

توسعه مدل هندسی شبکه شکستگی‌های مجزای سه‌بعدی فرکتال برای انتخاب طرح آب‌بندی تونل

مهین اعتمادی‌فر^۱؛ غلامرضا شعاعی^{۲*}؛ مرتضی جوادى اصطهباناتی^۳؛ آرش هاشم‌نژاد^۴

- ۱- فارغ‌التحصیل دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۲- عضو هیأت علمی گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
- ۳- عضو هیأت علمی گروه مهندسی معدن، نفت و ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- ۴- فارغ‌التحصیل دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه خوارزمی، ایران.

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱

(**نویسنده مسئول: shoaei@modares.ac.ir)

چکیده

توده‌سنگ، متشکل از سنگ بکر و ناپیوستگی‌هایی مانند شکستگی‌ها می‌باشد که این شکستگی‌ها تأثیر به‌سزایی بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی آن دارند. از جمله در تحلیل‌های حساس مانند شبیه‌سازی پایداری تونل، عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی می‌تواند نتایج شبیه‌سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. از این‌رو تعیین دقیق پارامترهای درزه‌داری سنگ مانند جهت‌داری و طول اثر بسیار حائز اهمیت است. استفاده از شبکه شکستگی مجزا یکی از روش‌های متداول به‌منظور شبیه‌سازی سنگ درزه‌دار می‌باشد. در این تحقیق یک برنامه کامپیوتری توسعه داده شده که به کمک آن می‌توان شبکه شکستگی مجزای توده‌سنگ را با دو روش آماری (DFN) و بعد فرکتال ($FDFN$) تولید کرد. در هر کدام از این دو روش پارامترهایی از قبیل موقعیت، چگالی، شیب، جهت شیب و طول شکستگی‌ها شبیه‌سازی شدند. به منظور کاربرد عملی برنامه توسعه یافته از داده‌های تونل امام زاده هاشم استفاده شد. به منظور طراحی آب‌بندی تونل امام‌زاده هاشم، ابتدا داده‌ها وارد نرم‌افزار $DIPS$ شدند. نتایج نشان داد که درزه‌ها در ۴ دسته اصلی تقسیم می‌شوند. سپس خصوصیات آماری مربوط به هر دسته درزه از قبیل توابع توزیع احتمال و پارامترهای توابع توزیع تعیین شدند. در مرحله بعد شبکه شکستگی مجزا برای دو حالت آماری و فرکتال ساخته شد. سپس شبکه هادی جریان سیال در دو حالت ساخته شد. سپس با بکارگیری الگوریتم جستجوی عمق اول مسیرهای هادی جریان مشخص شدند. برای دستیابی به الگوی بهینه تزریق، چندین رینگ (هر رینگ می‌تواند شامل تعداد دلخواهی گمانه باشد) با فواصل مختلف پیاده‌سازی شد. تعداد رینگ‌ها و گمانه‌ها تا دستیابی به الگوی بهینه می‌توانند به صورت دل‌خواه توسط کاربر در این کد تغییر یابند. حال برخورد گمانه‌های تزریق شبیه‌سازی شده با شکستگی‌های هادی جریان بررسی می‌شود. در نهایت تعداد، موقعیت، شیب و طول گمانه‌هایی بهینه تزریق محاسبه می‌شود. نتایج نشان داد که در تونل امام زاده هاشم در مقطع مورد مطالعه برای دستیابی به الگوی بهینه تزریق در حالت بعد فرکتال و آماری به ترتیب ۱۱ و ۵ گمانه باید حفاری و تزریق گردد. همچنین حداکثر طول موثر گمانه‌های تزریق برای دو حالت فرکتال و آماری به ترتیب ۳/۵۲ و ۲/۹۴ متر محاسبه شد.

شبکه شکستگی مجزا (DFN)، شبکه شکستگی مجزا فرکتال ($FDFN$)، الگوی تزریق، تونل امام‌زاده هاشم، جریان سیال، بهینه‌سازی الگوی تزریق

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

توده سنگ ترکیبی از ماده سنگ و ناپیوستگی است. ناپیوستگی‌ها شامل تخلخل، شکستگی، درزه، گسل و صفحات لایه‌بندی هستند و نقش مهمی در حوزه مکانیک سنگ و تعیین آب‌گذری در پی سازه‌هایی همانند سد و جداره‌های تونل دارند. کنترل آب زیرزمینی توده سنگ مسأله مهمی در احداث سازه‌های زیرزمینی می‌باشد مطالعه ویژگی‌ها و هندسه شکستگی‌ها در تعیین راستای بهینه تزریق و آب‌بندی سازه‌های زیرزمینی نقش مهمی دارد. تعیین میزان آب زیرزمینی که در هنگام حفاری به داخل تونل جریان می‌یابد نیز از جمله مسائلی است که در حفر تونل‌های سنگی و همچنین آب‌بندی صحیح آن بایستی بدان توجه شود.

علاوه بر موارد فوق هجوم جریان آب به داخل تونل نه تنها موجب کاهش ضریب پایداری ساختاری در توده سنگ-های اطراف تونل شده بلکه آثار و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از زهکشی تونل را نیز در پی دارد. بنابراین لازم است که محل و مقدار جریان آب ورودی به داخل تونل و روش‌های آب‌بندی آن پیش‌بینی شده و در ملاحظات تونل‌سازی در نظر گرفته شود.

امروزه تزریق در سنگ به دو منظور اصلی بهبود ویژگی‌های مقاومتی (تزریق تحکیمی) و کاهش تراوایی سنگ (تزریق پرده‌ای یا آب بند) صورت می‌گیرد. تزریقات آب‌بند به منظور کاهش نفوذپذیری توده سنگ و کنترل تراوش آب و کاهش نشت آب به سازه به کار گرفته می‌شود. در این نوع از تزریقات با حفر یک، دو یا چند ردیف گمانه؛ یک پرده یکپارچه آب‌بند در اطراف تونل احداث شده و مانع از نشت آب (ورود یا خروج آن) از بیرون به سازه یا از درون سازه به بیرون می‌شود.

به منظور شبیه‌سازی شکستگی‌ها روش‌های مختلفی طی پنج دهه گذشته ارائه شده است. در مراحل اولیه شبکه شکستگی از طریق سه گروه عمود بر هم از صفحات نامحدود با فواصل ثابت یا تصادفی مدل‌سازی شده است [۱]. در مطالعات گذشته، فاصله یک صفحه شکستگی نامحدود از یک مبدأ قراردادی با به کارگیری مدل‌های توزیع پواسون پیشنهاد داده شده است [۲، ۳ و ۴]. همچنین رفتار آب‌های زیرزمینی

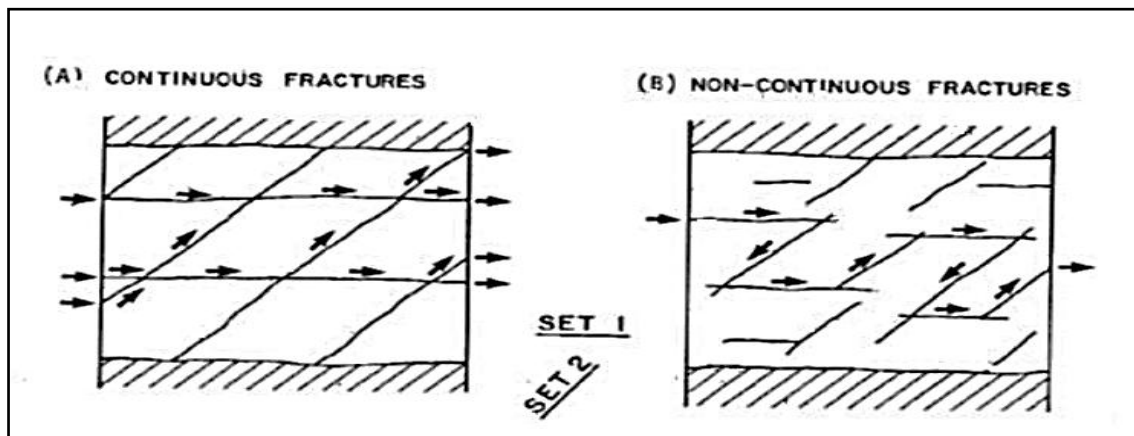
پس از احداث سازه‌های زیرزمینی از آن جهت حائز اهمیت است که حرکت آب همواره در جهتی است که دارای کوتاه‌ترین مسیر و بیشترین شیب هیدرولیکی است [۵].

با پیشرفت علم محققین از روش‌های نوین شبکه شکستگی مجزا برای شبیه‌سازی توده سنگ درزه‌دار استفاده شده است. به منظور ساخت شبکه شکستگی مجزا اطلاعاتی از قبیل: چگالی، جهت‌داری، طول و بازشدگی شکستگی‌ها مورد نیاز است. کد محاسباتی FracIUT جهت ایجاد شکستگی مجزا بر مبنای توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها و با استفاده از الگوریتم مونت کارلو توسعه داده شده است [۶]. نوروزی و جلالی با استفاده از داده‌های سد رودبار لرستان شبکه ناپیوستگی‌های توده سنگ را در این منطقه شبیه‌سازی کردند [۷]. روشی سه‌بعدی متکی بر هندسه با هدف مدل‌سازی لایه‌های چین‌خورده سنگ توسط فرشته‌نژاد و یاراحمدی باقی پیشنهاد شد [۸]. برخی از محققین دیگر نیز از روش زمین‌آمار جهت مدل‌سازی شبکه شکستگی مجزا استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های برداشت شده از دیواره گمانه‌ها و رخنمون‌های سطحی، چگالی و جهت‌داری شکستگی‌ها را با به کارگیری روش زمین‌آمار شبیه‌سازی نمودند [۹]. برای ساخت شبکه شکستگی مجزا در سال ۲۰۲۱ از تلفیق داده‌های هندسی شکستگی‌های به دست آمده از عملیات میدانی و داده‌های حاصل از مدل مجزای ساخته شده با عکس‌های هوایی استفاده شد [۱۰]. در سال ۲۰۲۲ نیز مدلی مبتنی بر شبکه شکستگی مجزا برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی ارائه شد [۱۱].

در پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های عددی و بهره‌گیری از داده‌های واقعی در منطقه مورد مطالعه سعی شده است که میزان تاثیر پارامترهای درزه و الگوی هندسی آن‌ها بر پیش‌بینی درست الگوی هندسی مسیرهای هدایت جریان آب ورودی به تونل مورد بررسی قرار گیرد که این فرآیند با استفاده از روش‌های مدل‌سازی شبکه مجزا فرکتال (FDFN)^۱ انجام شد. همچنین انطباق الگوی هندسی تزریق بر الگوی هندسی شبکه شکستگی به منظور بهبود آب‌بندی مورد بررسی قرار گرفت. تاکنون روابط و روش‌های تحلیلی و عددی متعددی برای برآورد پیش‌بینی مسیرهای آب ورودی به تونل ارائه شده است اما به علت عدم توجه به

هر دو مورد به روشنی دیده می‌شود که نفوذپذیری توده سنگ B از توده سنگ A بیشتر است [۱۲]. در این تحقیق با ایجاد تغییرات در فاصله‌داری و آرایش چال‌های تزریق روشی ارائه شده که می‌توان تزریق را بر شبکه شکستگی‌ها منطبق کرد که تا حد زیادی از هدر رفتن وقت و هزینه جلوگیری می‌شود.

هندسه ناپیوستگی‌ها و یکسان فرض نمودن مشخصات ناپیوستگی‌ها یا همسان‌گرد فرض نمودن محیط، مقدار برآورد مذکور واقع بینانه نبوده است. به‌عنوان مثال در شکل ۱، تاثیر پیوسته (ممتد) و ناپیوسته بودن (ناممتد) شکستگی‌ها بر رفتار هیدرولیکی دو توده‌سنگ با پارامترهای هندسی شکستگی‌ها (شامل: بازشدگی، زبری، جهت‌گیری و تراکم) مشابه نشان داده شده است. با فرض نفوذ ناپذیر بودن ماتریس سنگ در



شکل ۱- تاثیر پیوستگی بر روی نفوذپذیری یک دسته شکستگی [۱۲].

توابع توزیع آماری‌ای خواهند بود که از سطح رخنمون‌های سنگی و یا سطح داخلی گمانه‌ها برداشت شده‌اند. با برداشت و اندازه‌گیری داده‌ها از طریق برداشت‌های صحرائی، می‌توان تحلیل‌های آماری متنوعی مانند برآورد شاخص کیفیت توده‌سنگ و یا توزیع اندازه بلوک‌ها انجام داد. برای تحلیل‌های پیچیده‌تر مانند تحلیل‌های عددی از رفتار توده‌سنگ‌های تحت بارگذاری خارجی و شرایط محیطی، استفاده از مدل هندسی سیستم شکستگی‌ها ضروری می‌باشد. نمایش سیستم شکستگی را می‌توان با استفاده از فرآیند معکوس تولید تصادفی شکستگی مبتنی بر توابع توزیع‌های آماری پارامترهای هندسی به‌دست آورد. هر کدام از این مدل‌های تصادفی بخش کوچکی از منطقه مورد مطالعه بوده که فرض می‌شود شکستگی‌ها رفتار آماری یکسانی دارند. گردآوری مقادیر عددی تصادفی از توابع آماری پارامترهای هندسی سیستم شکستگی، فرایند شبیه‌سازی مونت کارلو^۲ نامیده می‌شود.

۲- روش‌ها و وسایل

به لحاظ تئوری، چنانچه تعداد شکستگی‌های موجود در یک مسئله خاص کم باشد؛ می‌توان با نمایش صریح همه شکستگی‌ها و بلوک‌های سنگی ما بین آن‌ها، مدل هندسی واقعی برای تحلیل و طراحی در نظر گرفت. به هر حال وجود چنین پروژه‌هایی با این مشخصات در مکانیک سنگ کمتر یافت می‌شود. بنابراین برای موارد کاربردی، استفاده از این مدل‌ها نمی‌تواند ارزیابی دقیقی از رفتار توده‌سنگ‌ها ارائه نماید. مطالعه و بررسی شکستگی‌های بزرگ مقیاس و متوسط روش مرسوم در این حالت بوده و مطالعه سایر شکستگی‌ها در قالب ریز ترک‌ها و میکرو ترک‌ها را بایستی در رفتار ماده‌سنگ مورد بررسی قرار داد. روش‌های تصادفی برای نمایش این شکستگی‌ها می‌تواند ابزار مناسبی برای بررسی رفتار آنها تلقی گردد. با این نگرش پارامترهای هر دسته شکستگی دارای

² Monte Carlo Simulation Process

۱-۲- محاسبه بعد فرکتال شبکه ناپیوستگی‌ها

در پژوهش حاضر برای محاسبه بعد فرکتال از روش مربع‌شمار استفاده شده است. این روش برای آنالیز الگوهای ایزوتروپ و پیچیده دوبعدی بسیار مناسب است [۱۳]. در برنامه متلب، تصویر مورد بررسی شامل شبکه شکستگی‌ها که در مرحله قبل لبه‌های آن شناسایی شدند به وسیله مربع‌های دوبعدی در گام اولیه پوشش داده می‌شود. البته برای دقت بیشتر می‌توان ابتدا از الگوریتم مناسبی برای پیوند دادن پیکسل‌های لبه‌ها برای تشکیل لبه‌های معنادار یا مرزهای نواحی مختلف تصویر استفاده کرده و در عین حال لبه‌های زائد را حذف کرد. تبدیل هاف^۳، از مهم‌ترین روش‌های ارائه شده برای یافتن و سپس اتصال پیکسل‌ها در قالب خطوط است [۱۴]. مزیت اصلی این تبدیل، انعطاف‌پذیری آن در توصیف خصوصیات مرزهای شکستگی‌ها و بی‌تأثیر ماندن از نویزهای موجود در تصویر دودویی است. این روش می‌تواند خطوطی را که به صورت چند پاره‌خط در آمده‌اند، تشخیص دهد و آن‌ها را به صورت پاره-خطی پیوسته نمایش دهد اما از طرفی به دلیل این‌که خطوط شکستگی‌ها کاملاً مستقیم نمی‌باشند، ممکن است تبدیل هاف به درستی قادر به شناسایی این خطوط نباشد که باعث می‌شود خطوط به طور ناقص و یا یک خط به صورت چند خط شناسایی شود. برای رفع این مشکل با به‌کارگیری اطلاعات مکانی و راستای لبه‌ها، خطوط (شکستگی‌ها) شناسایی شده و سپس با اصلاحاتی نظیر حذف خطوط کوچک و متصل کردن خطوط یک راستای نزدیک به هم شبکه شکستگی‌ها ایجاد می‌شود.

سپس برای تعیین بعد فرکتال، مرحله تکرار بعدی حاصل می‌شود. در این مرحله، اندازه مربع با استفاده از یک فاکتور کاهش داده می‌شود. برای هر شبکه مربع در نظر گرفته شده در محاسبات، پنجره‌ای از اندازه جعبه مربوطه ایجاد می‌شود. این پنجره، از مکانی به مکان دیگر در یک شبکه فرضی

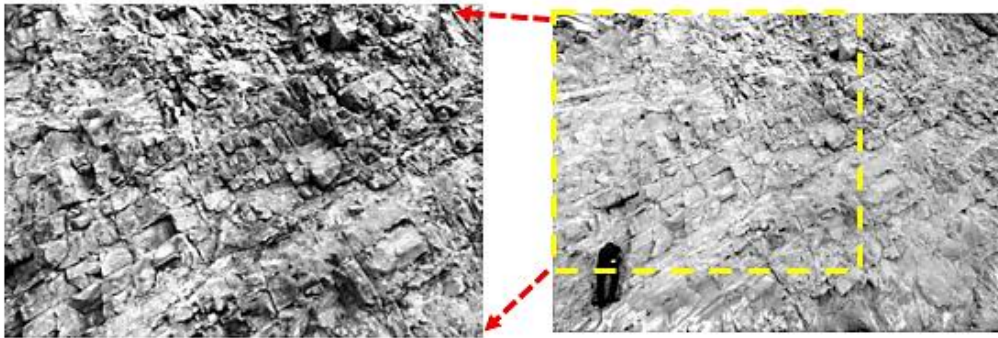
در تصویر مورد بررسی، انتقال داده می‌شود. تعداد مربع‌های مورد نیاز برای پوشش کامل این ویژگی شمارش شده، در یک نمودار لگاریتمی-لگاریتمی بر حسب تعداد مربع‌ها و اندازه آن‌ها نمایش داده می‌شود. هر تکرار به صورت یک نقطه در این نمودار قرار داده می‌شود. در نهایت شیب این نمودار به عنوان پارامتر بعد فرکتال تصویر محاسبه می‌شود. در شکل ۲ مراحل بیان شده نمایش داده شده است.

۲-۲- گسترش بعد فرکتال دوبعدی به حالت سه-

بعدی

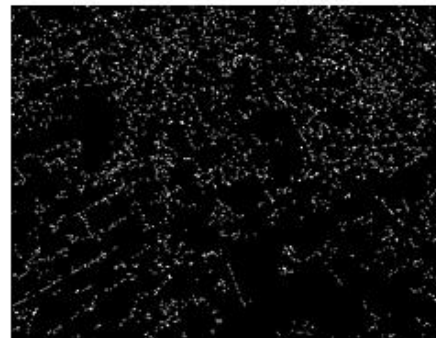
تفاوت اساسی در فرآیند تعیین بعد فرکتال در حالت سه‌بعدی استفاده از مکعب به جای مربع (در حالت دوبعدی) برای ثبت شکستگی‌ها است (شکل ۳). در این مطالعه برای توسعه بعد فرکتال از حالت دوبعدی به سه‌بعدی از ترکیب چندین مقطع عرضی (دوبعدی) استفاده شد. لازم به ذکر است که تنها با یک عکس هم می‌توان از کد توسعه داده شده برای محاسبه بعد فرکتال سه‌بعدی استفاده کرد اما به منظور افزایش دقت توصیه می‌شود که از چهار عکس استفاده شود. پس از شناسایی شکستگی‌ها، ماتریس شکستگی‌ها برای هر عکس تشکیل می‌شود که این ماتریس دوبعدی است. همچنین باید توجه شود که هر چهار عکس باید فصل مشترک داشته باشند. سپس براساس ماتریس‌های دوبعدی تشکیل شده برای هر یک از عکس‌ها و با توجه به فصل مشترک آن‌ها، هر چهار ماتریس با هم ادغام شده و یک ماتریس سه‌بعدی تشکیل می‌شود. لازم به ذکر است به منظور ادغام می‌بایست اندازه همه عکس‌ها یکسان باشد. پس از تشکیل ماتریس سه‌بعدی که نمایانگر محیط دربرگیرنده تونل است مدل اولیه به مکعب-های کوچک با ابعاد مختلف تقسیم شده و در نهایت بعد فراکتال در حالت سه‌بعدی (D) با رگرسیون خطی \log $(n.box)$ روی $\log (box.size)$ تخمین زده می‌شود.

³ Hough transform



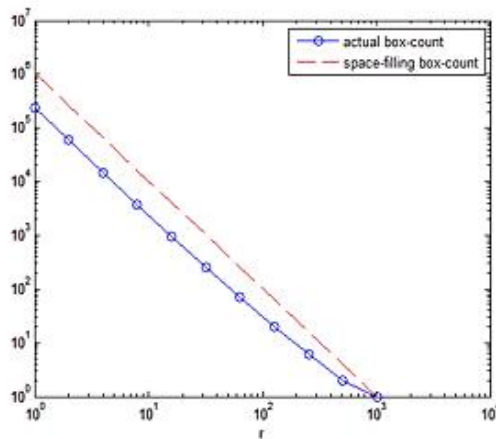
ب.

الف



د

ج



ه



ا

شکل ۲- مراحل تعیین بعد فرکتال با استفاده از تکنیک پردازش تصویر: الف) سیاه و سفید کردن تصویر اصلی، ب) پیش پردازش تصویر در ناحیه مورد نظر با عملگر یکنواخت سازی هیستوگرام، ج) تشخیص نقاط لبه با عملگر کنی، د) نمایش نقاط شناسایی شده در تصویر، ه) شکستگی‌های نهایی تشخیص داده شده با استفاده از تابع هاف، و) دیاگرام لگاریتمی-لگاریتمی فراوانی بر حسب اندازه مربع‌ها و تعیین شیب خط (بعد فرکتال) [۱۵].

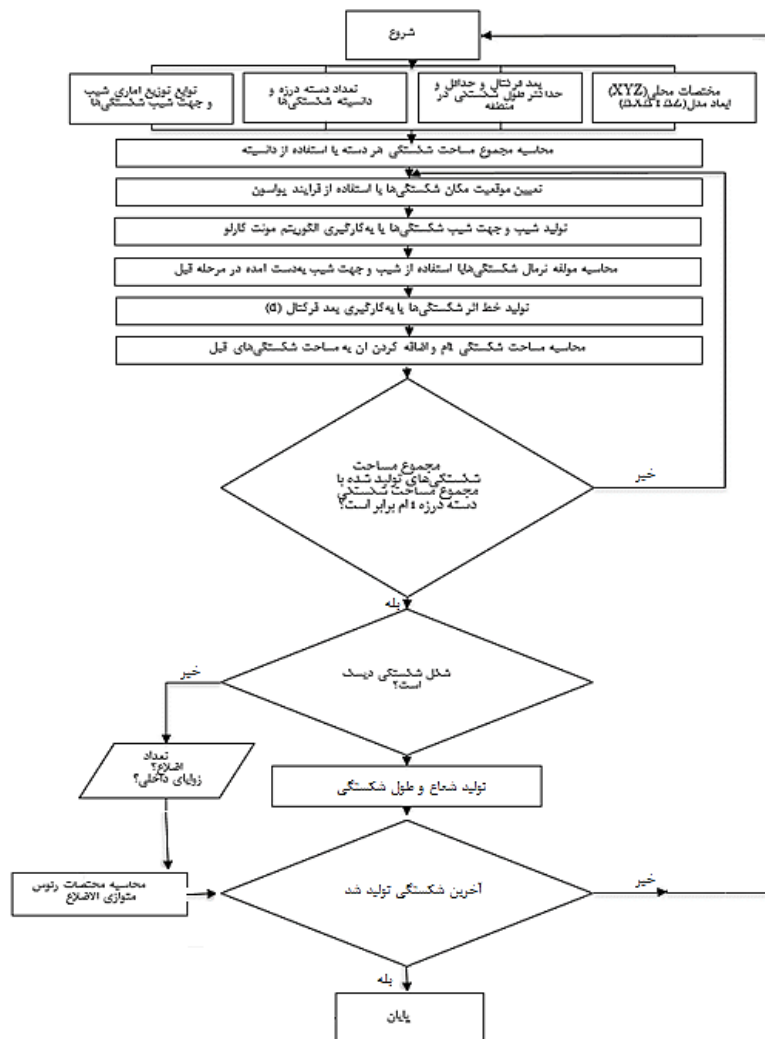
مختلف یکسان است، بنابراین برای شبیه‌سازی هندسه شبکه شکستگی‌ها می‌توان از پردازش تصاویر گرفته شده از تونل استفاده کرد. سپس بعد فرکتال را برای ناحیه مورد نظر محاسبه نمود و با استفاده از رابطه (۱)، توزیع مناسب‌تری از هندسه شبکه شکستگی‌های به‌دست آورد [۱۷]. به‌همین منظور کدی در نرم‌افزار متلب تهیه شد که بتواند با استفاده از پارامترهای بعد فرکتال و همچنین رابطه (۱) شبکه شکستگی‌ها را با چگالی‌های مختلف و با توجه به اندازه مدل مورد نظر تولید کند. از خصوصیات این کد می‌توان به ورود شیب درزه و تعداد درزه‌های مورد نیاز برای تحلیل اشاره کرد.

۳-۲- ساخت شبکه شکستگی سه‌بعدی فرکتال^۴

با توجه به ارتباط قانون توان با مقیاس طول شکستگی (L)، از رابطه (۱) برای مدل‌سازی شبکه شکستگی‌ها می‌توان استفاده کرد [۱۶].

$$L = \left[L_{\min}^{-D} + F \left(L_{\max}^{-D} - L_{\min}^{-D} \right) \right]^{-1/D} \quad (1)$$

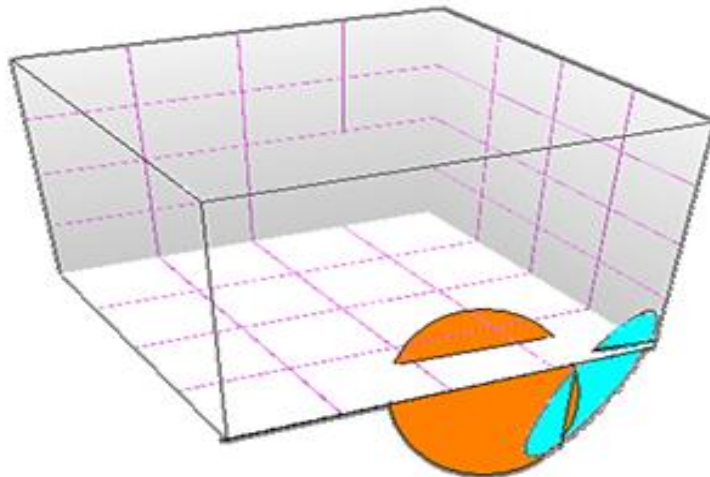
در رابطه (۱)، L_{\min} و L_{\max} به ترتیب طول کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین، D بعد فرکتال و F عددی تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $0 \leq F \leq 1$ می‌باشد. از آنجائی که ثابت شده بعد فرکتال و توزیع فضایی شبکه شکستگی‌ها در مقیاس‌های



شکل ۳- الگوریتم ساخت شبکه شکستگی سه بعدی فرکتال در کد توسعه داده شده در محیط نرم افزار متلب

⁴ Fractal DFN

شده و مشخص گردد که هر شکستگی با کدام شکستگی‌ها برخورد و با کدام بدون برخورد است. البته عدم برخورد دو شکستگی به معنی برخورد نداشتن دو شکستگی در مرزهای محدوده جریان نمی‌باشد چه بسا دو شکستگی با یکدیگر برخورد داشته باشند اما در خارج از مرزهای محدوده‌ی جریان این برخورد صورت گیرد. شکل ۴ نمونه‌ای از این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۴- تصویر شماتیکی از برخورد دو شکستگی در خارج از مرزهای جریان

که معادله جواب ندارد یعنی دو شکستگی یکدیگر را قطع نکرده اند. الگوریتم‌های مختلفی از روش‌های مسیریابی^۵ و پیمایشی در تئوری گراف وجود دارد که به‌طور کلی به دو نوع الگوریتم جستجوی عمق اول^۶ (جستجوی عمقی) و الگوریتم جستجوی عرضی^۷ تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیق برای شناسایی شکستگی‌های غیرهادی از مسیرهای اصلی جریان از الگوریتم جستجوی عمق اول استفاده شده است. در شکل ۵ با استفاده از الگوریتم جستجوی عمق اول جهت حذف مسیرهای غیرهادی برای یک نمونه شاخص از یک شبکه شکستگی دو بعدی و شبکه شکستگی کانالی متناظر با آن نمایش داده شده است.

۴-۲- شبیه‌سازی مسیرهای هادی جریان هدایت - پذیر

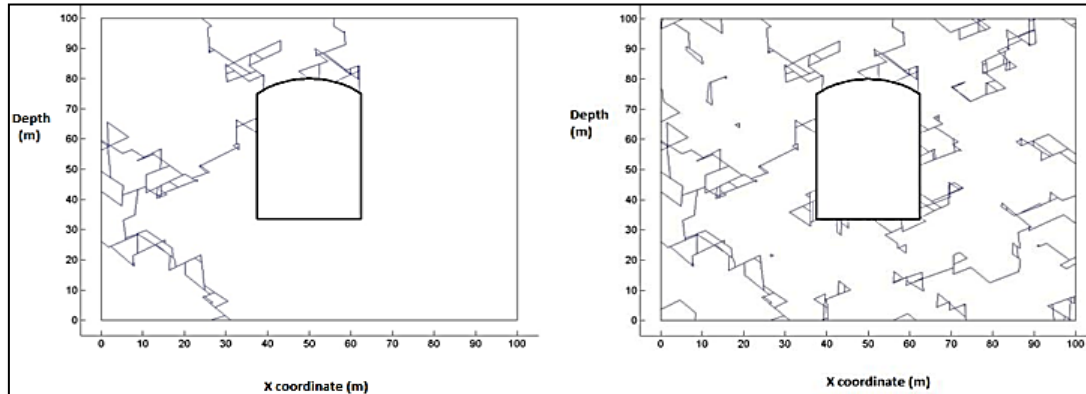
جهت شناسایی شکستگی‌های مؤثر بر جریان و یا جدا افتاده و بی ارتباط با جریان ابتدا لازم است شکستگی‌ها از لحاظ برخورد با یکدیگر تعیین وضعیت شوند. ضمن اینکه وضعیت هر شکستگی نسبت به سایر شکستگی‌ها نیز می‌بایست تعیین

در مدل دیسکی مرزهای شکستگی یک دایره می‌باشد به عبارتی مکان هندسی نقاطی از دیسک i ام است که فاصله‌ی اقلیدسی آن‌ها از مرکز دیسک r ام برابر شعاع دیسک i ام می‌باشد، بطوریکه می‌توان برای آن نقاط رابطه پارامتری نوشت. اما در مدل سازی بوسیله مدل دیسکی کافیتست معادله‌ی پارامتری دایره i ام در فضای سه بعدی را در معادله کلی صفحه‌ای که دایره r ام در آن واقع است جایگزین کنیم که یک معادله درجه دو نتیجه خواهد شد که در صورتیکه معادله جواب داشته باشد به دو نقطه‌ای که دیسک i ام و دیسک r ام در آن نقطه تلاقی دارند دست خواهیم یافت. به عبارتی این دو نقطه، نقطه آغازی و پایانی فصل مشترک دو دیسک می‌باشند. اما در مواقعی که ریشه مضاعف داشته باشد دو دیسک بر هم مماس خواهند شد، و در نهایت در مواقعی

⁷ Breadth First Search (BFS)

⁵ Traversal

⁶ Depth-first search (DFS)

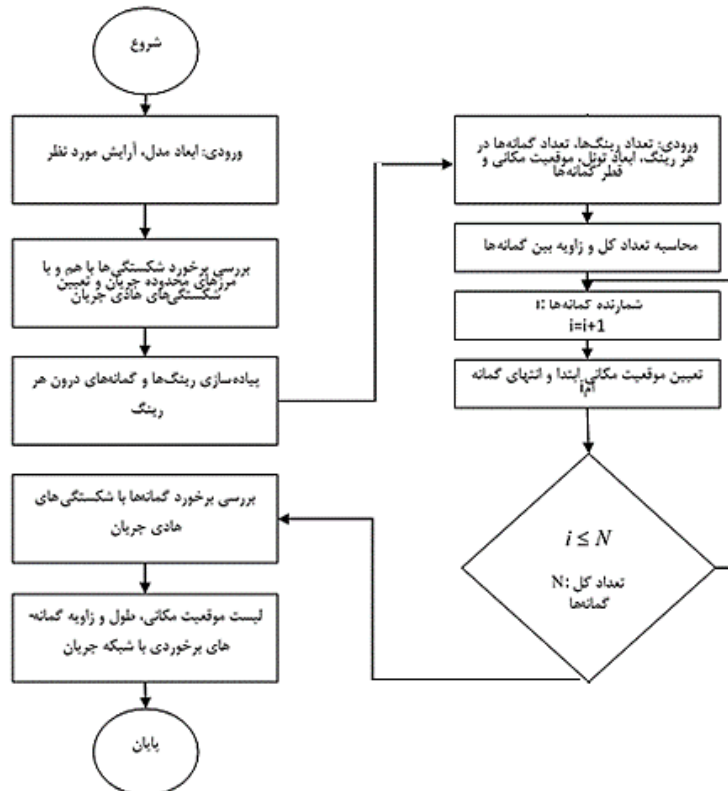


شکل ۵- استفاده از الگوریتم جستجوی عمق اول جهت حذف مسیرهای غیرهادی برای یک نمونه شاخص از یک شبکه شکستگی دو بعدی (سمت راست) و شبکه شکستگی کانالی متناظر با آن (سمت چپ) [۱۸].

۲-۵- بهینه‌سازی الگوی تزریق

به منظور دست‌یابی به شبکه تزریق بهینه، چندین رینگ با فواصل مختلف پیاده سازی شد. هر رینگ می‌تواند شامل

چندین گمانه تزریق باشد که این گمانه‌ها می‌توانند با فواصل، طول و زوایای دل‌خواه باشند. پس از شبیه‌سازی‌های مختلف، الگوی بهینه تزریق به دست آمد. شکل ۶ الگوریتم کلی بهینه سازی الگوی تزریق در این تحقیق را نشان می‌دهد.

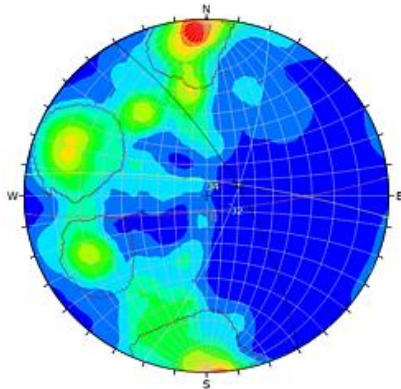


شکل ۶- الگوریتم کلی بهینه سازی الگوی تزریق

۳- یافته‌ها

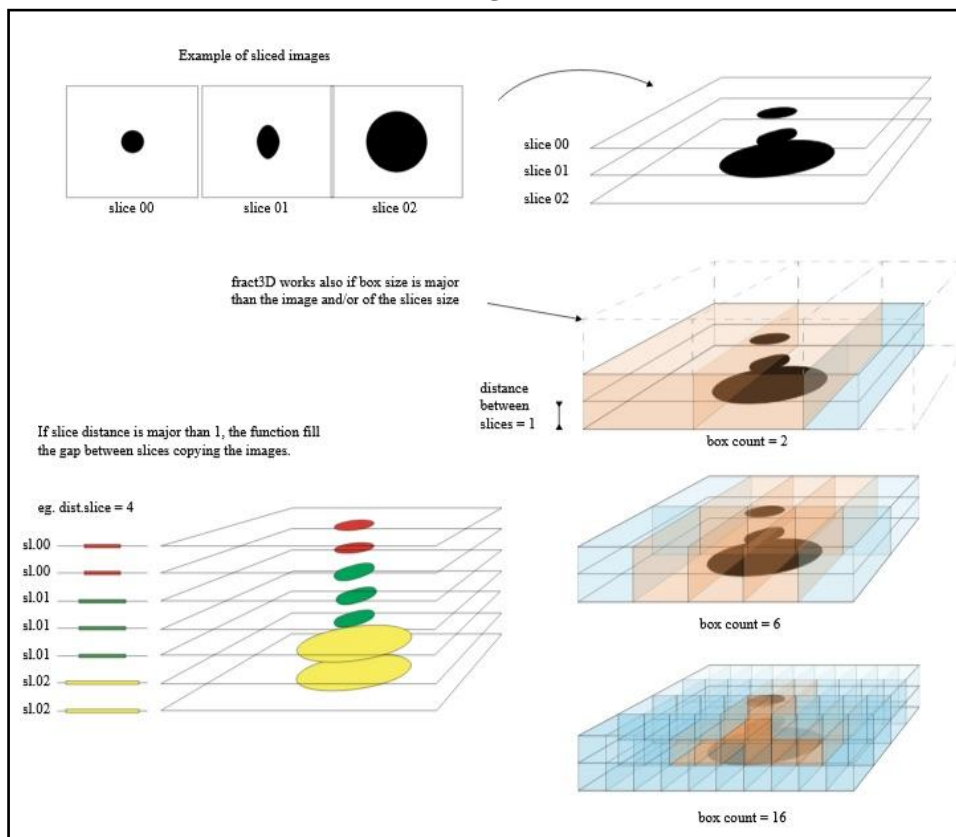
در شکل ۷ دسته درزه‌های شناسایی شده با استفاده از نرم افزار *DIPS* در سینه کار تونل امام زاده هاشم نمایش داده شده است. جدول ۱ چهار دسته درزه تشکیل شده را نشان

می‌دهد. شکل ۸ برای تعیین بعد فرکتال انتخاب شده و به- عنوان ورودی به برنامه داده شده است. شکل ۹ نیز تعداد مکعب‌های مورد نیاز در مقابل ابعاد هر مکعب برای شناسایی بعد فرکتال سه‌بعدی را نشان می‌دهد که با توجه به این اشکال بعد فرکتال ۲/۲ محاسبه می‌شود.

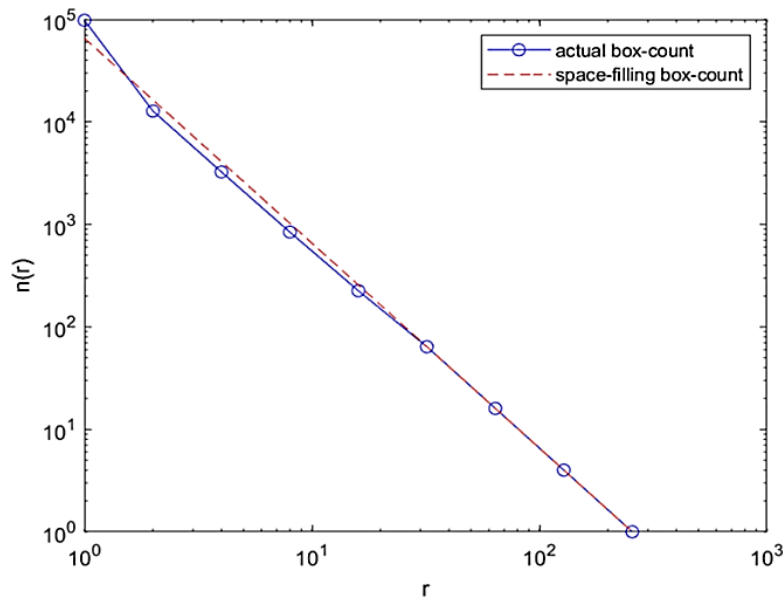


	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m	Red	80	174	31
2m	Green	73	110	32
3m	Black	70	60	33
4m	Yellow	80	7	34

شکل ۷- دسته درزه‌های شناسایی شده با استفاده از نرم افزار *DIPS*.



شکل ۸- روند تولید بعد فرکتال سه‌بعدی [۱۹].



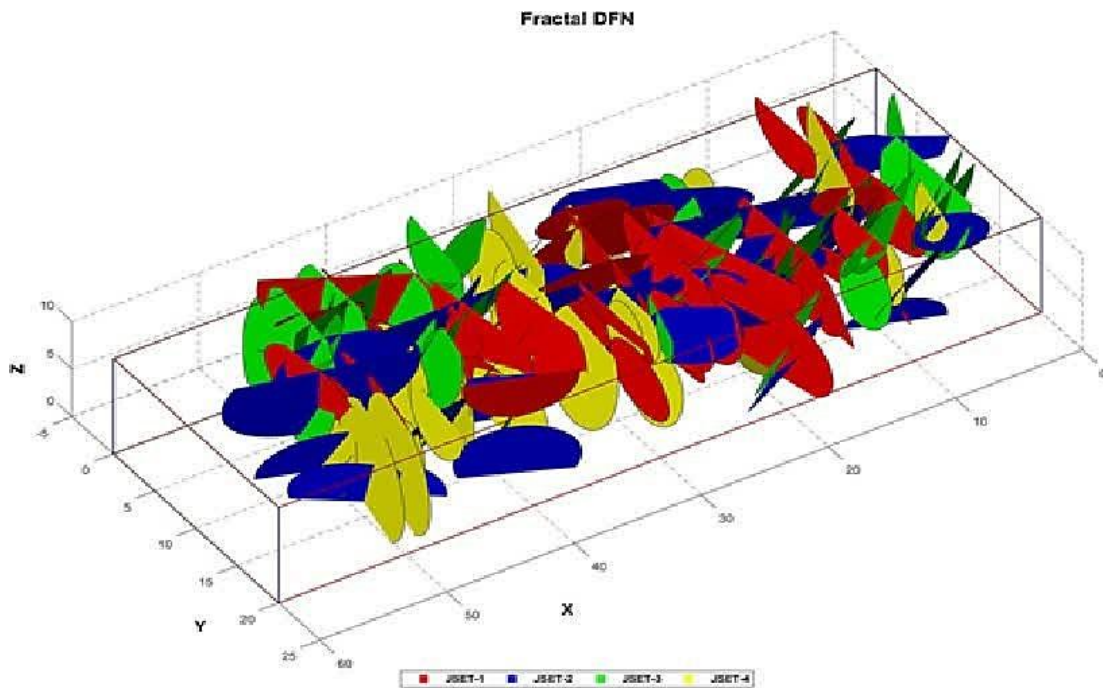
شکل ۹- تعداد مکعب های مورد نیاز در مقابل ابعاد هر مکعب برای شناسایی بعد فرکتال سه بعدی؛ در این شکل r اشاره ابعاد مکعب دارد.

جدول ۱- نتایج مربوط به پارامترهای مدل توزیع برازش شده به داده های تجربی چهار دسته درزه

دسته درزه	خصوصیت	مدل توزیع	پارامترها
۱	جهت شیب	نرمال	میانگین=۱۷۵
	شیب	توانی	Min=۶۴
	طول	نمایی منفی	Min=۱, Max=۱۰
۲	جهت شیب	نرمال	میانگین=۱۱۰
	شیب	نرمال	میانگین=۷۲
	طول	توانی	A=۲۳/۵, D=۰/۱۴۰۶
۳	جهت شیب	نرمال	میانگین=۵۸
	شیب	نرمال	میانگین=۶۶
	طول	نمایی منفی	$\lambda = 0/۳۱$
۴	جهت شیب	نمایی منفی	$\lambda = 0/۰۹۳۴۱$
	شیب	نرمال	میانگین=۸۱
	طول	نمایی منفی	$\lambda = 0/۲۶۲۳$

هاشم با استفاده از بعد فرکتال و کد توسعه داده شده در محدوده کیلومتر ۱۴۸۰-۱۵۳۰ در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

به منظور محاسبه بعد فرکتال، ابتدا چندین عکس، به کد توسعه داده شده به عنوان ورودی داده شده است. سپس با استفاده از بعد فرکتال به دست آمده، شبکه شکستگی تونل امامزاده هاشم ساخته شده است. شبکه شکستگی امامزاده



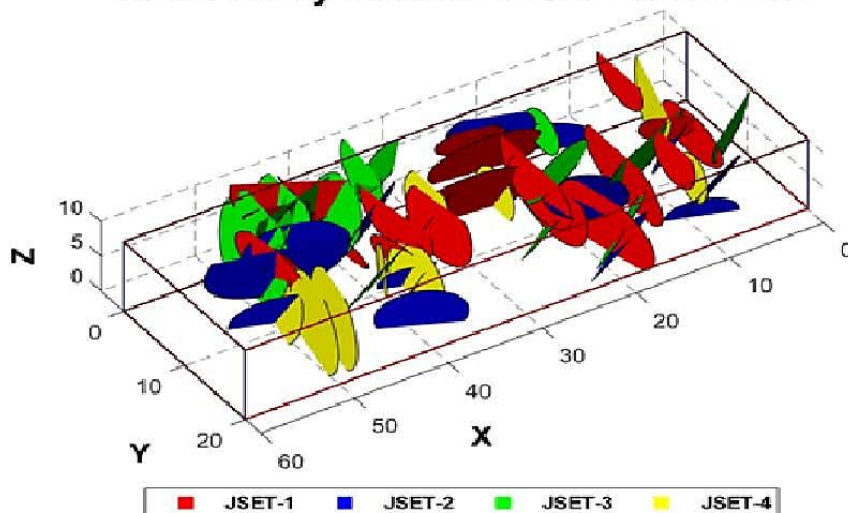
شکل ۱۰- شبکه شکستگی امام زاده هاشم با استفاده از بعد فرکتال و کد توسعه داده شددر محدوده کیلومتر ۱۴۸۰-۱۵۳۰؛ واحد های محورهای مختصات نشان داده شده در تصاویر متر می باشد.

زمانی که شبکه با در نظرگیری بعد فرکتال ساخته شده است.

در این شبکه شکستگی های موثر در جریان شناسایی شده‌اند که در شکل ۱۱ به تفکیک نوع دسته درزه آورده شده است.

شبکه شکستگی هادی (شامل شکستگی‌هایی که در جریان نقش دارند و سایر شکستگی‌ها نیز حذف شده‌اند) برای

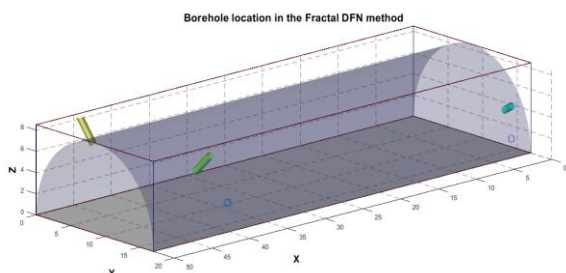
Conductivity Network of the Fractal DFN



شکل ۱۱- شبکه هادی بدست آمده از مدل ساخته شده با استفاده از بعد فرکتال محدوده کیلومتر ۱۴۸۰-۱۵۳۰

خوشه‌ها نیز این فرآیند تکرار می‌شود. پس از شبیه‌سازی‌های مختلف، الگوی بهینه تزریق به دست آمد.

در این تحقیق برای دست‌یابی به شبکه تزریق بهینه در حالت بعد فرکتال نیز چندین رینگ با فواصل مختلف پیاده‌سازی شد. هر رینگ می‌تواند شامل چندین گمانه تزریق باشد که این گمانه‌ها می‌توانند با فواصل، طول و زوایای دل‌خواه باشند. پس از شبیه‌سازی‌های مختلف، الگوی بهینه تزریق به دست آمد. به‌منظور دست‌یابی به الگوی بهینه تزریق، ۵ گمانه در موقعیت‌های مختلف و با زوایا و طول‌های مختلف زده شد. جدول ۲ نتایج مربوط به هندسه گمانه‌های تزریقی را نمایش می‌دهد. حداقل و حداکثر طول موثر گمانه‌های تزریق به ترتیب ۰/۱۹ و ۲/۹۴ متر محاسبه شد.



شکل ۱۲- آرایش گمانه‌ها به صورت شعاعی در محل شبکه هادی شکستگی فرکتال

جدول ۲- نتایج مربوط به هندسه گمانه‌های تزریق

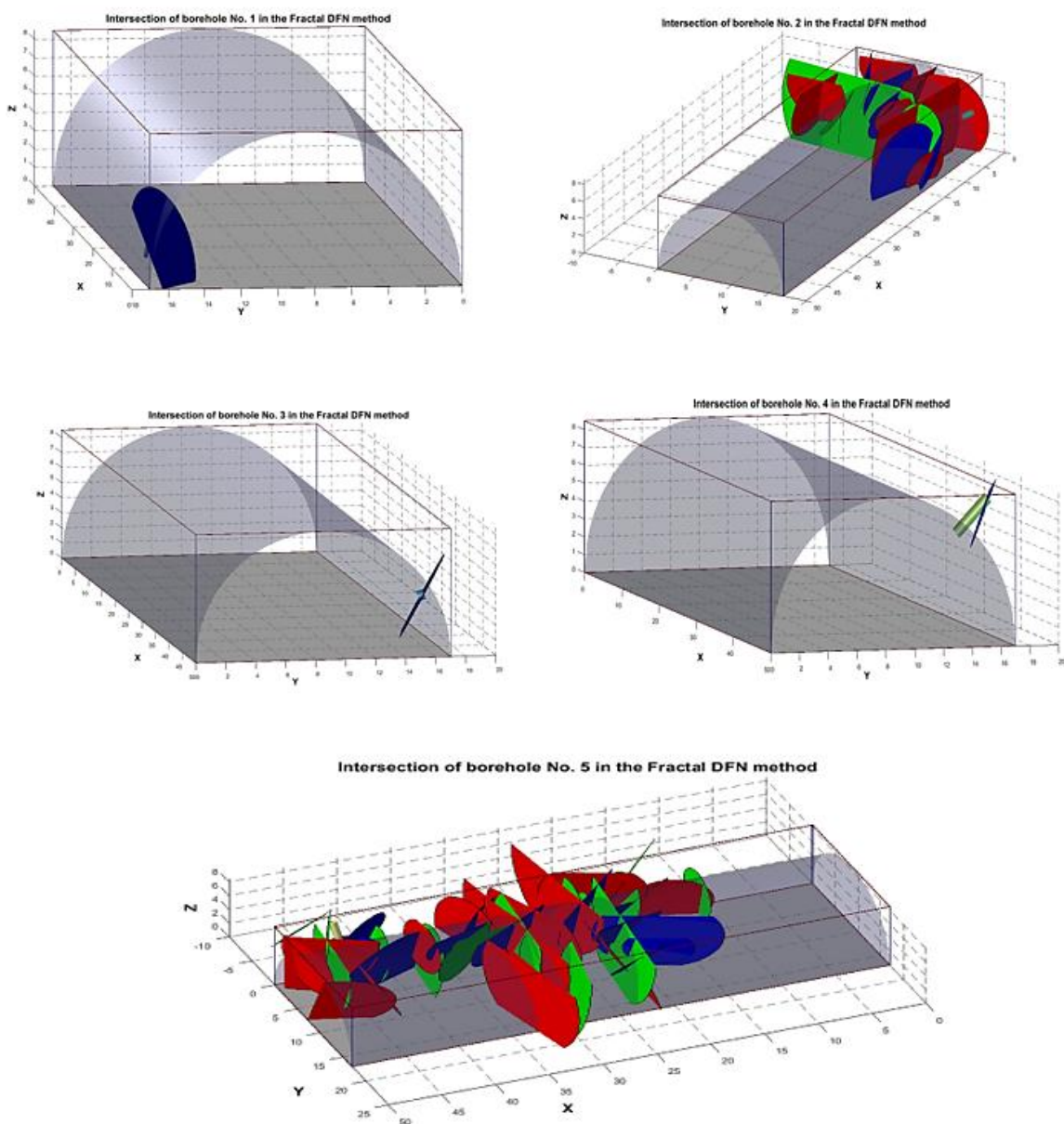
شماره گمانه	موقعیت ابتدای مدل (متر)	شیب (درجه)	طول (متر)
۱	۲/۵	۱۲	۰/۱۹
۲	۲/۵	۳۰	۱/۳۱۵
۳	۴۰	۱۸	۰/۴۴
۴	۴۲/۵	۴۲	۲/۹۴
۵	۴۵	۱۳۲	۲/۹۴

لازم به ذکر است در این تحقیق صرفاً مکان‌هایی برای شروع عملیات تزریق پیشنهاد می‌گردد و مبحث طراحی پرده آب‌بند مورد بررسی قرار نمی‌گیرد. برای دست‌یابی به شبکه تزریق بهینه، چندین رینگ با فواصل مختلف پیاده‌سازی شد. هر رینگ می‌تواند شامل چندین گمانه تزریق باشد که این گمانه‌ها می‌توانند با فواصل، طول و زوایای دل‌خواه باشند. ابتدا کاربر باید ابعاد محدوده مورد نظر را به عنوان ورودی به برنامه بدهد. همچنین کاربر باید مشخص کند چند رینگ و در هر رینگ چند گمانه می‌خواهد بزند. حال تعداد کل گمانه‌های تزریق از حاصل ضرب تعداد رینگ در تعداد گمانه‌ها در هر رینگ به دست می‌آید. همچنین زاویه بین گمانه‌ها در یک رینگ دل‌خواه از رابطه (۲) به دست می‌آید (اشکال ۱۲ و ۱۳).

$$\Delta_{\theta} = \frac{180}{N_{\text{hole_in_ring}}} \quad (2)$$

در این رابطه Δ_{θ} و $N_{\text{hole_in_ring}}$ به ترتیب زاویه بین گمانه‌ها در یک رینگ و تعداد گمانه در یک رینگ می‌باشند. حال باید خصوصیات هندسی را برای کل گمانه‌های تزریق پیشنهاد شده توسط کاربر به دست آورد. خصوصیات هندسی از قبیل موقعیت قرارگیری گمانه، طول موثر گمانه و شیب گمانه نسبت افق می‌باشند. به منظور بدست آوردن طول موثر گمانه ابتدا باید برخورد گمانه (تحت یک زاویه دل‌خواه) با نیم‌دایره معرف مقطع تونل و وجهی از مدل که گمانه با آن برخورد می‌کند را به دست آورد.

در انتهای این بخش یک فایل که معرف اطلاعات هندسی گمانه‌ها می‌باشد، ساخته می‌شود. حال برخورد این گمانه‌ها با خوشه‌های شکستگی‌های هادی جریان سیال بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که گمانه‌ها به صورت هشت‌ضلعی منظم در نظر گرفته می‌شوند و موقعیت‌های هر یک از اضلاع این هشت‌ضلعی ذخیره می‌شود. برخورد گمانه‌ها با شکستگی‌ها به صورت برخورد خط و صفحه در نظر گرفته می‌شود. اولین گمانه‌ای که با یک خوشه دل‌خواه برخورد کرد، به‌عنوان گمانه بهینه تزریق در نظر گرفته می‌شود. برای سایر



شکل ۱۳- نمونه‌هایی از تلاش برای بهینه‌سازی الگوی تزریق در شبکه شکستگی فرکتال

مقایسه شدند. بدین‌منظور داده‌های جهت‌داری شبیه‌سازی شده برای چهار آرایش مختلف وارد نرم‌افزار DIPS شدند و دسته درزه‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. برای محاسبه درصد خطا در جداول اعتبارسنجی از خطای نسبی استفاده شده است. نتایج نشان داد که شبیه‌سازی‌ها با داده‌های اولیه تطابق خوبی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

برای اعتبارسنجی پارامترهای شیب، جهت شیب و طول خط اثر شکستگی، داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های اولیه

با توجه به تاثیر شرایط تنش بر فرایند هیدرولیکی، پیشنهاد می‌گردد تاثیر تنش بر آب‌بندی تونل در مطالعات آتی در نظر گرفته شود. همچنین در این تحقیق فرض شد که سطح شکستگی صاف می‌باشد و زبری سطح درزه در نظر گرفته نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده این فرضیه بر طرف شود. همچنین تاثیر ناهمگنی و آنیزوتروپی روی خصوصیات هندسی درزه‌ها در نظر گرفته شود.

نتایج ساخت شبکه هادی شکستگی با دو روش آماری و بعد فرکتال نشان داد که وقتی از بعد فرکتال برای ساخت شبکه شکستگی استفاده می‌شود، تعداد شکستگی‌های موثر بیشتر است. علت این است که استفاده از بعد فرکتال باعث می‌شود شکستگی‌هایی با طول بزرگتر تولید شود. همچنین اگر از بعد فرکتال برای ساخت شبکه شکستگی‌ها استفاده شود، تعداد شکستگی‌هایی که در شبکه تزریق مشارکت می‌کنند نیز افزایش می‌یابد.

نتایج نشان می‌دهد که الگوی بهینه تزریق مطابق جدول ۲ شامل ۵ گمانه می‌باشد. حداقل و حداکثر طول موثر گمانه‌های تزریق به ترتیب ۰/۱۹ و ۲/۹۴ متر ارائه گردید.

۵- منبع‌ها

- [1] Snow, D. T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. *Water resources research*, 5(6), 1273-1289.
- [2] Priest, S., and Hudson, J. (1976). Discontinuity spacings in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 13(5), 135-148.
- [3] Andersson, J., Shapiro, A. M., and Bear, J. (1984). A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information. *Water Resources Research*, 20(1), 79-88.
- [4] Andersson, J., and Thunvik, R. (1986). Predicting mass transport in discrete fracture networks with the aid of geometrical field data. *Water Resources Research*, 22(13), 1941-1950.
- [5] Song, W. K., Hamm, S. Y., & Cheong, J. Y. (2006). Estimation of groundwater discharged into a tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 3(21), 460.
- [6] Joolaei, A., and Baghbanan, A. (2013). Three Dimensional Fluid Flow Modeling in Fractured Rocks using Numerical Pipe Network Approach. 9th International Congress on Civil Engineering (pp. 1-6). Isfahan : Isfahan University of Technology.
- [7] Noroozi, M., Kakaie, R., and Jalali, S. (2015). 3D geometrical-stochastic modeling of rock mass joint networks: case study of the right bank of Rudbar Lorestan Dam plant. *Journal of Geology and Mining Research*, 7(1), 1-10.
- [8] Fereshtenejad, S., Afshari, M. K., Bafghi, A. Y., Laderian, A., Safaei, H. and Song, J.-J. (2016). A discrete fracture network model for geometrical modeling of cylindrically folded rock layers. *Engineering Geology*, 215, 81-90.
- [9] Wang, C.J. and Vecchiarelli, A., (2019). June. A geostatistical approach to modelling DFN: a block size.
- [10] Smeraglia, L., Mercuri, M., Tavani, S., Pignalosa, A., Kettermann, M., Billi, A., and Carminati, E. (2021). 3D Discrete Fracture Network (DFN) models of damage zone fluid corridors within a reservoir-scale normal fault in carbonates: multiscale approach using field data and UAV imagery. *Marine and Petroleum Geology*, 126, 104902.
- [11] Li, X., Liu, J., Gong, W., Xu, Y., and Bowa, V. M. (2022). A discrete fracture network based modeling scheme for analyzing the stability of highly fractured rock slope. *Computers and Geotechnics*, 141, 104558.
- [12] Rouleau, A., and Gale, J. (1987). Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24(2), 99-112.
- [13] Falconer, K. (1990). *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*, Wiley, Chichester.
- [14] Du, S., Van Wyk, B., Tu, C., Zhang, X. (2009). An Improved Hough Transform Neighborhood Map for Straight Line Segments, *IEEE Transactions on Image Processing*, 19: 573-585, DOI: 10.1109/TIP.2009.2036714.
- [15] بصیرت، روح الله ، تاثیر شبکه شکستگی ها بر گسترش شکست هیدرولیکی در مخازن هیدروکربنی، رساله دکتری دانشگاه تربیت

مدرس، ۱۳۹۸.

- [16] Newman, M. E. J., (2005). Power laws, Pareto distributions and Zipf's law, *Contemporary Phys.*, 46, 323–351.
- [17] Lei, Q., and Wang, X., (2016). Tectonic interpretation of the connectivity of a multiscale fracture system in limestone, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 1551–1558, doi: 10.1002/2015GL067277.
- [۱۸] بهروز، پاریاب، ارائه مدلی برای شبکه درزه داری و تخمین آب ورودی به داخل حفاریات زیر زمینی-مطالعه موردی، رساله کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۱.
- [19] Mancuso, F., Di Benedetto, P., Tosolini, L., Buttironi, M. M., Beltrame, A., and Causero, A. (2021). Treatment options for massive rotator cuff tears: a narrative review. *Acta Bio Medica: Atenei Parmensis*, 92 (Suppl 3), e2021026.



Development of a geometric model of a 3D fractal discrete fracture network for tunnel sealing design selection

Mahin Etemadifar¹; Gholamreza Shoaie²; Morteza Javadi Estahbanati³; Arash Hashemnejad⁴

1- PhD graduate in Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Faculty member, Department of Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3- Faculty member, Department of Mining, Petroleum and Geotechnical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

4- PhD graduate in Engineering Geology, Kharazmi University, Iran.

Received: 19. August. 2025 Accepted: 23. September. 2025

(*Corresponding author: shoaie@modares.ac.ir)

Keywords

**Discrete Fracture Network (DFN)
Discrete Fractal Fracture Network (DFN)
Injection Pattern
Imamzadeh Hashem Tunnel
Fluid Flow, Optimization Injection Pattern**

Final English Extended Abstract

Rock masses consist of intact rock and discontinuities such as fractures, which strongly control their mechanical and hydraulic behavior. In sensitive analyses, including tunnel stability assessment and groundwater inflow simulation, uncertainty in fracture network modeling can significantly affect the results. Accurate characterization of fracture parameters such as orientation, density, and effective length is therefore essential. Discrete Fracture Network (DFN) modeling is widely used to represent fractured rock masses. In this study, a numerical code was developed to generate three-dimensional fracture networks using both conventional statistical DFN and fractal-based DFN (DFN) approaches. Key fracture parameters, including position, density, dip, dip

direction, and length, were simulated in both frameworks. The developed methodology was applied to the Imamzadeh Hashem tunnel as a real case study. Hydraulic fracture networks were constructed, conductive flow paths were identified, and an optimal tunnel grouting pattern was designed. The results demonstrate the critical role of fracture geometry representation in hydraulic analysis and grouting optimization

Introduction

Modeling fracture systems has been a major focus in rock mechanics research over recent decades. Early models represented fractures as infinite planes with regular or random spacing, whereas more advanced approaches rely on stochastic descriptions derived from field observations. Groundwater flow around underground structures is particularly important because water preferentially migrates through highly connected and hydraulically conductive fractures. Many conventional analytical and numerical methods neglect fracture geometry or assume homogeneous conditions, which leads to unrealistic predictions of water inflow. This study aims to investigate the influence of fracture geometry and spatial distribution on groundwater flow paths and tunnel grouting efficiency by incorporating fractal characteristics into discrete fracture network modeling.

Methodology and Approaches

Discontinuity data from the Imamzadeh Hashem tunnel were analyzed to identify major fracture sets and determine their statistical properties. Probability distribution functions were fitted to fracture orientation, spacing, and length for each set. A MATLAB-based code was developed to construct three-dimensional DFN and FDFN models. The fractal dimension of the fracture network was estimated using the box-counting method and extended from two-dimensional images to three-dimensional space. Fracture intersections were analyzed, and hydraulically conductive pathways were



identified using a depth-first search algorithm. Various grouting configurations with different numbers, orientations, and lengths of boreholes were simulated to determine the optimal injection pattern.

Results and Conclusions

The results indicate that fractal-based fracture networks generate a greater number of hydraulically effective fractures than conventional statistical DFN models, mainly due to the presence of longer fractures. Consequently, fracture connectivity and fluid flow potential increase. For the investigated tunnel section, the optimal grouting design required 11 boreholes in the fractal model, compared with 5 boreholes in the statistical model. The maximum effective borehole lengths were calculated as 3.52 m and 2.94 m for the fractal and statistical approaches, respectively. The study confirms that incorporating fractal geometry into fracture network modeling improves the realism of hydraulic analysis and enhances the reliability of tunnel grouting design.
