دوره دوازدهم، شماره ۳۷، زمستان ۱۳۹۶، صفحه۲۱ تا ۳۸

Vol. 12, No. 37, 2018, pp.21_38

نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن" Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME)

مدلسازی هندسی- تصادفی سه بعدی تودهسنگ منطقه مزینو با هدف بر آورد نشت گاز در استخراج به روش گاز کردن علی حیدری⁽؛ سیدمحمداسماعیل جلالی^۲؛ مهدی نوروزی^{۳®}

۱ – دانشجوی دکترای استخراج معدن، دانشکدهی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، ali.heydari84@yahoo.com ۲– دانشیار دانشکدهی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، jalalisme@shahroodut.ac.ir ۳– استادیار دانشکدهی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، mehdi.noroozi@shahroodut.ac.ir

(دریافت ۱۳مرداد ۱۳۹۵، پذیرش ۲۲ آذر ۱۳۹۶)

چکیدہ

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 گاز کردن زیرزمینی زغالسنگ (UCG) میتواند بهعنوان بهترین گزینه مطرح باشد. یکی از این ذخایر زغالسنگ، زغالسنگهای منطقه مزینو طبس است. از جمله معیارها و عوامل تأثیرگذار بر امکانپذیری و اقتصادی بودن روش UCG، نشت گاز از میان درزه و شکافهای اطراف ژئوراکتور زیرزمینی و یا به-عبارت دیگر عایق بودن آن است. در این مقاله، با توجه به اهمیت این موضوع، 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، با استفاده از دادههای میدانی درزههای برداشت شده از منطقه مزینو، مدل هندسی-تصادفی سه بعدی شبکهی درزههای تودهسنگ 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 میتواند ورودیهای مفید برای مدلهای عددی برای مطالعه رفتار هیدرولیکی و نشت گاز باشد.

كلمات كليدى:

مدلسازی هندسی-تصادفی، گاز کردن زیرزمینی زغالسنگ (UCG)، نشت گاز، منطقه مزینو طبس

۱– مقدمه

بنا به آخرین آمار موجود، ذخایر اقتصادی زغالسنگ شناخته شده در سطح جهان تنها در حدود ۱۰۰۰ میلیارد تن برآورد میشود، در حالیکه 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 معدن كارى كنونى قابل استخراج است [۱]. از اينرو امروزه به-منظور افزایش بازیابی لایههای زغالسنگ با ضخامتهای متغیر و در اعماق زیاد، روش گازکردن زیرزمینی زغالسنگ ('UCG) مورد توجه قرار گرفته است [۲]. در این فرآیند لایههای زغالسنگ بدون نیاز به عملیات معدن کاری 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 می شوند. 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 معد-نکاری معیارهایی باید در نظر گرفته شود. از جمله این معیارها میتوان به ضخامت لایه (۱ تا ۳۰ متر)، شیب لایه (صفر تا ۲۰ درجه)، نوع زغالسنگ، خاکستر لایه (کمتر از ۶۰ درصد)، پراکندگی گسلها و ناپیوستگیها و ذخیرهی لایه (بیشتر از ۲/۵ میلیون تن) اشاره کرد [۲۰۵]. در این میان، شکستگیها از جمله عوامل محیطی تأثیرگذار بر اقتصادی بودن روش UCG بیان شده است [۶۰۶]. 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 آلوده کنندهها به سفرههای آب زیرزمینی است (شکل ۱) [۲۰۸].

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

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) 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، اساسا 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 بوسط شکستگیها کنترل میشود و

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

در این مقاله، با استفاده از دادههای میدانی درزههای برداشت شده از منطقه مزینو، مدل هندسی-تصادفی سه بعدی شبکهی درزههای تودهسنگ با استفاده از برنامه کامپیوتری -DFN Gabbar [۳]، با هدف بررسی نشت گاز از کارگاه استخراج DFN-FRAC^{3D} تهیه شده است. بدین منظور برنامه DFN-FRAC 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 به کار رفته است.

۲- پیشینه 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 می کند [۱۴،۱۵]. همچنین این شبیهسازیها می-تواند 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 نیاز به مطالعات بیشتر دارد که به خوبی روشن نشده است و نیاز به مطالعات بیشتر دارد [1۵]. همچنین در حال حاضر، توسعه و پیشرفت مدلهای جریان MFN سهبعدی بهدلیل پیچیدگی ترکیببندیها و ویژگیهای نشت درزههای سه بعدی در سنگهای درزهدار واقعی، بهکندی پیش می رود [10].

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

DFN تقریبا به ۳۰ سال پیش، یعنی مدل دوبعدی توسعه داده شده توسط لانگ^۳ و همکاران در سال ۱۹۸۲ بر می گردد [۱۹]. در طی زمان با به کار گیری 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[†] و همکاران در سال ۱۹۹۰ [۲۱، ۲۲]، تبدیل می شدند. شیوه شبکه لوله معادل برای تخمین جریان کافی است اما به-منظور بررسی جزئیات جریان و مکانیزم انتقال در داخل درزهها شیوههای پیشرفته تر بر اساس مش بندی عددی درزهها توسعه شده در سالهای اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال سیال در شده در سالهای اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال سیال در

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 [10] و یا آزمایشگاهی [۳۳] 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 می شود.

موضوع و نتايج تحقيق	پژوهشگر	رديف
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.	Meyer and Einstein, 2002 [23]	١
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 برهم کنش خمیره-درزه پرداختند.	Ito and Seol, 2003 [24]	٢
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.	شریفزاده و همکاران، ۱۳۸۵ [۲۵]	٣
اقدام به توسعه مدل تصادفی دوبعدی بهمنظور بررسی اثرات وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه بر رفتار هیدرومکانیکی و مکانیکی تودهسنگ درزهدار کردند.	Baghbanan and Jing, 2008 [26]	۴
یک مدل DFN سه بعدی را بهمنظور شبیهسازی ویژگیهای هیدرولیکی تودهسنگ گرانیتی اطراف تونل تحقیقاتی زیرزمینی KURT در کره جنوبی توسعه دادند. مدل DFN با فرض همبستگی بین طول و بازشدگی درزهها و مسیر جریان ذوزنقهای در درزهها ایجاد شد.	Bang et al., 2012 [27]	۵
روی پیچیدگیهای محاسباتی شبیهسازی جریان در مدلهای DFN بزرگ مقیاس تمرکز کردند. آنها روش تکرارشونده شبهفضایی Krylov را بهعنوان مهمترین روشها برای حل شبکههای بزرگ در نظر گرفتند.	Parashar and Reeves, 2012 [28]	۶
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.	جوادی و شریفزاده، ۱۳۹۱ [۲۹]	٧
با هدف تعیین مقدار نفوذپذیری گاز CO2، 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 نمی گیرند.	Bigi et al., 2013 [30]	٨
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 نسبتا کمتری درزه صادق است. درزهها، صاف، موازی و با بازشدگی ثابت فرض شدند.	Zhang and Yin, 2014 [15]	٩
اقدام به توسعه مدل DFN سه بعدی و مدل تولید مش ساختنیافته (UMG) بهمنظور شبیهسازی جریان و انتقال CO2 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.	Lee and Ni, 2015 [12]	١.
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 آشفتگی جریان سیال، بازشدگی درزهها و عدد تصادفی بهکاررفته برای تولید توزیع طول فراکتال درزهها تأثیر میپذیرد.	Liu et al., 2015 [18]	11
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.	Hyman et al., 2015 [31]	١٢

سيال	ه انتقال	حريان و	تخمين	ىەمنظەر	مای اخد	سال ه	D ساخته شده در	مای FN	از مدا ه	، ۱: د خبر	حدوا
0.5	0		ومسيق	, <u>(</u>	على العير	0)		· []	ن البر على	· · · · ·

۳- منطقهی مزینو طبس

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 نیمه آنتراسیت، با شیب لایه های زغالی کمتر از ۳۰ درجه و ضخامت متغیر ۵/۰ تا ۶ متر است. این خود نشان دهنده 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 تأمين كند. بنابراين اين لايه بهعنوان لايهي قابل كار براي 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 جمع آوری 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، اندازه گیری می شوند. در روش برداشت خطی سطوح مسطح تمییز سنگی به گونهای انتخاب می شود 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.

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 R_0 و R_2 برای نشان دادن وضعیت پایانیابی درزهها از رابطه زیر محاسبه میشود [11]:

$$R_{0} = \frac{p}{(p+m+n)}$$

$$R_{1} = \frac{m}{(p+m+n)}$$

$$R_{2} = \frac{n}{(p+m+n)}$$
(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.

ميانگين طول	درزهها (./)	تعداد		
درزهها (m)	R_2	R_{I}	R_0	درزهها
۰٫۸۱	۲٩	۱۵	۶	779

جدول ۲: خلاصهای از درزههای برداشتی از رخنمون

عدم توانایی ثبت درزههایی که طول آنها از حد اندازه گیری کوچک تر است بهعنوان خطای فرواندازه⁵ معرفی شده است. همچنین درزههایی که طول آنها به دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی شود، بهعنوان خطای فرااندازه⁷ شناخته شده است. تأثیر خطای فرواندازه را با کاهش سطح اندازه در موقع برداشت درزه، می توان 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 نمی گیرد. همچنین چون درصد درزههایی که هر دو انتهای آن قابل مشاهده است، یعنی پایانیابی R_2 بسیار بیشتر است، می توان در این مورد مطالعاتی از خطای فرااندازه نیز چشمیوشی کرد [۱۱].



شكل ٢: موقعيت منطقه مزينو [٣٧]



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 می شود. 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 دقیق تر بهتر است، در صورت امکان، تعداد بیشتری درزه برداشت و در محاسبات وارد شود.



شکل ۴: جدایش دسته درزهها در شبکه اشمیت

۵–۱– فراوانی دسته درزهها

نمودارهای ستونی دسته درزههای تفکیک شده به همراه تعداد در شکل ۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود دسته درزههای ۲ و ۳ دارای تعداد خیلی بیشتری از دسته درزه-های 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 می کند [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– فاصلەدارى

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

۵-۴- 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 به کار 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 می کند. 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 نکند، 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 می شود که بازشدگی درزه از توزیع لاگنرمال پیروی می کند [۱۷،۲۷،۴۲]. تابع چگالی احتمال (PDF) برای توزیع لاگنرمال بازشدگی های درزه (h) می تواند به شکل کلی زیر نوشته شود:

$$f_{A}(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln h - \mu)^{2}}{2\sigma^{2}}}$$
(Y)

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











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

$$F_A(h) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left[\frac{\ln h - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right] \tag{(7)}$$

که در آن erf تابع خطا است و می تواند به صورت زیر نوشته شود:

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

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)

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

$$P_{32} = \frac{N_T E(A)}{V} \tag{(a)}$$

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 می شود.

$$E(D) = \frac{128\mu_l^3}{3\pi^3(\mu_l^2 + \sigma_l^2)}$$
(\$

در این مقاله، درزههای قابل دیدن با چشم غیرمسلح با استفاده از یک چارچوب ۱ متر مربعی دارای شبکه مش بندی ۱۰ سانتی متر مربعی در میدان شمارش شدند (شکل ۸). درزههای متقاطع با هر خط مش اندازه گیری و تعداد کلی درزههای شمارش شده در چارچوب ۱ متر مربعی به عنوان چگالی سطحی درزه تعریف می-

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

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

با استفاده از اندازه گیری های میدانی انجام شده و کاربرد رابطه های ۵ و ۶، مقادیر P₃₂ برای هر دسته درزه به طور جداگانه محاسبه شده و در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۸: اندازهگیری چگالی درزه، P₂₁

	دسته درزه			بارامتر		
دسته درزه ۴	دسته درزه ۳	دسته درزه ۲	دسته درزه ۱	y		
114/22	226/20	227/22	• ٨٨/٣٨	بب/جهت شيب	شي	
۳۶	۲۲ _/ ۶	۲۲,۷	۵۸/۶	بت فیشر (K)	ثا	
•,• ۴	•,14	•،/۱۸	١/١٧	ىت، (P ₃₂ (m ⁻¹	شد	
لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	گاما	تابع توزيع		
σ=•, ۶۶۶	$\sigma=\cdot,$ ۵۶۵	$\sigma={\boldsymbol{\cdot}}_{/}{\boldsymbol{\Delta}}{\boldsymbol{\lambda}}{\boldsymbol{\nabla}}$	$\alpha = \mathbf{r} \mathbf{r}_{\mathbf{r}} \mathbf{r} \mathbf{r}$	پارامتر تابع		
$\mu=-1/220$	$\mu = - \iota_{/} \iota \cdot \mathfrak{q}$	$\mu = - \iota_{/} \iota \Delta$	$eta=ullet_{_{I}}$ ۱۹۶	پارامتر تابع	پارامترهای توزیع طول	
•,٣۶١	۰,۳۸۶	۰٫۳۷۵	۴٬۵۸۷	متوسط (m)		
۰,۲۲۰	•, ٢ ٣٧	٠٫٢٣٩	•,949	انحراف استاندارد (m)		
لاگنرمال	لاگنرمال	لاگنرمال	لاگنرمال	تابع توزيع		
$\sigma = \cdot \Delta \gamma \cdot$	$\sigma = \cdot \ \Delta F T$	$\sigma = \cdot \ \Delta F T$	$\sigma = \cdot, rr$	پارامتر تابع	پارامترهای	
$\mu=-{\boldsymbol{\cdot}}_{/}{\boldsymbol{\tau}}{\boldsymbol{\tau}}{\boldsymbol{\tau}}$	$\mu = - \cdot , \cdot \delta \mathfrak{P}$	$\mu = - \boldsymbol{\cdot}_{/} \boldsymbol{\cdot} \Delta \lambda$	$\mu = \cdot {}_{/} \Delta V Y$	پارامتر تابع	توزيع	
۰٬۸۵۲	۱,•۹۵	١,• ٩٢	۱,۹۵۳	متوسط (mm)	بازشدگی	
۰,۵۲۸	•,84•	<i>۶</i> ۳۹ ر	•,9•۴	انحراف استاندارد (mm)		

جدول ۳- پارامترهای هندسی دسته درزههای برداشت شده

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/پهنا و طول درزهها حقیقتا همبسته هستند، حتی اگر تابع همبستگی جهانی معتبری وجود نداشته باشد [۱۷].

با فرض این که تابع چگالی احتمال برای توزیع لاگنرمال بازشدگیهای درزه (h) ، (f_A(h) باشد، تابع چگالی احتمال کوتاه شده (^{*}TPDF) برای توزیع لاگنرمال بازشدگیهای درزه به-صورت زیر است [۲۷]:

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

که در آن h_a و h_b بهترتیب 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 لاگنرمال بازشدگی بهصورت زیر بهدست خواهد آمد: می شود. در کاربردهای عملی، این روشها محدودیتهایی در رابطه با اعمال صحيح تأثير هندسه شكستكىها در رفتار جريان 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 بهصورت 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 می شود. معروف ترین روش مدل سازی رفتار ناپیوسته جریان سیال در محیطهای سنگی درزهدار، روش شبکه درزههای مجزا (DFN) است. مدل DFN فرض می کند که خمیره سنگی نفوذناپذیر است و آب زیرزمینی فقط از طریق سیستم درزه می-تواند 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 می شود. 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 بهطوریکه 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.

$$F_{TA}(h) = \int_{h_a}^{h} f_{TA}(t)dt = \frac{\int_{h_a}^{h} f_A(t)dt}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t)dt} =$$

$$= \frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h) - F_A(h_a)} , \quad h_a \le h \le h_b$$
(A)

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

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

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

که در آن (I) تابع توزیع تجمعی برای توزیع لاگنرمال طول درزه و I_a و I_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 به کار میبندند، فرض می کنند که هیچ همبستگیای بین بازشدگی و طول درزه وجود ندارد [۲۷]. در این مطالعه، به-منظور ساخت مدل DFN دقیق برای هدف تحلیلهای منظور ساخت مدل DFN دقیق برای هدف تحلیلهای گرفته شده است.

V− 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 روش-های 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

این برنامه به زبان برنامهنویسی ++C نوشته شده و متشکل از ۱۴ کلاس، ۱۱۰ تابع و بیش از ۳۰۰۰ خط برنامه است. برنامه مذکور اکثر قابلیتهای نرمافزارهای تجاری و برنامههای کامپیوتری که تاکنون توسعه داده شدهاند را دارد و قادر است با استفاده از دادههای برداشت شده، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش گرافیکی از شبکه ناپیوستگیها را در راستاهای مختلف ارایه دهد. برخی ابزارهای نمونهبرداری مانند نمونهبرداری صفحهای و مغزهای بهمنظور تعیین سطح اعتبار مدل در این برنامه فراهم شده است. این برنامه دارای قابلیت ایجاد مقاطع در راستاهای مختلف و بررسی آماری اثر درزهها بر روی مقاطع است. همچنین آن میتواند بهمنظور حذف اثرات مرزی، درزهها را در ناحیهای فراتر از ناحیه مورد نظر تولید کند و تنها بخشی از درزههایی 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 بهعنوان ورودی دریافت کرده و آنها را در محیط موردنظر با ابعاد و آرایشهای مختلف تولید کرده و همچنین دارای قابلیت پردازش با آرایشهای زیاد است. علاوه بر اینها، از مهمترین قابلیتهای DFN-FRAC^{3D} که سایر برنامههای مشابه فاقد آنها هستند، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

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

ب- مدلسازی ناحیه گسلی: برنامه توسعه داده شده قادر به مدلسازی تصادفی دوبعدی و سهبعدی سیستمهای درزه در نواحی گسلی است که در آن چگالی درزه با فاصله از هسته گسل میتواند 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 نرمافزارهای تجاری این قابلیت را دارند و این عامل نیز مزیت بزرگی است.

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

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

File Edit Format View Help		المحافظ منتر الم		بر سه دی .
Npol All Fracture 2356 center	dip	strike	radius	aperture
-58,504 34,3568 95,6741	35.2377	-162.281	2.64547	0.0062875
-29.4903 33.7594 66.4868	35.2377	-162.281	5.51795	0.00814375
-25.4462 23.3398 62.9467	35,2377	-162,281	5.26069	0.00814375
-12.7414 -18.9236 87.1816	35.2377	-162.281	14.985	0.00984531
-20.6995 -34.5072 107.692	35.2377	-162.281	4.98484	0.00783438
-7.72185 25.3956 85.7014	35.2377	-162.281	18.9578	0.01
47.3426 -61.2988 8.82592	54.0596	-138.828	0.796124	0.00303906
-19.9979 -38.4211 87.5141	35.2377	-162,281	2,60895	0,0062875
-9.80997 2.95394 88.0076	35.2377	-162,281	13.2235	0.00969063
-8.27714 -48.7067 35.5222	35, 2377	-162,281	1,52171	0,00474063
-19.009 33.8588 62.6476	19,7997	-162,589	9,78257	0.00938125
-45.3907 24.7541 80.2551				

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





۸- نتیجهگیری

امروزه بهمنظور افزایش بازیابی لایههای زغالسنگ 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 آلوده کننده ااز 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 مزینوی طبس بهعنوان یکی از محتمل ترین مناطق برای اجرای UCG در ایران، مطالعات صحرایی و برداشت درزهها انجام شد. پردازش داده ها 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

[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. سما؛ خالوکاکایی. ر؛ لطفی آزاد. ع؛ ۱۳۹۲؛ "انتخاب لایه امید بخش برای استخراج به روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)"، مطالعه موردی منطقه زغالی مزینوی 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.

سهبعدی از تودهسنگ 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

[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. سما؛ خالوکاکایی. ر؛ ۱۳۹۴؛ "شبیهسازی هندسی سهبعدی شبکهی ناپیوستگیهای تودهسنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان"، نشریه مهندسی تونل و فضاهای 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.

۳۵

[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 threedimensional 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؛ "بر آورد مقاومت تودهسنگ دارای ناپیوستگیهای ناپایا با استفاده از مدل تصادفی شبکه درزههای مجزا (مورد مطالعاتی: تودهسنگ ساختگاه سد و نیروگاه رودبار لوستان)"، 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 threedimensional 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. سما؛ خالوکاکایی. ر؛ ۱۳۹۳؛ "بر آورد 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. سما؛ کاکایی. ر؛ ۲۰۱۳؛ **"روابط آماری حاکم بر مشخصات هندسی ناپیوستگیها"،** 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. پىنوشت

- 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