

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری استخراج مواد معدنی

تحلیل عددی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG

با استفاده از شبکه لوله

نگارنده: علی حیدری

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور:

دکتر مهدی نوروزی

شهریور ۱۳۹۸

شماره: ۲۶۹۸/۴۴۷
تاریخ: ۲۰/۸/۹۸
ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲: صورت جلسه نهایی دفاع از رساله دکتری (Ph.D)
(ویژه دانشجویان ورودی های ۹۴ و ما قبل)

بدینوسیله گواهی می شود آقای/خانم علی حیدری دانشجوی دکتری رشته مهندسی استخراج معدن به شماره دانشجویی ۹۱۲۵۱۵۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۹۱ در تاریخ ۱۳۹۸/۰۶/۲۵ از رساله نظری / عملی خود با عنوان: تحلیل عددی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG با استفاده از شبکه لوله دفاع و با اخذ نمره ۱۸.۵ به درجه بسیار خوب نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input checked="" type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹ - ۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹ - ۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> ه) رساله نیاز به اصلاحات دارد	

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	استاد/استاد راهنما	دانشیار	
۲	دکتر مهدی نوروزی	مشاور/ مشاورین	استاد	
۳	دکتر فرهنگ سرشکی	استاد مدعو داخلی	استاد	
۴	دکتر علی عباس نژاد	استاد مدعو داخلی / خارجی		
۵	دکتر مهدی نجفی	استاد مدعو داخلی / خارجی	دانشیار	
۶	دکتر محمد کارآموزیان	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده		

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم در خصوص انجام مراحل دانش آموختگی آقای/خانم علی حیدری بعمل آید.



نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به

پدر و مادر عزیز تر از جانم

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از تمامی عزیزان و دلسوزانی که در مسیر انجام این رساله و اخذ درجه دکتری اینجانب را یاری نمودند نهایت قدردانی و تشکر خود را دارم اسامی این عزیزان به شرح ذیل می باشد:

۱. دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

۲. دکتر مهدی نوروزی

۳. دکتر فرهنگ سرشکی

۴. مهندس نگار صیرفیان

۵. دکتر حمیدرضا نظارت

۶. آقای حسین شاه حسینی

۷. آقای علی اکبر رجبی

۸. خانم مریم رجبی

۹. خانوم الهه ترابی

۱۰. خانوم فاطمه قریب بلوک

تعهد نامه

اینجانب **علی حیدری** دانشجوی دوره دکتری رشته **مهندسی استخراج معدن** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله "**تحلیل عددی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG با استفاده از شبکه لوله**" تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی رساله تاثیرگذار بوده‌اند رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضاء

تاریخ:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در ایران بخش زیادی از ذخایر زغال سنگ در عمق واقع شده و یا دارای ضخامت کمی هستند که برای استحصال و استفاده از این منابع، فناوری UCG می‌تواند به عنوان بهترین گزینه مطرح باشد. یکی از این ذخایر زغال سنگ، زغال سنگ‌های منطقه مزینو طبس است. از جمله معیارها و عوامل تاثیرگذار بر امکان‌پذیری و اقتصادی بودن روش UCG، نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور زیرزمینی و یا به عبارت دیگر ایزوله بودن آن است. در این رساله، با توجه به اهمیت این موضوع، بر مدل‌سازی نشت گاز بر اساس مدل جریان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) سه بعدی 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.

همچنین، این برنامه برای شناسایی شبکه‌های رسانا نیز توسعه داده شده است. در ادامه، شبکه‌های مشترک متصل به شبکه‌های لوله معادل تبدیل می‌شوند. سرانجام برای بررسی جریان سیال درون این شبکه، از نرم افزار عددی مدل سازی جریان، WaterGEMS که قابلیت ساخت لوله‌های پیچیده و دریافت سایر اطلاعات هیدرولیکی را دارد، استفاده شده است. به منظور اعتبار سنجی عملکرد این برنامه، مدل هیدرولیک سه بعدی برای شبکه شکستگی توده سنگ در منطقه مزینو ارایه شده است. از این مدل و تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که در صورت اجرای UCG در معدن ذغال سنگ مزینو، گازهای حاصل از آن به سطح زمین نشت نخواهد کرد.

به منظور تحلیل حساسیت، فرض شده که شدت درزه‌داری منطقه ۵۰ درصد افزایش یابد. در این حالت، از آنجا که تعداد درزه‌های رسانا و بالتبع تعداد لوله‌ها بسیار زیاد است، تصمیم بر کاربرد اندازه REV

هیدرولیکی منطقه گرفته شد. بر این اساس برای اندازه‌های بلوک مکعبی با یال ۳، ۵، ۸، ۱۰ و ۱۵ متر مدل DFN هیدرولیکی و سپس مدل شبکه لوله معادل آن تهیه شده است. مدل‌های شبکه لوله تهیه شده با استفاده از نرم‌افزار تجاری WaterGEMS تحلیل و مقادیر شدت جریان محاسبه شده است. در این شرایط در مورد مطالعاتی این تحقیق، اندازه REV برابر $8m \times 8m \times 8m$ برآورد شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ جریان متوسط توده‌سنگ مورد مطالعه، 212 lit/s است. در انتها نتایج حاصله نسبت به تغییرات فشار مخزن تحلیل حساسیت شده است.

واژه‌های کلیدی: نفوذپذیری توده‌سنگ، UCG، شبکه درزه مجزا، مدل‌سازی عددی، منطقه مزینو طبس

مقالات علمی-پژوهشی

- ۱- علی حیدری، سیدمحمداسماعیل جلالی؛ مهدی نوروزی (۱۳۹۶)، "مدل سازی هندسی- تصادفی سه بعدی توده سنگ منطقه مزینو با هدف برآورد نشت گاز در استخراج به روش گاز کردن"، نشریه علمی پژوهشی مهندسی معدن، دوره دوازدهم، شماره ۳۷، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۲۱ تا ۳۸.
۲. A. Heydari, S.E. Jalali, M. Noroozi, (۲۰۱۵), "Developing a 3D stochastic discrete fracture network model for hydraulic analyses", International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE), IJMGE, ۵۲-۲, pp. ۱۶۷-۱۷۵
۳. A. Heydari, S.E. Jalali, M. Noroozi, (۲۰۱۹), "Numerical study of effective parameters on Gas emission from UCG extraction stope", Journal of Mineral Resource Engineering (JMRE), ۱۹ June ۲۰۱۹, Accepted

مقالات کنفرانسی

- ۱- علی حیدری، سیدمحمد اسماعیل جلالی، مهدی نوروزی (۱۳۹۵)، " بررسی مخاطرات زیست محیطی روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG)، سومین کنگره ملی زغالسنگ ایران، شاهرود.
- ۲- علی حیدری، سیدمحمد اسماعیل جلالی، فرهنگ سرشکی، احمد رمضانزاده (۱۳۹۳)، بررسی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG با استفاده از مدل سازی عددی، پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران.

فهرست مطالب

فصل اول کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق	۴
۳-۱- اهداف و روش تحقیق	۶
۴-۱- فرضیات تحقیق	۹
۵-۱- جنبه‌های نوآوری تحقیق	۹
۶-۱- ساختار رساله	۱۰

فصل دوم بررسی پدیده نشت گاز در فرآیند گازکردن زیرزمینی زغالسنگ (UCG)

۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- مزایای روش UCG	۱۶
۳-۲- محدودیت‌های روش UCG	۱۶
۴-۲- بررسی پدیده نشت گاز	۱۷
۱-۴-۲- مخاطرات زیست محیطی	۱۷
۱-۱-۴-۲- آلودگی آب‌های زیرزمینی	۱۸
۲-۱-۴-۲- آلودگی آب‌های سطحی	۱۹
۳-۱-۴-۲- آلودگی هوا	۲۰
۲-۴-۲- کاهش کارایی روش استخراج	۲۰
۵-۲- عوامل موثر بر نشت گاز از کارگاه استخراج UCG	۲۲
۱-۵-۲- ترکیب گازها	۲۲
۲-۵-۲- فشار گاز	۲۴
۳-۵-۲- دمای گاز و محیط نشت	۲۵
۴-۵-۲- تخلخل و نفوذپذیری زغال سنگ و لایه‌های اطراف کارگاه	۲۶
۵-۵-۲- ضخامت روباره	۲۷
۶-۵-۲- آب محتوی	۲۷
۷-۵-۲- وضعیت آب‌های زیرزمینی نزدیک کارگاه	۲۷
۸-۵-۲- درزه‌داری اولیه و ثانویه	۲۸
۶-۲- جمع‌بندی	۲۹

فصل سوم بررسی پیشینه مطالعات

۱-۳- مقدمه	۳۲
۲-۳- مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها	۳۳
۳-۳- جریان سیال در شبکه درزه‌های مجزا (DFN)	۴۰
۱-۳-۳- شبیه‌سازی جریان سیال	۴۵
۱-۱-۳-۳- ارتقای ویژگی‌های شبکه درزه	۴۶

- ۳-۱-۲- شناسایی شبکه‌های درزه متصل و حل معادلات جریان بر روی مسیرها-----۵۰
- ۳-۴- روش شبکه لوله برای مدلسازی جریان -----۵۱
- ۳-۴-۱- حذف درزه‌های نارسانا -----۵۵
- ۳-۴-۲- تولید شبکه لوله‌ی معادل شبکه شکستگی‌های مجزا-----۵۶
- ۳-۴-۳- تعیین تقاطع لوله‌ها -----۵۷
- ۳-۴-۴- محاسبات شبکه لوله -----۵۸
- ۳-۴-۴-۱- رسانایی لوله‌های معادل -----۵۸
- ۳-۴-۴-۲- قانون جریان سیال تراکم ناپذیر در درزه تنها-----۵۹
- ۳-۴-۴-۳- قانون گره نرخ جریان -----۶۱
- ۳-۴-۴-۴- قانون لوله‌ی فشار -----۶۲
- ۳-۴-۴-۵- نفوذپذیری درزه-----۶۲
- ۳-۵- مدلسازی عددی جریان سیالات در توده سنگ -----۶۳
- ۳-۶- نشت گاز از کارگاه استخراج UCG -----۷۴
- ۳-۷- جمع‌بندی -----۷۴

فصل چهارم تهیه و توسعه مدل DFN هیدرولیکی به منظور بررسی جریان سیال

- ۴-۱- مقدمه -----۷۸
- ۴-۲- معرفی برنامه کامپیوتری $DFN-FRAC^{3D}$ (Ver ۱,۰,۱) -----۷۹
- ۴-۲-۱- ورودی برنامه -----۸۱
- ۴-۲-۲- خروجی‌های برنامه -----۸۲
- ۴-۲-۲-۱- خروجی متنی -----۸۳
- ۴-۲-۲-۲- خروجی تصویری -----۸۴
- ۴-۲-۳- قابلیت‌های خاص برنامه -----۸۵
- ۴-۳- توسعه مدل DFN و برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ برای مدلسازی بازشدگی درزه -----۸۶
- ۴-۳-۱- ویژگی بازشدگی -----۸۷
- ۴-۳-۲- همبستگی آماری بازشدگی و طول درزه -----۸۷
- ۴-۳-۳- توسعه برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ -----۹۰
- ۴-۴- توسعه مدل DFN و برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ برای شناسایی شبکه درزه‌های متصل -----۹۱
- ۴-۵- توسعه مدل DFN و برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ برای مدلسازی شبکه لوله -----۹۶
- ۴-۶- جمع‌بندی -----۱۰۰

فصل پنجم تحلیل عددی نشت سیال از درون ناپیوستگی‌های توده سنگ

- ۵-۱- مقدمه -----۱۰۴
- ۵-۲- تولید مدل هیدرولیکی توده‌سنگ -----۱۰۶
- ۵-۲-۱- موقعیت توده سنگ مورد بررسی -----۱۰۶
- ۵-۲-۲- مطالعات میدانی و جمع‌آوری اطلاعات ساختاری -----۱۰۷
- ۵-۳-۲- تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه درزه‌های برداشت شده -----۱۰۹
- ۵-۳-۲-۱- فراوانی دسته درزه‌ها -----۱۱۰

۱۱۱	-----	جهت یافتگی	۲-۳-۲-۵
۱۱۱	-----	فاصله‌داری	۳-۳-۲-۵
۱۱۱	-----	طول (پایایی)	۴-۳-۲-۵
۱۱۳	-----	بازشدگی و همبستگی بازشدگی و پایایی درزه	۵-۳-۲-۵
۱۱۴	-----	شدت حجمی درزه	۶-۳-۲-۵
۱۱۶	-----	تولید شبکه ناپیوستگی های مجزا و اعتبارسنجی	۴-۲-۵
۱۱۹	-----	تهیه مدل شبکه درزه های متصل	۵-۲-۵
۱۲۱	-----	مدلسازی عددی جریان سیال	۳-۵
۱۲۱	-----	بررسی نرم افزارهای موجود	۱-۳-۵
۱۲۱	-----	نرم‌افزار FLUENT	۱-۱-۳-۵
۱۲۲	-----	نرم‌افزار PipeFlow Expert	۲-۱-۳-۵
۱۲۲	-----	نرم‌افزار PipelineStudio	۳-۱-۳-۵
۱۲۳	-----	نرم‌افزار AFT Fathom	۴-۱-۳-۵
۱۲۳	-----	نرم‌افزار AFT Arrow	۵-۱-۳-۵
۱۲۴	-----	نرم‌افزار PIPE-FLO	۶-۱-۳-۵
۱۲۴	-----	نرم‌افزار WaterGEMS	۷-۱-۳-۵
۱۲۵	-----	انتخاب و توصیف نرم افزار مناسب	۲-۳-۵
۱۲۶	-----	مدل سازی عددی جریان سیال با استفاده از نرم افزار WaterGEMS	۳-۳-۵
۱۲۶	-----	مناسب سازی داده های ورودی	۱-۳-۳-۵
۱۲۹	-----	شرایط مرزی و ویژگی های سیال	۲-۳-۳-۵
۱۳۳	-----	تحلیل مثال فرضی	۳-۳-۳-۵
۱۳۵	-----	بررسی نشت سیال در منطقه مزینو	۴-۳-۳-۵
۱۳۹	-----	تحلیل حساسیت پارامترهای تاثیر گذار بر نشت سیال	۵-۳-۳-۵
۱۴۰	-----	آنالیز حساسیت نسبت به فشار مخزن	۱-۵-۳-۳-۵
۱۴۲	-----	تحلیل حساسیت نسبت به دمای گاز	۲-۵-۳-۳-۵
۱۴۵	-----	تحلیل حساسیت نسبت به ویژگی های درزهداری	۳-۵-۳-۳-۵
۱۵۲	-----	جمع‌بندی	۴-۵

فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۵۷	-----	نتیجه‌گیری	۱-۶
۱۶۰	-----	پیشنهادات	۲-۶
۱۶۲	-----	منابع	

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: روندنمای انجام رساله ----- شکل ۱۲
- شکل ۱-۲: فرآیند کلی روش UCG ----- شکل ۱۵
- شکل ۲-۲: شمایی از مخاطرات زیست محیطی روش UCG ----- شکل ۱۸
- شکل ۳-۲: اثر فشار گاز بر ترکیب گاز سنتزی در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین ----- شکل ۲۲
- شکل ۴-۲: مسیر عبور مولکول گاز از طریق خلل و فرج میکروسکوپی با گازهای جاذب سطحی ----- شکل ۲۳
- شکل ۵-۲: نفوذپذیری زغال سنگ داریت بوک تحت بار محوری در فشارهای مختلف گاز دی اکسید کربن ----- شکل ۲۵
- شکل ۱-۳: مدل تخلخل دوگانه ----- شکل ۴۲
- شکل ۲-۳: گروه بندی سلول ها توسط تقاطع یک صفحه محدود ----- شکل ۴۶
- شکل ۳-۳: روش های مختلف مدلسازی جریان سیال ----- شکل ۵۱
- شکل ۴-۳: شیوه های مدلسازی برای شبکههای درزه سه بعدی. ----- شکل ۵۲
- شکل ۵-۳: کاهش تعداد نقاط داخلی ----- شکل ۵۶
- شکل ۶-۳: شمایی از روش تبدیل درزه به لوله ----- شکل ۵۷
- شکل ۷-۳: مدل مفهومی جریان سیال تراکم ناپذیر در تک درزه ----- شکل ۶۰
- شکل ۱-۴: برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} قابل اجرا در کامپایلر Dev-C++ ----- شکل ۸۰
- شکل ۲-۴: روندنمای ساخت مدل ارایه شده ----- شکل ۸۱
- شکل ۳-۴: ورودی برنامه DFN-FRAC^{3D} ----- شکل ۸۲
- شکل ۴-۴: فایل خروجی مشخصات چندضلعی های تولید شده ----- شکل ۸۳
- شکل ۵-۴: شبکه درزه تصادفی شبیه سازی شده توسط برنامه DFN-FRAC^{3D} ----- شکل ۸۵
- شکل ۶-۴: مدلسازی سه بعدی شبکه درزه داری در مجاورت گسل ----- شکل ۸۶
- شکل ۷-۴: خروجی مقادیر بازشدگی درزه در مقابل شعاع درزه تولید شده بر اساس همبستگی آماری آنها ----- شکل ۹۱
- شکل ۸-۴: درزه های حذف شده در مراحل مختلف اجرای الگوریتم ----- شکل ۹۳
- شکل ۹-۴: الگوریتم حذف درزه های منفرد و مسیرهای بسته در مدل DFN ----- شکل ۹۴
- شکل ۱۰-۴: مقایسه چگالی درزه در شبکه اولیه و شبکه پس از حذف درزه های منفرد ----- شکل ۹۵
- شکل ۱۱-۴: مدل مفهومی شبکه لوله منتهی از تقاطع چند درزه ----- شکل ۹۷
- شکل ۱۲-۴: مدل شبکه لوله معادل با شبکه درزه مجزای شکل ۴-۱۰ ب ----- شکل ۹۸
- شکل ۱۳-۴: شبکه درزه با تمامی درزه های موجود ----- شکل ۹۹
- شکل ۱۴-۴: شبکه درزه متصل (رسانا) ----- شکل ۹۹
- شکل ۱۵-۴: مدل شبکه لوله معادل ----- شکل ۱۰۰
- شکل ۱-۵: فرار گاز از ژئوراکتور UCG و انتقال آلوده کننده ها به محیط اطراف و آبهای زیرزمینی ----- شکل ۱۰۵
- شکل ۲-۵: موقعیت منطقه مزینو ----- شکل ۱۰۷
- شکل ۳-۵: ترانسه محل برداشت ناپیوستگی ها ----- شکل ۱۰۹
- شکل ۴-۵: جدایش دسته درزه ها در شبکه اشمیت ----- شکل ۱۱۰
- شکل ۵-۵: فراوانی دسته درزه های برداشت شده ----- شکل ۱۱۱
- شکل ۶-۵: نتایج مقایسه ای آزمون های بهترین برازش برای طول درزه ----- شکل ۱۱۲
- شکل ۷-۵: توابع توزیع طول برازش شده بر درزه های برداشت شده ----- شکل ۱۱۳

- شکل ۵-۸: اندازه‌گیری میدانی چگالی سطحی درزه، P۲۱----- ۱۱۵
- شکل ۵-۹: شبکه DFN منطقه مزینو با تمامی درزه‌های موجود----- ۱۱۸
- شکل ۵-۱۰: خط اثر درزه بر روی مقطع عمودی هم امتداد با جهت شیب خط برداشت----- ۱۱۹
- شکل ۵-۱۱: شبکه DFN متصل (رسانا)----- ۱۲۰
- شکل ۵-۱۲: خروجی کد محاسباتی DFN-FRAC3D----- ۱۲۷
- شکل ۵-۱۳: محاسبات انجام شده در EXCEL----- ۱۲۷
- شکل ۵-۱۴: ورود داده‌های لوله‌ها به نرم افزار ROCKWORK۱۶----- ۱۲۸
- شکل ۵-۱۵: خروجی DXF از نرم افزار ROCKWORK۱۶----- ۱۲۸
- شکل ۵-۱۶: تعریف قطر برای هر لوله به صورت یک ویژگی کیفی----- ۱۲۹
- شکل ۵-۱۷: شبکه لوله‌ها و جهات جریان در نرم‌افزار WaterGEM----- ۱۳۴
- شکل ۵-۱۸: نتایج تحلیل جریان مدل ۳×۳×۳ مترمکعبی توسط نرم افزار WaterGEMS----- ۱۳۶
- شکل ۵-۱۹: نتایج تحلیل جریان مدل ۵×۵×۵ مترمکعبی توسط نرم افزار WaterGEMS----- ۱۳۷
- شکل ۵-۲۰: نتایج تحلیل جریان مدل ۸×۸×۸ مترمکعبی توسط نرم افزار WaterGEMS----- ۱۳۷
- شکل ۵-۲۱: نتایج تحلیل جریان مدل ۱۰×۱۰×۱۰ مترمکعبی توسط نرم افزار WaterGEMS----- ۱۳۸
- شکل ۵-۲۲: نتایج تحلیل جریان مدل ۱۵×۱۵×۱۵ مترمکعبی توسط نرم افزار WaterGEMS----- ۱۳۸
- شکل ۵-۲۳: مقادیر نرخ جریان برای اندازه‌های مختلف توده سنگ ناحیه مزینو----- ۱۳۹
- شکل ۵-۲۴: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال----- ۱۴۱
- شکل ۵-۲۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۳ مگاپاسکال----- ۱۴۱
- شکل ۵-۲۶: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۵ مگاپاسکال----- ۱۴۲
- شکل ۵-۲۷: نمودار تاثیر تغییرات فشار راکتور UCG بر شدت جریان سیال----- ۱۴۲
- شکل ۵-۲۸: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد----- ۱۴۳
- شکل ۵-۲۹: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد----- ۱۴۴
- شکل ۵-۳۰: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد----- ۱۴۴
- شکل ۵-۳۱: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد----- ۱۴۵
- شکل ۵-۳۲: نمودار تاثیر تغییرات دمای سیال در راکتور UCG بر شدت جریان سیال----- ۱۴۵
- شکل ۵-۳۳: شدت جریان در مدل ۸ متری با شدت درزه واقعی----- ۱۴۶
- شکل ۵-۳۴: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۲۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۴۷
- شکل ۵-۳۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۴۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۴۷
- شکل ۵-۳۶: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۶۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۴۸
- شکل ۵-۳۷: نمودار تاثیر تغییرات شدت درزه داری در توده سنگ بالای ژئوراکتور UCG بر شدت جریان سیال----- ۱۴۸
- شکل ۵-۳۸: شدت جریان در مدل ۸ متری با مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۴۹
- شکل ۵-۳۹: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۲۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۵۰
- شکل ۵-۴۰: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۴۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۵۰
- شکل ۵-۴۱: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۶۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی----- ۱۵۱
- شکل ۵-۴۲: نمودار تاثیر تغییرات طول درزه‌ها در توده سنگ بالای ژئوراکتور UCG بر شدت جریان سیال----- ۱۵۱
- شکل ۵-۴۳: نمودار تاثیر تغییرات بازشدگی درزه‌ها در توده سنگ بالای ژئوراکتور UCG بر شدت جریان سیال----- ۱۵۲

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳: روند تکامل مدل‌های تصادفی شبکه درزه-----۳۹
- جدول ۲-۳: مقایسه استراتژی‌های مختلف بکار رفته برای گسسته سازی درزه در کدها/شیوه‌های مختلف-----۵۳
- جدول ۳-۳: مهم‌ترین مدل‌های DFN ساخته شده در دهه‌های اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال سیال-----۷۲
- جدول ۱-۵: خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون-----۱۰۹
- جدول ۲-۵: عوامل هندسی دسته درزه‌های برداشت شده-----۱۱۶
- جدول ۳-۵: برآورد ترکیب، وزن مولکولی و چگالی گاز درون راکتور-----۱۳۱
- جدول ۴-۵: لزجت گازها در دماهای مورد نظر-----۱۳۲
- جدول ۵-۵: لزجت مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر-----۱۳۲
- جدول ۶-۵: مشخصات سیال ورودی در نرم افزار WaterGEMS-----۱۳۳
- جدول ۷-۵: خلاصه محاسبه شدت جریان در اندازه‌های مختلف مدل-----۱۳۹

فصل اول

کلیات

کاهش روز افزون ذخایر نفت و گاز و وضعیت غیرقابل پیش‌بینی بازار نفت باعث شده است که در کشورهای پیشرفته‌ی جهان، استفاده از نفت و گاز به عنوان سوخت به تدریج کاهش یافته و به سوخت‌های جایگزین نفت و گاز توجه بیشتری شود. در همین راستا، به دلیل وجود ذخایر بسیار غنی زغال‌سنگ و نیز پراکندگی مناسب آنها در سراسر جهان و امکان ساخت نیروگاه‌ها در نزدیکی این منابع، توجه اغلب کشورها به استفاده از این منابع به ویژه در تولید برق و استفاده در صنایع شیمیایی بیشتر شده است (Hester and Harrison, ۲۰۱۰).

در سده‌ی گذشته، در سراسر جهان روش‌های نوین استخراج زغال‌سنگ همیشه مورد توجه پژوهشگران و فناوران بوده است. اکثر پژوهشگران در پی یافتن و یا توسعه روش‌های ارزان‌تر و پاک‌تر برای انتقال انرژی زغال‌سنگ از حالت جامد به حالت مایع یا گاز و انتقال آن به سطح زمین و جایگزین کردن آن با نفت و گاز طبیعی بوده‌اند. یکی از روش‌های پاک و در عین حال ارزان استخراج زغال‌سنگ، روش گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG^۱) است.

در پروژه‌های گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ، زغال‌سنگ موجود در اعماق زمین از طریق تزریق اکسیدان به صورت برجا نیم‌سوز می‌شود و طی این فرآیند ترکیب زغال‌سنگ و اکسیدان تبدیل به گاز متان می‌شود. از گازهای حاصله می‌توان به عنوان سوخت و یا به عنوان خوراک در صنعت پتروشیمی استفاده نمود.

گازهای تولیدی در روش UCG تحت فشار و دمای بالا هستند و در نتیجه قابلیت نشت‌پذیری آنها از طریق سنگ‌های درون‌گیر کارگاه استخراج بسیار زیاد است. نشت گاز از دو جنبه حایز اهمیت است. اول مخاطرات زیست محیطی حاصل از نشت گاز و دوم تاثیر منفی نشت گاز بر کارایی روش استخراج و مشکلات ناشی از آن.

^۱ Underground Coal Gasification

بررسی مخاطرات زیست محیطی ناشی از کاربرد این روش اهمیت زیادی دارد. تا حدی که ممکن است در مواردی باعث رد و یا تغییر روش استخراج شود. نشت گازهای تولید شده در فرآیند UCG از درون کارگاه استخراج به بیرون، از طریق تخلخل موثر و نیز بازشدگی ناپیوستگی‌های ذاتی و ثانویه زغال سنگ و سنگ‌های در برگیرنده آن رخ می‌دهد. این گازها پس از نشت به سطح زمین و یا با حل شدن در آب‌های زیرزمینی که در نزدیکی کارگاه استخراج جریان دارند، موجب آلودگی هوا و سفره‌های آب زیرزمینی می‌شوند. همچنین خروج گاز از کارگاه استخراج UCG ممکن است به دو طریق باعث کاهش کارایی این روش استخراج شود. نخست، از دست رفتن مقادیری از گاز متان تولید شده در کارگاه استخراج و دیگر، کاهش فشار فرآیند سوختن در داخل کارگاه استخراج که باعث کاهش تولید گاز متان و یا به طور کلی تغییر ناخواسته‌ی ترکیب گاز سنتزی می‌شود.

عوامل مهم در نشت گاز از کارگاه استخراج UCG عبارتند از: ترکیب گازها، فشار، دما، سرعت گاز کردن، تخلخل، ضخامت روباره، آب محتوی، سطح آب زیرزمینی، وضعیت درزه داری اولیه و ثانویه (لطفی آزاد، ۱۳۹۱). در این تحقیق به طور ویژه به بررسی وضعیت درزه‌داری و نقش آن در میزان نشت گاز از کارگاه استخراج UCG پرداخته خواهد شد.

امروزه، مدل‌سازی عددی توده‌سنگ به طور فراگیری به منظور تعیین دقیق ویژگی‌های توده‌سنگ و بهبود درک رفتار آن بکار برده می‌شود. در این تحقیق نیز از روش‌های عددی برای بررسی نشت گاز از میان توده‌سنگ استفاده خواهد شد. از طرفی موفقیت تحلیل‌های عددی به شدت وابسته به چگونگی تهیه مدل هندسی است (Pine et al., ۲۰۰۶). تعریف دقیق ساختار توده‌سنگ نقطه شروع بهتری را برای مدل‌سازی و تعیین ویژگی‌های رفتاری توده‌سنگ فراهم می‌کند. برای مدل‌سازی دقیق توده‌سنگ، باید جانمایی درزه‌ها در داخل مدل به گونه‌ای باشد که توزیع درزه‌ها تا حد امکان مشابه توزیع ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ واقعی باشد (Song, ۲۰۰۶). از آنجا که توده‌سنگ از مواد طبیعی

ناهمگن^۱ و ناهمسانگرد^۲ تشکیل شده است، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله جهت‌داری^۳، پایایی^۴ و فاصله‌داری^۵ دارای مقادیری پراکنده در توده‌سنگ باشند. بنابراین لازم است ماهیتی تصادفی برای ویژگی‌های مورد نظر تعریف شود و در مدل‌سازی توده‌سنگ بکار رود (Hoek, ۱۹۹۸; Park and West ۲۰۰۱). یکی از توانمندترین روش‌های شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی^۶ شبکه درزه‌های مجزا^۷ (DFN) است.

۱-۲- طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق

مقایسه بین سبد انرژی جهان و ایران نشانگر اتکای بیش از حد ایران به منابع نفت و گاز در قیاس با سایر کشورها است. به نحوی که سایر منابع انرژی اعم از منابع زغال‌سنگ، تنها ۱/۵ درصد از سبد انرژی ایران را به خود اختصاص داده است. دلایل گوناگونی برای شکل‌گیری این وابستگی صرف به نفت و گاز در ایران وجود دارد. از مهم‌ترین این دلایل جایگاه ایران به عنوان دومین دارنده منابع نفت و گاز جهان است. از طرف دیگر با توسعه تصاعدی صنایع جهان و وابستگی این صنایع به نفت و گاز و رشد پایدار تقاضای جهانی برای این دو منبع ارزشمند انرژی در قرن اخیر و در نتیجه رشد چشمگیر قیمت آن در دهه‌های اخیر، چنان جذابیتی برای استفاده از این دو منبع انرژی به وجود آمده است که بیشتر کشورهای دارنده نفت و گاز از جمله ایران طی ۵۰ سال گذشته تمامی تلاش خود را برای اکتشاف، استخراج و صدور نفت و گاز معطوف کرده‌اند. این رویکرد تا حد زیادی سبب مهجور ماندن سایر منابع انرژی در ایران شده است. اگرچه طی دهه اخیر این رویکرد تا حد زیاد در حال تغییر است اما طرح تحول اقتصادی و طرح هدفمند کردن یارانه‌ها به ویژه طرح اصلاح قیمت حامل‌های انرژی، توجه بیشتر به سایر منابع انرژی در ایران را اجتناب ناپذیر خواهد کرد. در این راستا با نزدیک شدن قیمت داخلی

^۱ Non-homogeneous

^۲ Anisotropic

^۳ Orientation

^۴ Persistence

^۵ Spacing

^۶ ۳D stochastic modeling

^۷ Discrete fracture network

نفت و گاز به قیمت‌های جهانی به ویژه قیمت‌های کشورهای حوضه خلیج فارس، سایر منابع انرژی از جمله زغال‌سنگ نیز قابلیت رقابت با نفت و گاز در سبد انرژی ایران را پیدا کرده‌اند (ترازنامه انرژی، ۱۳۹۱).

پیش‌بینی‌ها در خصوص تنوع سبد انرژی جهان تا سال ۲۰۳۰ بیانگر افزایش نقش زغال‌سنگ در زندگی بشر است. بر اساس مطالعات انجام شده انتظار می‌رود سهم زغال‌سنگ در سبد انرژی جهان تا سال ۲۰۳۰ حدود ۱۳ درصد افزایش یابد. این افزایش چشمگیر نشانگر اهمیت زغال‌سنگ در زندگی آتی بشر است. از دلایل مهم این رشد، موفقیت‌های فناورانه در ارایه روش‌های نو برای کاهش آلاینده‌های استفاده از این منبع ارزشمند است (راعی نیایی، ۱۳۹۱).

در حال حاضر بنا بر آخرین آمار موجود، در حدود هزار میلیارد تن ذخیره اقتصادی زغال‌سنگ در جهان برآورد شده است. این در حالی است که ذخیره کلی تخمین زده شده (نه لزوماً اقتصادی) در حدود ۱۸ هزار میلیارد تن است. بیشتر این ذخایر در اعماق زیاد قرار دارند و تنها حدود ۵ درصد از این منابع با روش‌های معدنکاری سنتی قابل استخراج هستند (James, ۲۰۰۹). با کاربرد روش UCG ممکن است بتوان بخش قابل توجهی از این منابع ارزشمند را قابل بهره‌برداری نمود. در ایران نیز بخش زیادی از ذخایر زغال‌سنگ در اعماق زیاد قرار دارند. از سوی دیگر زغال‌سنگ ایران به علت برخی مسایل فنی و فیزیکی کیفیت پایینی دارد و به طور متوسط دارای حدود ۳۰ درصد خاکستر است. این میزان خاکستر برای استفاده از زغال‌سنگ در صنایع، باید کاهش یابد. طبق استانداردهای بین‌المللی اگر میزان خاکستر موجود در زغال‌سنگ بیش از ۱۰ درصد باشد، نیاز به زغال‌شویی وجود خواهد داشت، از این‌رو کاربرد روش UCG می‌تواند به عنوان بهترین گزینه برای بهره‌برداری از ذخایر زغال‌سنگ غیر کک‌شو و عمیق ایران مطرح باشد.

در کاربرد روش UCG، پدیده نشت گاز تولیدی در کارگاه استخراج، از طریق فضای متخلخل سنگ و ناپیوستگی‌های موجود در آن بسیار حایز اهمیت است. نشت گاز باعث بروز مشکلات زیادی از قبیل کاهش راندمان استخراج، تغییر ترکیب گازهای تولیدی، احتمال بروز خودسوزی کنترل نشده

زغال سنگ، آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی و نیز آلودگی هوا و در نهایت غیرعملیاتی شدن پروژه گردد. اطلاع از میزان نشت گاز در شرایط مختلف کمک زیادی به طراحی موفق ابعاد پهنه استخراجی و طراحی فرآیند استخراج زغال سنگ می‌کند. از این رو در رساله‌ی پیش رو به موضوع نشت گاز از کارگاه استخراج UCG، مشکلات ناشی از این پدیده و در نهایت راهکارهای ارزیابی آن پرداخته شده است.

مطالعات متعددی در زمینه نشت گاز از معادن زغال سنگ انجام شده است. اما نشت گاز از کارگاه UCG به دلیل حرارت و فشار بالای گازهای خروجی شرایط ویژه‌ای را داراست. همچنین مطالعاتی که تاکنون در زمینه نشت گاز از کارگاه استخراج UCG انجام شده است بیشتر بر روی حرکت سیال در فضای متخلخل تمرکز داشته است. حال آنکه فرآیند UCG باعث تخریب فضای استخراجی و به وجود آمدن ناپیوستگی‌های زیادی در فضای اطراف کارگاه می‌شود. این ناپیوستگی‌ها به ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ اطراف کارگاه اضافه خواهند شد. از این رو یکی از مهم‌ترین مسایل موجود، مدل‌سازی فضای پر درزه و شکاف و نیز تحلیل جریان سیال در این شکستگی‌ها است. البته خمیره‌ی سنگ‌های اطراف کارگاه علاوه بر ناپیوستگی‌ها از طریق تخلخل نیز در عبور سیال شرکت می‌کند. هرچند میزان این تاثیر گاهی بسیار کم است اما نمی‌توان به راحتی از آن چشم پوشی کرد.

از طرف دیگر، تاکنون، مطالعات انجام شده بر روی توزیع و نشت گاز در فضای تخریب شده در روش‌های مختلف استخراج زغال سنگ و به طور خاص در روش UCG، توسط اندازه‌گیری مقدار گاز در برخی نقاط تخریب شده و یا با شبیه‌سازی آزمایشگاهی برآورد شده است. اما این دو روش کاربرد زیادی ندارند، زیرا انجام آنها به زمان و هزینه زیادی نیاز دارد. با پیشرفت فناوری‌های رایانه‌ای، روش‌های مدل‌سازی عددی تبدیل به اصلی‌ترین روش برای مدل‌سازی رفتار و انتقال گاز شده است.

۱-۳- اهداف و روش تحقیق

هدف اصلی این تحقیق، تعیین میزان نشت گاز از کارگاه استخراج UCG با در نظر گرفتن ناپیوستگی‌های توده سنگ اطراف کارگاه استخراج است. برآورد میزان نشت پیش از شروع عملیات گاز کردن زغال سنگ

و در مراحل مطالعاتی طرح می‌تواند اطلاعات مناسبی را برای طراحی ترکیب گاز سنتزی، ابعاد فضای استخراجی و حتی انتخاب روش استخراج در اختیار قرار دهد.

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)، ذخیره‌ی زغال‌سنگ (بیشتر از ۳/۵ میلیون تن) و پراکندگی گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها اشاره نمود (Burton, ۲۰۰۶; Couch, ۲۰۰۹). در این میان، ناپیوستگی‌ها از جمله مهم‌ترین عوامل محیطی تاثیرگذار بر اقتصادی بودن روش UCG بیان شده است (Perkins, ۲۰۰۵; Sarraf Shirazi et al., ۲۰۱۱). 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 (Stanczyk et al., ۲۰۱۱; Liu et al., ۲۰۰۷). بنابراین تعیین پارامترهایی مانند حجم و سرعت انتشار گازها و چگونگی حرکت گاز از ژئوراکتورهای زیرزمینی و بررسی ظرفیت آلودگی زیست محیطی، قبل، بعد و در طول فرآیند UCG لازم و ضروری است (Pardala and Stanczyk, ۲۰۱۵).

در این تحقیق، با توجه به اهمیت نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور UCG، بر مدل‌سازی نشت گاز از مدل جریان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) سه بعدی تمرکز شده است که در مطالعات پیشین تاکنون به آن پرداخته نشده است.

با توجه به اهداف تحقیق، ابزار مورد استفاده برای انجام کار، مدل‌های شبکه ناپیوستگی مجزا (DFN) همراه با کاربرد روش‌های حل عددی است.

این بررسی‌ها در چهار مرحله به شرح زیر انجام می‌شود:

- در مرحله اول، با استفاده از روش برداشت خطی به جمع‌آوری اطلاعات ساختاری دسته درزه‌های موجود در توده‌سنگ اطراف ناحیه زغالی مزینو طبس پرداخته می‌شود. اطلاعات جمع‌آوری شده با کاربرد نرم‌افزار تجاری Dips ۵,۱۰۳ پردازش شده و با استفاده از آزمون‌های

بهترین برازش، توابع توزیع مناسب برآورد می‌شوند. سپس بر اساس این اطلاعات آماری و با استفاده از برنامه DFN-FRAC^{3D} (نوروزی، ۱۳۹۳)، مدل هندسی-تصادفی بزرگ مقیاس شبکه درزه‌های منطقه تولید می‌شود.

- در مرحله دوم، برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} که پیش از این برای تحلیل‌های مکانیکی تهیه شده بود، برای ساخت DFN هیدرولیکی توسعه داده می‌شود. برای این منظور مولفه بازشدگی درزه‌ها به سایر ویژگی‌های هندسی درزه شامل شیب، جهت شیب، فاصله داری و پایایی اضافه می‌شود. علاوه بر این به منظور ساخت مدل DFN دقیق برای هدف تحلیل‌های هیدرولیکی، همبستگی بین بازشدگی و طول درزه در برنامه در نظر گرفته خواهد شد که در اکثر مطالعات قبلی وجود ندارد. در ادامه، این برنامه کامپیوتری به منظور شناسایی شبکه‌های درزه متصل به هم (رسانا) توسعه داده می‌شود.

- در مرحله سوم، برای حل معادلات جریان از میان این شبکه DFN، از روش شبکه لوله معادل استفاده می‌شود. در این روش ناپیوستگی‌ها به عنوان لوله‌هایی با قابلیت هدایت هیدرولیکی معادل با هر ناپیوستگی، که مسیر گذر سیال را تامین می‌کنند، در نظر گرفته می‌شوند. هر لوله معادل ناپیوستگی، از مرکز صفحه چندوجهی ناپیوستگی شروع شده و در محل تقاطع با ناپیوستگی‌های دیگر پایان می‌یابد. به همین منظور، برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} برای تبدیل شبکه درزه‌های متصل به شبکه لوله معادل توسعه داده می‌شود. استفاده از روش شبکه لوله به همراه حذف ناپیوستگی‌هایی که در انتقال سیال دخالتی ندارند، و نیز معادل سازی مسایل دو بعدی و سه بعدی با یک سری از اجزای یک بعدی موجب می‌شود که تا حد بسیار زیادی حجم محاسبات کاهش یابد.

- در مرحله چهارم، با استفاده از نرم‌افزار عددی مدل‌ساز جریان، WaterGEMS، که قابلیت ساخت شبکه پیچیده لوله‌ها و دریافت سایر اطلاعات هیدرولیکی مساله را دارا است، جریان سیال درون این شبکه بررسی می‌شود. در پایان میزان نشت گاز از کارگاه استخراج UCG برآورد

می‌شود تا در صورت لزوم تمهیدات لازم برای جلوگیری از آلودگی محیط زیست و کاهش کارایی روش استخراج UCG در هر پروژه اندیشیده شود.

۱-۴- فرضیات تحقیق

در راستای انجام این تحقیق و به‌دست آوردن پاسخی مناسب برای پرسش‌های موجود در خصوص مساله مورد تحقیق، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است.

- از انواع ناپیوستگی‌های توده‌سنگ، فقط درزه‌ها و سطوح لایه‌بندی که سهم حداکثری در بین انواع ناپیوستگی‌ها دارند، در نظر گرفته می‌شود.
- فرض می‌شود اندازه‌های سه بعدی (پایایی) درزه‌های دارای ویژگی‌های آماری مشابه با اندازه‌های دو بعدی (طول اثر) درزه‌ها متناسب هستند.
- ناپیوستگی‌ها، مستوی (بدون انحنا) فرض می‌شوند.
- ماده‌سنگ واقع در بین ناپیوستگی‌ها صلب در نظر گرفته می‌شود.
- جریان سیال آرام در نظر گرفته می‌شود.
- از آنجا که نفوذپذیری بدنه سنگ در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده-سنگ بسیار ناچیز است، و فرض می‌شود مسیر اصلی جریان سیال درزه‌های توده سنگی باشند.
- در انتشار عرضی و پراکندگی در هر کانال جریان، از اختلاط کامل در عرض کانال اطمینان حاصل می‌شود.
- فرض می‌شود واکنش‌های جذب بر روی دیواره‌ی ناپیوستگی‌ها و در توده سنگ اتفاق نمی‌افتد.
- سیال تک فاز و در حالت گاز بررسی می‌شود.

۱-۵- جنبه‌های نوآوری تحقیق

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) سه بعدی تمرکز شده است که تاکنون در مطالعات پیشین به آن پرداخته نشده 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 (Pardala and Stanczyk, ۲۰۱۵) و یا آزمایشگاهی (Yang and Zhang, ۲۰۰۹) برای بررسی نشت گاز در توده‌سنگ‌های اطراف استفاده کرده‌اند.

علاوه بر این‌ها، در این پژوهش یک مدل DFN مناسب برای تحلیل‌های هیدرولیکی توسعه داده شده است. برنامه کامپیوتری $DFN-FRAC^{3D}$ که پیش از این برای تحلیل‌های مکانیکی تهیه شده بود، در این تحقیق برای اهداف هیدرولیکی توسعه داده شده است. برای این منظور مولفه بازشدگی درزه‌ها به سایر ویژگی‌های هندسی درزه اضافه شده است. علاوه بر این به منظور ساخت مدل DFN دقیق برای هدف تحلیل‌های هیدرولیکی، همبستگی بین بازشدگی و طول درزه در برنامه در نظر گرفته شده که در اکثر مطالعات قبلی وجود ندارد. همچنین، این برنامه کامپیوتری به منظور شناسایی شبکه‌های درزه متصل و تبدیل درزه‌های متصل به شبکه لوله معادل نیز سازگار شده است.

۱-۶- ساختار رساله

با توجه به اهداف این تحقیق، روندنمای انجام رساله در شکل ۱-۱، نشان داده شده است. بر اساس روند مذکور، رساله‌ی حاضر در ۵ فصل به شرح ذیل تدوین شده است.

در **فصل اول** کلیات موضوع رساله شامل طرح مساله و ضرورت انجام تحقیق، فرضیات، اهداف و جنبه‌های نوآورانه تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

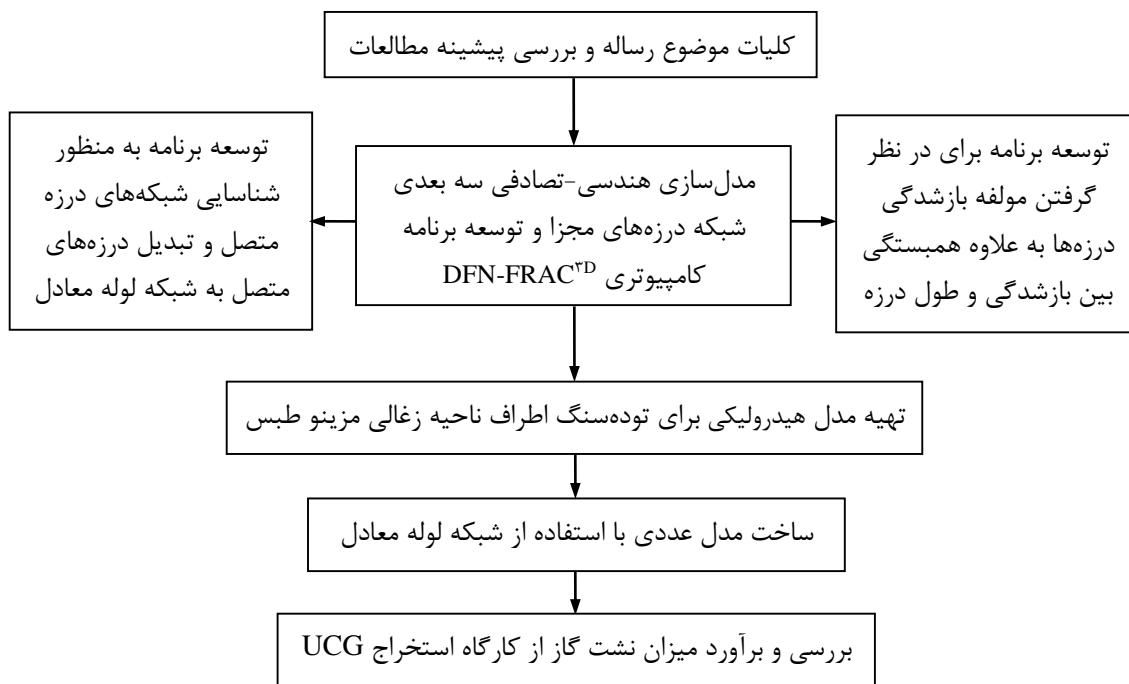
در **فصل دوم** به تشریح و بیان پیشینه مطالعات انجام شده بر روی موضوعات توزیع‌های آماری ویژگی‌های هندسی درزه، مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها (DFN)، جریان و انتقال سیال در شبکه

درزه‌های مجزا (DFN)، روش شبکه لوله برای مدل‌سازی جریان، مدل‌سازی عددی جریان در توده‌سنگ و نشت گاز از کارگاه استخراج UCG پرداخته می‌شود.

در **فصل سوم** به ساخت و توسعه مدل تصادفی شبکه ناپیوستگی‌های مجزای سه بعدی به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی توده‌سنگ پرداخته می‌شود. در این فصل برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D}، برای این منظور توسعه داده می‌شود. مولفه بازشدگی درزه‌ها به علاوه همبستگی بین بازشدگی و طول درزه در برنامه در نظر گرفته می‌شود. همچنین، این برنامه کامپیوتری به منظور شناسایی شبکه‌های درزه متصل (رسانا) و تبدیل درزه‌های متصل به شبکه لوله معادل نیز توسعه داده می‌شود.

در **فصل چهارم** به مدل‌سازی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های رسانایی توده‌سنگ و برآورد میزان نشت گاز پرداخته می‌شود. برای این منظور، در ابتدا با استفاده از DFN-FRAC^{3D} و با برآورد بهترین توابع توزیع بر داده‌های برداشت شده، به مدل‌سازی هندسی-تصادفی سه بعدی توده‌سنگ اطراف ناحیه زغالی مزینو طبس پرداخته می‌شود. سپس مدل هیدرولیکی و مدل شبکه لوله معادل آن تهیه می‌شود. برای این منظور با استفاده از DFN-FRAC^{3D} درزه‌های هیدرولیکی به وسیله روش لوله معادل، تبدیل به المان‌های یک بعدی لوله شده و انتقال سیال از این لوله‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. نرم‌افزار عددی WaterGEMS برای تحلیل‌های هیدرولیکی سیال از میان شبکه لوله‌ها مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

در **فصل پنجم** نتایج حاصل شده از تحقیق به طور خلاصه بیان می‌شود و سپس به ارایه‌ی پیشنهادها برای انجام مطالعات بعدی پرداخته می‌شود.



شکل ۱-۱: روندنمای انجام رساله

فصل دوم

بررسی پدیده نشت گاز در فرآیند گازکردن

زیرزمینی زغال سنگ (UCG)

۲-۱- مقدمه

اکثر شرکت‌های تولید کننده مواد هیدروکربنی پیش‌بینی کرده‌اند که تولید جهانی نفت تا سال ۲۰۵۰ میلادی و تولید گاز طبیعی تا سال ۲۰۷۰ میلادی به مقدار قابل توجهی کاهش خواهد یافت. این در حالی است که طول عمر ذخایر زغال‌سنگ بیش از ۲۰۰ سال برآورد شده و بنابراین عمر طولانی‌تری نسبت به نفت و گاز دارند (Hester et al., ۲۰۱۰). و لازم است تدابیری برای بهره‌برداری از آنها به عنوان جایگزین نفت و گاز طبیعی اندیشیده شود.

یکی از روش‌های استخراج پاک و در عین حال ارزان زغال‌سنگ، روش گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG) است.

گازکردن به فرآیندهای ترکیب شیمیایی سوخت‌های جامد و مایع (مانند زغال‌سنگ، کک و هیدروکربن‌های سنگین) با هوا، اکسیژن و یا بخار آب در درجه حرارت و فشار زیاد و تبدیل آن‌ها به محصولات گازی قابل احتراق مانند گاز سنتزی^۱ گفته می‌شود (Burton et al., ۲۰۰۷). گاز سنتزی عمدتاً از گازهای هیدروژن، مونواکسیدکربن، متان و بخار آب تشکیل شده است (Shedden Uhde Australia, ۲۰۰۹).

این محصولات گازی در توربین‌های گازی (سیکل ساده یا سیکل ترکیبی) و نیروگاه‌های بخار (به تنهایی و یا به عنوان سوخت مکمل) برای تولید برق، خوراک صنایع شیمیایی برای تولید مواد شیمیایی مانند متانول و مشتقات آن، اتانول، آمونیاک، کود شیمیایی، سوخت‌های مایع، سوخت جت، سوخت هیدروژنی و جایگزین گاز طبیعی سنتزی^۲ (SNG) استفاده می‌شوند (Burton et al., ۲۰۰۷ & Shafirovich et al., ۲۰۰۸).

گازکردن زغال‌سنگ به دو دسته گازکردن سطحی زغال‌سنگ^۳ (SCG) و گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG) تقسیم‌بندی می‌شود. در SCG، زغال‌سنگ استخراج شده با استفاده از روش‌های سنتی در

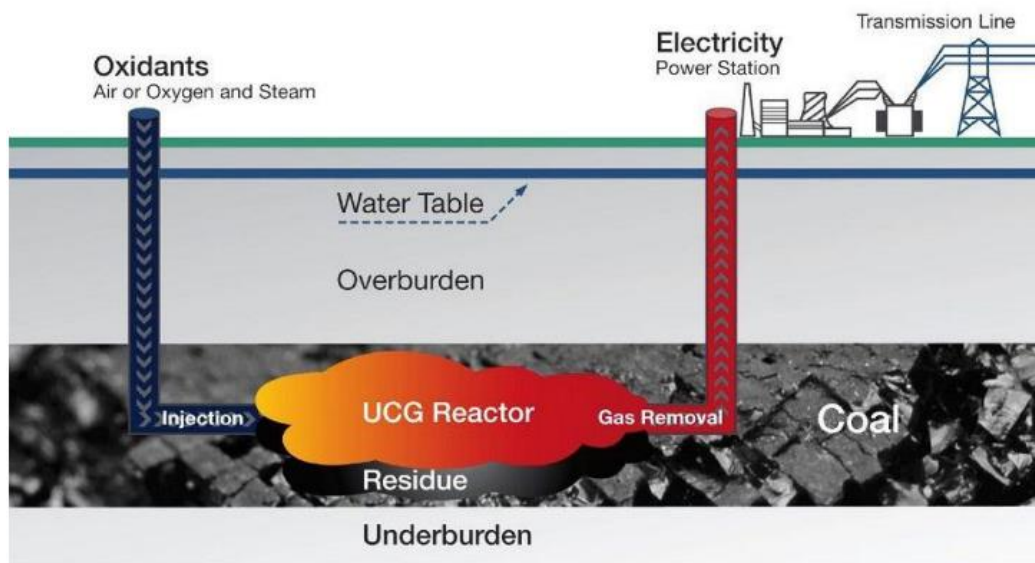
^۱ Syngas

^۲ Synthetic Natural Gas

^۳ Surface Coal Gasification

مبدل‌های^۱ سطحی تبدیل به گاز می‌شود. تبدیل زغال‌سنگ به محصولات گازی، به صورت برجا و در زیرزمین و بدون آنکه زغال‌سنگ استخراج شود، را گازکردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG) می‌نامند (GasTech, ۲۰۰۷).

در روش UCG، محصول اولیه استخراج شده از زیرزمین، گازهای قابل احتراق با ارزش حرارتی کم تا متوسط، ۳۷۰۰ تا ۱۱۲۰۰ کیلوژول بر مترمکعب (در شرایط متعارفی)، هستند (Hartman, ۱۹۹۶). در شکل ۱-۲، شمایی از روش UCG مشاهده می‌شود، در این فرآیند، ابتدا چاه‌های تزریق و تولید تا رسیدن به سطح لایه‌ی زغال‌سنگ حفاری و سپس به یکدیگر متصل می‌شوند. بعد از حفاری چاه‌های تزریق و تولید و ایجاد ارتباط بین آنها، اکسیدان، مرکب از هوا یا اکسیژن و بخار آب (گاه هوا و بخار آب) به داخل چاه تزریق ارسال می‌شود تا باعث سوختن زغال‌سنگ و تبدیل آن به گاز شود. بر اثر احتراق، گرما، منواکسید کربن و برخی گازهای ترکیبی تولید می‌شوند. گاز ترکیبی از فضای استخراجی ایجاد شده در لایه زغال‌سنگ به داخل چاه تولید و سپس به سطح زمین منتقل می‌شود. محصولات گازی حاصل شده دارای ارزش حرارتی نسبتاً بالا بوده و کاربرد گسترده‌ای در تولید برق، تولید هیدروژن، سوخت مایع و غیره دارد (نجفی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۱-۲: فرآیند کلی روش UCG (Irwin and Bowen, ۲۰۰۸)

^۱ Reactors

۲-۲- مزایای روش UCG

روش UCG نسبت به روش‌های استخراج زیرزمینی، روش روباز و گازکردن سطحی زغال‌سنگ دارای برتری‌هایی به شرح زیر است (Burton et al., ۲۰۰۷):

الف) هزینه‌های سرمایه‌گذاری تاسیسات UCG به دلیل عدم نیاز به ساخت مبدل‌های سطحی، در مقایسه با SCG به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد.

ب) به دلیل عدم حمل و نقل زغال‌سنگ و باطله همراه آن، هزینه‌ی استخراج آن در مقایسه با روش‌های معمول استخراج زیرزمینی و روباز کاهش یافته، انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات محلی در ارتباط با روباره برداری زغال‌سنگ و انبار زغال‌سنگ کاهش می‌یابد.

پ) روش UCG یک روش قابل کاربرد در کنسارهای زغال‌سنگ با شرایط نامطلوب (نازک، عمیق، پرشیب، کیفیت پایین از نظر نوع، قبلاً کار شده، شرایط زمین‌شناسی نامساعد و غیره) است که معمولاً از نظر اقتصادی با روش‌های سنتی غیرقابل استخراج تشخیص داده می‌شوند.

ت) خسارات ناشی از پدیده‌ی نشست سطح زمین کاهش می‌یابد.

ث) به دلیل عدم حضور نیروی انسانی در زیر زمین شرایط ایمنی و بهداشتی بسیار خوبی دارد.

ج) مقدار زیادی از خاکستر زغال‌سنگ در زیرزمین باقی مانده، در نتیجه فرآیندهای پالایش گاز آسان‌تر می‌شود و مسایل زیست‌محیطی مرتبط با انبار باطله در این روش وجود ندارد.

چ) مقدار برخی از آلاینده‌ها مانند SO_x ، NO_x ، ذرات معلق و سولفورها تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

روش UCG در مقایسه با روش گازکردن سطحی زغال‌سنگ، گازهای گلخانه‌ای کمتری تولید کرده و برای جداسازی و ذخیره‌سازی زیرزمینی کربن^۱ مناسب‌تر است.

۲-۳- محدودیت‌های روش UCG

^۱ -Carbon Capture and Storage

هر چند روش UCG روش دارای مزایای زیادی است، ولی محدودیت‌هایی به شرح ذیل نیز دارد (Burton et al., ۲۰۰۷):

الف) تاثیرات زیست‌محیطی مانند آلودگی سفره‌های آب زیرزمینی و نشست سطح زمین ممکن است وجود داشته باشد.

ب) روش UCG برای بسیاری از منابع زغال‌سنگ مناسب است، ولی در برخی مناطق به دلیل شرایط زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی نامناسب، محدودیت‌های زیست‌محیطی وجود دارد.

پ) کارگاه‌های استخراج زیرزمینی به اندازه‌ی کارگاه‌های استخراج سطحی قابل کنترل نیستند. عوامل زیادی مانند میزان نفوذ آب، توزیع واکنش‌دهنده‌ها در مناطق واکنش و میزان گسترش کارگاه استخراج ایجاد شده بر روی فرآیندها اثرگذار است. این اثرات فقط از روی اندازه‌گیری درجه‌ی حرارت و کیفیت و کمیت محصولات قابل ارزیابی هستند.

ت) روش استخراج UCG یک روش تقریباً ناپایدار است و ممکن است میزان جریان گاز و ارزش حرارتی آن هنگام گازکردن تغییر نماید.

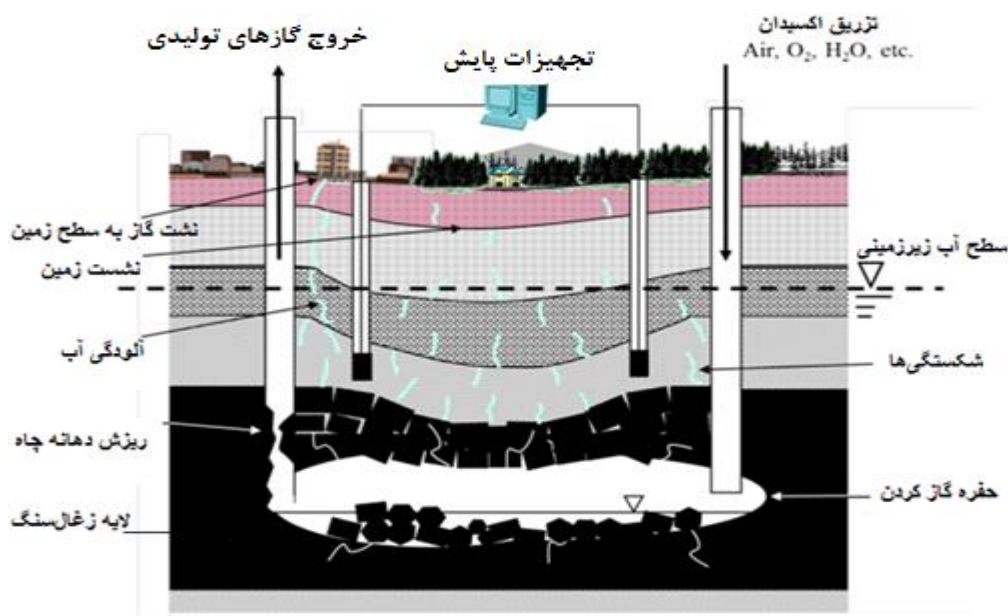
ث) ارزش حرارتی گاز تولید شده در این روش، بدون استفاده از راهکارهای خاص برای افزایش کیفیت آن کم است.

۲-۴- بررسی پدیده نشست گاز

گازهای سنتزی تولیدی در فرآیند UCG، شامل CH_4 ، H_2 ، CO ، CO_2 و H_2O است. این گازهای پرفشار، ممکن است از خلل و فرج سنگ‌ها، ناپیوستگی‌های ذاتی سنگ و یا شکستگی‌های ثانویه که بر اثر گسترش کارگاه استخراج در سنگ‌های اطراف آن به وجود می‌آیند، از درون کارگاه استخراج خارج شود. این موضوع از آن جهت مورد توجه است که خروج گازهای تولیدی باعث کاهش کارایی روش استخراج و بروز مشکلات زیست‌محیطی می‌شود. در ادامه، پیامدهای نشست گاز از درون کارگاه استخراج UCG تشریح می‌شود.

۲-۴-۱- مخاطرات زیست‌محیطی

روش UCG، در مقایسه با روش‌های معدنکاری سنتی دارای مزایای زیست محیطی بیشتری است. به عنوان مثال در روش UCG آشفته‌گی سطح زمین نسبت به روش‌های سنتی کمتر است. گازکردن بر جای زغال سنگ سبب می‌شود بسیاری از محصولات اشتعال‌زا و آلودگی‌ها در داخل زمین باقی بمانند. در عوض این روش دارای مخاطراتی شامل آلودگی آب‌های زیرزمینی، آلودگی آب‌های سطحی، آلودگی هوا است که به طور شماتیک در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: شمایی از مخاطرات زیست محیطی روش UCG (Su et al., ۲۰۱۳)

۲-۴-۱-۱-۱-۴-۲ آلودگی آب‌های زیرزمینی

یکی از مهم‌ترین مخاطرات زیست محیطی در فرآیند UCG آلودگی آب‌های زیرزمینی است. آلودگی‌هایی که به واسطه فرآیند UCG به وجود می‌آیند دارای انواع مختلف بوده و از منابع مختلفی تولید می‌شوند. انتقال و نشست غیر کنترل شده گاز تولید شده، باعث آلودگی سفره‌های آب بالادستی می‌شود (Wobus and Ritter, ۲۰۱۰). همچنین ممکن است برخی محصولات فرعی نیز به طور ناخواسته در فرآیند UCG حاصل شوند. این محصولات ممکن است حاوی آلودگی‌های ارگانیک^۱ (PAH)

^۱ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons

ها) مانند فنول‌ها، بنزن و همچنین آلودگی‌های غیر ارگانیک شامل سولفات، بور و برخی فلزات و شبه فلزات مانند جیوه، آرسنیک، و سلیوم به صورت ناخالصی‌های سولفات‌های فلزی، در زغال سنگ باشند (Skousen et al., ۲۰۰۰ & Sury et al., ۲۰۰۴). آرسنیک و سلیوم، فلزات و شبه فلزهای سبکی هستند که می‌توانند به صورت گاز به داخل فرآیند UCG وارد شوند (Liu et al., ۲۰۰۹). این آلودگی‌ها می‌توانند به واسطه نشت گاز از درون کارگاه استخراج، سفره‌های آب زیرزمینی و کیفیت هوا در زیرزمین و سطح آن را متاثر نمایند. میزان این تاثیرات، بسته به دمای فرآیند، نوع فعالیت‌های ژئوشیمیایی که در طول فرآیند گازکردن رخ می‌دهد و نحوه توزیع راه‌های عبور، از زغال سنگ تا سطح زمین متغیر خواهد بود.

از دیگر منابع آلودگی می‌توان واحدهای زمین‌شناسی در برگیرنده لایه‌ی زغال سنگ را نام برد. این واحدهای سنگی که به صورت بلافصل در مجاورت لایه‌های زغالی هستند از فرآیند UCG متاثر می‌شوند. بدین ترتیب، اکسیداسیون و فرآیندهای دیگر در سنگ‌های در برگیرنده زغال سنگ، عامل به وجود آمدن آلودگی محسوب می‌شوند. نوع آلودگی‌های به وجود آمده، به آلودگی‌های موجود در سنگ‌های اطراف کارگاه استخراج بستگی دارد.

۲-۴-۱-۲- آلودگی آب‌های سطحی

علاوه بر آلودگی آب‌های زیرزمینی که مهم‌ترین و قابل بررسی‌ترین مخاطره زیست محیطی در روش UCG است، خروج گاز از سطح زمین و در مسیرهایی به غیر از چاه تولید نیز می‌تواند ایجاد مخاطراتی نماید.

خروج و نشت گاز به سطح زمین ممکن است از طریق ماتریس متخلخل توده سنگ، گسل‌ها و شکستگی‌های ذاتی توده سنگ و یا شکستگی‌های ثانویه که بر اثر نشست زمین ایجاد شده‌اند، رخ دهد (Gregg, ۱۹۷۷). میزان مخاطرات زیست محیطی نشت گاز، به عواملی چون طبیعت گاز و منابع زیستی‌ای که در سطح وجود دارد، بستگی دارد. در هر صورت این مخاطرات عمدتاً از نوع به مخاطره افتادن زندگی گیاهان، یا اسیدی شدن آب‌های سطحی است. همچنین تبخیر فلزات و شبه فلزاتی مانند

آرسنیک، جیوه یا سلنیوم در اثر حرارت کارگاه استخراج UCG و راه یافتن آن‌ها به سطح زمین از طریق نشت گاز، می‌تواند باعث ایجاد محیط‌هایی سمی در خاک و آب‌های سطحی شود (Wobus et al., ۲۰۱۰).

باید توجه داشت که آب‌های سطحی جاری در نزدیکی کارگاه استخراج UCG، ممکن است از طریق خروج آب زیرزمینی آلوده از رخنمون‌ها و چشمه‌های موجود در نزدیکی کارگاه‌های استخراج و نیز پمپاژ آب آلوده و انتقال آن به سطح زمین دچار آلودگی شوند (Evans, ۱۹۸۶).

۲-۴-۱-۳- آلودگی هوا

امروزه یکی از مسایل زیست محیطی جهان، آلودگی هوا و به دنبال آن گرم شدن کره زمین است. مصرف زغال‌سنگ به عنوان سوخت به دلیل تولید دود، اثر قابل توجهی را در آلودگی محیط زیست و به ویژه هوا دارد. انتشار گازهای CH_4 ، CO_2 ، CO و NH_3 در هر دو روش UCG و SCG وجود دارد. در روش SCG، گازهای خروجی از طریق دودکش‌ها و در روش UCG، نشت این گازها از کارگاه استخراج و همچنین آلودگی‌های کارخانجات سطحی دارای بیشترین اثر در آلودگی هوا هستند (Gujarat Industries Power Co, ۲۰۰۹). این گازها با ورود به هوا، هر یک به نوعی بر سلامتی انسان و محیط زیست تاثیر می‌گذارند. از جمله مهم‌ترین آنها، اثر گلخانه ای این گازهاست.

۲-۴-۲- کاهش کارایی روش استخراج

نشت گاز از کارگاه استخراج به دو صورت باعث کاهش کارایی روش استخراج UCG می‌شود. اول اینکه گازهای تولیدی در کارگاه استخراج UCG از مسیرهایی غیر از چاه تولید و از طریق فضاهای متخلخل و ناپیوستگی‌های ساختاری توده‌سنگ اعم از شکستگی‌های اولیه، ثانویه، گسل‌ها و غیره، از کارگاه استخراج به بیرون منتشر شده و از چرخه تولید خارج می‌شوند و به اصطلاح به هدر می‌روند. از این رو مقادیر گاز سنتزی استحصالی نسبت به حالت بدون نشت کاهش یافته و باعث کاهش کارایی روش استخراج می‌گردد. علاوه بر این با توجه به این که یکی از عوامل موثر بر سینتیک واکنش‌های شیمیایی، فشار است، کاهش فشار کارگاه استخراج که به دلیل نشت گاز از کارگاه استخراج رخ می‌دهد، باعث

کاهش درجه نیم‌سوز شدن زغال‌سنگ برای تولید گاز متان شده و در نتیجه، بهره‌وری کارگاه استخراج کاهش می‌یابد (Creedy et al., ۲۰۰۱). واکنش تولید گاز متان در کارگاه استخراج UCG به صورت واکنش شیمیایی (۱-۲) است (Shafirovich and Varma, ۲۰۰۹).



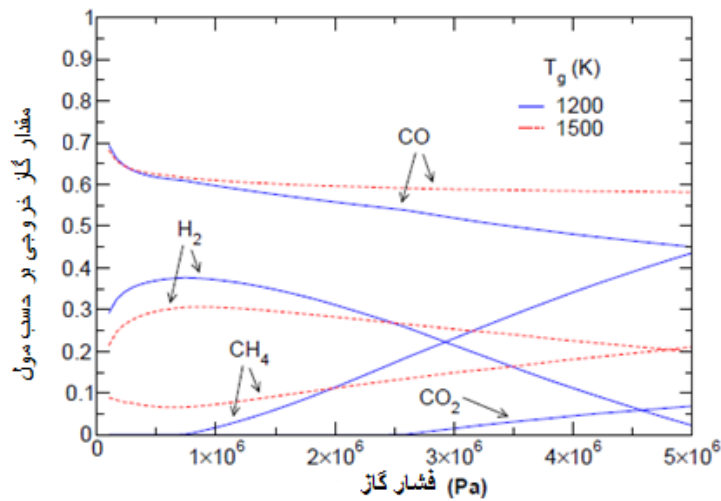
در جریان واکنش (۱-۲)، با کاهش فشار کارگاه استخراج، طبق اصل لوشاتلیه^۱ تعادل به سمت چپ (یعنی افزایش تولید گاز مونوکسید کربن و کاهش گاز متان) که یک فرآیند نامطلوب به شمار می‌رود، جابه‌جا می‌شود. این را می‌توان در نتایج آزمایش صحرایی روش UCG در ایالات متحده (در فشار ۰/۴ مگاپاسکال) و در اسپانیا (فشار ۵/۳ مگاپاسکال) که در هر دو مورد اکسیژن تزریق شده است، نیز مشاهده نمود. گازهای حاصل در فشار ۰/۴ مگاپاسکال شامل ۴/۷ درصد CH_4 ، ۲۰/۸ درصد CO و ۳۸/۱ درصد H_2 است، در حالی که گازهای به دست آمده در فشار ۵/۳ مگاپاسکال شامل ۱۳/۲ درصد CH_4 ، ۱۲/۸ درصد CO و ۲۴/۸ درصد H_2 هستند (گازهای CO_2 و H_2S متعادل هستند). ارزش حرارتی گازهای حاصل به ترتیب ۸/۷۳ و ۱۰/۹ مگاژول بر مترمکعب برآورد شده است (Shafirovich and Varma, ۲۰۰۹). همچنین در کارگاه‌های پرایس‌تون^۲ و چینچیللا^۳ در فشار یک مگاپاسکال به ترتیب در حدود ۸ و ۱۳ درصد گاز متان تولید شده است (Perkins, ۲۰۰۵).

شکل ۲-۳، تغییرات اثر فشار گاز بر ترکیب گاز در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین را نشان می‌دهد که با نتایج داده‌های گزارش شده از مناطق مختلف سازگاری خوبی دارد (Perkins, ۲۰۰۵).

^۱ - Le Chatelier's principle

^۲ - Pricetown

^۳ - Chinchilla



شکل ۲-۳: اثر فشار گاز بر ترکیب گاز سنتزی در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین (Perkins, ۲۰۰۵)

۲-۵- عوامل موثر بر نشت گاز از کارگاه استخراج UCG

بیشتر مشکلات روش گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ، ناشی از نشت گاز از کارگاه استخراج و رسیدن آن به سطح زمین و یا منابع آب زیرزمینی است. در این بخش عوامل موثر بر این مهم بررسی شده تا بتوان به طور موثرتری نسبت به ارزیابی نشت گاز اقدام نمود.

عوامل مهم در بررسی نشت گاز از کارگاه استخراج UCG عبارتند از: ترکیب گازها، فشار، دما، سرعت گاز کردن، تخلخل، ضخامت روباره، آب محتوی، سطح آب زیرزمینی، وضعیت درزه‌داری اولیه و ثانویه (لطفی آزاد، ۱۳۹۱).

۲-۵-۱- ترکیب گازها

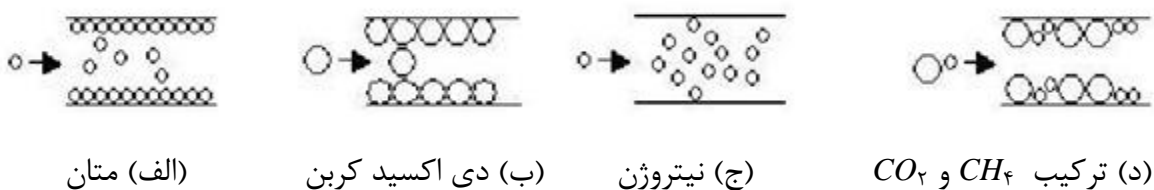
مقدار و چگونگی جریان گاز از میان خلل و فرج به ابعاد و توزیع این فضاها بستگی دارد. منافذ کوچک با ابعاد چند آنگستروم می‌توانند مانند سرد عمل کنند و مانع عبور برخی از مولکول‌ها شوند. بنابراین سرعت جریان برای گازهای با مولکول بزرگ‌تر کاهش خواهد یافت.

دو نظریه در این مورد وجود دارد که اولین نظریه معروف به نظریه ترمیم^۱ است، که در سال ۱۹۶۵ ارایه شده است. طبق این مطالعات، نفوذپذیری سنگ‌ها به ویژه زغال سنگ به اندازه مولکول گاز بستگی

^۱ Patching

دارد و از جذب سطحی گاز کمتر متاثر می‌شود. دومین نظریه به سمرتون^۱ و همکاران (۱۹۷۵) منسوب است، که معتقد بودند نفوذپذیری در زغال سنگ را نمی‌توان تنها با اندازه مولکول توجیه نمود. بر اساس نظریه ترمیم، نیتروژن باید بیشترین مقدار قابلیت نفوذ، و به همین ترتیب پس از آن، متان، دی‌اکسید کربن و سپس مخلوط متان و دی‌اکسید کربن کمترین مقدار را از خود بروز دهند. اگرچه برخی از محققین 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. ژاو و توماس^۲ پیشنهاد کردند که با توجه به باریک بودن مجاری عبور مولکول گاز، این مجاری همانند لوله‌های موئین^۳ در نظر گرفته شوند.

در شکل ۲-۴، این فرضیه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جذب سطحی مولکول‌ها، به ویژه دی‌اکسید کربن در دیواره‌های خلل و فرج مانند یک لایه، شعاع موثر مجاری عبور را کاهش داده و از عبور گاز از طریق مجاری، جلوگیری می‌کنند و در واقع نفوذپذیری را کاهش می‌دهند. نتایج برخی از تحقیقات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهند که نفوذپذیری زغال سنگ برای عبور گاز متان به صورت تقریبی از لحاظ مقدار بزرگتر از دی‌اکسید کربن است. دلیل این مساله اندازه‌ی قطر مولکولی این گازها است که به ترتیب ۳۸ و ۴۱ آنگستروم است (Xua and Thomas, ۱۹۹۵).



شکل ۲-۴: مسیر عبور مولکول گاز از طریق خلل و فرج میکروسکوپی با گازهای جاذب سطحی

(Sereshki, ۲۰۰۵)

^۱ Somerton

^۲ Xua and Thomas

^۳ Capillary Tubes

البته زغال سنگ در حضور گازهایی مانند CH_4 و CO_2 به دلیل جذب سطحی گاز، متورم می‌شود (Harpalani and Zhao, ۱۹۹۱). این تورم به دلیل بسته شدن مجاری و کاهش در ضریب انتقال^۱ مجاری است (Sereshki, ۲۰۰۵).

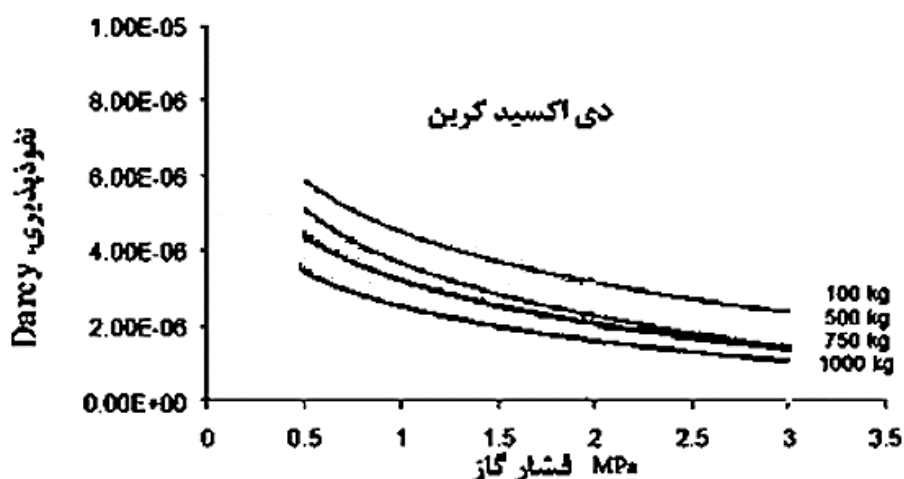
۲-۵-۲- فشار گاز

یکی از مهم‌ترین عوامل قابل کنترل برای جلوگیری از نشت گاز درون کارگاه استخراج در مدت زمان فرآیند UCG، کنترل فشار کارگاه استخراج است. اگر فشار کارگاه استخراج 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 کارگاه می‌شود (Dennis, ۲۰۰۶). فشار کارگاه استخراج یک عامل قابل کنترل است که با تنظیم سرعت تزریق اکسیدان متناسب با نرخ استخراج و توسط شیر تنظیم در ابتدای چاه تولید کنترل می‌شود (Moorhouse et al., ۲۰۱۰).

نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط سرشکی برای بررسی رابطه فشار گاز با نفوذپذیری محیط نسبت به گازهای مختلف تحت بار محوری وارد بر نمونه، در شکل ۲-۵ آمده است (Sereshki, ۲۰۰۵). نتایج این آزمون‌ها برای نمونه زغال سنگ معدن دارت بوک^۲ با تغییر در بار محوری و فشار گاز برای نمونه‌های مختلف گاز تولیدی نشان می‌دهد که نفوذپذیری گاز صرفه نظر از نوع گاز با افزایش بار به صورت نمایی کاهش می‌یابد. به علاوه نه تنها نفوذپذیری زغال سنگ به میزان تنش وابستگی زیادی دارد، بلکه به فشار متوسط گاز نیز وابسته است. بنابراین با افزایش متوسط فشار گاز به بیش از ۳ مگا پاسکال، نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

^۱ Transmissivity

^۲ Dartbook



شکل ۲-۵: نفوذپذیری زغال سنگ دارت بوک تحت بار محوری در فشارهای مختلف گاز دی اکسید کربن

(Sereshki, ۲۰۰۵)

به عنوان دیگر نمونه‌ها، در کارگاه چینچیلا در عمق ۱۴۰ متری فشار گاز در کارگاه استخراج یک مگاپاسکال، در ال ترمدال^۱ در عمق ۵۶۰ متری فشار گاز در کارگاه استخراج ۵/۲ مگاپاسکال و در زولین^۲ در عمق ۸۶۰ متری فشار گاز در کارگاه استخراج بیش از ۱۰ مگاپاسکال بوده است (DTI, ۲۰۰۴). مطالعات اقتصادی و زیست محیطی نشان می‌دهند که فشار کارگاه استخراج UCG بهتر است بین ۱ تا ۵ مگاپاسکال باشد (Perkins and Sahajwalla, ۲۰۰۶).

۲-۵-۳- دمای گاز و محیط نشت

دما نقش مهمی در انتقال گاز از یک محیط متخلخل ایفا می‌کند. درجه حرارت کارگاه استخراج گاز کردن معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ سانتی‌گراد است (Perkins, ۲۰۰۵). بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد، در تمامی موارد، نفوذپذیری کل توده سنگ، در دماهای مختلف و فشار ثابت تقریباً برابر است و شیب منحنی تنها به علت تاثیر ترکیب فشار منفذی و فشار محصور کننده است. البته با توجه به اینکه فشار محصور کننده ثابت در نظر گرفته شده است، فشار منفذی از فشار نزدیک به فشار اتمسفر

^۱ El Tremedal

^۲ Thulin

تا چند ده اتمسفر تغییر می‌نماید. اگرچه نقش دما در انتقال گاز در محیط متخلخل پررنگ است اما عمده مسیر عبور گاز ناپیوستگی‌های توده سنگ است. در اینجا تنها به این نتیجه اکتفا شده است که دما، برخلاف محیط متخلخل، تاثیر به‌سزایی بر نفوذپذیری گاز در محیط‌های پر درزه ندارد (لطفی آزاد، ۱۳۹۱).

۲-۵-۴- تخلخل و نفوذپذیری زغال سنگ و لایه‌های اطراف کارگاه

تخلخل لایه‌ها و اندازه خلل و فرج می‌تواند تغییرات زیادی از ۰/۱ درصد تا ۵۰ درصد نمونه سنگ را به همراه داشته باشد. البته معمولاً تخلخل زغال سنگ خیلی کمتر از لایه‌های در برگیرنده است اما تاثیر مشابهی بر میزان نشت گاز دارند. برای بررسی تاثیر تخلخل بر عبور گاز، مطالعاتی بر روی نمونه‌هایی از زغال سنگ معدن باربارا^۱ در لهستان انجام شده است (Solcova et al., ۲۰۰۹). 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 روزنه‌های بزرگ در مدت زمان گاز کردن کاهش یافته و به طور هم‌زمان تعداد زیادی ریز ترک به وجود می‌آیند. همچنین با افزایش قطر متوسط روزنه‌ها، نرخ حرکت گاز افزایش می‌یابد، اما تاثیرگذاری آن از افزایش فشار کمتر است (Solcova et al., ۲۰۰۹).

نفوذپذیری سنگ‌ها به شدت وابسته به ارتباط بین فضاهای خالی سنگ، اندازه ذرات سنگ و سیمانی شدن بین ذرات سنگ است. یک سنگ به شدت می‌تواند متخلخل باشد، ولی اگر هر منفذی جدا از دیگری باشد، سنگ نفوذ ناپذیر محسوب می‌شود (Peng and Zhang, ۲۰۰۷).

مهم‌ترین شکستگی‌های طبیعی یا مصنوعی پیرامون راکتور UCG که باعث افزایش نفوذپذیری و نشت گاز از راکتور می‌شود؛ شامل لایه‌های ترک‌دار و نفوذپذیر ماسه‌سنگ، درزه‌ها و ریزترک‌های موجود در زغال سنگ، گسل‌ها، دایک‌ها و سیل‌های آذرین، سازندهای کارستی، سنگ‌های تخریب شده و گمانه‌های رها شده است (DTI, ۲۰۰۴).

^۱ Barbara

۲-۵-۵- ضخامت روباره

تاکنون روش UCG در اعماق ۳۰ تا ۱۴۰۰ متر اجرا شده است. بنابراین کارگاه‌های استخراج UCG در طیف وسیعی از اعماق بوده است. در کارگاه‌های استخراجی که به سطح زمین نزدیک‌تر هستند به علت پوشیده شدن با لایه‌های با نفوذپذیری زیاد، رسیدن نشست سقف کارگاه استخراج به سطح زمین، ایجاد مسیرهای نشست گاز و کم بودن فشار ایستابی^۱، امکان نشست گاز بیشتر است.

در کارگاه‌های استخراج کم عمق که فشار ایستابی کم است، اندکی افزایش در فشار کارگاه استخراج ممکن است باعث نشست گاز شود، ولی در کارگاه‌های استخراج با عمق زیاد، فشار ایستابی بیشتر بوده و ایجاد یک شرایط متعادل راحت‌تر است (Couch, ۲۰۰۹).

۲-۵-۶- آب محتوی

تغییر میزان آب محتوی، مقدار متان و هیدروژن تولید شده را تغییر می‌دهد. آب محتوی و نیز آبی که از لایه‌های اطراف لایه زغالی وارد فضای کارگاه می‌شود، به بیرون پمپ نمی‌شوند. 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 دی اکسید کربن می‌شود. افزایش میزان آب محتوی تا حدودی می‌تواند میزان نشست گاز را افزایش دهد. البته این افزایش ناچیز خواهد بود اما می‌توان حدس زد که میزان آب محتوی بر نشست گاز از کارگاه بی‌تاثیر نخواهد بود (Zamzow, ۲۰۱۰).

۲-۵-۷- وضعیت آب‌های زیرزمینی نزدیک کارگاه

کارگاه‌های استخراج UCG معمولاً در زیر سطح ایستابی قرار داشته و در معرض آب‌های زیرزمینی هستند. اگر لایه‌ی زغال‌سنگ دارای نفوذپذیری زیاد و سنگ‌های در برگیرنده کارگاه استخراج نفوذپذیر باشند، آب موجود در لایه‌های مجاور به درون کارگاه استخراج تراوش می‌کند. تراوش آب به درون کارگاه استخراج باعث کاهش عملکرد کارگاه استخراج و کاهش کیفیت گاز تولید شده می‌شود.

^۱ Hydrostatic

بدیهی است اگر فشار کارگاه استخراج کمتر از فشار آب‌های زیرزمینی باشد، آب‌های زیرزمینی به درون کارگاه استخراج نفوذ می‌کنند. در این صورت برای جلوگیری از نفوذ آب به درون کارگاه استخراج باید فشار کارگاه استخراج بزرگتر یا مساوی فشار ایستابی باشد. گاز با فشار، آب‌های زیرزمینی را از درزه و ترک‌های موجود در سنگ به عقب رانده و با سرعت به بیرون از ناحیه‌ی آبدار نشت می‌کند (DTI, ۲۰۰۴).

فشار ایستابی با افزایش عمق در حدود ۰/۰۱ مگاپاسکال بر متر برای آب تازه و برای سفره‌های شور اشباع شده ۰/۰۱۲ مگاپاسکال بر متر افزایش می‌یابد. یعنی در عمق ۱۰۰ و ۱۰۰۰ متر، فشار ایستابی به ترتیب تقریباً ۱ و ۱۰ مگاپاسکال است.

۲-۵-۸- درزه‌داری اولیه و ثانویه

توده‌ی سنگ دارای شکستگی‌ها و درزه‌های طبیعی‌ای است. این شکستگی‌ها و درزه‌ها به صورت یک سیستم انتقال بزرگ، برای جریان آب و گاز در لایه زغالی و لایه‌های اطراف عمل می‌کنند. نفوذپذیری توده سنگ با چگالی شکستگی‌ها، بازشدگی و عرض شکستگی‌ها افزایش می‌یابد. ظرفیت جریان محیط درزه دار کاملاً به تعداد و عرض درزه‌ها و تداوم^۱ آنها بستگی دارد (Dabbous et al., ۱۹۷۴). لینگارد^۲ نشان دادند که ابعاد درزه‌ها بر روی نفوذپذیری زغال‌سنگ و به دنبال آن توده سنگ اثر زیادی می‌گذارد. درزه‌های بزرگتر، موجب نفوذپذیری بیشتر توده سنگ می‌شوند (Sereshki, ۲۰۰۵). جریان از طریق ریز درزه‌ها معمولاً آرام است و از معادلات ۲-۲ و ۳-۲ برای اندازه‌گیری نرخ جریان آرام در کانال‌های باریک استفاده می‌شود.

$$Q = \frac{10^8 W^3 \Delta P}{12 \mu \Delta L} \quad (۲-۲)$$

که در آن:

Q : جریان سیال (cm/sec)

^۱ Continuity

^۲ Lingard

W : عرض شکستگی (cm)

$\Delta P/L$: اختلاف فشار در طول کانال (atm/cm)

μ : گرانروی دینامیکی سیال (centipoise)

همان گونه که قبلا ذکر شد، قانون دارسی جریان سیال را به صورت رابطه‌ی (۳-۲) بیان می‌نماید:

$$Q = \frac{k_f A \Delta P}{\mu L} \quad (3-2)$$

با ترکیب معادله‌های فوق، رابطه (۴-۲)، به دست می‌آید.

$$k_f = \frac{10^8 W^3}{12A} \quad (4-2)$$

که در آن:

K_f : نفوذپذیری درزه (Darcy)

W : عرض شکستگی (cm)

A : مقطع عرضی مساحت جریان شکستگی (cm^2)

اطلاعات مرتبط با اندازه‌ی شکستگی‌ها و ریز درزه‌ها و فاصله‌داری آنها در توده سنگ، در پیش‌بینی نفوذپذیری می‌تواند به کار رود. ریز درزه‌های ثانویه نیز در زغال‌سنگ و توده سنگ اطراف کارگاه به عنوان نتیجه‌ی تنش اعمالی و تغییر در ساختار زمین شناسی زغال‌سنگ یا معدن کاری رخ می‌دهد. این درزه‌ها به صورت معمول باعث افزایش نفوذپذیری می‌شوند. با توجه به تحقیقات هایس^۱ نفوذپذیری در درزه‌ها و نواحی شکسته جلوی جبهه کار در دوره معدن کاری، بزرگتر از نفوذپذیری در نواحی زغالی و خاکی دست نخورده است (Hayes, ۱۹۸۲).

۲-۶- جمع بندی

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه نشت گاز از فضاهای متخلخل و توده سنگ‌های درزه دار توسط محققین مختلف انجام شده است. اما در زمینه نشت گاز از کارگاه استخراج UCG بررسی‌های محدودی

^۱ Hayes

صورت گرفته است. طبق بررسی‌های انجام شده چند عامل بر میزان نشت گاز از کارگاه استخراج UCG موثر هستند که این عوامل عبارت از ترکیب گازها، فشار گاز در کارگاه استخراج، دما، تخلخل، ضخامت روباره، آب محتوی، آب زیرزمینی و درزه داری اولیه و ثانویه هستند.

فصل سوم

بررسی 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 ذخیره سازی زیرزمینی CO₂ بازی می‌کند (Castelletto et al., ۲۰۱۳; Zhang and Yin, ۲۰۱۴). همچنین این شبیه‌سازی‌ها می‌تواند نقش قابل توجهی در بررسی نشت گاز از کارگاه زیرزمینی گاز کردن زغال (UCG) داشته باشد. جریان سیال در توده‌سنگ‌های ناپیوسته غالباً 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 (Zhang and Yin, ۲۰۱۴). همچنین در حال حاضر، توسعه و پیشرفت مدل‌های جریان DFN سه بعدی به دلیل پیچیدگی ترکیب‌بندی‌ها و ویژگی‌های نشت درزه‌های سه بعدی در سنگ‌های درزه‌دار واقعی، به کندی پیش می‌رود (Zhang and Yin, ۲۰۱۴).

در دهه‌ی اخیر تلاش‌های بسیاری برای درک رفتار جریان سیال در توده‌سنگ‌ها انجام شده است (Zhao et al., ۲۰۰۷; Baghbanan and Jing, ۲۰۱۱). در موارد متعدد بیان شده که در صورتی که نفوذپذیری خمیره در مقابل درزه‌ها پایین باشد، بازشدگی درزه اساساً رفتارهای جریان و انتقال کلی را کنترل می‌کند (Berkowitz, ۲۰۰۲; Trivedi and Babadagli, ۲۰۰۸). اگرچه، تخمین دقیق نفوذپذیری در توده‌سنگ‌ها، به دلیل پیچیدگی‌های توزیع درزه‌ها در ماکروساختارها (یعنی هندسه شبکه درزه) و میکروساختارها (یعنی هندسه فضاهای خالی در داخل درزه‌های منفرد)، هنوز موضوعی چالش برانگیز است (Yu and Cheng, ۲۰۰۲; Liu et al. ۲۰۱۵).

امروزه با تلفیق مدل شبکه درزه تصادفی و روش‌های تحلیلی و یا عددی و در نهایت ساخت مدل ترکیبی، تعریف کامل‌تری از هیدرولیک توده‌سنگ حاصل شده است.

در این فصل پیشینه مطالعات انجام شد. در خصوص ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها از لحاظ تحلیل آماری و برازش توزیع‌های مناسب بر آنها، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. از آنجا که در این تحقیق

هدف برآورد قابلیت انتقال سیال در توده‌سنگ در ارتباط با ناپیوستگی‌های ناپایا است، ویژگی بازشدگی هندسی درزه، با تفصیل بیشتری بررسی می‌شود.

سپس، مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها که شیوه مدل‌سازی هندسی موردنظر در این تحقیق است از لحاظ پیشینه موضوع مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

متعاقباً، جریان و انتقال سیال در شبکه درزه‌های مجزا و به طور خاص روش شبکه لوله برای مدل‌سازی جریان بررسی می‌شود. در ادامه به برخی مدل‌سازی‌های عددی جریان (سیال و گاز) در شبکه DFN که تاکنون انجام شده، پرداخته می‌شود و در هر مورد به طور مفصل جنبه‌های مختلف مدل‌سازی و نتایج کار آنها تشریح می‌شود. سرانجام در انتهای فصل به پیشینه بررسی نشت گاز از کارگاه استخراج زیرزمینی UCG پرداخته می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها

در شبیه‌سازی هندسی توده‌سنگ، سعی بر این است که ساختارهای اصلی زمین‌شناسی توده‌سنگ، شناخته شده و ویژگی‌های هندسی آن اندازه‌گیری و با توجه به این ویژگی‌ها، موقعیت آنها به بهترین وجه و با بیشترین تطابق با واقعیت، مکان‌یابی شوند. به این ترتیب با شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و تطابق آنها با توده‌سنگ واقعی، می‌توان یک توده‌سنگ را مدل‌سازی نمود و نهایتاً امکان ساخت مدل‌های عددی و تحلیل‌های هیدرولیکی را فراهم نمود. آنچه در شبیه‌سازی هندسی اهمیت فوق‌العاده می‌یابد نزدیک کردن مدل به واقعیت و اجتناب از فرضیات اضافی و تخمین‌های دور از واقعیت است.

توصیف قطعی ناپیوستگی‌های منفرد در توده‌سنگ فقط برای ناپیوستگی‌های بزرگ مانند گسل و چین امکان‌پذیر است و برای توصیف درزه‌ها باید از مدل‌های شبکه درزه تصادفی استفاده شود. مدل‌های تصادفی ابزار قوی‌ای را برای آرایه شبکه درزه بر اساس اطلاعات آماری حاصل شده از پیمایش‌های خطی و سطحی فراهم می‌کند.

در چند سال گذشته با دستیابی به توانایی گسترده‌تر قدرت محاسباتی، روش‌های مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌های مجزا (DFN) برتری بیشتری یافته‌اند. روش DFN در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی

از میان سیستم درزه طبیعی، به طور وسیعی توسط پروژه‌های مختلف استفاده می‌شود. همچنین این روش کاربردهایی را در صنعت نفت و گاز برای مدل‌سازی مخازن هیدروکربوری و انرژی هسته‌ای برای طراحی سایت‌های دفع باطله رادیواکتیو یافته است (Rogers et al., ۲۰۰۷). مزیت اصلی مدل‌های DFN در توانایی ارزیابی ناهمگنی و عدم قطعیت سیستم‌های درزه با تعریف تصادفی و واضح از درزه‌ها است (Moffitt and Rogers, ۲۰۰۷). جنبه جالب دیگر روش مدل‌سازی DFN توانایی تشکیل بلوک‌ها توسط تعداد بسیار زیادی درزه است. شکل بسیاری از بلوک‌های تشکیل شده در مدل، کاملاً ناشناخته (بی‌شکل) است. این موضوع اجازه می‌دهد که تعریف واقعی تری از هندسه بلوک‌ها نسبت به روش‌های دیگر بدست آید.

در حال حاضر اکثر مدل‌ها به طور کافی برای کاربردهای مهندسی گوناگون بازبینی نشده‌اند. در عمل، انتخاب مدل به اطلاعات میدانی موجود و نیازهای مهندسی پروژه بستگی دارد. تاکنون ابزارهای مختلفی برای تولید شبکه درزه با پیچیدگی و سهولت کاربرد مختلف توسعه داده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به Stereoblock بر اساس مدل بیچر (Hadjigeorgiou et al., ۱۹۹۵) و یا Fracture-SG بر اساس مدل ونزیانو (Grenon and Hadjigeorgiou, ۲۰۰۸)، اشاره نمود.

مدل‌های تصادفی شبکه درزه توسعه داده شده توسط بیچر و همکارانش در سال ۱۹۷۷ و ونزیانو در سال ۱۹۷۸ در دانشگاه MIT از اولین مدل‌های ارزیابی شده در این زمینه هستند (Baecher et al., ۱۹۷۸; Veneziano, ۱۹۷۷). مطالعات هادسون و لاپونته^۱ در سال ۱۹۸۰ و رابینسون^۲ در سال ۱۹۸۳ در زمینه تراوش و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد این مدل‌ها دانست (Hudson and La Pointe, ۱۹۸۰; Robinson, ۱۹۸۳). در سال ۱۹۸۳ انیشتین و همکاران^۳ با استفاده از اطلاعات آماری مربوط به طول و فاصله‌داری درزه، مدلی برای برآورد احتمال شکست ارزیابی نمودند (Einstein et al.,

^۱ Hudson and La pointe

^۲ Robinson

^۳ Einstein

۱۹۸۳). در شوایتز^۱ و انیشتین در سال ۱۹۸۸ مدل تصادفی ای ارایه نمودند که با در نظر گرفتن تغییرات در جهت‌داری، فاصله‌داری و پایایی ناپیوستگی، شبکه درزه واقعی‌تری^۲ را ایجاد کرد (Dershowitz and Einstein, ۱۹۸۸). پریست و سمانیگو^۳ در سال ۱۹۸۸ اقدام به توسعه مفهوم مذکور در زمینه تحلیل پایداری بلوک نمودند (Priest and Samaniego, ۱۹۸۸).

به منظور گروه‌بندی درزه‌های تولید شده در داخل دسته درزه‌هایی که از لحاظ ترتیب زایش با یکدیگر مرتبط هستند، مدل سلسله مراتبی^۴ دوبعدی توسط لی^۵ و همکارانش در سال ۱۹۹۰ توسعه داده شد (Lee et al., ۱۹۹۰). مدل ارایه شده توسط رییس^۶ و انیشتین در سال ۱۹۹۱ در ارتباط با فرآیندهای پایه‌ای ایجاد درزه (Reyes and Einstein, ۱۹۹۱) و مدل ارایه شده توسط مارتل^۷ و همکاران در سال ۱۹۹۱ که در آن اجزای فراکتالی شکل با استفاده از سیستم‌های توابع تکراری^۸ ایجاد می‌شوند (Martel et al., ۱۹۹۱) را می‌توان از دیگر نمونه‌های مدل‌های تصادفی دوبعدی سلسله مراتبی دانست. معایب این مدل‌ها، به ویژه محدودیت مدل‌سازی فقط دو دسته درزه و مشکل در ارایه تغییرات گسترده توزیع دسته درزه‌ها، منجر به توسعه مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته توسط یو^۹ در سال ۱۹۹۲ شد (Yu, ۱۹۹۲). پریست در سال ۱۹۹۳ مدل تصادفی سه بعدی ای را ارایه نمود که در آن درزه‌ها به صورت دیسک‌های دایره‌ای فرض شده‌اند. در این مدل مقادیر تصادفی برای قطر درزه نیز توسط الگوریتم‌های ارایه شده توسط پریست، از توزیع‌های مناسب تولید می‌شوند (Priest, ۱۹۹۳). پس از آن، ایوانووا^{۱۰} و همکارانش در سال ۱۹۹۵ مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته ارایه شده توسط یو را به سه بعد توسعه دادند (Ivanova et al., ۱۹۹۵). در شوایتز و همکاران در سال ۱۹۹۸ نرم‌افزار تجاری FracMan را ارایه

^۱ Dershowitz

^۲ More realistic

^۳ Priest and Samaniego

^۴ Hierarchical Model

^۵ Lee

^۶ Reyes

^۷ Martel

^۸ Iterated Function Systems

^۹ Yu

^{۱۰} Ivanova

نمودند که تا به امروز در حال توسعه است و از پیشرفته‌ترین مولدهای DFN به شمار می‌آید که گستره‌ای از مدل‌های شبکه درزه مختلف را برای کاربردهای مهندسی در محیط‌های زمین‌شناسی گوناگون جمع‌آوری کرده است (Dershowitz et al., ۱۹۹۸).

مییر^۱ و انشتین در سال ۲۰۰۲ مدل تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌ای را ارائه نمودند که در واقع توسعه داده‌شده‌ی مدل ایوانووا است. مدل ارائه شده به منظور تحلیل شبکه درزه و ویژگی اتصال هندسی درزه‌ها در شبکه درزه (به ویژه اتصال درزه‌ها با مرزها از جهت برآورد میزان جریان آب زیرزمینی گذرنده از میان توده‌سنگ) مورد استفاده قرار گرفته است (Meyer and Einstein, ۲۰۰۲).

ایتو و سوول^۲ در سال ۲۰۰۳ تولیدکننده شبکه درزه مجزای سه بعدی FracMesh را برای بررسی جریان و انتقال سیال توسعه دادند (Ito and Seol, ۲۰۰۳). کولاتیلاک^۳ و همکاران در سال ۲۰۰۴ اقدام به تهیه‌ی مدل شبکه درزه تصادفی سه بعدی برای توده‌سنگی از جنس دیوریت و ارائه فرآیند جدیدی برای تخمین مقاومت و تغییرشکل‌پذیری بلوک سنگی در سه بعد نمودند (Kulatilake et al., ۲۰۰۴). در بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ کاربردهای گسترده‌تری از مدل‌های DFN ارائه شده است. راجرز^۴ و همکاران در سال ۲۰۰۷ اقدام به بررسی خردایش برجای سه بعدی توده‌سنگ با استفاده از تعریف شبکه درزه از طریق ساخت مدل‌هایی در FracMan نمودند (Rogers et al., ۲۰۰۷). فلاین و پین^۵ در سال ۲۰۰۷ بر روی تعیین اندازه مساحت صفحه برداشت مورد نیاز برای تعیین ویژگی‌های هندسی دقیق توده‌سنگ درزه‌دار (P_{21} به عنوان مقیاس دقت) با در نظر گرفتن تغییرپذیری و پیچیدگی طبیعی درزه‌ها، تمرکز نمودند. آنها نرم‌افزار شبکه درزه‌های مجزا FracMan را برای تولید مدل‌های تصادفی سه بعدی از توده‌سنگ با استفاده از اطلاعات هندسی برداشت شده به کار بردند. مفیت^۶ و راجرز در سال ۲۰۰۷ مدل DFN را برای بهینه‌سازی حفاری و طراحی نگهداری تونل بکار بردند (Moffitt and Rogers,)

^۱ Meyer

^۲ Ito and Seol

^۳ Kulatilake

^۴ Rogers

^۵ Flynn & Pine

^۶ Moffitt

۲۰۰۷). گرن و هاجیجورجیو^۱ در سال ۲۰۰۸ کاربرد مدل‌سازی شبکه درزه (DFN) به همراه تحلیل تعادل حدی را برای تحلیل پایداری شیروانی دیواره جاده مشرف به پل کوپک^۲ بکار بردند. آنها از تولیدکننده سیستم درزه بر اساس مدل ونزیانو استفاده کردند (Grenon and Hadjigeorgiou, ۲۰۰۸). در چند سال اخیر نیز توسعه مدل تصادفی به منظور بررسی اثرات وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه بر رفتار هیدرومکانیکی و مکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار، بر اساس مدل‌های پیشین، انجام گرفته است. مدل دوبعدی ارایه شده توسط باغبانان و جینگ^۳ در سال ۲۰۰۷ (Baghbanan and Jing, ۲۰۰۸) و همچنین مدل سه‌بعدی بنگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ (Bang et al., ۲۰۱۲) را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از این نوع برشمرد.

زو و دود^۵ در سال ۲۰۱۰ نرم‌افزاری سه بعدی به نام FracSim^{۳D} را ارایه نمودند که می‌تواند برای تولید شبکه درزه‌های دو بعدی و سه بعدی بکار رود. موقعیت‌های درزه می‌تواند توسط فرآیند نقطه‌ای پواسونی، غیرهمگن یا خوشه‌ای مدل شود. ویژگی‌ها و هندسه‌ی درزه توسط توابع توزیع احتمالاتی مربوطه مدل می‌شوند. ابزارهای نمونه‌برداری مانند نمونه‌برداری صفحه‌ای، پنجره‌ای و خط برداشت در این نرم‌افزار تعبیه شده است (Xu and Dowd, ۲۰۱۰).

جوادی و شریف‌زاده در سال ۲۰۱۲، مدل جریان سیال در محیط‌های سنگی درزه‌دار را با استفاده از روش شبکه درزه‌های مجزای دوبعدی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور یک برنامه کامپیوتری محاسباتی تحت عنوان FNETF برای ساخت شبکه درزه‌های مجزا و تحلیل عددی جریان آرام در شبکه شکستگی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB توسعه داده شد. فرآیند ساخت و تحلیل جریان در این برنامه محاسباتی در دو مرحله مختلف ساخت و تحلیل شبکه درزه‌های مجزا و حل معادلات جریان سیال در شبکه (با استفاده از روش المان محدود) انجام می‌شود. در نهایت این برنامه محاسباتی با

^۱ Grenon and Hadjigeorgiou

^۲ Quebec Bridge

^۳ Baghbanan and Jing

^۴ Bang

^۵ Xu and Dowd

استفاده از داده‌های میدانی مربوط به وضعیت شکستگی‌ها و آب زیرزمینی در اطراف مغار نیروگاه سیاه بیشه مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار جریان آب ورودی به مغار نیروگاه مطالعه شد (جوادی و شریف‌زاده، ۱۳۹۱).

به عنوان یکی از مهمترین و جدیدترین فعالیت‌های صورت گرفته (به ویژه در داخل کشور) در تهیه، ساخت و توسعه مدل DFN می‌توان به تهیه برنامه کامپیوتری $DFN-FRAC^{3D}$ توسط نوروزی و همکاران در سال ۱۳۹۳ اشاره نمود (نوروزی، ۱۳۹۳).

در جدول ۱-۳، به خلاصه‌ای از مهمترین مواردی که به موضوع مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها در حالت دو بعدی و سه بعدی پرداخته‌اند، اشاره شده است.

جدول ۳-۱: روند تکامل مدل‌های تصادفی شبکه درزه

ردیف	پژوهشگر	توضیحات
۱	Baecher et al., ۱۹۷۷	جزء اولین مدل‌های ارائه شده در زمینه مدل‌سازی تصادفی
۲	Veneziano, ۱۹۷۸	
۳	Hudson and La Pointe, ۱۹۸۰	آغاز کاربرد مدل‌های تصادفی در زمینه تراوش و جریان سیال
۴	Robinson, ۱۹۸۳	
۵	Einstein et al., ۱۹۸۳	مدل برآورد احتمال شکست با کاربرد داده‌های آماری طول و فاصله‌داری
۶	Dershowitz and Einstein, ۱۹۸۸	در نظر گرفتن تغییرات در جهت، فاصله‌داری و پایداری ناپیوستگی
۷	Priest and Samaniego, ۱۹۸۸	توسعه مدل در زمینه تحلیل پایداری بلوک
۸	Lee et al., ۱۹۹۰	توسعه مدل سلسله مراتبی دو بعدی
۹	Reyes and Einstein, ۱۹۹۱	مدل سلسله مراتبی دو بعدی در ارتباط با فرآیندهای پایه‌ای ایجاد درزه
۱۰	Martel et al., ۱۹۹۱	مدل سلسله مراتبی دو بعدی برای ایجاد اجزاء فراکتالی شکل
۱۱	Yu, ۱۹۹۲	توسعه مدل دو بعدی سلسله مراتبی پیشرفته و رفع محدودیت‌های مدل‌های قبلی
۱۲	Priest, ۱۹۹۳	ارایه مدل سه بعدی با درزه‌هایی به صورت دیسک‌های دایره‌ای و دارای توزیع‌های مناسب
۱۳	Ivanova et al., ۱۹۹۵	توسعه مدل دو بعدی سلسله مراتبی پیشرفته به سه بعد
۱۴	Dershowitz et al., ۱۹۹۸	ارایه نرم افزار تجاری FracMan
۱۵	Meyer and Einstein, ۲۰۰۲	توسعه مدل ایوانووا برای تحلیل ویژگی اتصال هندسی درزه‌ها در شبکه درزه
۱۶	Ito and Seol, ۲۰۰۳	ارایه شبیه‌ساز FracMesh برای بررسی جریان و انتقال سیال در محیط متخلخل درزه‌دار
۱۷	Kulatilake et al., ۲۰۰۴	تهیه مدل سه بعدی شبکه درزه و کاربرد آن برای تخمین مقاومت توده‌سنگ
۱۸	Rogers et al., ۲۰۰۷	کاربرد FracMan برای تعریف دقیق خردایش برجای پیش از تخریب در معادن تخریب بلوکی
۱۹	Flynn and Pine, ۲۰۰۷	کاربرد FracMan برای تهیه مدل سه بعدی با استفاده از اطلاعات هندسی برداشت شده
۲۰	Moffitt and Rogers, ۲۰۰۷	بهینه‌سازی حفاری و طراحی نگهداری تونل
۲۱	Grenon and Hadjigeorgiou, ۲۰۰۸	کاربرد تولیدکننده بر اساس مدل ونزیانو برای تحلیل پایداری شیروانی
۲۲	Baghbanan and Jing, ۲۰۰۸	ارایه مدل دوبعدی به منظور در نظر گرفتن وابستگی بین توزیع بازشدگی و طول اثر درزه
۲۳	Xu and Dowd, ۲۰۱۰	ارایه نرم‌افزار سه بعدی FracSim
۲۴	Bang et al., ۲۰۱۲	توسعه مدل باغبانان به سه بعد
۲۵	جوادی و شریف‌زاده، ۲۰۱۲	ارایه برنامه محاسباتی FNETF برای تحلیل عددی جریان آرام در شبکه شکستگی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB
۲۶	نوروزی، ۲۰۱۴	تهیه و توسعه برنامه کامپیوتری DFN-FRAC ^{TD}

۳-۳- جریان سیال در شبکه درزه‌های مجزا (DFN)

مطالعه رفتار جریان سیال در محیط‌های سنگی ناپیوسته در بسیاری از فعالیت‌های عمرانی، معدنی و زیست‌محیطی مثل دفن زباله‌های خطرناک و باطله فعالیت‌های هسته‌ای، نفت و انرژی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. با به کارگیری روش مناسب مطالعه و مدل‌سازی جریان سیال می‌توان کارایی مطالعات طراحی، اجرا و ایمنی را در چنین فعالیت‌هایی افزایش داد.

در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری خمیره‌ی سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ بسیار ناچیز است و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند (Zimmerman & Bodvarsson, ۱۹۹۶; Rapantova et al., ۲۰۰۷; Bodin et al., ۲۰۰۷). در حقیقت محیط جریان و انتقال سیال در بسیاری از بخش‌های پوسته زمین ناپیوسته بوده و در نتیجه رفتار سیال در چنین محیط‌هایی نیز ناپیوسته خواهد بود. در این حالت رفتار جریان سیال در توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود و برآورد آن نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیکی شبکه شکستگی است. همانطور که الگوی شبکه درزه در توده‌سنگ و رفتار جریان سیال از میان شبکه درزه‌ها خیلی پیچیده است، پیش‌بینی الگوی جریان سیال در سنگ درزه‌دار چالشی بزرگ برای مهندسیین است (Panda & Kulatilake, ۱۹۹۵).

سه نوع روش اصلی برای مدل‌سازی جریان سیال در سنگ‌های درزه دار به کار می‌رود. اینها شامل مدل‌های جریان محیط متخلخل معادل (EPM^۱) پیوسته، شبکه درزه مجزا (DFN) و محیط متخلخل درزه‌دار (FPM^۲) می‌شوند (Zhang and Yin ۲۰۱۴).

در روش پیوسته، مثل روش‌های تخلخل دوگانه^۳ و نفوذپذیری دوگانه^۴، با استفاده از آزمایش‌های برجا و یا به صورت غیرمستقیم با استفاده از روش‌های عددی و یا روش‌های هندسی ساده، خواص معادل

^۱ equivalent porous medium

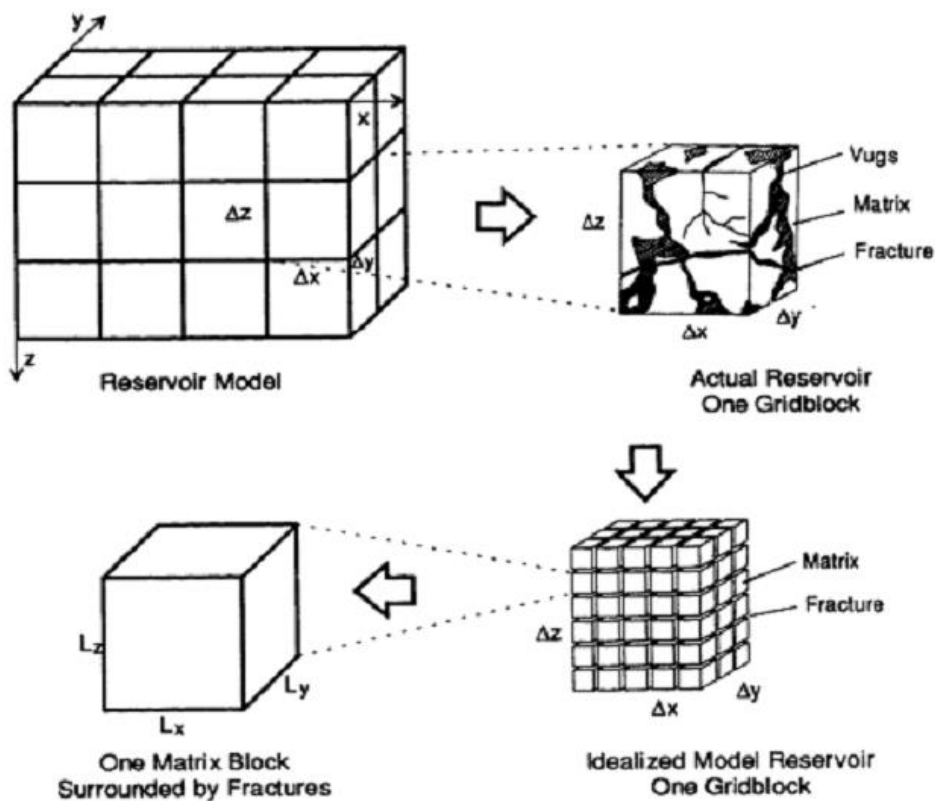
^۲ fractured porous medium

^۳ Dual porosity

^۴ Dual permeability

تخلخل و شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ تعیین و یک مدل معادل از رفتار هیدرولیکی برای مدل -سازي جریان سيال در محيط ارايه مي‌شود. در مدل پيوسته دوگانه، درزه و ماتريس به صورت دو جزء جداگانه پيوسته، حجم كنترلي يكساني را در فضا اشغال مي‌كنند. برهم‌كنش ماتريس-درزه مي‌تواند به صورت جريان و انتقال بين اين محيط‌هاي پيوسته به كار رود. در کاربردهای عملی، این روش‌ها محدودیت‌هایی در رابطه با اعمال صحیح تاثیر هندسه شکستگی‌ها در رفتار جریان دارند. در حقیقت تخلخل موثر هیدرولیکی که پارامتر اساسی مدل‌سازی جریان است، تحت تاثیر تقاطع شکستگی‌های موجود در دامنه است (Zhou et al., ۲۰۰۶) 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 (Xu et al., ۲۰۰۶). همچنین برای کاربرد مدل پيوسته دوگانه، لازم است مقدار REV را در نظر گرفت و حجم بخش مورد مطالعه را بزرگتر از REV انتخاب کرد. به دليل اين كه بیشینه اندازه بلوک سنگی در آزمایش‌های آزمایشگاهی بندرت بزرگ‌تر از یک متر مکعب است، در صورتی که درزه‌ها کم باشند، نمی‌توان REV را کوچکتر از مقیاس بلوک اصلی تعریف نمود. در این مورد، مدل پيوسته دوگانه نمی‌تواند بكار رود (Ito and Seol, ۲۰۰۳). مفهوم تخلخل دوگانه در شکل ۱-۳، نشان داده شده است. مدل مخزن به بلوک‌های شبکه شامل درزه‌ها، خمیره و حفرات، تقسیم می‌شوند. یک بلوک واقعی شبکه مخزن به مدل شبکه بلوکی ایده‌آل که در آن بلوک‌های خمیره مکعبی توسط درزه‌ها محصور شده‌اند، تبدیل می‌شود.

در مقابل، در روش‌های ناپيوسته تلاش بر اين است كه اين پیچیدگی هندسی توزیع فضایی شکستگی‌ها در محیط توده سنگ و تاثیر آنها در رفتار هیدرولیکی توده سنگ به صورت صریح مدل‌سازی شود. در این حالت با ایجاد یک مدل دقیق هندسی از شکستگی‌ها که نشان دهنده 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 ناپيوسته جریان سیال در محیط‌های سنگی درزه‌دار، روش شبکه درزه‌های مجزا (DFN) است.



شکل ۳-۱: مدل تخلخل دوگانه (Wang et al., ۲۰۰۸)

در مدل DFN فرض می‌شود که خمیره‌ی سنگی نفوذناپذیر است و آب زیرزمینی فقط از طریق سیستم درزه می‌تواند جریان یابد. وقتی که خمیره‌ی سنگی دارای نفوذپذیری کم است، این شیوه مناسب‌تر است (Zhang and Yin, ۲۰۱۴). شبکه‌های درزه مجزا می‌توانند از اطلاعات برداشت میدانی توسط روش برداشت خطی^۱، برداشت پنجره‌ای^۲، چال پیمایی^۳، پردازش تصویر^۴ و تحلیل آماری برای ایجاد توابع چگالی احتمال (PDFs^۵) پارامترهای درزه مربوط به چگالی، جهات، فاصله‌داری، موقعیت‌ها و اندازه‌ها تولید شوند. بعد از ساخت هندسه مدل DFN، با اعمال قوانین هیدرولیکی بر روی اجزای مدل و در نظر گرفتن تاثیر متقابل این پارامترها بر روی هم، شبیه‌سازی جریان در توده‌سنگ انجام می‌شود. شیوه DFN به طور موثری ناهمسانگردی توده‌سنگ درزه‌دار را منعکس می‌کند. در مدل دو بعدی، سیال

^۱ scan-line method

^۲ window mapping

^۳ borehole logging

^۴ image processing

^۵ probabilistic density functions

از میان تقاطع‌های یک قطعه درزه یک بعدی (با بازشدگی مشخص) به دیگری جریان می‌یابد. اتصال‌های بین قطعه‌ها به راحتی تحلیل می‌شوند و مدل‌سازی دو بعدی نسبتاً بخوبی توسعه می‌یابد. اگرچه، روند توسعه مدل‌های DFN سه بعدی به دلیل پیچیدگی ترکیب‌بندی‌ها و ویژگی‌های نشت درزه‌های سه بعدی در سنگ‌های درزه‌دار واقعی کند شده است (Zhang and Yin, ۲۰۱۴).

در مدل جریان FPM (که به نام مدل جریان پیوسته درزه مجزا نامیده می‌شود) فرض می‌شود که سیال به طور هم‌زمان در داخل درزه‌ها و از میان خمیره‌ی بلوک سنگی جریان می‌یابد (Blessent et al., ۲۰۱۱; Mourzenko et al., ۲۰۱۱). درزه‌های مجزا برای توصیف حرکت سیال در صفحات ساختاری اصلی مانند گسل‌ها که معمولاً دارای نفوذپذیری هیدرولیکی بالا هستند، به کار می‌روند. محیط متخلخل برای توصیف حرکت سیال در خمیره‌ی سنگی و درزه‌های کوچک بکار می‌رود. این نوع مدل می‌تواند مزایای هر دو مدل پیوسته (ارایه‌کننده جریان خمیره‌ی بلوکی) و مدل DFN (شبیه‌سازی قابلیت هدایت بالای درزه‌ها) را داشته باشد. این نوع مدل برای وقتی که اثرات ذخیره‌سازی یا قابلیت هدایت خمیره‌ی سنگی نمی‌تواند نادیده گرفته شود (مخصوصاً اگر مطالعه شامل انتقال محلول یا انرژی مانند نفت یا کاربردهای ژئوترمال می‌شود) بهترین انتخاب است. بعلاوه، وقتی که کمیت درزه‌ها بیش از اندازه زیاد باشد چنان‌که شبیه‌سازی با استفاده از DFN سنگین باشد، اثرات نفوذپذیری درزه‌های کوچک می‌تواند معادل با خمیره قرار داده شود و فقط درزه‌های بزرگتر نیاز به شبیه‌سازی دقیق داشته باشند. بنابراین، یک مدل FPM ممکن است نیاز به یک ظرفیت محاسباتی پایین داشته باشد و برای حل مسایل شامل توده‌سنگ‌های درزه‌دار بزرگ مقیاس به کار رود. به طور خلاصه، مدل‌های FPM دید گسترده‌تری در کاربردهای عملی دارند.

در محیط‌های سنگی مسایل مربوط به انتقال و جریان سیال در چهار فرآیند فیزیکی زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- انتقال و جریان سیال در داخل یک درزه یا شکستگی تنها
- انتقال و جریان سیال از طریق شبکه شکستگی‌ها

• انتقال و جریان سیال از طریق محیط سنگی متخلخل

• عکس العمل بین محیط متخلخل و شکستگی‌ها

در این مطالعه بر روی جریان و انتقال در شبکه درزه‌ها تمرکز شده است و از برهم‌کنش‌های درزه‌ها و خمیره‌ی سنگی اطراف صرف‌نظر شده است.

پدیده جریان سیال و مباحث انتقال در محیط متخلخل دارای شکستگی را از نظر مقیاس دامنه مورد بررسی می‌توان به چهار دسته شامل میدان خیلی نزدیک^۱، میدان نزدیک^۲، میدان دور^۳ و میدان خیلی دور^۴ تقسیم بندی نمود (Bear et al., ۱۹۹۳). میدان‌های نزدیک و خیلی نزدیک به کلاس‌های مختلفی از مسایل مرتبط با ابعاد دامنه کم مربوط می‌شود. مسایل محلی مرتبط با جریان سیال و انتقال ذرات در نزدیکی منابع آلوده کننده و منابع تغذیه کننده در این دو میدان مطرح می‌شوند. در همسایگی بسیار نزدیک از منابع تغذیه کننده، مساله جریان با استفاده از مدل‌های مربوط به میدان خیلی نزدیک بیان می‌شود. در میدان‌های نسبتاً بزرگتر، از مدل‌های میدان نزدیک استفاده می‌شود که در حقیقت ابعاد دامنه هنوز به اندازه کافی بزرگ نیست تا بتوان از روش‌های پیوسته استفاده نمود. در این حالت جریان سیال و انتقال ذرات در داخل یک دامنه نسبتاً کوچک شامل تعدادی شکستگی کاملاً تعریف شده مطالعه می‌شود. این مسایل نیازمند در نظر گرفتن همه شکستگی‌های موجود در دامنه است که تعریف این شکستگی‌ها یا به صورت قطعی و یا به صورت آماری انجام می‌شود. با افزایش ابعاد دامنه مورد بررسی، تعداد شکستگی‌های موجود در دامنه به شدت افزایش یافته که در نتیجه با مشکلات زیادی در ورود اطلاعات و تجزیه و تحلیل مساله به دلیل محدودیت‌های محاسباتی مواجه می‌شود. این گونه مسایل تحت عنوان میدان دور و خیلی دور نامیده می‌شود. در این گونه مسایل، برای میدان دور، جریان سیال و انتقال به طور هم‌زمان در دو محیط پیوسته پوششی^۵ شامل جریان در داخل شبکه‌ای از

^۱ Very near field

^۲ Near field

^۳ Far field

^۴ Very far field

^۵ Overlapping continua

شکستگی‌ها و جریان در خمیره‌ی سنگی متخلخل اتفاق می‌افتد و لذا روش‌های پیوسته دوگانه قابل به کارگیری هستند. در این مدل‌های مفهومی، محیط متخلخل دارای شکستگی به صورت دو محیط مجزا با اندرکنش متقابل در نظر گرفته می‌شود که هر کدام از این اجزا به صورت پیوسته در نظر گرفته شده و اندرکنش بین آنها به صورت تبادل جرم بین خمیره‌ی سنگی و شکستگی‌ها لحاظ می‌شود. در صورتی که مقدار تخلخل خمیره‌ی سنگی پایین باشد، رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ به طور عمده توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود و در نتیجه برای بررسی رفتار هیدرولیکی باید از روش‌های ناپیوسته استفاده نمود. برای مسایل با ابعاد دامنه بسیار بزرگ، مدل‌های میدان خیلی دور مطرح می‌شوند که در این حالت دامنه مورد بررسی به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود.

در این تحقیق، بر روی مدل جریان DFN سه بعدی تمرکز شده است.

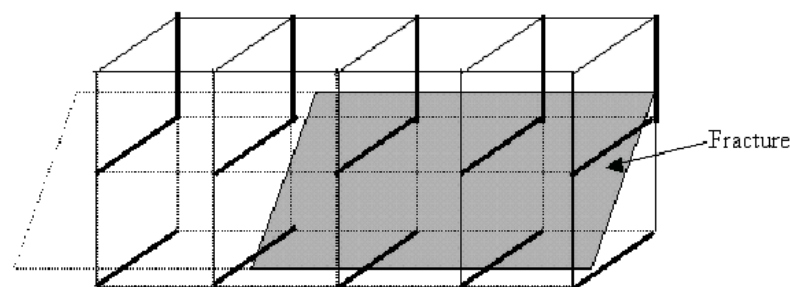
۳-۳-۱- شبیه‌سازی جریان سیال

پس از ایجاد مدل شبکه درزه‌های مجزا، شبیه‌سازی جریان سیال به دو روش می‌تواند انجام شود. در روش اول می‌توان یک شبکه‌بندی عمودی بر مدل اعمال نمود و برای هر بلوک شبکه فرآیند ارتقای^۱ شبکه درزه را انجام داد و در نهایت خروجی‌های (مختصات و ویژگی‌ها) مناسب برای نرم‌افزار شبیه‌ساز جریان مانند ECLIPSE را ایجاد نمود. خروجی‌ها از شبیه‌ساز شامل نرخ‌های جریان و پیش‌بینی فشار هستند. در روش دوم می‌توان شبکه درزه‌های متصل در داخل مدل درزه را شناسایی و با استفاده از روش‌های مانند شبکه لوله، شبکه کانال و یا روش اجزای محدود به مدل‌سازی جریان سیال پرداخت.

^۱ Upscaling

۳-۱-۱-۳-۱- ارتقای ویژگی‌های شبکه درزه

سلول‌های شبیه‌سازی درزه و خمیره برای مدل‌سازی سیستم تخلخل دوگانه در ECLIPSE، با هر بلوک شبکه در ارتباط هستند. در این مدل، فرض می‌شود که جریان سیال در درزه و خمیره اتفاق می‌افتد. در مدل‌های تخلخل دوگانه، درزه‌ها مجراهایی را برای جریان سیال فراهم می‌کنند، درحالی که خمیره انباری برای سیال است. مدل تخلخل دوگانه در ECLIPSE توابع انتقال مرسوم را برای توصیف برهم-کنش بین بلوک خمیره و سیستم درزه به کار می‌برد. این مدل نیازمند دو سلول شبیه‌سازی برای ارایه هر بلوک شبکه است. ECLIPSE یک سلول هر بلوک شبکه را با خمیره و سلول دیگر را با درزه مرتبط می‌کند. در صورتی که حداقل یک صفحه درزه محدود یک سلول پایه را قطع کند، آن سلول یک سلول درزه در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت، آن یک سلول ماتریس در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۲). تمام سلول‌ها نیاز به دارا بودن مقادیر تخلخل و نفوذپذیری هستند.



شکل ۳-۲: گروه بندی سلول‌ها توسط تقاطع یک صفحه محدود

یکی از موارد بحرانی در مدل‌سازی جریان سیال و توصیف محیط متخلخل معادل سیستم‌های درزه دار و گسله شده، انتخاب اندازه سلولی^۱ است که برای گسسته‌سازی^۲ مدل عددی مورد نیاز است. اندازه سلول کوچک ممکن است که امکان تعیین ویژگی دقیق ساختاری و زمین شناسی مخزن/آبخوان را بدهد اما آن نیاز به زمان محاسبه بالا در طول حل معادلات جریان را خواهد داشت. از طرف دیگر، اندازه سلول بزرگ زمان محاسبات را کم می‌کند اما آن شدیداً جزییات ساختاری و لیتولوژیکی که ممکن است

^۱ cell size

^۲ discretization

در مدل مخزن/آبخوان وارد شود را محدود می‌کند و همچنین احتمال توصیف میدان جریان کوچک مقیاس را کاهش می‌دهد.

ارتقای ویژگی‌های شبکه درزه توسط مشخص نمودن نفوذپذیری در جهات x ، y و z با استفاده از روش آدا^۱، تعیین تخلخل درزه و تحلیل عامل سیگما انجام می‌شود.

الف- نفوذپذیری درزه

نفوذپذیری درزه به شدت درزه، به اتصال داخلی درزه‌ها و قابلیت انتقال^۲ درزه‌ها بستگی دارد (Golder Associates Inc., ۲۰۱۲). آدا در سال ۱۹۸۵ شیوه‌ای را برای تخمین نفوذپذیری درزه توسعه داد. در روش آدا، رابطه ۱-۳، جهت درزه‌ها در سلول شبکه، به صورت بردار نرمال واحد n در نظر گرفته می‌شود. با انتگرال‌گیری درزه‌ها بر روی تمام نرمال‌های واحد N ، آدا تانسور N_{ij} ، توصیف کننده گشتاور جرمی اینرسی نرمال‌های درزه توزیع شده بر روی کره واحد، را بدست آورد (Golder Associates Inc., ۲۰۱۲):

$$N_{ij} = \int_{\Omega/2} n_i n_j E(n) d\Omega \quad (1-3)$$

که در آن،

n : تعداد درزه‌ها در Ω

n_i و n_j : اجزای نرمال واحد برای درزه n

$E(n)$: تابع چگالی احتمال، توصیف کننده تعداد درزه‌هایی که دارای بردار نرمال n جهت یافته با زاویه کوچک $d\Omega$ هستند.

Ω : زاویه ورودی مرتبط با سطح کره واحد

تانسور درزه تجربی می‌تواند از مجموع درزه‌های منفرد وزن دار شده توسط مساحت و قابلیت انتقال آنها، به صورت رابطه ۲-۳، برای یک سلول شبکه مشخص محاسبه شود.

^۱ Oda

^۲ transmissivity

$$F_{ij} = \frac{1}{V} \sum_{K=1}^N A_K T_K n_{ik} n_{jk} \quad (2-3)$$

که در آن:

F_{ij} : تانسور درزه

V : حجم سلول شبکه

N : تعداد کلی درزه‌ها در سلول شبکه

A_k : مساحت درزه k

T_k : قابلیت انتقال درزه k

n_{ik} و n_{jk} : اجزای نرمال واحد برای درزه k

سرانجام، تانسور نفوذپذیری آدا با فرض این که F_{ij} جریان درزه را به صورت یک بردار در طول نرمال واحد درزه بیان می‌کند و با فرض این که درزه‌ها در جهت موازی با بردار نرمال‌شان نفوذناپذیر هستند، از F_{ij} مشتق می‌شود، رابطه ۳-۳.

$$k_{ij} = \frac{1}{12} (F_{kk} \delta_{ij} - F_{ij}) \quad (3-3)$$

که در آن:

k_{ij} : تانسور نفوذپذیری

F_{kk} : اثر تانسور درزه F_{ij}

δ_{ij} : دلتای Kroenecker

راه حل آدا دارای این مزیت است که می‌تواند بدون شبیه‌سازی‌های جریان موردنیاز، محاسبه شود.

ب- تخلخل درزه

تخلخل درزه نسبت حجم کلی درزه‌ها بر حجم واحد است. تخلخل درزه تنها بستگی به هندسه درزه دارد و در رابطه ۳-۴، می‌تواند به صورت حاصل ضرب مساحت درزه در بازشدگی درزه‌ها بر حجم سلول محاسبه شود.

$$\varphi_f = \frac{V_{if}}{V_t} = \frac{\sum(A_f e)}{V_t} \quad (4-3)$$

که در آن:

V_{if} : حجم کلی درزه، m^3

V_t : حجم کل، m^3

تخلخل درزه بستگی به شدت درزه، اندازه و بازشدگی آن دارد.

پ- عامل سیگما

بلوک‌های خمیره بخش اصلی حجم خلل و فرج مخزن را تشکیل می‌دهند، اما در عین حال آنها نفوذپذیری بسیار پایینی در مقایسه با درزه‌ها دارند. عامل سیگما یکی از عوامل مهم در مدل تخلخل دوگانه است که جریان بین بلوک خمیره و شبکه درزه را اندازه‌گیری می‌کند. عامل سیگما مطابق رابطه ۳-۵ که توسط کاظمی و همکاران در سال ۱۹۷۶ معرفی شده، فاصله متوسط در سه جهت عمود بر هم را برای توصیف این جریان در مخازن درزه‌دار ترکیب می‌کند (Kazemi et al., ۱۹۷۶).

$$\sigma = 4 \left(\frac{1}{l_x^2} + \frac{1}{l_y^2} + \frac{1}{l_z^2} \right) \quad (5-3)$$

که در آن:

l_x : طول سلول خمیره (m)

l_y : عرض سلول خمیره (m)

l_z : ضخامت سلول خمیره (m)

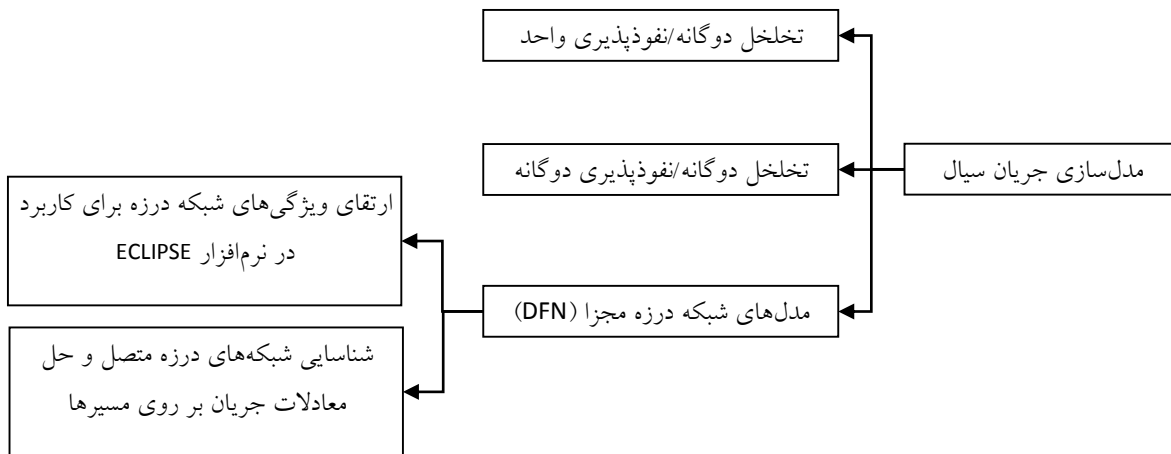
از معادله ۳-۵ دریافت می‌شود که عامل سیگما در صورتی که سلول‌ها خیلی کوچک باشند، می‌تواند خیلی بزرگ باشد. مقدار سیگمای بالا بدین معنی است که سیال دارای جریان خیلی سریعی از خمیره به درزه‌ها است. پس از این که عوامل سیگما محاسبه شدند، می‌توانند به داخل شبیه‌ساز ECLIPSE برای شبیه‌سازی جریان وارد شوند.

۳-۳-۱-۲- شناسایی شبکه‌های درزه متصل و حل معادلات جریان بر روی مسیره‌ها

یکی از مشکلات روش مدل‌سازی درزه‌های مجزا تعداد بسیار زیاد درزه‌های مدل‌سازی شده در میدان است. در هنگام ساخت مدل توده‌سنگ درزه‌دار طبیعی، لازم نیست که مدل استاتیکی با جزئیات زیاد تولید نمود. تلاش برای ارایه تمامی درزه‌های تولید شده به طور دقیق در مدل، اغلب با محدودیت‌های حافظه سیستم روبرو می‌شود. حتی در صورتی که این کار انجام شود، واسنجی^۱ پارامترهای مدل‌سازی درزه برای شبیه‌سازی جریان نیاز به مراحل تکرارشونده دارد که در آن کارایی محاسباتی، عاملی محدودکننده است. برای تهیه مدل شبیه‌ساز جریان، چنانچه مقدار جریان تولید شده توسط مدل بتواند با جریان مشاهده شده سر زمین قابل مقایسه باشد، تنها لازم است که مدل بتواند جریان را شبیه‌سازی کند.

برای شناسایی شبکه‌های درزه متصل، ابتدا مدل درزه استاتیکی با جزئیات زیاد دریافت می‌شود و سپس شبکه درزه‌های (DFNs) مهم برای جریان (شبکه درزه‌های متصل) در داخل مخزن در طول مراحل تولید شناسایی می‌شوند. درزه‌هایی که ایزوله هستند یا به طور جزئی با دیگر درزه‌ها یا مرزهای ورود جریان و خروج جریان متصل هستند، حذف می‌شوند. سپس شبکه‌های DFN باقیمانده را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند شبکه لوله معادل یا روش کانال به مدل شبیه‌سازی جریان تبدیل نمود و به نتایج دقیقی در خصوص نفوذپذیری سیال رسید. روش ارایه شده بسیار سریع است و تنها نیاز به برداشت خطوط جریان و محاسبه زمان عبور سیال دارد. اما مهم‌تر آن‌که، این روش، تنها با در نظر گرفتن شبکه‌ی ناپیوستگی‌های متصل قادر به شبیه‌سازی مهم‌ترین رفتارهای مراحل اولیه تاریخچه تولید، است. نمودار شکل ۳-۳، خلاصه‌ای از روش‌های مختلف مدل‌سازی جریان سیال در مخازن نفتی درزه‌دار را نشان می‌دهد.

^۱ calibration



شکل ۳-۳: روش های مختلف مدل سازی جریان سیال

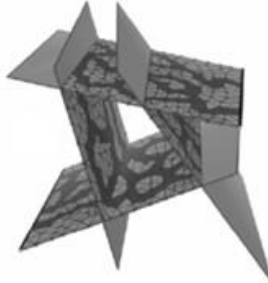
۳-۴- روش شبکه لوله برای مدل سازی جریان

پس از این که شبکه درزه سه بعدی تولید شد، دو شیوه متفاوت برای شبیه سازی عددی جریان صفحه ای بکار می رود. یکی تبدیل DFN به شبکه لوله هایی است که دارای قابلیت هدایت، نرخ های جریان و ویژگی های هیدرولیکی تقریباً معادل با درزه های صفحه ای هستند (Tsang and Tsang, ۱۹۸۷; Cacas). در این شیوه، اجزای لوله ای یک بعدی هستند و «مدل شبکه لوله» نامیده می شود. شیوه دیگر گسسته سازی^۱ دقیق صفحات درزه به اجزای محدود^۲ و کاربرد روش اجزای محدود (FEM) است (Erhel et al., ۲۰۰۹; Blocher et al., ۲۰۱۰; Pichot et al., ۲۰۱۰; Mustapha, ۲۰۱۱). این دو گزینه در شکل ۳-۴، نشان داده شده است. گسسته سازی درزه ها به شبکه های منظم یا نامنظم روشی پیچیده است زیرا محاسبه تغییرات بازشدگی در هر صفحه درزه، مشکل است. متأسفانه، این کار از لحاظ محاسباتی بسیار طاقت فرسا است زیرا معادلات جریان و انتقال باید برای هر عنصر شبکه حل شود. بسیار دور از ذهن است که ت کامپیوتر امروزی قابلیت پردازش در مقیاس میدانی را با استفاده از این روش داشته باشند، زیرا معمولاً در این شیوه تعداد ۱۰^۵ تا ۱۰^۷ درزه مورد نیاز است تا محیط به درستی نمایش داده شود. البته اندرسون و

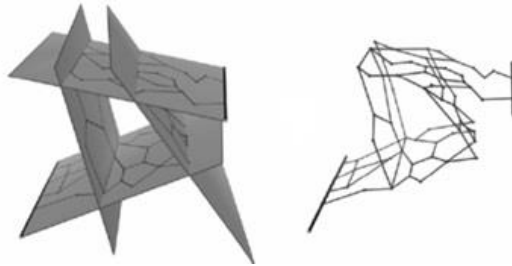
^۱ discretize

^۲ finite elements

درستورپ^۱ در سال ۱۹۸۷ روش اجزای مرزی را نیز برای حل حرکت سیال در درزه‌های دیسک مانند بکار برده‌اند. اما این روش عمومیت کمتری دارد.



الف) گسسته‌سازی صفحات درزه، سلول‌های خاکستری حامل بیشترین جریان هستند.



ب) تولید شبکه‌های لوله در صفحات درزه

شکل ۳-۴: شیوه‌های مدل‌سازی برای شبکه‌های درزه سه بعدی. (Bodin, ۲۰۰۷)

از آنجا که در مدل‌سازی جریان و انتقال توسط شبکه‌های لوله مسایل دوبعدی و سه بعدی به مسایلی یک بعدی تغییر می‌یابند، از لحاظ محاسباتی پربازده‌تر است. توجه فیزیکی این مفهوم آن است که جریان سیال از میان درزه‌های سنگ اغلب در طول مسیرهای ترجیحی متمرکز می‌شود که متناظر با مسیرهایی با کمترین مقاومت هیدرولیکی هستند (Tsang and Neretnieks, ۱۹۹۸). به منظور مقایسه مدل شبکه لوله با سایر استراتژی‌های گسسته‌سازی درزه مورد استفاده در نرم‌افزارهای مشهور و معروف تحلیل جریان DFN شامل FracMan/MAFIC، ConnectFlow/NAMMU و ConnectFlow/NAPSAC، جدول ۳-۲ فراهم شده است. البته توجه شود، مزایا و معایب کدها/شیوه‌های مختلف ممکن است به آسانی از مقایسه نتایج تحلیل مشخص نشود.

^۱ Andersson and Dverstorp

جدول ۳-۲: مقایسه استراتژی های مختلف بکار رفته برای گسسته سازی درزه در کدها/شیوه های مختلف

شیوه/کد	راهبرد گسسته سازی	شناسایی تقاطع	در نظر گرفتن درزه	توانایی ها و محدودیت-ها
مدل شبکه لوله	شبکه DFN به المان های یک بعدی (لوله ها) تبدیل می شود	تقاطع های درزه و مسیرهای جریان باید تعیین شوند. از آنجا که مسیرهای شناسایی شده یکتا نیستند، مسیرهای ترجیحی باید با استفاده از الگوریتمی خاص بهینه سازی شوند.	واضح و روشن (Explicit)	بدست آوردن روابط اتصال بین درزه ها راحت است. تعیین مسیرهای ترجیحی وقتی که اتصالات بین درزه ها پیچیده است، بسیار مشکل است
FracMan/MAFIC	DFN به شبکه های لوله تبدیل می شود (مسیرها بر اساس لوله هایی با بزرگترین احتمال جریان تعریف می شوند) (صفحات درزه به المان های اجزای محدود تبدیل می شوند)	درزه ها پی در پی گسسته سازی می شوند و تقاطع های درزه ها باید به صورت دستی (manually) شناسایی شوند. این عملیات در DFN های پیچیده بسیار دشوار است.	واضح و روشن	برای DFN های پیچیده، گسسته سازی درزه ها و تعیین اتصال گره ها به صورت دستی و دقیق دشوار است
ConnectFlow/NAMMU	شبکه FEM مستقل از درزه ها برپا می شود. برای هر المان، نفوذپذیری مناسب و موثر تعیین می شود (برای ارایه خمیره ها در داخل المان و درزه هایی که المان را قطع می کنند، مناسب است)	از آنجا که ویژگی های معادل برای ارایه تقریبی سیستم درزه/خمیره بکار می رود، شناسایی روابط اتصال بین تقاطع های درزه غیر ضروری است. بنابراین، تعداد زیادی درزه می تواند در نظر گرفته شود	مجازی. محیط متخلخل پیوسته	نیازی به تحلیل تقاطع های درزه نیست، بنابراین تعداد زیادی درزه می تواند در نظر گرفته شود. این شیوه برای مدل سازی جریان، تقریب زیادی دارد.
ConnectFlow/NAPSAC	درزه ها به صورت مستقیم به المان های محدود گسسته سازی می شوند. تقاطع ها با دیگر درزه ها توسط خطوطی در طول مرزهای المان محدود تخمین زده می شود	تقاطع های روی درزه کمی اصلاح می شوند تا در طول مرزهای المان محدود قرار گیرند	واضح و روشن	وقتی که تقریب تقاطع های درزه به کار می رود، در نظر گرفتن DFN های پیچیده و تعیین دقیق اتصالات دشوار است.

یکی از آخرین و مهمترین فعالیت‌هایی که در زمینه مدل‌سازی شبکه لوله انجام شده، توسط لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴ بوده است (Li et al., ۲۰۱۴). آنها به منظور شبیه‌سازی جریان آب در شبکه درزه مجزا، یک روش شبکه لوله گراف-تیوری (GPNM^۲) پیشنهاد کردند. مدل جریان آب پیشنهاد شده با کد Matlab اجرا می‌شود. در این روش در ابتدا، مسیرهای جریان آب با کاربرد روش برش درختی^۳ شناسایی می‌شوند. سپس هر درزه در شبکه درزه مجزا به صورت یک لوله وزن‌دار با گره شروع و گره پایان در گراف جهت‌دار شبیه‌سازی می‌شود. وزن هر لوله برابر متوسط میزان هدایت و مقاومت آن در نظر گرفته می‌شود که روش‌های تحلیلی و یا از روش انجام و آزمایش‌های هیدرولیکی تعیین می‌شوند. در این روش قانون گره نرخ جریان و قانون لوله‌ی فشار سیال در شبکه‌های درزه مجزا به ترتیب بر اساس بقای جرم و انرژی اتخاذ می‌شوند. مقادیر فشارهای آب و نرخ‌های جریان در شبکه‌های درزه مجزا از طریق حل یک دستگاه معادلات خطی غیرهمگن بدست می‌آید. در GPNM هیچ‌گونه گسسته‌سازی^۴ ای نیاز نیست. این موضوع باعث می‌شود که روش مذکور در هر دو روش شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی و میدانی جریان سیال بکار رود. مدل‌های GPNM، مشابه مدل شبکه‌های درزه دو بعدی (Long et al., ۱۹۸۲) و مدل شبکه لوله (Cacas et al., ۱۹۹۰a, ۱۹۹۰b) است. روش پیشنهادی بر روی موارد مطالعاتی ساده، پیچیده و بسیار پیچیده (DFN) آزمایش شده است. نتایج، موارد مطالعاتی ساده با روش‌های تحلیلی و شبیه‌سازی‌های UDEC اعتبارسنجی شده‌اند. در خصوص موارد مطالعاتی پیچیده، به دلیل این که روش‌های تحلیلی برای شبکه‌های متصل پیچیده (که به سادگی قابل تفکیک به درزه‌های موازی و ردیفی نیستند) نمی‌توانند به راحتی بدست آمده و اعتبارسنجی شوند، این موارد مطالعاتی تنها با شبیه‌سازی‌های UDEC اعتبارسنجی می‌شوند. معمولاً موارد مطالعاتی با پیچیدگی DFN به دو دلیل بدون هیچ اعتبارسنجی‌ای تحلیل می‌شوند. اول این که، وقتی شبکه‌ها پیچیده هستند،

^۱ Li

^۲ Graph-theoretic Pipe Network Method

^۳ tree cutting

^۴ discretization

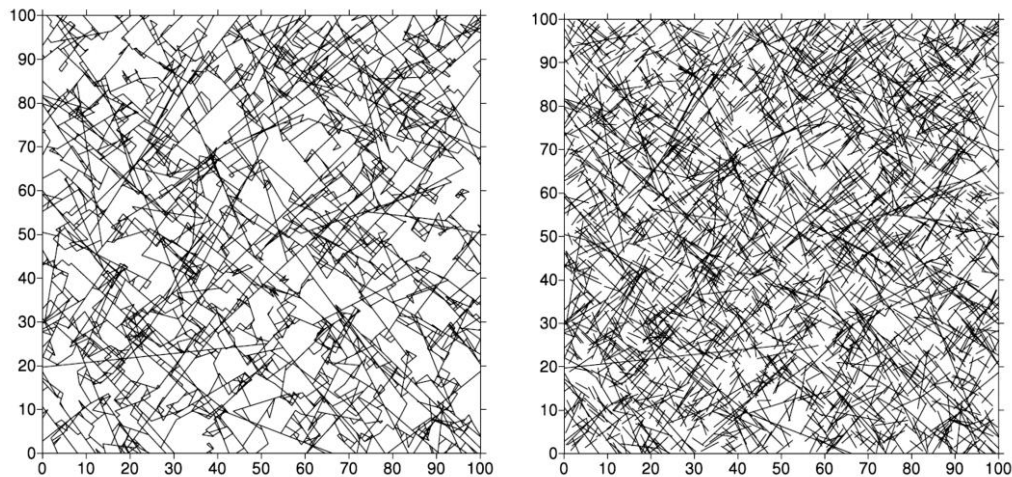
نمی‌توان روش‌های تحلیلی را به راحتی اجرا نمود. دوم این که، وقتی تعداد درزه‌ها زیاد باشند، نمی‌توان با UDEC شبیه‌سازی مناسبی را انجام داد. نتایج اعتبارسنجی‌های انجام شده نشان می‌دهد که شبیه‌سازی UDEC و روش‌های تحلیلی در موارد مطالعاتی مختلف به خوبی با روش GPNM تطابق دارند. نتایج کار آنها نشان می‌دهد که روش شبکه لوله تیوری گراف (GPNM) در تحلیل جریان آب در شبکه‌های درزه مجزا بسیار کارآمد است و مسیرهای غالب جریان آب می‌تواند به وسیله این روش محاسبه شوند. همچنین روش GPNM بازدهی و پتانسیل بالایی در کاربردهای مهندسی، مانند تزریق و جلوگیری از ورود جریان آب به داخل تونل‌ها یا حفاری‌های معدنی، زهکشی، بهره‌برداری آب‌های زیرزمینی و غیره دارد. این روش را می‌توان برای حوزه‌های مختلف تحقیقاتی مانند، بررسی دیگر سیالات و جریان و انتقال گاز در شبکه لوله و محیط‌های زمین‌شناسی توسعه داد.

۳-۴-۱- حذف درزه‌های نارسانا

مدل‌های DFN از لحاظ محاسباتی سنگین هستند، بنابراین بهتر است قبل از برقراری سیستم معادلات جبری خطی، تعداد نقاط داخلی با استفاده از شناسایی و حذف درزه‌های غیر متصل، کاهش داده شود. این روش از طریق شماره‌گذاری متوالی نقاط انتهایی تمام درزه‌ها و سپس پایش مدل برای فیلتر کردن قطعه‌هایی که دارای نقطه انتهایی بدون اتصال با دیگر نقاط داخلی در مدل هستند، بدست می‌آید. درزه‌هایی که یک یا دو نقطه انتهایی بدون اتصال با شبکه بزرگتر دارند، نمی‌توانند هدایت‌کننده جریان سیال باشند. لازم به ذکر است که یک درزه در اینجا به صورت یک پل بین دو نقطه تقاطع متوالی تعریف می‌شود. بنابراین یک درزه بلند قطع شده توسط تعداد زیادی درزه به صورت مجموعه‌ای از چند قطعه کوچکتر مدل می‌شود. فرآیند شناسایی درزه‌های غیرهادی (نارسانا)، که می‌تواند شامل درزه‌های منفرد شده و قطعه‌های با نقطه انتهایی بسته^۱ باشند، یک فرآیند تکرارشونده است. به همین دلیل ممکن است حذف یک درزه با نقطه انتهایی بسته، دیگر قطعه‌های موجود در شبکه را به درزه منفرد و

^۱ dead-end

یا یک قطعه با نقطه انتهایی بسته جدید تبدیل کند. کاربرد دقیق فرآیند حذف، همانند آنچه در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود، منجر به ایجاد شبکه‌ای ساده‌تر با تعداد بسیار کمتری از نقاط تقاطع می‌شود.



الف) شبکه با تمامی درزه‌های موجود
ب) همان شبکه بعد از حذف درزه‌های منفرد و قطعه‌های با نقطه انتهایی بسته

شکل ۳-۵: کاهش تعداد نقاط داخلی (Parashar and Reeves, ۲۰۱۲)

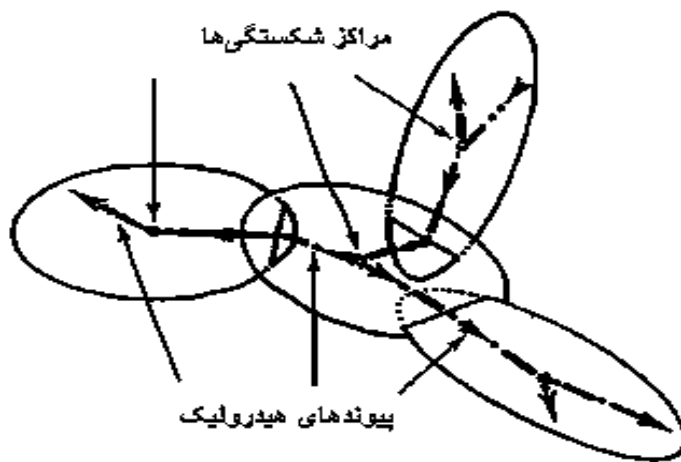
۳-۴-۲- تولید شبکه لوله‌ی معادل شبکه شکستگی‌های مجزا

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 دبی یکسانی از سیال را در مقایسه با یک شکستگی از خود عبور می‌دهند. همان‌گونه که در شکل ۳-۶، نشان داده شده است، هر صفحه شکستگی شامل خط اثر تمام شکستگی‌هایی خواهد بود که با صفحه مورد نظر متقاطع هستند. با وصل کردن مرکز تمام خط اثرها در صفحه، لوله‌های معادل برای آن صفحه ساخته می‌شوند. لوله‌ها برای هر صفحه شکستگی در مراکز خط اثر به هم متصل خواهند شد و به این صورت شبکه لوله شکل می‌گیرد. در یک جریان پایدار، ویژگی هیدرولیک برای هر لوله، ضریب هدایت هیدرولیکی است:

$$C = \frac{Q}{J_p} \quad (۳-۶)$$

که در آن:

Q جریان خروجی لوله، (m^3/s)



شکل ۳-۶: شمایی از روش تبدیل درزه به لوله (Cacas et al., 1990b)

۳-۴-۳- تعیین تقاطع لوله‌ها

در این روش مبادله سیال بین درزه‌های مختلف از طریق خطوط تقاطع آنها و بر طبق قانون بقای جرم انجام می‌شود. در این روش، باید تعداد، موقعیت و توزیع بازشدگی مسیرهای جریان مشخص شود. در روش شبکه لوله، به منظور محاسبه جریان توسط سیستم لوله، محل تقاطع تمام لوله‌ها تعیین می‌شود. تقاطع بین لوله‌ها و مرزهای ناحیه جریان نیز تعیین می‌گردد. برای تعیین ارتباط لوله‌ها با مرز، مراحل زیر به ترتیب انجام می‌شوند؛

در مرحله نخست، لوله‌هایی که با مرز نهایی مدل متقاطع هستند به عنوان لوله‌های سطح اول در نظر گرفته می‌شوند. سپس لوله‌هایی که به لوله‌های مرزی متصل هستند در سطح دوم شماره‌گذاری شده و به این ترتیب لوله‌هایی که با لوله‌های سطح دوم متقاطع هستند مشخص می‌شوند و این مراحل تا زمانی که هیچ تقاطع جدیدی یافت نشود ادامه می‌یابند. به این روش لوله‌هایی که هیچ راه ارتباطی با مرز مدل پیدا نمی‌کنند، به صورت خودکار حذف خواهند شد. این خودکار لوله‌های نارسا وقتی مفید است که شبکه شکستگی وجود دارد اما جریانی در آن برقرار نیست.

در این روش، مسیرهای لوله‌ای از مرزها تا داخل ناحیه جریان، مرحله به مرحله ساخته می‌شوند. تقاطع تمام لوله‌هایی که با مرزها متقاطع هستند (لوله‌های سطح اول) با تمامی لوله‌ها، اعم از سطح یک یا دیگر سطوح، جستجو می‌شوند. تمامی لوله‌هایی که در سطح اول نیستند اما با یک لوله در سطح اول تقاطع دارند، در سطح دوم قرار می‌گیرد و سپس تقاطع آنها با لوله‌های دیگر بررسی می‌شود. وقتی که لوله i در نظر گرفته می‌شود، تقاطع آن با لوله‌های دیگری که در دیسک‌های شکستگی یکسان هستند بررسی می‌شود. در تقاطع دیسک شکستگی، لوله‌های هر دو شکستگی که تقاطع را می‌سازند نشان داده می‌شود.

پس از این که همه لوله‌ها در شکستگی‌ها (که لوله i هستند) نمایش داده شدند، لوله بعدی در سطح کنونی بررسی می‌شود. این فرآیند تا انتهای مرحله و تا زمانی که هیچ لوله‌ای در سطح باقی نماند ادامه می‌یابد.

۳-۴-۴- محاسبات شبکه لوله

در این بخش روابط و معادلات حاکم بر محاسبات جریان در لوله‌ها ارائه می‌شوند. به این منظور لازم است ابتدا ویژگی‌های هیدرولیکی شبکه لوله‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

۳-۴-۴-۱- رسانایی لوله‌های معادل

ویژگی رسانایی لوله که هم تابعی از خصوصیات هندسی لوله‌ها و هم خصوصیات سیال است، توسط رابطه زیر بدست می‌آید (جولایی و باغبانان، ۱۳۹۱).

$$C = (A)^3 \times (bl - bc) / \left(\log\left(\frac{bl}{bc}\right) \right) \times v \quad (۷-۳)$$

که در آن:

A ، بازشدگی صفحه شکستگی است که لوله مجازی منتقل کننده جریان در آن واقع شده است، (m)

v ، ویسکوزیته سینماتیکی سیال، (kg/m.s)

bl ، طول فصل مشترک شکستگی‌ای است که انتهای لوله به آن ختم شده است، (m)

متغیر bc نیز از رابطه (۸-۳) بدست می‌آید.

$$bc = 4 \times R \times \frac{bl}{bs} \quad (8-3)$$

که در آن:

R ، شعاع شکستگی است که لوله منتقل کننده جریان در صفحه‌ی آن واقع شده است، (m)

bs ، نیز مجموع طول فصل مشترک شکستگی‌های دیگر در صفحه شکستگی است، (m)

۳-۴-۲- قانون جریان سیال تراکم ناپذیر در درزه تنها

اساساً، جریان سیال تراکم ناپذیر در درزه تنها از معادله Navier-Stokes (N-S)، یعنی یک مجموعه

از سه معادلات دیفرانسیل جزئی غیرخطی بهم پیوسته^۱ پیروی می‌کند (Oron and Berkowitz, ۲۰۰۰)

(Zimmerman and Yeo, ۱۹۹۸).

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} u + \rho (u \cdot \nabla) u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + F \quad (9-3)$$

که در آن؛

ρ چگالی سیال، u بردار سرعت، μ ویسکوزیته، p فشار سیال، F بردار نیروی بدنه، $\partial u / \partial t$ شتاب ناپایداری^۲، $(u \cdot \nabla) u$ شتاب انتقال^۳ (مایع) و $\mu \nabla^2 u$ واگرایی ویسکوزیته تنش^۴ است.

شکل ۳-۷، جریان سیال حالت پایدار در درزه بست شده توسط دو سطح سنگی صاف، موازی، نفوذناپذیر و بدون شیب را نشان می‌دهد. کاربرد فرض مدل صفحه موازی برای شبیه‌سازی انتقال سیال در درزه‌ها متداول است. در این مدل، فرض می‌شود که درزه‌ها که صاف و موازی هستند و همانطور که توسط مورزنکو و همکاران در سال ۱۹۹۶ اشاره شده (Mourzenko et al., ۱۹۹۶)، این شرایط به طور واضحی با درزه‌های واقعی متفاوت است. درزه‌ها در سنگ‌های واقعی زبر، غیر موازی و دارای پرکننده بین دو سطحشان هستند. بنابراین ناهمگنی داخلی درزه‌ها مشهود است. اما از آنجا که اندازه‌گیری دقیق زبری

^۱ Coupled nonlinear partial differential equations

^۲ Unsteady acceleration

^۳ convective

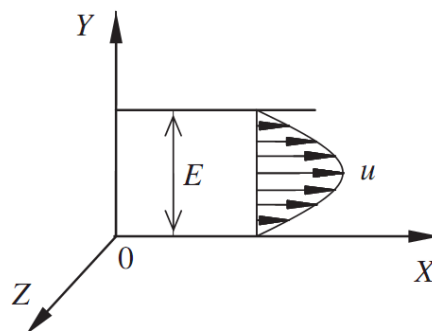
^۴ Viscosity divergence of stress

درزه‌ها در سنگ‌های واقعی بسیار دشوار است، ساده‌سازی درزه‌ها به صورت دو صفحه موازی به صورت گسترده‌ای مورد قبول است (Zhang and Yin ۲۰۱۴).

سیال، موازی با سطوح مرزی حرکت می‌کند. که معادله آن می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$u = u(y), v = 0, w = 0 \quad (۱۰-۳)$$

که در آن u ، v و w واگرایی‌های X ، Y و Z سرعت سیال هستند.



شکل ۳-۷: مدل مفهومی جریان سیال تراکم ناپذیر در تک درزه

در این شرایط، هیچ سیالی در جهات Y و Z جریان نمی‌یابد، بنابراین واگرایی‌های Y و Z شتاب انتقال و تنش ویسکوزیته برابر با صفر هستند. شتاب ناپایدار در این نوع تحلیل حالت پایدار که نرخ جریان وابسته به زمان است، برابر صفر است. در صورتی که گرانش نادیده گرفته شود، نتیجه می‌شود که گرادیان فشار در جهات Y و Z برابر صفر است. این بدین معنی است که فشار سیال فقط تابعی از مختصات X و بی‌ربط به Y و Z است.

$$p = p(x) \quad (۱۱-۳)$$

سپس معادلات N-S به صورت معادله (۱۲-۳) ساده می‌شود:

$$\frac{d^2 u(y)}{d y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp(x)}{dx} \quad (۱۲-۳)$$

^۱ divergence

با انتگرال گیری بر روی بازه از صفر تا بازشدگی درزه، E ، و ترکیب با شرایط مرزی که سرعت سیال در سطوح مرزی برابر با صفر هستند، ($y=E$ و $y=0$)، در نتیجه، سرعت سیال و نرخ جریان به صورت زیر درون یابی می شوند:

$$u(y) = -\frac{1}{2\mu} \frac{dp(x)}{dx} y(E-y) \quad (13-3)$$

$$Q = W \int_0^E u(y) dy = -\frac{E^3 W}{12\mu} \frac{dp(x)}{dx} \quad (14-3)$$

سپس نرخ جریان سیال Q به شکل زیر تغییر می یابد:

$$Q = K.S.J, Q = \frac{\Delta P}{R} \text{ or } Q = G.\Delta P \quad (15-3)$$

که در آن Q نرخ جریان سیال، K نفوذپذیری متوسط، S مساحت مقطع درزه، J گرادیان فشار، ΔP اختلاف فشار که جهت مثبت آن هم جهت با نرخ جریان سیال و مخالف با گرادیان فشار است، R و G مقاومت و میزان هدایت متوسط است. K ، J ، ΔP ، G و R به صورت زیر بیان می شوند:

$$K = \frac{E^2}{12\mu} \quad (16-3)$$

$$J = \frac{\Delta P}{L} \quad (17-3)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (18-3)$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{E^3 W}{12\mu L} \quad (19-3)$$

که در آن P_1 و P_2 فشارهای سیال ورودی و خروجی انتهای درزه هستند، W پهنای درزه (در جهت Z) است که اغلب به صورت طول واحد، یعنی یک متر در تحلیل مسایل دوبعدی اختصاص داده می شود.

۳-۴-۴-۳ قانون گره نرخ جریان

قانون گره نرخ جریان در شبکه درزه مجزا بر اساس بقای جرم پایه گذاری شده است و معرف قانون بقای نرخ ورودی و خروجی جریان در هر نقطه تقاطع است.

$$\sum_{j=1}^{PN} a_{\Gamma ij} Q_{bj} = 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, NN, \quad J = 1, 2, 3, \dots, PN \quad (20-3)$$

(1~NN) i و (1~PN) z به ترتیب یک گره و لوله تقاطع منحصر به فرد را علامت گذاری می کنند. Qbz نرخ جریان مربوطه در لوله bz است. NN، تعداد معادلات کلی در معادله (۳-۲۰) است و PN نیز تابعی از آن است.

۳-۴-۴-۳- قانون لوله‌ی فشار

قانون لوله‌ی فشار بر اساس قانون بقای انرژی تعریف می‌شود که بیان کننده قانون کاهش فشار رانش سیال از میان لوله است. اگر فرض شود که b_i یک لوله در شبکه درزه مجزا است، قانون لوله‌ی فشار به صورت معادله زیر بیان می‌شود:

$$P_{bi} = P_j - P_k \quad (۳-۲۱)$$

که در آن، z و k به ترتیب شماره‌های سریال گره‌های شروع و پایان لوله b_i هستند، P_{bi} کاهش فشار در لوله b_i است، P_j و P_k فشار سیال به ترتیب در گره‌های z و k هستند.

۳-۴-۴-۵- نفوذپذیری درزه

ارتباط نفوذپذیری و بازشدگی درزه با استفاده از رابطه ارایه شده زیر توسط دی‌مارسیلی^۱ در سال ۱۹۸۶ تعریف شده است:

$$k = \frac{b^2}{12} \quad (۳-۲۲)$$

که در آن k و b به ترتیب نفوذپذیری و بازشدگی درزه هستند.

نفوذپذیری معادل سنگ درزه‌دار، نفوذپذیری کلی برای بلوک سنگی را بیان می‌کند. در شبیه‌سازی جریان، یک درزه می‌تواند به عنوان یک کانال جریان سریع و یا یک سد جریان بسته به نفوذپذیری درزه عمل کند. درزه‌های دارای نفوذپذیری بالا می‌توانند منجر به افزایش نفوذپذیری معادل بلوک سنگی درزه‌دار شوند. در عین حال، درزه‌های دارای نفوذپذیری پایین می‌توانند به عنوان موانع جریان که نفوذپذیری معادل سنگ درزه‌دار را کاهش می‌دهند، عمل کنند. محاسبه نفوذپذیری معادل برای سیستم

^۱ de Marsily

سنگی از مفهوم بقای جرم پیروی می‌کند. در سیستم جریان حالت پایدار، سرعت سیال در سنگ درزه‌دار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V = \frac{\rho g k_{eq} \Delta H}{\mu \Delta L} \quad (3-23)$$

که در آن ρ و μ به ترتیب چگالی و ویسکوزیته هستند. نماد g شتاب گرانش است. گرادیان هد به صورت نسبت اختلاف هد با ΔH و فاصله با ΔL تعریف شده است. نفوذپذیری معادل k_{eq} در صورتی که نرخ جریان سنگ درزه‌دار از مدل جریان DFN بدست آمده باشد، برآورد می‌شود.

۳-۵- مدل سازی عددی جریان سیالات در توده سنگ

تاریخچه مدل‌های جریان متکی بر مدل‌های DFN تقریباً به ۳۵ سال پیش، یعنی مدل دو بعدی توسعه داده شده توسط لانگ^۱ و همکاران در سال ۱۹۸۲ بر می‌گردد. در طی زمان با بکارگیری تکنولوژی‌های محاسباتی، شبکه درزه سه بعدی شامل درزه‌های چندضلعی یا دیسک شکل ایجاد شدند. مدل‌های جریان و انتقال در یک سیستم DFN به طور معمول به شبکه‌های معادل تقریبی لوله‌های یک بعدی بر اساس مفهوم پیشنهاد شده توسط لانگ و همکاران در سال ۱۹۸۵ و کاکاس^۲ و همکاران در سال ۱۹۹۰، و توسعه‌های بعدی آن تبدیل می‌شوند. شیوه شبکه لوله معادل برای تخمین جریان کافی است اما به منظور بررسی جزییات جریان و مکانیزم انتقال در داخل درزه‌ها، شیوه‌های پیشرفته‌تر بر اساس مش-بندی عددی درزه‌ها توسعه داده شدند (Lee & Ni, ۲۰۱۵). در ادامه، فعالیت‌های انجام شده در زمینه ساخت و تحلیل مدل‌های جریان در شبکه درزه‌های مجزا بررسی شده است.

مییر و انشتین^۳ در سال ۲۰۰۲ با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری شده از تعدادی از تونل‌ها در ناحیه بوستون اقدام به مدل‌سازی سه بعدی تصادفی سیستم درزه (DFN) منطقه و شناسایی زیرشبکه‌های متصل در مدل نمودند. در این مدل‌سازی بررسی جریان مد نظر نبوده و تنها زیرشبکه‌ها از لحاظ اتصال

^۱ Long

^۲ Cacas

^۳ Meyer and Einstein

هندسی بررسی شده‌اند. در مدل آنها اندازه زیرشبکه‌های متصل و به ویژه بزرگ‌ترین زیرشبکه خیلی متغیر بوده است. برای بررسی اثر مقیاس، شبیه‌سازی‌هایی با افزایش اندازه حجم مدل‌سازی و هندسه بزرگ‌ترین زیرشبکه اجرا شدند. مشخص شد که برای حجم مدل‌سازی $16 \times 16 \times 16$ متر مکعبی تغییرات گسترش هندسه زیرشبکه‌ها ثابت می‌ماند. آنها بیان نمودند که اتصال هندسی و به ویژه اتصالات بین مرزها در سیستم درزه از جهت تخمین میزان جریان آب زیرزمینی از میان توده سنگ بسیار پراهمیت است (Meyer and Einstein, ۲۰۰۲).

برخی شبیه‌سازی‌های شبکه درزه مجزای سه بعدی (3D DFN) صرفاً برای بررسی جریان و انتقال سیال توسعه داده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به تولیدکننده شبکه درزه مجزای سه بعدی FracMesh، تهیه شده توسط ایتو و سوول^۱ در سال ۲۰۰۳ اشاره نمود. آنها با استفاده از FracMesh و نرم‌افزار عددی جریان چندفازی TOUGH۲، اقدام به مطالعه انتقال جریان سیال در محیط متخلخل درزه‌دار و با در نظر گرفتن برهم‌کنش‌های خمیره-درزه^۲ نموده‌اند. برنامه FracMesh به گونه‌ای توسعه داده شده که اطلاعات ورودی مورد نیاز نرم‌افزار TOUGH۲ را فراهم می‌کند. در این برنامه یک درزه به صورت صفحه‌ی مستطیلی چهارگوش با مساحتی محدود تعریف شده است. بازشدگی درزه به طول درزه بر اساس یک رابطه تجربی توانی وابسته شده است (Ito and Seol, ۲۰۰۳).

شریف‌زاده و همکاران در سال ۲۰۰۶ به تحلیل هیدرومکانیکی توده‌سنگ اطراف تونل با استفاده از روش المان مجزا در قالب برنامه UDEC پرداختند. در روش المان مجزا، درزه‌ها بصورت دو صفحه موازی با بازشدگی ثابت شبیه‌سازی شدند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که الگوی توزیع جریان در داخل توده‌سنگ اطراف تونل به الگوی درزه‌داری و ارتباط درزه‌ها به یکدیگر بستگی دارد (شریف‌زاده و همکاران، ۱۳۹۱). باغبانان و جینگ^۳ در سال ۲۰۰۷ با توسعه یک کد جدید برای تولید درزه به صورت دوبعدی و با کاربرد نرم‌افزار تجاری UDEC به تحلیل جریان پرداختند. در کار آنها همبستگی طول و بازشدگی درزه در

^۱ Ito and Seol

^۲ Fracture-matrix interaction

^۳ Baghbanan and Jing

نظر گرفته شده است. البته شناسایی درزه‌های متصل به منظور کاهش تعداد درزه‌ها انجام نشده است (Baghbanan & Jing, ۲۰۰۷).

بودین^۱ در سال ۲۰۰۷ اقدام به توسعه کد جدید به نام SOLFRAC برای تحلیل جریان در شبکه درزه‌ها نمود. او شبکه درزه‌های مجزا را تولید و سپس به شناسایی شبکه درزه‌های متصل در شبکه اصلی پرداخت. در نهایت مدل شبکه لوله معادل تهیه نمود و مسیرهای محتمل جریان را شناسایی و معرفی کرد. البته بودین بازشدگی درزه‌ها را ثابت در نظر گرفت. همچنین کلیه مدل‌سازی‌ها در فضای دوبعدی انجام شده است (Bodin et al, ۲۰۰۷).

ایندینگ و رینگروز^۲ در سال ۲۰۰۸ بر روی اجرای استراتژی پایش جامع و مدل‌سازی رفتار تزریق CO₂ به منظور اطمینان از ذخیره‌سازی بلندمدت ایمن تمرکز نمودند. بخش مهم این تحقیق فهم فرآیندهای درگیر در مهاجرت CO₂ در داخل ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌های با نفوذپذیری نسبتاً پایین و متاثر از درزه‌ها و گسل‌ها است. نفوذپذیری بالای درزه‌ها می‌تواند به CO₂ امکان مهاجرت سریع از میان سنگ پوشان به سطح یا آبخوان‌های همسایه را بدهد. در تحقیق آنها یک مدل DFN از درزه‌های موجود در سایت ساخته شد. سپس بسته نرم‌افزاری تجاری Eclipse برای شبیه‌سازی جریان و بررسی تغییرات ویژگی‌های درزه بر حرکت CO₂ بکار برده شد (Iding and Ringrose, ۲۰۰۸).

بنگ^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل شبکه درزه مجزای سه بعدی را به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های هیدرولیکی توده سنگ 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. در پژوهش آنها فرض شده است که طول درزه از توزیع نمایی منفی و بازشدگی درزه‌ها از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند (Bang et al., ۲۰۱۲).

^۱ Bodin

^۲ Iding and Ringrose

^۳ BANG

پاراشار و ریوز^۱ در سال ۲۰۱۲ روشی تکرارشونده را برای حل مدل جریان و انتقال در شبکه DFN پیشنهاد نمودند. در این مقاله بر روی پیچیدگی‌های محاسباتی (در کاربرد روش‌های اجزای محدود) مربوط به مدل‌های DFN با هدف فراهم نمودن راهنمایی جهت توسعه الگوریتم‌های پربازده‌ای که بتواند به مدل‌سازها در شبیه‌سازی جریان در شبکه‌های درزه مجزای بزرگ کمک کند، تمرکز شده است. آنها بیان نمودند که زمان محاسبات در روش‌های حل سنتی معادلات سیستم بسیار زیاد است و سیستم‌های بزرگ در خصوص زمان و ذخیره کامپیوتر دچار مشکل می‌شوند. برخلاف روش‌های مستقیم، روش‌های تکرارشونده هرگز ماتریس ضرایب را تغییر نمی‌دهند و نیاز به ذخیره‌سازی تعداد کمی از محاسبات در یک زمان دارند. آنها روش‌های تکرارشونده شبه فضایی Krylov را به عنوان مهم‌ترین روش‌ها برای حل سیستم‌های بزرگ در نظر گرفتند. نرخ همگرایی تکنیک‌های تکرارشونده نشان می‌دهد که یک الگوی سیستماتیک در ارتباط با تغییرات در پارامترهای آماری شبکه‌های تصادفی درزه تولید شده وجود دارد. ویژگی‌های برجسته روندهای مشاهده شده در الگوهای همگرایی بحث شده است. این مطالعه محدود به تحلیل ویژگی‌های ماتریس و موارد محاسباتی مربوط به شبکه‌های درزه دوبعدی می‌شود (Parashar and Reeves, ۲۰۱۲).

جوادی و شریف‌زاده در سال ۲۰۱۲، مدل جریان سیال در محیط‌های سنگی درزه‌دار را با استفاده از روش شبکه درزه‌های مجزای دوبعدی مورد مطالعه قرار دادند. بدین منظور یک برنامه کامپیوتری محاسباتی تحت عنوان FNETF برای ساخت شبکه درزه‌های مجزا و تحلیل عددی جریان آرام در شبکه شکستگی در محیط برنامه‌نویسی MATLAB توسعه داده شد. فرآیند ساخت و تحلیل جریان در این برنامه محاسباتی در دو مرحله مختلف انجام می‌شود. مرحله اول ساخت و تحلیل شبکه درزه‌های مجزا است که در آن با حذف شکستگی‌های غیرهادی از شبکه شکستگی‌های اولیه، مسیرهای پایه جریان حاصل می‌شود. بعد از حذف شکستگی‌های غیرهادی، با توجه به فصل مشترک شکستگی‌ها، شبکه کانالی مسیرهای جریان در داخل دامنه ساخته می‌شود. سپس در مرحله دوم، حل معادلات جریان

^۱ Parashar and Reeves

سیال در شبکه (با استفاده از روش المان محدود) انجام می‌شود. در نهایت این برنامه محاسباتی با استفاده از داده‌های میدانی مربوط به وضعیت شکستگی‌ها و آب زیرزمینی در اطراف مغار نیروگاه سیاه بیشه مورد ارزیابی قرار گرفت و رفتار جریان آب ورودی به مغار نیروگاه مطالعه شد (جوادی و شریف‌زاده، ۲۰۱۲).

بیجی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳، با تمرکز بر روی منطقه‌ای در ایتالیا که در آن گاز CO₂ به طور طبیعی رها می‌شود و با هدف تعیین مقدار نفوذپذیری، مدل DFN^۲ی تحت عنوان AM^۲ تهیه نمودند که توانایی محفوظ نگه داشتن هندسه درزه‌های مشاهده شده در میدان و پارامترهای ژئومکانیکی وابسته به آنها (بازشدگی، طول، شیب و جهت شیب) را داشته باشد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مدل‌های DFN تجاری به طور کلی مقادیر نفوذپذیری را کمتر تخمین می‌زنند (در حدود دو برابر) و ناهمسانگردی‌های وابسته به گسل را در نظر نمی‌گیرند، در حالی که این موارد به خوبی توسط AM تعریف شده است. میزان نشت شبیه‌سازی شده ارتباط خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد که نشان دهنده تاثیر گسل و تقاطع‌های درزه در میزان نشت CO₂ است. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که چگونه مسیرهای انتقال گاز توسط نفوذپذیری ناپیوستگی، جهات درزه پیچیده و موقعیت‌های درزه در داخل حجم سنگی مورد نظر کنترل می‌شوند. در این مطالعه از نرم افزارهای تجاری Petrel و Comsol به منظور ساخت مدل DFN و تحلیل جریان استفاده نمودند. همچنین بازشدگی درزه‌ها ثابت در نظر گرفته شد (Bigi et al., ۲۰۱۳).

ژانگ و یین^۳ در سال ۲۰۱۴، به مدل‌سازی عددی جریان سیال در ترکیب‌بندی‌های پیچیده شبکه درزه‌های مجزا با استفاده از مدل جریان DFN سه بعدی پرداختند. در این مدل، درزه‌ها صاف، موازی و دارای بازشدگی ثابت فرض شده‌اند. در این تحقیق، روش برش بلوک سه بعدی^۴ برای اولین بار برای

^۱ Bigi

^۲ Analogue Model

^۳ Zhang and Yin

^۴ ۳-d block cutting method

شناسایی هر دو مورد روابط اتصال بین درزه‌ها و مسیرهای جریان در DFN‌های پیچیده اتخاذ شده است. روش برش بلوک سه بعدی می‌تواند تمام بلوک‌های فضایی در داخل توده سنگی مشخص که توسط درزه‌های تصادفی و قطعی با گسترش‌های محدود تشکیل می‌شوند را جستجو کند. در این روش، فرض می‌شود سیال از طریق مرزهای بلوک‌ها جریان می‌یابد. مرزهای بلوک‌ها از حلقه‌هایی که توسط تقاطع خطوط بین تمام سطوح (درزه‌ها و دیگر سطوح) شکل یافته‌اند تشکیل شده است. بر اساس اتصال حلقه‌ها، اتصال‌های نقاط اجزای محدود بین سطوح مختلف تعیین می‌شوند. حلقه‌های با شکل‌های دلخواه به اجزای محدود گسسته‌سازی شده و سپس با کاربرد روش اجزای محدود معادلات جریان حل می‌شوند. شیوه‌ارایه شده توسط آنها مزیت سرو کار داشتن با ترکیب‌بندی‌های DFN پیچیده را دارد و می‌تواند به طور دقیق اتصال بین تقاطع‌های درزه را تعیین کند. اما در مقایسه با روش‌های دیگر، شیوه به کار رفته توسط آنها، در ارتباط با تعداد نسبتاً کمتری درزه صادق است (Zhang and Yin, ۲۰۱۴).

لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۴ به منظور شبیه‌سازی جریان آب در شبکه درزه مجزا، یک روش شبکه لوله مبنی بر تیوری گراف (GPNM) پیشنهاد دادند. در روش آنها، برای شناسایی مسیرهای جریان آب یک تکنیک برش درخت اتخاذ می‌شود. سپس هر درزه در شبکه درزه مجزا به صورت یک لوله وزن‌دار با گره شروع و گره پایان در گراف جهت دار رفتار می‌کند. مقادیر فشارهای آب و نرخ‌های جریان در شبکه درزه‌های مجزا توسط حل یک سیستم از معادلات خطی غیرهمگن بدست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که روش شبکه لوله تیوری گراف (GPNM) در تحلیل جریان آب در شبکه‌های درزه مجزا موثر است.

لی و نی^۲ در سال ۲۰۱۵، اقدام به توسعه مدل شبکه شکستگی‌های مجزای (DFN) سه بعدی و مدل تولید مش ساخت‌نیافته (UMG^۳) سه بعدی به منظور شبیه‌سازی جریان و انتقال از سیستم‌های سنگی درزه‌دار نمودند. آنها نرم‌افزار تجاری شبیه‌ساز محیط درزه‌دار و متخلخل سه بعدی

^۱ Li

^۲ Lee and Ni

^۳ unstructured mesh generation

(TOUGH2/ECO2N) را برای تحلیل جریان سیال‌های چندفازی و انتقال CO_2 در محیط درزه‌دار، بکار بردند. در این مطالعه درزه‌های منفرد شده که با دیگر درزه‌ها و مرزهای سنگی متصل نیستند، به منظور افزایش کارایی محاسباتی حذف شدند. این فرآیند توسط حلقه‌های جستجو در مدل DFN توسعه یافته انجام می‌شود. مدل‌های DFN مختلف با شدت‌های درزه مختلف برای بررسی رفتار نفوذپذیری معادل بلوک سنگی اجرا شدند. درزه‌های بیضوی شکل برای تولید DFN‌های سه بعدی بکار رفته است. در این مطالعه، فرض شده است که نفوذپذیری در درزه‌ها به طور قابل توجهی بزرگتر از خمیره‌ی سنگی باشد. همچنین بازشدگی درزه‌ها ثابت فرض شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داده است که مدل‌های توسعه یافته می‌تواند رفتارهای جریان و انتقال را در محیط‌های درزه‌دار دربرگیرد (Lee and Ni, ۲۰۱۵). در مطالعه لیو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک مدل فراکتال برای بررسی نفوذپذیری معادل شبکه‌های درزه دوبعدی ایجاد شد. بعد فراکتال D_T و D_f در مدل بکار رفتند تا به ترتیب ویژگی انحنا جریان سیال در درزه‌ها در اثر دیواره‌های زبر (در مقیاس میکرو) و ویژگی هندسی توزیع‌های درزه (در مقیاس ماکرو) را ارایه نمایند. در مدل آنها، شبکه‌های درزه با استفاده از روش مونت کارلو تولید شدند و دارای توزیع اندازه توانی بودند. جریان سیال در مدل‌های شبکه درزه تولید شده شبیه‌سازی شد و رابطه بین بعد فراکتال و نفوذپذیری معادل تحلیل شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که نفوذپذیری معادل شبکه درزه می‌تواند به طور قابل توجهی با آشفستگی جریان سیال، بازشدگی درزه‌ها و عدد تصادفی بکار رفته برای تولید توزیع طول فراکتال درزه‌ها در شبکه تاثیر پذیرد. آنها بر این موضوع تاکید کردند که اثرات آشفستگی نباید نادیده گرفته شود و باید در مدل فراکتال برای تخمین دقیق رفتار هیدرولیکی شبکه‌های درزه شامل شود. در نهایت با استفاده از مدل فراکتال پیشنهاد شده، عبارت ریاضی بین نفوذپذیری معادل K و بعد فراکتال پیشنهاد شد (Liu et al., ۲۰۱۵).

^۱ Liu

هایمن^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵، یک بسته محاسباتی برای تولید شبکه‌های درزه مجزای سه بعدی (DFN) و شبیه‌سازی جریان و انتقال به نام DFNWORKS تولید نمودند. این بسته برای مطالعه جریان و انتقال در محیط درزه‌دار در مقیاس‌هایی از میلی‌متر تا کیلومتر بکار برده شده است. در این بسته پس از ایجاد شبکه DFN با استفاده از ابزار تجاری مش‌بندی LAGRIT مثلث‌بندی شبکه انجام می‌شود. سپس نرم‌افزار تجاری PFLOTTRAN برای محاسبه فشار و جریان در شبکه بکار می‌رود. در انتها، شیوه لاگرانژی برای تعیین خطوط مسیر از میان شبکه و تحلیل انتقال محلول استفاده می‌شود (Hyman et al., ۲۰۱۵).

هوآنگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۶، به منظور برآورد نفوذپذیری توده سنگ درزه‌دار اقدام به ساخت مدل سه بعدی شبکه درزه مجزا با اندازه، جهت و موقعیت فضایی نمودند. آنها از توابع توزیع برای مدل‌سازی بازشدگی استفاده نمودند. در مدل آنها درزه‌ها به صورت دیسک‌های دایره‌ای مدل شدند و حل جریان توسط نرم‌افزار ۳DEC انجام شد. در مدل آنها شناسایی درزه‌های متصل مدنظر قرار داده نشده است.

رن^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از نرم‌افزار تجاری مدل‌ساز شبکه درزه اقدام به شبیه‌سازی مهاجرت CO_۲ در توده‌سنگ درزه‌دار نمودند. جریان دوفازی برای خمیره و درزه‌ها در نظر گرفته شد. خمیره و درزه‌ها به طور جداگانه به شبکه لوله معادل تبدیل شدند و در نهایت مدل توام برای شبکه لوله ایجاد شد. معادلاتی برای محاسبه چگالی و دیسکوزیته CO_۲ در طول فرآیند تزریق توسعه داده شد. آنها بازشدگی درزه‌ها را ثابت در نظر گرفتند. مدل توسعه داده شده توسط آنها ساده و حساس به مش‌بندی نیست. مدل توسعه داده شده توسط مقایسه با دیگر روش‌های عددی اعتبارسنجی شد. مثال - های عددی نشان داد که درزه‌ها تاثیر بسیار مهمی بر توزیع CO_۲ در توده سنگ دارند.

^۱ Hyman

^۲ Huang

^۳ Ren

در جدول ۳-۳ خلاصه‌ای از مدل‌های DFN ساخته شده در سال‌های اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال سیال در توده‌سنگ درزه‌دار، ارائه شده است.

با بررسی پیشینه مطالعات انجام شده در جدول ۳-۳، مشخص می‌شود که در تمام تحقیقات انجام شده ساده‌سازی‌هایی در خصوص انجام مطالعه در سطح دو بعدی، در نظر گرفتن شبکه درزه با شکل ساده (مستطیل یا دایره‌ای شکل)، فرض بازشدگی ثابت و عدم در نظر گرفتن همبستگی آماری ویژگی پایایی و بازشدگی درزه صورت گرفته است.

جدول ۳-۳: مهم ترین مدل های DFN ساخته شده در دهه های اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال سیال

ردیف	پژوهشگر/سال	موضوع و نتایج تحقیق
۱	Meyer and Einstein, ۲۰۰۲	با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده از تعدادی از تونل ها در ناحیه بوستون اقدام به مدل سازی سه بعدی تصادفی سیستم درزه منطقه و شناسایی زیرشبکه های متصل در مدل نمودند. در این کار بررسی جریان مد نظر نبوده و تنها زیرشبکه ها از لحاظ اتصال هندسی بررسی شده اند.
۲	Ito and Seol, ۲۰۰۳	با توسعه شبیه ساز شبکه درزه مجزای سه بعدی FracMesh و کاربرد نرم افزار عددی جریان چندفازی TOUGH۲، اقدام به مطالعه انتقال جریان در محیط متخلخل درزه دار با در نظر گرفتن برهم کنش های ماتریس-درزه نمودند. در این برنامه یک درزه به صورت صفحه ی مستطیلی چهار گوش با مساحتی محدود تعریف شده است. بازشدگی درزه به طول درزه نیز بر اساس یک رابطه تجربی توانی وابسته شده است.
۳	شریف زاده و همکاران، ۱۳۸۵	به تحلیل هیدرولیکی- هیدرومکانیکی توده سنگ اطراف تونل با استفاده از روش المان مجزا در قالب برنامه UDEC پرداختند. در روش المان مجزا، درزه ها بصورت دو صفحه موازی با بازشدگی ثابت شبیه سازی شدند.
۴	Baghbanan and Jing, ۲۰۰۷	با توسعه یک کد جدید برای تولید درزه به صورت دوبعدی وبا کاربرد نرم افزار تجاری UDEC به تحلیل جریان پرداختند. آنها همبستگی طول و بازشدگی درزه را در نظر گرفتند.
۵	Bodin, ۲۰۰۷	توسعه کد جدید به نام SOLFRAC و شناسایی شبکه درزه های متصل و ایجاد شبکه لوله معادل انجام شد. البته بازشدگی درزه ها ثابت در نظر گرفته شد. همچنین کلیه مدل سازی ها در فضای دوبعدی انجام شده است.
۶	Iding and Ringrose, ۲۰۰۸	بر روی اجرای استراتژی پایش جامع و مدل سازی رفتار تزریق CO ₂ به منظور اطمینان از ذخیره سازی بلندمدت ایمن تمرکز نمودند. در این مقاله پس از ساخت مدل DFN از درزه های موجود در سایت، بسته نرم افزاری تجاری Eclipse برای شبیه سازی جریان و بررسی تغییرات ویژگی های درزه بر حرکت CO ₂ بکار برده شد.
۷	Bang et al., ۲۰۱۲	یک مدل DFN سه بعدی را به منظور شبیه سازی ویژگی های هیدرولیکی توده سنگ گرانیتی اطراف تونل تحقیقاتی زیرزمینی KURT در کره جنوبی توسعه دادند. مدل DFN با فرض همبستگی بین طول و بازشدگی درزه ها و مسیر جریان دوزنقه ای در درزه ها ایجاد شد. فرض شده که طول درزه از توزیع نمایی منفی و بازشدگی درزه ها از توزیع لاگ نرمال پیروی می کند.
۸	Parashar and Reeves, ۲۰۱۲	بر روی پیچیدگی های محاسباتی مربوط به مدل های DFN در شبیه سازی جریان در شبکه های درزه بزرگ مقیاس تمرکز نمودند. آنها روش های تکرار شونده شبه فضایی Krylov را به عنوان مهمترین روش ها برای حل سیستم های بزرگ در نظر گرفتند. این مطالعه محدود به تحلیل ویژگی های ماتریس و موارد محاسباتی مربوط به شبکه های درزه دوبعدی می شود.
۹	جوادی و شریف زاده، ۱۳۹۱	یک برنامه کامپیوتری محاسباتی تحت عنوان FNETF برای ساخت شبکه درزه های مجزا و تحلیل عددی دوبعدی جریان آرام در شبکه شکستگی (با استفاده از روش المان محدود) در محیط برنامه نویسی MATLAB توسعه دادند. در نهایت با استفاده از این برنامه رفتار جریان آب ورودی به مغار نیروگاه سیاه بیشه مطالعه شد.

ادامه جدول ۳-۳: برخی از مدل‌های DFN ساخته شده در سال‌های اخیر به منظور تخمین جریان و انتقال

سیال

با هدف تعیین مقدار نفوذپذیری گاز CO ₂ ، مدل DFN ای تحت عنوان AM تهیه نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که مدل‌های DFN تجاری به طور کلی مقادیر نفوذپذیری را کمتر تخمین می‌زنند (در حدود دو برابر) و ناهمسانگردی‌های وابسته به گسل را در نظر نمی‌گیرند. آنها از نرم‌افزارهای تجاری Petrel و Comsol به منظور ساخت مدل DFN و تحلیل جریان استفاده نمودند. همچنین بازشدگی درزه‌ها ثابت در نظر گرفته شد.	Bigi et al., ۲۰۱۳	۱۰
روش برش بلوک سه بعدی برای اولین بار برای شناسایی هر دو مورد روابط اتصال بین درزه‌ها و مسیرهای جریان در DFN‌های پیچیده توسط آنها اتخاذ شده است. در این روش، فرض می‌شود سیال از طریق مرزهای بلوک‌ها جریان می‌یابد. در مقایسه با روش‌های دیگر، شیوه بکار رفته توسط آنها، در ارتباط با تعداد نسبتاً کمتری درزه صادق است. در مدل آنها، درزه‌ها، صاف، موازی و دارای بازشدگی ثابت فرض شدند.	Zhang and Yin, ۲۰۱۴	۱۱
به منظور شبیه‌سازی جریان آب در شبکه درزه مجزا، یک روش شبکه لوله مینی بر تیوری گراف (GPNM) پیشنهاد دادند. هر درزه در شبکه درزه به صورت یک لوله وزن‌دار با گره شروع و گره پایان در گراف جهت دار رفتار می‌کند. مقادیر فشارهای آب و نرخ‌های جریان در شبکه توسط حل یک سیستم از معادلات خطی غیرهمگن بدست می‌آید.	Li et al., ۲۰۱۴	۱۲
اقدام به توسعه مدل شبکه شکستگی‌های مجزای (DFN) سه بعدی و مدل تولید مش ساخت‌نیافته (UMG) به منظور شبیه‌سازی جریان و انتقال CO ₂ از سیستم‌های سنگی درزه‌دار نمودند. آنها نرم‌افزار تجاری TOUGH۲ را برای تحلیل جریان سیال بکار بردند. در این مطالعه بازشدگی درزه‌ها ثابت فرض شده است.	Lee and Ni, ۲۰۱۵	۱۳
یک مدل فراکتال برای بررسی نفوذپذیری معادل شبکه‌های درزه دوعدی ایجاد نمودند و رابطه بین بعد فراکتال و نفوذپذیری معادل تحلیل شد. نتایج مطالعه آنها نشان داد که نفوذپذیری معادل شبکه درزه می‌تواند به طور قابل توجهی توسط آشفتگی جریان سیال، بازشدگی درزه‌ها و عدد تصادفی بکار رفته برای تولید توزیع طول فراکتال درزه‌ها در شبکه تاثیر می‌پذیرد.	Liu et al., ۲۰۱۵	۱۴
یک بسته محاسباتی برای تولید DFN سه بعدی و شبیه‌سازی جریان و انتقال به نام DFNWORKS تولید نمودند. در این بسته پس از ایجاد DFN با استفاده از ابزار تجاری مش‌بندی LAGRIT، مثلث‌بندی شبکه انجام می‌شود. سپس نرم‌افزار تجاری PFLOTRAN برای محاسبه فشار و جریان در شبکه بکار می‌رود.	Hyman et al., ۲۰۱۵	۱۵
آنها برای تخمین نفوذپذیری توده‌سنگ درزه‌دار اقدام به ساخت مدل سه بعدی شبکه درزه مجزا نمودند. توابع توزیع آماری برای مدل‌سازی بازشدگی استفاده شده است. درزه‌ها به صورت دیسک‌های دایره‌ای حل جریان توسط نرم‌افزار ۳DEC انجام شد. در مدل آنها شناسایی درزه‌های متصل مدنظر قرار داده نشده است.	Huang et al., ۲۰۱۶	۱۶
با استفاده از نرم افزار تجاری مدل ساز شبکه درزه اقدام به شبیه‌سازی مهاجرت CO ₂ در توده سنگ درزه‌دار نمودند. خمیره و درزه‌ها به طور جداگانه به شبکه لوله معادل تبدیل شدند و در نهایت مدل توام برای شبکه لوله ایجاد شد. آنها درزه‌ها را پلی‌گونی و بازشدگی را ثابت فرض نمودند.	Ren et al., ۲۰۱۷	۱۷

۳-۶- نشت گاز از کارگاه استخراج UCG

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 (Pardala and Stanczyk, ۲۰۱۵) و یا آزمایشگاهی (Yang and Zhang, ۲۰۰۹) برای بررسی نشت گاز در توده سنگ‌های اطراف استفاده کرده‌اند. اکثر این تحقیقات نیز با در نظر گرفتن CO_2 به عنوان سیال انجام شده است که با متان از لحاظ ساختاری متفاوت است.

در تحقیق انجام شده توسط یانگ^۱ در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۵ بر اساس آزمایش‌های آزمایشگاهی، قوانین تحلیلی حرکت گاز در گازکردن زیرزمینی زغال (UCG) تحلیل شده است. مدل‌های ریاضی نشت غیرخطی سه بعدی سیال با استفاده از روش اجزای محدود ایجاد شده است (Yang, ۲۰۰۳). برخی از مطالعات نیز از تاثیر 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 به طور خاص بر سایر عوامل انتشار گاز از جمله ویژگی‌های فیزیکی لایه زغالی (Liu et al., ۲۰۰۷) و بافت متخلخل محیط اطراف (Solcova et al., ۲۰۰۹) تمرکز شده است.

در این تحقیق، با توجه به اهمیت نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور UCG و ملاحظات مربوط به آب‌های زیرزمینی، بر مدل سازی نشت گاز بر اساس مدل جریان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) سه بعدی تمرکز شده است که در مطالعات پیشین تاکنون به آن پرداخته نشده است.

۳-۷- جمع‌بندی

در این فصل، در ابتدا به روش مدل‌سازی تصادفی شبکه درزه‌ها (DFN) به عنوان بهترین روش شبیه‌سازی تصادفی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها که در حال حاضر موجود است، از لحاظ پیشینه مطالعات و انواع کاربردهای صورت گرفته، پرداخته شد. در ادامه، مبحث جریان و انتقال سیال در شبکه درزه‌های

^۱ Yang

مجزا مورد بررسی قرار گرفت. در این زمینه انواع روش‌های مدل‌سازی جریان سیال در سنگ‌های درزه‌دار شامل مدل‌های جریان محیط متخلخل معادل پیوسته، شبکه درزه مجزا و محیط متخلخل درزه‌دار (FPM) معرفی شدند و همچنین روش‌های شبیه‌سازی جریان سیال در مدل DFN شامل ارتقای ویژگی‌های شبکه درزه و شناسایی شبکه‌های درزه متصل با استفاده از روش‌های شبکه لوله و شبکه کانال تشریح شدند. در زمینه شبیه‌سازی جریان سیال در سنگ، بررسی‌ها نشان می‌دهد که بسیاری از بسته‌های نرم‌افزاری معروف، مانند FracMan/MAFIC و HydroGeoSphere نیز در کنترل صحیح پارامتر تقاطع‌های درزه با شکست مواجه می‌شوند. در حقیقت، حتی جزییات مطالب در این خصوص در کتاب‌های راهنمای آنها وجود ندارد. روش شبکه لوله از لحاظ پیشینه و فرمول‌بندی در ادامه به تفصیل مورد بررسی واقع شد. در کاربرد این شیوه به یک الگوریتم قوی نیاز است که قادر به شناسایی روابط اتصال بین درزه‌ها باشد. آن همچنین باید قادر به بدست آوردن همزمان مسیرهای جریان در شبکه درزه پیچیده باشد. سپس به بررسی پیشینه مطالعات انجام شده در زمینه مدل‌سازی عددی جریان سیال در توده‌سنگ پرداخته شد. نتایج بررسی‌های انجام شده نشان داد که در تمام تحقیقات انجام شده ساده‌سازی‌هایی در خصوص انجام مطالعه در سطح دو بعدی، در نظر گرفتن شبکه درزه با شکل ساده (مستطیل یا دایره‌ای شکل)، فرض بازشدگی ثابت و عدم در نظر گرفتن همبستگی آماری ویژگی پایایی و بازشدگی درزه صورت گرفته است. لازم به ذکر است که اکثر بررسی‌های انجام شده در خصوص انتقال سیال از شبکه شکستگی‌ها به مدل‌سازی گاز CO₂ پرداخته شده است. در انتها در خصوص نشت گاز از درزه و شکاف‌های اطراف کارگاه UCG بررسی‌هایی انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهند که مطالعات بسیار کمی در این زمینه وجود دارد و اکثر این مطالعات اندک نیز از روش‌های اندازه‌گیری و یا آزمایشگاهی برای بررسی نشت گاز در توده‌سنگ‌های اطراف کارگاه UCG استفاده کرده‌اند.

فصل چهارم

تهیه و توسعه مدل DFN هیدرولیکی به

منظور بررسی جریان سیال

جریان سیال در توده‌سنگ‌های ناپیوسته با خمیره نفوذناپذیر، غالباً توسط ویژگی‌های درزه‌ها شامل بازشدگی، جهت، پایایی، فاصله‌داری و پایایی کنترل می‌شود. از طرفی بدلیل این که توده‌سنگ از مواد طبیعی تشکیل شده، ضروری است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها با ماهیت تصادفی تعریف شوند. از بهترین روش‌های دارای توانایی شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌های مجزا (DFN) است. هر چند این روش از اوایل دهه ۱۹۷۰ پدید آمده است اما در چند سال گذشته با دستیابی به توانایی گسترده‌تر قدرت محاسباتی، توسعه بیشتری یافته و قابلیت کاربرد پیدا کرده است. این مدل‌ها برای بررسی دامنه گسترده‌ای از مسایل هیدرولیکی و ژئومکانیکی در ارتباط با توده‌سنگ‌های درزه‌دار مناسب هستند. امروزه برای مدل‌سازی تصادفی توده‌سنگ، برخی نرم‌افزارهای تجاری همچون FracMan، FRACA و ۳FLO موجود هستند که در زمینه تحلیل مکانیکی، مدل‌سازی جریان و تعیین نفوذپذیری در سنگ‌های شکسته، کاربرد دارند. اما متأسفانه تاکنون در کشور نرم‌افزار تولید شبکه درزه تصادفی به صورت سه بعدی و مناسب برای تحلیل‌های مکانیکی وجود نداشته است. همچنین در حال حاضر بدلیل تحریم‌های موجود، امکان خریداری این نرم‌افزارها نیز وجود ندارد.

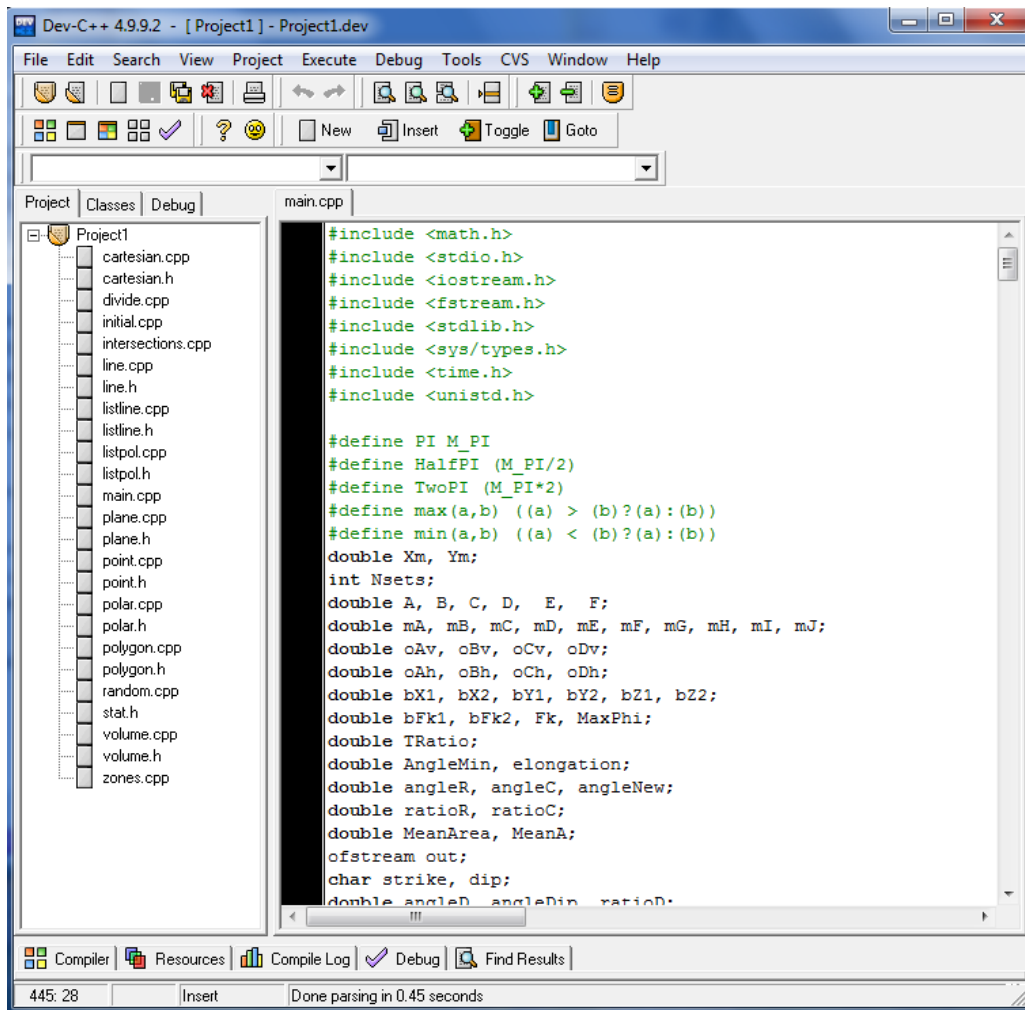
در این فصل از پایان نامه، هدف ساخت مدل DFN مناسب برای تحلیل‌های هیدرولیکی است. همچنین با هدف بومی‌سازی و تکمیل نرم‌افزارهای موجود، برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} که پیش از این برای تحلیل‌های مکانیکی تهیه شده بود، برای ساخت DFN هیدرولیکی توسعه داده شده است. برای این منظور مولفه بازشدگی درزه‌ها به سایر ویژگی‌های هندسی درزه شامل شیب، جهت شیب، فاصله داری و پایایی اضافه شده است. علاوه بر این به منظور ساخت مدل DFN دقیق‌تر برای تحلیل‌های هیدرولیکی، همبستگی بین بازشدگی و طول درزه در برنامه در نظر گرفته شده که در اکثر برنامه‌ها و نرم‌افزارها وجود ندارد. همچنین همانند اکثر مدل‌سازهای DFN، این برنامه کامپیوتری به منظور شناسایی شبکه‌های درزه متصل، توسعه داده شده است. در نهایت DFN-FRAC^{3D} برای تبدیل شبکه

درزه‌های متصل به شبکه لوله معادل توسعه داده شده است. این نسخه از برنامه کامپیوتری مذکور تحت عنوان نسخه ۲,۱,۱ معرفی شده است. به منظور آزمایش کارایی برنامه کامپیوتری مذکور، این برنامه بر روی یک مثال فرضی اجرا شده است.

۲-۴- معرفی برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} (Ver ۱,۰,۱)

برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} بر اساس مدل ونزیانو و به زبان برنامه‌نویسی ++C نوشته شده و متشکل از ۱۴ کلاس، ۱۱۰ تابع و بیش از ۳۰۰۰ خط برنامه است (شکل ۴-۱). این برنامه اکثر قابلیت‌های نرم‌افزارهای تجاری و برنامه‌های کامپیوتری که تاکنون توسعه داده شده‌اند، از جمله FracMan را دارا است. این برنامه با هدف تحلیل‌های مکانیکی ساخته شده و برای انجام تحلیل‌های هیدرولیکی باید به‌روزرسانی و قابلیت‌های دیگری به نرم‌افزار افزوده شود (نوروزی، ۱۳۹۳).

این برنامه قادر است با استفاده از داده‌های برداشت شده، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش گرافیکی از شبکه ناپیوستگی‌ها را در راستاهای مختلف ارائه دهد. برخی ابزارهای نمونه‌برداری مانند نمونه‌برداری صفحه‌ای و مغزه‌ای 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 درزه‌ها بر روی مقاطع است. برنامه تهیه شده می‌تواند به منظور 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 می‌گیرند را مدل کند. این برنامه، توابع توزیع مربوط به پایایی، شیب و جهت شیب درزه را به عنوان ورودی دریافت کرده و آنها را در محیط مورد نظر با ابعاد و آرایش‌های مختلف تولید کرده و همچنین دارای قابلیت پردازش با آرایش‌های زیاد است. در این شرایط امکان ارائه سیستم‌های درزه طبیعی در توده‌سنگ به صورت واقعی‌تر فراهم می‌شود (نوروزی، ۱۳۹۳).



شکل ۴-۱: برنامه کامپیوتری $DFN-FRAC^{3D}$ قابل اجرا در کامپایلر Dev-C++ (نوروزی، ۱۳۹۳)

در $DFN-FRAC^{3D}$ ، درزه‌ها ناپیوستگی‌های صفحه‌ای پلی‌گون شکل محدب هستند که به طور تصادفی در فضای سه بعدی جهت یافته‌اند. این برنامه، فرآیندهای تصادفی خطی و صفحه‌ای پواسونی را ترکیب می‌کند. یک دسته درزه با کاربرد متوالی چهار فرآیند تصادفی در فضای مدل سازی تولید می‌شود (نوروزی، ۱۳۹۳):

الف- فرآیند اول: شبکه پواسونی همگن از صفحات

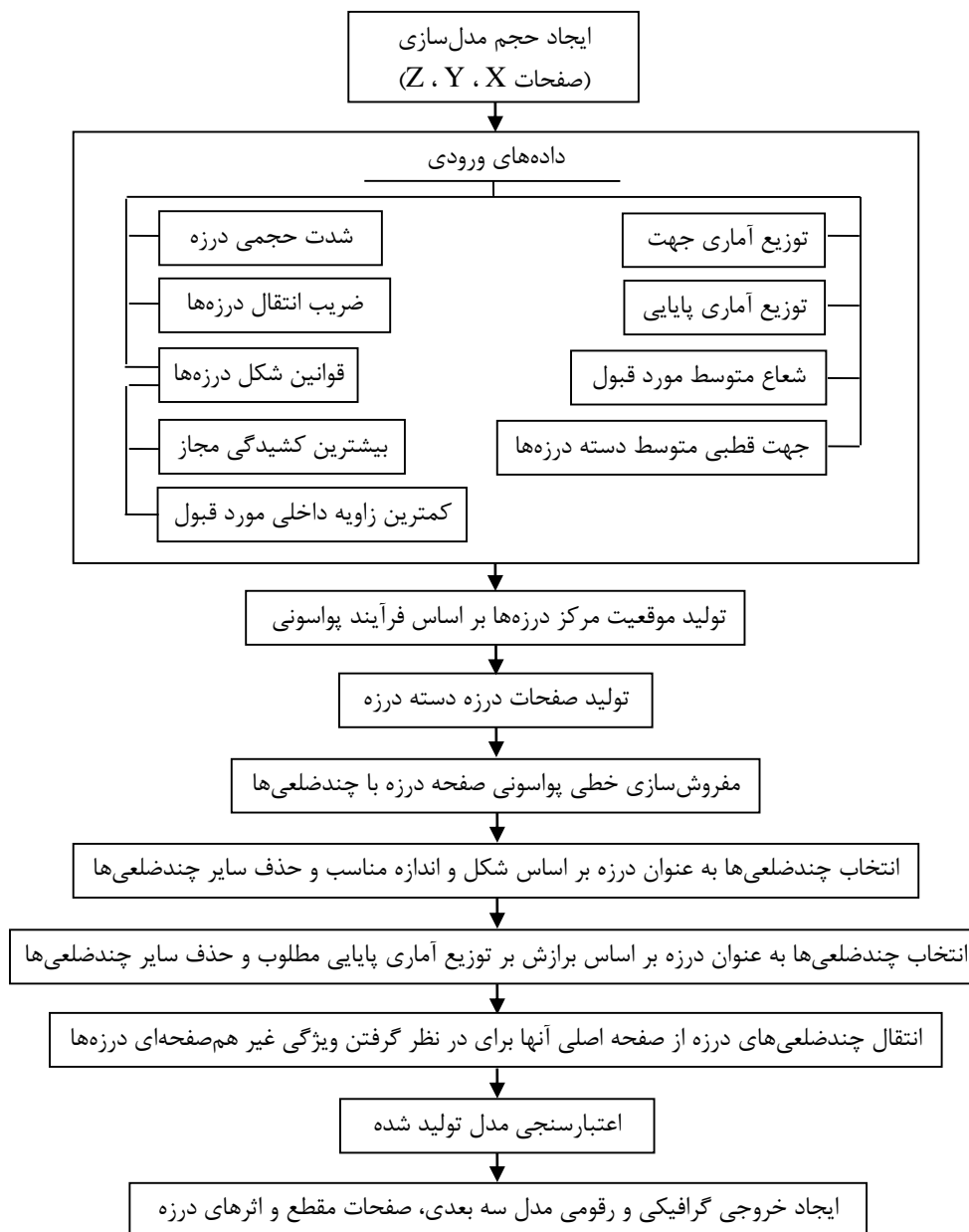
ب- فرآیند دوم: تقسیم هر صفحه به ناحیه درزه‌دار و ناحیه سنگ سالم مکمل آن توسط شبکه خطی همگن پواسونی

پ- فرآیند سوم: علامت‌گذاری غیرهمگن پلی‌گون‌های تشکیل شده در مرحله قبل بر اساس اندازه و

شکل

ت- فرآیند چهارم: انتقال تصادفی پلی‌گون‌ها (یا بخشی از پلی‌گون‌ها) که به عنوان درزه‌دار در نزدیکی موقعیت اصلی‌شان علامت‌گذاری شده‌اند.

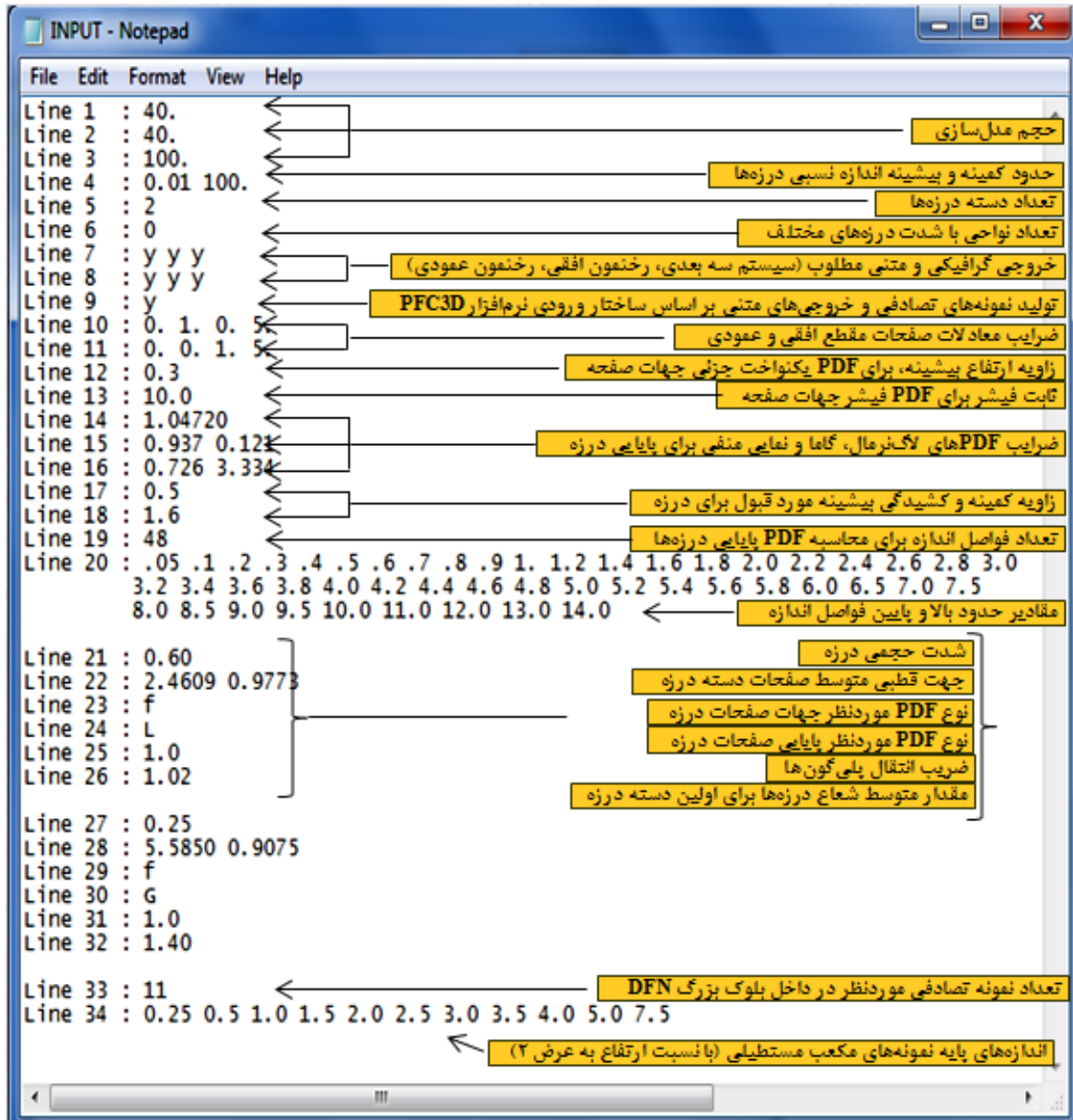
سیستم درزه، متشکل از دسته درزه‌ها، با تکرار فرآیندهای ارائه شده، ایجاد می‌شود. الگوریتم ساخت مدل برای یک دسته درزه در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: روندنمای ساخت مدل ارائه شده (نوروزی، ۱۳۹۳)

۴-۲-۱- ورودی برنامه

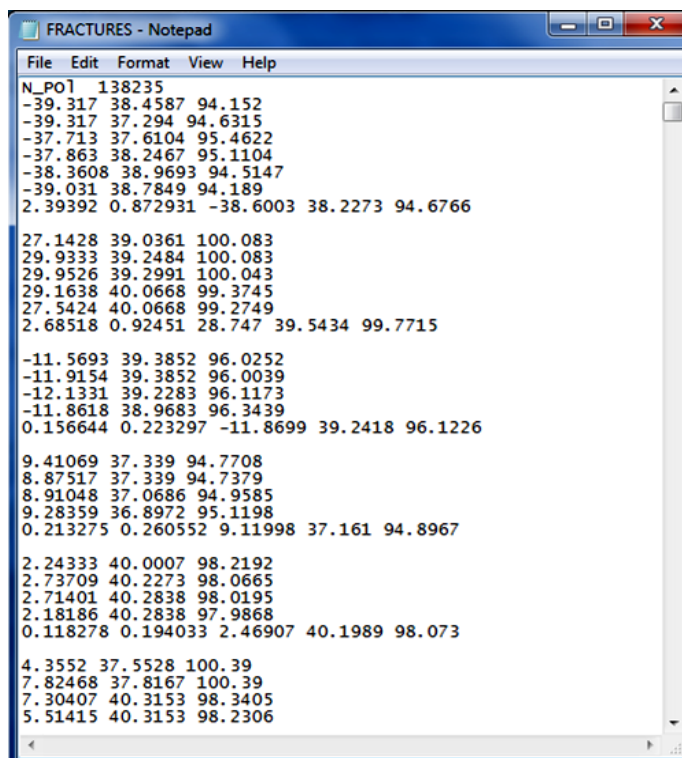
ورودی برنامه DFN-FRAC^{3D} به صورت یک فایل متنی است که ساختار آن در شکل ۴-۳، نشان داده شده است.



خروجی برنامه به دو صورت متنی (رقومی) و تصویری است.

۴-۲-۲-۱- خروجی متنی

خروجی متنی برنامه از آغاز برنامه در چند فایل جداگانه بر حسب نوع اطلاعات ذخیره می‌شود. در صورتی که به هر دلیلی، برنامه در حین اجرا متوقف شود، نتایج تولید شده در فایل‌ها قابل بازیابی است. خروجی‌های متنی ذخیره شده به صورت ساختاربندی شده در سطرهای مختلف چاپ می‌شود. در فایل مشخصات چندضلعی‌های تولید شده (شکل ۴-۴)، در سطر اول تعداد چندضلعی‌ها و سپس برای هر چندضلعی به طور جداگانه در هر سطر مختصات یک راس از چندضلعی (X,Y,Z) و در خط آخر به ترتیب مساحت، شعاع معادل و مختصات مرکز چندضلعی ایجاد می‌شود.



```
File Edit Format View Help
N_PO1 138235
-39.317 38.4587 94.152
-39.317 37.294 94.6315
-37.713 37.6104 95.4622
-37.863 38.2467 95.1104
-38.3608 38.9693 94.5147
-39.031 38.7849 94.189
2.39392 0.872931 -38.6003 38.2273 94.6766

27.1428 39.0361 100.083
29.9333 39.2484 100.083
29.9526 39.2991 100.043
29.1638 40.0668 99.3745
27.5424 40.0668 99.2749
2.68518 0.92451 28.747 39.5434 99.7715

-11.5693 39.3852 96.0252
-11.9154 39.3852 96.0039
-12.1331 39.2283 96.1173
-11.8618 38.9683 96.3439
0.156644 0.223297 -11.8699 39.2418 96.1226

9.41069 37.339 94.7708
8.87517 37.339 94.7379
8.91048 37.0686 94.9585
9.28359 36.8972 95.1198
0.213275 0.260552 9.11998 37.161 94.8967

2.24333 40.0007 98.2192
2.73709 40.2273 98.0665
2.71401 40.2838 98.0195
2.18186 40.2838 97.9868
0.118278 0.194033 2.46907 40.1989 98.073

4.3552 37.5528 100.39
7.82468 37.8167 100.39
7.30407 40.3153 98.3405
5.51415 40.3153 98.2306
```

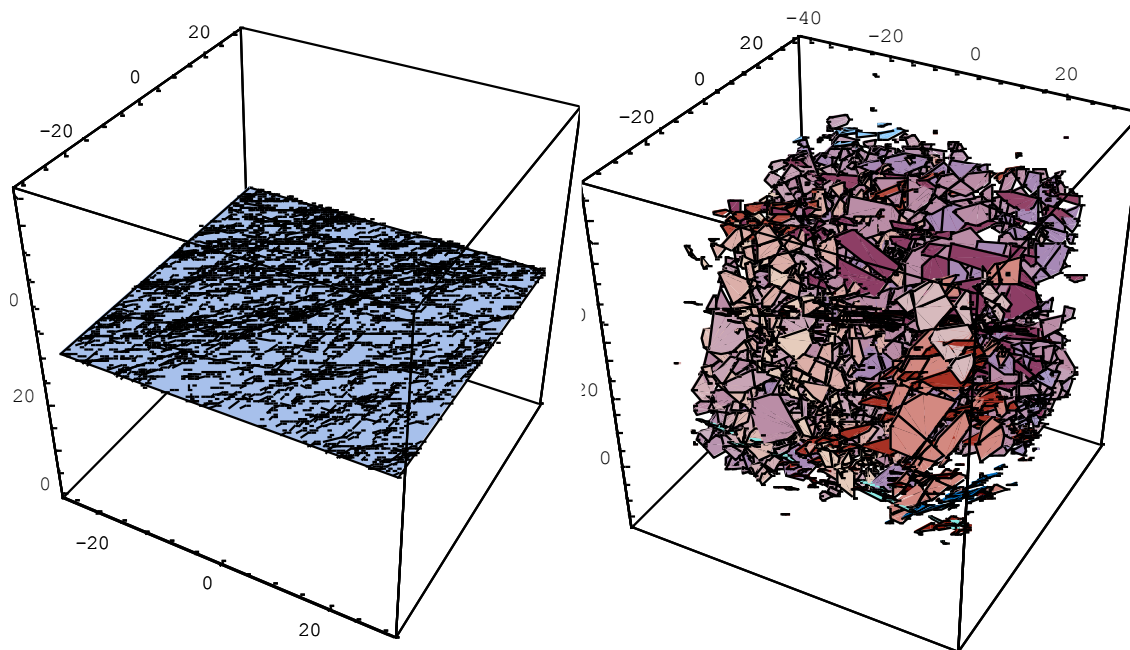
شکل ۴-۴: فایل خروجی مشخصات چندضلعی‌های تولید شده (نوروزی و همکاران، ۲۰۱۳)

در $DFN-FRAC^{3D}$ ، ساختار خروجی قابل اصلاح است، به گونه‌ای که بتواند به عنوان ورودی مستقیم برای نرم‌افزارهای عددی قابل استفاده باشد. در ویرایش کنونی $DFN-FRAC^{3D}$ ، برنامه قادر است فایل مشخصات درزه که به طور مستقیم توسط نرم‌افزار اجزای مجزای PFC^{3D} به کار می‌رود را ایجاد کند.

همچنین ویژگی‌های آماری درزه‌ها و خطوط اثر صفحات مقطع در فایلی دیگر ذخیره می‌شود. در این فایل ویژگی‌های آماری متوسط و انحراف استاندارد مساحت درزه‌ها و طول‌های خطوط اثر درزه‌ها به علاوه‌ی مقادیر شدت درزه P_{21} و P_{22} محاسبه و نشان داده می‌شوند. سرانجام در $DFN-FRAC^{3D}$ ابزاری برای محاسبه توزیع اندازه‌های تولید شده، فراهم شده است. توسط این ابزار، اطلاعات اندازه درزه به صورت جفت‌های (۱) حدفاصل (بر حسب متر مربع) و (۲) تعداد درزه‌ها در فاصله‌ی اندازه تعریف شده توسط این حدفاصل لیست می‌شود.

۴-۲-۲-۴- خروجی تصویری

$DFN-FRAC^{3D}$ قادر است هم‌زمان با تولید خروجی متنی، توسط برنامه توسعه داده شده در محیط ممتیکا شبکه درزه‌های تولید شده را نمایش دهد. شکل ۴-۵ نمونه‌ای از شبیه‌سازی شبکه درزه توده‌سنگ اطراف تونل دسترسی به گالری سد رودبار لرستان، توسط $DFN-FRAC^{3D}$ را نشان می‌دهد که متشکل از دو دسته درزه اصلی و ۱۳۸۳۵۸ درزه در محدوده‌ای به ابعاد $۶۰ \times ۶۰ \times ۶۰$ مترمکعب است. در این شکل مقطع ایجاد شده در جهت افقی و در ارتفاع ۳۰ متری نیز نشان داده شده است. از قابلیت‌های برنامه، توانایی چرخش مدل و مشاهده وضعیت درزه‌ها از زوایای مختلف است. همانطور که بیان شد، در $DFN-FRAC^{3D}$ قابلیت ایجاد مقطع با موقعیت و جهت‌یافتگی دلخواه وجود دارد و کاربر قادر است وضعیت دوبعدی شبکه درزه‌ها را در هر جهتی بررسی نماید. این امکان در مطالعات حفر تونل که در اختیار داشتن مقاطع در برخی مناطق ضروری است، اهمیت دارد.



ب) مقطع افقی

الف) شبکه درزه سه بعدی

شکل ۴-۵: شبکه درزه تصادفی شبیه‌سازی شده توسط برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ (نوروزی، ۱۳۹۳)

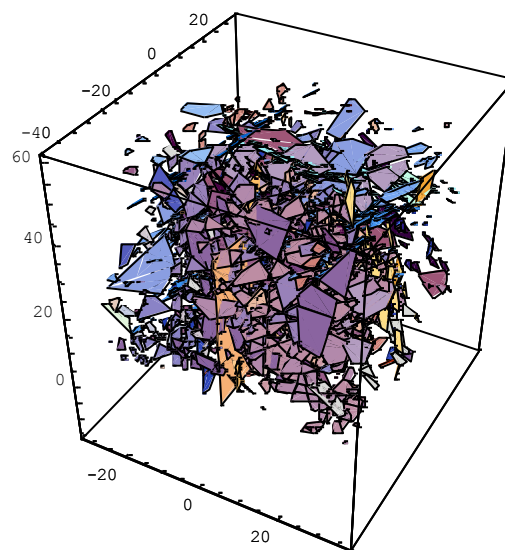
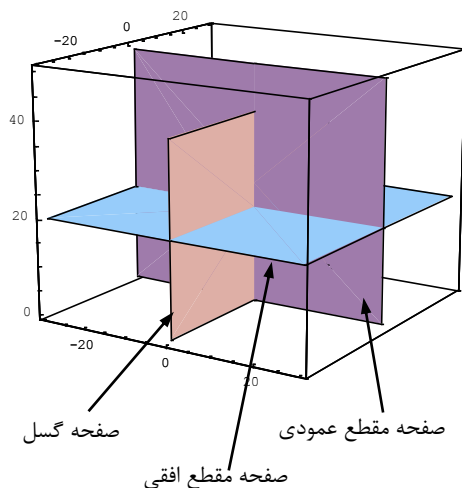
۴-۲-۳- قابلیت‌های خاص برنامه

از مهمترین قابلیت‌های $DFN-FRAC^{3D}$ (نسخه ۱,۰,۱) که سایر برنامه‌های مشابه فاقد آنها هستند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

الف- نمونه‌گیری تصادفی: برنامه تهیه شده می‌تواند به طور تصادفی نمونه‌هایی سه بعدی با تعداد و اندازه‌های دلخواه از داخل نمونه بزرگ اولیه تولید شده تهیه نماید.

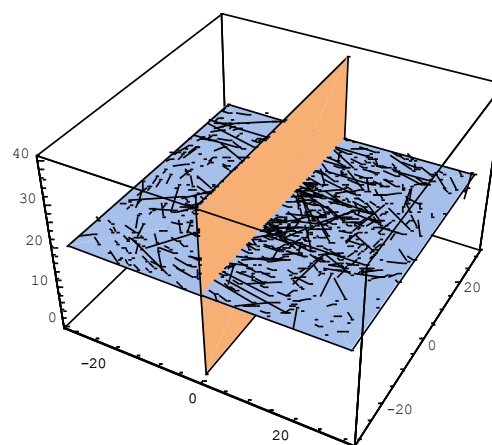
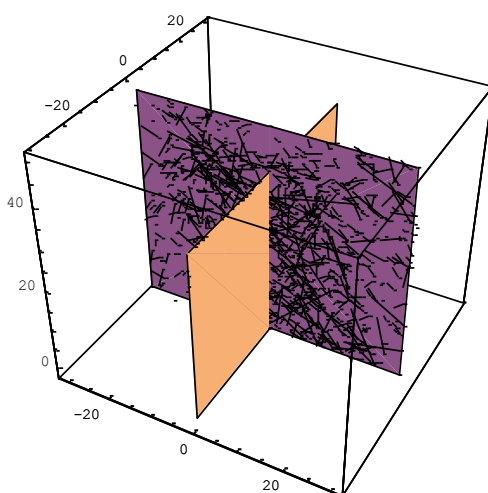
ب- مدل‌سازی ناحیه گسلی: برنامه توسعه داده شده قادر به مدل‌سازی تصادفی دوبعدی و سه بعدی سیستم‌های درزه در نواحی گسلی است که در آن چگالی درزه با فاصله از هسته گسل می‌تواند به طور نمایی یا خطی تغییر کند (شکل ۴-۶).

پ- در نظر گرفتن ویژگی غیرهم‌صفحه‌ای: این ویژگی در بسیاری از مدل‌های ارایه شده وجود ندارد و تنها مدل‌های پیچیده و برخی نرم‌افزارهای تجاری دارای این قابلیت هستند و این عامل نیز مزیت بزرگی است.



ب) گسل و صفحات مقاطع

الف) شبکه درزه سه بعدی



د) مقطع عمودی اثر درزه

ج) مقطع افقی اثر درزه

شکل ۴-۶: مدل سازی سه بعدی شبکه درزه داری در مجاورت گسل (نوروزی، ۱۳۹۳)

۴-۳- توسعه مدل DFN و برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ برای مدل سازی بازشدگی درزه

در این بخش در ابتدا روابط و معادلات حاکم برای بازشدگی و همبستگی بین بازشدگی و طول درزه
ارایه می شود و در نهایت به توسعه برنامه کامپیوتری پرداخته خواهد شد.

۴-۳-۱- ویژگی بازشدگی

یکی از ویژگی‌های هندسی درزه که تاثیر 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 توده سنگ، تابعی از بازشدگی درزه هستند (Parashar and Reeves, ۲۰۱۲).

به طور کلی فرض می‌شود که بازشدگی درزه از توزیع لاگ‌نرمال پیروی می‌کند (Baghbanan and Jing, ۲۰۰۷; Nordqvist et al., ۱۹۹۵; Bang et al., ۲۰۱۲). تابع چگالی احتمال (PDF) برای توزیع لاگ‌نرمال بازشدگی‌های درزه (h) می‌تواند به شکل کلی زیر نوشته شود:

$$f_A(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln h - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-4)$$

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

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

$$F_A(h) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf} \left[\frac{\ln h - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad (2-4)$$

که در آن erf تابع خطا است و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\operatorname{erf}(h) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^h e^{-t^2} dt \quad (3-4)$$

۴-۳-۲- همبستگی آماری بازشدگی و طول درزه

تاکنون برخی محققان بر اساس ویژگی‌های درزه منتج از برداشت‌های میدانی، روابطی بین طول اثر درزه و بازشدگی ارائه نموده‌اند (Hatton et al., ۱۹۹۴; Renshaw and Park, ۱۹۹۷). بر این اساس رابطه‌ی که بازشدگی با طول اثر توسط تابع توانی زیر تعریف شده است:

$$h = cl^\beta \quad (4-4)$$

که در آن h و l به ترتیب بازشدگی و طول اثر هستند. α و β نیز اعدادی ثابت هستند که β بین $0/5$ و 2 تغییر می‌کند. مشاهده قطعه‌های رگه‌ای ایزوله نشان می‌دهد که پهنا و طول رگه رابطه‌ای خطی با یکدیگر ($\beta=1$) دارند، در حالیکه برای سیستم‌های درزه پیچیده‌تر، مشخصه توان در حدود $0/5$ است (Stone, 1984; Vermilye and Scholz, 1995; Johnston and McCaffrey, 1996). مطالعه الگوی درزه-گسل در ورقه‌های رسی منجر به یک رابطه مقیاسی جدید برای بازشدگی درزه (w) به عنوان تابعی از طول آن (l) ارائه شده است (Walmann et al., 1996):

$$w \approx l^{(1-\beta)/\beta} \quad (5-4)$$

بر اساس پیشینه مطالعات انجام شده، رابطه بین بازشدگی و طول درزه‌ها/گسل‌ها ممکن است که برای تمام درزه‌ها/گسل‌ها در نواحی مختلف توسط توان یکتایی ارائه نشود (Renshaw CE, Park, 1997; Johnston and McCaffrey, 1996).

مفهومی‌ترین مطالعه بر روی وابستگی بین بازشدگی و طول درزه بر روی نتایج برداشت میدانی توسط رنشا و پارک^۱ در سال ۱۹۹۷ گزارش شده است (Renshaw CE, Park, 1997). در این مطالعه، به منظور کمی کردن نتایج، با استفاده از روش مربعات حداقل، منحنی خطی-لگاریتمی چندمقیاسه بر اطلاعات برازش شده است:

$$\begin{aligned} W &= s_1(L - L_0) + W_0, \quad L \leq L_0 \\ W &= s_2(L - L_0) + W_0, \quad L > L_0 \end{aligned} \quad (6-4)$$

که در آن W لگاریتم بازشدگی، L لگاریتم طول درزه و s_1 و s_2 ضرایب مقیاس هستند. روابط به دست 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 و طول درزه‌ها حقیقتاً

^۱ Renshaw and Park

همبسته هستند، حتی اگر تابع همبستگی جهانی معتبری وجود نداشته باشد (Baghbanan and Jing, ۲۰۰۷).

با فرض این که تابع چگالی احتمال برای بازشدگی های درزه توزیع لاگ نرمال (h) ، $f_A(h)$ باشد، تابع چگالی احتمال فرو اندازه $(TPDF^1)$ برای توزیع لاگ نرمال بازشدگی های درزه به صورت زیر خواهد بود (Bang et al., ۲۰۱۲):

$$f_{TA}(h) = \frac{f_A(h)}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t) dt}, \quad h_a \leq h \leq h_b \quad (7-4)$$

که در آن h_a و h_b به ترتیب حدود بالایی و پایینی بازشدگی درزه هستند. شایان توجه است، که روش های اندازه گیری درزه دارای حدود تشخیص بالا و پایین است، توابع توزیع به طور معمول دارای خطای نمونه برداری^۲ هستند که تحت عنوان آستانه فرو اندازه^۳ شناخته می شوند. در مدل سازی عددی با استفاده از اطلاعات سیستم درزه برداشت شده، کاربرد توزیع های کوتاه شده بازشدگی های درزه و طول ها اجتناب ناپذیر است زیرا این توزیع ها پیامد مستقیم برداشت درزه برجا هستند. تابع توزیع تجمعی کوتاه شده (TCDF) برای توزیع لاگ نرمال بازشدگی به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$F_{TA}(h) = \int_{h_a}^h f_{TA}(t) dt = \frac{\int_{h_a}^h f_A(t) dt}{\int_{h_a}^{h_b} f_A(t) dt} = \frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h_b) - F_A(h_a)}, \quad h_a \leq h \leq h_b \quad (8-4)$$

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 بازشدگی های درزه (h) دارای تعداد تصادفی مشابه با TCDF برای توزیع طول درزه (l) هستند (Bang et al., ۲۰۱۲). لذا معادله همبستگی طول و بازشدگی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

^۱ Truncated Cumulative Distribution Function

^۲ sampling bias

^۳ truncation threshold

$$\frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h_b) - F_A(h_a)} = \frac{F_L(l) - F_L(l_a)}{F_L(l_b) - F_L(l_a)} \quad (9-4)$$

که در آن تابع توزیع تجمعی برای توزیع طول درزه، $F_A(h)$ تابع توزیع تجمعی برای توزیع بازشدگی درزه و l_a و l_b به ترتیب حدود بالایی و پایینی طول درزه هستند.

۴-۳-۳- توسعه برنامه DFN-FRAC^{3D}

واقعیت این است که تغییرات نفوذپذیری کلی بین مدل‌های تصادفی مختلف، وقتی که بازشدگی و طول همبسته هستند، بسیار بزرگ‌تر از وقتی است که این مقادیر ناهمبسته هستند و کاربرد غیرهمبستگی در این خصوص، ساده‌سازی در مدل‌سازی‌های عددی است (Baghbanan and Jing, ۲۰۰۷). با این حال، در اکثر مطالعات قبلی که مدل DFN را به کار گرفته‌اند، فرض شده است که هیچ همبستگی‌ای بین بازشدگی و طول درزه وجود ندارد (Bang et al., ۲۰۱۲). در این مطالعه، به منظور ساخت مدل DFN دقیق برای تحلیل‌های هیدرولیکی، همبستگی بین بازشدگی و طول درزه در نظر گرفته شده و برنامه ۲,۱,۱ DFN-FRAC^{3D} برای این هدف توسعه داده شده است.

برنامه ۲,۱,۱ DFN-FRAC^{3D} با استفاده از کاربرد توزیع‌های تجمعی نمایی منفی، لاگ نرمال و گاما برای طول و بازشدگی درزه، مقادیر بازشدگی در مقابل طول درزه را برای تمامی درزه‌ها محاسبه و در فایل جداگانه (شکل ۴-۷) چاپ می‌کند.

CENTER DIP STRIKE RADIUS APERTURE - Notepad			شعاع درزه‌ها بر حسب متر	بازشدگی درزه‌ها
File	Edit	Format	View	Help
Npo1 All Fracture 2356				
Center				
-58.504	34.3568	95.6741	dip	strike
			radius	aperture
			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 ۴-۷: خروجی مقادیر بازشدگی درزه در مقابل شعاع درزه تولید شده بر اساس همبستگی آماری آنها

۴-۴- توسعه مدل DFN و برنامه DFN-FRAC^{3D} برای شناسایی شبکه درزه‌های متصل

یکی از مشکلات روش مدل‌سازی درزه‌های مجزا تعداد بسیار زیاد درزه‌های مدل‌سازی شده در میدان هستند. تلاش برای ارزیابی تمامی درزه‌های تولید شده به طور دقیق در مدل، اغلب با محدودیت‌های حافظه سیستم روبرو می‌شود. برای تهیه مدل شبیه‌ساز جریان، تنها لازم است که چنین مدلی بتواند جریان را شبیه‌سازی کند در صورتیکه جریان محاسبه شده با جریان اندازه‌گیری شده سر زمین قابل مقایسه باشد.

برای شناسایی شبکه‌های درزه متصل، ابتدا مدل درزه استاتیکی با جزئیات زیاد دریافت می‌شود و سپس شبکه درزه‌های (DFNs) مهم برای جریان (شبکه درزه‌های متصل) در داخل مخزن در طول مراحل تولید شناسایی می‌شوند. آنهایی که ایزوله هستند یا به طور جزئی با دیگر درزه‌ها یا مرزهای ورود جریان و خروج جریان متصل هستند، حذف می‌شوند. فرآیند شناسایی درزه‌های غیرهادی، فرآیندی تکرارشونده است. این امر بدین دلیل است که حذف قطعه با نقطه انتهایی قطع شده^۱ می‌تواند دیگر قطعه‌های موجود در شبکه را به درزه ایزوله شده و یا یک قطعه با نقطه انتهایی قطع شده جدید تبدیل کند. کاربرد دقیق فرآیند حذف منجر به شبکه‌ای ساده‌تر با تعداد قابل توجه کمتری از نقاط تقاطع می‌شود.

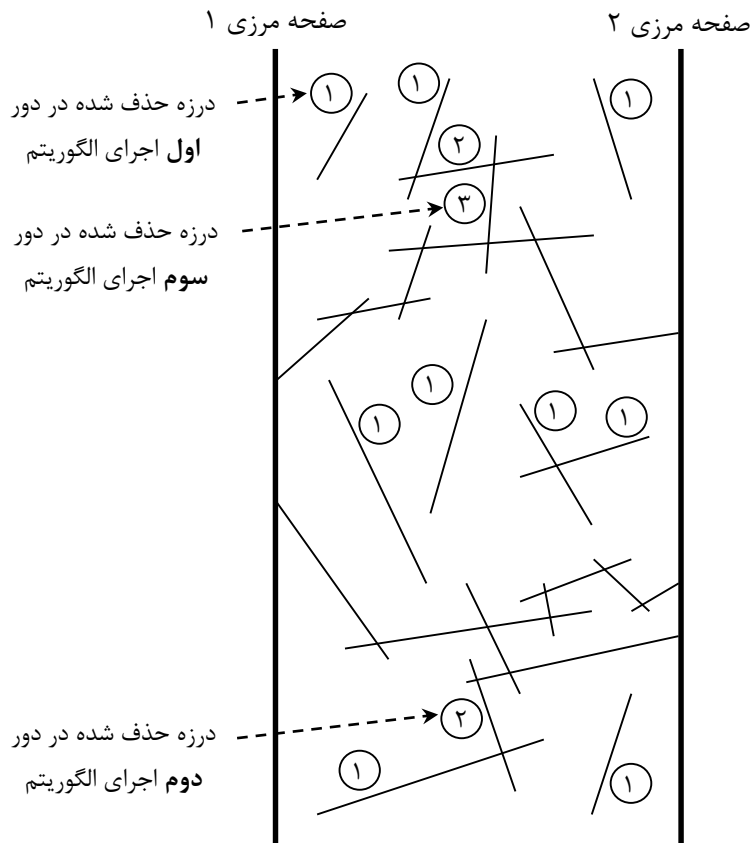
شبکه‌های DFN باقیمانده را می‌توان با استفاده از روش‌هایی مانند شبکه لوله یا کانال به مدل شبیه‌سازی جریان تبدیل نمود و به نتایج دقیقی در خصوص نفوذپذیری سیال رسید. این روش، روشی سریع است و فقط نیاز به برداشت خطوط جریان و محاسبه زمان عبور سیال دارد. مهم‌تر آن‌که، این روش قادر به شبیه‌سازی مهمترین رفتارهای مراحل اولیه تاریخچه جریان، تنها با استفاده از در نظر گرفتن شبکه‌ی ناپیوستگی‌های متصل است.

در این پایان‌نامه، نرم‌افزار DFN-FRAC^{3D} به منظور شناسایی شبکه‌های درزه متصل توسعه داده شده است. متدولوژی به کار رفته به صورت زیر است. در دور اول از ویرایش درزه‌ها، درزه‌های با انتهای باز

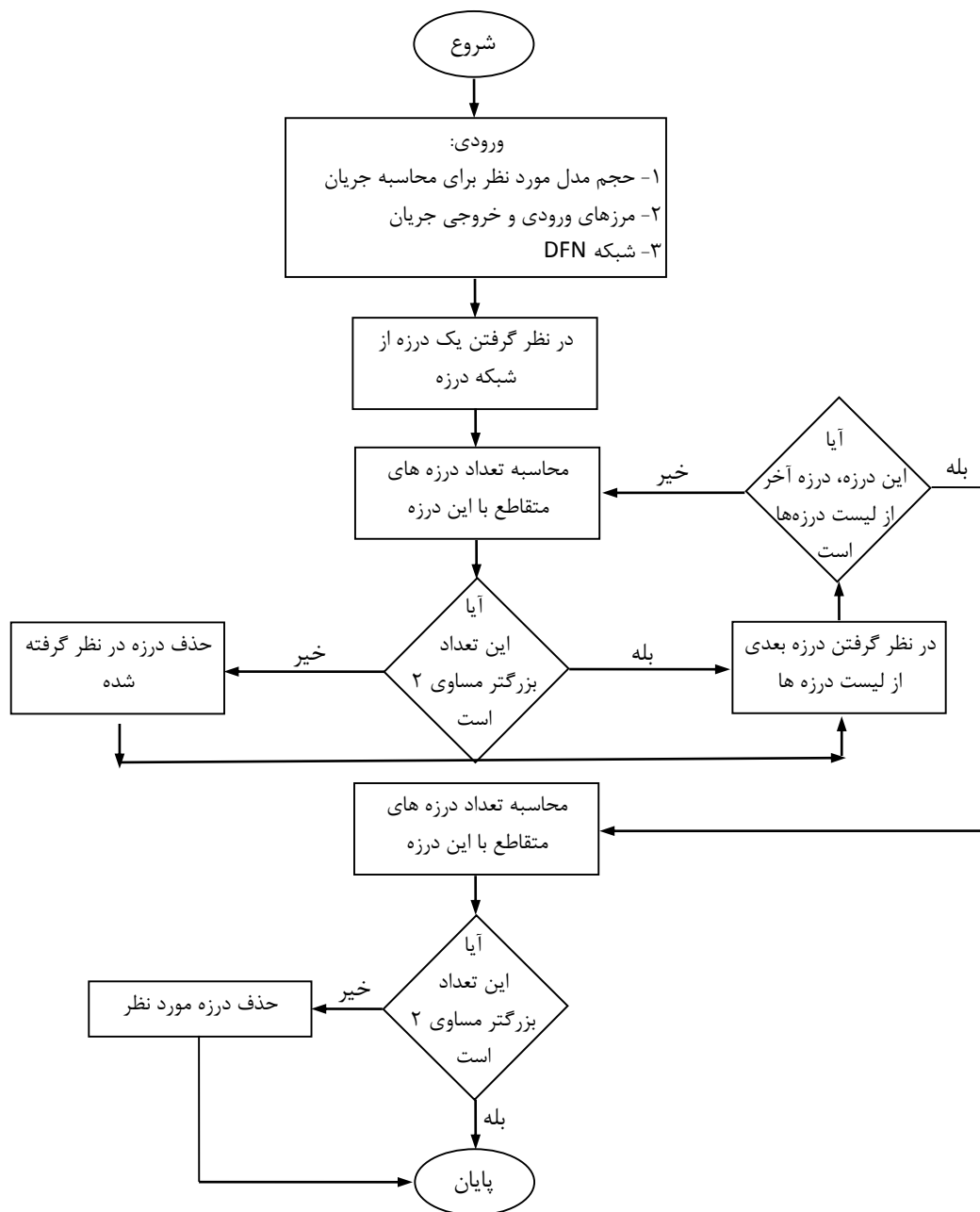
^۱ dead-end

و درزه‌های ایزوله حذف می‌شوند. این درزه‌ها با شماره ۱ در شکل ۴-۸، نشان داده شده است. معیار در نظر گرفته شده برای شناسایی این درزه‌ها، تعداد درزه‌های متصل به درزه مورد نظر است. در صورتی که تعداد درزه‌های متصل با درزه مورد نظر، بزرگتر یا مساوی ۲ باشد، آن درزه یک درزه هیدرولیکی است و در غیر این صورت آن درزه حذف می‌شود. الگوریتم به کار رفته برای توسعه نرم‌افزار DFN-^{3D} FRAC به منظور شناسایی درزه‌های هیدرولیکی در شکل ۴-۹، نشان داده شده است. در هر یک از دوره‌های بعدی از ویرایش درزه‌ها، درزه‌های با انتهای باز حذف می‌شوند. درزه‌های حذف شده در دور دوم و سوم از اجرای الگوریتم در شکل ۴-۸، به ترتیب با شماره‌های ۲ و ۳، نشان داده شده است. این فرآیند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تمامی درزه‌های با انتهای باز و به تبع آن تمامی مسیرهای بسته (غیر متصل به مرزهای جریان تعریف شده) حذف شوند. درزه‌های باقیمانده درزه‌هایی هستند که حداقل در یک مسیر متصل کننده دو صفحه مرزی نقش دارند.

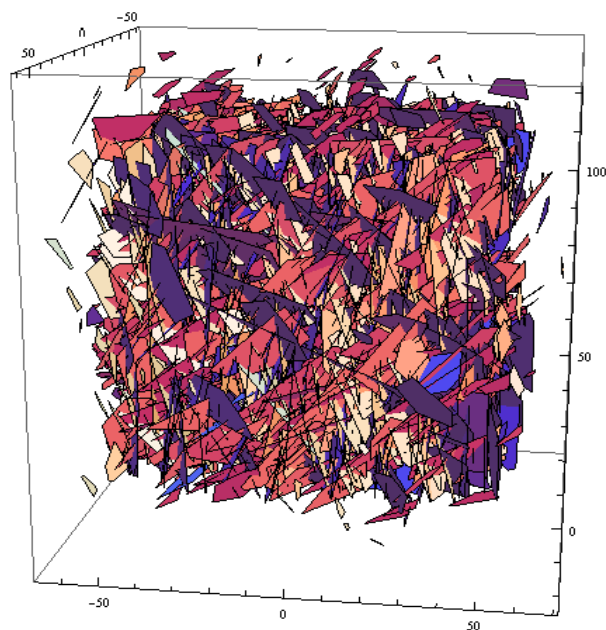
نمونه ای از اجرای مدل DFN و شبکه‌های درزه متصل شناسایی شده در آن در شکل ۴-۱۰، نشان داده شده است. ابعاد مدل بزرگ $100 \times 100 \times 100$ مترمکعب است و شامل ۴ دسته درزه و تعداد 3402 درزه می‌باشد (شکل ۴-۱۰ الف). مدل هیدرولیکی در محدوده‌ای به ابعاد 60×60 مترمربع پایه و 40 متر ارتفاع از مرکز مدل DFN انتخاب شده است. صفحات مرزی جریان، صفحات افقی پایینی ($z = 30$) و بالایی ($z = 70$) انتخاب شده است. پس از اجرای مدل هیدرولیکی، تنها تعداد 612 درزه متصل کننده مرزهای جریان شناسایی شده است (شکل ۴-۱۰ ب).



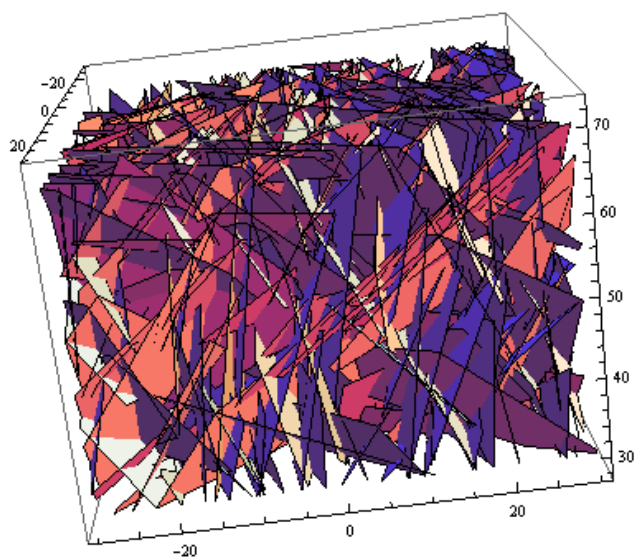
شکل ۴-۸: درزه‌های حذف شده در مراحل مختلف اجرای الگوریتم



شکل ۴-۹: الگوریتم حذف درزه های منفرد و مسیرهای بسته در مدل DFN



الف) شبکه با تمامی درزه‌های موجود،



ب) شبکه هیدرولیکی بعد از حذف درزه‌های ایزوله و

قطعه‌های با نقطه انتهایی قطع شده

شکل ۴-۱۰: مقایسه چگالی درزه در شبکه اولیه و شبکه پس از حذف درزه‌های منفرد

۴-۵- توسعه مدل DFN و برنامه DFN-FRAC^{3D} برای مدل سازی شبکه لوله

مدل سازی جریان و انتقال سیال در شبکه لوله ها به دلیل تبدیل مسایل دو بعدی و سه بعدی به یک بعدی، از لحاظ محاسباتی بسیار پربازده است. در این شیوه، یک شبکه لوله از مدل شبکه درزه مجزای سه بعدی ساخته می شود. به طور کلی، اساس روش شبکه لوله معادل جایگزینی درزه های سنگی با لوله هایی است که جریان یکسانی با درزه ها دارند. فرآیند تشکیل شبکه لوله ها در برنامه DFN-FRAC^{3D} به صورت زیر است:

۱- در نظر گرفتن یک درزه

۲- یافتن درزه / درزه های متقاطع با آن

۳- یافتن خطوط تقاطع (درزه ها با یکدیگر و درزه ها با مرزهای مدل)

۴- یافتن نقطه منصف خطوط تقاطع

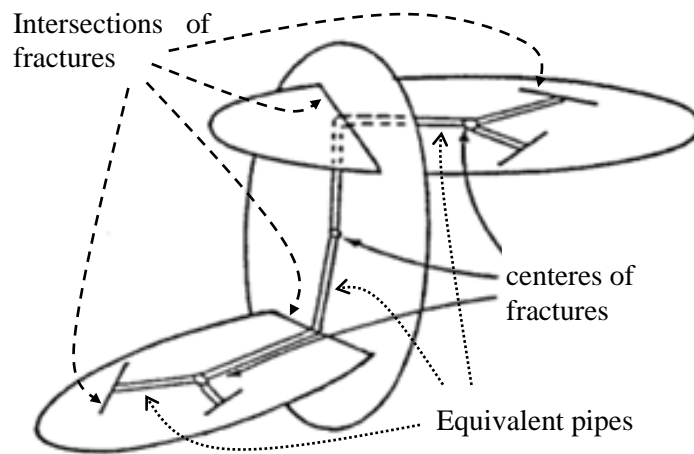
۵- ایجاد خط واصل بین نقاط منصف خطوط تقاطع و مرکز درزه (تشکیل لوله ها با مختصات ابتدا و انتها) در شکل ۴-۱۱ مدل مفهومی آن ارایه شده است.

۶- محاسبه طول لوله ها (L) و مجموع طول لوله ها (L_{tot}). فرض شده است که تمام لوله های واقع بر روی یک درزه، قطر یکسانی دارند.

۷- محاسبه قطر لوله معادل از رابطه زیر (در این حالت فرض شده که کل درزه در انتقال سیال نقش دارد):

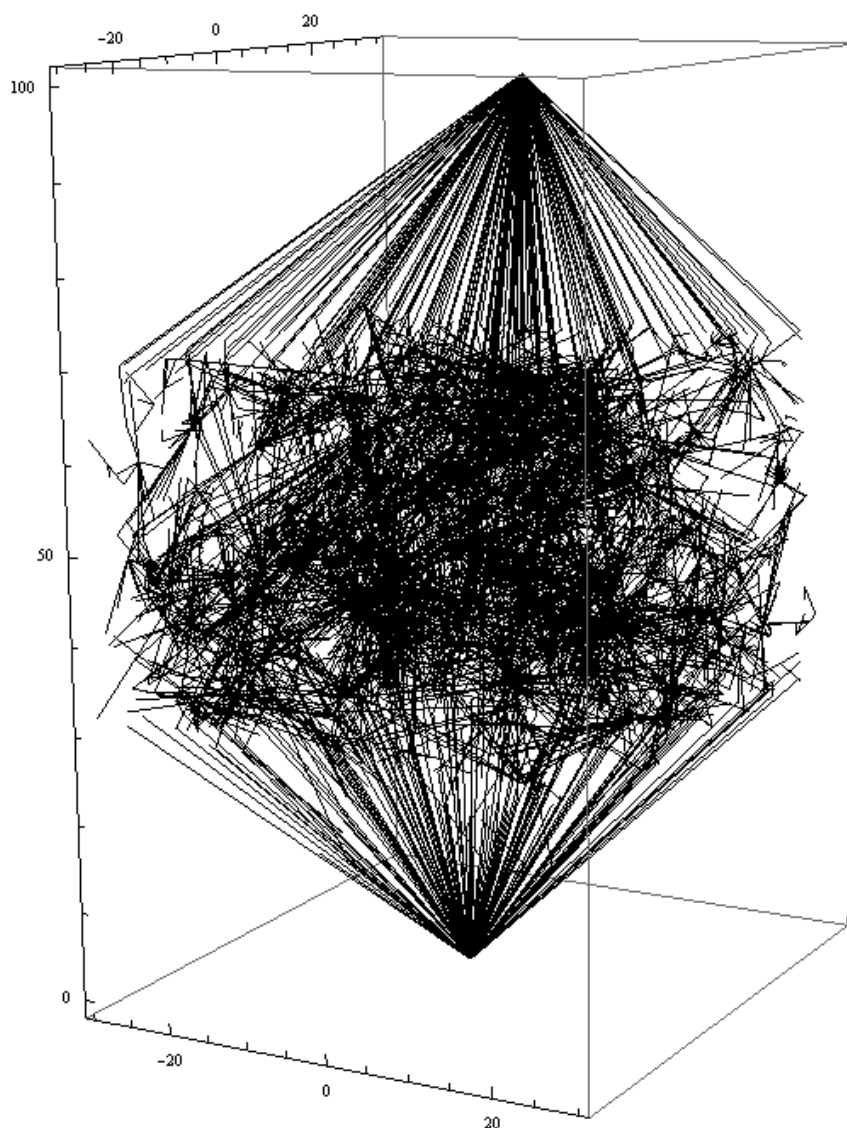
$$\sqrt{\frac{4 \times A \times e}{\pi \times L_{tot}}} = d \quad (4-10)$$

که در آن A مساحت و e بازشدگی درزه است.



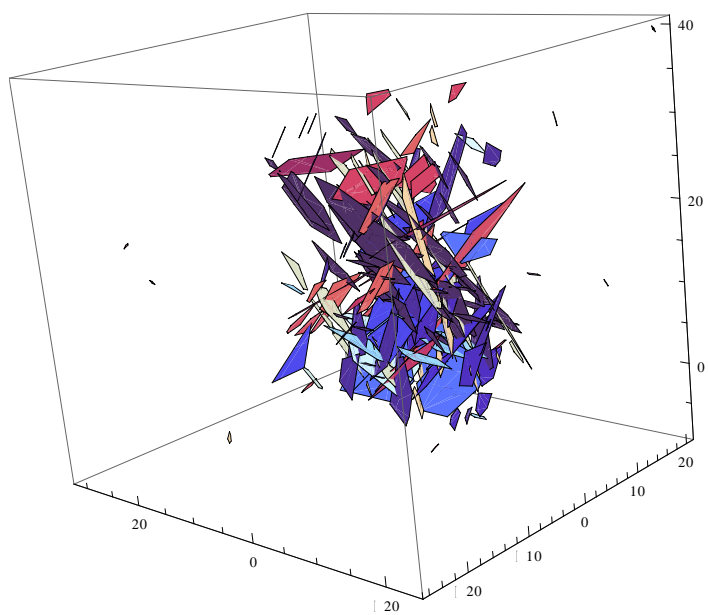
شکل ۴-۱۱: مدل مفهومی شبکه لوله منتهجه از تقاطع چند درزه

مدل شبکه لوله معادل با شبکه درزه نشان داده شده در شکل ۴-۱۰، شامل ۸۸۱۳ لوله در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. در این مدل، لوله های متقاطع با مرزهای بالا و پایین به دو نقطه توسط لوله های مجازی متصل شده اند. این لوله های مجازی بدون اصطکاک فرض شده اند و در نتایج تحلیل های هیدرولیکی تاثیری ندارند. در این شیوه، فشار/هد ورودی می تواند به نقطه اول وارد شود و در نقطه دوم اندازه گیری شود.

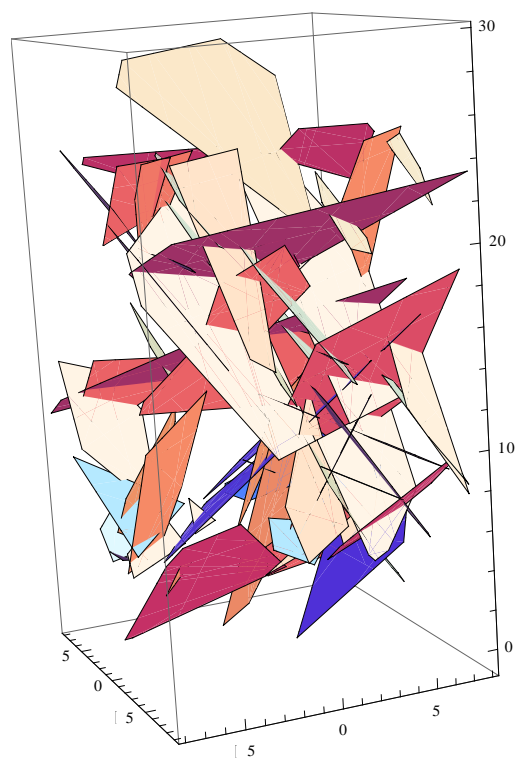


شکل ۴-۱۲: مدل شبکه لوله معادل با شبکه درزه مجزای شکل ۴-۱۰-ب

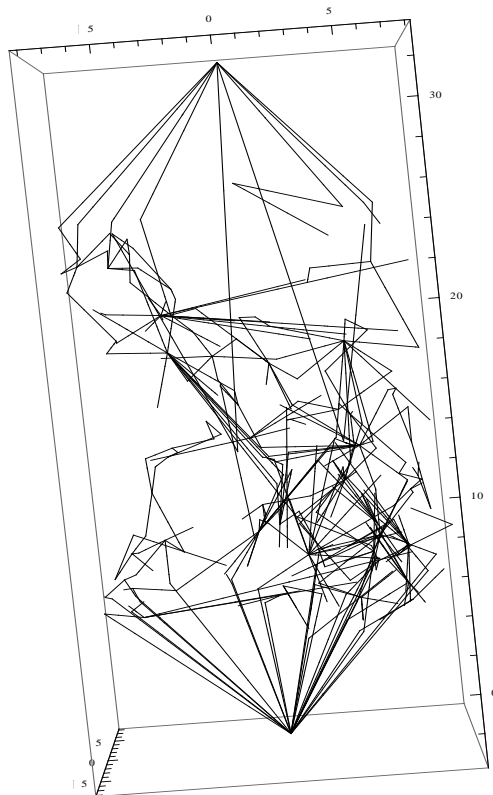
به عنوان یک مثال دیگر، شبکه درزه نشان داده شده در شکل ۴-۱۳ متشکل از ۱۹۴ درزه است، پس از حذف درزه‌های نارسانا بر اساس الگوریتم ارایه شده و با کاربرد برنامه $DFN-FRAC^{3D}$ ، تعداد ۷۶ درزه رسانی باقی می‌ماند (شکل ۴-۱۴). مدل شبکه لوله معادل با این شبکه درزه رسانی، شامل ۳۶۴ لوله در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳: شبکه درزه با تمامی درزه‌های موجود



شکل ۴-۱۴: شبکه درزه متصل (رسانا)



شکل ۴-۱۵: مدل شبکه لوله معادل

۴-۶- جمع بندی

مهمترین مرحله در تعیین ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ ساخت مدل هندسی دقیق از توده‌سنگ است. در حال حاضر، بهترین و دقیق‌ترین روش شبیه‌سازی ساختارهای واقعی توده‌سنگ، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌ها (3D DFN) است. به منظور دستیابی به یک مدل هندسی اولیه و دقیق برای انجام مدل‌سازی‌های عددی، در این فصل در ابتدا به معرفی برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} تهیه شده توسط نوروزی در سال ۱۳۹۳ که به منظور تولید شبکه‌های درزه تصادفی در دو و سه بعد توسعه داده شده بود، پرداخته شده است. برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} تا پیش از این برای تحلیل‌های مکانیکی تهیه شده بود و لازم است برای تحلیل‌های هیدرولیکی توسعه داده شود. برای این منظور، در این فصل، برنامه DFN-FRAC^{3D} (Ver. ۲,۱,۱) به منظور در نظر گرفتن بازشدگی، همبستگی بازشدگی و طول درزه، شناسایی شبکه درزه‌های متصل و مدل‌سازی شبکه لوله معادل توسعه

داده شده است. شایان توجه است، در حال حاضر که بدلیل تحریم‌های موجود امکان خرید نرم‌افزارهای تجاری وجود ندارد، توسعه نمونه‌های مشابه آنها لازم و ضروری است.

در فصل بعد با استفاده از این نرم‌افزار و کاربرد نرم‌افزار تجاری WaterGEMS که توانایی شبیه‌سازی شبکه لوله را دارد، به بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی توده‌سنگ پرداخته خواهد شد.

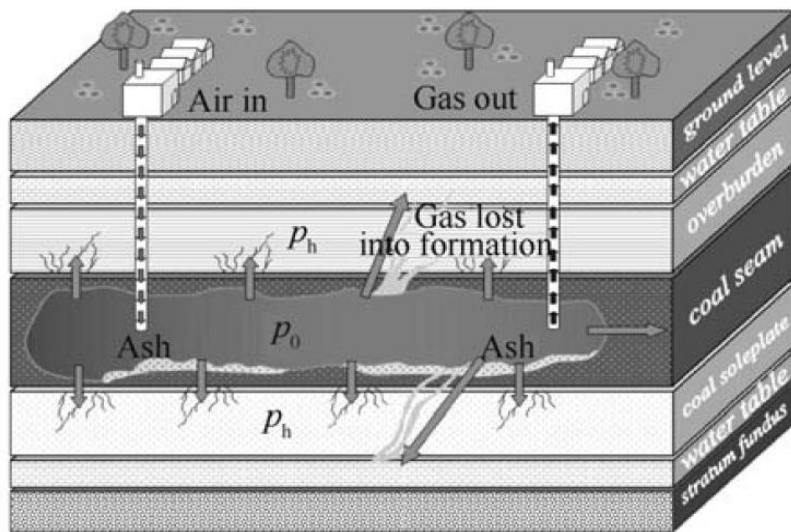
فصل پنجم

تحلیل عددی نشت سیال از درون

ناپیوستگی‌های توده سنگ

در ایران بخش زیادی از ذخایر زغال سنگ در عمق واقع شده و از نوع حرارتی هستند که برای استحصال و استفاده از این منابع، فناوری گاز کردن زیرزمینی زغال سنگ (UCG) می‌تواند به عنوان بهترین گزینه مطرح باشد. یکی از این ذخایر زغال سنگ، زغال سنگ‌های منطقه مزینو طبس است. برای اجرای روش UCG همانند سایر روش‌های مرسوم معدنکاری باید معیارهایی در نظر گرفته شود. از جمله این معیارها می‌توان به ضخامت لایه (۱ تا ۳۰ متر)، شیب لایه (صفر تا ۷۰ درجه)، نوع زغال سنگ، خاکستر لایه (کمتر از ۶۰ درصد)، پراکندگی گسل‌ها و ناپیوستگی‌ها و ذخیره‌ی لایه (بیشتر از ۳/۵ میلیون تن) اشاره نمود (Burton et al., ۲۰۰۶; Couch, ۲۰۰۹). در این میان از جمله تاثیرگذارترین معیارها و عوامل بر امکان‌پذیری و اقتصادی بودن روش UCG، نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور زیرزمینی و یا به عبارت دیگر ایزوله بودن آن است (Perkins, ۲۰۰۵; Sarraf Shirazi, ۲۰۱۱). 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 ۵-۱) (Liu et al., ۲۰۰۷; Stanczyk et al., ۲۰۱۱).

تعیین عوامل‌هایی مانند حجم و سرعت انتشار گازها برای توصیف مهاجرت گاز از ژئوراکتورهای زیرزمینی و بررسی پتانسیل آلودگی زیست محیطی، قبل، بعد و در طول فرآیند UCG کاملاً ضروری است (Pardala and Stanczyk, ۲۰۱۵). به عبارت دیگر، ایزوله بودن ژئوراکتور UCG از نقطه نظر کنترل فرآیند و آب‌های زیرزمینی، مساله بسیار مهمی است. بنابراین از مسایل مهمی که در این روش باید مورد توجه قرار گیرد، شبیه‌سازی رفتار انتقال یا نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور UCG است.



شکل ۵-۱: فرار گاز از ژئوراكتور UCG و انتقال آلوده‌کننده‌ها به محیط اطراف و آب‌های زیرزمینی (Liu et

al., ۲۰۰۷)

در این رساله، با توجه به اهمیت این موضوع، بر مدل‌سازی نشت گاز بر اساس مدل جریان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) سه بعدی تمرکز شده است که در مطالعات پیشین تاکنون به آن پرداخته نشده است. در صورتی که نفوذپذیری خمیره در مقابل درزه‌ها پایین باشد، این درزه‌ها هستند که اساساً رفتارهای جریان و انتقال سیال در توده سنگ را کنترل می‌کنند. واقعیت این است که در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری خمیره سنگی در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده سنگ بسیار ناچیز است و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند. در این حالت رفتار جریان سیال در توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود و برآورد آن نیازمند فهم مناسبی از شبکه شکستگی است. دقیق‌ترین و واقعی‌ترین مدل از شبکه شکستگی‌ها، مدل شبکه درزه‌های مجزا (DFN) است. تولید شبکه درزه‌های مجزا نیازمند دانش در خصوص ویژگی‌های درزه، شامل تعداد، جهت، فاصله‌داری، پایایی، شدت و بازشدگی درزه است.

در رساله حاضر، با استفاده از داده‌های میدانی درزه‌های برداشت شده از منطقه مزینو، در ابتدا با کاربرد نرم‌افزار تجاری ۵,۱۰۳ Dips، اطلاعات جمع‌آوری شده پردازش شده و با استفاده از آزمون‌های بهترین برازش، توابع توزیع مناسب برآورد می‌شوند. سپس بر اساس این اطلاعات آماری و با استفاده از برنامه

۲,۱,۱ DFN-FRAC^{3D} Ver مدل هندسی-تصادفی سه بعدی بزرگ مقیاس شبکه درزه‌های منطقه تولید می‌شود. به منظور تهیه مدل DFN هیدرولیکی منطقه، ضمن در نظر گرفتن وابستگی بین طول و بازشدگی، شبکه درزه‌های متصل شناسایی و شبکه لوله معادل از درزه‌های متصل منطقه تهیه می‌شود. در نهایت با استفاده از این شبکه لوله معادل و با کاربرد نرم‌افزار تجاری WaterGEMS تحلیل‌های هیدرولیکی بر روی شبکه درزه‌های منطقه مورد مطالعه انجام می‌شود.

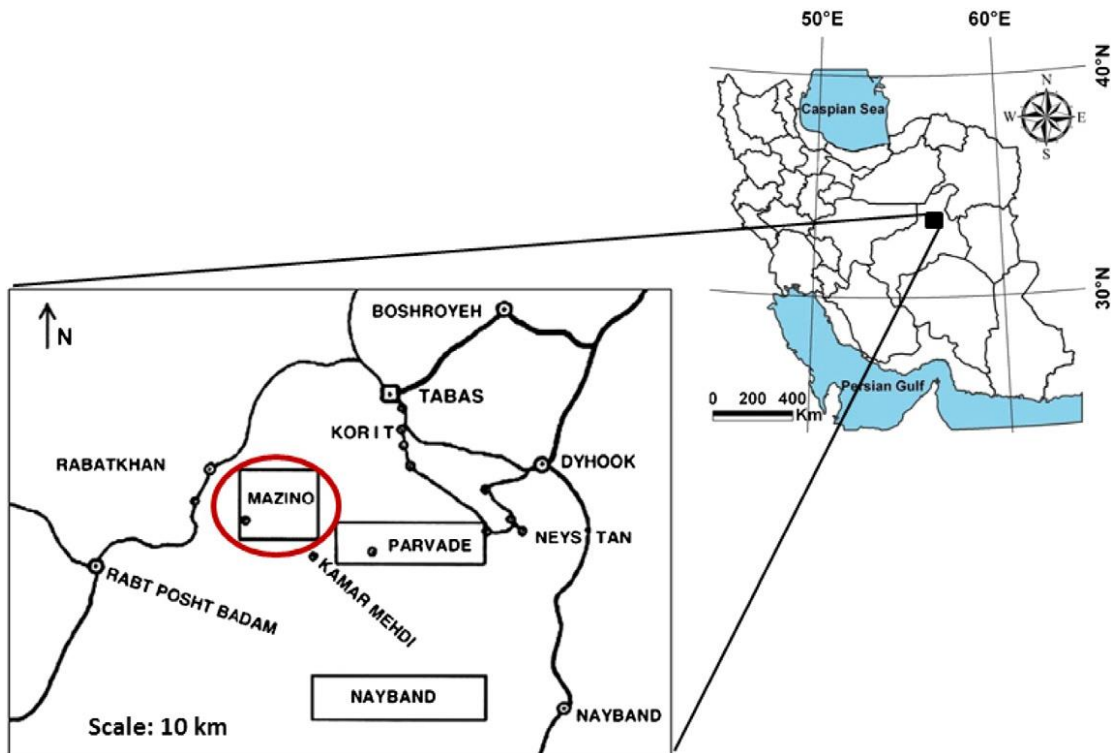
۵-۲- تولید مدل هیدرولیکی توده‌سنگ

در این بخش، مدل شبکه درزه رسانا (هیدرولیکی) از توده‌سنگ منطقه مزینو که مناسب برای تحلیل‌های هیدرولیکی توسط نرم‌افزارهای عددی مختلف است، تهیه و ارائه می‌شود.

۵-۲-۱- موقعیت توده سنگ مورد بررسی

ناحیه‌ی زغال‌سنگی مزینو، ۸۸۰۰ کیلومتر مربع از حوضه‌ی زغال‌دار طبس را در بر می‌گیرد. این ناحیه در ۸۵ کیلومتری غرب شهرستان طبس در استان یزد واقع شده است (شکل ۵-۲). سیمای کلی زمین-شناسی محدوده شامل تقابل برآمدگی‌های نه‌چندان بلند و جدا از هم در یک دشت تقریباً مسطح است. عملکرد تکتونیک منطقه به گونه‌ای بوده که باعث تشدید عوامل فرسایش در محدوده گردیده و بسیاری از رخنمون‌ها فرسایش یافته و از بین رفته‌اند. شاخص‌ترین لایه سنگی در این محدوده مانند دیگر محدوده‌های نزدیک به آن، همان واحد آهکی پرورده بوده که به علت ترد و شکننده بودن این تشکیلات آهکی در راس برآمدگی‌های مذکور خودنمایی می‌کند و قطعات خردشده‌ای از آن را می‌توان در رسوبات کواترنر مشاهده نمود. در منطقه‌ی مزینو، ۷۵ لایه‌ی زغال‌سنگ شناسایی شده است. تشکیلات مزینو شامل ماسه‌سنگ، شیل و گل‌سنگ است که لایه‌های زغال به صورت میان لایه‌ای با این تشکیلات قرار گرفته‌اند. زغال‌سنگ‌های ناحیه‌ی مزینو از نوع آنتراسیت و نیمه‌آنتراسیت هستند و شیب لایه‌های زغالی آن کمتر از ۳۰ درجه است که خود نشان‌دهنده‌ی مناسب بودن تمام لایه‌های زغالی برای اجرای UCG در این منطقه است. ضخامت لایه‌های زغالی در منطقه‌ی مزینو از ۰/۵ تا ۶ متر متفاوت است. از بین لایه‌های منطقه مزینو، لایه‌ی M۲ به دلیل 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 تامین نماید. بنابراین این لایه به عنوان 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 و دارای ۱۳۹ میلیون تن ذخیره است (Najafi et al., ۲۰۱۴).



شکل ۵-۲: موقعیت منطقه مزینو (Najafi et al., ۲۰۱۴)

۵-۲-۲- مطالعات میدانی و جمع‌آوری اطلاعات ساختاری

اطلاعات جمع‌آوری شده در این پژوهش با استفاده از روش برداشت خطی بدست 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 به گونه‌ای 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.

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 جهت نشان دادن وضعیت پایان‌یابی درزه‌ها مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴):

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{p}{p+m+n} \\ R_1 &= \frac{m}{p+m+n} \\ R_2 &= \frac{n}{p+m+n} \end{aligned} \quad (1-5)$$

در این پژوهش، کانال‌های حفر شده به عمق تقریبی ۱/۵ متر در منطقه مزینو، به عنوان تنها رخنمون در دسترس در منطقه، برای برداشت درزه انتخاب شده است (شکل ۵-۳ تصویر ترانسه‌ها). در جدول ۱-۵، خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون ارایه شده است.

عدم توانایی ثبت درزه‌هایی که طول آنها از حد اندازه‌گیری کوچکتر است به عنوان خطای فرواندازه^۱ معرفی شده است. همچنین درزه‌هایی که طول آنها به دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی‌شود، به عنوان خطای فرااندازه^۲ شناخته شده است. تاثیر 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 از آنجا که درصد درزه‌هایی که هر دو انتهای آن قابل مشاهده است، یعنی پایان‌یابی R_2 ، بسیار بیشتر است، می‌توان در این مورد مطالعاتی از خطای فرااندازه نیز چشم‌پوشی کرد (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴).

^۱ truncation
^۲ censoring



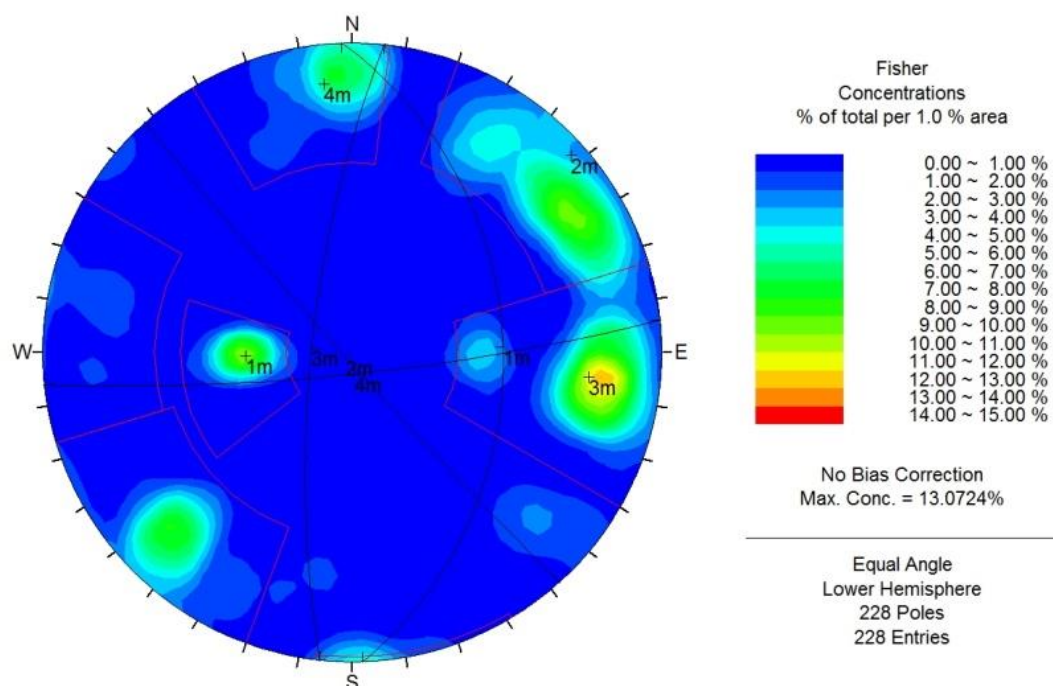
شکل ۵-۳: ترانشه محل برداشت ناپیوستگی‌ها

جدول ۵-۱: خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون

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

۵-۲-۳- تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه درزه‌های برداشت شده

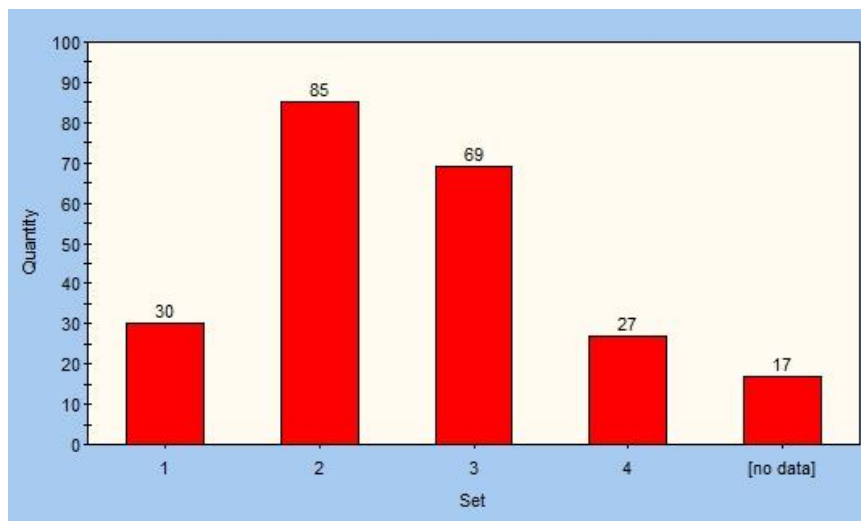
با تفکیک هر دسته درزه و جداسازی ویژگی‌های درزه‌های مربوط به آن از جمله شیب، جهت شیب، فاصله‌داری و طول، اطلاعات لازم برای مطالعات آماری فراهم می‌گردد. بر اساس مشخصات شیب و جهت شیب درزه‌های برداشت شده از منطقه مزینو، همانطور که در شکل ۵-۴ نشان داده شده، تعداد ۴ دسته درزه در منطقه شناسایی شده است.



شکل ۵-۴: جدایش دسته درزه‌ها در شبکه اشمیت

۵-۲-۳-۱- فراوانی دسته درزه‌ها

نمودارهای ستونی دسته درزه‌های تفکیک شده به همراه تعداد در شکل ۵-۵، 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 ۵-۵: فراوانی دسته درزه‌های برداشت شده

۵-۲-۳-۲- جهت یافتگی

تحقیقات نشان داده است که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند (نوروزی و همکاران، ۲۰۱۳) و (Priest, ۱۹۹۳). برای مورد مطالعاتی این تحقیق، ثابت فیشر برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزار Dips بدست آمده که در جدول ۵-۲ نشان داده شده است.

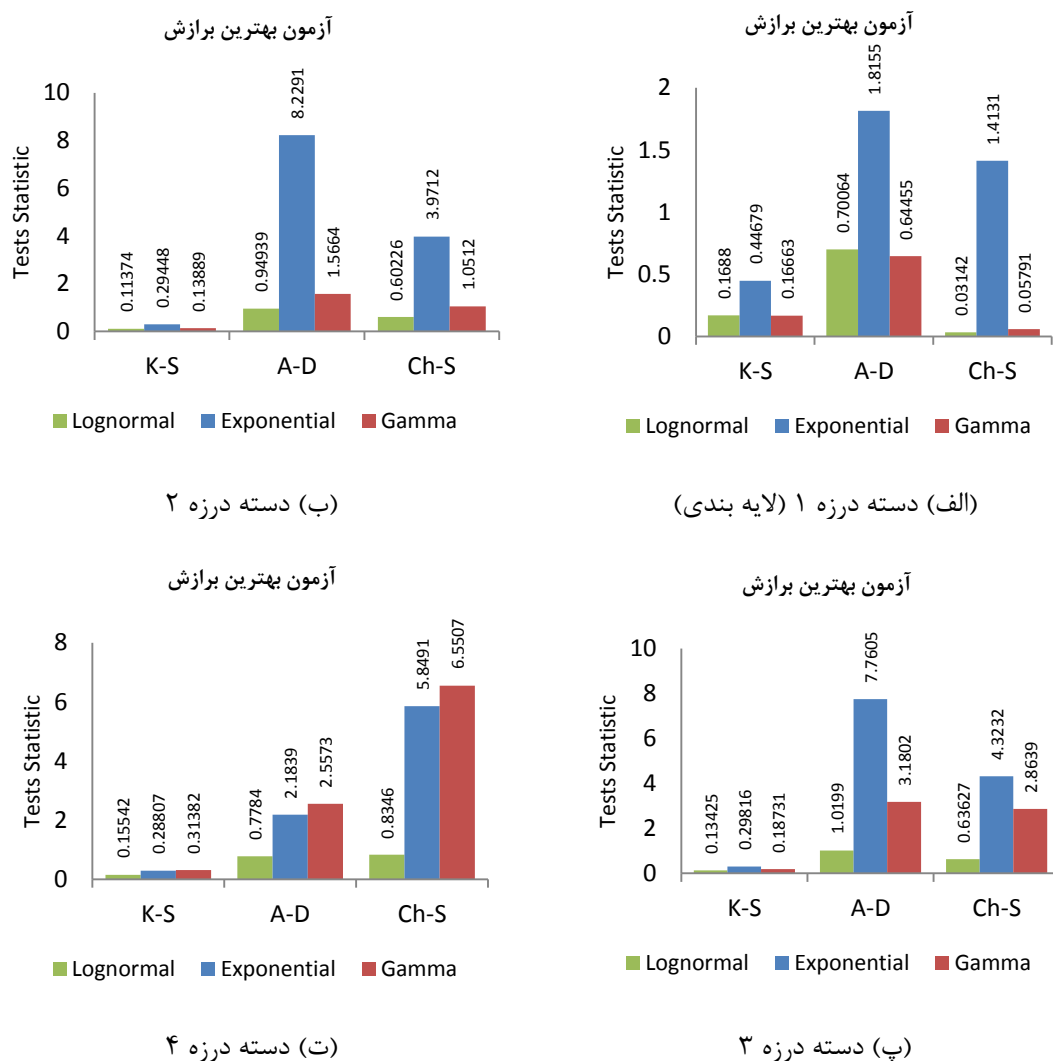
۵-۲-۳-۳- فاصله‌داری

بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، توزیع فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، برای انواع گوناگون سنگ‌های رسوبی، آذرین و متامورفیک می‌تواند با تابع توزیع چگالی احتمال نمایی منفی مدل شود (Beacher, ۱۹۸۳). بر این اساس، در این پژوهش، توزیع نمایی منفی برای فاصله‌داری بکار برده شده است.

۵-۲-۳-۴- طول (پایایی)

به دلیل این که 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 بدست آمده از پیمایش‌های دو بعدی هستند (Xu &

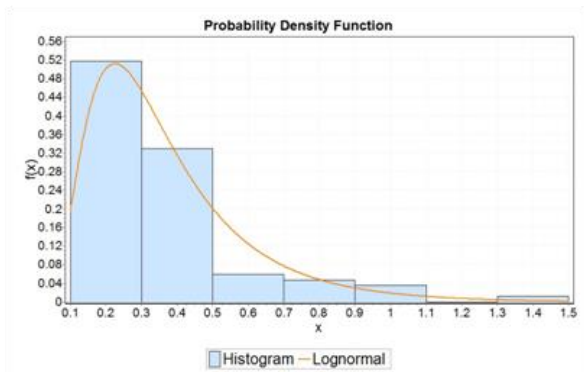
(Dowd, ۲۰۱۰). به طور معمول برای توزیع طول اثر واقعی درزه، سه تابع نمایی منفی، لاگ نرمال و گاما برای اطلاعات حاصل از پیمایش دوبعدی درزه‌ها بکار برده می‌شوند (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴). نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش برای داده‌های برداشت شده طول مربوط به هر دسته درزه در رخنمون سنگی مورد مطالعه در شکل ۵-۶، نشان داده شده است.



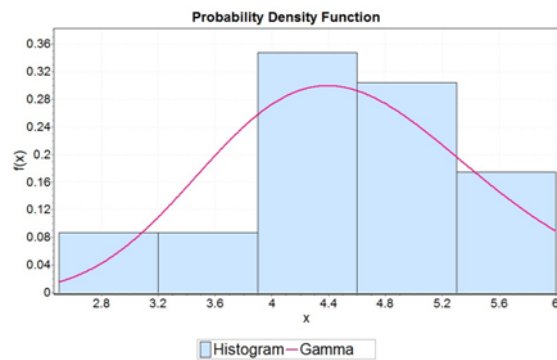
شکل ۵-۶: نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش برای طول درزه

بر 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 لایه بندی است از تابع توزیع گاما پیروی

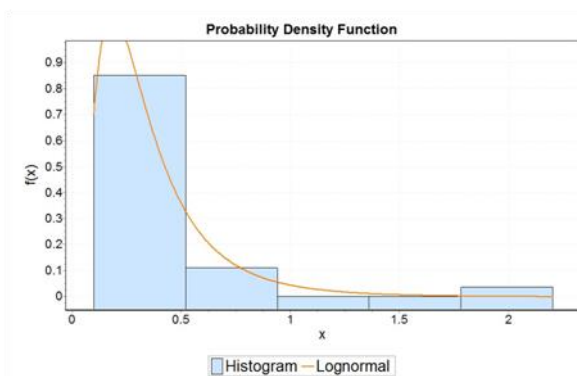
می‌کند. توابع توزیع برازش شده بر طول درزه‌ها در هر دسته درزه، در شکل ۵-۷، نشان داده شده و مشخصات این توابع در جدول ۵-۲، بیان شده است.



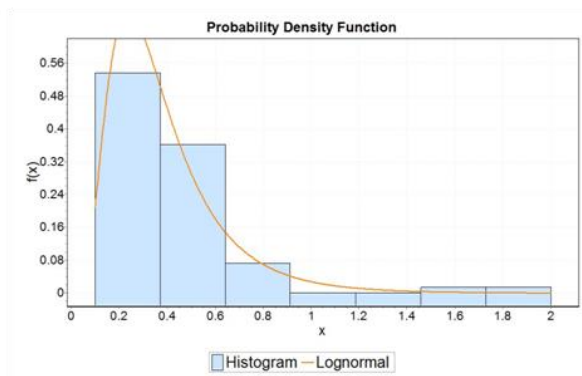
(ب) دسته درزه ۲



(الف) دسته درزه ۱



(ت) دسته درزه ۴



(پ) دسته درزه ۳

شکل ۵-۷: توابع توزیع طول برازش شده بر درزه‌های برداشت شده

۵-۲-۳-۵- بازشدگی و همبستگی بازشدگی و پایایی درزه

یکی از ویژگی‌های هندسی درزه که تاثیر 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. لذا با توجه به اهداف این مطالعه، در منطقه مورد نظر، مولفه بازشدگی درزه‌ها با دقت برداشت و نتایج برداشت تجزیه و تحلیل آماری شده است.

برای دسته درزه‌های برداشت شده از منطقه مزینو، مشخصات توابع توزیع لاگ‌نرمال برازش شده بر بازشدگی هر دسته درزه در جدول ۲-۵، بیان شده است. همچنین همبستگی پایایی و بازشدگی درزه بر اساس رابطه زیر (ارایه شده توسط بنگ و همکاران در سال ۲۰۱۲) در نظر گرفته شده است.

$$\frac{F_A(h) - F_A(h_a)}{F_A(h_b) - F_A(h_a)} = \frac{F_L(l) - F_L(l_a)}{F_L(l_b) - F_L(l_a)} \quad (2-5)$$

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.

۵-۲-۳-۶- شدت حجمی درزه

به طور کلی مقدار شدت حجمی درزه، (متر مربع بر متر مکعب) P_{32} ، از مقادیر شدت سطحی برداشت-شده، (متر بر متر مربع) P_{21} ، بدست می‌آید. ژانگ و انیشتین در سال ۲۰۰۰ رابطه زیر را برای محاسبه P_{32} پیشنهاد نمودند (Zhang & Einstein, ۲۰۰۰):

$$P_{32} = \frac{N_T E(A)}{V} \quad (3-5)$$

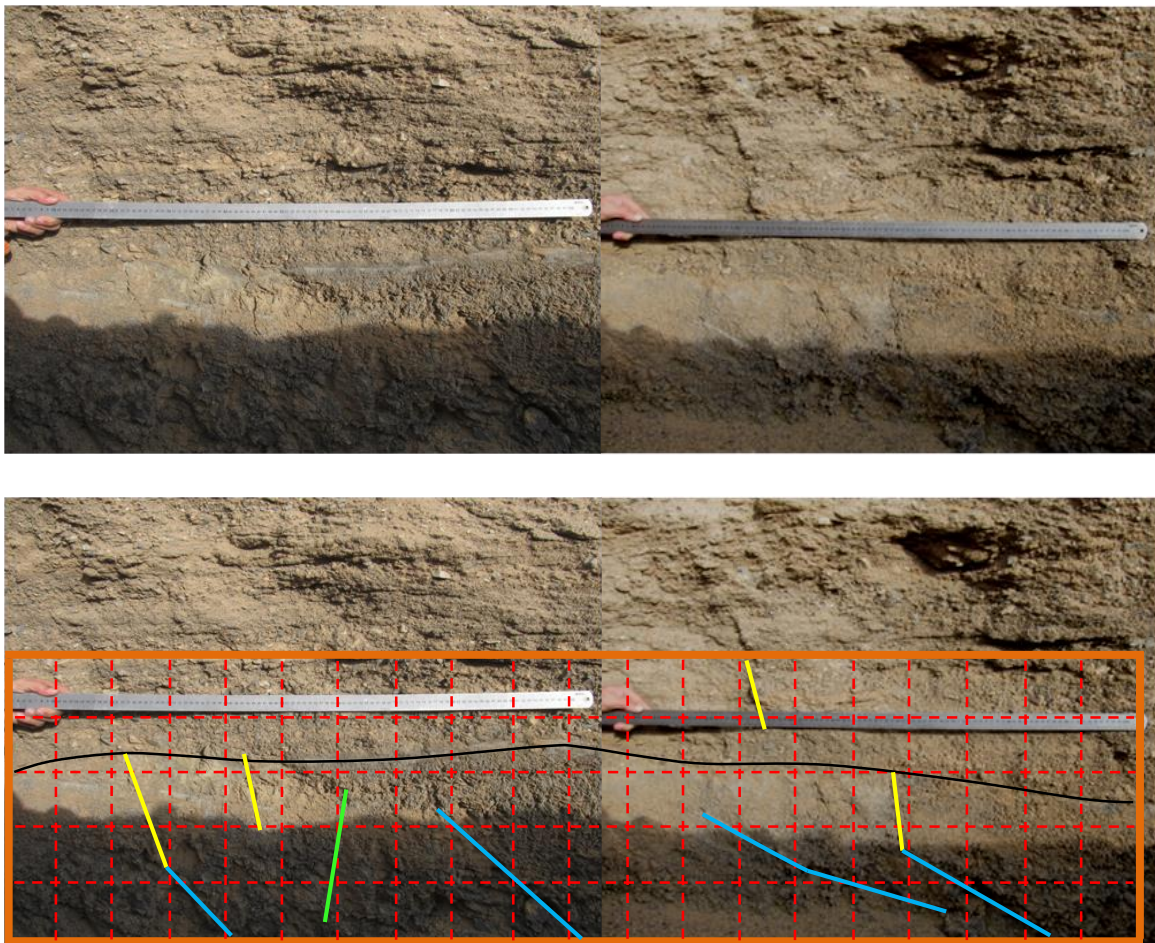
که در آن N_T تعداد کلی درزه‌های برداشت شده، $E(A)$ مساحت متوسط درزه محاسبه شده و V حجم واحد است. مساحت متوسط درزه، با کاربرد رابطه زیر و با فرض دایره‌ای بودن درزه محاسبه می‌شود.

$$E(D) = \frac{128\mu_l^3}{3\pi^3(\mu_l^2 + \sigma_l^2)} \quad (4-5)$$

در این پژوهش، درزه‌های قابل دیدن با چشم غیرمسلح با استفاده از یک چارچوب ۱ متر مربعی دارای شبکه مش‌بندی ۱۰ سانتی‌متر مربعی در میدان شمارش شده‌اند (شکل ۵-۸ تصویر چگونگی محاسبه میدانی چگالی سطحی درزه). درزه‌های متقاطع با هر خط مش اندازه‌گیری و تعداد کلی درزه‌های شمارش شده در چارچوب ۱ مترمربعی به عنوان چگالی سطحی درزه تعریف می‌شود (Lin & Yamashita, ۲۰۱۳) (نوروزی و همکاران، ۱۳۹۴). شایان توجه است که استاندارد قابل قبول جهانی برای روش برداشت وجود ندارد و در واقع باید جزییات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم را برای هدف موردنظر جمع‌آوری نمود و با شرایط محلی سنگ تطابق داد (Priest, ۱۹۹۳). با ذکر

این نکته و با توجه به ارتفاع کم رخنمون در دسترس، در این تحقیق از چارچوب‌های (۰/۵ × ۲) مترمربعی استفاده شده است.

با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده و کاربرد رابطه‌های (۳-۵) و (۴-۵)، مقادیر $P_{۳۲}$ برای هر دسته درزه به طور جداگانه محاسبه شده و در جدول ۲-۵، نشان داده شده است.



شکل ۵-۸: اندازه‌گیری میدانی چگالی سطحی درزه، $P_{۲۱}$

جدول ۵-۲: عوامل هندسی دسته درزه‌های برداشت شده

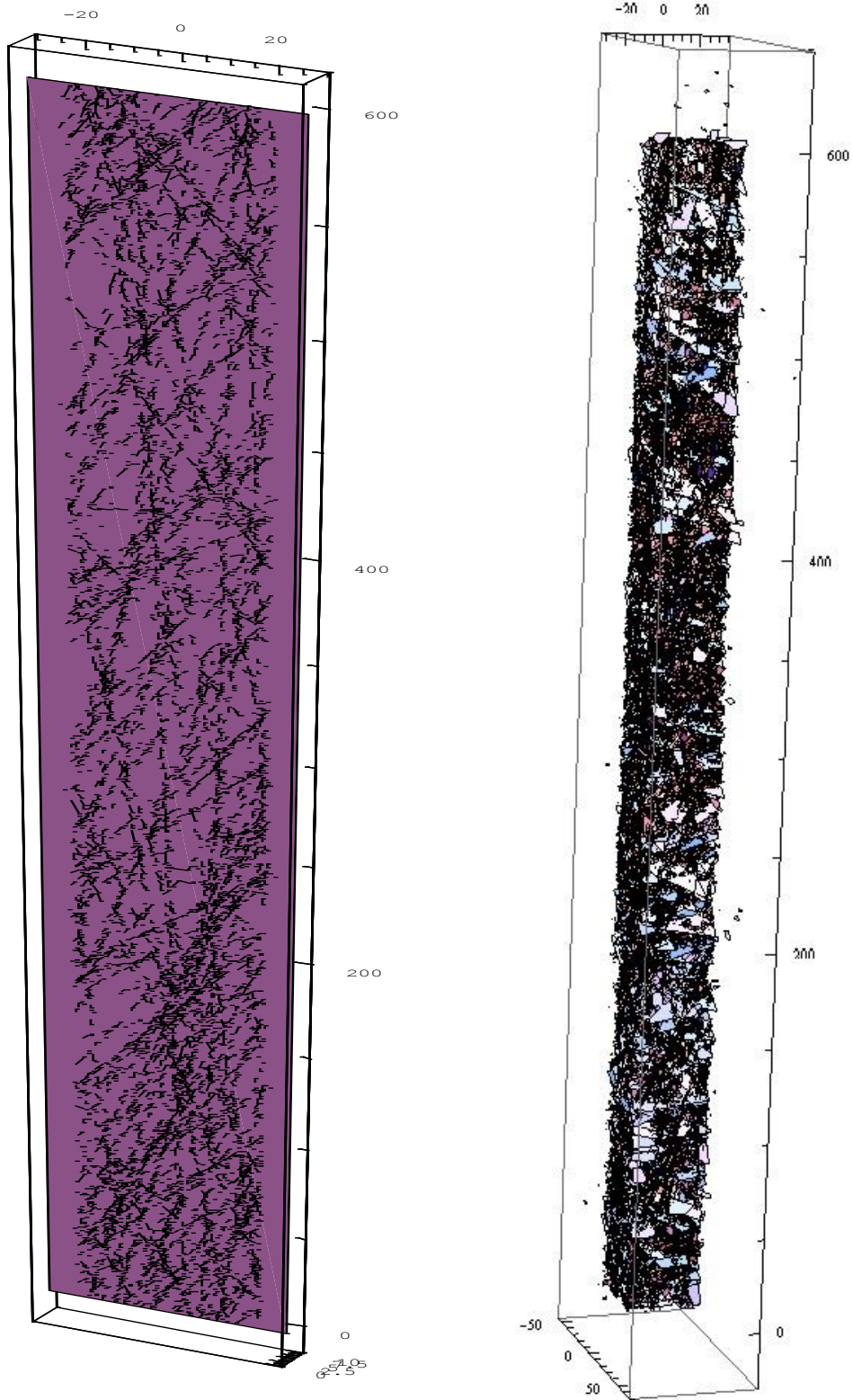
دسته درزه				عوامل	
دسته درزه ۴	دسته درزه ۳	دسته درزه ۲	دسته درزه ۱		
۸۲	۷۵	۸۷	۳۸	شیب/جهت شیب	
۱۷۴	۲۷۶	۲۲۸	۰۸۸	جهت شیب	
۳۶	۲۲٫۶	۲۲٫۷	۵۸٫۶	ثابت فیشر (K)	
۰٫۰۴	۰٫۱۴	۰٫۱۸	۱٫۱۷	شدت، $P_{32} (m^{-1})$	
لاگ نرمال	لاگ نرمال	لاگ نرمال	گاما	تابع توزیع	عوامل توزیع طول
$\sigma = ۰٫۶۶۶$	$\sigma = ۰٫۵۶۵$	$\sigma = ۰٫۵۸۳$	$\alpha = ۲۳٫۳۴$	عوامل تابع	
$\mu = -۱٫۲۳۹$	$\mu = -۱٫۱۰۹$	$\mu = -۱٫۱۵$	$\beta = ۰٫۱۹۶$	عوامل 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	عوامل توزیع بازشدگی
$\sigma = ۰٫۵۷۰$	$\sigma = ۰٫۵۴۲$	$\sigma = ۰٫۵۴۲$	$\sigma = ۰٫۴۴۰$	عوامل تابع	
$\mu = -۰٫۳۲۲$	$\mu = -۰٫۰۵۶$	$\mu = -۰٫۰۵۸$	$\mu = ۰٫۵۷۲$	عوامل تابع	
۰٫۸۵۲	۱٫۰۹۵	۱٫۰۹۲	۱٫۹۵۳	متوسط (mm)	
۰٫۵۲۸	۰٫۶۴۰	۰٫۶۳۹	۰٫۹۰۴	انحراف استاندارد (mm)	

۵-۲-۴- تولید شبکه ناپیوستگی‌های مجزا و اعتبارسنجی

یک شبکه درزه مجزا، نمایشی از ویژگی‌های هندسی درزه است به طوری که در آن درزه‌ها به وضوح و از لحاظ آماری به طور دقیق در مدل سه بعدی ارایه می‌شوند. در مدل‌سازی DFN، شیوه کلی شامل بررسی و استنتاج موقعیت، پایایی (اندازه)، جهت، بازشدگی و دیگر ویژگی‌های درزه‌ها به عنوان 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 صورت می‌گیرد. نجفی و همکاران در سال ۱۳۹۳ عرض پهناهای استخراجی UCG به روش CRIP در این لایه را در حدود ۴۵ متر محاسبه کردند (نجفی و همکاران، ۱۳۹۳). در این پژوهش نیز از این عواملها برای ساخت مدل بهره گرفته می‌شود.

شبیه‌سازی شبکه درزه‌ی توده‌سنگ منطقه مزینو، با استفاده از برنامه کامپیوتری DFN- Ver ۲,۱,۱ و بر اساس عواملهای هندسی برداشت شده از منطقه مزینو (جدول ۵-۲) تهیه شده است. این مدل متشکل از ۲۶۹,۶۲۳ درزه در محدوده‌ای به ابعاد $۴۵ \times ۴۵ \times ۶۰۰$ مترمکعب در شکل ۵-۹، نشان داده شده است.

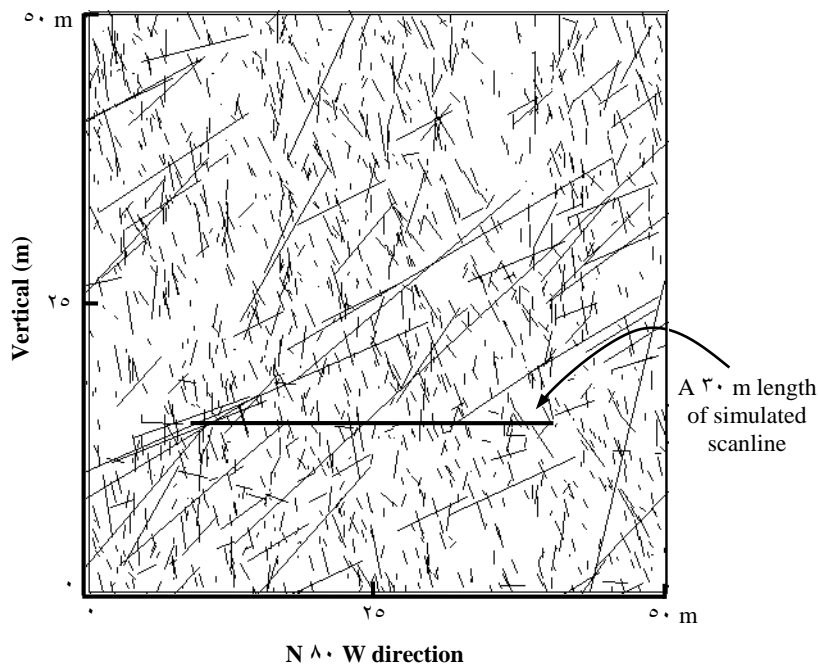


ب) مقطع قائم از مدل
سه بعدی

الف) مدل سه بعدی

شکل ۵-۹: شبکه DFN منطقه مزینو با تمامی درزه‌های موجود

به منظور اعتبارسنجی مدل DFN تهیه شده، درزه‌های مدل شده و برداشت شده با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شکل ۵-۱۰ اثرات درزه بدست 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.

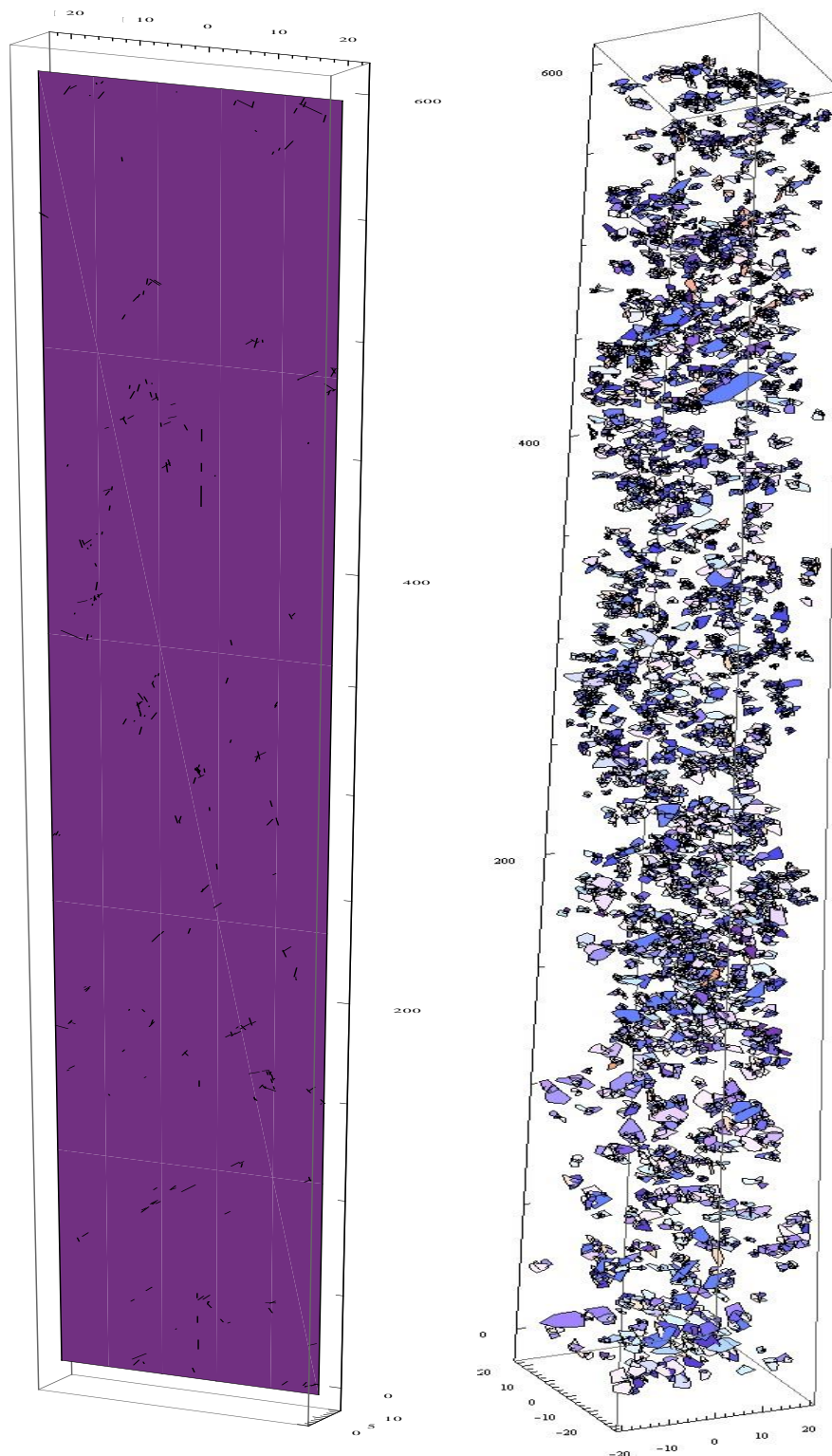


شکل ۵-۱۰: خط اثر درزه بر روی مقطع عمودی هم امتداد با جهت شیب خط برداشت

۵-۲-۵- تهیه مدل شبکه درزه‌های متصل

مدل شبکه درزه‌های متصل از مدل DFN اصلی مشتق می‌شود. مدل شبکه درزه‌های متصل در محدوده-ای به ابعاد ۴۵×۴۵ مترمربع پایه و ۶۰۰ متر ارتفاع از مرکز مدل DFN اصلی انتخاب شده است. صفحات

مرزی جریان، صفحات افقی پایینی ($z = 5$) و بالایی ($z = 595$) در نظر گرفته شده است. پس از اجرای مدل هیدرولیکی تعداد ۶۳۵۵ درزه متصل شناسایی شده است (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱: شبکه DFN متصل (رسانا)

۵-۳- مدل سازی عددی جریان سیال

در این بخش به مدل سازی نشت سیال از شبکه لوله های معادل شبکه شکستگی های مجزای تهیه شده در بخش قبل پرداخته می شود. برای این منظور در ابتدا نرم افزار عددی مناسب که توانایی شبیه سازی مجموعه ای از لوله ها را داشته باشد، انتخاب می شود. سپس به مدل سازی جریان سیال برای توده سنگ منطقه مزینو بر اساس نرم افزار منتخب پرداخته خواهد شد.

۵-۳-۱- بررسی نرم افزارهای موجود

در این بخش، به منظور مدل سازی شبکه ای از لوله ها و انتخاب نرم افزاری برای تحلیل جریان سیال در این شبکه، اقدام به معرفی نرم افزار مناسب از میان نرم افزارهای تجاری تحلیل شبکه های جریان و انتقال سیالات شده است.

لازم به ذکر است که مهم ترین معیارهای مورد بررسی این نرم افزارها عبارتند از :

- ۱- تعداد لوله های قابل بارگذاری به نرم افزار
- ۲- توانمندی نرم افزارها شامل نوع سیال و معادلات به کار رفته در آنها
- ۳- توانایی دریافت فایل ورودی با فرمت مشخص از نرم افزارهای دیگر
- ۴- قابلیت دسترسی به نرم افزار

۵-۳-۱-۱- نرم افزار FLUENT

یک نرم افزار مهندسی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای مدلسازی جریان سیال و انتقال حرارت در هندسه های پیچیده است. این نرم افزار امکان تغییر شبکه، به صورت کامل و تحلیل جریان با شبکه های غیرساخت یافته برای هندسه های پیچیده را فراهم می سازد. همچنین فلوینت به کاربر اجازه بهبود شبکه (مثلا ریز کردن یا درشت کردن شبکه در مرزها و مکان های لازم در هندسه) را می دهد. این بهینه سازی برای حل و شبکه، قابلیت در اختیار کاربر قرار می دهد که نتایج را در ناحیه هایی که دارای گردابه های بزرگ (مانند لایه مرزی و ...) باشند، دقیق تر سازد. این نرم افزار با زبان

برنامه‌نویسی C نوشته شده است و از تمامی توان و قابلیت انعطاف این زبان بهره می‌برد. این نرم‌افزار از جمله نرم‌افزارهای بسیار قدرتمند در زمینه مدل‌سازی جریان سیال است. محدودیت اصلی این نرم‌افزار که باعث عدم انتخاب آن برای استفاده در این پروژه شده است، عدم توانایی نرم‌افزار در ورود تعداد بالای لوله است.

۵-۳-۱-۲- نرم‌افزار PipeFlow Expert

یک نرم‌افزار بسیار قدرتمند برای طراحی و تجزیه و تحلیل شبکه‌های لوله پیچیده است که در آن جریان و فشار برای حل سیستم باید متعادل شود. این نرم‌افزار توسط شرکت انگلیسی Pipe Flow توسعه داده شده است و آخرین نسخه آن در سال ۲۰۱۹ به بازار معرفی شده است. نرم‌افزار PipeFlow Expert قادر به انجام محاسبات جریان سیال در شبکه لوله حلقه باز و یا بسته، تخلیه مخازن، پمپ‌های متعدد سری یا موازی و شبکه لوله و اتصالات با اندازه‌های مختلف است. در این نرم‌افزار محاسبه افت فشار با استفاده از روش Darcy-Weisbach و محاسبه اصطکاک با استفاده از معادله Colebrook-White انجام می‌شود. این نرم‌افزار شامل پایگاه داده با انواع داده‌های مایع و گاز و لوله‌ها با مواد و اندازه متداول است. محدودیت این نرم‌افزار که باعث عدم انتخاب آن برای استفاده در این پروژه شده است، قابلیت مدل‌سازی حداکثر ۱۰۰۰ لوله در نسخه کامل نرم‌افزار است که است تعداد پاسخگوی تعداد لوله‌های معادل شده در این رساله نمی‌باشد.

۵-۳-۱-۳- نرم‌افزار PipelineStudio

نرم‌افزاری قوی برای طراحی، شبیه‌سازی و آنالیز خط لوله‌های گاز و مایعات است که محیطی گرافیکی همراه با ابزار تحلیل و اندازه‌گیری را در اختیار مهندسان قرار می‌دهد. این نرم‌افزار توسط شرکت آمریکایی Emerson حدود ۳۰ سال پیش توسعه داده شد و این شرکت در ۹ کشور دنیا نمایندگی رسمی دارد. از این نرم‌افزار می‌توان برای طراحی، برنامه‌ریزی و آنالیز هیدرولیک خطوط لوله و رفتار گاز طبیعی و مایعات در دو حالت پایدار و پویا بهره برد. تجزیه و تحلیل نشت، ارزیابی سریع تغییرات برنامه‌ریزی نشده در عملیات و رابط گرافیکی کاربر دوست از دیگر ویژگی‌های این برنامه است.

عدم دسترسی به نسخه کامل نرم افزار، باعث خوردن برچسب عدم استفاده از آن در این پروژه شده است.

۵-۳-۱-۴- نرم افزار AFT Fathom

نرم افزار شبیه ساز دینامیک سیالات است که با استفاده از آن می توان میزان فشار موجود در لوله ها و مجراها را هنگام توزیع جریان مایعات و گاز محاسبه کرد. این نرم افزار امکاناتی جامع نظیر تجزیه و تحلیل جریان تراکم ناپذیر در لوله، سیستم مدل سازی باز و بسته مسیر جریان، پایگاه داده ای شامل بیش از ۶۰۰ نوع سیالات و اتصالات، کنترل شیرآلات و پمپ و انواع ساختمان مدل ها، استفاده از قالب های GIS، محاسبه ارزش و هزینه لوله ها، نمایش گرافیکی تجهیزات و اتصالات و قابلیت استفاده از آنها به صورت گروهی، تجزیه و تحلیل سیستم های حرارتی (شامل انتقال حرارت) و مدل سازی سیستم های مبدل حرارتی را در اختیار کاربر قرار می دهد.

علت اصلی که باعث عدم انتخاب این نرم افزار برای انجام این پروژه شده است، محدودیت تعداد لوله در آن است. این نرم افزار قابلیت مدل سازی حداکثر ۱۵۰ لوله را دارد.

۵-۳-۱-۵- نرم افزار AFT Arrow

نرم افزار قدرتمند شبیه ساز دینامیک سیالات و تراکم جریان لوله ها است که برای محاسبه افت فشار و توزیع جریان در سیستم های لوله کشی گاز، کانال های جریان هوای فشرده، فرآیندهای گازی شیمیایی و پتروشیمی، خطوط انتقال گاز طبیعی و ... مورد استفاده قرار می گیرد. این نرم افزار توسط شرکت Arrow Pipes and fitting FZCO در سال ۲۰۰۲ به بازار ارایه شد که این شرکت زیر مجموعه شرکت Rockwell Trading می باشد. توسط این برنامه می توان تمامی ابزارها شامل مخازن، لوله ها، انتقال دهنده ها، فن ها، کمپرسورها، شیرآلات و غیره را برای شبیه سازی کامل و همه جانبه سیستم ها به کار گرفت. با استفاده از مدل ساخته شده توسط این نرم افزار می توان مواردی چون اندازه لوله و مجرا، اندازه شیر و محاسبات سیستم، اندازه کمپرسور و فن، کنترل اندازه دریچه، شبیه سازی عملیات سیستم و تعامل اجزا، ارزیابی عایق لوله و انتقال حرارت در مبدل های حرارتی و لوله ها، عیب یابی سیستم های موجود برای تعیین علت مشکلات عملیاتی و ... را بررسی و آنالیز نمود. علاوه بر این، نرم افزار AFT

Arrow به طور همزمان قابلیت حل پنج مسئله اساسی جرم، تکانه، انرژی، حالت و عدد ماخ را دارد و با استفاده از روش خمیره نیوتون-رافسون یکی از بهترین انتخاب‌ها برای محاسبات دقیق و قابل اطمینان است.

محدودیت این نرم‌افزار که باعث انتخاب نشدن آن برای استفاده در این پروژه شده است، عدم توانایی آن در دریافت فایل ورودی شبکه لوله‌ها حاصل از نرم‌افزارهای جانبی است.

۵-۳-۱-۶- نرم‌افزار PIPE-FLO

PIPE-FLO برای طراحی، مدل‌سازی، عملیات و اصلاحات سیستم‌های لوله‌کشی سیالات، کاربردهای بسیار زیادی دارد. این نرم‌افزار توسط شرکتی با نام Engineered Software INC ارایه شده است که آخرین نسخه آن نسخه ۱۶ می‌باشد. این نرم‌افزار برای بهینه‌سازی و عیب‌یابی سیستم‌های لوله‌کشی موجود و یا سیستم‌های جدید طراحی شده است. رابط کاربری ساده‌ای برای مدل‌سازی دارد که به راحتی می‌توان با حداکثر کارایی به طراحی و مهندسی مدل مورد نظر پرداخت. در این نرم‌افزار امکان محاسبه فشار، نرخ جریان، مقدار ورودی، فشار دیفرانسل دریچه‌ها و بار روی پمپ‌ها و شبیه‌سازی شرایط غیرنرمال برای عیب‌یابی و پیش‌بینی حالات و مشکلات بحرانی فراهم شده است.

محدودیت این نرم‌افزار که باعث عدم انتخاب آن شد، عدم دسترسی به نسخه کامل نرم‌افزار است.

۵-۳-۱-۷- نرم‌افزار WaterGEMS

از جمله پرطرفدارترین محصولات شرکت معروف Bentley است که برای تحلیل شبکه‌های توزیع سیالات استفاده می‌شود. این نرم‌افزار قابلیت‌های فراوانی نظیر محاسبه سرعت، فشار و سایر عوامل هیدرولیکی، شبیه‌سازی حالت آتش‌نشانی، شبیه‌سازی کیفیت شبکه‌های انتقال سیالات، مدل‌سازی آلودگی و محاسبه غلظت آلاینده پس از ورود به شبکه، محاسبات هزینه انرژی و همچنین طراحی و بهینه‌سازی شبکه توزیع سیالات با استفاده از الگوریتم ژنتیک را دارد. از سایر ویژگی‌های نرم‌افزار می‌توان به یافتن محل نشت سیال در شبکه‌های توزیع سیال شهری نام برد. این نرم‌افزار کاربردهای فراوانی در شهرداری‌ها و طراحی‌های شبکه آب و فاضلاب دارد. از دیگر قابلیت‌های مهم این نرم‌افزار می‌توان به

توانایی ورود داده‌ها از نرم‌افزارهای پرکاربرد دیگر مانند GIS و AUTO CAD، دسترسی به نسخه کامل نرم‌افزار در داخل کشور و توانایی مدل‌سازی تعداد بسیار زیاد لوله اشاره نمود.

۵-۳-۲- انتخاب و توصیف نرم‌افزار مناسب

در میان نرم‌افزارهای مدل‌ساز شبکه لوله، Bently WaterGEMS v۸i نرم‌افزاری کارآمد برای ایجاد خطوط انتقال و شبکه توزیع سیالات شهری و صنعتی است که می‌تواند شبکه جریان را به صورت شماتیک یا دارای مقیاس تحلیل نماید. در ترسیم شبکه توزیع جریان، این نرم‌افزار به صورت خودکار لوله‌ها، گره‌ها و سایر عناصر را نام‌گذاری می‌کند.

این برنامه در واقع همان نسخه ارتقا یافته نرم‌افزار WaterCad است که توسط شرکت‌های Haestade و Bently طراحی شده است. به طور کلی در تمامی نرم‌افزارهای قبلی که مورد بررسی قرار گرفت، طراح باید برای ورود اطلاعات اولیه خود یک سری محاسبات دستی و مقدماتی را بر روی نقشه‌های مربوط به منطقه مورد نظر اعمال نماید و در نهایت با برداشت اطلاعات جغرافیایی لازم از روی نقشه‌ها، آن را به نرم‌افزار تحلیل‌گر شبکه لوله ارجاع دهد. این مراحل مقدماتی نه تنها بسیار وقت‌گیر و خسته‌کننده است، بلکه باعث بروز خطاهای محاسباتی و انسانی بی‌شماری می‌گردد که صحت نتایج گرفته شده از برنامه‌های ذکر شده را با تردید مواجه می‌سازد. به منظور برداشته شدن و حذف محاسبات مربوط به برداشت‌های جغرافیایی، نرم‌افزار WaterGEMS طراحی و ارائه شده است. این نرم‌افزار با قابلیت پشتیبانی از نرم‌افزار اطلاعات جغرافیایی ArcGIS توانایی انجام و انتقال نتایج حاصل از محاسبات جغرافیایی را دارا می‌باشد. علاوه بر این، شرکت Haestade با عقد یک قرارداد سه جانبه با شرکت‌های Microsoft، Autodesk و ESRI سه نرم‌افزار ArcGIS، Autocad و Microsoft Excel را به خدمت گرفته و با وارد کردن ابزارآلات و منوهای WaterGEMS روی رابط گرافیکی این محصولات باعث گسترده شدن کارایی WaterGEMS شده است.

با توجه به قابلیت‌های ذکر شده و همچنین امکان تعریف ویژگی‌های سیال و جنس لوله‌ها، دسترسی به نسخه کامل نرم‌افزار در داخل کشور و توانایی مدل‌سازی تعداد بسیار زیاد لوله، نرم‌افزار WaterGEMS به عنوان نرم‌افزار مناسب برای تحلیل جریان سیال در شبکه لوله‌ها انتخاب می‌گردد.

۵-۳-۳- مدل سازی عددی جریان سیال با استفاده از نرم افزار WaterGEMS

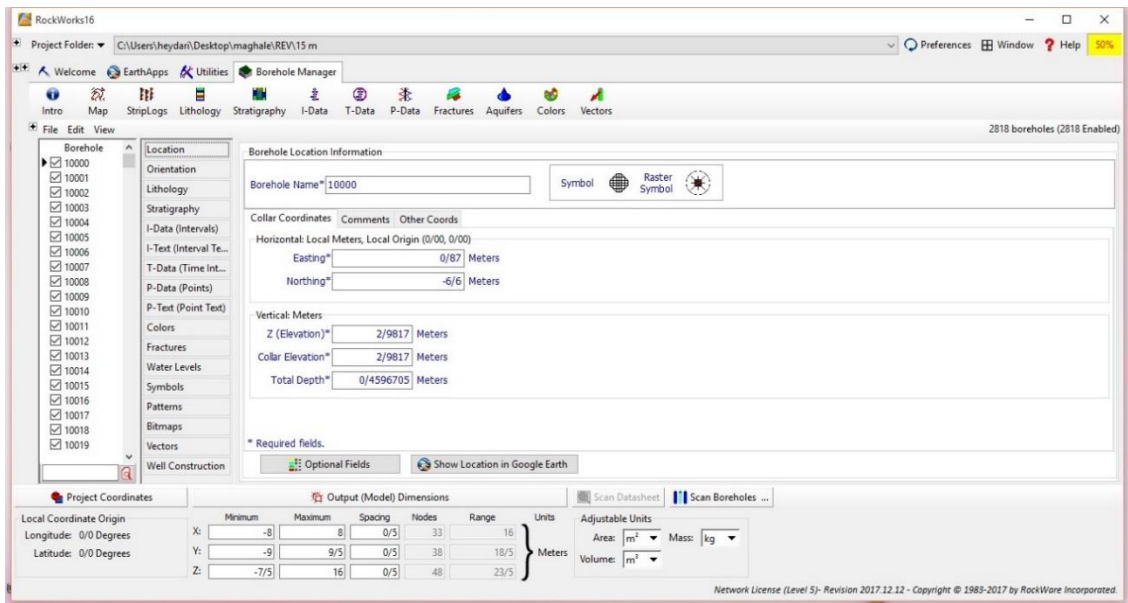
در این بخش با کاربرد نرم افزار WaterGEMS به مدل‌سازی جریان سیال در مدل شبکه لوله تهیه شده در منطقه مزینو به عنوان مورد مطالعاتی این تحقیق پرداخته می‌شود.

۵-۳-۳-۱- مناسب سازی داده‌های ورودی

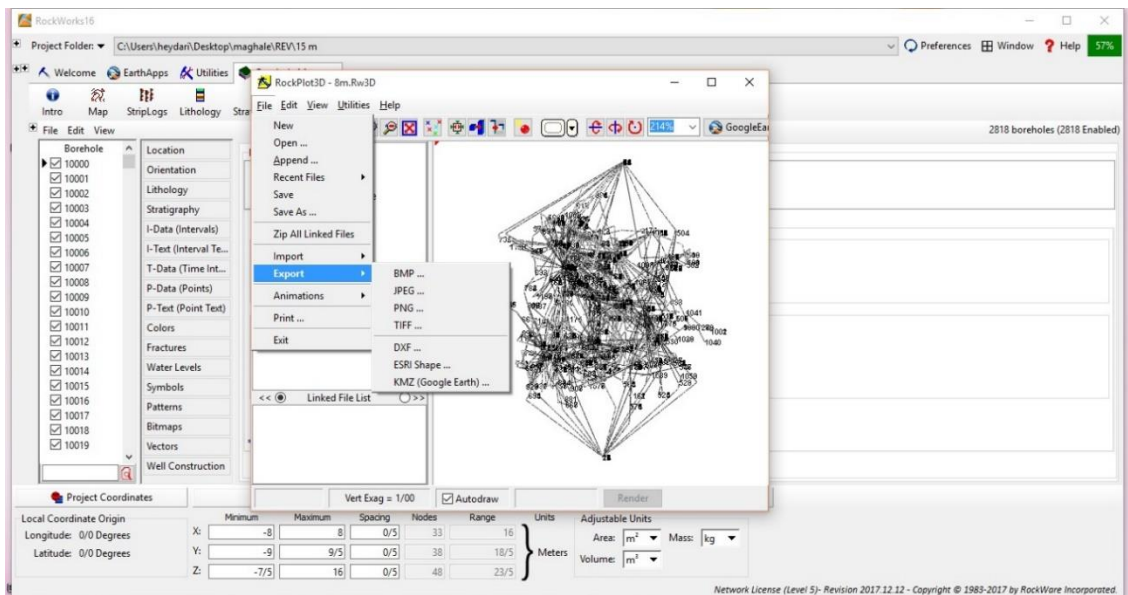
پیش از شروع فرآیند مدل‌سازی جریان ابتدا لازم است داده‌های خروجی برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} برای ورود به نرم‌افزار WaterGEMS مناسب‌سازی شوند. بدین منظور طی چند مرحله داده‌های خروجی متنی کد DFN که به صورت فایل Notepad ارائه می‌شود به فرمت مناسب ورودی نرم‌افزار عددی تبدیل شوند که این مراحل به ترتیب در ادامه شرح داده می‌شوند.

الف) مرحله اول: تهیه فایل Excel

همانطور که در شکل ۵-۱۲، نشان داده شده است، خروجی متنی برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} به صورت مختصات محلی ابتدا و انتهای لوله، طول و قطر لوله‌ها است. در مرحله اول مطابق شکل ۵-۱۳، به منظور ترسیم فضایی این لوله‌ها، یک کد محاسباتی در نرم‌افزار Excel نوشته شده است که مختصات ابتدا و انتهای هر لوله را وارد کرده و شیب و جهت شیب را محاسبه و تولید می‌نماید.



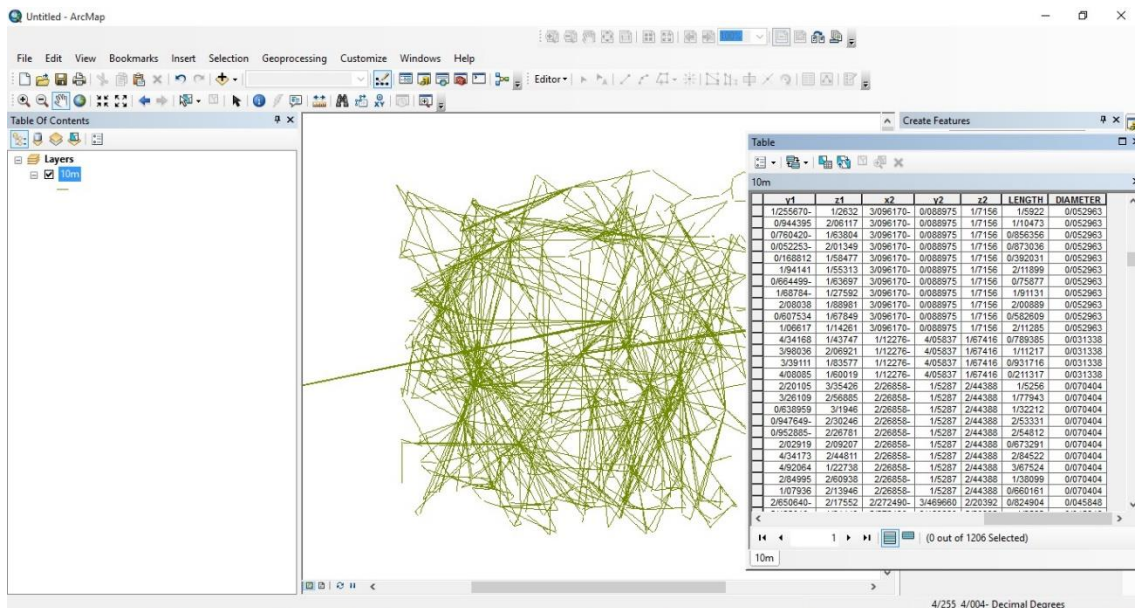
شکل ۵-۱۴: ورود داده‌های لوله‌ها به نرم افزار ROCKWORK ۱۶



شکل ۵-۱۵: خروجی DXF از نرم افزار ROCKWORK ۱۶

(پ) مرحله سوم: کاربرد نرم‌افزار GIS

در این مرحله، مطابق شکل ۵-۱۶، قطر لوله‌های تشکیل شده به صورت یک ویژگی به هر لوله تخصیص داده می‌شود. برای این منظور از نرم افزار GIS که فایل ورودی به فرمت DXF را دریافت می‌کند و قطر هر لوله را به آن اضافه می‌کند، استفاده شده است.



شکل ۵-۱۶: تعریف قطر برای هر لوله به صورت یک ویژگی کیفی

ت) مرحله چهارم: نرم افزار WaterGEMS

در این مرحله فایل شکلی^۱ تولید شده در نرم افزار GIS وارد نرم افزار WaterGEMS می شود. هم اکنون مدل شبکه لوله برای انجام تحلیل های جریان سیال آماده است.

۵-۳-۲- شرایط مرزی و ویژگی های سیال

شرایط مرزی ورودی جریان، فشار ورودی و شرایط مرزی خروجی جریان، فشار خروجی^۲ است. فشار خروجی برای تعیین فشار استاتیک و سایر متغیرهای جریان در مرز خروجی استفاده می شود. سایر مرزهای مدل بسته است و از عبور جریان در این مرزها جلوگیری شده است.

ویژگی های سیال استفاده شده در مدل سازی ها در ادامه شرح داده شده است. سیال حاصل از روش استخراج UCG شامل مخلوطی از گازهای CH_4 ، H_2 ، CO ، CO_2 و H_2O است. ترکیب این سیالات صرف نظر از تاثیر عوامل غیرقابل کنترل، وابسته به عوامل قابل کنترل مانند نوع اکسیدان، آب، درجه حرارت و فشار راکتور است.

^۱ Shape File

^۲ -Pressure Outlet

برای استفاده از نرم‌افزار WaterGEMS فرض سیال تراکم‌ناپذیر غیر قابل اجتناب است. در این تحقیق نیز از این فرض استفاده شده است. همچنین در این نرم‌افزار، قبل از حل هر مساله نیاز است که ویژگی سیال تعریف شود. در صورتی که سیال مورد نظر در بانک اطلاعاتی نرم‌افزار موجود نباشد، می‌توان یک سیال جدید با ویژگی‌های مورد نظر تعریف نمود. ویژگی‌های مورد نظر در این مدل وزن مولکولی، چگالی، لزجت، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب هدایت حرارتی سیال است. از آنجا که سیال مورد نظر در این تحقیق گاز حاصل از فرآیند UCG است، این ویژگی‌ها برای این گاز تعیین می‌شوند.

الف) وزن مولکولی و چگالی گاز

ضریب تراکم‌پذیری^۱ گاز سنتزی با استفاده از رابطه‌ی برزلیوت^۲ در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه کلوین و فشار ۱ تا ۵ مگاپاسکال درون راکتور محاسبه شده است. بر این اساس مشاهده شد که ضریب تراکم‌پذیری گاز بین ۱/۰۰۱ تا ۱/۰۰۶ درون راکتور تغییر می‌کند. در نتیجه می‌توان از مقدار آن صرف نظر کرده و از معادله‌ی حالت گازهای ایده‌آل به صورت زیر برای محاسبه چگالی گاز استفاده نمود.

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (5-5)$$

در رابطه‌ی (۵-۵)، ρ_g چگالی گاز بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، P فشار گاز بر حسب پاسکال، M وزن مولکولی گاز بر حسب گرم بر مول، R ثابت گازها با مقدار $8.315 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ و T درجه حرارت بر حسب کلوین است.

ترکیب و وزن مولکولی گاز درون راکتور با توجه به نمودار ارایه شده توسط پرکینز برآورد شده است (Perkins, ۲۰۰۵). همچنین چگالی گاز درون راکتور در دمای ۱۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین و فشار ۱ مگاپاسکال از رابطه‌ی (۵-۵) محاسبه شده و در جدول ۵-۳، آورده شده است.

^۱ - Compressibility Factor

^۲ - Berthelot Equation

جدول ۳-۵: برآورد ترکیب، وزن مولکولی و چگالی گاز درون راکتور

چگالی مخلوط سیال (Kg/m ^۳)	وزن مولکولی (gr/mol)	ترکیب گاز (درصد)					درجه حرارت (K)	فشار سیال (MPa)	ردیف
		H _۲ O	CO _۲	CO	H _۲	CH _۴			
۱/۸۱	۱۸/۰۶	۳۳	۰	۴۰/۲۰	۲۴/۷۹	۲/۰۱	۱۲۰۰	۱	۱
۱/۶۹	۱۸/۳۳	۳۳	۰	۴۰/۶۵	۲۳/۲۳	۳/۱۳	۱۳۰۰		۲
۱/۶۰	۱۸/۶۰	۳۳	۰	۴۱/۰۹	۲۱/۶۶	۴/۲۴	۱۴۰۰		۳
۱/۴۵	۱۸/۰۶	۳۳	۰	۴۱/۵۴	۲۰/۱۰	۵/۳۶	۱۵۰۰		۴

ب) لزجت پویای گاز

لزجت، مقاومت گاز در برابر اعمال تنش برشی است. لزجت گازها با افزایش دما، کاهش می‌یابد. برای محاسبه لزجت گازها به صورت تابعی از دما از رابطه‌ی ساترلند^۱ استفاده شده است.

$$\mu = \mu_0 \frac{T + C}{T_0 + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (۶-۵)$$

در رابطه‌ی (۶-۵)، μ لزجت پویای گاز بر حسب $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ در دمای T بر حسب K ، μ_0 لزجت پویای گاز در دمای T_0 و C ثابت ساترلند هستند. لزجت گازهای CH_4 ، H_2 ، CO ، CO_2 و بخار آب از رابطه‌ی ساترلند در دماهای ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ کلوین محاسبه شده و در جدول ۳-۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۳-۵ و درصد گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر، لزجت پویای مخلوط گاز بر حسب kg/m.s محاسبه شده و در جدول ۴-۵ آورده شده است.

^۱ - Sutherland Equation

جدول ۴-۵: لزجت گازها در دماهای مورد نظر

ردیف	نوع گاز	μ_0 (kg/m.s)	T_0 (K)	μ_{1200} (kg/m.s)	μ_{1300} (kg/m.s)	μ_{1400} (kg/m.s)	μ_{1500} (kg/m.s)
۱	CH _۴	$۱/۲ \times ۱۰^{-۵}$	۲۷۳/۱۵	$۳/۷۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۳/۹۲ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۷۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۴/۲۹ \times ۱۰^{-۵}$
۲	H _۲	$۸/۴۱ \times ۱۰^{-۶}$	۲۷۳/۱۵	$۲/۲۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۴۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۲/۵۱ \times ۱۰^{-۵}$
۳	CO	$۱/۰ \times ۱۰^{-۴}$	۲۷۳/۱۵	$۲/۷۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۸۷ \times ۱۰^{-۴}$	$۲/۹۹ \times ۱۰^{-۴}$	$۳/۱۱ \times ۱۰^{-۴}$
۴	CO _۲	$۱/۳۷ \times ۱۰^{-۵}$	۲۷۳/۱۵	$۴/۳۹ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۶۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۸۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۵/۰۷ \times ۱۰^{-۵}$
۵	H _۲ O	$۱/۳۴ \times ۱۰^{-۵}$	۲۹۸/۱۵	$۵/۵۵ \times ۱۰^{-۵}$	$۵/۹۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۶/۳۱ \times ۱۰^{-۵}$	$۶/۶۷ \times ۱۰^{-۵}$

جدول ۵-۵: لزجت مخلوط گاز تولید شده در دما و فشارهای مورد نظر

ردیف	فشار (MPa)	μ_{1200} (kg/m.s)	μ_{1300} (kg/m.s)	μ_{1400} (kg/m.s)	μ_{1500} (kg/m.s)
۱	۱	$۱/۳۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۴۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۵۱ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۵۹ \times ۱۰^{-۴}$
۲	۲	$۱/۲۹ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۳۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۴۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۵۵ \times ۱۰^{-۴}$
۳	۳	$۱/۲۳ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۳۴ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۴۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۵۶ \times ۱۰^{-۴}$
۴	۴	$۱/۱۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۳۰ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۴۲ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۵۴ \times ۱۰^{-۴}$
۵	۵	$۱/۱۵ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۲۸ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۴۱ \times ۱۰^{-۴}$	$۱/۵۵ \times ۱۰^{-۴}$

پ) مشخصات سیال

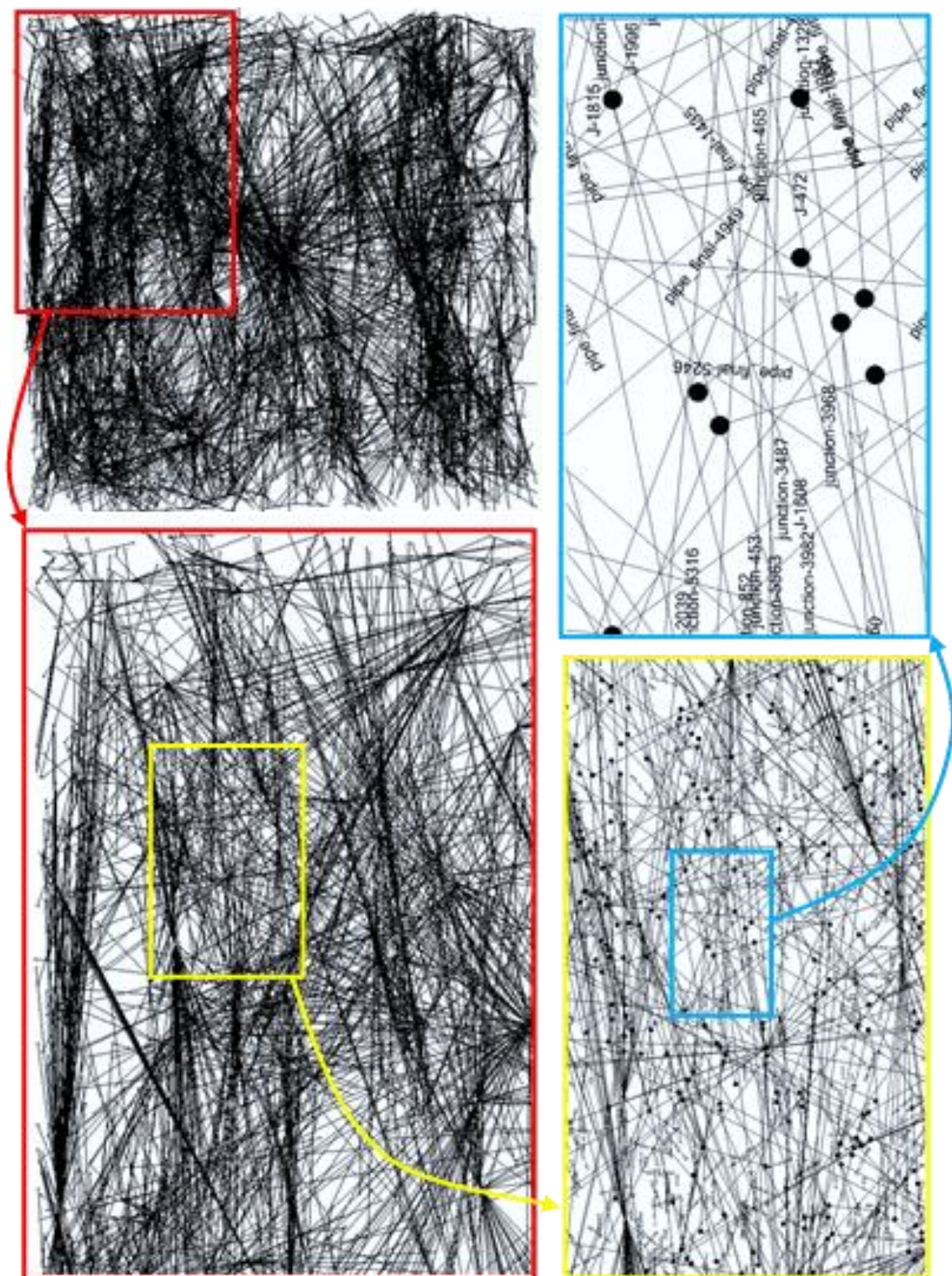
با توجه به محاسبات صورت گرفته و نتایج ارایه شده در جداول فوق، مشخصات سیال مورد استفاده در تحلیل جریان در نرم افزار WaterGEMS به شرح جدول ۵-۶، برآورد شده است.

جدول ۵-۶: مشخصات سیال ورودی در نرم افزار WaterGEMS

نوع سیال	LPG
لزجت سینماتیک سیال	0.15×10^{-6} (Stokes)
وزن مخصوص سیال	1.64 (Kg/m ³)

۵-۳-۳-۳- تحلیل مثال فرضی

در این بخش مدل شبکه لوله معادل (شکل ۴-۱۲) با شبکه درزه مجزای نشان داده شده در شکل ۴-۱۰ ب با استفاده از نرم افزار WaterGEMS تحت آنالیز جریان قرار می گیرد. برای این منظور دو مخزن در نقاط ابتدا و انتهای شبکه لوله تعریف می شود و پمپ مناسبی در نقطه شروع شبکه برای تامین فشار مخزن قرار داده می شود. خروجی نرم افزار 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. تحلیل جریان برای شبکه لوله شکل ۴-۱۲، در شکل ۵-۱۷، نشان داده شده است. در این مثال، فشار ورودی برابر ۱ مگاپاسکال فرض شده است و بر این اساس، فشار در نقطه خروجی برابر ۰.۶ مگاپاسکال به دست آمده است.



شکل ۵-۱۷: شبکه لوله‌ها و جهات جریان در نرم‌افزار WaterGEM

۵-۳-۴- بررسی نشت سیال در منطقه مزینو

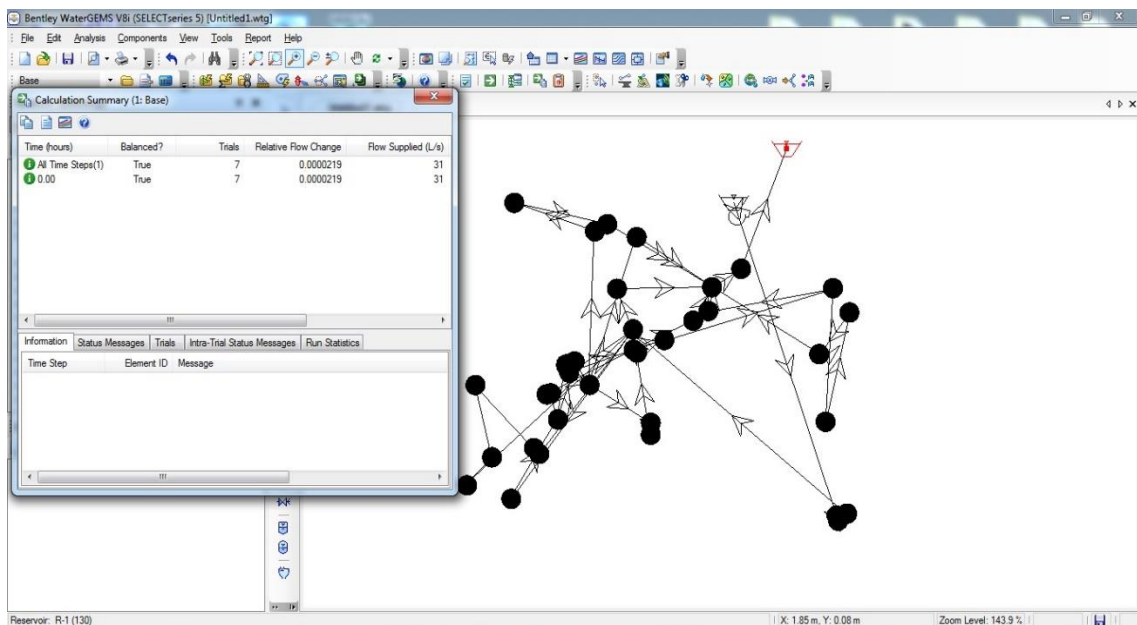
همانطور که از شکل ۵-۱۱، (شبکه درزه‌های متصل) پیداست، درزه‌های متصل، مرزهای پایینی و بالایی مدل را به یکدیگر متصل نمی‌کنند. به عبارت دیگر، در برخی نواحی از مدل، اتصال درزه‌ها به یکدیگر برقرار نیست و درزه‌های مدل به طور کامل به یکدیگر متصل نیستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورت اجرای UCG در معدن زغال مزینو، بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده، گازهای ناشی از آن به سطح زمین نشت نخواهند کرد.

به منظور انجام تحلیل حساسیت و با هدف ایجاد شبکه‌ای کاملاً متصل از درزه‌ها بین مرزهای پایینی و بالایی، در این تحقیق فرض شده مقادیر و توابع توزیع عوامل طول، شیب، جهت شیب و همچنین بازشدگی برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده در مطالعات میدانی باشد، در عین حال عوامل شدت حجمی درزه با افزایش ۵۰ درصدی نسبت به مقادیر محاسبه شده برای منطقه در نظر گرفته شده است. برای این حالت، مجدداً مدل شبکه درزه برای منطقه مزینو تهیه شده است.

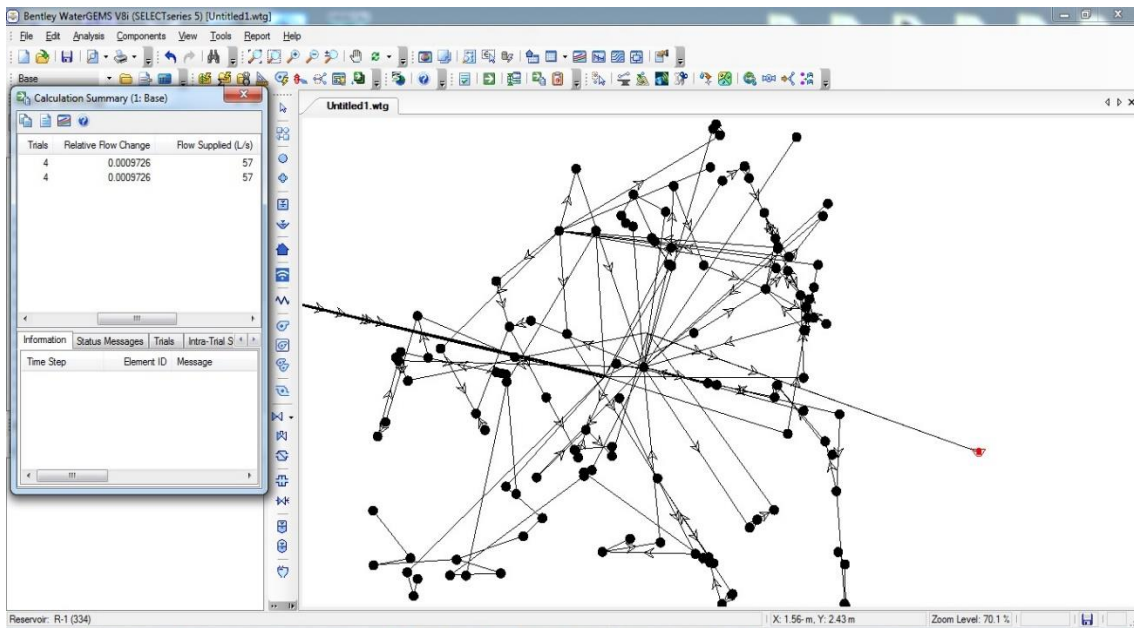
مدل جدید متشکل از ۳۴۷۲۸۸ درزه و ۱۰۴۵۱ درزه متصل تهیه شده است. در مدل جدید درزه‌های متصل به طور کامل به یکدیگر اتصال دارند و مرزهای پایینی و بالایی مدل را به یکدیگر متصل می‌کنند. با توجه به تعداد بسیار زیاد لوله تشکیل شده در مدل (بیش از یک میلیون)، برنامه DFN-^{3D} FRAC قادر به اجرای بخش ایجاد شبکه لوله نیست. علاوه بر این هیچ نرم‌افزار تجاری‌ای نیز قادر به تحلیل چنین مدلی نمی‌باشد. لذا تصمیم بر تهیه مدل REV براساس مدل جدید گرفته شد. طبق تعریف، کوچکترین اندازه‌ای از مدل که در آن، تعداد کافی ناهمگنی‌ها برای ثابت ماندن ویژگی‌های معادل توده‌سنگ، 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 رساله، تعداد ۵ اندازه نمونه مکعبی با ابعاد ۳، ۵، 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

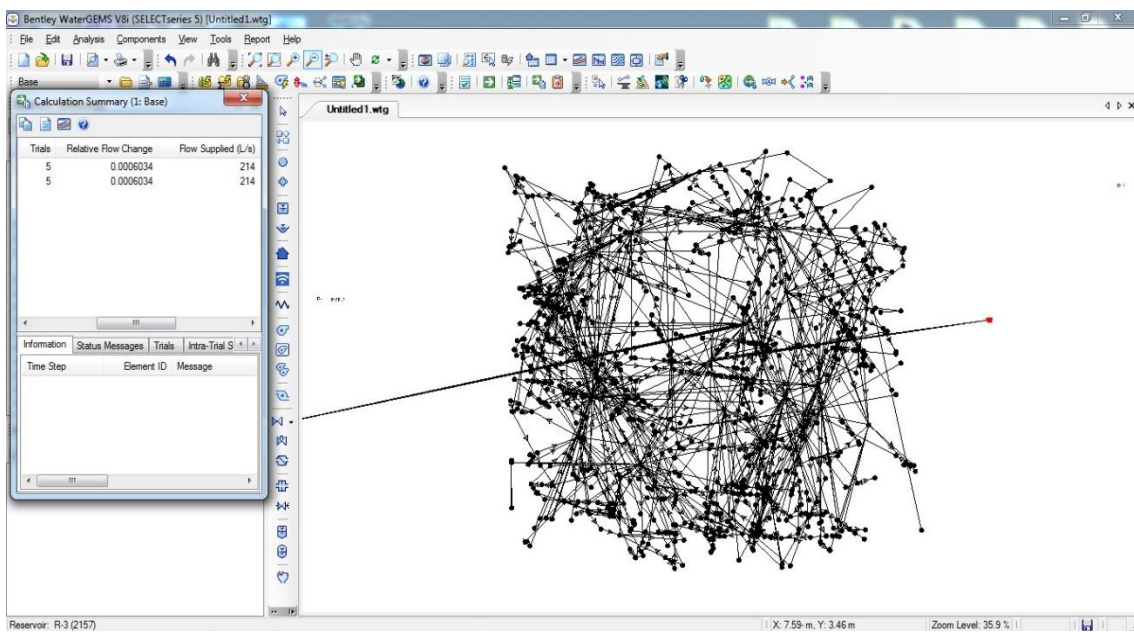
متعاقباً مدل شبکه لوله ایجاد شده است. در نهایت همانطور که در شکل‌های ۵-۱۸ تا ۵-۲۲ نشان داده شده است، مدل شبکه لوله با استفاده از نرم‌افزار تجاری WaterGEMS تحلیل شده و مقدار شدت جریان محاسبه شده است. نتایج حاصل برای اندازه‌های مختلف نمونه به طور خلاصه در جدول ۵-۷ و به طور شماتیک در شکل ۵-۲۳، نشان داده شده است. مقدار شدت جریان برای کوچکترین نمونه با ابعاد $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$ برابر 30.6 lit/s 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 $8\text{m} \times 8\text{m} \times 8\text{m}$ برآورد می‌شود. در اندازه‌های بزرگ‌تر از این مقدار، تغییرات شدت جریان ناچیز است. بر اساس اندازه‌ی REV، نرخ جریان متوسط توده‌سنگ مورد مطالعه، 212 lit/s برآورد شده است.



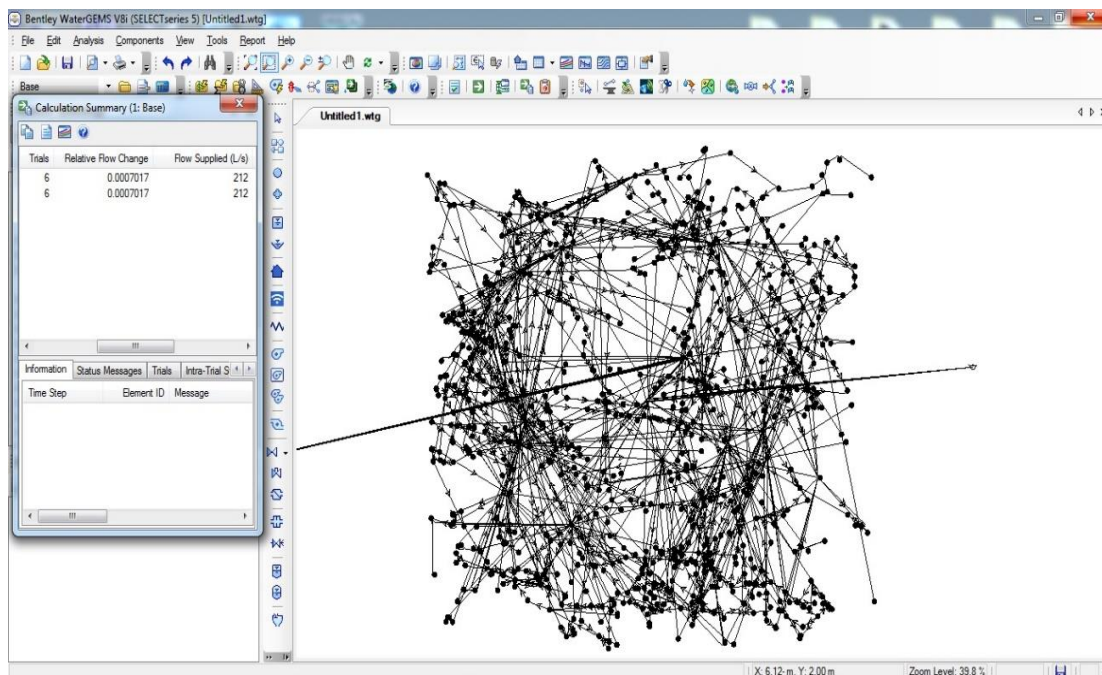
شکل ۵-۱۸: نتایج تحلیل جریان مدل $3 \times 3 \times 3$ مترمکعبی توسط نرم‌افزار WaterGEMS



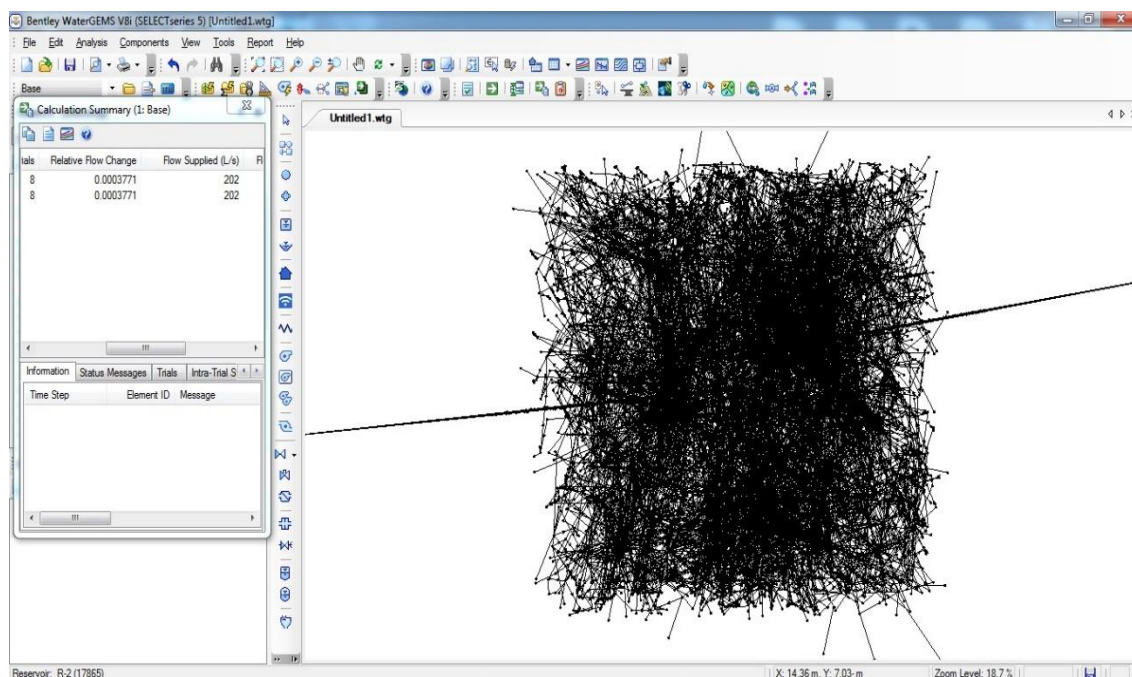
شکل ۵-۱۹: نتایج تحلیل جریان مدل $5 \times 5 \times 5$ مترمکعبی توسط نرم‌افزار WaterGEMS



شکل ۵-۲۰: نتایج تحلیل جریان مدل $8 \times 8 \times 8$ مترمکعبی توسط نرم‌افزار WaterGEMS



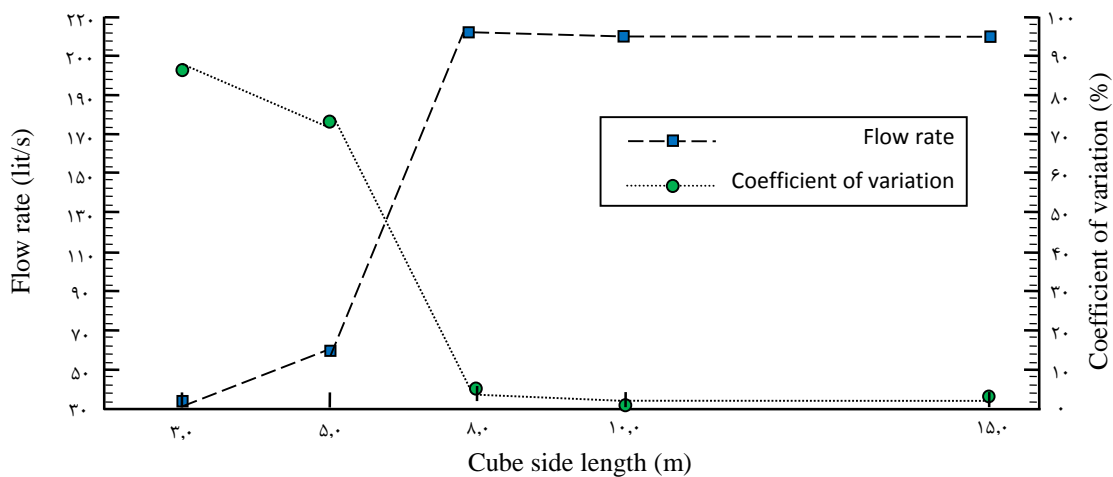
شکل ۵-۲۱: نتایج تحلیل جریان مدل ۱۰×۱۰×۱۰ مترمکعبی توسط نرم‌افزار WaterGEMS



شکل ۵-۲۲: نتایج تحلیل جریان مدل ۱۵×۱۵×۱۵ مترمکعبی توسط نرم‌افزار WaterGEMS

جدول ۵-۷: خلاصه محاسبه شدت جریان در اندازه‌های مختلف مدل

شدت جریان سیال (Lit/s)	فشار رآکتور (MPa)	ابعاد مدل	ردیف
۳۱	۱	۳×۳×۳	۱
۵۷	۱	۵×۵×۵	۲
۲۱۴	۱	۸×۸×۸	۳
۲۱۲	۱	۱۰×۱۰×۱۰	۴
۲۰۲	۱	۱۵×۱۵×۱۵	۵



شکل ۵-۲۳: مقادیر نرخ جریان برای اندازه‌های مختلف توده سنگ ناحیه مزینو

۵-۳-۳-۵- تحلیل حساسیت پارامترهای تاثیر گذار بر نشت سیال

همانطور که قبلاً بیان شد، از جمله مهمترین عوامل تاثیر گذار 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 هستند که در نشت سیال موثر هستند. در این بخش، نقش هر یک از این پارامترها بر نشت گاز از کارگاه استخراج UCG مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل

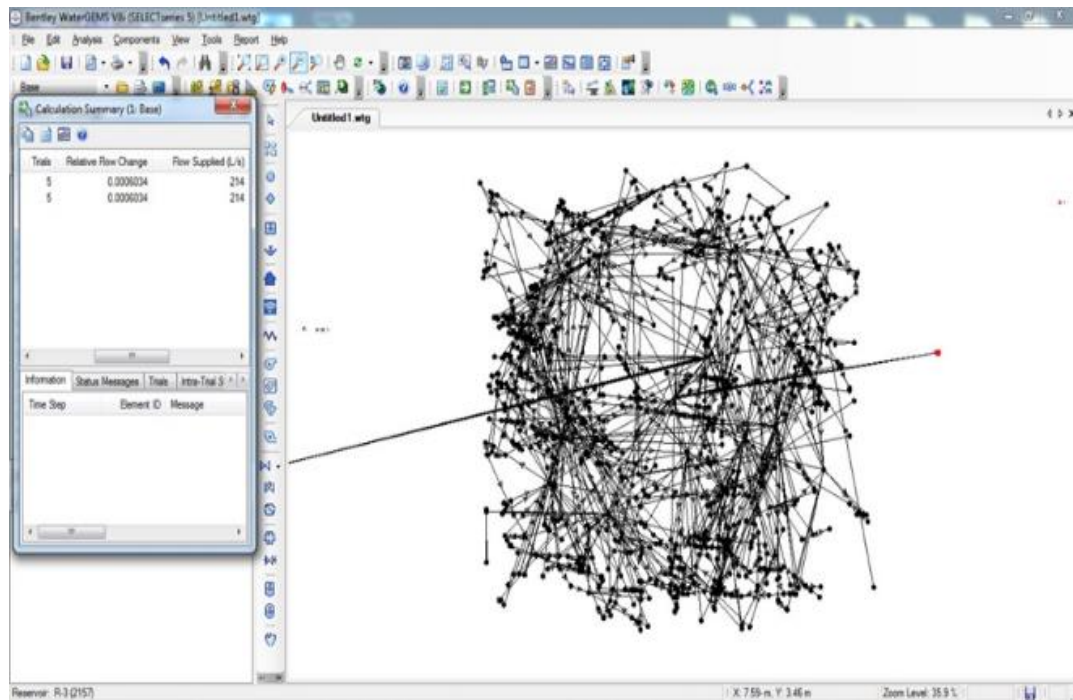
حساسیت پارامترها و تاثیر آنها در میزان نشت گاز با انجام آزمایش‌های عددی بر روی مدل مرجع تهیه شده از مورد مطالعاتی مزینو طبس و در اندازه REV جریان (بلوک ۸×۸×۸ مترمکعبی) بدست آمده صورت می‌گیرد.

۵-۳-۳-۱ آنالیز حساسیت نسبت به فشار مخزن

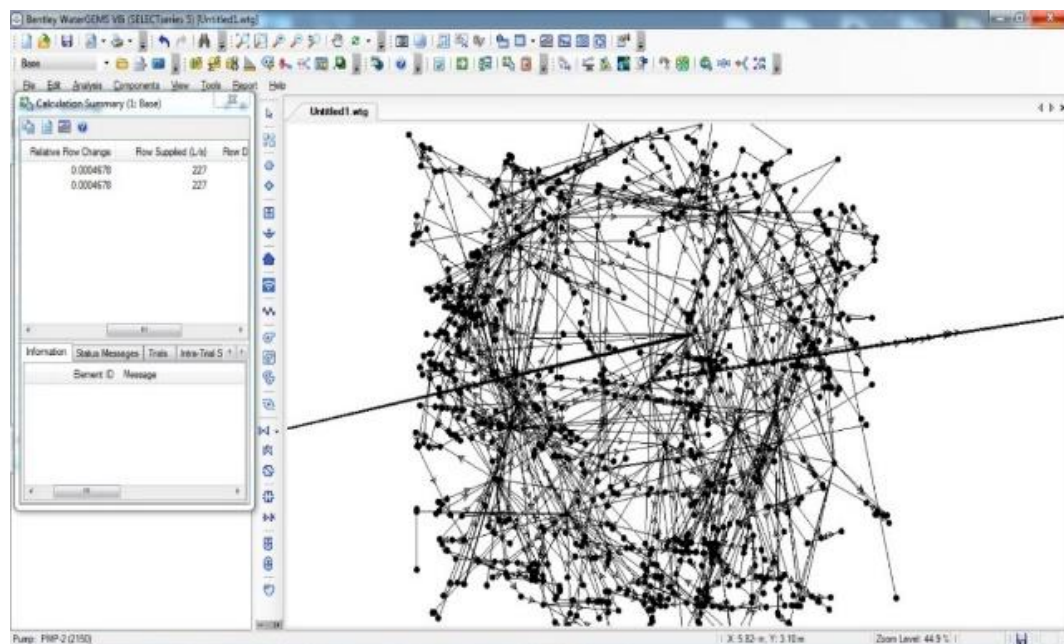
فرآیند UCG می‌تواند در عمق کم با شرایط فشار پایین و در عمق زیاد با شرایط فشار زیاد انجام گیرد. اخیراً در تمام پروژه‌های UCG برای کاهش آلودگی سعی می‌شود تحت فشار ایستابی کار شود. در کارگاه استخراج کم عمق مانند چین‌چیلا^۱ فشار اتمسفری ۱ مگاپاسکال و در کارگاه‌های استخراج عمیق در اروپا فشار را حدوداً ۶ مگاپاسکال در نظر می‌گیرند (Jones, ۲۰۰۴).

برای بررسی تاثیر فشار بر نشت سیال در منطقه مزینو سه فشار کاری کم فشار ۱ مگاپاسکال، فشار متوسط ۳ مگاپاسکال و پر فشار ۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و در هر فشار مقدار خروج سیال از سطح زمین بررسی شده است. شدت جریان در 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 ۵-۲۴ تا ۵-۲۶ نشان داده شده است. خلاصه نتایج در نمودار شکل ۵-۲۷، ارایه گردیده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار در راکتور، مقدار نشت گاز افزایش می‌یابد. همانگونه که در بخش‌های پیشین 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 ی سنگ در برگیرنده راکتور می‌شود.

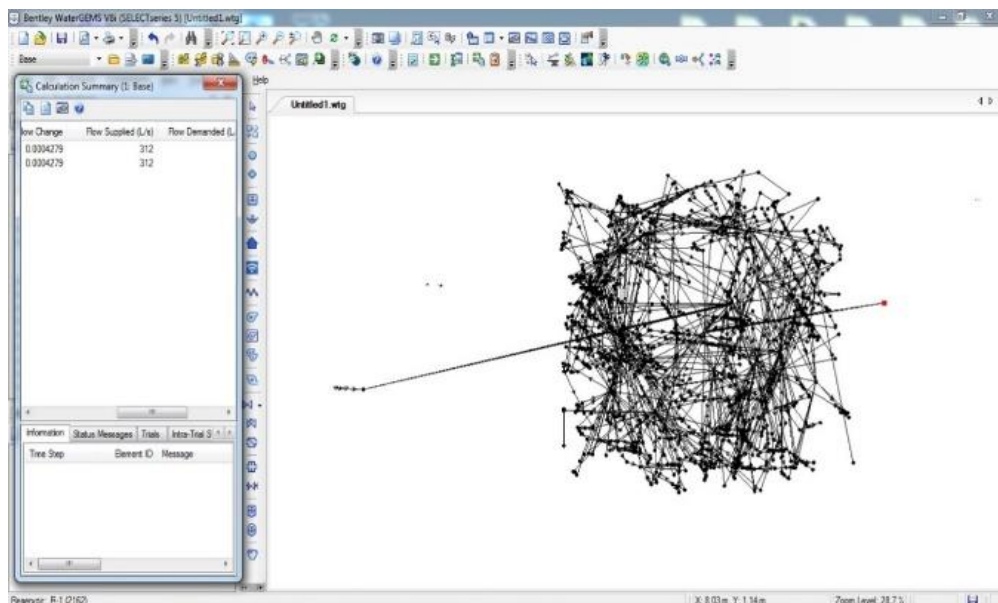
^۱ - Chinchilla



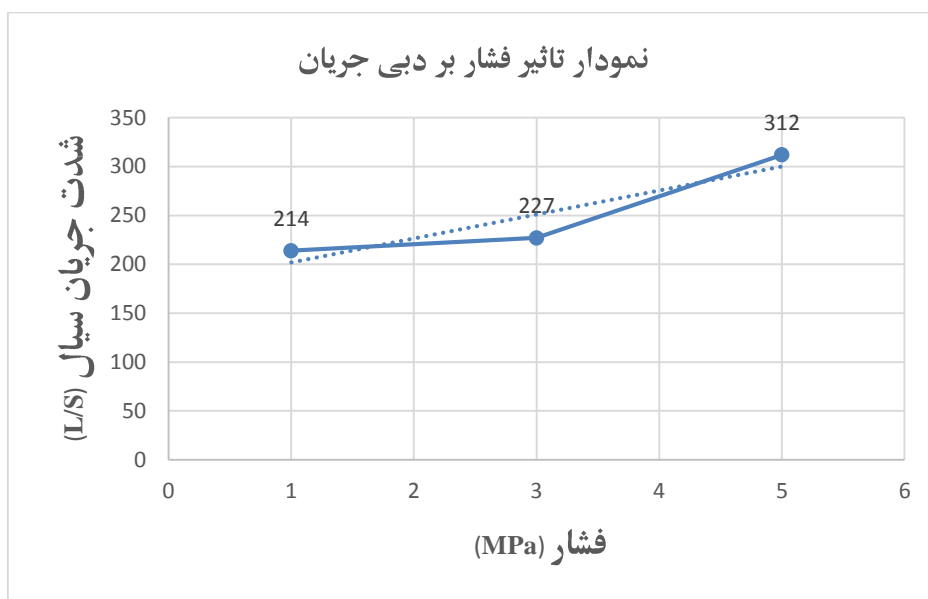
شکل ۵-۲۴: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال



شکل ۵-۲۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۳ مگاپاسکال



شکل ۵-۲۶: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۵ مگاپاسکال

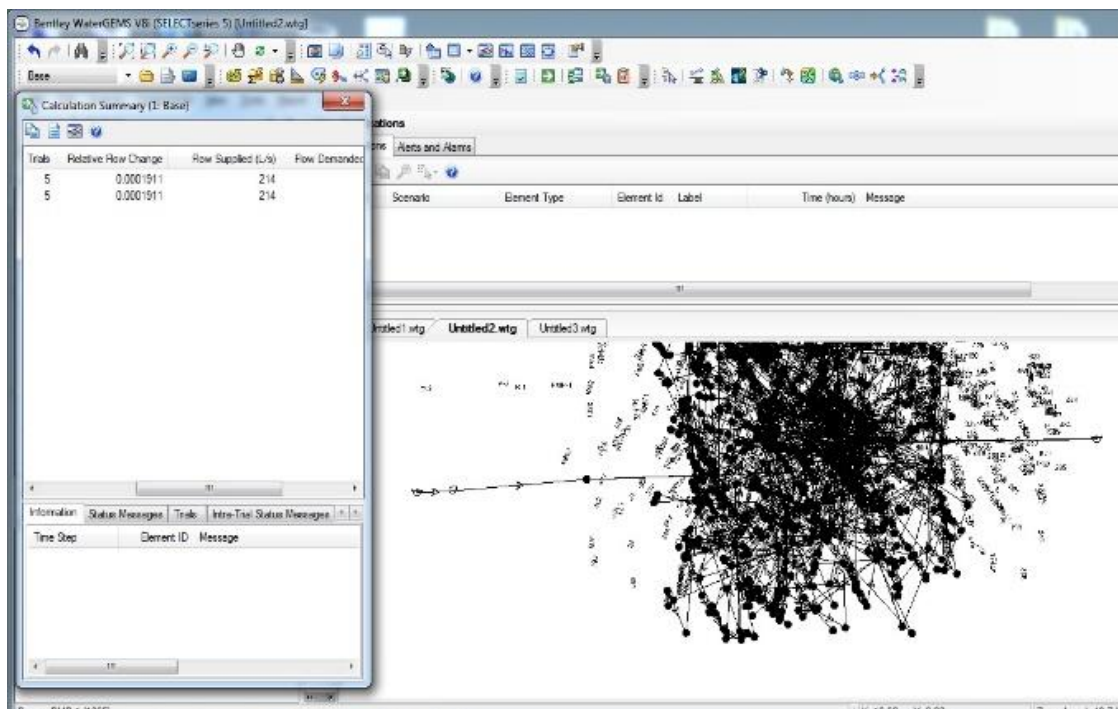


شکل ۵-۲۷: نمودار تاثیر تغییرات فشار راکتور UCG بر شدت جریان سیال

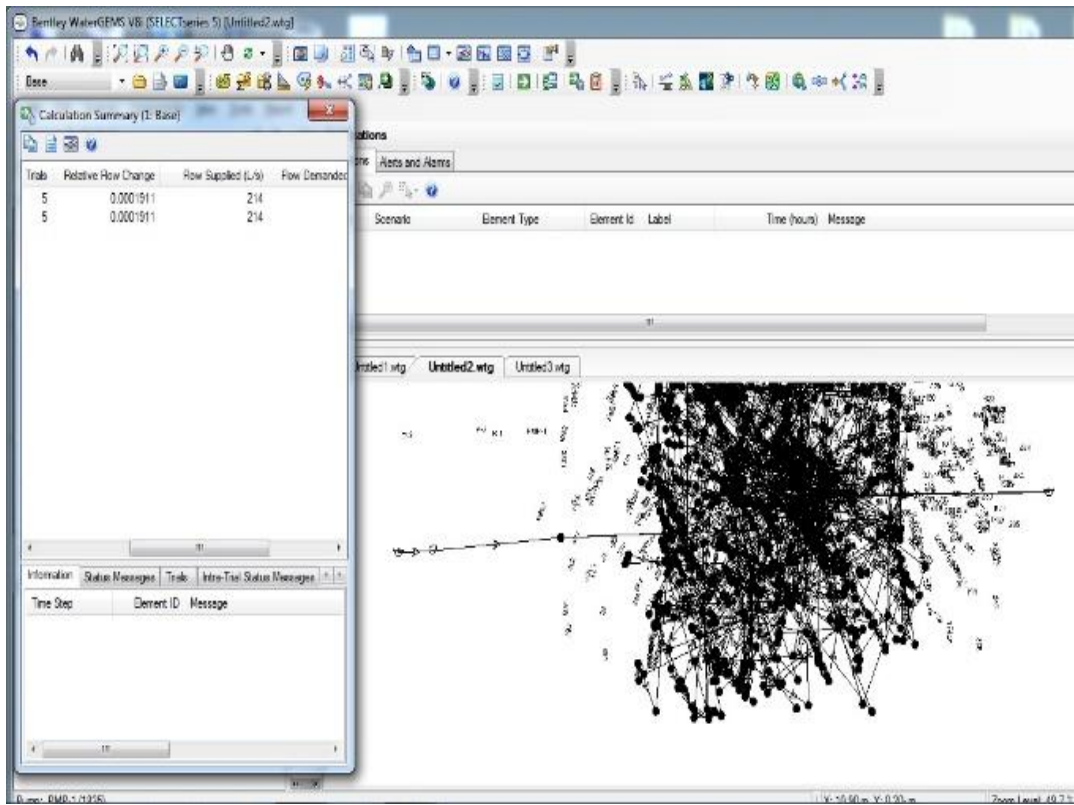
۵-۳-۳-۲ تحلیل حساسیت نسبت به دمای گاز

فرآیند UCG بسته به شرایط و ترکیب اکسیدان و فشار مخزن در دماهای متفاوتی معمولاً بین ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، انجام می‌شود. اگرچه همانطور که قبلاً ذکر شد، نقش دما در نشت سیال در

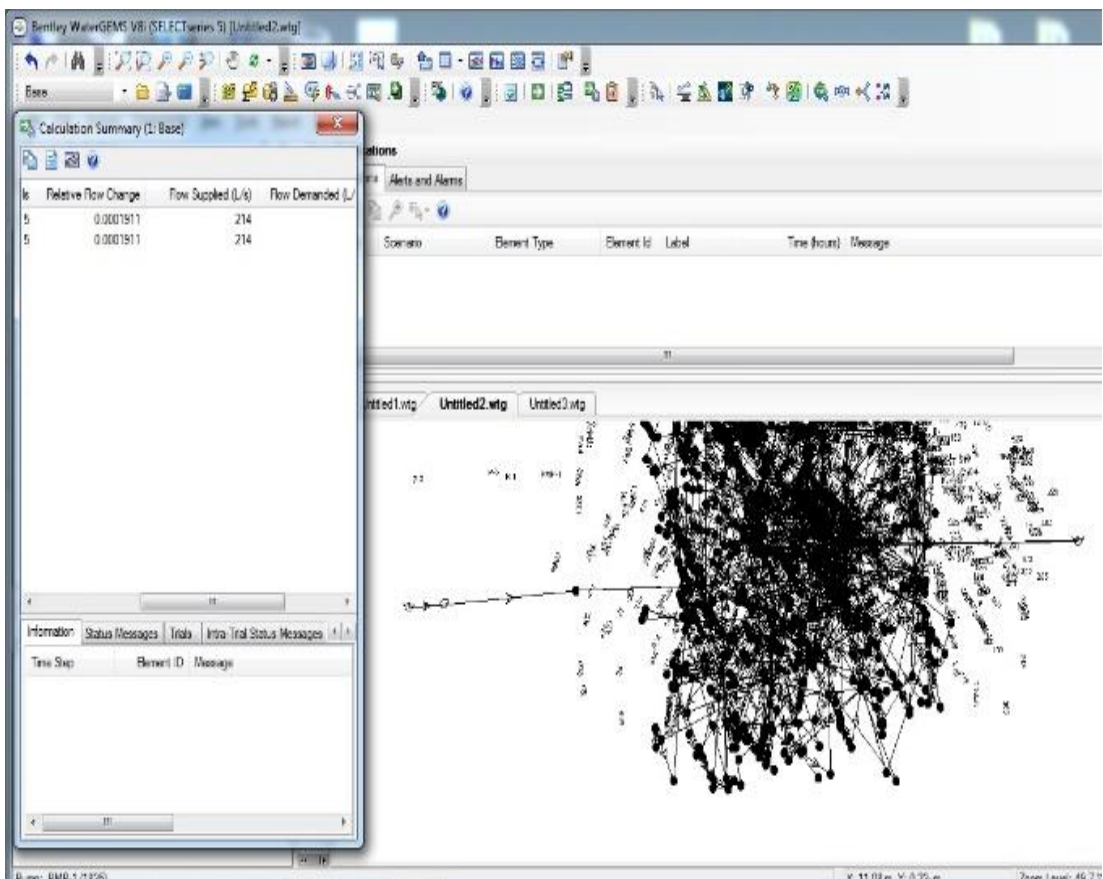
محیط‌های درزه و شکاف‌دار کم‌رنگ است، اما از طرفی دما بر ترکیب گازها موثر است و می‌تواند به طور غیرمستقیم بر نشت سیال تاثیرگذار باشد. لذا از آنجا که تاثیر دما بر نشت سیال در محیط‌های درزه و شکاف‌دار ناشناخته است، در این بخش به بررسی نقش دما بر نشت سیال پرداخته می‌شود. برای بررسی نشت سیال، با تمرکز بر 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 شکل‌های ۵-۲۸ تا ۵-۳۱ نشان داده شده است. خلاصه نتایج نیز در نمودار شکل ۵-۳۲ ارایه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش دما تاثیری بر میزان نشت سیال ندارد. در تمام حالت‌ها شدت جریان برابر ۲۱۴ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. همانگونه که در بخش‌های پیشین 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 می‌باشد.



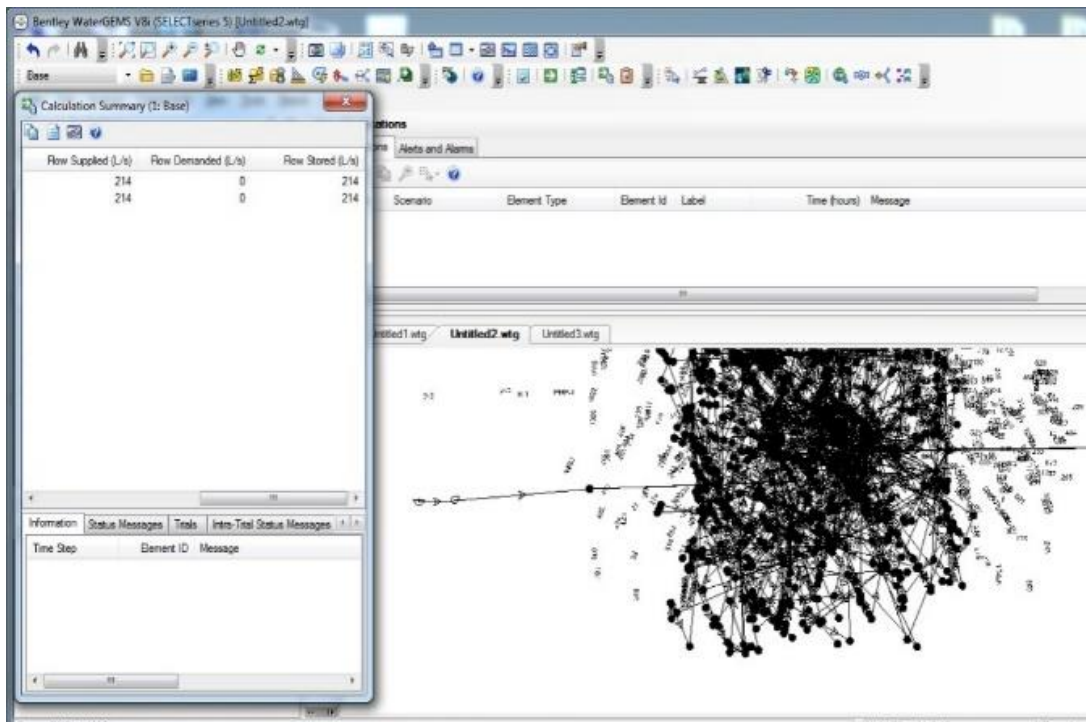
شکل ۵-۲۸: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد



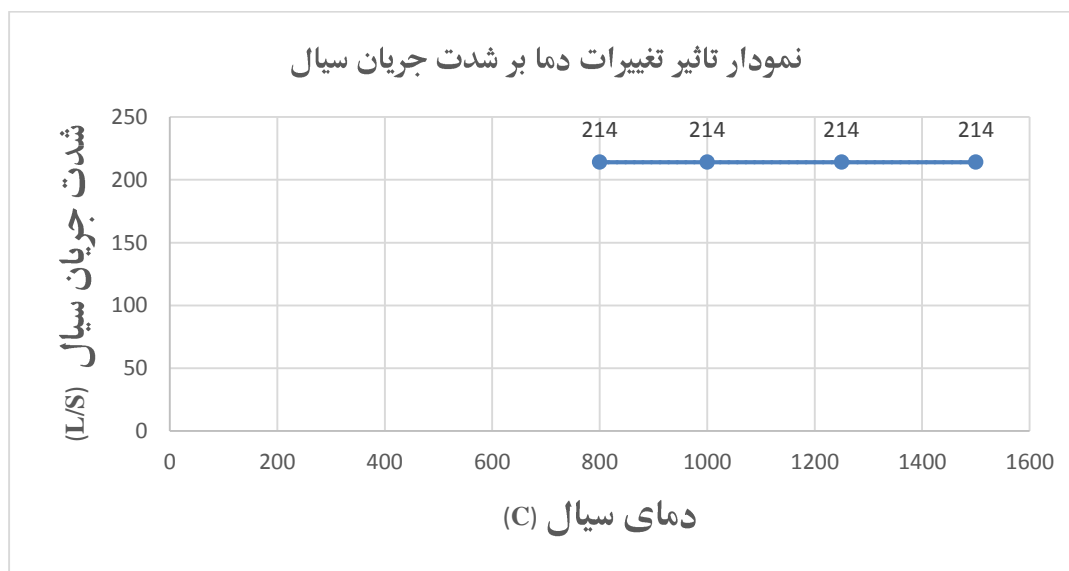
شکل ۵-۲۹: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد



شکل ۵-۳۰: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد



شکل ۳۱-۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با فشار ۱ مگاپاسکال و دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی گراد



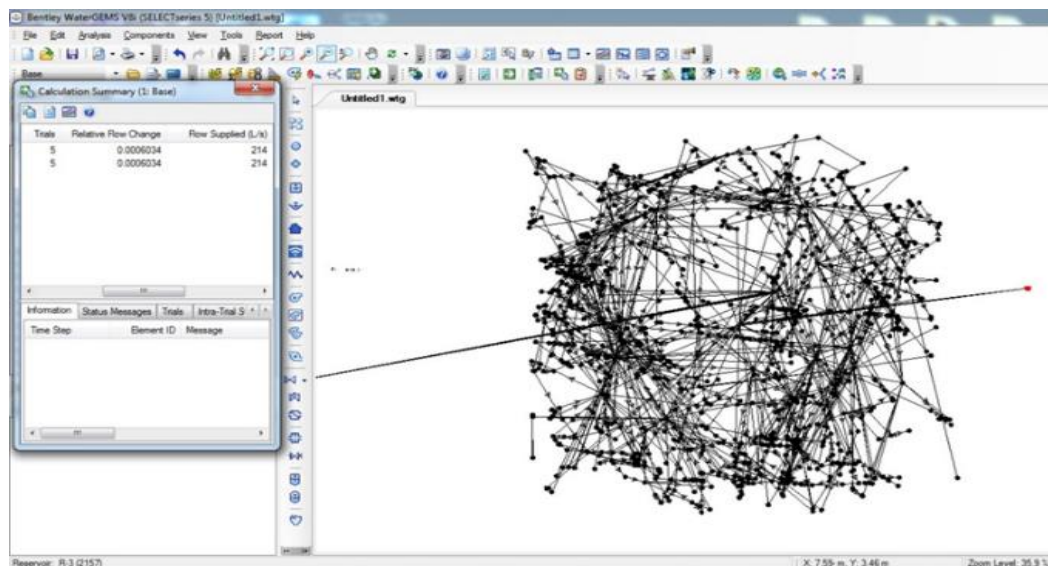
شکل ۳۲-۵: نمودار تاثیر تغییرات دمای سیال در راکتور UCG بر شدت جریان سیال

۳-۵-۳-۳-۵ تحلیل حساسیت نسبت به ویژگی‌های درزه‌داری

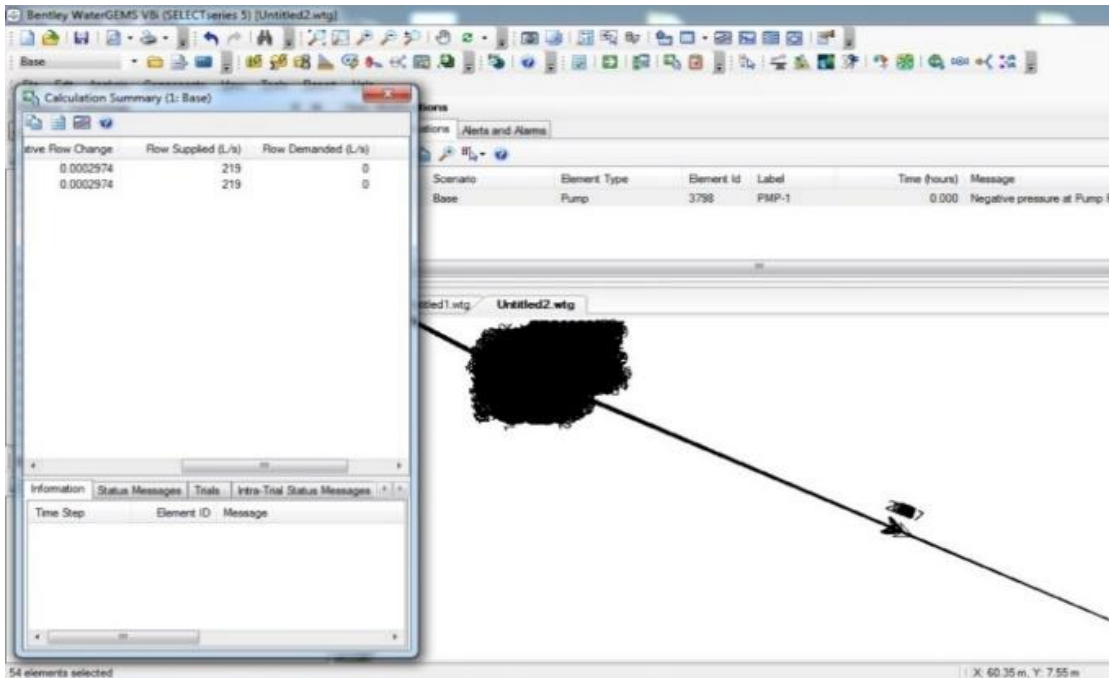
در این بخش سه ویژگی درزه‌داری شامل شدت، طول و بازشدگی درزه با گام‌های افزایشی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصدی مدل‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

الف) تحلیل حساسیت شدت جریان سیال نسبت به شدت درزه

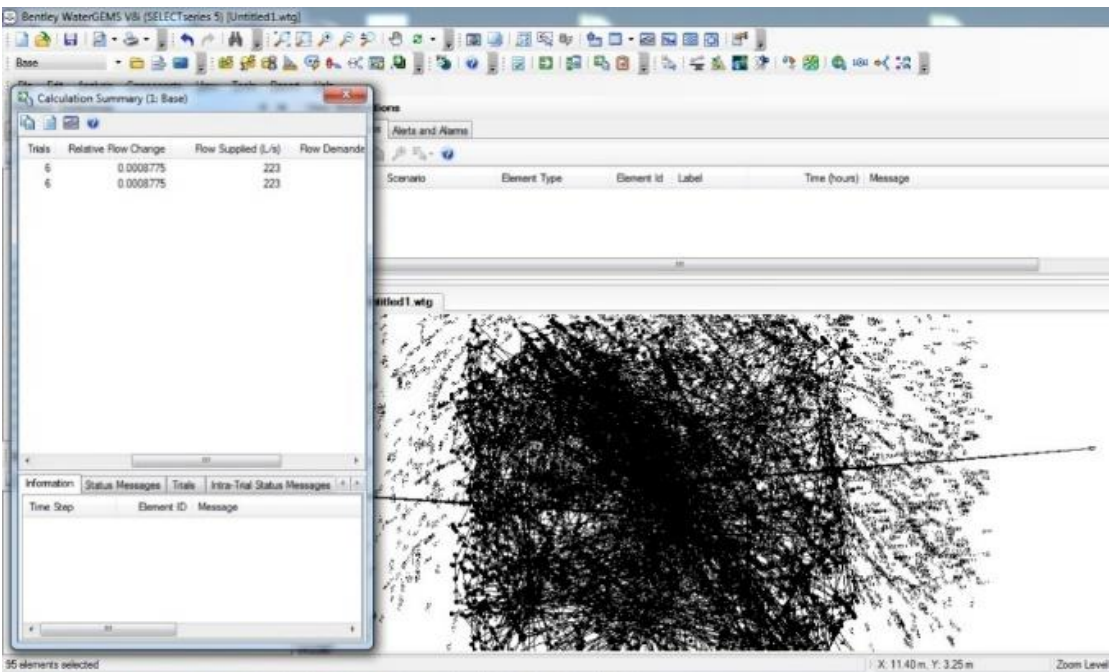
در این بخش نیز با تمرکز بر مورد مطالعاتی منطقه مزیو طبس، در ابتدا شدت درزه واقعی حاصل از برداشت‌های صحرایی مدل‌سازی شده که مقدار شدت جریان در این حالت ۲۱۴ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. سپس، شدت درزه داری تا مقدار ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد افزایش یافته و کلیه مراحل ساخت مدل برای هر حالت مجدداً تکرار و در نهایت مدل‌ها تحلیل شده‌اند. نتایج تحلیل مدل در حالت‌های مختلف در شکل‌های ۵-۳۳ تا ۵-۳۶ نشان داده شده است. خلاصه نتایج در نمودار شکل ۵-۳۷ ارائه گردیده است. همانطور که مشاهده می‌شود، 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 ژئوراکتور تا سطح زمین بیان نمود که مدل ساخته شده به خوبی این تغییرات را نشان می‌دهد.



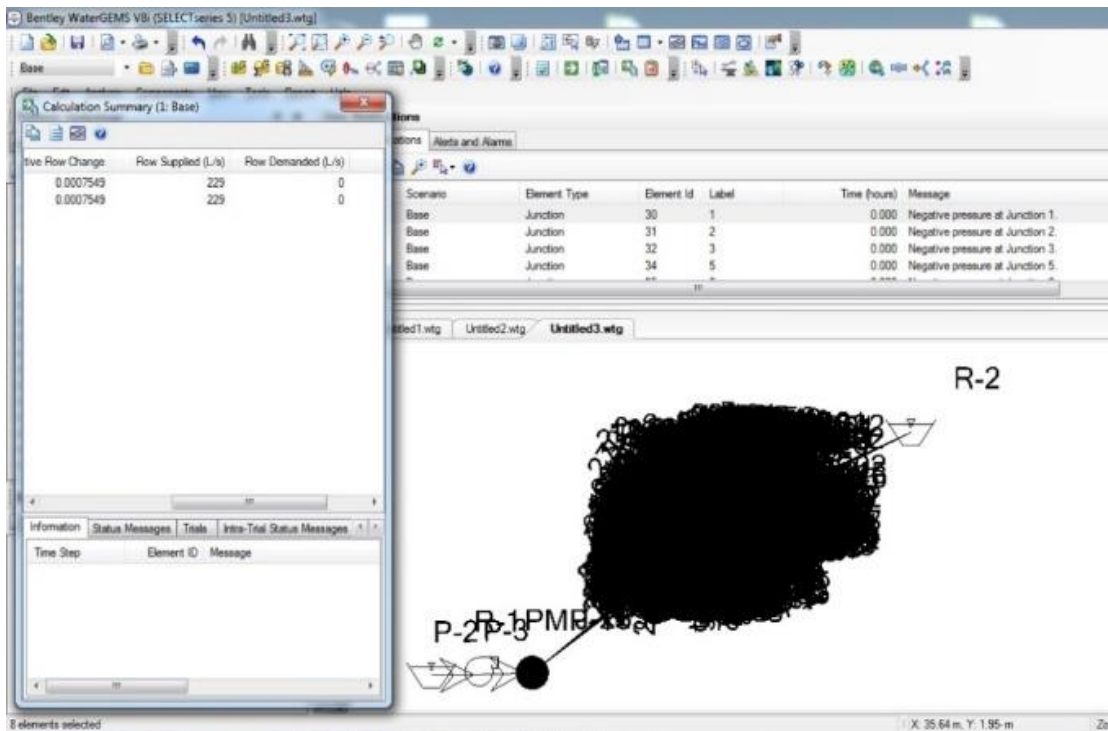
شکل ۵-۳۳: شدت جریان در مدل ۸ متری با شدت درزه واقعی



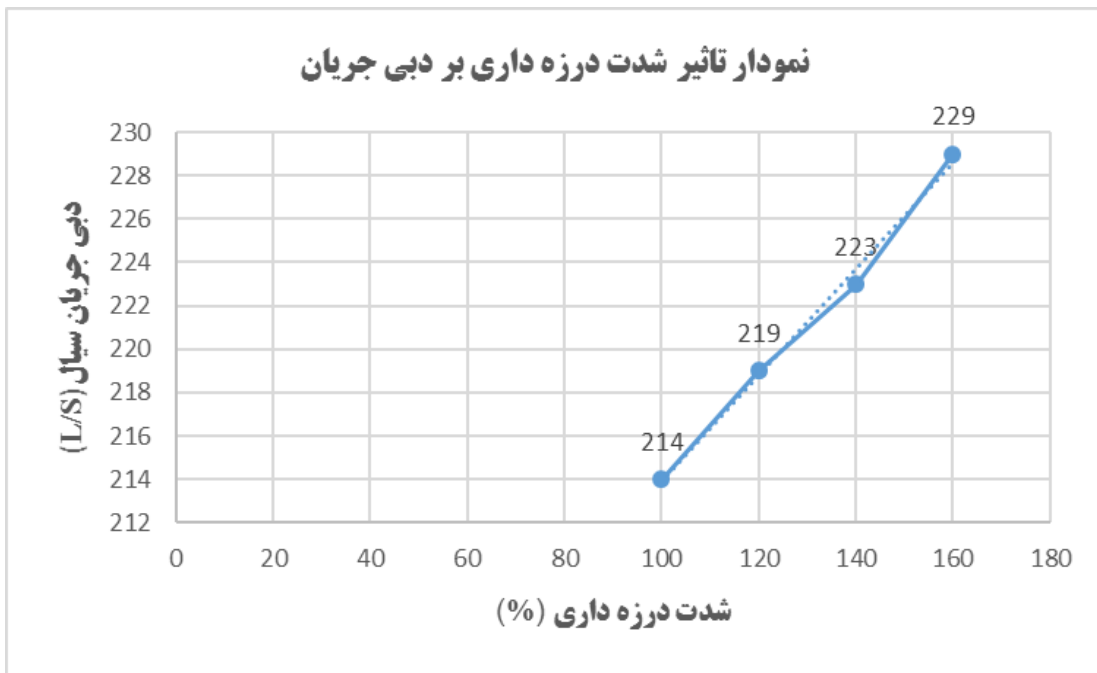
شکل ۳۴-۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۲۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی



شکل ۳۵-۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۴۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی



شکل ۵-۳۶: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۶۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی

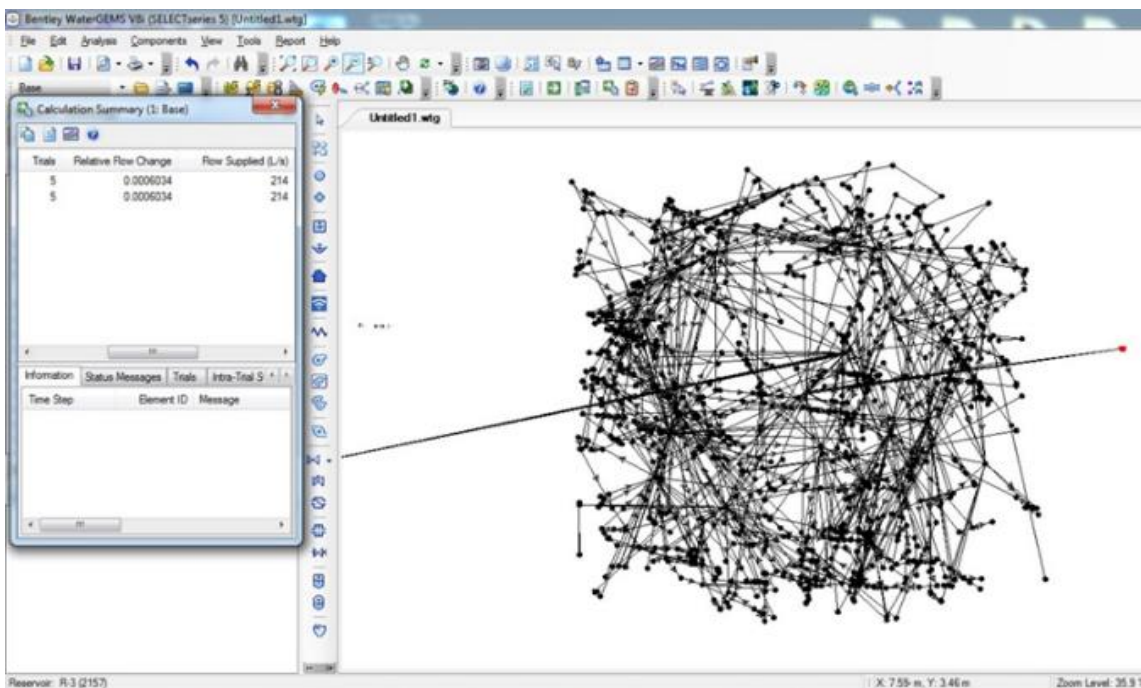


شکل ۵-۳۷: نمودار تأثیر تغییرات شدت درزه داری در توده سنگ بالای ژئوراکتور UCG بر شدت جریان

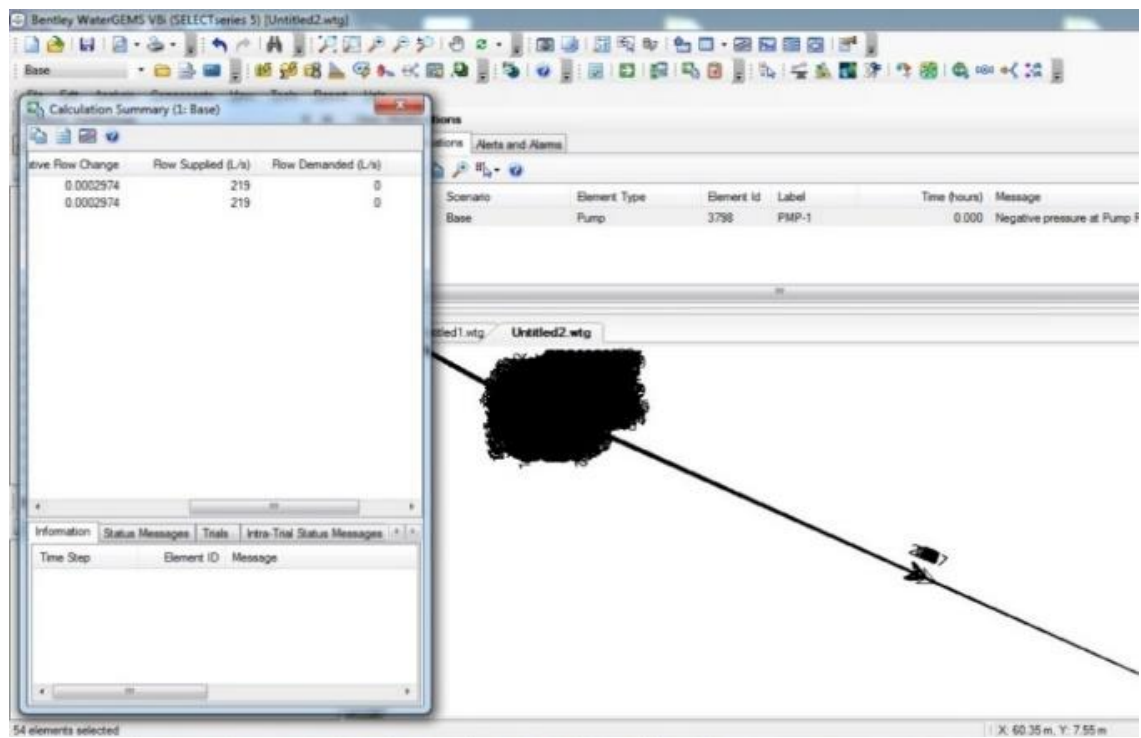
سیال

(ب) تحلیل حساسیت شدت جریان سیال نسبت به طول درزه

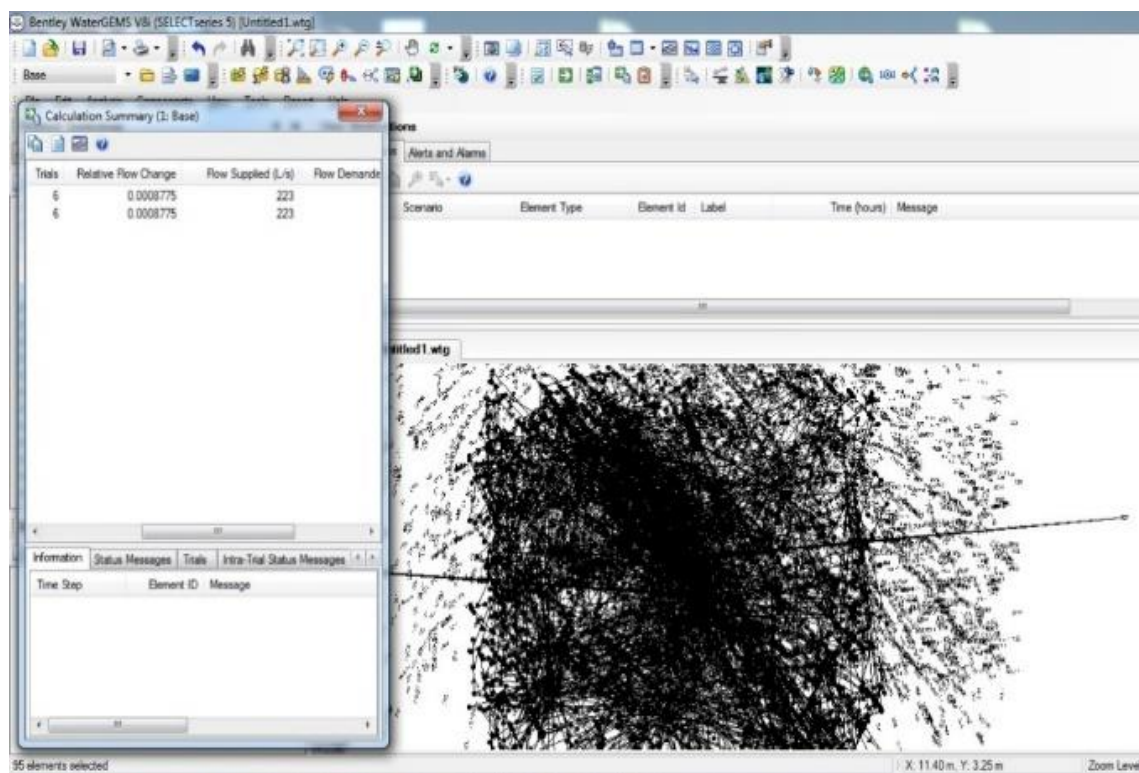
در این بخش نیز چهار حالت، (۱) درزه‌های واقعی حاصل از برداشت های صحرائی، (۲) افزایش ۲۰ درصدی طول درزه‌ها، (۳) افزایش ۴۰ درصدی طول درزه‌ها و (۴) افزایش ۶۰ درصدی طول درزه‌ها نسبت به حالت واقعی، با تکیه بر مدل مرجع تهیه شده، با یکدیگر مقایسه شده است. در هر حالت، سایر ویژگی‌های مدل مرجع ثابت در نظر گرفته شده است. مقادیر شدت جریان در حالت‌های مختلف در شکل‌های ۳۸-۵ تا ۴۱-۵ نشان داده شده است. خلاصه نتایج به صورت نموداری در شکل ۵-۴۲ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، 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 نموده و احتمال افزایش مسیرهای رسانا از سطح رآکتور تا سطح زمین را بیشتر می‌کند. این افزایش مسیرهای رسانا باعث افزایش نشت گاز از رآکتور به سطح زمین و آلودگی‌های سطحی می‌شود.



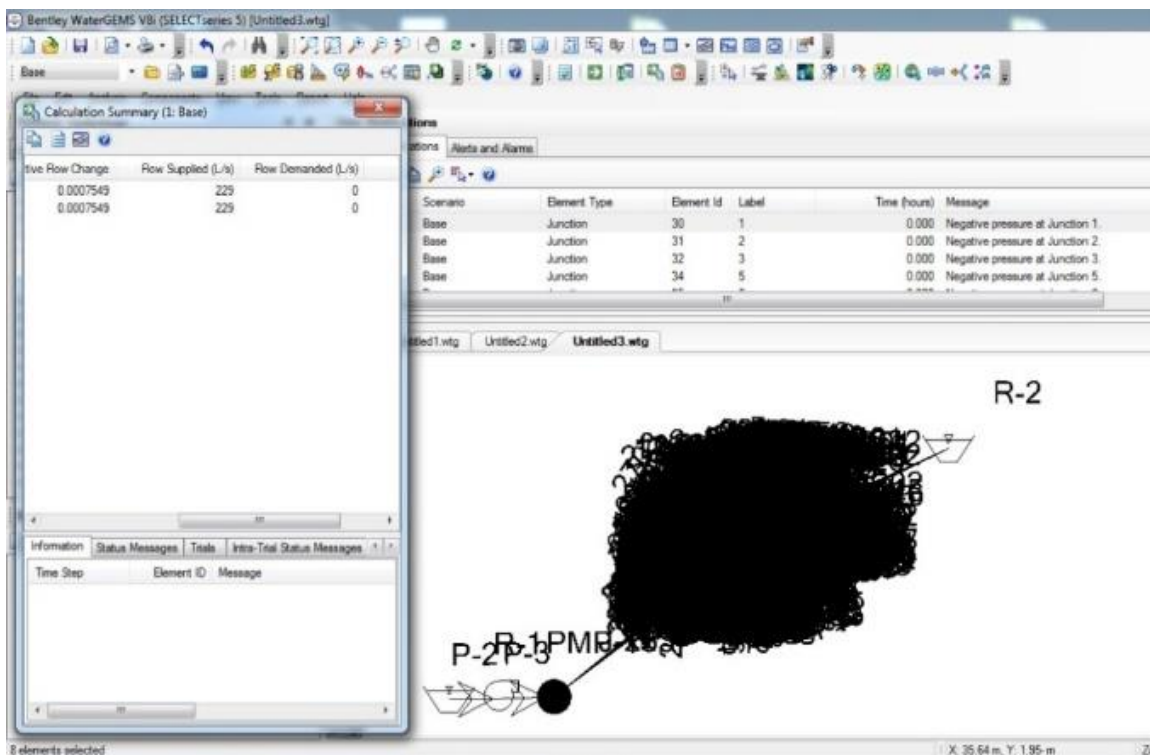
شکل ۵-۳۸: شدت جریان در مدل ۸ متری با مقدار شدت درزه واقعی



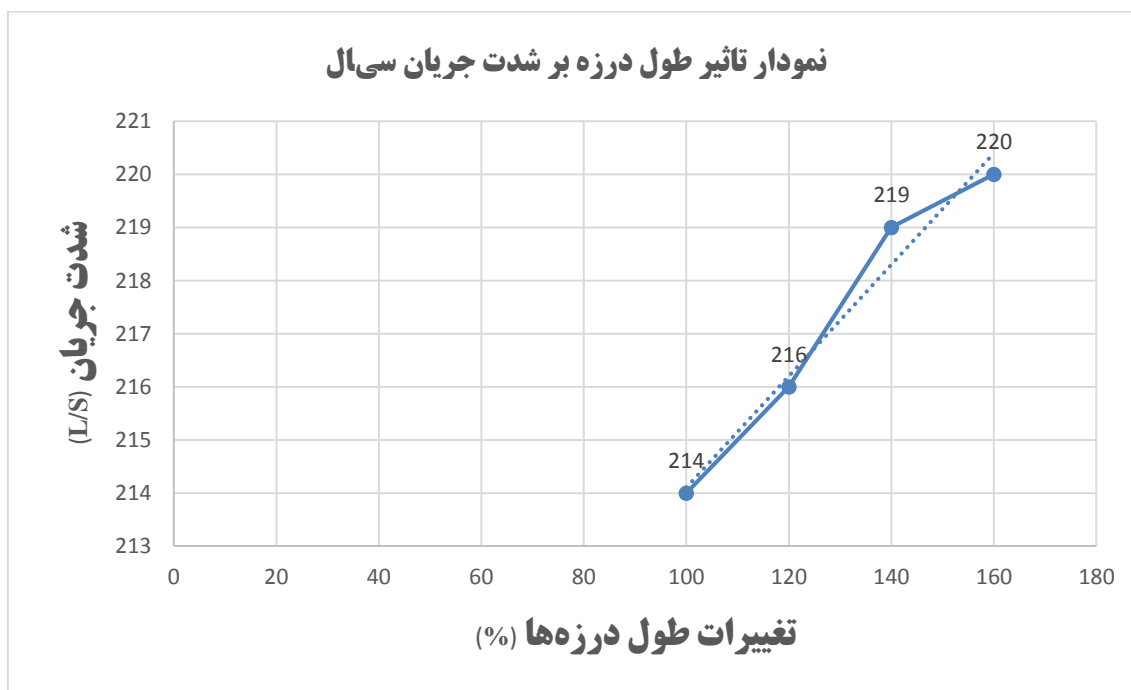
شکل ۵-۳۹: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۲۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی



شکل ۵-۴۰: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۴۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی



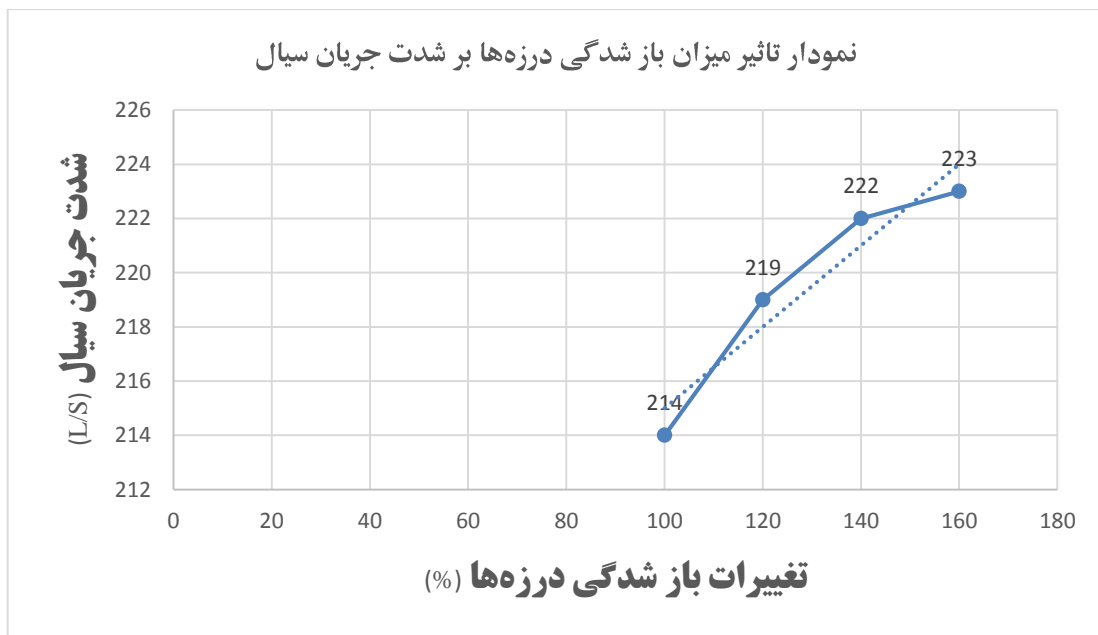
شکل ۴۱-۵: شدت جریان در مدل ۸ متری با افزایش ۶۰ درصدی در مقدار شدت درزه واقعی



شکل ۴۲-۵: نمودار تاثیر تغییرات طول درزهها در توده سنگ بالای ژئوراكتور UCG بر شدت جریان سیال

پ) تحلیل حساسیت شدت جریان سیال نسبت به بازشدگی درزه

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 جریان خروجی از مخزن افزایش می‌یابد. طبق آنچه که در بخش‌های قبل و نیز رابطه ۴-۱۰ در بخش ۴-۵ ذکر شد، می‌توان نتیجه گرفت که میزان بازشدگی درزه‌ها با قطر لوله‌های معادل رابطه مستقیم دارند 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 می‌گردد.



شکل ۵-۴۳: نمودار تاثیر تغییرات بازشدگی درزه‌ها در توده سنگ بالای ژئوراکتور UCG بر شدت جریان

سیال

۵-۴- جمع بندی

در این فصل به بررسی و تحلیل جریان سیال گازی حاصل از کارگاه UCG در منطقه مزینو طبس پرداخته شده است. برای این منظور در ابتدا اقدام به مطالعات میدانی و برداشت دسته درزه‌های منطقه شده است. جمع‌آوری اطلاعات میدانی با کاربرد روش خط برداشت در طول ترانشه احداث شده در منطقه انجام شده است. تحلیل‌های آماری بر روی اطلاعات جمع‌آوری شده صورت گرفته و بدین ترتیب مشخصات آماری ویژگی‌های هندسی دسته درزه شامل شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، طول، بازشدگی و شدت درزه داری تعیین شده‌اند. بر اساس این مشخصات آماری، مدل شبکه درزه‌های مجزا (DFN) از منطقه متشکل از ۲۶۹,۶۲۳ درزه در محدوده‌ای به ابعاد $۴۵ \times ۴۵ \times ۶۰۰$ مترمکعب تهیه و اعتبارسنجی شد. به منظور دقیق‌تر نمودن مدل تهیه شده برای تحلیل‌های هیدرولیکی علاوه بر در نظر گرفتن ویژگی بازشدگی، همبستگی بازشدگی و طول درزه نیز در نظر گرفته شده است. درزه‌هایی که منفرد هستند یا یک انتهای آنها باز است، نقشی در تحلیل‌های هیدرولیکی ندارند. پس از تهیه مدل DFN، این درزه‌ها حذف و بدین ترتیب مدل DFN هیدرولیکی تنها شامل درزه‌های متصل (رسانا)، تهیه شده است. با توجه به مدل تهیه شده، درزه‌های رسانا، مرزهای پایینی و بالایی مدل را به یکدیگر متصل نمی‌کنند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورت اجرای UCG در معدن زغال مزینو، بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده، گازهای ناشی از آن به سطح زمین نشت نخواهند کرد. اما به منظور تحلیل حساسیت، اندازه شدت حجمی درزه ۵۰ درصد بیش از مقدار برداشت شده فرض شده است، در عین حال که سایر عوامل درزه ثابت و برابر مقدار اندازه‌گیری شده در نظر گرفته شده است. در این شرایط مدل DFN جدید بر این اساس تهیه شده است. به دلیل تعداد بسیار زیاد درزه‌ها و لوله‌های منتجه، برنامه قادر به تشکیل این تعداد لوله نیست. لذا تصمیم بر تهیه مدل REV از منطقه گرفته شده است. تعداد ۵ اندازه نمونه مکعبی با ابعاد ۳، ۵، 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. به منظور تحلیل جریان در شبکه لوله، تصمیم بر استفاده از نرم‌افزارهای تجاری گرفته شده است. با توجه به محدودیت‌ها و قابلیت‌های نرم‌افزارها، از میان نرم‌افزارهای موجود،

نرم افزار WaterGEMS به عنوان مناسب ترین گزینه انتخاب شده است. مدل های شبکه لوله تهیه شده با استفاده از نرم افزار تجاری WaterGEMS تحلیل شده و مقدار شدت جریان سیال در هر مورد محاسبه شده است. مشاهده می شود که برای نمونه های بزرگتر از ۸ متر آنیزوتروپی درزه ها کم تر شده و در نتیجه تغییرات اندازه شدت جریان کاهش می یابد. برای مورد مطالعاتی این تحقیق، اندازه REV برابر $8m \times 8m \times 8m$ برآورد شده است. در این اندازه، نرخ جریان سیال متوسط عبوری از طریق توده سنگ مورد مطالعه، ۲۱۲ lit/s برآورد شده است. در انتها نتایج به دست آمده، نسبت به تغییرات فشار مخزن، دمای مخزن و درزه داری سنگ های کمر بالا (شامل: طول درزه ها، شدت درزه داری و اندازه باز شدگی درزه ها) تحلیل حساسیت شده اند که در نتایج آنها به شرح زیر می باشد.

- افزایش فشار سیال یا به عبارت دیگر افزایش فشار راکتور باعث افزایش شدت جریان سیال و یا افزایش نشت گاز می شود و منحنی تغییرات شدت جریان سیال نسبت به فشار از توزیع نرمال پیروی می کند. لذا تا حد ممکن باید سعی شود در هنگام طراحی، فشار راکتور تا حد ممکن، کم و به فشار ایستایی نزدیک در نظر گرفته شود.
- افزایش دمای سیال یا افزایش دمای راکتور تاثیری بر شدت جریان سیال خروجی از شبکه لوله و سطح زمین نشان نمی دهد و منحنی تغییرات شدت جریان سیال 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، امکان نمایش این تغییرات احتمالی وجود ندارد.
- افزایش شدت درزه داری توده سنگ کمر بالا یا به عبارت دیگر تعداد درزه ها، عامل اصلی نشت سیال هستند و افزایش شدت درزه داری تاثیر به سزایی بر شدت جریان سیال خروجی و در واقع نشت گاز از راکتور UCG دارد. همچنین منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به شدت درزه داری از توزیع نرمال پیروی می کند.
- افزایش باز شدگی درزه ها، به معنای افزایش قطر لوله های معادل و افزایش توان شبکه لوله برای انتقال سیال است. با افزایش باز شدگی درزه ها، نشت سیال افزایش می یابد.

- 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 از راکتور UCG به سطح زمین می‌شود.
- همچنین منحنی تغییرات شدت جریان نسبت به شدت درزه داری، بازشدگی درزه و طول درزه در هر سه مورد از توزیع نرمال پیروی می‌کند.
- 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 می‌گردد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه‌گیری

کاهش روز افزون ذخایر نفت و گاز و وضعیت غیرقابل پیش‌بینی بازار نفت باعث شده است که در کشورهای پیشرفته‌ی جهان، استفاده از نفت و گاز به عنوان سوخت به تدریج کاهش یافته و به سوخت‌های جایگزین نفت و گاز توجه بیشتری می‌شود. به دلیل وجود ذخایر بسیار غنی زغال‌سنگ و نیز پراکندگی مناسب آنها در سراسر جهان و امکان ساخت نیروگاه‌ها در نزدیکی این منابع، توجه اغلب کشورها به استفاده از این منابع به ویژه در تولید برق و استفاده در صنایع شیمیایی بیشتر شده است. در ایران بخش زیادی از ذخایر زغال‌سنگ در عمق واقع شده‌اند. که برای استحصال و استفاده از این منابع، فناوری گاز کردن زیرزمینی زغال‌سنگ (UCG) می‌تواند به عنوان بهترین گزینه مطرح باشد. یکی از این ذخایر زغال‌سنگ، زغال‌سنگ‌های منطقه مزینو طبس است.

در این رساله، با توجه به اهمیت موضوع نشت گاز از میان درزه و شکاف‌های اطراف ژئوراکتور زیرزمینی UCG و یا به عبارت دیگر ایزوله بودن آن، بر مدل‌سازی نشت گاز با استفاده از روش شبکه لوله معادل از میان شبکه درزه‌های مجزا (DFN) سه بعدی با در نظر گرفتن مورد مطالعاتی منطقه مزینو طبس تمرکز شده است.

مهمترین دستاوردها و نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

- حضور شکستگی‌های ناپایا در توده‌سنگ اثر مهمی بر ویژگی‌های هیدرولیکی و رفتار آن دارد و باید به دقت برای تعیین ویژگی‌های مهندسی توده‌سنگ، در نظر گرفته شوند. واقعیت این است که در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی، نفوذپذیری خمیره‌ی 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 برآورد آن نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیکی شبکه شکستگی‌ها است.

- برای مدل‌سازی دقیق توده‌سنگ باید جانمایی درزه‌ها در داخل مدل به گونه‌ای باشد که توزیع درزه‌ها تا حد امکان مشابه ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ واقعی باشد. به عبارت دیگر مساله اصلی در مدل‌سازی توده‌سنگ، منتج شدن اطلاعات جمع‌آوری شده به تعریف سه بعدی دقیق از ساختارها در توده‌سنگ است. از طرفی به دلیل تشکیل توده‌سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد، ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله جهت درزه‌ها، پایایی و فاصله‌داری درزه‌ها دارای مقادیر پراکنده‌ای در توده‌سنگ هستند. بنابراین باید ماهیتی تصادفی برای ویژگی‌های مورد نظر در نظر گرفته شود و در مدل‌سازی توده‌سنگ بکار رود.

- امروزه برای مدل‌سازی، تحلیل جریان و تعیین نفوذپذیری در سنگ‌های پر درزه و شکاف، نرم‌افزارهای تجاری مختلفی وجود دارد. در این رساله از برنامه‌ی کامپیوتری بومی -DFN- FRAC^{3D} به منظور تولید شبکه‌های درزه تصادفی در سه بعد، استفاده شده است. این برنامه تاکنون برای تحلیل‌های مکانیکی توسعه داده شده بود، اما به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت افزودن امکانات دیگر را نیز دارد. در رساله حاضر، برنامه برای انجام تحلیل-های هیدرولیکی توسعه داده شده است. برای این منظور سه قابلیت مدل‌سازی توابع توزیع مختلف بازشدگی درزه‌ها و همچنین وابستگی بین طول و بازشدگی درزه‌ها، تشخیص درزه‌های متصل (رسانا) و ایجاد شبکه لوله معادل به برنامه اضافه شده است.

- به منظور تحلیل جریان در شبکه لوله معادل، با توجه به پیچیدگی حل جریان در شبکه‌های بزرگ لوله‌ها، از نرم‌افزارهای تجاری استفاده شده است. از میان نرم‌افزارهای FLUENT، PIPE-FLO، AFT Arrow، AFT Fathom، PipelineStudio، PipeFlow Expert و Bently WaterGEMS، با توجه به محدودیت‌ها و قابلیت‌های این نرم‌افزارها، نرم‌افزار WaterGEMS به عنوان مناسب‌ترین گزینه انتخاب شد. در این نرم‌افزار، نیاز به محاسبات دستی برای ورود اطلاعات اولیه حذف شده است و با قابلیت پشتیبانی از نرم افزار اطلاعات

جغرافیایی ArcGIS توانایی انجام و انتقال نتایج حاصل از محاسبات جغرافیایی امکان‌پذیر شده است. با توجه به این قابلیت و همچنین امکان تعریف ویژگی‌های سیال و جنس لوله‌ها، دسترسی به نسخه کامل نرم‌افزار در داخل کشور و توانایی مدل‌سازی تعداد بسیار زیاد لوله به صورت همزمان، نرم‌افزار WaterGEMS به عنوان نرم‌افزار مناسب برای تحلیل جریان سیال در شبکه لوله‌ها انتخاب گردیده است.

- برای مورد مطالعاتی منطقه مزینو طبس، با توجه به مدل‌های هیدرولیکی ساخته شده بر اساس اطلاعات برداشت‌های صحرائی انجام شده، شبکه درزه‌های متصل، مرزهای پایینی و بالایی مدل را به یکدیگر متصل نمی‌کنند. به عبارت دیگر، در برخی نواحی از مدل، اتصال درزه‌ها به یکدیگر برقرار نیست و درزه‌های مدل به طور کامل به یکدیگر متصل نیستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت در صورت اجرای UCG در منطقه مزینو، گازهای ناشی از آن به سطح زمین نشت نخواهند کرد.

- به منظور انجام تحلیل حساسیت و با هدف ایجاد شبکه‌ای کاملاً متصل از درزه‌ها بین مرزهای پایینی و بالایی، فرض شده که پارامتر شدت حجمی درزه داری به میزان ۵۰ درصد افزایش یابد، در عین حال که سایر پارامترها ثابت و برابر با مقادیر اندازه‌گیری شده در مطالعات میدانی باشد. برای این حالت، مجدداً مدل شبکه درزه برای منطقه مزینو تهیه شده است. در مدل جدید درزه‌های متصل به طور کامل به یکدیگر اتصال دارند و مرزهای پایینی و بالایی مدل را به یکدیگر متصل می‌کنند. با توجه به تعداد بسیار زیاد لوله‌های تشکیل شده در مدل (بیش از یک میلیون)، تصمیم بر تهیه مدل REV بر اساس مدل جدید گرفته شده است.

- برای تعیین نرخ جریان بر اساس مدل REV، تعداد ۵ اندازه نمونه مکعبی با ابعاد ۳، ۵، 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 معادل با استفاده از نرم‌افزار تجاری WaterGEMS تحلیل شده و مقدار دبی جریان سیال محاسبه شد. نتایج حاصل نشان داد که برای نمونه-های بزرگتر از ۸ متر آنیزوتروپی درزه‌ها کم شده و در نتیجه تغییرات اندازه دبی کاهش می‌یابد. لذا برای مورد مطالعاتی این رساله، اندازه REV برابر $8m \times 8m \times 8m$ و نرخ جریان متوسط توده‌سنگ برابر 212 lit/s برآورد می‌شود.

- فرآیند UCG می‌تواند در عمق کم با شرایط فشار پایین و در عمق زیاد با شرایط فشار زیاد انجام گیرد. برای بررسی نشت سیال در منطقه مزینو سه فشار کاری کم فشار ۱ مگاپاسکال، فشار متوسط ۳ مگاپاسکال و پر فشار ۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده و در هر فشار مقدار خروج سیال از سطح زمین بررسی شده است. نتایج نشان داد که با افزایش فشار در راکتور، مقدار نشت سیال افزایش می‌یابد و از ۲۱۴ لیتر بر ثانیه در فشار ۱ مگاپاسکالی راکتور به ۳۱۲ لیتر بر ثانیه در فشار ۵ مگاپاسکالی راکتور می‌رسد.
- در این رساله یک شیوه سیستماتیک منظم برای بررسی نشت سیال در توده‌سنگ درزه‌دار در مقیاس مهندسی ارائه شده است. این شیوه مربوط به محل خاصی نیست و می‌تواند در سایر موارد مطالعاتی به کار رود.

۲-۶- پیشنهادها

برای ادامه کار تحقیقات زیر پیشنهاد می‌شود:

- پیشنهاد می‌شود شیوه بکار رفته برای تعیین نفوذپذیری توده‌سنگ در این رساله، برای توده‌سنگ‌های مختلف دارای ویژگی‌های هندسی متفاوت بکار رود. سپس با توجه به نتایج حاصل روابطی کمی برای تعیین نفوذپذیری سیال بر اساس ویژگی‌های هندسی درزه‌ها ارائه شود.
- تاثیر تنش‌های قائم و افقی بر نشت سیال از راکتور زیرزمینی UCG توسط مدل‌سازی توامان هیدرومکانیکی توده‌سنگ بررسی شود.

- در صورت امکان از نرم‌افزار عددی مدل‌ساز جریان که امکان مدل‌سازی سیال تراکم‌پذیر و تعداد بسیار زیاد لوله را داشته باشد، استفاده نمود.
- برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} Ver ۲,۱,۱ برای تشخیص مسیرهای ترجیحی جریان بر اساس الگوریتم‌های بهینه‌سازی مسیر توسعه داده شود.

- Baecher, G. B. (١٩٨٣), “*Statistical analysis of rock mass fracturing*”, Journal of Mathematical Geology, ١٥, ٢, pp. ٣٢٩-٣٤٧.
- Baecher, G. B., Einstein H. H., Lanney N. A. (١٩٧٧), “*Statistical description of rock properties and sampling*”, Energy resources and excavation technology, The ١٨th U.S. symposium on rock mechanics, Golden: Colo. Sch. Mines Press, pp. ١-٨.
- Baghbanan, A., Jing, L. (٢٠٠٧), “*Hydraulic properties of fracture rock masses with correlated fracture length and aperture*”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., ٤٤(٥), ٧٠٤-٧١٩.
- Bang, S. H., Jeon, S., Kwon, S. (٢٠١٢), “*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, ٤٤, ٦.
- Bear, J., Tsang, C.F., De Marsily, G. (١٩٩٣), “*Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*”, Academic Press, San Diego. ٤٣٢ P.
- Berkowitz, B. (٢٠٠٢), “*Characterizing flow and transport in fractured geological media: a review*”, Adv. Water Resour. ٢٥, ٨٦١-٨٨٤. [http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00042-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00042-8).
- Bigi, S., Battaglia, M., Alemanni, A., Lombardi, S., Campana, A., Borisova, E., Loizzo, M., (٢٠١٣), “*CO₂ flow through a fractured rock volume: Insights from field data, 3D fractures representation and fluid flow modeling*”, International Journal of Greenhouse Gas Control ١٨, ١٨٣-١٩٩.
- Blessent, D., Therrien, R., Gable, C. (٢٠١١), “*Large-scale numerical simulation of groundwater flow and solute transport in discretely-fractured crystalline bedrock*”, Adv. Water Resour. ٣٤, ١٥٣٩-١٥٥٢.

Blocher, M. G., Cacace, M., Lewerenz, B., (2010), “Three dimensional modeling of fractured and faulted reservoirs: framework and implementation”, Chem. Erde 70 (S3), 145–153.

Bodin, J., Delay, F. De Marsily, G. (2003), “Solute transport in fissured aquifers: 1. Fundamental mechanisms”, Hydrogeol. J., 11: 418–433.

Bodin, J., Porel, G., Delay, F., Ubertosi, F., Bernard, S., Dreuzy, J. R. (2007), “Simulation and analysis of solute transport in 3D fracture/pipe networks: The SOLFRAC program”, Journal of Contaminant Hydrology 89 1–28, DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.07.005

Burton, E., Friedmann, J., and Upadhye, R. (2007). “Best practices in underground coal gasification”. US Department of Energy Research report, Lawrence Livermore National Laboratory. Livermore, USA. (pp. 11–67).

Cacas, M. C., Ledoux, E., de Marsily, G., Barbreau, A., Calmels, P., Gaillard, B., Margritta, R. (1990a), “Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 2. The transport model”, Water Resour. Res. 26, 491–500.

Cacas, M. C., Ledoux, E., de Marsily, G., Tillie, B., Barbreau, A., Durand, E., Feuga, B., Peaudecerf, P., (1990b), “Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model”, Water Resour. Res. 26, 479–489.

Castelletto, N., Teatini, P., Gambolati, G., Bossie-Codreanu, D., Vincké, O., Daniel, J. M., Battistelli, V., Marcolini, M., Donda, F., Volpi, V. (2013), “Multiphysics modeling of CO₂ sequestration in a faulted saline formation in Italy”, Adv. Water Resour. (Part C) 62, 570–587. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.04.006>.

Couch, G. R. (2009). “Underground coal gasification”, IEA Clean Coal Center. International Energy Agency, London, UK, ISBN 978-92-9-29-471-9, pp. 13–113.

Creedy, D., Garner, K., Holloway, S., Jones, N., and Ren, T. X. (2001). "Review of underground coal gasification technological advancements", COAL R211 DTI/Pub URN 01/0141. London, UK. (pp. 4-7).

Dabbous, M. K., Reznik, A. A., Taber, J. J. and Fulton, P. F. (1974), "The permeability of coal to gas and water", SPE, Vol. 14, No. 6, (pp. 663-672).

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

Dershowitz, W. S., Einstein H. H. (1988), "Characterizing rock joint geometry with joint system models", Rock Mechanics and Rock Engineering, 21, pp. 21-51.

Dershowitz, W., Lee, G., Geier, J., Foxford, T., LaPointe, P., Thomas, A. (1998), "FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modelling and Exploration Simulation", User Documentation, Golder Associates Inc.

Dowd, P. A., Xu, C., Mardia, K. V., Fowell, R. J. (2007), "A comparison of methods for the simulation of rock fractures", Mathematical Geology, 39, pp. 697-714.

DTI. (2004), "Review of environmental issues of underground coal gasification", COAL R272 DTI/Pub URN 04/1880. Harwell International Business Centre. Didcot, Oxfordshire, UK. (pp. 14-G64).

Dverstorp, B., Andersson J. (1989), "Application of the discrete fracture network concept with field data: possibilities of model calibration and validation", Water Resource Res., 25, pp. 540-550.

Einstein H. H., Baecher, G. B. (1983), "Probabilistic and statistical methods in engineering geology, specific methods and examples, part 1: exploration", Rock Mechanics and rock Engineering, 16, pp. 39-72.

Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B., O'Reilly, K. J. (1983), "*The effect of discontinuity persistence on a rock slope stability*", International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 20, 5, pp. 227-236.

Erhel, J., de Dreuzy, J.-R., Poirriez, B. (2009), "*Flow simulation in three-dimensional discrete fracture network*", SIAM J. Sci. Comput. 31 (4), 2688-2705.

Evans, J. M. (1986), "*A methodology for assessing environmental and health risks of underground coal gasification*", Western Aquatics, Inc. Laramie, USA. (pp. 13-15).

Faqiang, S., Nakanowataru, T., Itakura, K., Ohga, K., Deguchi, G. (2013), "*Evaluation of Structural Changes in the Coal Specimen Heating Process and UCG Model Experiments for Developing Efficient UCG Systems*", Energies journal. (pp. 52-64).

Flynn Z. N., Pine R. J. (2007), "*Fracture characterisation determined by numerical modelling analyses*", The 11th Congress of the international Society for Rock Mechanics, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-45084-3.

GasTech. (2007), "*Viability of underground coal gasification in the deep coals of the Powder River Basin*", Wyoming. Casper WY: Wyoming Business Council. (pp. 9-28).

Golder Associates Inc. (2012), FracMan User's Manual Release 7,4.

Gregg, D.W. (1977), "*Ground Subsidence Resulting from Underground Gasification of Coal*", UCRL-82255. Lawrence Livermore Laboratory, University of California.

Grenon, M., Hadjigeorgiou J. (2008), "*A design methodology for rock slopes susceptible to wedge failure Using fracture system modeling*", Engineering Geology, 96, pp. 78-93

Gujarat Industries Power Co. (2009), "*Environmental impact assessment for proposed underground coal gasification (UCG) pilot project at Vastan mine block*", Surat in Gujarat. India. (pp. 28-64).

- Hadjigeorgiou, J., Lessard, J. F., Flament, F. (1995), “*Characterizing in-situ block distribution using a stereological model*”, Canadian Tunnelling, pp. 201-211.
- Harpalani, S., Zhao, X. (1991), “*Microstructure of coal and its influence on flow of Gas*”, Energy Sources, Vol. 13, No.2, (pp. 229- 242).
- Hartman, H. (1996), “*SME mining engineering handbook*”, Chapter 22.6., In-site gasification and combustion of coal, Society of Mining and Metallurgy, and Exploration. Littleton, CO. (pp. 1955-1963).
- Hatton, C. G., Main, I. G., Meredith P. G. (1994), “*Non-universal of fracture length and opening displacement*”, Nature, 367:160-2.
- 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.), niversity of Wollongong, Wollongong, Australia, (pp. 62-69).
- Hester, R., Harrison, R. (2010), “*Carbon capture sequestration and storage*”, Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK. (pp. 104-119).
- Hoek, E. T. (1998), “*Reliability of the Hoek–Brown estimates of rock mass properties and their impact on design*”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 35, pp. 63–68.
- Huang, N., Jiang, Y., Li, B., Liu, R. (2016), “*A numerical method for simulating fluid flow through 3-D fracture networks*”, Journal of Natural Gas Science and Engineering 33, 1271-1281.
- Hudson, J. A., La Pointe (1980), “*Printed circuits for studying rock mass permeability*”, International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts, Technical Note, 17, 5, pp. 297-301.

Hyman, J. D., Karra, S., Makedonska, N., Gable, C. W., Painter, S. L., Viswanathan, H.S. (2015), “*DFNWORKS: A discrete fracture network framework for modeling subsurface flow and transport*”, Computers & Geosciences 14, 10–19.

Iding, M., Ringrose, Ph. (2008), “*Evaluating the impact of fractures on the long-term performance of the In Salah CO₂ storage site*”, Energy Procedia 1, 2021–2028.

Irwin, M. W., Bowen, B. H., Gotham, B. J. (2009), “*Indiana coal report 2009*”, Chapter 9. Indiana Center for Coal Technology Research. Purdue University, USA. (pp. 10–15).

ISRM, (1978), “*Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*”, International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 15, 6, pp. 319–368.

Ito K., Seol Y. (2003), “*A 3-dimensional discrete fracture generator to examine fracture-matrix interaction using TOUGH 2*”, TOUGH Symposium.

Ivanova, V., Xiaomeng, Y., Veneziano, D., Einstein, H. H. (1995), “*Development of stochastic models for fracture systems*”, Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5410-552-6.

James, R. (2009), “*Powder River Basin Underground Coal Gasification*”, National Energy Technology Laboratory.

Jimenez-Rodriguez R., Sitar N. (2006), “*Inference of discontinuity trace length distributions using statistical Graphical models*”, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp. 877–893

Johnston, J. D., McCaffrey, K. J. W. (1996), “*Fractal geometries of vein systems and the variation of scaling relationships with mechanism*”, J Struct Geol., 18(2):349–58.

Jourde, H., Cornaton, F., Pistre, S. and Bidaux, P. (2002), “*Flow behavior in a dual fracture network*”, J. Hydrol., 266: 99–119.

Kazemi, H., Merrill, L., Porterheld, K., Zeman, P. (1976), “*Numerical simulation of water-oil flow in naturally fractured reservoirs: Society of Petroleum Engineers*”, v. 16, no. 6, p. 317-326.

Kim, B. H., Cai, M., Kaiser, P. K. (2007), “*Rock Mass Strength with Non-persistent Joints*”, 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, 27-31 May, Vancouver, Canada, pp. 241-248.

Kulatilake, P. H. S. W., Park, J., Um, J. G. (2004), “*Estimation of rock mass strength and deformability In 3-D for a 3 m cube at a depth of 140m at Aspo Hard Rock Laboratory*”, Geotechnical and Geological Engineering, 22, pp. 313-330.

Kulatilake, P. H. S. W., Um, J., Wang, M., Escandon, R. F., Varvaiz, J. (2003), “*Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA*”, Engineering Geology, 70, pp. 131-155.

Lee, I. H., Ni, C. F. (2015), “*Fracture-based modeling of complex flow and CO₂ migration in three-dimensional fractured rocks*”, Computers & Geosciences 81, 64-77.

Lee, J. S., Veneziano, D., Einstein, H. H. (1990), “*Hierarchical fracture trace model*”, Rock mechanics, contributions and challenges, The 3rd U.S. symposium, Rotterdam: A. A. Balkema, pp. 261-268.

Li, S. C., Xu, Z. H., Ma, G. W. (2014), “*A Graph-theoretic Pipe Network Method for water flow simulation in discrete fracture networks: GPNM*”, Tunnelling and Underground Space Technology 42, 247-263.

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, 45-55.

Liu, S. Q., Wang, Y. Y., Zhao, K., Yang, N. (2009), “*Enhanced-hydrogen gas production through underground gasification of lignite*”, Journal of China University of Mining and Technology. (pp. 1-5).

Liu, S., Li, J., Mei, M., Dong, D. (2007), “*Groundwater Pollution from Underground Coal Gasification*”, J China Univ Mining & Technol, 17(4), pp 467 – 472.

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, 645-658.

Martel, S., Hestir, K., Long, J. C. S. (1991), “*Generation of fracture patterns using self-similar function concepts*”, Annual report, Earth Sc. Div., Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, CA.

Meyer, T., Einstein, H. H. (2002), “*Geologic Stochastic Modeling and Connectivity Assessment of Fracture Systems in the Boston Area*”, Rock Mech. Rock Engng. 35 (1), 23-44.

Moffitt, K. M., Rogers, S. F. (2007), “*Probabilistic analysis of block stability in underground excavations using realistic fracture network models*”, The 11th Congress of the international Society for Rock Mechanics, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-45084-3.

Moorhouse, J., Huot, M., McCulloch, M. (2010), “*Underground coal gasification: environmental risks and benefits*”, Pembina Institute. Alberta, Canada T1A 1S7. (pp. 3-10).

Mourzenko, V. V., Bogdanov, I. I., Thovert, J.-F. (2011), “*Three-dimensional numerical simulation of single-phase transient compressible flows and welltests in fractured formations*”, Math. Comput. Simul. 81, 2270-2281.

Mourzenko, V. V., Thovert, J. F., Adler, P. M. (1996), “*Geometry of simulated fractures*”, Phys. Rev. E 53 (6), 5606-5626.

Mustapha, H. (2011), “*Finite element mesh for complex flow simulation*”, Finite Elem. Anal. Des. 47, 434–442.

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.

Oron, A. P., Berkowitz, B. (1998), “*Flow in rock fractures: the local cubic law assumption reexamined*”, Water Resour. Res. 34, 2811–2825.

Panda, B. B., Kulatilake, P. H. S. W. (1995), “*Study of the effect of joint geometry parameters on the permeability of jointed rock*”, Rock Mechanics, Daemen & Schultz (eds) © 1995 Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410 552 6.

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, 4712–4724.

Pardala, M. L., Stanczyk, K. (2015), “*Underground coal gasification (UCG): An analysis of gas diffusion and sorption phenomena*”, Fuel 150, 48–54.

Park H., West T. R. (2001), “*Development of a probabilistic approach for rock wedge failure*”, Engineering Geology, 59, pp. 233–251.

Park, H. J., West, T. R., Woo, I. (2005), “*Probabilistic analysis of rock slope stability and random Properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA*”, Engineering Geology, 79, pp. 230–250.

Peng, S., Zhang, J. (2007), “*Engineering geology for underground rocks*”, Springer. (pp. 4-10).

Perkins, G. (2005), “*Mathematical modelling of underground coal gasification*”, PhD thesis, School of Materials Science and Engineering, The University of New South Wales, Australia. (pp. 103-162).

Perkins, G., Sahajwalla, V. (2006), “*A numerical study of the effects of operating conditions and coal properties on cavity growth in underground coal gasification*”, Energy and Fuels Article 22, 596-608. (pp. 2-6).

Pichot, G., Erhel, J., de Dreuzy, J. R. (2010), “*A mixed hybrid Mortar method for solving flow in discrete fracture networks*”, Appl. Anal. Int. J. 89 (10), 629. <http://dx.doi.org/10.1080/00036811.2010.495333>.

Pine, R. J., Coggan, J. S., Flynn, Z., Elmo, D. (2006), “*The development of a comprehensive numerical modelling approach for pre-fractured rock masses*”, Rock Mechanics and Rock Engineering, 39, 5, pp. 395-419.

Priest, S. D. (1993), “*Discontinuity Analysis for Rock Engineering*”, Published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN.

Priest, S. D. (2004), “*Determination of discontinuity size distributions from scanline data*”, Rock Mechanics and rock Engineering, 37, 5, pp. 347-368.

Priest, S. D., Hudson J. A. (1976), “*Discontinuity spacing in rock*”, International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 13, pp. 135-148.

Priest, S. D., Samaniego, J. A. (1988), “*The statistical analysis of rigid block stability in jointed rock masses*”, The 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, The Institution of Engineers Australia, Sydney, pp. 398-403.

Rapantova, N., Grmela, A., Vojtec, D., Halir, J., Michalek, B. (2007), “*Ground Water Flow Modelling Applications in Mining Hydrogeology*”, Mine Water Environ., 26, 264, 270.

Renshaw, C. E., Park, J. C. (1997), “*Effect of mechanical interactions on the scaling of fracture length and aperture*”, *Nature*, 386: 482–4.

Reyes, O., Einstein, H. H. (1991), “*Failure mechanics of fractured rock - a fracture coalescence model*”, The 7th ISRM Congress, 16-20 September, Aachen, Germany.

Robinson, P. C. (1983), “*Connectivity of fracture systems - a percolation theory approach*”, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 16, pp. 605–614.

Rogers, S. F., Kennard, D. K., Dershowitz, W. S., Vanas, A. (2007), “*Characterizing the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach*”, *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-4440-1-9.

Sarraf Shirazi, A., Mmbaga, J. P., Gupta, Hayes, R. E. (2011), “*Modeling Cavity Growth during Underground Coal Gasification*”, 2011 COMSOL Conferences in Boston. ISBN: 978-0-983968825.

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. (pp. 65-78).

Shafirovich, E., Varma, A. (2009), “*Underground coal gasification: A brief review of current status*”, *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 7865–7875. (pp. 2-9).

Shedden Uhde Australia. (2009), “*UCG/GTL technology study prepared for Metrocoal Limited*”, Melbourne, Australia.

Skousen, J. G., Sexstone, A. Ziemkiewicz, P. F. (2000), “*Acid mine drainage control and treatment*”, Chapter 9 in *Reclamation of Drastically Disturbed Lands*. American Society of Agronomy and American Society for Surface Mining and Reclamation. Agronomy No. 41.

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.

Song, J. J. (2006), “*Estimation of a joint diameter distribution by an implicit scheme and interpolation technique*”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 43, pp. 512–519.

Stanczyk, K., Howaniec, N., Smolinski, A., Swiadrowski, J. (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.

Stone, D. “*Sub-surface fracture maps predicted from borehole data: an example from the Eye-Dashwa Pluton, Atikolan, Canada*”, *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 1984, 21(4): 183–94.

Sury, M., White, M., Kirton, J., Carr, P., Woodbridge, R., Mostade, M., Chappell, R., Hartwell, D. (2004), “*Review of Environmental Issues of Underground Coal Gasification*”, Report No. COAL R272 DTI/Pub URN 04/1880. Department of Trade and Industry, UK. November.

Trivedi, J., Babadagli, T. (2008), “*Efficiency analysis of greenhouse gas sequestration during miscible CO₂ injection in fractured oil reservoirs*”, *Environ. Sci. Technol.* 42, 5473–5479. <http://dx.doi.org/10.1021/es073264r>.

Tsang, C. F., Neretnieks, I. (1998), “*Flow channeling in heterogeneous fractured rocks*”, *Rev. Geophys.*, 36(2): 275–298.

Tsang, Y. W., Tsang, C. F. (1987), “*Channel model of flow through fractured media*”, *Water Resour. Res.* 23 (3), 467–479.

Veneziano, D. (1978), “*Probabilistic models of joints in rock*”, Research report, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Vermilye, J. M., Scholz, C. H. (1995), “*Relation between vein length and aperture*”, J Struct Geol., 17(3): 423–34.

Wallis, P. F., King M. S. (1980), “*Discontinuity spacing in a crystalline rock*”, International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts, 17, pp. 63-66.

Walmann, T., Malthe-Sorensen, A., Feder, J., Jossang, T., Meakin, P., Hardy, H. H. (1996), “*Scaling relations for the lengths and widths of fractures*”, Phys Rev Lett; 77:5393–6.

Wang, H., Forster, C., Deo, M. (2008), “*Simulating Naturally Fractured Reservoirs: Comparing Discrete Fracture Network Models to the Upscaled Equivalents*”, Oral presentation at AAPG Annual Convention, San Antonio, Texas, April 20-23, 2008

Wobus, C., Ritter, K. (2010), “*Potential Environmental Impacts of the Proposed CIRC Underground Coal Gasification*”, Center for Science in Public Participation 224 North Church Avenue Bozeman, MT 59715.

Xu, C., Dowd P. (2010), “*A new computer code for discrete fracture network modeling*”, Computers & Geosciences, 36, pp. 292–301.

Xu, C., Dowd, P. A., Mardia, K. V., Fowell, R. J. (2006), “*A Connectivity Index for Discrete Fracture Networks*”, Mathematical Geology, 38 (5), 611-634.

Xua, S., Thomas, L. J. (1995), “*Laboratory Investigation on the Permability of Coal to Mixture of Methan 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). Wologog, Australia. (pp. 311-315).

Yang, L. (2003), “*Numerical simulation on three-dimensional nonlinear and unstable seepage of fluid in underground coal gasification*”, Fuel Processing Technology 44, 79–93.

Yang, L. (2005), “*Nonlinear coupling mathematical models on percolation-patterned underground coal gasification*”, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH, 29: 1331–1353.

Yang, L., Zhang, X. (2009), “*Modeling of contaminant transport in underground coal gasification*”, Energy Fuels, 23, pp 193–201.

Yu, B., Cheng, P. (2002), “*A fractal permeability model for bi-dispersed porous media*”, Int J Heat Mass Transf; 45: 2983–2993.

Yu, X. (1992), “*Stochastic modeling of rock fracture geometry*”, M.S. Thesis, MIT, Cambridge, MA.

Zamzow, K. L. (2000), “*Underground Coal Gasification: History, Environmental Issues, and the Proposed Project at BELUGA, ALASKA*”, Center for Science in Public Participation.

Zhang, L., Einstein H. H. (2000), “*Estimating the Intensity of Rock Discontinuities*”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37, pp. 819–837.

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, 281–296.

Zhao, Z., Jing, L., Neretnieks, I. (2011), “*Numerical modeling of stress effects on solute transport in fractured rocks*”, Comput Geotech; 38(2): 113–126.

Zhou, Q., Salve, R., Liu, H., Wang, J. S. Y., Hudson, D. (2006), “*Analysis of a mesoscale infiltration and water seepage test in unsaturated fractured rock: Spatial variabilities and discrete fracture patterns*”, Journal of Contaminant Hydrology, 87, 96–122.

Zimmerman, R. W., Bodvarsson, G. S. (1996), “*Hydraulic conductivity of rock fractures*”, Transport in Porous Media 23, 1–30.

Zimmerman, R. W., Yeo, I. W. (۲۰۰۰), "Fluid flow in rock fractures: From the Navier-Stokes equations to the cubic law, *Dynamics of fluids in fractured rock*", AGU, Washington, DC, pp. ۲۱۳-۲۲۴.

ترازنامه انرژی ایران، (۱۳۹۱).

جوادی، م.، شریفزاده، م.، (۱۳۹۱)، "مدل سازی جریان سیال در محیط سنگی ناپیوسته برای میدان نزدیک"، همایش ملی جریان و آلودگی آب، تهران.

جولایی، ا.، باغبانان، ع.، (۱۳۹۱)، "مدل سازی سه بعدی شبکه انتقال سیال درون سنگ های درزه دار با استفاده از مدل شبکه لوله ای و روش المان مجزا"، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران. راعی نیای، ا. (۱۳۹۱)، "گزارش اهمیت زغال سنگ در جهان امروز"، شرکت مهندسی مشاور فرآیند نوآوری مواد (میپک).

شریف زاده، م.، کارگر، س.، ترابی معصومی، ا.، (۱۳۸۵)، "تحلیل هیدرولیکی- هیدرومکانیکی توده سنگ اطراف تونل با استفاده از روش المان مجزا"، هفتمین کنفرانس تونل.

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

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 مزینوی طبس، فصلنامه علمی پژوهشی زمین شناسی محیط زیست، سال هفتم، شماره ۲۵.

نوروزی، م. (۱۳۹۳)، "برآورد مقاومت توده سنگ دارای ناپیوستگی های ناپایا با استفاده از مدل تصادفی شبکه درزه های مجزا (مورد مطالعاتی: توده سنگ ساختگاه سد و نیروگاه رودبار لرستان)"، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود.

نوروزی، م.، جلالی، س.م.ا.، کاکایی، ر.، (۲۰۱۳)، "روابط آماری حاکم بر مشخصات هندسی ناپیوستگی- ها"، *International Conference on Mining Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering*, زنجان.

Abstract

In Iran, most of the coal reserves are located deep in the ground or they are very thin in layer. To extract and use these sources of coal, *Underground Coal Gasification (UCG)* seems to be the best option. One of these coal reserves is coal-bearing strata of *Mazino area in Tabas*. Among the factors and indices that affect the feasibility and economy of the UGC is gas leakage through joints and fractures developed around an underground geo-reactor, i.e. its isolation. Given the significance of this issue, the present study focuses on gas leakage modelling based on the 3D Discrete Fracture Network (DFN) model, since it has not been studied so far. Accordingly, using field data of joints in Mazino area, a 3D geometrical-stochastical modeling of a rock mass jointed network is presented by DFN-FRAC^{3D} code. As regards, this program is developed to consider various distribution functions of joint aperture as well as the relationship between joint length and aperture. Also, the program is developed for detection of connected joint networks. In the following, the connected joint networks are converted to equivalent pipe networks. Finally to study the fluid flow within this network, Numerical software of flow modeling, WaterGEMS that has the capability to make complex pipes and receive other hydraulic information, is used. In order to test the performance of the provided program, a 3D hydraulic model for fracture network of rock mass in Mazino region is presented. It can be concluded that in the case of the execution of UCG in the Mazino coal mine, the resulting gases will not leak to the ground.

For the purpose of sensitivity analysis, it is assumed that the seismicity intensity of the region is increased by 50%. In this case, since the number of conductive joints and consequently the number of pipes is very high, the decision was made to apply hydraulic REV size to the area. Accordingly, hydraulic DFN model and then equivalent pipe

network model for cubic block dimensions with 3, 5, 8, 10 and 15 m edges were prepared. The pipe network models prepared using WaterGEMS commercial software are analyzed and the flow intensity values are calculated. In this case, the REV size is estimated to be 8 m × 8 m × 8 m. The results show that the average mass flow rate of the studied rock mass is 212 (lit /s). Finally, the results are sensitive analyzed to changes in reservoir pressure, Temperature and Joints physical properties.

Keywords: Gas Leaking, UCG, DFN, Numerical modeling, Mazino area



Shahrood University of Technology

**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering
Ph.D. Thesis in Mineral Exploitation**

**Numerical analysis of gas from UCG mining sites
using the pipe network method**

By: Ali Heidari

Supervisor:

Dr. Seyed Mohammad Esmaeil Jalali

Advisor:
Dr. Mehdi Noroozi

September ۲۰۱۹