

### شبیه‌سازی هندسی سه‌بعدی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان

مهدی نوروزی<sup>۱\*</sup>؛ سید محمد اسماعیل جلالی<sup>۲</sup>؛ رضا کاکایی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دانشیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- استاد؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۰۳/۱۱؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۳/۱۰/۰۹

واژگان کلیدی	چکیده
مدل هندسی	امروزه مدل‌سازی توده‌سنگ به طور فراگیری به منظور تعیین ویژگی‌های مقاومتی و رفتار
مدل‌سازی تصادفی	هیدرولیکی توده‌سنگ بکار برده می‌شود. از طرفی عدم قطعیت و تغییرپذیری در مطالعات
شبکه درزه	زمین‌شناسی مهندسی در ارتباط با توده‌سنگ‌های متشکل از مواد طبیعی و ناهمگن اجتناب‌ناپذیر
برداشت درزه	است. زمانی که متغیرهای در فرآیند، عدم قطعیت و تغییرپذیری را نشان می‌دهند، لازم است
مطالعات آماری	ماهیت ویژگی‌های تصادفی تعریف شود. در این مقاله، با توجه به اهمیت بالای ویژگی پایایی درزه بر
سد رودبار لرستان	رفتار مقاومتی و هیدرولیکی توده‌سنگ، به توسعه مدل هندسی تصادفی سه بعدی شبکه درزه با در

نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه درزه بر اساس مدل ونزیانو پرداخته شده است. با استفاده از برداشت‌های انجام شده در تونل دسترسی به گالری سد و نیروگاه رودبار لرستان و برآورد بهترین توابع توزیع احتمالی بر ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های موجود در این منطقه، مدل هندسی سه بعدی شبکه درزه‌ها تهیه شده است. به منظور اجرای مدل، برنامه کامپیوتری‌ای به زبان برنامه‌نویسی ++C، به نام  $DFN-FRAC^{3D}$  نوشته شده که قادر است با استفاده از داده‌های برداشت شده، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش بصری از شبکه ناپیوستگی‌ها در راستاهای مختلف ارائه دهد. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند ورودی‌های مفید برای مدل‌های عددی جهت تحلیل پایداری و مطالعه رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ باشد.

بسیاری از فعالیت‌های عمرانی، معدنی و زیست‌محیطی مثل دفن زباله‌های خطرناک و باطله فعالیت‌های هسته‌ای، نفت و انرژی ژئوترمال از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. برآورد رفتار هیدرولیک توده‌سنگ نیازمند فهم مناسبی از رفتار هیدرولیکی شکستگی و مدل دقیقی از شبکه شکستگی‌ها است. با بکارگیری مدل مناسب برای بررسی رفتار هیدرولیکی توده‌سنگ اطراف حفاریات زیرزمینی، می‌توان دقت مطالعات طراحی و ایمنی را افزایش داد که در نهایت باعث کاهش عدم قطعیت در رابطه با برآورد رفتار توده‌سنگ و کاهش هزینه‌های اجرا و بهره‌برداری خواهد شد. از طرف دیگر یکی از الزامات مهم در طراحی و اجرای پروژه‌های

#### ۱- مقدمه

در بسیاری از کاربردهای مهندسی، ناپیوستگی‌ها عامل بحرانی در تعیین عملکرد توده‌سنگ هستند [1]. در میان ناپیوستگی‌های توده‌سنگ شامل صفحات لایه‌بندی، گسل‌ها، صفحات رخ و غیره، درزه‌ها متداول‌ترین نوع ناپیوستگی‌ها هستند [2]. شبکه درزه‌های توده‌سنگ و ویژگی‌های هندسی آن از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار جریان سیالات (آب، نفت و گاز) [3]، مقاومت و پایداری توده‌سنگ [4] و نرخ نفوذ دستگاه  $TBM$  [5] است.

مطالعه رفتار جریان سیال در محیط‌های سنگی در

\* سمنان، شاهرود، میدان هفت تیر، بلوار دانشگاه، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، طبقه دوم، کدپستی:

۳۶۱۹۹۵۱۶۱، صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۳۳۳۳۳۵۵۰۹؛ رایانامه: [mnoroozi.mine@gmail.com](mailto:mnoroozi.mine@gmail.com)

هیدرولیکی توده‌سنگ، به توسعه مدل تصادفی شبکه درزه با در نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه درزه بر اساس مدل ونزیانو پرداخته شده است.

همچنین در این مقاله، با استفاده از داده‌های میدانی درزه‌های برداشت شده در تونل دسترسی به گالری سد و نیروگاه رودبار لرستان، مدل هندسی سه بعدی شبکه‌ی درزه‌های توده‌سنگ با استفاده از مدل تصادفی توسعه یافته، تهیه شده است. پردازش داده‌ها شامل تطبیق توابع توزیع احتمالی متفاوت بر ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های برداشت شده انجام شده است. به منظور اجرای مدل، برنامه کامپیوتری‌ای به زبان برنامه‌نویسی ++C، به نام *DFN-FRAC<sup>3D</sup>* نوشته شده که قادر است با استفاده از داده‌های برداشت شده، علاوه بر تولید خروجی رقمی، نمایش بصری از شبکه ناپیوستگی‌ها در راستاهای مختلف ارائه دهد.

## ۲- پیشینه 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 [۶]. مطالعات هادسون (*Hudson*) و لاپونته (*La pointe*) در سال ۱۹۸۰ و رابینسون (*Robinson*) در سال ۱۹۸۳ در زمینه تراوش و جریان سیال را می‌توان نقطه آغاز کاربرد مدل‌های تصادفی دانست [12] و [13]. درشوایتز (*Dershowitz*) و انیشیتین (*Einstein*) در سال ۱۹۸۸ مدل تصادفی‌ای ارائه نمودند که با در نظر گرفتن تغییرات در جهت، فاصله‌داری و پایایی ناپیوستگی، شبکه درزه واقعی‌تری را ایجاد می‌کند [14]. پریست (*Priest*) و سمانیگو (*Samaniego*) در سال ۱۹۸۸ اقدام به توسعه این مفهوم در زمینه تحلیل پایداری بلوک نمودند [15]. ارایه‌ی مدل هندسی سلسله مراتبی در ارتباط با فرآیندهای پایه‌ای ایجاد درزه توسط ریس (*Reyes*) و انیشیتین (*Einstein*) در سال ۱۹۹۱ [16] و مدل هندسی- مکانیکی ارایه شده توسط مارتل (*Martel*) و همکاران در سال ۱۹۹۱ [17] 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

عمرانی و معدنی در سنگ، ارزیابی دقیق مقاومت توده‌سنگ است [۶].

نخستین گام در توسعه یک مدل جریان یا مطالعه رفتار مکانیکی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار، ساخت مدلی هندسی از شبکه درزه متناسب با هندسه داده‌های برداشت شده از زمین است. به عبارت دیگر مساله اصلی در مدل-سازی توده‌سنگ، منتج شدن اطلاعات جمع‌آوری شده به تعریف سه بعدی دقیق از ساختارها در توده‌سنگ است [7]. از آنجا که توده‌سنگ از مواد طبیعی ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده است، ممکن است ویژگی‌های هندسی درزه‌ها از جمله جهت، پایایی و فاصله‌داری دارای مقادیری پراکنده در توده‌سنگ باشند. بنابراین لازم است ماهیتی تصادفی برای ویژگی‌های مورد نظر در نظر گرفته شود و در مدل‌سازی توده‌سنگ بکار رود [8] و [9]. از بهترین روش‌های دارای توانایی شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌ها است. هدف در تولید شبکه‌های درزه تصادفی تولید تعدادی درزه با ویژگی‌های هندسی منطبق بر توابع توزیع خاص در دو یا سه بعد است به طوری که ویژگی‌های جمعیتی درزه‌های واقعی برداشت شده در توده‌سنگ را منعکس کند [۱۰].

پارامترهای تصادفی ناپیوستگی‌ها از اندازه‌گیری‌های میدانی و تحلیل‌های آماری به دست 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 به دست آورد. لذا این امکان فراهم می‌شود که بر اساس اطلاعات آماری جمع‌آوری شده، ویژگی‌های توده‌سنگ با کیفیت بهتری تعیین شوند [۱۱].

مدل‌های تصادفی شبکه درزه توسعه داده شده توسط بوچر و همکارانش در سال ۱۹۷۷ و ونزیانو در سال ۱۹۷۸ جزء مدل‌های پایه ارایه شده در این زمینه هستند. در این مدل‌ها ویژگی‌هایی از درزه شامل احتمال رخداد، جهت و فاصله‌داری به خوبی به طور آماری مدل شده‌اند؛ اما به ویژگی پایایی درزه به دلیل مشکلات اندازه‌گیری مقدار آن و عدم وجود روابط مربوطه پرداخته نشد. در این مقاله، با توجه به تاثیر شدید ویژگی پایایی درزه بر ویژگی‌های مکانیکی و

مغزه‌های حفاری، دوربین ته چال، واقع‌نگاری ژئوفیزیکی خطی و روش‌های دورسنجی مناسب برای بررسی رخنمون‌ها از جمله فتوگرامتری و اسکن کردن لیزری استفاده نمود [1]. نکته کلیدی مدل‌سازی شبکه درزه در توده‌سنگ، برآورد مناسب خواص هندسی درزه‌ها است. موفقیت تحلیل‌های ناپیوسته (عددی) به شدت وابسته به چگونگی برداشت درزه‌های برجا و تهیه مدل هندسی است. ویژگی‌های هندسی درزه به طور معمول توسط برداشت درزه‌ها در امتداد سطوح سنگی نمایان با استفاده از روش برداشت خطی یا پنجره برداشت تعیین می‌شوند. در روش برداشت خطی، قضاوت کمتری در طی جمع‌آوری اطلاعات واقعی مورد نیاز است در نتیجه تجربه بالای برداشت زمین‌شناسی مورد نیاز نیست. در مقایسه اطلاعاتی بیشتری در روش برداشت پنجره‌ای بر روی نواحی بزرگ‌تر به دست می‌آید، اما اطلاعات برداشت خطی در محل‌های مشخص جزئیات بیشتری را ارائه می‌کند [4].

### ۳- موقعیت و زمین‌شناسی منطقه سد رودبار لرستان

محل پروژه سد و نیروگاه رودبار لرستان در استان لرستان و در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز و در مسیر رودخانه رودبار قرار دارد (شکل ۱). گستره مورد بررسی در پهنه زاگرس شمالی یا زاگرس بلند واقع شده که از جنوب غرب به نوار چین خرده زاگرس و از شمال شرق به گسله اصلی واژگون زاگرس و پهنه سنج - سیرجان محدود گردیده است. به لحاظ توپوگرافی، متوسط ارتفاع منطقه در حدود ۱۷۵۰ متر و دارای آب و هوای سرد و کوهستانی است. با توجه به ارتفاع منطقه، برف بخش مهمی از بارش‌های جوی را تشکیل می‌دهد.

در منطقه مورد مطالعه مهم‌ترین واحدهای دارای رخنمون شامل سازندهای آهکی - دولومیتی دالان و سروک متعلق به دوره پرمین، سازندهای هرمز و میلا دارای لیتولوژی شیل و مارن متعلق به دوره کامبرین، سازند گرو با لیتولوژی آهک مارنی و مارن متعلق به دوره کرتاسه و سازند بختیاری عمدتاً متشکل از کنگلومرا متعلق به دوره پلیوسن هستند.

گسترده توزیع دسته درزه‌ها، منجر به توسعه مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته توسط یو (Yu) در سال ۱۹۹۲ شد [18]. پرست (Priest) در سال ۱۹۹۳ مدل تصادفی سه بعدی‌ای را ارائه نمود که در آن درزه‌ها به صورت دیسک‌های دایره‌ای فرض شده‌اند. در این مدل مقادیر تصادفی برای قطر درزه نیز به وسیله الگوریتم‌های ارائه شده توسط پرست، از توزیع‌های مناسب تولید می‌شوند [19]. ایوانووا (Ivanova) و همکارانش در سال ۱۹۹۵ مدل دوبعدی سلسله مراتبی پیشرفته را به سه بعد توسعه دادند [20]. کولاتیلاک (Kulatilake) و همکاران در سال ۲۰۰۴ اقدام به تهیه مدل شبکه درزه تصادفی سه بعدی برای توده سنگی از جنس دیوریت و ارائه فرآیند جدیدی برای تخمین مقاومت و تغییرشکل پذیری بلوک سنگی در سه بعد نمودند [21]. 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 گرفته است. مدل دوبعدی ارائه شده توسط باغبانان و جینگ (Jing) در سال ۲۰۰۸ [22] و مدل سه‌بعدی ارائه شده توسط زو (Xu) و دود (Dowd) در سال ۲۰۱۰ [1] و همچنین بنگ (Bang) و همکارانش در سال ۲۰۱۲ [23] را می‌توان به عنوان نمونه‌هایی از این نوع برشمرد.

طبیعت ناهمگن و تصادفی بودن خواص شکستگی‌های موجود در توده‌سنگ، لزوم استفاده از آنالیزهای آماری را نشان می‌دهد [9]. توصیف ویژگی‌های تشکیلات درزه‌دار توسط عملیات میدانی، به طور ضعیفی مستندسازی شده است [3]. اگرچه برخی نویسندگان توصیفاتی آماری از شبکه‌های درزه در محیط‌های مختلف ارائه نموده‌اند [24]. چندین ویژگی درزه‌ها به خصوص فاصله‌داری، جهت و طول آن‌ها مطالعه شده و غالباً توزیع‌های نمایی منفی، فیشر، لاگ نرمال و گاما برای این ویژگی‌ها در نظر گرفته شده است [۱۱].

اولین مرحله در فرآیند مدل‌سازی، جمع‌آوری اطلاعات ناپیوستگی برای تحلیل‌های آماری است. برای این منظور، می‌توان از روش‌های پیمایش متداول شامل برداشت خطی و روش برداشت پنجره‌ای رخنمون‌های سنگی یا سطوح استخراج شده، استفاده نمود [25]. علاوه بر این می‌توان از



شکل ۱ - موقعیت جغرافیایی سد رودبار لرستان

انفجار و هوازدگی و پنهان ماندن در زیر گیاهان است. اطلاعات جمع‌آوری شده در این مقاله با استفاده از روش برداشت خطی به دست آمده است. در این روش تمامی درزه‌هایی که خط برداشت را در امتداد آن قطع می‌کنند، اندازه‌گیری می‌شوند. نکته شایان توجه این است که استاندارد قابل قبول جهانی برای روش خط برداشت وجود ندارد و در واقع باید جزئیات روش را به نحوی تغییر داد که بتوان داده‌های لازم را برای هدف موردنظر جمع‌آوری نمود و با شرایط محلی سنگ تطابق داد [19].

در روش برداشت خطی سطوح مسطح تمیز 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 [19].

خط برداشت از متر نواری ۲۰ تا ۳۰ متر تشکیل شده و توسط دو میخ در امتداد رخنمون و بیشترین شیب سنگی ثابت می‌شود. بهتر است که نقطه شروع خط برداشت از یک ناپیوستگی باشد ولی رعایت این نکته چندان مهم نیست. موقعیت مکانی و جهت‌داری شرایط رخنمون سنگی به همراه زاویه میل و امتداد خط برداشت ثبت خواهد شد.

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 ( $m$ )، درزه‌هایی که فقط یک انتهای آن‌ها دیده می‌شود ( $m$ ) و درزه‌هایی که هیچ یک از دو انتهای آن دیده نمی‌شود ( $p$ ). سپس ضرایب  $R_1$ ،  $R_0$  و

گسل‌های از نوع معکوس یا رانده عامل اصلی تکتونیکی منطقه را تشکیل داده، ظاهری خردشده در سنگ‌های منطقه ایجاد نموده و به واسطه قرارگیری در پهنه زاگرس بلند از تنوع ویژه‌ای نیز برخوردار هستند. روند کلی ساختار زمین‌شناسی منطقه  $NI30E$  تا  $NI40E$  یا همان روند زاگرس است. توده‌سنگ‌های دربرگیرنده مخزن سد عمدتاً از جنس کربناته، با وزن مخصوص حدود  $gr/cm^3$  ۲٫۷، تخلخل کم و دارای لایه‌بندی هستند. ضخامت لایه‌ها بسیار متفاوت بوده و از نازک لایه تا توده‌ای را شامل می‌شوند. امتداد لایه‌ها معمولاً از روند ساختار منطقه تبعیت می‌کنند. به طور معمول شیب لایه‌ها زیاد بوده و در حدود ۶۰ تا ۹۰ درجه تغییر می‌کند و تقریباً در همه جا به سوی شمال غرب است [۲۶].

#### ۴- مطالعات میدانی

درزه‌نگاری یکی از عناصر مهم در مطالعات خصوصیات مهندسی سنگ است. اندازه‌گیری از روی رخنمون‌های سنگی از این مزیت که از منطقه بیشتری برای برداشت استفاده می‌شود، برخوردار است. ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها مانند جهت‌داری، اندازه و دیگر خصوصیات بزرگ مقیاس ناپیوستگی‌ها می‌تواند برداشت شود. رابطه زمین‌شناسی بین گروه ناپیوستگی‌ها نیز در رخنمون‌های سنگی قابل مشاهده است. بزرگ‌ترین نقص این روش در دسترس نبودن رخنمون‌ها، تحت تاثیر قرار گرفتن آن‌ها از



شکل ۳- رخنمون مورد مطالعه و خط برداشت

جدول ۱- خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون

میانگین طول درزه‌ها (m)	نوع پایان‌یابی درزه‌ها (%)			تعداد درزه‌ها	جنس سنگ
	$R_2$	$R_1$	$R_0$		
۱٫۵	۸۰	۱۳	۷	۱۸۷	آهک دولومیتی

عدم توانایی ثبت درزه‌هایی که طول آن‌ها از حد اندازه‌گیری کوچک‌تر است به عنوان خطای فرواندازه (truncation) معرفی شده است. همچنین درزه‌هایی که طول آن‌ها به دلیل محدود بودن رخنمون سنگی دیده نمی‌شود، به عنوان خطای فراندازه (censoring) شناخته شده است [29] و [30]. 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 فراندازه نیز چشم‌پوشی کرد.

## ۵- تحلیل آماری ویژگی‌های هندسی شبکه

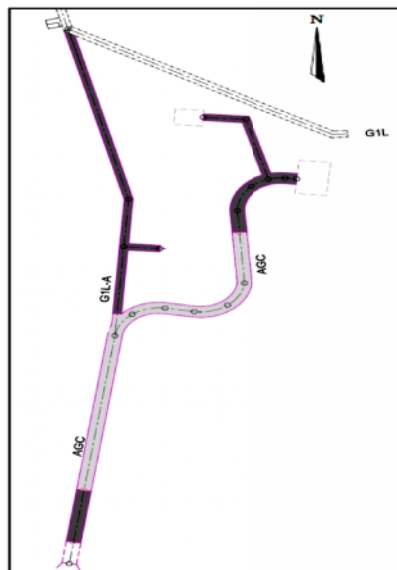
### درزه‌ها

پردازش داده‌ها شامل تعیین پارامترهای هر درزه بر مبنای توزیع آن پارامتر در آن دسته درزه و به صورت تصادفی

$R_2$  جهت نشان دادن وضعیت پایان‌یابی درزه‌ها مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود [27]:

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{p}{p+m+n} \\ R_1 &= \frac{m}{p+m+n} \\ R_2 &= \frac{n}{p+m_1+n} \end{aligned} \quad (1)$$

در این مقاله تونل دسترسی به گالری (AGC) سد رودبار لرستان برای برداشت درزه انتخاب شده است (شکل ۲). این تونل دسترسی در تشکیلات دالان متشکل از لایه‌های متوسط تا ضخیم خاکستری رنگ آهک دولومیتی واقع شده است. ضخامت لایه‌ها از ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر تغییر می‌کند. جهت صفحات لایه‌بندی در حدود آزمون ۴۵ درجه و شیب ۸۵ درجه است. بازشدگی درزه‌ها معمولاً کمتر از ۱ میلی‌متر است. تونل تقریباً عمود بر امتداد لایه‌بندی حفر شده است که از نقطه نظر حفاری و پایداری مطلوب است. بر اساس مشاهدات گزارش شده از ابتدای حفر تونل و همچنین با توجه به کیفیت بالای توده‌سنگ، نیاز به نصب نگهدارنده در داخل تونل تشخیص داده نشده است [28]. در شکل ۳ رخنمون و خط برداشت نشان داده شده است. در جدول ۱ خلاصه‌ای از درزه‌های برداشتی از رخنمون ارائه شده است.



شکل ۲- تونل دسترسی به گالری (AGC) سد رودبار لرستان [۲۶]

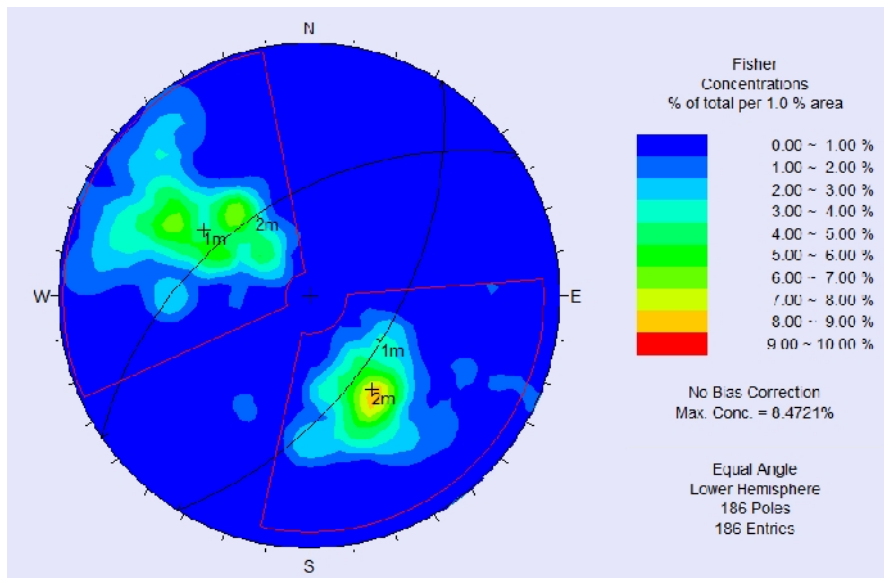
منطقه شناسایی شده است.

#### ۵-۱- توزیع جهت یافتگی

جهت یافتگی درزه‌ها دارای دو مولفه جهت شیب و زاویه شیب است. این دو مولفه به صورت مستقل و با توجه به تابع توزیع آماری خود تولید می‌شوند. تحقیقات نشان داده است که جهت شیب از توزیع یکنواخت و زاویه شیب از توزیع فیشر پیروی می‌کند [۱۱] و [۱۹]. ثابت فیشر برای هر دسته درزه با استفاده از نرم‌افزار *Dips* به دست آمده و در جدول ۲ نشان داده شده است.

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 به وجود آمدن توزیع‌های نمایی و فرآیندهای پیچیده باعث ایجاد توزیع‌های لاگ‌نرمال می‌شود [۱۴].

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 درزه‌های برداشت شده از تونل دسترسی به گالری *AGC*، همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده، تعداد ۲ دسته درزه در



شکل ۴- جدایش دسته درزه‌ها در شبکه اشمیت

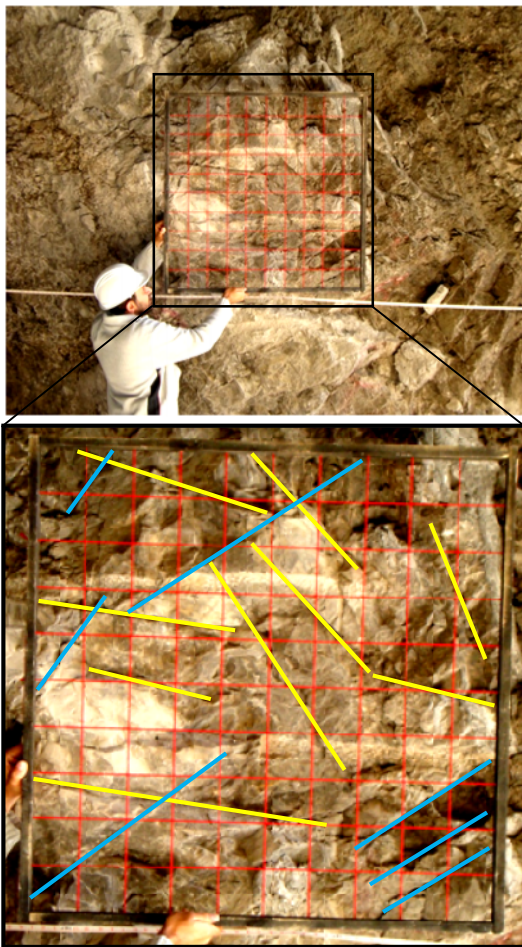
جدول ۲- پارامترهای هندسی دسته درزه‌های برداشت شده

جهت دسته درزه ( <i>Dip/DDir</i> )	ثابت توزیع فیشر ( <i>K</i> )	چگالی $P_{32} (m^{-1})$	پارامترهای توزیع طول			
			تابع توزیع	پارامتر مقیاس ( $\sigma$ )	پارامتر موقعیت ( $\mu$ )	میانگین استاندارد
۱ (۵۳/۱۲۱)	۱۳,۰۳	۰,۳۶	لاگ‌نرمال	۰,۹۴۲	-۰,۰۸۹	۱,۵۸۵
۲ (۴۸/۳۲۶)	۱۶,۱۱	۰,۱۲	لاگ‌نرمال	۰,۸۷۶	۰,۰۵۲	۱,۵۳۶

واحد توده‌سنگ است که در آن واحد توده‌سنگ، می‌تواند حجم، مساحت و یا طول باشد. چگالی درزه در دو بعد،  $P_{21}$

#### ۵-۲- چگالی درزه

چگالی درزه‌های سنگ در اصل اندازه‌ای از تعداد درزه‌ها بر



شکل ۵- اندازه‌گیری چگالی درزه،  $P_{21}$

#### ۵-۴- توزیع طول (پایایی)

طول اثر درزه، ناشی از برخورد درزه با سطح رخنمون، بیانگر گسترش صفحه درزه است و اندازه بلوک‌های سنگی را تعیین می‌کند [34]. به دلیل اینکه برداشت مستقیم ناپیوستگی‌ها در داخل سنگ غیر ممکن است، مطالعات بسیار اندکی در خصوص پیمایش‌های سه بعدی درزه وجود دارد [35]. بنابراین در عمل، فرض می‌شود اندازه‌های سه بعدی درزه‌ها دارای ویژگی‌های آماری مشابه با نتایج بدست آمده از پیمایش‌های دو بعدی هستند [1]. بطور معمول برای توزیع طول اثر واقعی درزه، سه تابع نمایی منفی [25]، [33] و [36]، لاگ‌نرمال [19]، [31] و [37] و گاما [19] و [31] برای اطلاعات حاصل از پیمایش دوبعدی درزه‌ها بکار برده می‌شوند.

به عنوان تعداد کلی درزه در داخل مساحت داده شده تعریف می‌شود. پارامتر سه بعدی چگالی درزه،  $P_{32}$ ، به صورت مساحت کلی سطح درزه‌دار بر واحد حجم تعریف می‌شود. این پارامتر مانند  $P_{21}$  مستقل از مقیاس و به عنوان پارامتری حجمی، مستقل از جهت نیز است [31].

به طور کلی مقدار چگالی حجمی درزه، (متر مربع بر متر مکعب)  $P_{32}$ ، از مقادیر چگالی سطحی برداشت شده، (متر بر متر مربع)  $P_{21}$ ، به دست می‌آید. زانگ و انیشتین در سال ۲۰۰۰ رابطه زیر را برای محاسبه  $P_{32}$  پیشنهاد نمودند [31]:

$$P_{32} = \frac{N_T E(A)}{V} \quad (2)$$

مساحت متوسط درزه  $(E(A))$ ، با کاربرد رابطه زیر و با فرض دایره‌ای بودن درزه محاسبه می‌شود.

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

در این مقاله، درزه‌های قابل دیدن با چشم غیرمسلح با استفاده از یک چارچوب ۱ متر مربعی دارای شبکه مش‌بندی ۱۰ سانتی‌متر مربعی در میدان شمارش شدند (شکل ۵). درزه‌های متقاطع با هر خط مش اندازه‌گیری و تعداد کلی درزه‌های شمارش شده در چارچوب ۱ مترمربعی به عنوان چگالی سطحی درزه تعریف شد [32]. با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده و کاربرد رابطه‌های ۲ و ۳، مقادیر  $P_{32}$  برای هر دسته درزه به طور جداگانه محاسبه شده است (جدول ۲).

#### ۵-۳- توزیع فاصله‌داری

فاصله‌داری به فاصله دو ناپیوستگی مجاور در امتداد خط برداشت گفته می‌شود. 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 [29] و [33]. همچنین اثبات شده در صورتی که موقعیت‌های درزه تصادفی باشند آنگاه تابع توزیع چگالی احتمال فاصله‌داری درزه، نمایی منفی خواهد بود [19]. بر این اساس، در این مقاله، توزیع نمایی منفی برای فاصله‌داری بکار برده شده است.

که در آن  $O_i$  فراوانی مشاهده شده دسته  $i$  و  $E_i$  فراوانی مورد انتظار است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_i = F(x_2) - F(x_1) \quad (8)$$

که در آن  $F(x)$  تابع توزیع تجمعی توزیع احتمال تحت آزمون،  $x_1$  و  $x_2$  کران‌های دسته هستند [36]. در سطح اعتماد مشخص ( $\alpha$ ) اگر مقدار آماره آزمون-های کولموگروف-اسمینوروف ( $D$ )، آندرسون-دارلینگ ( $A^2$ ) و کای-سکویر ( $\chi^2$ ) از مقدار بحرانی آن‌ها بیشتر باشد، فرضیه شکل توزیع رد خواهد شد. از مقادیر  $\alpha$  برابر ۰.۰۱ و ۰.۰۵، معمولاً برای ارزیابی فرض تھی 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. نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش برای داده‌های برداشت شده طول مربوط به هر دسته درزه در رخنمون سنگی مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

بر طبق آزمون‌های بهترین برازش، تابع توزیع لاگ-نرمال بیشترین سازگاری را برای توزیع طول درزه از خود نشان داده است. رابطه‌ی این تابع به صورت زیر است:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (9)$$

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

## ۶- ساخت مدل تصادفی شبکه درزه

در مدل‌سازی تصادفی، شیوه کلی شامل بررسی و استنتاج موقعیت، پایایی (اندازه)، جهت و دیگر ویژگی‌های درزه‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع‌های احتمالاتی است. این توزیع‌ها پایه و اساس تحقق تصادفی را فراهم می‌نمایند. برای مدل‌سازی، درزه‌ها در دسته‌هایی که بر اساس تحلیل‌های آماری اطلاعات اندازه‌گیری شده و تاریخچه زمین‌شناسی منطقه تعریف شده‌اند، گروه‌بندی می‌شوند. ساخت مدل با تولید صفحات دسته درزه شروع می‌شود. هر دسته به طور جداگانه مدل شده و شبیه‌سازی نهایی به صورت ترکیب تمام دسته درزه‌ها به طور مستقل انجام می‌شود.

آزمون‌های بهترین برازش (*Goodness-of-Fit*) ((*GOF*) برای آزمون این فرضیه که توزیع داده‌های برداشت شده از یک الگوی خاص تابع چگالی احتمال (*Probability Density Function (PDF)*) پیروی می‌کند یا خیر، طراحی شده است [36]. در این مقاله آزمون‌های بهترین برازش کولموگروف-اسمینوروف (*Kolmogorov-Smirnov*)، آندرسون-دارلینگ (*Anderson-Darling*) و کای-سکویر (*Chi-Squared*) برای توابع توزیع گاما، نمایی و لاگ‌نرمال به طور جداگانه انجام شده است.

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

$$F_n(x) = \frac{1}{n} [\text{Number of observations} \leq x] \quad (4)$$

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

$$D = \max_{1 \leq i \leq n} \left( F(x_i) - \frac{i-1}{n}, \frac{i}{n} - F(x_i) \right) \quad (5)$$

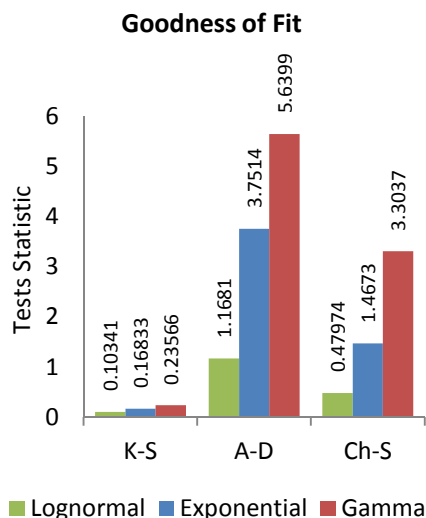
آزمون آندرسون-دارلینگ برازش تابع توزیع تجمعی مشاهده شده را با تابع توزیع تجمعی مورد نظر مقایسه می‌کند. این آزمون نسبت به آزمون کولموگروف-اسمینوروف به داده‌های حاشیه وزن بیشتری می‌دهد. آماره آندرسون-دارلینگ ( $A^2$ ) به صورت زیر تعریف شده است:

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) [\ln F(x_i) + \ln(1-F(x_{n-i+1}))] \quad (6)$$

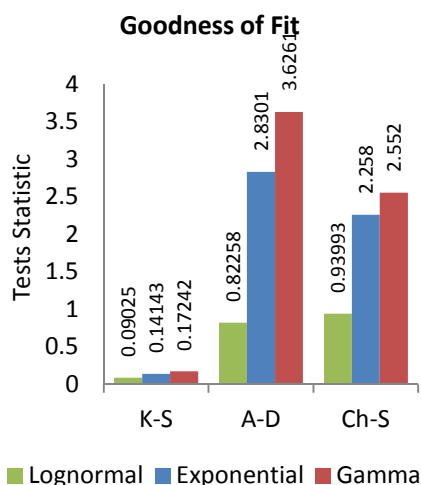
آزمون کای-سکویر برای آزمون این که جامعه از کدام توزیع پیروی می‌کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون بر روی داده‌های دسته‌بندی شده اعمال می‌شود، بنابراین مقدار آماره آزمون به چگونگی دسته‌بندی بستگی دارد. آماره کای-سکویر ( $\chi^2$ ) مطابق رابطه زیر تعریف شده است:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (7)$$



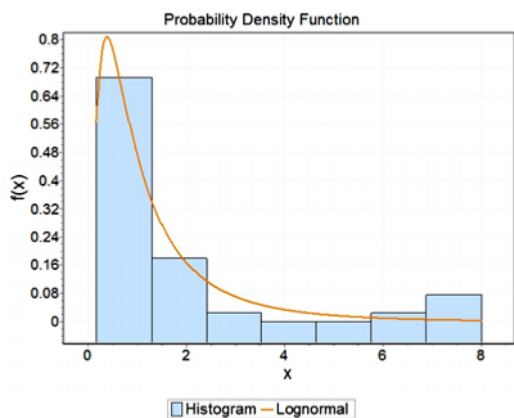


(ب)

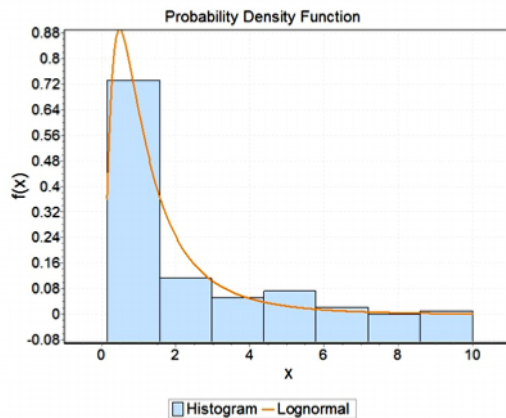


(الف)

شکل ۶- نتایج مقایسه‌ای آزمون‌های بهترین برازش (الف) دسته درزه ۱ (ب) دسته درزه ۲



(ب)



(الف)

شکل ۷- تابع توزیع لاگ نرمال برازش شده بر داده‌های برداشت شده (الف) دسته درزه ۱ (ب) دسته درزه ۲

پ- جهت متوسط دسته درزه  
 ت- چگالی حجمی درزه‌داری  
 ث- تابع چگالی احتمال ( $PDF$ ) تغییرات پایایی صفحات درزه شامل لاگ نرمال، نمایی منفی و گاما  
 در ویرایش کنونی مدل ارائه شده در این مقاله، درزه‌ها ناپیوستگی‌های صفحه‌ای پلی‌گون شکل محدب هستند که به طور تصادفی در فضای سه بعدی جهت یافته‌اند. مدل حاضر، فرآیندهای تصادفی خطی و صفحه‌ای پواسونی را ترکیب می‌کند. یک دسته درزه با کاربرد متوالی چهار فرآیند

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.

دسته درزه‌ها توسط پنج پارامتر توصیف می‌شوند:

الف- موقعیت مراکز درزه‌ها

ب- تابع چگالی احتمال ( $PDF$ ) تغییرات جهت صفحات درزه شامل یکنواخت، یکنواخت جزئی و فیشر

تشکیل می‌دهند. فرآیند سوم، فرآیند علامت‌گذاری پلی‌گون به نواحی درزه و ناحیه سنگ سالم مکمل آن غیر همگن است.

با کاربرد فرآیند چهارم می‌توان ویژگی غیرهم‌صفحه‌ای درزه‌ها را در نظر گرفت. این دو ویژگی، مدل ارائه شده در این مقاله را نسبت به مدل ونزیانو متفاوت می‌کند. این مدل دسته درزه‌هایی با تغییرات شکل و اندازه مشخص تولید می‌کند. بدین صورت امکان ارائه واقعی‌تری از سیستم‌های درزه طبیعی توده‌سنگ فراهم شده است. الگوریتم ساخت مدل برای یک دسته درزه در شکل ۸ نشان داده شده است.

تصادفی در فضای مدل سازی تولید می‌شود:

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

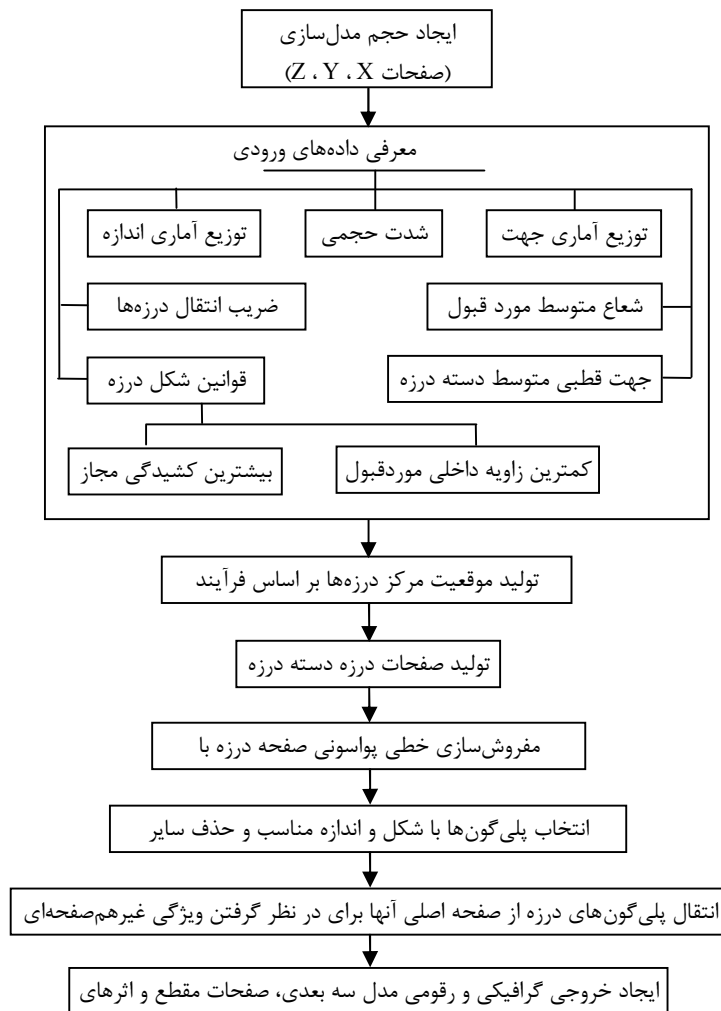
پلی‌گون‌ها) که به عنوان درزه‌دار در نزدیکی موقعیت اصلی-

شان علامت‌گذاری شده‌اند.

سیستم درزه، متشکل از دسته درزه‌ها، با تکرار

فرآیندهای ارائه شده، ایجاد می‌شود. دو فرآیند اول لزوماً

مدل احتمالاتی پیشنهاد شده توسط ونزیانو (۱۹۷۸) را

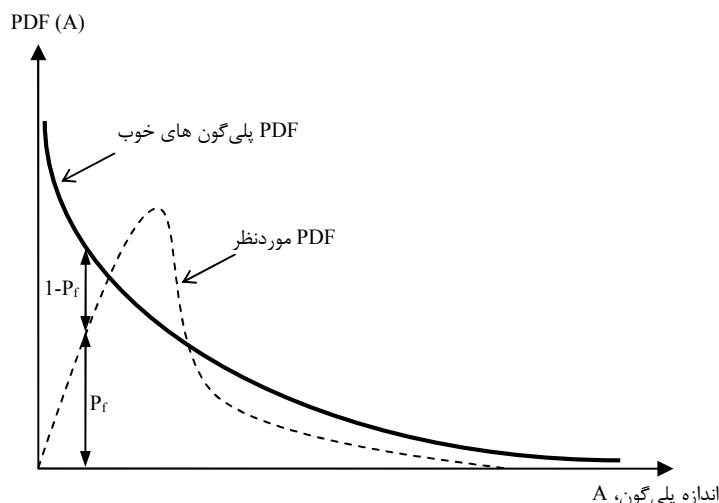


شکل ۸- روندنمای ساخت مدل ارائه شده

احتمال  $1-P_f$ ، تعریف شده به صورت اختلاف بین  $PDF$  موردنظر اندازه‌های درزه (یعنی لاگ‌نرمال، نمایی یا گاما) و  $PDF$  اندازه‌های پلی‌گون‌های خوب، حذف می‌شوند. مقدار احتمال  $P_f$  توسط  $PDF$  مورد نظر تعریف می‌شود. لازم به ذکر است، در مدل حاضر، ابتدا بر اساس معیارهای شکل مناسب برای درزه، بخشی از پلی‌گون‌ها (پلی‌گون‌های خوب) به عنوان درزه انتخاب می‌شوند. بر اندازه‌های این پلی‌گون‌های خوب،  $PDF$  گاما برازش می‌شود. این توزیع ارایه کننده سیستم‌های درزه طبیعی است که در آن‌ها درزه‌های بزرگ به مقدار اندک و درزه‌های کوچک به مقدار زیاد موجود هستند. سپس هر پلی‌گون خوب از نظر برازش بر  $PDF$  موردنظر به روش نشان داده شده در شکل ۹ کنترل می‌شود.

در مدل تهیه شده، فقط چندضلعی‌هایی با شکل‌هایی شبیه به شکل‌های درزه‌های واقعی باقی می‌مانند. یک پلی‌گون دارای شکل مناسب است و به عنوان درزه انتخاب می‌شود در صورتی که سه شرط (۱) حداقل چهار راس، (۲) تمام زوایا حداقل ۶۰ درجه و (۳) کشیدگی در حد مجاز را دارا باشد. یک پلی‌گون با احتمال  $P=1.0$  به عنوان «پلی‌گون خوب» باقی می‌ماند در صورتی که دارای شکل مناسب باشد، در غیر این صورت حذف می‌شود.

همچنین در مدل ارایه شده در این مقاله، اندازه‌های درزه بر توزیع خاصی شامل نمایی منفی، لاگ نرمال یا گاما برازش می‌شوند. در شکل ۹ روشی که برای مدل‌سازی توزیع‌های مختلف اندازه درزه بکار برده شده، نشان داده شده است. در هر فاصله اندازه‌ای، پلی‌گون‌ها با احتمال  $P_f$  به عنوان درزه باقی می‌مانند. به عبارت دیگر، پلی‌گون‌ها با



شکل ۹- علامت‌گذاری پلی‌گون با احتمال  $P_f$  به منظور بدست آوردن  $PDF$  موردنظر اندازه‌های درزه

برای اجرای این مدل، برنامه‌ای کامپیوتری به زبان برنامه‌نویسی  $C++$  به نام  $DFN-FRAC^{3D}$  نوشته شده است. برنامه کامپیوتری تهیه شده قادر است همزمان با تولید خروجی رقومی، توسط برنامه توسعه داده شده در محیط  $Mathematica$  شبکه درزه‌های تولید شده را نمایش دهد. در اختیار داشتن تصویری از شبکه درزه‌های مدل‌سازی شده، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در اختیار مهندسان قرار دهد. در  $DFN-FRAC^{3D}$ ، ساختار خروجی قابل اصلاح

همان‌طور که بیان شد، در هر فاصله اندازه‌ای، پلی‌گون‌ها با احتمال  $P_f$  که توسط  $PDF$  مورد نظر تعریف می‌شود، به عنوان درزه باقی می‌مانند. در صورتی که فاصله اندازه  $a$  تا  $b$ ، زیرمجموعه‌ای از برد متغیر تصادفی پیوسته  $X$  باشد، آن‌گاه:

$$P_f(a \leq X < b) = \int_a^b f(x).dx = \int_0^b f(x).dx - \int_0^a f(x).dx = F_X(b) - F_X(a) \quad (10)$$

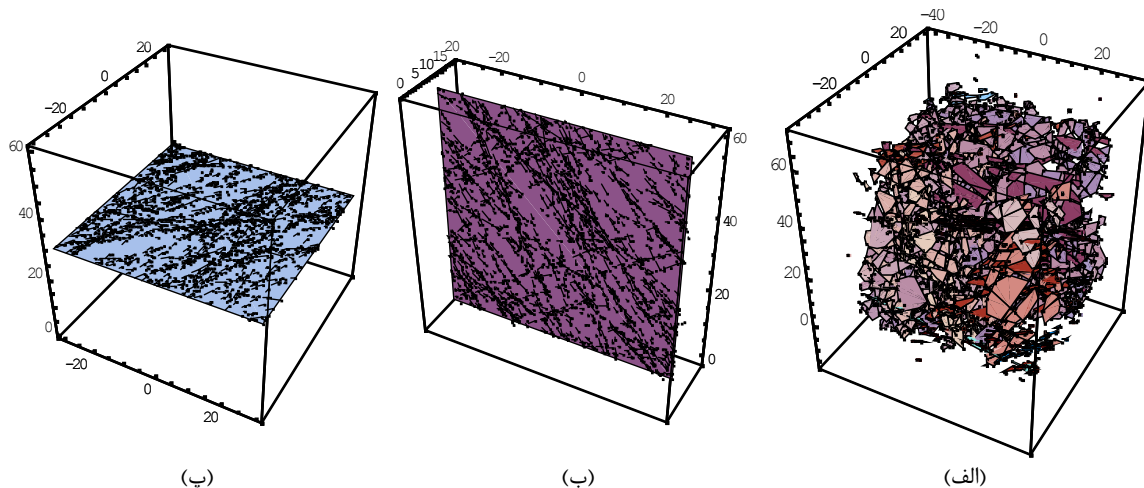
که در آن  $F_X$  تابع توزیع تجمعی متغیر تصادفی  $X$  است.

مختلفی چون در نظر گرفتن وابستگی پارامترهای هندسی درزه را نیز دارد. علاوه بر این‌ها، از مهم‌ترین قابلیت‌های این برنامه که سایر برنامه‌های مشابه فاقد آن‌ها هستند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- الف- نمونه‌گیری تصادفی: برنامه تهیه شده می‌تواند بطور 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.
  - 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.
- در شکل ۱۰ شبیه‌سازی شبکه درزه‌ی توده‌سنگ تونل دسترسی به گالری سد رودبار لرستان، بر اساس مدل تصادفی سه‌بعدی ارایه شده و با استفاده از پارامترهای هندسی بیان شده در جدول ۲، متشکل از ۱۳۸,۳۵۸ درزه در محدوده‌ای به ابعاد  $60 \times 60 \times 60$  مترمکعب نشان داده شده است.

است، به گونه‌ای که بتواند به عنوان ورودی مستقیم برای نرم‌افزارهای عددی قابل کاربرد باشد. ویرایش کنونی این برنامه قادر است فایل مشخصات درزه که به طور مستقیم توسط نرم‌افزار المان مجزای  $PFC^{3D}$  بکار می‌رود را ایجاد کند.

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. برنامه توسعه داده شده، توابع توزیع مربوط به پایایی، شیب و جهت شیب درزه را به عنوان ورودی دریافت کرده و آن‌ها را در محیط موردنظر با ابعاد و آرایش‌های مختلف تولید کرده و همچنین دارای قابلیت پردازش با آرایش‌های زیاد است. از آن‌جا که  $DFN-FRAC^{3D}$  برای اهداف بررسی مکانیکی توده سنگ توسعه داده شده است، از پارامتر دهانه بازشدگی در این ویرایش از نرم‌افزار صرف نظر شده است. همچنین  $DFN-FRAC^{3D}$  به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت افزودن امکانات



شکل ۱۰- شبکه درزه تصادفی شبیه‌سازی شده‌ی تونل دسترسی به گالری سد رودبار لرستان،  
الف) شبکه درزه سه بعدی، ب) مقطع عمودی، پ) مقطع افقی

## ۷- نتیجه‌گیری

در نظر گرفتن ویژگی‌های تصادفی پارامترهای هندسی درزه و ارایه مدلی واقعی‌تر از توده‌سنگ که از لحاظ آماری معتبر بوده و گویای ویژگی‌های توده‌سنگ برجا باشد، به منظور کاربرد در تحلیل‌های پایداری و هیدرولیکی لازم و ضروری است. مهم‌ترین مرحله در تحلیل‌های توده‌سنگ، تعریف دقیق شبکه ناپیوستگی‌ها (ساخت مدل هندسی) است. در این مقاله، شبیه‌سازی هندسی سه‌بعدی شبکه‌ی درزه‌های توده‌سنگ تونل دسترسی به گالری سد و نیروگاه رودبار لرستان، با استفاده از مدل تصادفی توسعه یافته انجام شده است. در این مدل درزه‌های تولید شده بر اساس مدل ونزیانو، با کاربرد روشی جدید بر توزیع چگالی احتمال موردنظر پایایی درزه منطبق می‌شوند. با کاربرد مطالعات آماری ویژگی‌های هندسی دسته درزه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه، ورودی‌های موردنیاز برای تهیه مدل هندسی فراهم گردید. همچنین برنامه‌ای کامپیوتری به زبان ++C به نام  $DFN-FRAC^{3D}$  دارای قابلیت نمایش تصویری سه بعدی شبکه درزه، به منظور اجرای مدل تهیه شده است. این برنامه اکثر قابلیت‌ها و توانایی‌های برنامه‌ها و نرم‌افزارهای موجود را داراست. علاوه بر این، آن دارای قابلیت‌هایی چون نمونه‌گیری تصادفی، مدل‌سازی ناحیه گسلی و در نظر

گرفتن ویژگی غیرهم‌صفحه‌ای بر اساس هدف از پیش تعیین شده است که نرم‌افزارهای موجود فاقد این قابلیت‌ها هستند. مدل حاضر می‌تواند برای مطالعات پایداری و هیدرولیکی منطقه بسیار مفید باشد.

## ۸- فهرست نمادها

در جدول ۳ فهرست نمادها و شرح آن‌ها آورده شده است.

جدول ۳- فهرست نمادها		
نماد	واحد	شرح
$N_T$	---	تعداد کلی درزه‌های برداشت شده
$E(A)$	$m^2$	مساحت متوسط درزه
$E(D)$	$m$	قطر متوسط درزه
	$m^3$	حجم واحد
$\mu_l$	$m$	طول اثر متوسط
$\sigma_l$	---	انحراف استاندارد
	---	نمونه‌های تصادفی
$\mu$	---	پارامتر موقعیت
$\sigma$	---	پارامتر مقیاس

## ۹- منابع

- [1] 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.
- [2] 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(3), 415–424. DOI:10.1016/S1365-1609(03)00004-2.
- [3] Le Garzic, E., & L'Hamaide, T., & Diraison, M., & et al. (2011). Scaling and Geometric Properties of Extensional Fracture Systems in the Proterozoic Basement of Yemen, Tectonic interpretation and fluid flow implications. *Journal of Structural Geology*, 33(4), 519-536. DOI:10.1016/j.jsg.2011.01.012.
- [4] Gumedde, H., & Stacey, T. R. (2007). Measurement of Typical Joint Characteristics in South African Gold Mines and the Use of These Characteristics in the Prediction of Rock Falls. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 107, 335-344. ISSN: 0038-223X/3.00.
- [5] افتخاری، س.م. و باغبانان، ع. و باقرپور، ر. (۱۳۹۲). تحلیل عددی تأثیر مشخصات هندسی شکستگی‌های توده‌سنگ بر نرخ نفوذ دستگاه *TBM*. *نشریه علمی و پژوهشی مهندسی معدن*، ۱۸(۱)، ۱-۱۲.

شبيه‌سازی هندسی سه‌بعدی شبکه‌ی ناپيوستگي‌های توده‌سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان: ص ۵۳-۶۸

[۶] نوروزی، م. و کاکایی، ر. و جلالی، س.م.ا. (۱۳۹۲). بررسی مدل تصادفی- ترکیبی برای تعیین ویژگی‌های مقاومتی توده‌سنگ. سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین، تهران.

[7] 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.

[8] Park, H. J, & West. T. R. (2001) .Development of a Probabilistic Approach for Rock Wedge Failure. *Engineering Geology*, 59(3), 223-251. DOI:10.1016/S0013-7952(00)00076-4.

[9] 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(1), 63–8. DOI:10.1016/S0148-9062(97)00314-8.

[۱۰] نوروزی، م. و جلالی، س.م.ا. و کاکایی، ر. (۱۳۹۳). توسعه مدل تصادفی شبکه درزه‌ها با در نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه درزه. پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ، تهران، ایران.

[۱۱] نوروزی، م. و جلالی، س.م.ا. و کاکایی، ر. (۲۰۱۳). روابط آماری حاکم بر مشخصات هندسی ناپيوستگي‌ها. *International Conference on Mining Mineral Processing, Metallurgical and Environmental Engineering*, زنجان.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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 - International Society for Rock Mechanics.

[17] 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.

[18] Yu, X. (1992). *Stochastic Modeling of Rock Fracture Geometry*. M.S. Thesis, MIT, Cambridge, MA. URI: <http://hdl.handle.net/1721.1/12176>.

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

[20] 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.

[21] 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.

[22] 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.

[23] 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.

[24] Escuder Viruete, J., & Carbonell, R., & Jurado, M. J., & et al. (2001). Two-Dimensional Geostatistical Modeling and Prediction of the Fracture System in the Albala Granitic Pluton, SW Iberian Massif, Spain. *Journal of Structural Geology*, 23, 2011-2023. DOI:10.1016/S0191-8141(01)00026-8.

[25] Kulatilake, P. H. S. W., & Um, J., & Wang, M., & et al. (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.

[۲۶] گزارش زمین شناسی مهندسی مرحله دوم. (۱۳۸۶). طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران.

[27] Kulatilake, P. H. S. W., & Chen, J., & Teng, J., & et al. (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.

[28] Study on Possibility of Concrete Lining Omission in AGC (Access Gallery). (2013). Rudbar Lorestan Dam & Hydropower Plant, Pöyry Energy Ltd., Iran Water & Power Resources development Co.

[29] Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). Discontinuity Spacing in Rock. *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences & Geomechanics, Abstract* 13(5), 135-148. DOI:10.1016/0148-9062(76)90818-4.

[30] 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.

[31] 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.

[32] Lin, A., & Yamashita, K. (2013). Spatial Variations in Damage Zone Width Along Strike-Slip Faults: An Example from Active Faults in Southwest Japan. *Journal of Structural Geology*, 57, 1-15. DOI:10.1016/j.jsg.2013.10.006.

[33] Baecher, G. B. (1983). Statistical Analysis of Rock Mass Fracturing. *Journal of Mathematical Geology*, 15(2), 329-347. DOI 10.1007/BF01036074.

[34] 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.

[35] 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, 697–714. DOI:10.1007/s11004-007-9116-6.

[36] 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.

[37] 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.