

## مدل سازی شبکه ناپیوستگی گسسته به منظور برآورد خردشوندگی برجای توده سنگ در روش های استخراج تخریبی

عنایت الله امامی میبدی<sup>۱\*</sup>، سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲</sup>، علیرضا یاراحمدی بافقی<sup>۳</sup>

دریافت مقاله: ۹۳/۰۴/۰۶ پذیرش مقاله: ۹۵/۰۷/۰۷

### چکیده

یکی از مولفه های اساسی به منظور ارزیابی قابلیت تخریب پذیری توده سنگ در روش های استخراج تخریبی، برآورد خردشوندگی برجای در مراحل پیش امکان سنجی است. برآورد ضعیف این مولفه می تواند اثر بسیار نامطلوبی را بر فرآیند تخریب داشته باشد. در سال های اخیر ناپیوستگی ها به عنوان عامل اصلی خردشوندگی برجای با استفاده از روش های جدید امکان شبیه سازی دقیق تری یافته اند. گسترش و ابعاد ناپیوستگی ها به عنوان یکی از پارامترهای هندسی در سیستم های شبیه سازی نامحدود مورد توجه قرار نمی گیرد در صورتی که تاثیر زیادی بر میزان تخریب پذیری کانسار در روش های استخراج تخریبی، به ویژه روش تخریب توده ای دارد. در آخرین روش های مدل سازی هندسی به نام شبکه ناپیوستگی های گسسته (DFN) ناپیوستگی ها به صورت ناپایا در نظر گرفته می شود که این امر از افزایش چگالی درزه داری جلوگیری کرده و با واقعیت تطابق بیشتری دارد. در این تحقیق با توجه به قابلیت های خوب محاسباتی و نمایه های بصری از نرم افزار Mathematica برای نوشتن کد شبکه ناپیوستگی گسسته دوبعدی (DFN<sup>2D</sup>) استفاده شد. از قابلیت های کد نوشته شده می توان به تولید خروجی رقومی، نمایه های بصری، در نظر گرفتن تسلسل درزه داری، ساخت مدل درزه های پایا و ناپایا، تعیین بلوک های کامل حاصل از برخورد درزه ها با محاسبه مساحت آن ها، ایجاد خروجی مناسب برای استفاده در نرم افزارهای تحلیل عددی UDEC و PFC2D و خروجی آماری هریک از مشخصه های هندسی مدل اشاره کرد. با استفاده از برداشت های انجام شده از ترانسه های موجود در یک معدن مس و برآورد بهترین توابع توزیع احتمالاتی ویژگی های هندسی دسته درزه های موجود در این منطقه، مدل هندسی شبکه درزه ها تهیه شد. خروجی های حاصل از مدل از جمله چگالی و شدت درزه داری با واقعیت موجود تطابق بسیار خوبی را نشان داد. میزان خردشوندگی برجای حاصل از درزه های ناپایا و همچنین نسبت سطح بلوکی شده به سطح کل مدل محاسبه شد.

**کلید واژه ها:** مدل سازی هندسی، درزه های ناپایا، شبکه ناپیوستگی گسسته، خردشوندگی برجای، روش های استخراج تخریبی

۱. دانشجوی دکتری استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک enayatemami@gmail.com

۲. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳. استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد.

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر صنعت معدنکاری با آرایشی تازه از چالش‌های قدیمی و جدید روبروست. عمیق‌تر شدن ذخایر، کم‌شدن عیار و افزایش تقاضا برای منابع معدنی از جمله این چالش‌هاست. استفاده از روش‌های تخریبی به‌ویژه روش تخریب توده‌ای به عنوان یک پاسخ به این مسایل مطرح است. روش تخریب توده‌ای استخراج ذخایر عظیم با عیار پایین در عمق را امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین این روش پایین‌ترین هزینه تولید و بالاترین نرخ تولید نسبت به سایر روش‌های استخراج زیرزمینی را دارد. به هر حال تجارب اخیر در برخی از معادن دنیا که با این روش مشغول به کار هستند، مانند معدن نورث پارکس Northparkes در استرالیا و پالابورا Palabora در آفریقای جنوبی، عدم شناخت کافی از فرآیندهای ژئوتکنیکی در بحث تخریب را نمایان می‌سازد. هم‌اکنون در کشورهای پیشرفته‌ی صنعتی تمایل برای استفاده از روش تخریبی در کانسارهای سخت‌تر از آنچه در گذشته با این روش مورد استخراج قرار می‌گرفته، وجود دارد. همواره در این روش به ویژه برای کانسارهای سخت‌تر چالش تخریب‌پذیری مطرح بوده است و یکی از مهمترین عوامل تاثیرگذار بر میزان تخریب‌پذیری در کانسارهای سخت، سیستم ناپیوستگی‌های آنهاست (Tollenaar, 2008).

در اکثر موارد ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها رفتار کلی توده‌سنگ را کنترل می‌کنند. تعریف دقیق ساختار هندسی توده‌سنگ نقطه شروع بهتری را برای مدل‌سازی و تعیین مقاومت توده‌سنگ فراهم می‌کند (Pine et al., 2006). درزه‌ها متداول‌ترین نوع ناپیوستگی‌ها در میان ناپیوستگی‌های توده‌سنگ هستند. لذا ارزیابی ویژگی‌های درزه‌ها بخش مهمی از مهندسی توده‌سنگ را تشکیل می‌دهد (Wanga et al., 2003). در بسیاری از شیوه‌های مدل‌سازی توده‌سنگ، درزه‌ها با استفاده از بعضی فرض‌های غیرواقعی ساده‌سازی می‌شوند. برای مثال فرض درزه‌های بی‌نهایت که معمولاً در مدل‌سازی‌ها به کار می‌رود، یک ویژگی است که با شرایط واقعی و طبیعی توده‌سنگ تطابق ندارد (Rogers et al., 2007). همچنین به طور معمول

پیش‌فرض‌هایی در مورد قطعی بودن ویژگی‌های درزه، تعداد بسیار کم درزه‌ها، استقلال درزه‌ها، احتمال رخداد یکسان و یکنواخت در توده‌سنگ و غیره در نظر گرفته می‌شوند.

این ساده‌سازی‌ها محدودیت‌هایی جدی بر توانایی مدل‌سازی رفتار واقعی توده‌سنگ، تحمیل می‌کنند. برای مدل‌سازی دقیق توده‌سنگ باید جانمایی درزه‌ها در داخل مدل به گونه‌ای باشد که توزیع درزه‌ها تا حد امکان مشابه ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ باشد. از طرف دیگر، ماهیت تصادفی هر ویژگی هندسی درزه اثر مهمی بر مقاومت توده‌سنگ دارد (Hoek, 1998). از بهترین روش‌های دارای توانایی شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، مدل‌سازی تصادفی شبکه ناپیوستگی‌های گسسته Discrete Fracture Network است. توسعه مدل‌سازی تصادفی، پیشرفت چشم‌گیری در زمینه مدل‌سازی توده‌سنگ و بررسی رفتار آن محسوب می‌شود (Rogers et al., 2006). در مدل‌سازی تصادفی، با تعریف ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها به صورت آماری و تصادفی، مدل‌ها با استفاده از مدل‌سازهای تولید سیستم درزه مانند مدل سلسله مراتبی پیشرفته دوبعدی و سه‌بعدی، مدل ونزیانو، مدل بیچر یا سایر مدل‌های مشابه با کاربرد سری‌های متوالی فرآیندهای تصادفی (خطی پواسونی، صفحه‌ای پواسونی و غیره) ایجاد می‌شوند.

پارامترهای تصادفی درزه‌ها از اندازه‌گیری‌های میدانی و تحلیل‌های آماری بدست می‌آیند. پیشرفت‌های چشم‌گیر در جمع‌آوری و روش‌های پردازش اطلاعات در سال‌های اخیر این امکان را فراهم نموده که بتوان حجم زیادی از اطلاعات با کیفیت بالا را از رخنمون‌های توده‌سنگ بدست آورد. لذا این امکان فراهم می‌شود که بر اساس اطلاعات آماری جمع‌آوری شده، ویژگی‌های توده‌سنگ با کیفیت بهتری تعیین شوند.

مدل‌های تصادفی شبکه درزه توسعه داده شده توسط بیچر Baecher و همکاران در سال ۱۹۷۷ و ونزیانو Veneziano در سال ۱۹۷۸ جزء مدل‌های پایه ارایه شده در این زمینه هستند. در این مدل‌ها ویژگی‌هایی از درزه شامل احتمال رخداد،

مفهوم در زمینه تحلیل پایداری بلوک نمودند (Priest and Samaniego, 1988). ارایه‌ی مدل هندسی سلسله مراتبی در ارتباط با فرآیندهای پایه‌ای ایجاد درزه توسط ریس و انیشتین در سال ۱۹۹۱ (Reyes and Einstein, 1991) و مدل هندسی - مکانیکی ارایه شده توسط مارتل و همکاران در سال ۱۹۹۱ (Martel et al., 1991) را می‌توان از دیگر نمونه‌های مدل‌های تصادفی توسعه داده شده دانست. محدودیت‌های این مدل‌ها، به ویژه توانایی مدل‌سازی فقط دو دسته درزه و مشکل در ارایه تغییرات گسترده توزیع دسته درزه‌ها، منجر به توسعه مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته توسط یو در سال ۱۹۹۲ شد (Yu, 1992). پریست در سال ۱۹۹۳ مدل تصادفی سه بعدی را ارایه نمود که در آن درزه‌ها بصورت دیسک‌های دایره‌ای فرض شده‌اند. در این مدل مقادیر تصادفی برای قطر درزه نیز به وسیله الگوریتم‌های ارایه شده توسط پریست، از توزیع‌های مناسب تولید می‌شوند (Priest, 1993). ایوانووا و همکارانش در سال ۱۹۹۵ مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته را به سه بعد توسعه دادند (Ivanova et al., 1995). کولاتیلاک و همکاران در سال ۲۰۰۴ اقدام به تهیه‌ی مدل شبکه درزه تصادفی سه بعدی برای توده‌سنگی از جنس دیوریت و ارایه فرآیند جدیدی برای تخمین مقاومت و تغییرشکل‌پذیری بلوک سنگی در سه بعد نمودند (Kulatilake et al., 2004). در سال‌های 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 شده است. مدل دوبعدی ارایه شده توسط باغبانان و جینگ در سال ۲۰۰۸ (Baghbanan and Jing, 2008) و مدل سه‌بعدی ارایه شده توسط زو و دود در سال ۲۰۱۰ (Xu And Dowd, 2010) و همچنین بنگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ (Bang et al., 2012) را می‌توان به‌عنوان نمونه‌هایی از این نوع برشمرد. در سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۳ امینی، گودرزی و یاراحمدی بافقی، مدل‌سازی سه بعدی توده سنگ‌های درزه‌دار به دو روش سیستم ناپیوستگی‌های نامحدود و سیستم دیسک‌های تصادفی

جهت‌داری و فاصله‌داری به خوبی به طور آماری مدل شده‌اند، اما به ویژگی ابعاد و گسترش (پایایی) درزه به دلیل مشکلات اندازه‌گیری مقدار آن و عدم وجود روابط مربوطه پرداخته نشده است. در این مقاله با توجه به تاثیر شدید پایایی درزه بر خردشوندگی برجای توده سنگ، مدل تصادفی شبکه درزه با در نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه طول درزه براساس مدل وزن‌یانو و مدل‌های سلسله مراتبی ساخته شده است. همچنین با استفاده از داده‌های میدانی برداشت شده از یک معدن مس پرفیری در ایران مدل هندسی دوبعدی شبکه درزه‌های توده‌سنگ با استفاده از مدل تصادفی توسعه یافته تهیه شده است. به این منظور کدی دوبعدی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار Mathematica به نام DFN<sup>2D</sup> تهیه شده که قادر است براساس داده‌های برداشت شده، خروجی رقمی، نمایه‌های بصری، در نظر گرفتن ژنز و تسلسل درزه‌داری، ساخت مدل درزه‌های پایا و ناپایا، تعیین بلوک‌های کامل حاصل از برخورد درزه‌ها با محاسبه مساحت آن‌ها، ایجاد خروجی مناسب برای استفاده در نرم‌افزارهای تحلیل عددی UDEC و PFC2D و خروجی آماری هریک از مشخصه‌های هندسی ساخت مدل را ارایه دهد.

## ۲. پیشنهاد مطالعات

مدل‌های تصادفی شبکه درزه، طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از ارایه شبکه درزه به صورت عناصری گسسته در فضا با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به طور تصادفی تعریف شده‌اند نمایش می‌دهد (Pine et al., 2006). مطالعات هادسون و لاپونته در سال ۱۹۸۰ و رایبسون در سال ۱۹۸۳ در زمینه تراوایی و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد مدل‌های تصادفی دانست (Hudson and La Pointe, 1980, Robinson, 1983). دراشویتز و انیشتین در سال ۱۹۸۸ یک مدل تصادفی ارایه نمودند که با در نظر گرفتن تغییرات در جهت، فاصله‌داری و پایایی ناپیوستگی، شبکه درزه واقعی‌تری را ایجاد می‌کرد (Dershowitz and Einstein, 1988). پریست و سامانیگو در سال ۱۹۸۸ اقدام به توسعه این

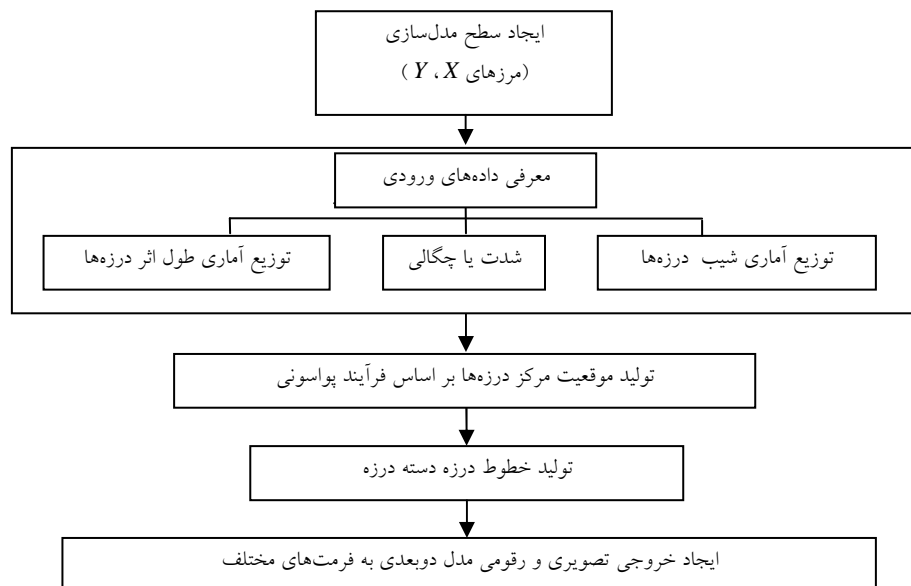
توده سنگ را به شیوه‌ی آماری ایجاد نماید. این کار بوسیله‌ی ساخت سری ناپیوستگی‌های مجزا بر مبنای مشاهده‌ها و برداشت‌های خواص هندسی ناپیوستگی‌های موجود در یک منطقه انجام می‌گیرد. این خواص شامل اندازه، امتداد و شدت درزه‌داری است.

روش مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی گسسته دارای مزایای اصلی نسبت به دیگر روش‌های معمول مدل‌سازی است. این روش برای مسایلی با مقیاس محلی مناسب‌تر است زیرا توانایی آن برای توصیف خواص هندسی ناپیوستگی‌های مجزا و درزه‌ها بسیار دقیق‌تر از شیوه‌های پیوسته بزرگ مقیاس است. همچنین این روش ناهمگنی سیستم درزه‌ها را به صورت واضح و مشخصی ارائه می‌کند، این عمل با توصیف خواص کلیدی سیستم ناپیوستگی امکان‌پذیر است. مهم‌ترین ویژگی این روش این است که مسیر آشکار و تجدیدپذیری را برای مدل‌سازی داده‌های برداشت شده از منطقه فراهم می‌کند زیرا خواص هندسی واقعی درزه‌ها در هنگام مدل‌سازی دست‌نخورده باقی خواهند ماند (Rogers et al., 2014).

در محیط نرم‌افزاری متمتیکا در برنامه‌ای با عنوان 3DGM توسعه دادند. در این برنامه نیز قابلیت اخذ خروجی مورد نیاز نرم‌افزارهای UDEC، 3DEC و DDA وجود دارد (امینی و یاراحمدی، ۱۳۸۶، امینی و یاراحمدی ۱۳۸۸، گودرزی و یاراحمدی، ۱۳۹۲، گودرزی و یاراحمدی، ۱۳۹۳) جدیدترین کارهای انجام شده در مورد استفاده از مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های گسسته و شدت درزه‌داری حجمی برای شناخت بیشتر توده‌سنگ در روش تخریب بلوکی مربوط به راجرز و همکاران در سال ۲۰۱۴ است (Rogers et al., 2014).

### ۳. تهیه نرم‌افزار تولید شبکه ناپیوستگی گسسته

در مدل‌سازی‌های تصادفی، شیوه کلی شامل بررسی و استخراج موقعیت، پایایی (اندازه)، جهت‌داری و دیگر ویژگی‌های هندسی درزه‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع‌های آماری است که مبنای تصادفی بودن مدل‌سازی‌ها خواهد بود. از جمله این روش‌های تصادفی شبکه ناپیوستگی گسسته است، این روش مدل‌سازی سعی دارد سیستم ناپیوستگی‌های



شکل ۱. روند نمای مدل‌سازی برای یک دسته درزه

- برای ساخت مدل شبکه ناپیوستگی گسسته از هر دسته درزه به چهار مولفه‌ی زیر نیاز است:
- الف - تابع چگالی احتمال جهت‌داری درزه‌ها
- ب - چگالی یا شدت درزه‌داری
- پ - تابع چگالی احتمال تغییرات اندازه (پایایی) درزه‌ها
- ت - موقعیت مراکز درزه‌ها
- روند نمای مدل‌سازی برای یک دسته درزه در شکل ۱ نشان داده شده است.
- یک دسته درزه در فضای دوبعدی با کاربرد متوالی سه فرآیند تصادفی تولید می‌شود.
- فرآیند اول: شبکه پواسونی همگن برای تولید مرکز درزه براساس چگالی درزه‌داری
- فرآیند دوم: انتخاب تصادفی مقدار شیب درزه از تابع چگالی احتمال شیب
- فرآیند سوم: انتخاب تصادفی مقدار طول اثر درزه از تابع چگالی احتمال آن
- در برنامه تهیه شده با عنوان  $DFN^{2D}$ ، که در محیط نرم‌افزاری Mathematica نوشته شده است، بنا به استفاده مورد نظر قابلیت‌هایی تعبیه شده که برخی از آن‌ها منحصر به فرد است، در ذیل به بخشی از مهمترین آنها اشاره شده است:
- امکان نمونه‌گیری تصادفی از درزه‌های تولید شده به تفکیک هر دسته درزه و یا بصورت کلی، به عنوان نمونه ۶۰٪ از درزه‌های ساخته شده بصورت تصادفی انتخاب شوند.
- امکان ایجاد مدل‌های سلسله مراتبی با در نظر گرفتن ژنز هر دسته درزه به تعداد دلخواه براساس تعداد دسته درزه‌ها.
- دارا بودن ابزارهای نمونه‌برداری برای تعیین میزان چگالی خطی در راستاهای مختلف در مدل ساخته شده، به دلخواه کاربر به تفکیک هر دسته درزه و یا بصورت کلی به منظور اعتبارسنجی مدل.
- امکان ایجاد خروجی رقومی و گرافیکی به تفکیک هر دسته درزه و بصورت کلی.
- دارا بودن ابزار نمونه‌گیری از درزه‌ها براساس مولفه‌های ورودی از جمله شیب و طول اثر، به عنوان نمونه تفکیک جامعه آماری درزه‌های با طول اثر (پایایی) بین ۰/۱ تا ۰/۸ متر.
- امکان تشکیل بلوک‌های کامل از تقاطع درزه‌ها و محاسبه‌ی مساحت آنها به همراه ترسیم توابع توزیع آماری مساحت بلوک‌ها.
- امکان خروجی تمامی مولفه‌های ایجاد شده در مرحله مدل‌سازی، توابع توزیع و آماره‌های آن‌ها به عنوان نمونه شیب، طول اثر، مساحت بلوک‌های تشکیل شده.
- امکان گرفتن خروجی از مدل ساخته شده به فرمت ورودی نرم‌افزارهای عددی UDEC و PFC2D با تفکیک نوع درزه‌ها براساس دسته درزه، طول اثر و ...
- امکان تکرار مدل‌سازی تصادفی به مقدار دلخواه، مقایسه‌ی مولفه‌های چگالی و شدت درزه‌داری خطی و سطحی مدل‌ها با یکدیگر و ترسیم توابع توزیع آماری هریک از این مولفه‌ها.

#### ۴. درزه‌نگاری منطقه

درزه‌نگاری یکی از بخش‌های مهم در مطالعات خصوصیات مهندسی توده‌سنگ است و از مهمترین مراحل تهیه داده‌ها برای مدل‌سازی هندسی محسوب می‌شود. این عملیات را می‌توان به سه زیربخش تفکیک کرد:

- برداشت
- ترسیم و تفکیک دسته درزه‌ها
- تحلیل آماری

##### ۴-۱. برداشت درزه‌ها

اندازه‌گیری از روی رخنمون‌های سنگی از این مزیت که از منطقه وسیع‌تری برای برداشت استفاده می‌شود، برخوردار است. ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مانند شیب و جهت شیب، اندازه و دیگر خصوصیات بزرگ مقیاس آن‌ها می‌تواند برداشت شود. ارتباط زمین‌شناسی بین گروه ناپیوستگی‌ها نیز

وجود نداشته است. داده‌های مورد نیاز از ترانشه‌ها در ترازهای ارتفاعی مختلف برداشت گردید و پارامترهای هندسی درزه‌ها شامل جهت شیب، شیب، فاصله‌داری، بازشدگی، پرشدگی و گسترش با استفاده از کمپاس و متر اندازه‌گیری شد. برای دست‌یابی به دیدی درست از درزه‌های برداشت شده لازم است درزه‌ها به سه گروه تقسیم شوند. تعداد درزه‌هایی که هر دو انتهای آن‌ها دیده می‌شود ( $n$ ) تعداد درزه‌هایی که فقط یک انتهای آن‌ها دیده می‌شود ( $m$ ) و تعداد درزه‌هایی که هیچ یک از دو انتهای آن دیده نمی‌شود ( $p$ ) موارد مربوط به این مولفه در ستون مربوط به Termination در فرم‌های مخصوص برداشت ناپیوستگی ثبت شد. ضرایب  $R_0$ ،  $R_1$  و  $R_2$  به منظور نشان دادن شرایط پایایی درزه‌ها مطابق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شوند (Kulatilake et al., 1996):

(۱)

$$R_0 = p/(p + m + n)$$

$$R_1 = m/(p + m + n)$$

$$R_2 = n/(p + m + n)$$

در مجموع تعداد سه ترانشه برای پیاده‌سازی خط برداشت مناسب‌تر تشخیص داده شد. در شکل ۲ نمایی از یک ترانشه به همراه خط برداشت ارایه شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از وضعیت پایان‌یابی درزه‌های برداشت شده ارایه شده است.

در رخنمون‌های سنگی قابل مشاهده است. بزرگ‌ترین نقص این روش در دسترس نبودن رخنمون‌ها، تحت تاثیر قرار گرفتن آن‌ها از انفجار و هوازدگی و پنهان ماندن در زیر پوشش گیاهی است. اطلاعات جمع‌آوری شده در این مقاله در مورد کلیه‌ی ناپیوستگی‌های با مقیاس درزه با استفاده از دو روش خط برداشت و پنجره برداشت به دست آمده است. نکته قابل توجه در روش خط برداشت این است که استاندارد قابل قبول جهانی برای این روش وجود ندارد و در واقع باید جزئیات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم برای هدف مورد نظر را جمع‌آوری نمود و با شرایط محلی توده‌سنگ تطابق داد.

در روش خط برداشت سطوح مسطح تمیز سنگی به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نسبت به اندازه و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بزرگ باشند. در این روش باید رخنمون شامل ۱۵۰ تا ۳۰۰ ناپیوستگی بوده و حداقل یک انتها از ۵۰ درصد آن‌ها قابل مشاهده باشد (Priest, 1993).

عملیات برداشت درزه‌ها در محدوده معدن با استفاده از خط برداشت‌هایی به موازات ترانشه‌های آماده‌سازی سکوه‌های حفاری انجام شد. در این روش تمامی درزه‌هایی که خط برداشت را قطع می‌کنند اندازه‌گیری شدند. در تعداد زیادی از ترانشه‌های موجود در منطقه به دلیل خردشدگی و شکستگی بالای توده‌سنگ و یا وجود روباره خاکی، امکان برداشت



شکل ۲. یکی از ترانشه‌های مورد مطالعه و خط برداشت

جدول ۱. خلاصه‌ای از وضعیت پایان‌یابی درزه‌های برداشت شده

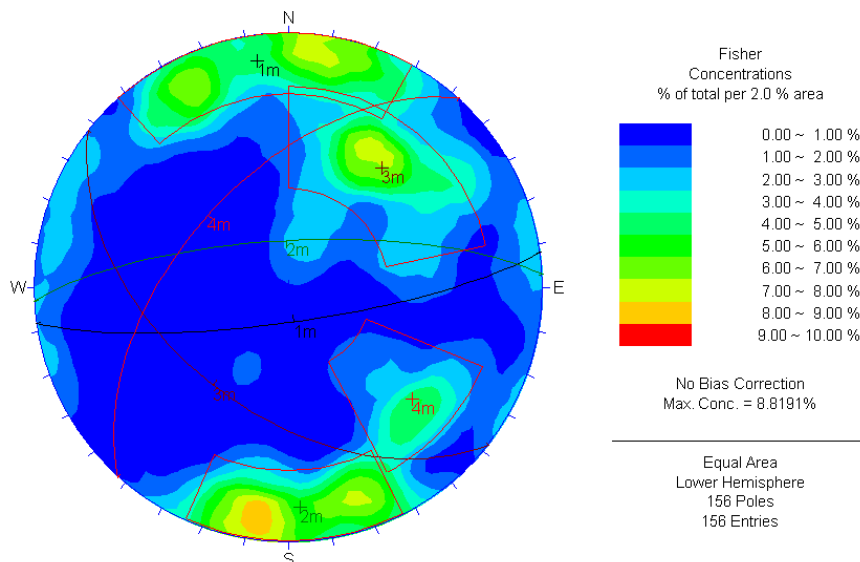
نوع پایان‌یابی درزه‌ها (%)			تعداد درزه‌ها
R <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>0</sub>	
۶۰	۳۵	۵	۳۰۰

## ۴-۲. ترسیم و تفکیک دسته‌درزه‌ها

با توجه به دسته‌درزه‌های قابل تفکیک در هر یک از سه ایستگاه برداشت، بر مبنای مولفه‌های شیب و جهت شیب، مشخص شد که تقریباً تمامی دسته‌درزه‌ها در ایستگاه‌های مختلف وجود دارد، که میزان فراوانی آن‌ها نیز تقریباً یکسان است. لذا برای تشخیص و تفکیک بهتر کلیه دسته‌درزه‌ها، تمامی درزه‌های موجود بصورت یکجا تحلیل شده است. با توجه به اینکه امکان برداشت بیشتر درزه در منطقه‌ی مورد مطالعه وجود داشت لذا به همین تعداد بسنده شد.

از طرفی با توجه به مرحله بعدی که استفاده از داده‌های برداشت شده برای ساخت مدل شبکه ناپیوستگی‌های گسسته به منظور برآورد خردشوندگی برجا و تخریب‌پذیری توده سنگ منطقه است، لذا میزان فراوانی هرچند اندک یک دسته درزه نیز، با توجه به مقادیر شیب، جهت شیب و طول آن می‌تواند بسیار تاثیرگذار باشد. براساس تحلیل‌های انجام شده در نرم‌افزار Dips تعداد ۴ تمرکز درزه قابل تشخیص است (شکل ۳).

عدم توانایی ثبت درزه‌هایی که طول آن‌ها از حد اندازه‌گیری کوچک‌تر است به عنوان خطای فرااندازه truncation bias خوانده می‌شود. همچنین درزه‌هایی که طول آن‌ها به دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی‌شود، به عنوان خطای فرااندازه censoring bias شناخته شده است (Priest and Hudson, 1976, Hudson and Priest, 1983). تاثیر اندازه خطای فرااندازه 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 بزرگی در برابر اندازه درزه‌های موجود هستند. بنابراین خطای فرااندازه قابل توجه نیست. همچنین از آنجا که درصد درزه‌هایی که هر دو انتهای آن قابل مشاهده است، پایان‌یابی R<sub>2</sub>، بسیار بیشتر است که می‌توان از خطای فرااندازه نیز چشم‌پوشی کرد.



شکل ۳. کنتور تمرکز درزه‌ها و تفکیک آنها در منطقه برداشت

## ۳-۴. تحلیل‌های آماری ویژگی‌های هندسی شبکه درزه‌ها

بررسی خصوصیات پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها، اساس مدل‌سازی‌های هندسی تصادفی و آماری است. پردازش داده‌ها شامل تعیین پارامترهای هر درزه بر مبنای تابع توزیع آن پارامتر در آن دسته درزه است. از نظر تئوری تفاوت موجود در توابع توزیع درزه ناشی از تفاوت در فرآیندهای مکانیکی مختلفی است که درزه را ایجاد می‌کند. برای مثال توزیع یکنواخت تنش باعث ایجاد توزیع‌های نمایی و فرآیندهای پیچیده باعث ایجاد توزیع‌های لاگ نرمال در مولفه‌ی طول اثر درزه خواهد شد (Dershowitz and Einstein, 1988).

با تفکیک هر دسته درزه و جداسازی ویژگی‌های درزه‌های مربوط به آن از جمله شیب، جهت شیب، چگالی و طول اثر، اطلاعات لازم برای مطالعات آماری و مدل‌سازی تصادفی فراهم می‌گردد. با استفاده از نرم‌افزار آماری Easyfit، تابع چگالی احتمال مولفه‌های هندسی برداشت شده برآورد شد. برای آزمودن این فرضیه که توزیع داده‌های برداشت شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال Probability Density Function پیروی می‌کند یا خیر، از آزمون‌های بهترین برازش Goodness of Fit استفاده شد. این آزمون‌ها بهترین توزیعی که بر داده‌های اندازه‌گیری شده برازش می‌شود را نشان می‌دهند. در این تحقیق از آزمون‌های بهترین برازش کولموگروف - اسمینوروف، آندرسون - دارلینگ و چي - اسکویر برای ارزیابی تابع چگالی احتمال شیب، جهت شیب و طول اثر درزه‌ها استفاده شده است.

آزمون کولموگروف - اسمینوروف: برای تشخیص فرضیه توزیع پیوسته بکار برده می‌شود. این آزمون بر اساس تابع توزیع تجمعی تجربی Empirical Cumulative Distribution Function (ECDF) بنا نهاده شده است. نمونه‌های تصادفی  $x_1, x_2, \dots, x_n$  را توزیعی با تابع توزیع تجمعی  $F(x)$  در نظر بگیرد. تابع توزیع تجمعی تجربی با استفاده از رابطه زیر نشان داده شده است

$$F_n(x) = \frac{1}{n} [\text{Number of observation} \leq x] \quad (02)$$

آماره کولموگروف - اسمینوروف (D) بر اساس بزرگترین اختلاف بین تابع توزیع تجمعی تئوری و تجربی بدست می‌آید.

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left( F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (03)$$

آزمون آندرسون - دارلینگ برازش تابع توزیع تجمعی مشاهده شده را با تابع توزیع تجمعی مورد نظر مقایسه می‌کند. این آزمون نسبت به آزمون کولموگروف - اسمینوروف به داده‌های حاشیه وزن بیشتری می‌دهد. آماره آندرسون-دارلینگ ( $A^2$ ) مانند زیر تعریف شده است

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (04)$$

آزمون چي - اسکویر برای آزمودن جامعه که از کدام توزیع پیروی می‌کند مورد استفاده قرار گرفته است. این آزمون بر روی داده‌های دسته‌بندی شده binned data اعمال می‌شود، پس مقدار آماره آزمون به چگونگی دسته‌بندی بستگی دارد. آماره چي - اسکویر The Chi-Squared statistic ( $\chi^2$ ) مطابق زیر تعریف شده است

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (05)$$

که در آن  $O_i$  فراوانی مشاهده شده دسته  $d_i$  و  $E_i$  فراوانی مورد انتظار بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E_i = F(x_2) - F(x_1) \quad (06)$$

که در آن  $F(x)$  تابع توزیع تجمعی احتمال تحت آزمون،  $x_1$  و  $x_2$  کران‌های دسته می‌باشند.

در سطح اعتماد مشخص ( $\alpha$ ) اگر مقدار آماره آزمون‌های کولموگروف - اسمینوروف (D)، آندرسون - دارلینگ ( $A^2$ ) و چي - اسکویر ( $\chi^2$ ) از مقدار بحرانی آن‌ها بیشتر باشد، فرضیه شکل توزیع رد خواهد شد. در جایی که فرضیه چند توزیع مختلف برای یک متغیر وجود داشته باشد هرچه آماره آزمون انجام شده در هر یک از توزیع‌های پیشنهادی کمتر باشد، آن توزیع به عنوان بهترین توزیع شناخته خواهد شد. از مقادیر  $\alpha$  برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۵، معمولاً برای ارزیابی فرض تهی (H0) null hypothesis در سطح اعتمادهای مختلف استفاده می‌شود. در اغلب موارد مقدار  $\alpha$  برابر ۰/۰۵ استفاده



می‌شود در این مقاله نیز از همین مقدار استفاده شده است. جدول ۲ آرایه شده است. خلاصه‌ای از تحلیل آماری دسته درزه‌های برداشت شده در

جدول ۲. خلاصه تحلیل آماری پارامترهای هندسی دسته‌درزه‌های برداشت شده

دسته درزه	جهت‌داری		چگالی ویژه ( $P_{20}$ )	طول اثر (متر)		
	شیب (درجه)	جهت شیب (درجه)		تایع	پارامتر	میانگین انحراف
۱	۶۹/۳	۶/۹۱	۵/۱	۰/۷۷	۰/۷۲	۰/۵۷
۲	۷۵/۵	۵/۶۶	۴/۴۴	۰/۸۳	۰/۵۴	۰/۶۳
۳	۵۰/۸	۸/۳۷	۴/۲	۰/۹۶	۰/۶۷	۰/۷۸
۴	۵۵/۳	۱۱/۶	۲/۶	۰/۶۸	۰/۴۹	۰/۳۷

#### الف- توزیع جهت‌داری

جهت یافتگی درزه‌ها شامل دو مولفه زاویه شیب و جهت شیب است. این دو مولفه در حالت مدل‌سازی سه بعدی به صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود تولید می‌شوند و در صورت وجود همبستگی بین آنها از توابع توزیع چند متغیره فیشر و بینگهام استفاده می‌گردد. در حالت دوبعدی شیب ظاهری درزه در صفحه مورد نظر پیاده خواهد شد. از این رو تنها تغییرات شیب ظاهری برای مدل‌سازی مدنظر است. در تحقیق انجام شده دو دسته درزه شماره ۱ و ۲ دسته درزه‌های اصلی منطقه هستند. این دو دسته درزه دارای بیشترین فراوانی، امتدادی تقریباً یکسان و جهت شیبی با اختلاف ۱۸۰ درجه‌ای هستند از اینرو صفحه مورد نظر برای ساخت مدل هندسی دو بعدی، صفحه‌ای با امتداد یکسان با این دو دسته درزه در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ مقادیر شیب و جهت شیب به همراه توابع توزیع آنها آرایه شده است. به منظور تعیین توزیع جهت یافتگی از آزمون برازش اندرسون - دارلینگ (A-D) استفاده شده است.

#### ب- توزیع طول اثر (پایایی)

طول اثر درزه، ناشی از برخورد درزه با سطح رخنمون است. این طول بیانگر گسترش صفحه درزه و اندازه‌ی بلوک‌های سنگی است (Sari, 2009). دانستن طول اثر ناپیوستگی‌ها از

جهت تاثیر آن بر اندازه بلوک‌هایی که ممکن است تشکیل شوند، برای پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ و میزان خردشوندگی برجای آن مهم است. متوسط، واریانس و توزیع طول اثر ناپیوستگی، اطلاعات مهمی برای هر دسته درزه محسوب می‌شوند که برای تهیه مدل هندسی تصادفی توده‌سنگ‌های درزه‌دار مورد نیاز هستند.

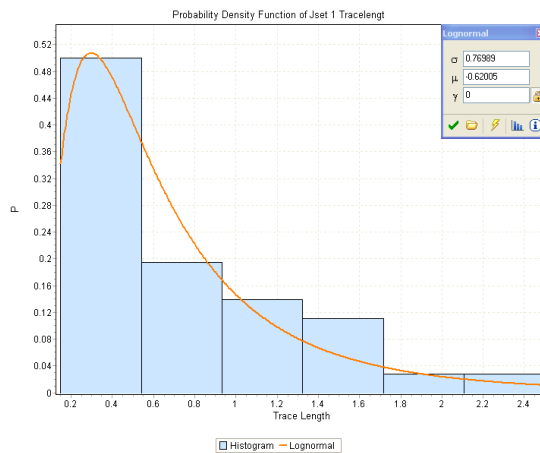
بدلیل اینکه برداشت مستقیم درزه‌ها در داخل توده‌سنگ در عمل غیرممکن است بنابراین فرض می‌شود که اندازه‌های سه‌بعدی درزه‌ها دارای ویژگی‌های آماری مشابه با نتایج بدست آمده از پیمایش‌های دوبعدی هستند (Xu and Dowd, 2010). تاکنون بهترین برازش‌های پیشنهاد شده برای توزیع طول اثر درزه‌های حاصل از برداشت دوبعدی، توابع نمایی منفی (Kulatilake et al., 2003, Baecher, 1983, Zadhesh et al., 2013)، لاگ نرمال (Priest, 1993, Zhang and Priest, 2002, Wu and Wang, 2002, Einstein, 2000) و گاما (Priest, 1993, Zhang and Einstein, 2000) بوده است.

نتایج مقایسه‌ی آزمون‌های بهترین برازش شامل آزمون کولموگروف-اسمینوروف (K-S)، اندرسون - دارلینگ (A-D) و آزمون چي-اسکویر (Ch-S) برای طول درزه‌های برداشت شده در رخنمون‌های مورد مطالعه در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج، سازگاری بیشتر تابع توزیع لاگ‌نرمال را برای

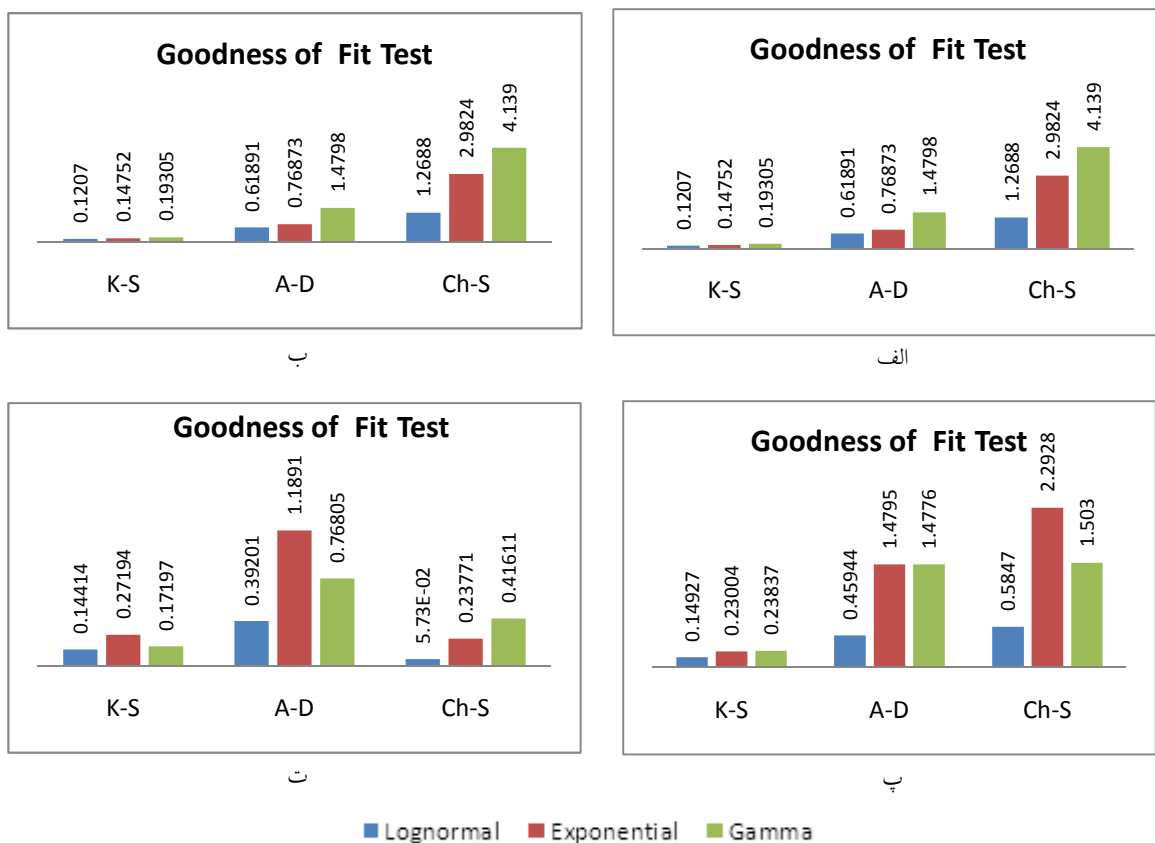
به عنوان نمونه تابع توزیع برازش شده بر طول دسته درزه ۱ در شکل ۴ نشان داده شده است، مشخصات توابع توزیع هر دسته درزه در جدول ۲ ارایه شده است.

توزیع طول درزه تایید می‌کند، که شکل کلی این تابع به صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (7)$$



شکل ۴. تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر طول اثر دسته درزه ۱ به همراه آماره‌های آن



شکل ۵. نتایج مقایسه‌ی آزمون بهترین برازش بر طول اثر الف) دسته درزه ۱ (ب) دسته درزه ۲ (پ) دسته درزه ۳ (ت) دسته درزه ۴

### ج- چگالی درزه‌داری

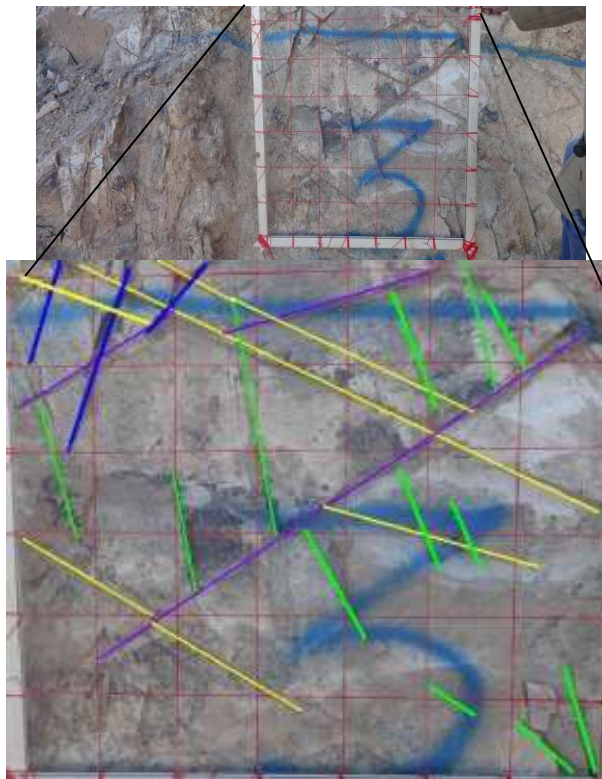
چگالی ناپیوستگی‌های سنگ در اصل تعداد ناپیوستگی‌ها بر واحد توده‌سنگ است که آن واحد، می‌تواند حجم، مساحت و یا طول باشد.

عدم دسترسی سه بعدی به یک توده سنگ باعث خواهد شد اندازه‌گیری حجمی چگالی یا شدت درزه‌داری بصورت مستقیم، مشکل و غیرممکن باشد. این در حالی است که اندازه‌گیری میدانی (مستقیم) این پارامترها بصورت یک بعدی (در طول خط برداشت و یا گمانه) و دو بعدی (در سطح دیواره‌ها، تونل‌ها و غیره) به سادگی قابل انجام است.

چگالی درزه‌داری دوبعدی ( $P_{20}$ )، به صورت تعداد کل درزه‌ها بر مساحت داده شده تعریف می‌شود. شدت درزه در دو بعد،

$P_{21}$ ، به عنوان طول کلی درزه در داخل مساحت داده شده تعریف می‌شود که مستقل از مقیاس است.  $P_{21}$ ، تعداد دسته درزه‌ها، پایایی درزه و تعداد درزه‌های موجود را در نظر می‌گیرد.

در این مقاله با استفاده از روش برداشت پنجره مربعی درزه‌های قابل دیدن با استفاده از یک چارچوب یک متر مربعی دارای شبکه مش‌بندی ۱۰ سانتی‌متر مربعی برداشت شدند (شکل ۶). درزه‌های متقاطع با هر خط مش اندازه‌گیری و تعداد کلی درزه‌های شمارش شده در چارچوب یک متر مربعی به عنوان چگالی سطحی درزه تعریف شدند. مقادیر  $P_{20}$  برای هر دسته درزه بصورت جداگانه محاسبه شده است (جدول ۲).



شکل ۶. اندازه‌گیری چگالی درزه ( $P_{20}$ )

### ۵. تحلیل خردشوندگی برجا

به‌طورکلی سه سطح خردشوندگی در روش‌های تخریبی تعریف شده است که عبارتند از: خردشوندگی برجا،

خردشوندگی اولیه و خردشوندگی ثانویه (Brown, 2003, Laubscher, 2003).

نماینده پایه (Representative Elementary Volume (REV) در مورد ابعاد انتخاب شده صدق کند. همچنین مدل ساخته شده باید در مقایسه با واقعیت موجود و برداشت شده اعتبار کافی را داشته باشد. به این منظور با توجه به طول درزه‌های برداشت شده مدل‌هایی با ابعاد  $10 \times 10$ ،  $15 \times 15$  و  $20 \times 20$  هر کدام ۶۰ مرتبه ساخته شد، یک نمونه از مدل ساخته شده به ابعاد  $20 \times 20$  در شکل‌های ۷ و ۸ به تفکیک دسته درزه‌ها و به صورت کلی نشان داده شده است.

در مرحله‌ی بعد با تعریف خطوط برداشت (نمونه‌گیری) افقی و قائم به فواصل یک متری داخل مدل‌ها، مقادیر چگالی درزه‌داری خطی ( $P_{10}$ ) برای هر خط برداشت تعیین شد، سپس مقادیر میانگین آن در هر یک از این دو راستا برای هر مدل محاسبه گردید. و در نهایت مقادیر تابع توزیع به همراه آماره‌های مرتبه اول و دوم آن (میانگین و انحراف استاندارد) برای هر یک از ابعاد محاسبه شد. شکل ۹ نمونه‌ای از خطوط برداشت افقی تعریف شده برای یک مدل را نشان می‌دهد.

در مورد چگالی درزه‌داری سطحی ( $P_{20}$ ) نیز این فرآیند برای کل دسته‌دازه‌های هر مدل و به تفکیک هر دسته درزه تکرار شد تا آماره‌های مورد نیاز جهت مقایسه‌ی مدل‌ها با ابعاد متفاوت به دست آید. یکی دیگر از مولفه‌های بررسی شده مقدار شدت درزه‌داری سطحی ( $P_{21}$ ) است. این مولفه نیز برای هر مدل در هر یک از ابعاد ذکر شده تعیین شد. سپس مقادیر میانگین و انحراف استاندارد آن برای هر یک از ابعاد محاسبه شد. همزمان با انجام فرآیند تعیین حجم نماینده، مقادیر شیب و طول برای هر دسته درزه برای هر یک از ابعاد در مدل‌های معرف هر بعد (با مولفه‌های آماری نزدیک به میانگین آن بعد)، تعیین و توابع چگالی احتمال به همراه آماره‌های آن‌ها با توابع چگالی احتمال و آماره‌های مقادیر برداشت شده که به عنوان ورودی مدل استفاده شده است، مقایسه شد تا مدل نهایی از برازش خوب و قابل قبولی با شرایط واقعی برخوردار باشد. پس از انجام تمامی فرآیندهای ذکر شده و مقایسه‌ی نتایج آماری به دست آمده، در نهایت مدل  $10 \times 10$  مناسب تشخیص داده شد.

الف) خردشدگی برجا In-situ Fragmentation شامل بلوک‌هایی که به‌طور طبیعی قبل از شروع عملیات معدنکاری در توده‌سنگ وجود دارند. این خردشدگی بوسیله درزه‌هایی شکل می‌گیرد که از قبل در توده وجود دارند.

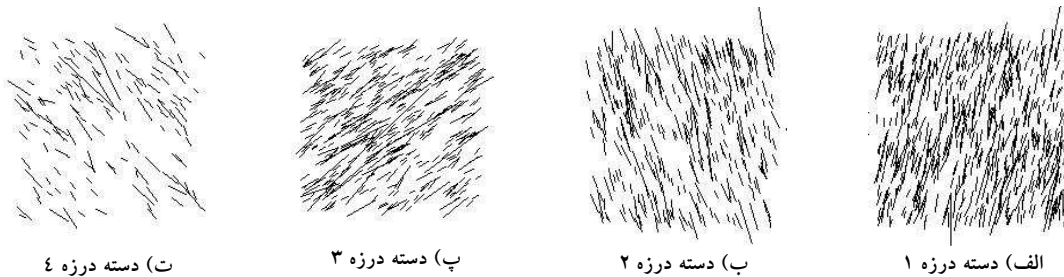
ب) خردشدگی اولیه Primary Fragmentation: به محض ایجاد زیربرش و شروع عملیات تخریب، بلوک‌های همسایه فضای تخریب جدا شده و خردایش اولیه شکل می‌گیرد.

ج) خردشدگی ثانویه Secondary Fragmentation: این خردایش در طول مسیر از زمان جداشدن سنگ از سطح تخریب و عبور از ستون تخلیه تا خروج از دهانه تخلیه رخ می‌دهد.

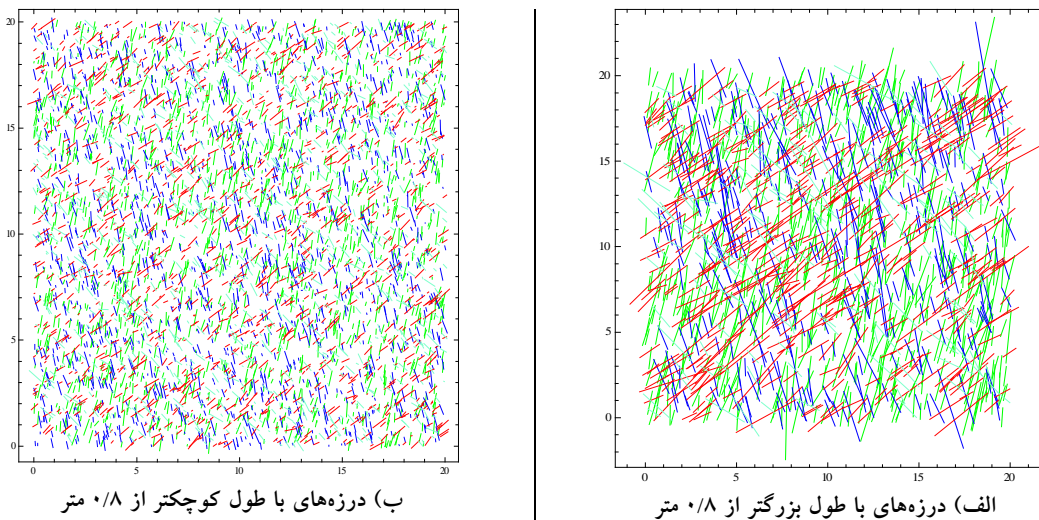
آنچه در این مقاله مورد نظر است، تعیین میزان خردشدگی و ابعاد بلوک‌های برجای تشکیل شده از شبکه درزه‌های موجود است. همانگونه که اشاره شد این بخش می‌تواند به عنوان یکی از مولفه‌های اولیه و اصلی امکان‌سنجی تخریب‌پذیری توده‌سنگ یا کانسار باشد. برای این منظور نرم‌افزار تهیه شده برای مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی گسسته باید دارای قابلیت ساخت انواع مدل‌های درزه‌داری (سلسله مراتبی، پایا و ناپایا) با انواع توزیع‌های آماری مختلف به همراه امکانات اعتبارسنجی لازم برای مدل‌های ساخته شده باشد و قابلیت تشکیل بلوک‌های کامل حاصل از برخورد درزه‌ها و تعیین ابعاد آن‌ها با امکان رسم توابع توزیع آماری را داشته باشد. همچنین امکان گرفتن خروجی به فرمت نرم‌افزارهای عددی برای تحلیل خردشدگی‌های اولیه و ثانویه، که در آن تغییرات تنش، تنش‌های القایی و جابجایی‌ها نقش دارد، وجود داشته باشد.

#### ۱-۵. ساخت مدل شبکه ناپیوستگی گسسته

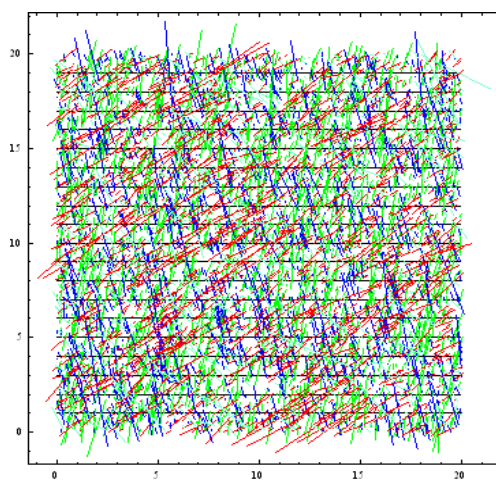
برای ساخت مدل شبکه‌دازه‌ها به‌منظور تخمین خردشدگی، اولین مرحله تعیین ابعاد مناسب مدل است. حد بیشینه ابعاد مدل بصورت تئوری ابعاد کل منطقه‌ای است که دارای شرایط درزه‌داری کاملاً مشابه با آنچه که برداشت شده است، باشد و کمینه این ابعاد باید به گونه‌ای تعریف شود که نماینده توده‌سنگ مورد مطالعه باشد. در واقع باید مفهوم حجم



شکل ۷. خروجی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها به تفکیک هر دسته درزه



شکل ۸. خروجی کلی یکی از مدل‌های ساخت شبکه درزه‌ها



شکل ۹. نمایی از یک مدل به همراه خطوط برداشت افقی در ترازهای یک متری

برداشت شده، در جدول‌های ۳ تا ۵ ارایه شده است. در جدول ۳ مقادیر چگالی درزه‌داری سطحی و چگالی

برخی از مولفه‌های هندسی مدل ۱۰×۱۰ انتخاب شده برای تحلیل خردشوندگی، به صورت مقایسه‌ای با مقادیر متناظر

داده‌های متناظر برداشت شده نشان می‌دهد. به عنوان نمونه توابع توزیع و آماره‌های مربوط به دسته درزه‌ی شماره ۳ در شکل ۱۰ و جدول ۵ برای مقایسه‌ی بهتر نشان داده شده است. پس از تعیین ابعاد بهینه مدل و اعتبارسنجی آن، بخشی از هر درزه که در ایجاد بلوک نقشی ندارد حذف شده و به اصطلاح مدل منظم‌سازی می‌شود.

### ۵-۲. محاسبه‌ی خردشوندگی برجا

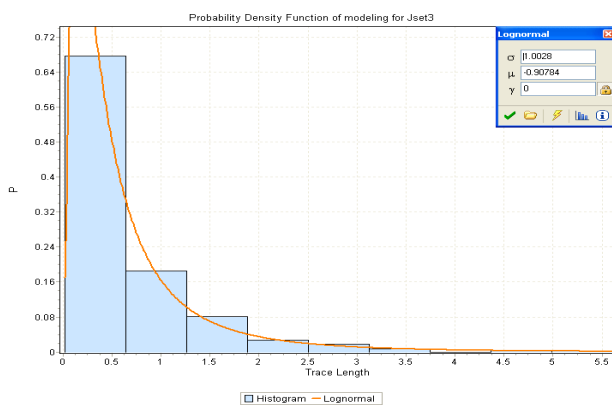
پس از آن بلوک‌های کامل حاصل از تقاطع درزه‌ها مشخص می‌شود و مساحت آن‌ها محاسبه می‌گردد، این فرآیند بصورت تصویری در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

درزه‌داری خطی برداشت شده در راستای افق و حاصل از مدل‌سازی، مقایسه شده و میزان انطباق به تفکیک هر دسته درزه و بصورت کلی برآورد شده است.

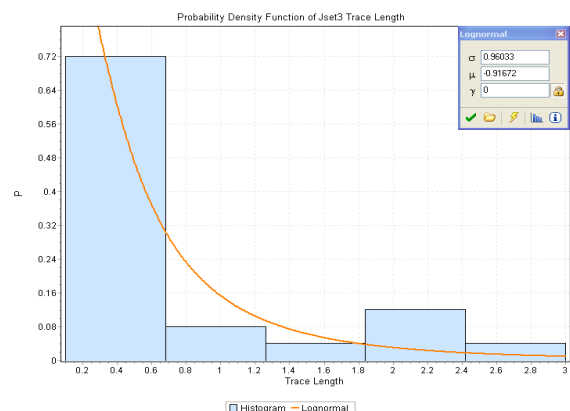
توابع چگالی احتمال شیب و طول درزه‌ها پس از ساخت مدل بوسیله‌ی  $DFN^{2D}$  با داده‌های برداشت شده مقایسه شده که هم‌خوانی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. در مورد مولفه‌ی شیب بدلیل اینکه روی صفحه‌ای که مقطع مدل‌سازی ایجاد شده دسته درزه‌های ۱ و ۲ با شیب واقعی مدل می‌شوند برای مقایسه از این دو دسته درزه استفاده شده است. نتایج در جدول شماره ۴ ارایه شده است. مقادیر توابع چگالی احتمال طول دسته درزه‌های مدل شده نیز تطابق بسیار خوبی را با

**جدول ۳. تعیین میزان انطباق چگالی درزه‌داری سطحی برداشت شده و مدل‌سازی بوسیله‌ی  $DFN^{2D}$**

چگالی درزه‌داری خطی افقی ( $P_{10}$ )			چگالی درزه‌داری سطحی ( $P_{20}$ )		
درصد انطباق	مدل $DFN^{2D}$	برداشت شده	درصد انطباق	مدل $DFN^{2D}$	برداشت شده
			۹۹/۵	۵/۰۷	۵/۱
			۱۰۰	۴/۴۴	۴/۴۴
			۹۹/۷	۴/۱۹	۴/۲
			۹۹/۶	۲/۶۱	۲/۶
۹۹/۲	۸/۸۳	۸/۹	۹۹/۸	۱۶/۳۱	۱۶/۳۴
					کل



ب) داده‌های خروجی مدل  $DFN^{2D}$



الف) داده‌های برداشت شده

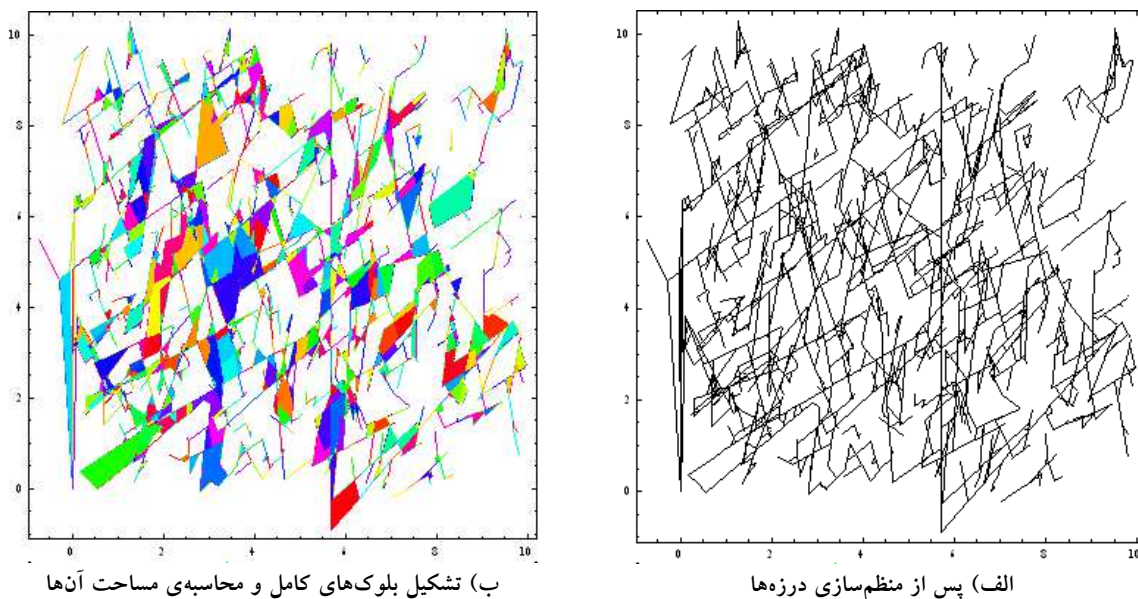
شکل ۱۰. تابع توزیع برازش شده بر طول دسته درزه ۳ به همراه آماره‌های آن

**جدول ۴. مولفه‌های آماری شیب دسته درزه‌های شماره ۱ و ۲، برداشت شده و پس از مدل‌سازی بوسیله‌ی  $DFN^{2D}$**

شیب (درجه)			
مدل $DFN^{2D}$		برداشت شده	
انحراف	میانگین	انحراف	میانگین
۶/۹۷	۷۹/۶۹	۶/۹۱	۷۹/۳
۵/۴۸	۷۵/۵۴	۵/۶۶	۷۵/۵
			دسته درزه
			۱
			۲

**جدول ۵.** مولفه‌های آماری طول دسته درزه‌ی شماره ۳، برداشت شده و پس از مدل‌سازی بوسیله‌ی  $DFN^{2D}$

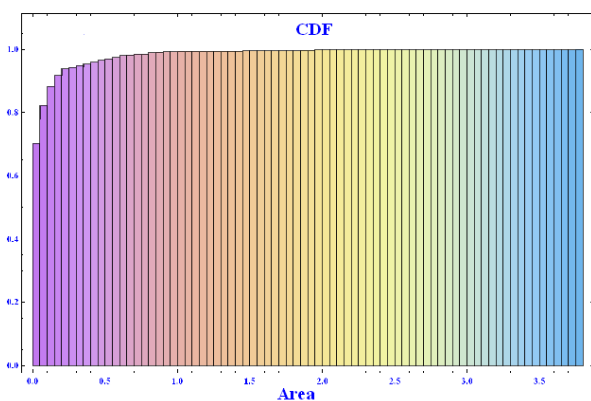
تابع توزیع	پارامتر موقعیت (m)	پارامتر مقیاس (s)	میانگین	انحراف استاندارد
برداشت	-۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۶۷	۰/۷۸
مدل $DFN^{2D}$	-۰/۹۰۸	۱/۰۰	۰/۶۵	۰/۷۲



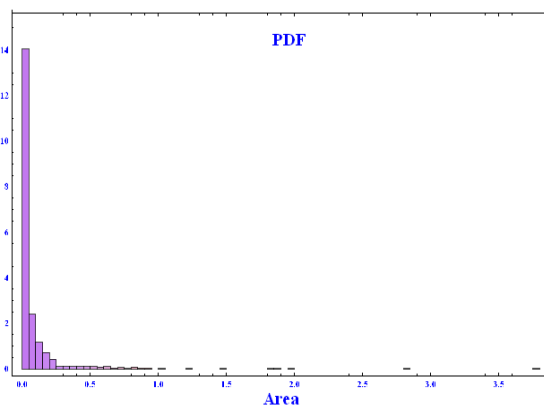
شکل ۱۱. خروجی مدل  $DFN^{2D}$

هستند. مساحت بزرگترین بلوک تشکیل شده  $۳/۶۸$  مترمربع و مساحت کوچکترین بلوک  $۰/۰۶۴$  مترمربع تعیین شد. مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌های برداشت شده از معدن میزان تشکیل بلوک‌های سنگی کامل را در وضعیتی خوب نشان می‌دهد ( $۶۷/۵$  درصد) این در حالی است که ابعاد بیشتر بلوک‌های تشکیل شده ( $۹۷$  درصد) کمتر یا مساوی  $۰/۵$  مترمربع محاسبه شده است. با فرض برقرار بودن شرایطی مشابه در عمق، می‌توان به این نتیجه رسید که ترکیبی از بلوک‌های سنگی درشت (حدود  $۳۰$  درصد) در زمینه‌ی بلوک‌های ریز قرار گرفته است که بسته به طراحی ابعاد زیربرش و پنل‌های استخراجی می‌تواند باعث بروز مشکلاتی در فرآیند خردشوندگی اولیه و ثانویه شود. نتیجه‌گیری درست و کامل راجع به موضوع مطرح شده، منوط به بررسی‌های زیرسطحی کامل، مدل‌سازی مکانیکی صحیح با در نظر گرفتن شرایطی تاحد امکان نزدیک به واقعیت و استنتاج و تحلیل کامل نتایج بدست آمده، است.

در شکل ۱۱ بلوک‌هایی که در داخل آن‌ها در اثر تقاطع درزه‌های کوچکتر بلوک‌های ریز تشکیل می‌شود نیز به رنگ زمینه (سفید) مشخص شده است. به منظور تشکیل نشدن بلوک‌های ریزتر همانگونه که اشاره شد می‌توان با استفاده از قابلیت تفکیک درزه‌ها براساس طول آن‌ها اقدام به حذف درزه‌های با طول کم نمود. در نهایت پس از تعیین مساحت بلوک‌ها تابع چگالی احتمال مساحت به همراه تابع چگالی تجمعی مساحت توسط نرم‌افزار محاسبه و در اختیار قرار خواهد گرفت (شکل ۱۲). همچنین نسبت مساحت کل بلوک‌ها به مساحت کل مدل نیز بصورت درصد ارایه می‌شود. این نسبت برای مدل ساخته شده  $۶۷/۵$  درصد محاسبه شده است. با بررسی منحنی‌های توابع چگالی احتمال و چگالی تجمعی مساحت بلوک‌ها مشخص می‌گردد که بیش از  $۹۷$  درصد از بلوک‌های کامل تشکیل شده دارای مساحتی کوچکتر یا مساوی  $۰/۵$  مترمربع



ب) تابع چگالی تجمعی مساحت بلوک‌ها



الف) تابع چگالی احتمال مساحت بلوک‌ها

شکل ۱۲. خروجی مدل  $DFN^{2D}$

## ۶. نتیجه گیری

در اکثر موارد به منظور محافظه کارانه عمل کردن در تحلیل‌های پایداری اعم از فضاهای زیرزمینی و روباز، گسترش ناپیوستگی‌ها بصورت نامحدود و پایا در نظر گرفته می‌شود، اما در واقع، گسترش درزه در مورد بیشتر ناپیوستگی‌ها و به ویژه درزه‌های موجود در توده سنگ، نامحدود نیست. این امر تاثیر زیادی بر میزان تخریب پذیری کانسار در روش‌های استخراج تخریبی، به ویژه روش تخریب توده‌ای دارد. در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی پارامترهای هندسی درزه و ارایه مدلی تا حد امکان واقعی از توده سنگ که از لحاظ آماری معتبر باشد و گویای ویژگی‌های هندسی توده سنگ برجا باشد، به منظور کاربرد در تحلیل‌های تخریب پذیری لازم است. در این مقاله با توجه به تاثیر شدید پایایی درزه بر

خردشوندگی برجای توده سنگ، مدل تصادفی شبکه درزه با در نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه طول درزه ساخته شده است. با توجه به این که در معدن مورد مطالعه دسترسی به عمق امکان پذیر نبوده است، از طرفی هدف اصلی، آزمایش کارایی نرم افزار تهیه شده با قابلیت‌های ذکر شده بوده است، لذا مدل هندسی براساس برداشت‌های سطحی انجام شده ساخته شده است. نتایج مدل سازی هندسی انجام شده توسط نرم افزار تهیه شده در مقایسه با واقعیت موجود بسیار رضایت بخش بوده است.

با توجه به قابلیت‌های طراحی شده در مدل سازی و ارایه‌ی خروجی‌های مناسب کدهای عددی در این نرم افزار، از آن می‌توان در مطالعات جریان سیال، تحلیل پایداری و تخریب پذیری در حالت دوبعدی بخوبی استفاده نمود.

## منابع

- امینی، ا. و یاراحمدی بافقی، ع.، ۱۳۸۶. مدل سازی سه بعدی هندسی، ژئوتکنیکی توده سنگ‌های درزه دار به روش آماری (مطالعه موردی: بلوک تکنونیک II معدن چغارت). مجموعه مقالات سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.
- امینی، ا. و یاراحمدی بافقی، ع.، ۱۳۸۸. شبیه سازی شبکه ناپیوستگی‌ها در مدل سازی ژئوتکنیکی فضاهای زیرزمینی توسط محیط نرم افزاری Mathematica، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل ایران، تهران.
- گودرزی، ه. و یاراحمدی بافقی، ع.، ۱۳۹۲. مدل سازی سه بعدی هندسی - ژئوتکنیکی توده سنگ‌های درزه دار به روش دیسک‌های تصادفی (ارائه برنامه RD3DGM)، مجموعه مقالات دهمین کنفرانس ملی تونل، تهران.
- گودرزی، ه. و یاراحمدی بافقی، ع.، ۱۳۹۳. مدل سازی ۲ بعدی هندسی ناپیوستگی‌ها در نرم افزار تحلیل عددی UDEC و رفع عیب آن با استفاده از برنامه 3DGM، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- Baecher, G., 1972. Site exploration: a probabilistic approach. PhD dissertation. Cambridge, MA: MIT.



- Baecher, G.B., 1983. Statistical Analysis of Rock Mass Fracturing. *Journal of Mathematical Geology*, 15(2), 329-347. DOI 10.1007/BF01036074.
- Baghbanan, A., Jing, L., 2008. Hydraulic Properties of Fractured Rock Masses with Correlated Fracture Length and Aperture. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44(5), 704– 719. DOI:10.1016/j.ijrmms.2006.11.001.
- Bang, S.H., Jeon, S., Kwon, S., 2012. Modeling the Hydraulic Characteristics of a Fractured Rock Mass with Correlated Fracture Length and Aperture: Application in the Underground Research Tunnel at Kaeri. *Nuclear Engineering and Technology*, 44 (6), 639-652. DOI:10.5516/ 02.2011.026.
- Brown, E.T., 2003. Block Caving Geomechanics, The International Caving Study Stage I 1997-2000, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Brisbane, Australia.
- Dershowitz, W.S., Einstein, H.H., 1988. Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 21(1), 21–51. DOI:10.1007/BF01019674.
- Hoek, E.T., 1998. Reliability of the Hoek–Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *Int J Rock Mech Min Sci*; 35: 63–8.
- Hudson, J.A., La Pointe, P.R., 1980. Printed Circuits for Studying Rock Mass Permeability, *International journal of rock mechanics and mining sciences and geomechanics abstracts*, Technical Note, 17(5), 297-301. DOI:10.1016/0148-9062(80)90812-8.
- Hudson, J.A., Priest, S.D., 1983. Discontinuity Frequency in Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract*, 20(2), 73-89. DOI:10.1016/0148-9062(83)90329-7.
- 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.
- Kulatilake, P.H.S.W., Chen, J., Teng, J., 1996. Discontinuity Geometry Characterization in a Tunnel Close to the Proposed Permanent Shiplock Area of the Three Gorges Dam site in China. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics Abstract*, 33(3), 255-277. DOI:10.1016/0148-9062(95)00060-7.
- Kulatilake, P.H.S.W., Park, J., Um, J., 2004. Estimation of Rock Mass Strength and Deformability in 3-D for a 30 m Cube at a Depth of 485 m at Aspo Hard Rock Laboratory. *Geotechnical and Geological Engineering*, 22(3), 313–330. DOI:10.1023/B:GEGE.0000025033.21994.c0.
- Kulatilake, P.H.S.W., Um, J., Wang, M., 2003. Stochastic Fracture Geometry Modeling in 3-D Including Validations for a Part of Arrowhead East Tunnel, California, USA. *Engineering Geology*, 70(1), 131-155. DOI:10.1016/S0013-7952(03)00087-5.
- Laubscher, D.H., 2003. *Cave Mining Handbook*, De Beers, p. 138.
- Martel, S., Hestir, K., Long, J.C.S., 1991. Generation of Fracture Patterns Using Self-Similar Function Concepts. *Earth Sciences Division Annual Report*, Lawrence Berkeley Lab, Berkeley, California, 52-56.
- 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: 395-419.
- Pine, R.J., Coggan, J.S., Flynn, Z., Elmo, D., 2006. The Development of a New Numerical Modeling Approach for Naturally Fractured Rock Masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 39(5), 395- 419. DOI:10.1007/s00603-006-0083-x.
- Priest, S.D., 1993. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Published by Chapman & Hall, London, p. 473. ISBN: 978-94-010-4656-5.
- Priest, S.D., Hudson, J.A., 1976. Discontinuity Spacing in Rock. *International Journal of RockMechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract* 13(5), 135-148. DOI:10.1016/0148-9062(76)90818-4.
- Priest, S.D., Samaniego, J.A., 1988. The Statistical Analysis of Rigid Block Stability in Jointed Rock Masses. 5<sup>th</sup> Australia-New Zealand Conference on Geomechanics, (pp. 398-403), Barton, A.C.T.: Institution of Engineers, Australia, Sydney. ISBN: 0858254271 & 0858254085.
- Reyes, O., Einstein, H. H., 1991. Failure Mechanics of Fractured Rock - A Fracture Coalescence Model. 7<sup>th</sup> International Society for Rock Mechanics, A.A. Balkema. Permission to Distribute -
- Robinson, P C., 1983. Connectivity of Fracture Systems - A Percolation Theory Approach. *Journal of Physics A: Mathematical and General* 16(3), 605–614. DOI:10.1088/0305-4470/16/3/020.

- Rogers, S.F., Kennard, D.K., Dershowitz, W.S., Vanas, A., 2007. Characterising the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach, *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands - Eberhardt, Stead & Morrison (eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44401-9.*
- Rogers, S.F., Moffitt, K.M., Kennard, D.T., 2006. Probabilistic slope and tunnel block stability analysis using realistic fracture network models. In *Proc. 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics, Golden, CO. ARM, VUSRMS, 06-1052.*
- Rogers, S.F., Elmo, D., Catalan, A., 2014. Volumetric Fracture Intensity Measurement for Improved Rock Mass Characterisation and Fragmentation Assessment in Block Caving Operations. *International Journal of Rock Mechanics Rock Engineering, 44(5), 704– 719.*
- Sari, M., 2009. The Stochastic Assessment of Strength and Deformability Characteristics for Apyroclastic Rock Mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 46(3), 613-628. DOI:10.1016/j.ijrmms.2008.07.007.*
- Tollenaar R.N., 2008. Characterization of discrete fracture networks and their influence on caveability and fragmentation. (Master of Applied Science) The University of British Columbia.
- Wanga, C., Tannant, D.D., Lilly, P.A., 2003. Numerical analysis of the stability of heavily jointed Rock slopes using PFC2D. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40, 415–424.*
- Wu, F., Wang, S., 2002. Statistical Model for Structure of Jointed Rock Mass. *Geotechnique, 52(2), 137–140. DOI: 10.1680/geot.2002.52.2.137.*
- Yu, X., 1992. Stochastic Modeling of Rock Fracture Geometry. M.S. Thesis, MIT, Cambridge, MA. URI: <http://hdl.handle.net/1721.1/12176>.
- Xu, C., Dowd, P., 2010. A New Computer Code for Discrete Fracture Network Modeling. *Computers & Geosciences, 36(3), 292–301. DOI:10.1016/j.cageo.2009.05.012.*
- Zadhesh, J., Jalali, S.E., Ramezanzadeh, A., 2013. Estimation of Joint Trace Length Probability Distribution Function in Igneous, Sedimentary, and Metamorphic Rocks. *Arabian Journal of Geosciences, DOI 10.1007/s12517-013-0861-1.*
- Zhang, L., Einstein, H.H., 2000. Estimating the Intensity of Rock Discontinuities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37(5), 819-837. DOI:10.1016/S1365-1609(00)00022-8.*