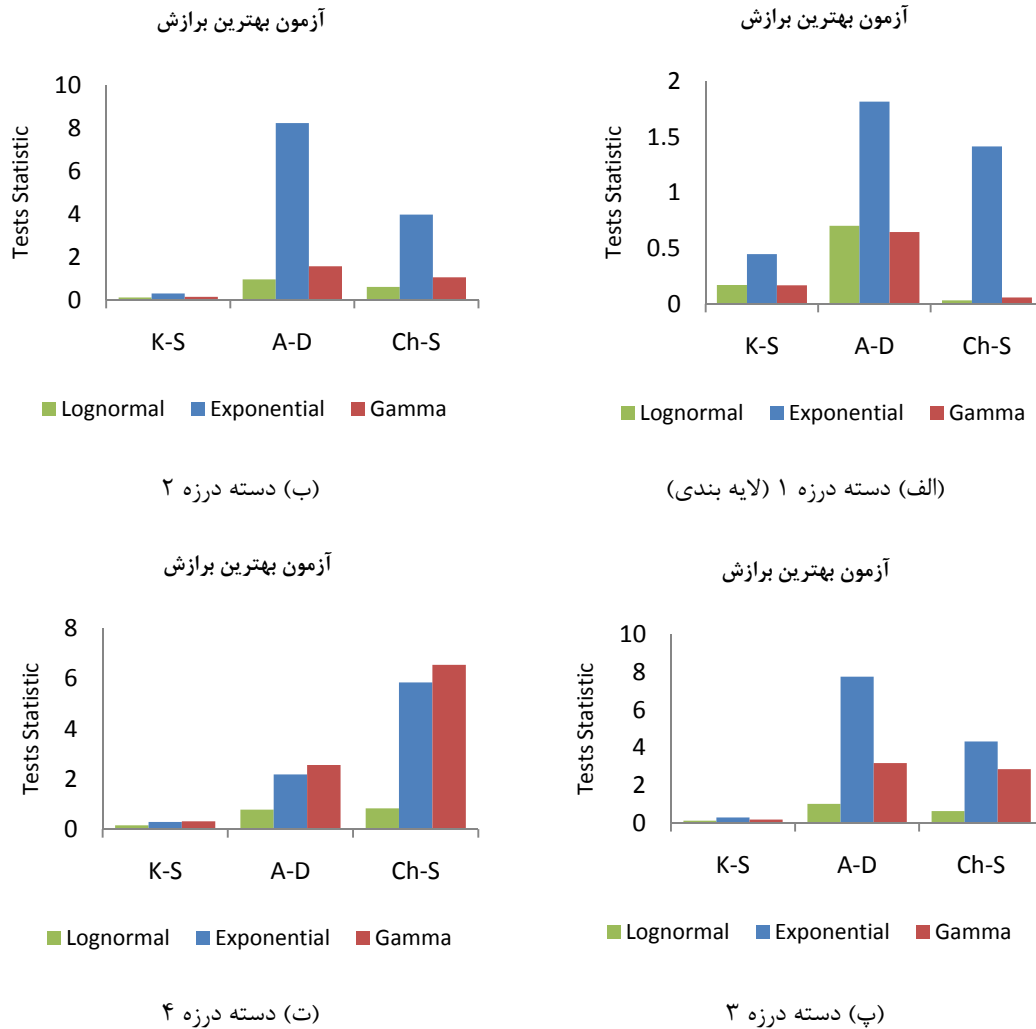
شکل ۵: فراوانی دسته درزه‌های برداشت شده

۵-۲- جهت یافتگی

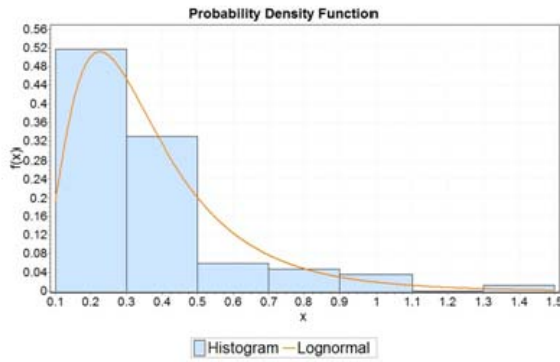
تحقیقات نشان داده است که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند [۳۸، ۳۹]. برای مورد مطالعاتی این تحقیق، ثابت فیشر برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزار Dips به‌دست آمده که در جدول ۳ نشان داده شده است.

۵-۳- فاصله‌داری

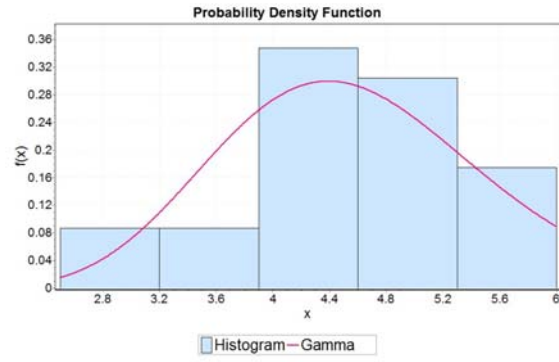
بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، توزیع فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، برای انواع گوناگون سنگ‌های رسوبی، آذرین و متامورفیک می‌تواند با تابع توزیع چگالی احتمالی نمایی منفی مدل شود [۴۰]. بر این اساس، در این مقاله، توزیع نمایی منفی برای فاصله‌داری به‌کار برده شده است.



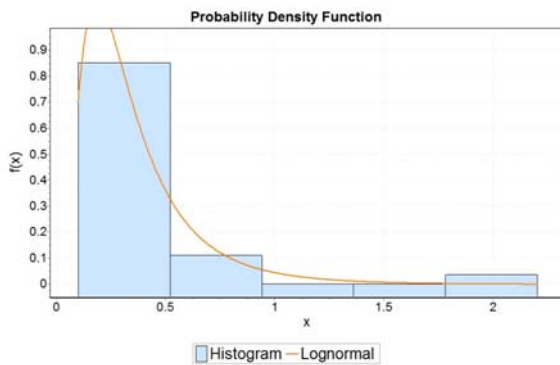
شکل ۶: نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش



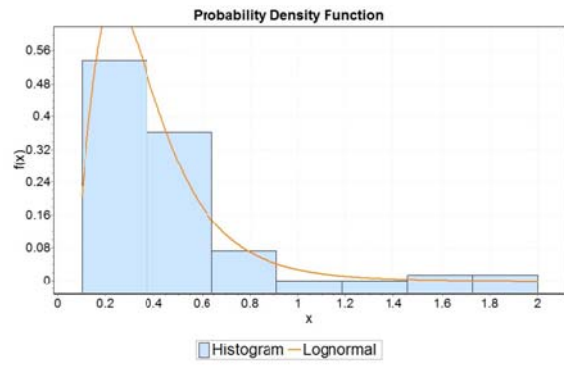
(ب) دسته درزه ۲



(الف) دسته درزه ۱



(ت) دسته درزه ۴



(پ) دسته درزه ۳

شکل ۷: توابع توزیع برازش شده بر درزه‌های برداشت شده

P_{21} ، به‌دست می‌آید. ژانگ و انیشیتین در سال ۲۰۰۰ رابطه زیر را برای محاسبه P_{32} پیشنهاد کردند [۴۳]:

$$P_{32} = \frac{N_T E(A)}{V} \quad (۵)$$

که در آن N_T تعداد کلی درزه‌های برداشت شده، $E(A)$ مساحت متوسط درزه محاسبه شده و V حجم واحد است. مساحت متوسط درزه، با کاربرد رابطه زیر و با فرض دایره‌ای بودن درزه محاسبه می‌شود.

$$E(D) = \frac{128\mu_i^3}{3\pi^3(\mu_i^2 + \sigma_i^2)} \quad (۶)$$

در این مقاله، درزه‌های قابل دیدن با چشم غیرمسلح با استفاده از یک چارچوب ۱ متر مربعی دارای شبکه مش‌بندی ۱۰ سانتی‌متر مربعی در میدان شمارش شدند (شکل ۸). درزه‌های متقاطع با هر خط مش اندازه‌گیری و تعداد کلی درزه‌های شمارش شده در چارچوب ۱ مترمربعی به‌عنوان چگالی سطحی درزه تعریف می‌-

تابع توزیع تجمعی (CDF) برای توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی‌های درزه به‌صورت زیر است:

$$F_A(h) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln h - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right] \quad (۳)$$

که در آن erf تابع خطا است و می‌تواند به‌صورت زیر نوشته شود:

$$\operatorname{erf}(h) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^h e^{-t^2} dt \quad (۴)$$

برای دسته درزه‌های برداشت شده از منطقه مزینو، مشخصات توابع توزیع لاگ‌نرمال برازش شده بر بازشدگی هر دسته درزه در جدول ۳ بیان شده است.

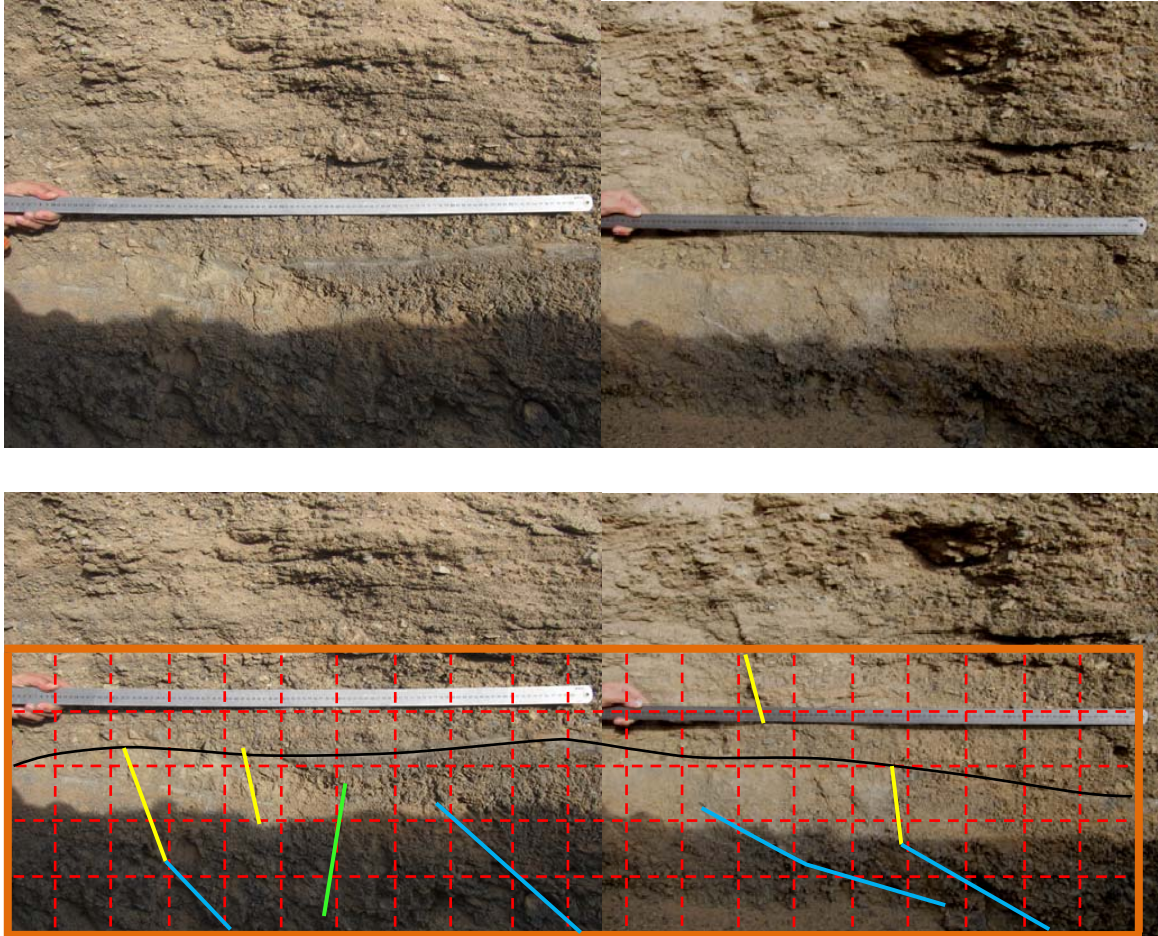
۵-۶- شدت حجمی درزه

به‌طور کلی مقدار شدت حجمی درزه، (متر مربع بر متر مکعب) P_{32} ، از مقادیر شدت سطحی برداشت‌شده، (متر بر متر مربع)

دسترس، در این تحقیق از چارچوب‌های (۵/۰ × ۲) مترمربعی استفاده شده است.

با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده و کاربرد رابطه‌های ۵ و ۶، مقادیر P_{32} برای هر دسته درزه به‌طور جداگانه محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است.

شود [۱۱،۴۴]. شایان توجه این است که استاندارد قابل قبول جهانی برای روش برداشت وجود ندارد و در واقع باید جزئیات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم را برای هدف موردنظر جمع‌آوری کرد و با شرایط محلی سنگ تطابق داد [۳۹]. با ذکر این نکته و با توجه به ارتفاع کم رخنمون در



شکل ۸: اندازه‌گیری چگالی درزه، P_{21}

جدول ۳- 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	۰۸۸/۳۸	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
$\sigma = 0.666$	$\sigma = 0.565$	$\sigma = 0.583$	$\alpha = 23.34$	پارامتر تابع
$\mu = -1.239$	$\mu = -1.109$	$\mu = -1.15$	$\beta = 0.196$	پارامتر تابع
۰/۳۶۱	۰/۳۸۶	۰/۳۷۵	۴/۵۸۷	متوسط (m)
۰/۲۷۰	۰/۲۳۷	۰/۲۳۹	۰/۹۴۹	انحراف استاندارد (m)
لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	تابع توزیع
$\sigma = 0.570$	$\sigma = 0.542$	$\sigma = 0.542$	$\sigma = 0.440$	پارامتر تابع
$\mu = -0.222$	$\mu = -0.056$	$\mu = -0.058$	$\mu = 0.572$	پارامتر تابع
۰/۸۵۲	۱/۰۹۵	۱/۰۹۲	۱/۹۵۳	متوسط (mm)
۰/۵۲۸	۰/۶۴۰	۰/۶۳۹	۰/۹۰۴	انحراف استاندارد (mm)

که در آن h_a و h_b به ترتیب حدود بالایی و پایینی بازشدگی درزه هستند. شایان توجه است، چون روش‌های اندازه‌گیری درزه حدود تشخیص بالا و پایین دارد، توابع توزیع به‌طور معمول دارای خطای نمونه‌برداری^۹ هستند که تحت عنوان آستانه کوتاه-شدگی^{۱۰} شناخته می‌شوند. در مدل‌سازی عددی با استفاده از اطلاعات سیستم درزه برداشت شده، کاربرد توزیع‌های کوتاه‌شده بازشدگی‌های درزه و طول‌ها اجتناب‌ناپذیر است زیرا این توزیع‌ها پیامد مستقیم برداشت درزه برجا هستند.

تابع توزیع تجمعی کوتاه شده (TCDF) برای توزیع لاگ نرمال بازشدگی به‌صورت زیر به‌دست خواهد آمد:

۶- همبستگی پایایی و بازشدگی درزه

تاکنون برخی محققان بر اساس ویژگی‌های درزه به‌دست آمده از برداشت‌های میدانی، روابطی بین طول اثر درزه و بازشدگی ارایه کرده‌اند. روابط به‌دست آمده، حاکی از آن است که یک قانون معتبر کلی برای همبستگی بین طول و بازشدگی درزه وجود ندارد. با این حال، پیشینه مطالعات نشان می‌دهد که بازشدگی/پهنای و طول درزه‌ها حقیقتاً همبسته هستند، حتی اگر تابع همبستگی جهانی معتبری وجود نداشته باشد [۱۷].

با فرض این که تابع چگالی احتمال برای توزیع لاگ نرمال بازشدگی‌های درزه (h) ، $f_A(h)$ باشد، تابع چگالی احتمال کوتاه شده $(TPDF^A)$ برای توزیع لاگ نرمال بازشدگی‌های درزه به-صورت زیر است [۲۷]:

$$f_{TA}(h) = \frac{f_A(h)}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t) dt}, \quad h_a \leq h \leq h_b \quad (7)$$

می‌شود. در کاربردهای 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 جریان است، تحت تأثیر تقاطع شکستگی‌های موجود در دامنه است و تقاطع بین شکستگی‌ها، تابع پیچیده‌ای از چگالی شکستگی‌ها (تعداد شکستگی در واحد سطح یا حجم)، اندازه (طول یا سطح) و جهت‌داری شکستگی‌های موجود در دامنه است. در مقابل، در روش‌های ناپیوسته تلاش بر این است که این پیچیدگی هندسی توزیع فضایی شکستگی‌ها در محیط توده‌سنگ و تأثیر آن‌ها در رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ به صورت صریح مدل‌سازی شود. 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 توده‌سنگ مدل‌سازی می‌شود. معروف‌ترین روش مدل‌سازی رفتار ناپیوسته جریان سیال در محیط‌های سنگی درزه‌دار، روش شبکه درزه‌های مجزا (DFN) است. مدل DFN فرض می‌کند که خمیره سنگی نفوذناپذیر است و آب زیرزمینی فقط از طریق سیستم درزه می‌تواند جریان یابد. وقتی که خمیره سنگی نفوذپذیری کمی دارد، این شیوه مناسب‌تر است [۱۵]. بعد از ساخت هندسه مدل DFN، با اعمال قوانین هیدرولیکی بر روی اجزای مدل و در نظر گرفتن تأثیر متقابل این پارامترها بر روی هم، شبیه‌سازی جریان در توده‌سنگ انجام می‌شود. در این بخش از مقاله، بر روی ساخت مدل هندسی جریان DFN سه بعدی تمرکز شده است.

یک شبکه درزه مجزا، نمایشی از ویژگی‌های هندسی درزه است به طوری که در آن درزه‌ها به‌طور واضح و از لحاظ آماری بطور دقیق در مدل سه بعدی ارائه می‌شوند. در مدل‌سازی DFN، شیوه کلی شامل بررسی و استنتاج موقعیت، پایایی (اندازه)، جهت، بازشدگی و دیگر ویژگی‌های درزه‌ها به‌عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع‌های احتمالاتی است. در این شیوه، تولید درزه‌ها در داخل مدل تا زمانی که تعداد درزه‌های متقاطع با چال یا سطح برداشت توسط مدل بازتولید شود، ادامه می‌یابد. کنترل چگالی درزه در مدل از طریق مقایسه مستقیم درزه‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده انجام می‌شود.

برای ساخت مدل DFN از توده‌سنگ مورد مطالعه در این مقاله، برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} [۱۳] استفاده شده است.

$$F_{TA}(h) = \int_{h_a}^h f_{TA}(t) dt = \frac{\int_{h_a}^h f_A(t) dt}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t) dt} = \frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h) - F_A(h_a)}, \quad h_a \leq h \leq h_b \quad (8)$$

به همین طریق، روابط مشابهی برای TCDF توزیع طول درزه به دست خواهد آمد.

برای در نظر گرفتن همبستگی طول و بازشدگی، فرض می‌شود که TCDF برای توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی‌های درزه (h) دارای تعداد تصادفی مشابه با TCDF برای توزیع لاگ‌نرمال طول درزه (l) هستند [۲۷]. بنابراین برای مورد مطالعاتی توده سنگ اطراف منطقه مزینو، معادله همبستگی طول و بازشدگی می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h_b) - F_A(h_a)} = \frac{F_L(l) - F_L(l_a)}{F_L(l_b) - F_L(l_a)} \quad (9)$$

که در آن $F_L(l)$ تابع توزیع تجمعی برای توزیع لاگ‌نرمال طول درزه و l_a و l_b به ترتیب حدود بالایی و پایینی طول درزه هستند. واقعیت این است که تغییرات نفوذپذیری کلی بین مدل‌های تصادفی مختلف، وقتی که بازشدگی و طول همبسته هستند، بسیار بزرگ‌تر از وقتی است که ناهمبسته هستند و کاربرد غیرهمبستگی در این خصوص، ساده‌سازی در مدل‌سازی‌های عددی است [۱۷]. با این حال، اکثر مطالعات قبلی که مدل DFN را به‌کار می‌بندند، فرض می‌کنند که هیچ همبستگی‌ای بین بازشدگی و طول درزه وجود ندارد [۲۷]. در این مطالعه، به منظور ساخت مدل DFN دقیق برای هدف تحلیل‌های هیدرولیکی بعدی، همبستگی بین بازشدگی و طول درزه در نظر گرفته شده است.

۷- ساخت مدل هندسی جریان DFN

برای مدل‌سازی و بیان رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ از دو روش پیوسته و ناپیوسته استفاده می‌شود. در روش پیوسته، مثل روش‌های تخلخل دوگانه^{۱۱} و نفوذپذیری دوگانه^{۱۲}، با استفاده از آزمایش‌های برجا و یا به‌صورت غیرمستقیم با استفاده از روش‌های عددی و یا روش‌های هندسی ساده، خواص معادل تخلخل و شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ تعیین و یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی برای مدل‌سازی جریان سیال در محیط ارائه

ب- مدل سازی ناحیه گسلی: برنامه توسعه داده شده قادر به مدل سازی تصادفی دوبعدی و سه بعدی سیستم های درزه در نواحی گسلی است که در آن چگالی درزه با فاصله از هسته گسل می تواند به طور نمایی یا خطی تغییر کند.

پ- در نظر گرفتن ویژگی غیرهم صفحه ای: این ویژگی در بسیاری از مدل های ارایه شده وجود ندارد و تنها مدل های پیچیده و برخی نرم افزارهای تجاری این قابلیت را دارند و این عامل نیز مزیت بزرگی است.

تا به امروز DFN-FRAC^{3D} با هدف ساخت مدل هندسی برای تحلیل های مکانیکی تهیه و توسعه یافته است. در این تحقیق، این برنامه برای کاربرد در تحلیل های هیدرولیکی توسعه داده شده است. برای این منظور، پارامتر بازشدگی درزه به سایر ویژگی های هندسی DFN اضافه شده است. به منظور ساخت مدلی دقیق از DFN هیدرولیکی، وابستگی طول و بازشدگی در این برنامه لحاظ شده است. در این بخش از برنامه با استفاده از رابطه ۹ و با کاربرد توزیع های تجمعی نمایی منفی، لاگ نرمال و گاما برای طول و بازشدگی درزه، مقادیر بازشدگی در مقابل طول درزه برای تمامی درزه ها محاسبه و در فایل جداگانه (شکل ۹) چاپ می شود.

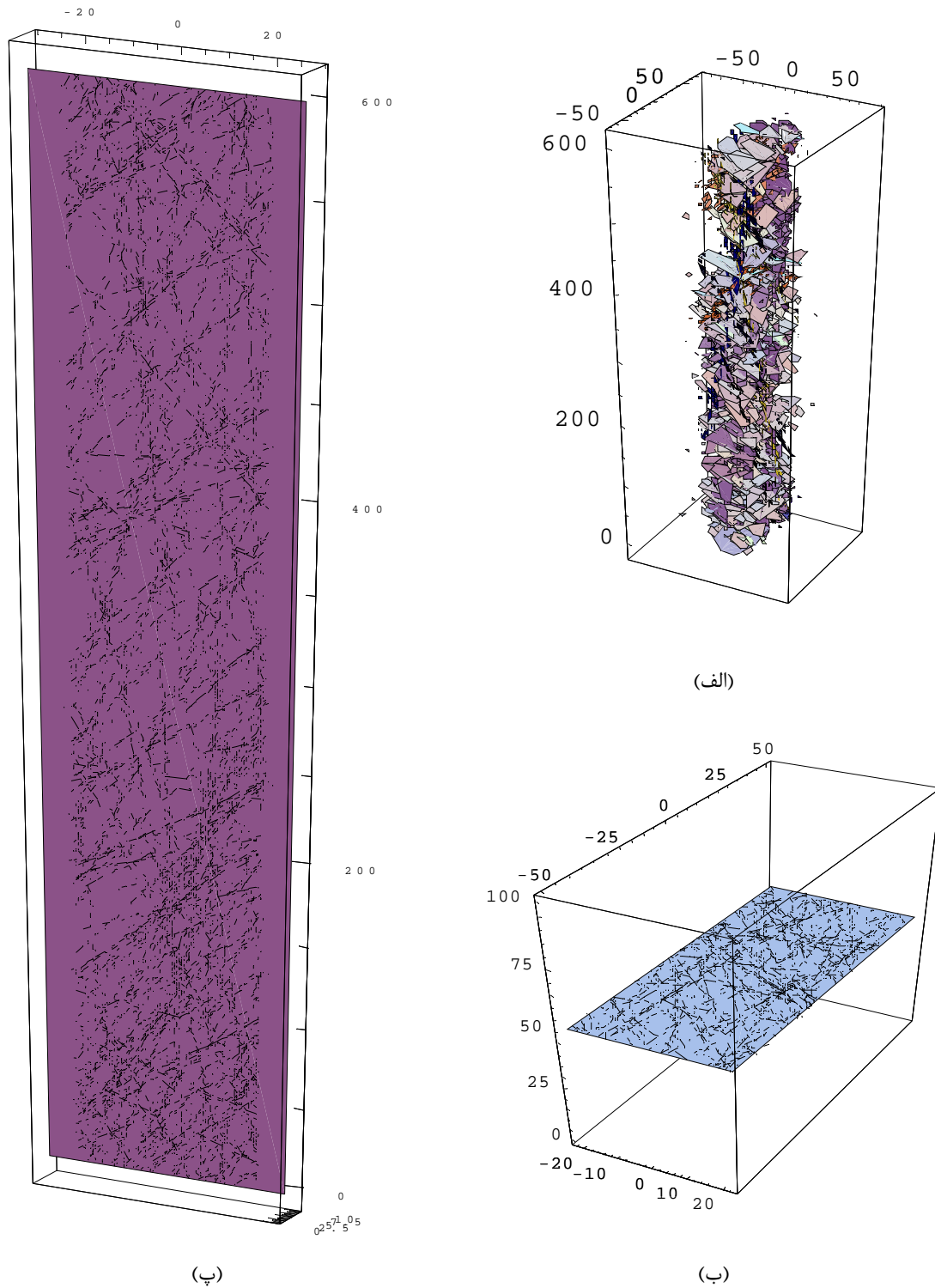
در شکل ۱۰ شبیه سازی شبکه درزه ی توده سنگ منطقه مزیبو، بر اساس مدل DFN و با استفاده از پارامترهای هندسی بیان شده در جدول ۳، متشکل از ۶۴۴.۶۰۳ درزه در محدوده ای به ابعاد ۶۰۰ × ۱۰۰ × ۴۵ مترمکعب نشان داده شده است.

این برنامه به زبان برنامه نویسی ++C نوشته شده و متشکل از ۱۴ کلاس، ۱۱۰ تابع و بیش از ۳۰۰۰ خط برنامه است. برنامه مذکور اکثر قابلیت های نرم افزارهای تجاری و برنامه های کامپیوتری که تاکنون توسعه داده شده اند را دارد و قادر است با استفاده از داده های برداشت شده، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش گرافیکی از شبکه ناپیوستگی ها را در راستاهای مختلف ارایه دهد. برخی ابزارهای نمونه برداری مانند نمونه برداری صفحه ای و مغزه ای به منظور تعیین سطح اعتبار مدل در این برنامه فراهم شده است. این برنامه دارای قابلیت ایجاد مقاطع در راستاهای مختلف و بررسی آماری اثر درزه ها بر روی مقاطع است. همچنین آن می تواند به منظور حذف اثرات مرزی، درزه ها را در ناحیه ای فراتر از ناحیه مورد نظر تولید کند و تنها بخشی از درزه هایی که در داخل محیط مورد نظر قرار می گیرند را مدل کند. این برنامه، توابع توزیع مربوط به پایایی، شیب و جهت شیب درزه را به عنوان ورودی دریافت کرده و آن ها را در محیط مورد نظر با ابعاد و آرایش های مختلف تولید کرده و همچنین دارای قابلیت پردازش با آرایش های زیاد است. علاوه بر اینها، از مهم ترین قابلیت های DFN-FRAC^{3D} که سایر برنامه های مشابه فاقد آن ها هستند، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

الف- نمونه گیری تصادفی: برنامه تهیه شده می تواند به طور تصادفی نمونه هایی سه بعدی با تعداد و اندازه های دلخواه از داخل نمونه بزرگ اولیه تولید شده تهیه کند.

	dip	strike	radius	aperture
Center	38.904	34.3568	95.6741	
	35.2377	-162.281	2.64547	0.0062875
	35.2377	-162.281	5.51795	0.00814375
	35.2377	-162.281	5.26069	0.00814375
	35.2377	-162.281	14.985	0.00984531
	35.2377	-162.281	4.98484	0.00783438
	35.2377	-162.281	18.9578	0.01
	54.0596	-138.828	0.796124	0.00303906
	35.2377	-162.281	2.60895	0.0062875
	35.2377	-162.281	13.2235	0.00969063
	35.2377	-162.281	1.52171	0.00474063
	19.7997	-162.589	9.78257	0.00938125

شکل ۹: خروجی مقادیر بازشدگی درزه در مقابل شعاع درزه تولید شده بر اساس همبستگی آماری آن ها



شکل ۱۰- شبکه DFN شبیه‌سازی شده‌ی توده سنگ منطقه مزینو،

(الف) شبکه درزه سه بعدی، (ب) مقطع افقی، (پ) مقطع عمودی

۸- نتیجه گیری

سه بعدی از توده سنگ مورد مطالعه در این مقاله، برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} استفاده شده است. در این مقاله، این برنامه برای کاربرد در تحلیل‌های هیدرولیکی توسعه داده شده است. برای این منظور، توابع توزیع بازشدگی درزه به سایر ویژگی‌های هندسی DFN اضافه شده و همچنین برای ساخت مدلی دقیق از DFN هیدرولیکی و به دور از ساده‌سازی، همبستگی طول و بازشدگی درزه در این برنامه لحاظ شده است. مدل هندسی- تصادفی سه بعدی شبکه‌ی درزه‌های تولید شده می‌تواند برای مطالعات هیدرولیکی منطقه و بررسی نشت گاز از کارگاه زیرزمینی UCG بسیار مفید باشد. مدل حاضر می‌تواند به شبیه‌سازی جریان و انتقال گاز در سیستم‌های گسلی پیچیده، در صورتی که گسل‌ها کانال‌های جریان سریع در تشکیلات بزرگ مقیاس در نظر گرفته شوند، توسعه پیدا کند.

امروزه به‌منظور افزایش بازیابی لایه‌های زغال سنگ با ضخامت‌های متغیر و در اعماق زیاد، روش UCG مورد توجه قرار گرفته است. در حین و پس از فرآیند UCG مقداری از گازهای تولید شده، خاکستر و سایر آلوده‌کننده‌ها از طریق درزه و شکاف‌های موجود، به سنگ‌های اطراف و سفره‌های آب زیرزمینی انتقال می‌یابند. در این مقاله به منظور بررسی نشت گاز از کارگاه زیرزمینی UCG، مدل جریان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) انتخاب شده است. با تمرکز بر روی منطقه مزیبوی طبس به‌عنوان یکی از محتمل‌ترین مناطق برای اجرای UCG در ایران، مطالعات صحرایی و برداشت درزه‌ها انجام شد. پردازش داده‌ها شامل تطبیق توابع توزیع احتمالی متفاوت بر ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های برداشت شده شامل شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، طول و بازشدگی انجام شد. برای ساخت مدل DFN

مراجع

- [7] Sarraf Shirazi, A.; Mmbaga, J.P.; Gupta, Hayes, R.E.; 2011; "Modeling Cavity Growth during Underground Coal Gasification", 2011 COMSOL Conferences in Boston. ISBN: 9780983968825.
- [8] Stanczyk, K.; Howaniec, N.; Smolinski, A.; Swiadrowski, J.; et al.; 2011; "Gasification of lignite and hard coal with air and oxygen enriched air in a pilot scale ex situ reactor for underground gasification", Fuel 2011, 90, pp 1953-1962.
- [9] Liu, S.; Li, J.; Mei, M.; Dong, D.; 2007; "Groundwater Pollution from Underground Coal Gasification", J China Univ Mining & Technol, 17(4), pp 0467 – 0472.
- [10] Pardala, M.L.; Stanczyk, K.; 2015; "Underground coal gasification (UCG): An analysis of gas diffusion and sorption phenomena", Fuel 150, pp 48-54.
- [۱۱] نوروزی، م؛ جلالی، س.م؛ خالوکاکی، ر؛ ۱۳۹۴؛ "شبیه‌سازی هندسی سه بعدی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های توده سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان"، نشریه مهندسی تونل و فضاهاى زیرزمینی، دوره ۴، شماره ۱، ص ۵۳-۶۸.
- [12] Lee, I.H.; Ni, C.F.; 2015; "Fracture-based modeling of complex flow and CO₂ migration in three- dimensional fractured rocks", Computers & Geosciences 81, pp 64-77.
- [1] James, R.; 2009; "Powder river basin underground coal gasification", National Energy Technology Laboratory.
- [2] Irwin, W.M.; Brian, H.; Barbara, J.; 2009; "Indiana coal report 2009", Indiana Center for Coal Technology Research, Purdue University, p 189.
- [۳] نجفی، م؛ جلالی، س.م؛ خالوکاکی، ر؛ لطفی آزاد، ع؛ ۱۳۹۲؛ "انتخاب لایه امید بخش برای استخراج به روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)"، مطالعه موردی منطقه زغالی مزیبوی طبس، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، سال هفتم، شماره ۲۵.
- [4] Burton, E.; Friedmann, J.; Upadhye, R.; 2006; "Best Practices in Underground Coal Gasification", US DOE Contract No. W-7405-Eng-48. Livermore, CA, USA: Lawrence Livermore National Laboratory.
- [5] Couch, G.R.; 2009; "Underground Coal Gasification", IEA Clean Coal Centre. ISBN 978-92-9029-471-9.
- [6] Perkins, G.M.P.; 2005; "Mathematical Modeling of Underground Coal Gasification", PhD Thesis: School of Materials Science & Engineering, Faculty of Science, The University of New South Wales.

[۲۵] شریف زاده. م؛ کارگر. س؛ ترابی معصومی. ا؛ ۱۳۸۵؛ "تحلیل هیدرولیکی- هیدرومکانیکی توده‌سنگ اطراف تونل با استفاده از روش المان مجزا"، هفتمین کنفرانس تونل.

[26] Baghbanan A.; Jing L.; 2008; "Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 44, pp. 704–719.

[27] Bang, S.H.; Jeon, S.; Kwon, S.; 2012; "Modeling the hydraulic characteristics of a fractured rock mass with correlated fracture length and aperture: application in the underground research tunnel at Kaeri", Nuclear Engineering and Technology 44 (6).

[28] Parashar, R.; Reeves, D.M.; 2012; "On iterative techniques for computing flow in large two-dimensional discrete fracture networks", Journal of Computational and Applied Mathematics 236, pp 4712–4724.

[۲۹] جوادی. م؛ شریف‌زاده. م؛ ۱۳۹۱؛ "مدل‌سازی جریان سیال در محیط سنگی ناپیوسته برای میدان نزدیک"، همایش ملی جریان و آلودگی آب، تهران.

[30] Bigi, S.; Battaglia, M.; Alemanni, A.; Lombardi, S.; et al.; 2013; "CO2 flow through a fractured rock volume: Insights from field data, 3D fractures representation and fluid flow modeling", International Journal of Greenhouse Gas Control 18, pp 183–199.

[31] Hyman, J.D.; Karra, S.; Makedonska, N.; Gable, C.W.; et al.; 2015; "DFNWORKS: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport", Computers & Geosciences 84, pp 10–19.

[32] Yang, L.; Zhang, X.; 2009; "Modeling of contaminant transport in underground coal gasification", Energy Fuels, 23, pp 193-201.

[33] Yang, L.; 2003; "Numerical simulation on three-dimensional nonlinear and unstable seepage of fluid in underground coal gasification", Fuel Processing Technology 84, pp 79– 93.

[34] Yang, L.; 2005; "Nonlinear coupling mathematical models on percolation-patterned underground coal gasification", International Journal of Energy Research, 29, pp 1331–1353.

[35] Solcova, O.; Soukup, K.; Rogut, J.; Stanczyk, K.; 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, pp 1495–1501.

[۱۳] 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.

[14] Castelletto, N.; Teatini, P.; Gambolati, G.; Bossie-Codreanu, D.; et al.; 2013; "Multiphysics modeling of CO2 sequestration in a faulted saline formation in Italy", Adv. Water Resour. (Part C) 62, pp 570–587.

[15] Zhang, Q.H.; Yin, J.M.; 2014; "Solution of two key issues in arbitrary three-dimensional discrete fracture network flow models", Journal of Hydrology 514, pp 281–296.

[16] Zhao, Z.; Jing, L.; Neretnieks, I.; et al.; 2011; "Numerical modeling of stress effects on solute transport in fractured rocks", Comput Geotech; 38(2), pp 113–126.

[17] Baghbanan, A.; Jing, L.; 2007; "Hydraulic properties of fracture rock masses with correlated fracture length and aperture", Int J Rock Mech Min Sci, 44(5), pp 704–719.

[18] Liu, R.; Jiang, Y.; Li, B.; Wang, X.; 2015; "A fractal model for characterizing fluid flow in fractured rock masses based on randomly distributed rock fracture networks", Computers and Geotechnics 65, pp 45–55.

[19] Long, J.C.S.; Remer, J.S.; Wilson, C.R.; Witherspoon, P.A.; 1982; "Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. Water Resour", Res. 18, pp 645–658.

[20] Long, J.C.S.; Gilmour, P.; Witherspoon, P.A.; 1985; "A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures", Water Resour. Res. 21, pp 1105–1115.

[21] Cacas, M.C.; Ledoux, E.; deMarsily, G.; Tillie, B.; et al.; 1990a; "Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1.The flow model", Water Resour. Res. 26 (3), pp 479–489.

[22] Cacas, M.C.; Ledoux, E.; deMarsily, G.; Barbreau, A.; et al.; 1990b; "Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 2.The transport model", Water Resour. Res. 26 (3), pp 491–500.

[23] Meyer, T.; Einstein, H.H.; 2002; "Geologic Stochastic Modeling and Connectivity Assessment of Fracture Systems in the Boston Area", Rock Mech. Roc Engng. 35 (1), pp 23–44.

[24] Ito, K.; Seol, Y.; 2003; "A 3-dimentional discrete fracture generator to examine fracture-matrix interaction using TOUGH2", TOUGH Symposium.

[۳۶] نجفی، م؛ جلالی، س.م؛ خالوکاکایی، ر؛ ۱۳۹۳؛ "برآورد توزیع دما در اطراف پهنه‌های استخراجی در روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)", نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن.

[37] Najafi, M.; Jalali, S.E.; KhaloKakaie, R.; 2014; "Thermal-mechanical-numerical analysis of stress distribution in the vicinity of underground coal gasification (UCG) panels", International Journal of Coal Geology 134-135, pp 1-16.

[۳۸] نوروزی، م؛ جلالی، س.م؛ کاکایی، ر؛ ۲۰۱۳؛ "روابط آماری حاکم بر مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها"، International Conference on Mining Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering زنجان.

[39] Priest, S.D.; 1993; "Discontinuity Analysis for Rock Engineering", Published by Chapman & Hall, London, ISBN: 978-94-010-4656-5., p 473.

[40] Baecher, G.B.; 1983; "Statistical Analysis of Rock Mass Fracturing", Journal of Mathematical Geology, 15(2), pp 329-347.

[41] Xu, C.; Dowd, P.; 2010; "A New Computer Code for Discrete Fracture Network Modeling", Computers & Geosciences, 36(3), pp 292-301.

[42] Nordqvist, A.W.; Tsang, Y.W.; Tsang, C.F.; Dverstorp, B.; Andersson, J.; 1995; "A variable aperture fracture network model for flow and transport in fractured rock at different scales", Proceedings of 2nd International Conference on Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, Austria, April 10-14.

[43] Zhang, L.; Einstein, H.H.; 2000; "Estimating the Intensity of Rock Discontinuities", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37(5), pp 819-837.

[44] Lin, A.; Yamashita, K.; 2013; "Spatial Variations in Damage Zone Width Along Strike-Slip Faults: An Example from Active Faults in Southwest Japan", Journal of Structural Geology, 57, pp 1-1.

پی نوشت

- ¹ Underground Coal Gasification
- ² Discrete Fracture Network
- ³ Long
- ⁴ Cacas
- ⁵ Yang
- ⁶ truncation
- ⁷ censoring
- ⁸ Truncated Cumulative Distribution Function
- ⁹ sampling bias
- ¹⁰ truncation threshold
- ¹¹ Dual porosity
- ¹² Dual permeability