

## ارائه الگوریتمی جهت تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا و استفاده از آن در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی

مجتبی ربیعی وزیری<sup>\*۱</sup>

<sup>۱</sup> قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء (ص)

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۲۷)

### چکیده

تعیین نوع و خصوصیات توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها از اهمیت ویژه‌ای در مباحث مربوط به مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی برخوردار است. عموماً توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب یا به صورت فرضی در نظر گرفته می‌شوند و یا به صورت مستقل از هم تعیین می‌گردند و وابستگی فضایی این پارامترها در تعیین توابع توزیع آن‌ها نادیده گرفته می‌شود. این موضوع باعث ایجاد عدم قطعیت در تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها می‌گردد. در این مطالعه با استفاده از روش‌های آماری و احتمالاتی و نیز روش‌های بررسی قابلیت اطمینان، الگوریتمی برای تعیین توابع توزیع ذکر شده ارائه گردید. بررسی‌ها نشان دهنده توانایی بالای این الگوریتم در تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها می‌باشند. در ادامه اقدام به تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در دیواره غربی معدن مس سرچشمه به عنوان مورد مطالعاتی شد و پایداری این دیواره با استفاده از توابع توزیع شناسایی شده، بررسی گردید. نتایج نشان داد تابع توزیع ترکیبی لاگ لوجستیک و ویبل ۳ پارامتری بهترین تابع توزیع برای توصیف جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها است. بررسی احتمال رخداد ناپایداری با استفاده از تابع توزیع ترکیبی شناسایی شده و تحت شیب‌های مختلف دیواره‌نهایی نشان داد، احتمال رخداد ناپایداری در دیواره‌نهایی غربی تحت شیب دیواره ۴۵ درجه حداکثر است و تحت شیب دیواره ۳۰ درجه دیواره‌نهایی کاملاً پایدار است. همچنین شیب بهینه دیواره‌نهایی غربی معدن مس سرچشمه ۲۹ درجه تعیین گردید.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل پایداری شیب، تحلیل احتمالاتی، تابع توزیع ترکیبی، موقعیت هندسی ناپیوستگی‌ها، روش شبیه‌سازی مونت کارلو.

### ۱. مقدمه

آن‌ها نیز دیده می‌شود. بنابراین، برای آنالیزی دقیق از رفتار مکانیکی توده‌سنگ لازم است ماهیت تصادفی درزه‌ها در مدل-سازی توده‌سنگ به کار رود. این ماهیت تصادفی مبین لزوم استفاده از آنالیزهای آماری جهت درک رفتار توده‌سنگ است. از جمله راه‌های کاربرد ماهیت تصادفی درزه‌ها در مدل‌سازی توده-سنگ استفاده از توابع توزیع پارامترهای دارای ماهیت تصادفی در تحلیل است [۶ و ۷]. از میان خواص هندسی درزه‌ها تعیین نوع و خصوصیات توابع توزیع جهت‌داری درزه‌ها شامل مقدار شیب و جهت شیب از اهمیتی ویژه در مباحث مکانیک سنگ برخوردار است [۸ و ۹]. تعیین این توابع توزیع و خصوصیات آن‌ها یکی از مراحل اساسی در مطالعات توده‌سنگ نظیر، مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ، خوشه‌بندی ناپیوستگی‌ها در توده-سنگ، تعیین ریزش‌های سنگی، بررسی قابلیت اطمینان سیستم-های ارائه شده در تحلیل‌های مربوط به توده‌سنگ و ... می‌باشد. با

در مهندسی سنگ، ناپیوستگی‌ها عامل تعیین کننده در رفتار توده‌سنگ محسوب می‌شوند [۱]. واژه ناپیوستگی عبارتی کلی برای تمامی سطوح جدایش موجود در سنگ‌ها شامل لایه‌بندی، گسل، زون برشی و ... بوده و درزه‌ها به عنوان متداول‌ترین نوع ناپیوستگی شناخته می‌شوند. ارزیابی ویژگی‌های درزه‌ها بخش مهمی از فرآیند مهندسی توده‌سنگ را تشکیل داده [۲]، و گامی ضروری برای طبقه‌بندی توده‌سنگ و طراحی‌های مهندسی ژئوتکنیک است [۳ و ۴]. مساله اصلی در مدل‌سازی توده‌سنگ، منتج شدن اطلاعات جمع‌آوری شده به تعریفی سه بعدی و دقیق از ساختارهای موجود در توده‌سنگ است [۵]. توده‌سنگ ذاتاً از مواد ناهمگن و ناهمسانگرد تشکیل شده است، این ویژگی تغییرپذیری ذاتی، در خواص هندسی درزه‌ها از جمله جهت‌داری

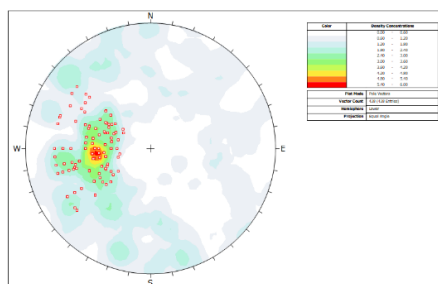
توزیع فضایی ناپیوستگی‌ها تعیین کننده رفتار توده‌سنگ در زمان حفر است. آن‌ها در مطالعه خود، برای توصیف پارامتر مقدار شیب از توزیع نرمال بهره گرفتند [۱۸]. ما و همکاران در سال ۲۰۱۸، با استفاده از تابع توزیع پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها و به وسیله روش شبیه‌سازی مونت کارلو شبکه ناپیوستگی‌ها در توده-سنگ را مدل کردند، آن‌ها در مطالعه خود برای جهت شیب درزه‌ها توزیع نرمال و برای مقدار شیب درزه‌ها توزیع‌های نرمال و یکنواخت را تعیین کردند [۱۹]. مروری بر تحقیقات انجام شده که در آن‌ها اقدام به تعیین توابع توزیع جهت‌داری ناپیوستگی‌ها و استفاده از آن‌ها در تحلیل شده است نشان می‌دهد که در اکثر این مطالعات توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب غالباً به صورت فرضی و یا به دلیل سهولت کاربرد یک توزیع نسبت به سایر توزیع‌ها، تعیین شده‌اند. در صورتی که این توابع توزیع بایستی بر اساس واقعیت‌های موجود تعیین شوند. همچنین این توابع توزیع اغلب به صورت مستقل از یکدیگر تعیین گردیده‌اند، و وابستگی فضایی این پارامترها در تعیین توابع توزیع آن‌ها نادیده گرفته شده است. در این مطالعه سعی بر آن است که با استفاده از روش‌های احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان، اقدام به ارائه الگوریتمی بهینه جهت تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها گردد. برای این منظور، از مورد مطالعاتی دیواره غربی معدن مس سرچشمه بهره گرفته شده است. در نهایت با استفاده از توابع توزیع شناسایی شده توسط الگوریتم ارائه شده اقدام به تحلیل پایداری دیواره غربی معدن با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو خواهد شد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. روش‌های احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان

اغلب پدیده‌هایی که در زندگی ما اتفاق می‌افتند، دارای عدم قطعیت‌هایی هستند که ما قادر به پیش‌بینی آن‌ها نمی‌باشیم. روش مقابله با این عدم قطعیت‌ها، بهره‌گیری از تحلیل قابلیت اطمینان است. بنابراین روش‌هایی در طراحی که مسئله عدم-قطعیت‌ها را در نظر می‌گیرند بسیار با اهمیت هستند. این روش‌ها بنام روش‌های تعیین قابلیت اطمینان مشهور می‌باشند. روش‌های بررسی قابلیت اطمینان به سه دسته روش‌های تحلیلی مانند روش ترکیب توزیع متغیرها [۲۰]، روش‌های تقریبی مانند روش-های تخمین نقطه‌ای [۲۱]، و مرتبه اول ممان دوم [۲۲]، و روش-های شبیه‌سازی مانند روش مونت کارلو تقسیم‌بندی می-شوند [۲۳]، که در این میان روش مونت کارلو با توجه به سهولت در کاربری و دقت در جواب‌های به دست آمده، از کاربرد بیشتری برخوردار است [۲۴]. در این روش با استفاده از یکسری

تعیین توابع توزیع جهت‌داری می‌توان انواع روش‌های احتمالاتی را که دانستن الگوی جهت‌داری ناپیوستگی‌ها در آن‌ها اهمیت دارد، در مدل‌سازی توده‌سنگ به کاربرد. در زمینه تحلیل احتمالاتی جهت‌داری ناپیوستگی‌ها و تعیین توابع توزیع آن‌ها مطالعات محدودی صورت گرفته است. پارک و همکاران در سال ۲۰۰۵، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو به تحلیل احتمالاتی پایداری شیب در مسیر بزرگراه بین ایالتی کارولینای شمالی اقدام کردند و در این تحلیل برای شبیه‌سازی آماری جهت‌داری ناپیوستگی‌ها از توزیع فیشر استفاده نمودند [۱۰]. باغبانان در سال ۲۰۰۸، در مطالعات خود در زمینه شبیه‌سازی تصادفی ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگ اظهار داشت که توابع توزیع جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، از جمله پارامترهای متغیر با اهمیت در این شبیه‌سازی می‌باشند [۱۱]. تخم‌چی و همکاران در سال ۲۰۱۱، و در مطالعه خود اقدام به خوشه‌بندی درزه‌ها نمودند، و از تابع توزیع نرمال برای برازش بر داده‌های جهت‌داری استفاده کردند [۱۲]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۴، به معرفی روش بهبود یافته شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بر اساس توزیع فیشر اقدام کردند. بررسی آن‌ها نشان داد که جهت‌داری‌های مربوط به قطب‌هایی که به مرز شبکه استریونت نزدیک و از طرف دیگر وارد استریونت می‌شوند تأثیر مهمی بر میانگین داده‌ها و ثابت فیشر دارند و سبب انحراف در مقادیر نهایی این پارامترها می‌شوند [۱۳]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی اعتبار روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد زمانی که فاصله‌داری از توزیع نمایی پیروی می‌کند، توزیع یکنواخت برای شبیه‌سازی موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها مناسب است [۱۴]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ و در مطالعات خود به بررسی توابع توزیع مربوط به خواص هندسی ناپیوستگی-ها اقدام کردند، آن‌ها برای دو پارامتر مقدار شیب و جهت شیب، سه توزیع نرمال، یکنواخت و لاگ نرمال را به ترتیب به‌عنوان مناسب‌ترین توابع توزیع تشخیص دادند [۱۵]. ژان و همکاران در سال ۲۰۱۷، اقدام به خوشه‌بندی داده‌های جهت‌داری با استفاده از هندسه فرکتال نمودند، نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که جهت-داری ناپیوستگی‌ها به صورت تصادفی در توده‌سنگ توزیع شده و قطب‌های این ناپیوستگی‌ها نیز در طبیعت و شبکه استریونت توزیع تصادفی دارند [۱۶]. لیو و همکاران در سال ۲۰۱۷، اقدام به شناسایی دسته درزه‌های موجود در توده‌سنگ بر اساس الگوریتمی موسوم به الگوریتم انتشار شباهت کردند، و از توزیع فیشر برای توصیف جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به دلیل سهولت کاربرد در شبیه‌سازی به روش مونت کارلو استفاده نمودند [۱۷]. هی و همکاران در سال ۲۰۱۸، بیان کردند که در اکثر موارد



شکل (۱). خطوط هم‌چگالی مربوط به قطب درزه‌های برداشت شده و قطب درزه‌های متعلق به دسته درزه اصلی

بعد از تعیین دسته درزه اصلی، برای تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها نیاز به تعیین توابع توزیع مقدار شیب و جهت شیب دسته درزه مورد مطالعه به صورت مستقل است. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزارهای @RISK و Minitab توزیع داده‌های مقدار شیب و جهت شیب با برازش طیف وسیعی از توابع توزیع مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت، که این توابع با استفاده از سه آزمون اندرسون - دارلینگ، کولموگروف - اسمیرنوف و کای ۲ شناسایی و رده‌بندی شدند. نتایج این بررسی برای برترین این توزیع‌ها در جدول (۱)، خلاصه شده است. در بسیاری از مطالعات با استفاده از یک مورد از آزمون‌های بالا تعیین تابع توزیع صورت می‌گیرد و یا تابع توزیعی به عنوان بهترین تعیین می‌شود که جزء برترین توابع توزیع شناسایی شده توسط هر سه آزمون باشد. این آزمون‌ها توزیع تجربی داده‌ها را با توزیع مورد مطالعه، از طریق آماره مربوط به آزمون مورد نظر مقایسه کرده و با تعیین سطح اهمیت و مقدار بحرانی آماره برای هر آزمون، مشخص می‌کنند که فرض پیروی توزیع تجربی داده‌ها از توزیع مورد مطالعه قابل قبول است یا این فرض رد می‌شود، آزمون‌های مختلف از این طریق و با مقایسه آماره‌های محاسبه شده با مقدار بحرانی آماره‌ها در سطوح اهمیت مختلف، توزیع‌های مورد مطالعه را رتبه‌بندی می‌کنند. از آنجایی که هر یک از این آزمون‌ها پارامترهای خاصی را برای تعیین بهترین تابع توزیع در نظر می‌گیرند، نتایج حاصل از هر یک از این آزمون‌ها در مقایسه با آزمون‌های دیگر اختلافاتی را نشان می‌دهد. این اختلاف‌ها مهندسين طراح را در انتخاب بهترین تابع توزیع جهت‌داری ناپیوستگی‌ها با تردید روبه‌رو می‌کند. در نتیجه لزوم ارائه روشی که بتواند بهترین تابع توزیع را برای جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها بر اساس نتایج واقعی تعیین کند، اهمیت پیدا می‌کند. در ادامه توابع توزیع مستقل تعیین شده برای مقدار شیب و جهت شیب دسته درزه مورد مطالعه که با توجه به سه آزمون بالا در رتبه‌های اول تا سوم قرار دارند، برای بررسی و تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی

اعداد تصادفی استخراج شده از تابع توزیع احتمال متغیرها، تابع نهایی شبیه‌سازی می‌شود [۲۵]. مراحل مختلف این روش عبارتند از:

- ۱- اخذ نمونه‌های محدودی از پارامترهای تصادفی سیستم.
- ۲- تجزیه و تحلیل اطلاعات خام به دست آمده.
- ۳- برآورد و تعیین نوع تابع توزیع احتمال حاکم بر نمونه‌ها و به دست آوردن پارامترهای آماری آن.
- ۴- تولید مقادیر تصادفی برحسب نوع تابع توزیع احتمال تطابق یافته و گرفتن پارامترهای جدید آماری توزیع مربوطه.
- ۵- ارزیابی عملکرد سیستم با استفاده از مقادیر تولید شده، به عنوان ورودی و برآورد خروجی‌های سیستم.

## ۲-۲. تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا

در این مطالعه، از اطلاعات مربوط به خواص هندسی ناپیوستگی‌های موجود در دیواره غربی معدن مس سرچشمه به عنوان مورد مطالعاتی واقعی جهت شبیه‌سازی و ارزیابی الگوریتمی محاسباتی - احتمالاتی، برای تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها استفاده شد. کانسار مس سرچشمه متشکل از یک توده گرانودیوریتی محصور در یک توده آندزیتی است که به وسیله دایک‌های متعددی قطع شده است [۲۶]. همچنین دگرسانی‌های مختلفی این مجموعه را تحت تأثیر قرار داده که علاوه بر خواص کانی‌شناسی، بر پارامترهای مقاومتی سنگ‌ها نیز تأثیر داشته است [۲۷]. این تأثیر باعث کاهش پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ و ایجاد ناپایداری در دیواره‌های معدن، به خصوص دیواره غربی شده است.

در معدن مس سرچشمه ویژگی‌های مکانیک‌سنگی، شرایط هندسی شیب‌نهایی، خصوصیات فیزیکی و هندسی شکستگی‌ها، نامناسب‌ترین شرایط پایداری را برای دیواره غربی معدن ایجاد کرده است. در نتیجه لزوم بررسی‌های مکانیک‌سنگی دقیق‌تر و با قابلیت اطمینان بالاتر در این دیواره به شدت احساس می‌شود. یکی از مهم‌ترین مراحل لازم برای بهره‌گیری از روش‌های احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان در مطالعات مکانیک‌سنگی تعیین دقیق توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها می‌باشد.

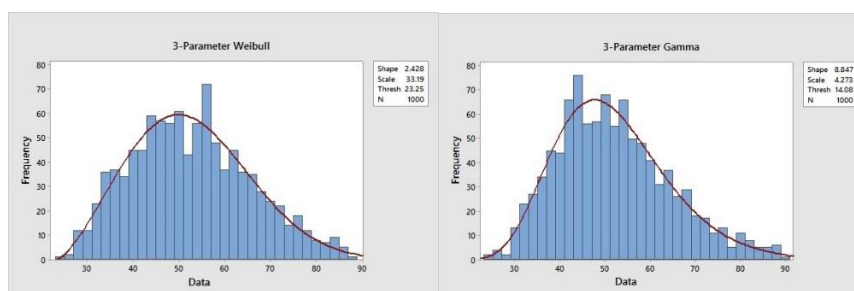
در این مطالعه برای تعیین این توابع توزیع، ابتدا برداشت درزه‌ها در دیواره غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش خط برداشت انجام شد. نتایج این برداشت نشان می‌دهد که در دیواره غربی معدن درزه‌ها با جهت‌داری‌های مختلف توزیع شده‌اند و یک دسته درزه اصلی در این دیواره قابل مشاهده است (شکل (۱)).

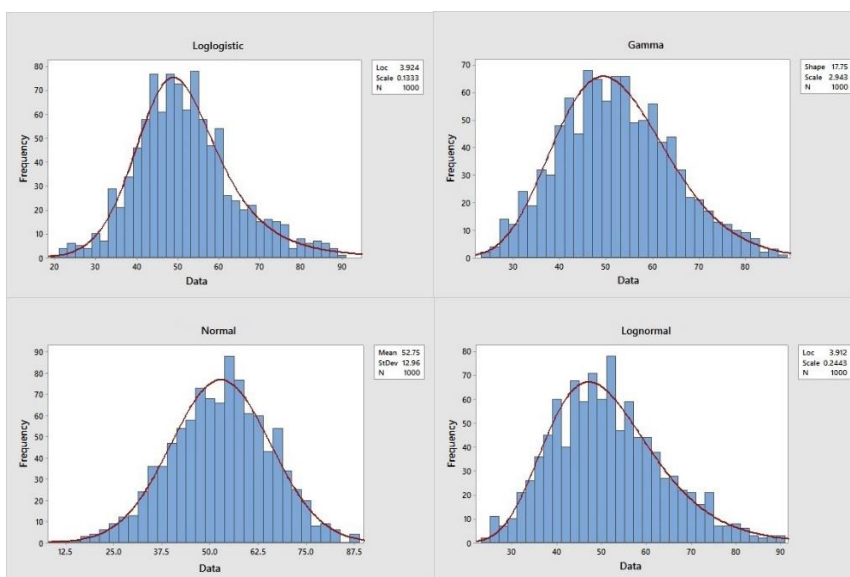
روند ترکیب به این صورت است که، داده‌های شبیه‌سازی شده برای هر یک از توابع مقدار شیب با داده‌های شبیه‌سازی شده برای هر یک از توابع جهت شیب به صورت کاملاً تصادفی و دو به دو ترکیب شده و هر یک از ترکیب‌های حاصل شده به عنوان یک قطب ناپیوستگی معرفی می‌گردد، در نهایت به تعداد داده‌های شبیه‌سازی شده قطب ناپیوستگی خواهیم داشت. در ادامه، قطب درزه‌های شبیه‌سازی شده، که نشان دهنده موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا می‌باشند، در شبکه استریونت ترسیم می‌گردند. در نهایت ترکیبی از توابع توزیع مستقل شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب که مقدار شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از آن حداقل اختلاف را با مقدار شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از برداشت‌های میدانی دارد، به عنوان بهترین تابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها معرفی شد. لازم به ذکر است در صورتی که حداقل اختلاف دو ترکیب شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی با مقدار شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از برداشت‌های میدانی برابر باشد، ترکیب شبیه‌سازی شده‌ای که مجموع ضریب تغییرات مقدار شیب و جهت شیب آن حداقل است به عنوان ترکیب بهینه انتخاب خواهد شد. همان‌طور که در شکل (۵) قابل مشاهده است، ترکیب توابع توزیع لاگ لجستیک و ویبل ۳ پارامتری برای مقدار شیب و جهت شیب، بیان‌کننده بهترین تابع توزیع ترکیبی برای توصیف جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها بوده، در صورتی که ترکیب توابع توزیع گامای ۳ پارامتری برای هر دو پارامتر مقدار شیب و جهت شیب، نشان دهنده بدترین تابع توزیع ترکیبی برای توصیف دسته درزه مورد مطالعه می‌باشد.

ناپیوستگی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند، برای این منظور با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و همچنین با در نظر گرفتن طبیعت این داده‌ها، تعداد ۱۰۰۰ داده از توزیع اولیه شناسایی شده شبیه‌سازی گردید و توابع توزیع مستقل شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب تعیین شدند. توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب به ترتیب در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده‌اند. برای تعیین بهترین تابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها، لازم است توابع توزیع مستقل شبیه‌سازی شده برای مقدار و جهت شیب دو به دو با هم ترکیب شده تا مناسب‌ترین ترکیب که نتایجی نزدیک به نتایج برداشت‌های میدانی را ارائه می‌کند و همچنین پراکندگی و ضریب تغییرات کمتری را ایجاد می‌نماید، تعیین شود. به این منظور، توابع توزیع مستقل شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب دو به دو و به روش شبیه‌سازی مونت کارلو با هم ترکیب شدند. روند این ترکیب در شکل (۴) نشان داده شده است.

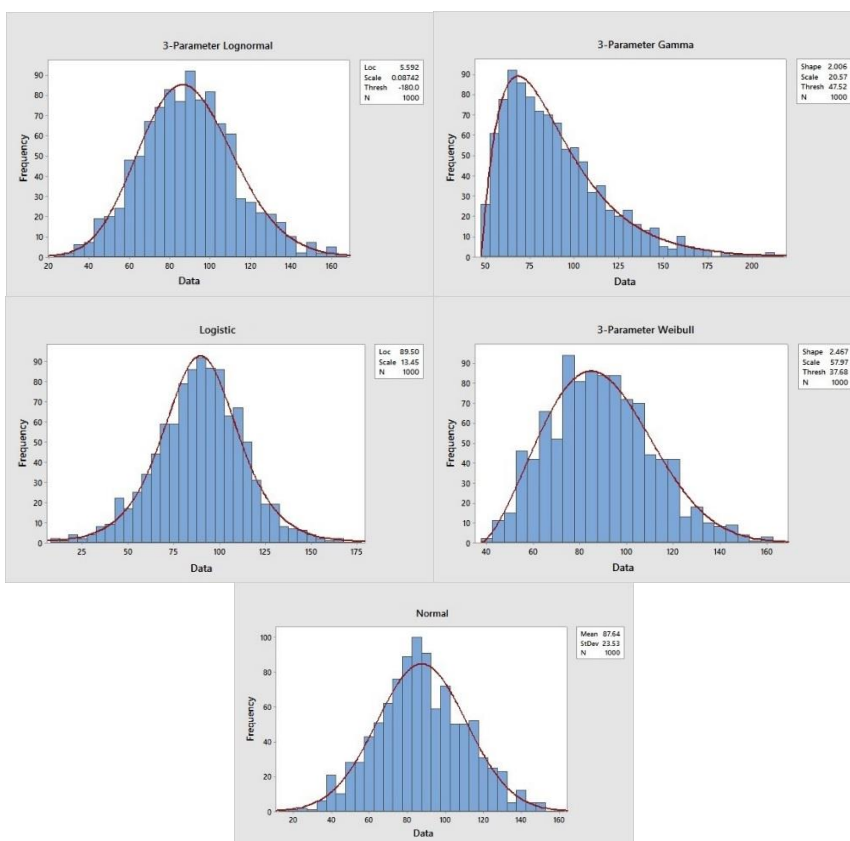
جدول (۱). رتبه‌بندی توابع توزیع شناسایی شده برای جهت‌داری

| تابع توزیع      |  | Chi - Squared |      | Anderson - Darling |      | Kolmogorov - Smirnov |      |
|-----------------|--|---------------|------|--------------------|------|----------------------|------|
|                 |  | Dip Direction | Di P | Dip Direction      | Di P | Dip Direction        | Di P |
| Beta            |  | ۷             | ۱۱   | ۱۱                 | ۱۱   | ۱۲                   | ۱۲   |
| Gamma           |  | ۹             | ۶    | ۶                  | ۴    | ۵                    | ۳    |
| Gamma 3P        |  | ۳             | ۵    | ۱                  | ۳    | ۳                    | ۵    |
| Log-Logistic    |  | ۱۱            | ۴    | ۹                  | ۶    | ۷                    | ۲    |
| Log-Logistic 3P |  | ۴             | ۷    | ۵                  | ۷    | ۴                    | ۴    |
| Logistic        |  | ۱             | ۱۰   | ۱۰                 | ۹    | ۱۰                   | ۹    |
| Lognormal       |  | ۵             | ۳    | ۷                  | ۱    | ۶                    | ۱    |
| Lognormal 3 P   |  | ۶             | ۸    | ۲                  | ۵    | ۲                    | ۶    |
| Normal          |  | ۲             | ۱    | ۴                  | ۸    | ۸                    | ۸    |
| Uniform         |  | N/A           |      | ۱۲                 | ۱۲   | ۹                    | ۱۱   |
| Weibull         |  | ۱۰            | ۹    | ۸                  | ۱۰   | ۱۱                   | ۱۰   |
| Weibull 3P      |  | ۸             | ۲    | ۳                  | ۲    | ۱                    | ۷    |





شکل (۲). توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب



شکل (۳). توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای جهت شیب

بررسی و از آنجایی که تعدادی از درزه‌های متعلق به دسته درزه اصلی پتانسیل ریزش نوع صفحه‌ای را داشتند، برای محاسبه فاکتور ایمنی از رابطه محاسبه فاکتور ایمنی ریزش نوع صفحه‌ای استفاده شد، این رابطه به صورت زیر می‌باشد:

$$F \cdot S = \frac{CA + (W(\cos\alpha - sc \times \sin\alpha) - U - V \sin\alpha + T \cos\theta) \tan\phi}{W(\sin\alpha + sc \times \cos\alpha) + V \cos\alpha - T \sin\theta} \quad (1)$$

$$z = H(1 - \sqrt{\cot\beta \tan\alpha}) \quad (2)$$

$$A = \frac{H-z}{\sin\alpha} \quad (3)$$

$$W = \frac{\gamma_r H^2}{2} \left( \left( 1 - \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right) \cot\alpha - \cot\beta \right) \quad (4)$$

$$U = \frac{\gamma_w z_w A}{2} \quad (5)$$

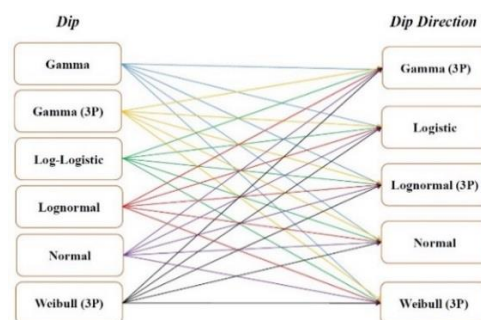
$$V = \frac{\gamma_w z_w^2}{2} \quad (6)$$

$H$  = ارتفاع شیب،  $\alpha$  = زاویه سطح لغزش،  $\beta$  = زاویه شیب،  $SC$  = ضریب لـرزه‌ای،  $\gamma_r$  = وزن مخصوص سنگ،  $\gamma_w$  = وزن مخصوص آب،  $C$  = چسبندگی،  $\phi$  = زاویه اصطکاک داخلی،  $T$  = نیروی پیچ سنگ،  $\theta$  = زاویه میل پیچ سنگ،  $Z$  = ارتفاع ترک کششی،  $Z_w$  = ارتفاع آب در ترک کششی،  $W$  = وزن بلوک ایجاد شده روی سطح لغزش،  $A$  = مساحت سطح لغزش،  $U$  = نیروی عمودی فشار آب روی سطح لغزش،  $V$  = نیروی افقی فشار آب در ترک کششی.

برای حالت بدون ترک کششی  $Z$  و  $Z_w$  برابر صفر است، و  $U$  از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

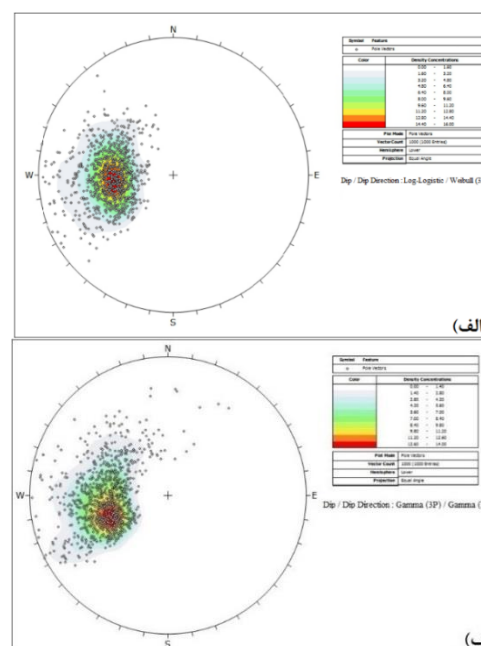
$$U = \frac{\gamma_w H^2}{4 \sin\alpha} \quad (7)$$

تجربه‌های گسترده‌ای برای تعیین و کاربرد فاکتور ایمنی در شرایط مختلف ژئوتکنیکی برای خاک و سنگ وجود دارند. از این گذشته، عموماً مقادیر فاکتورهای ایمنی قابل قبول برای شیب‌های طراحی شده متغیر بوده و با توجه به اهداف مورد نظر تعیین می‌شوند. با این وجود به علت عدم قطعیت در تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی، فاکتور ایمنی محاسبه شده همواره دارای خطا است. برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها در محاسبه فاکتور ایمنی، تحلیل به روش‌های احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان بهترین گزینه محسوب می‌شود، که لازمه آن در اختیار داشتن توابع توزیع پارامترهای ژئوتکنیکی دارای عدم قطعیت است. روش‌های ارائه شده برای تحلیل احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان، به دلیل عدم اطمینان‌های ناشی از خطاهای موجود در اطلاعات مورد کاربرد و همچنین اطلاعات



شکل (۴). روند ترکیب توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار

شیب و جهت شیب



شکل (۵). ارزیابی توابع توزیع ترکیبی جهت‌داری. (الف) - ترکیب

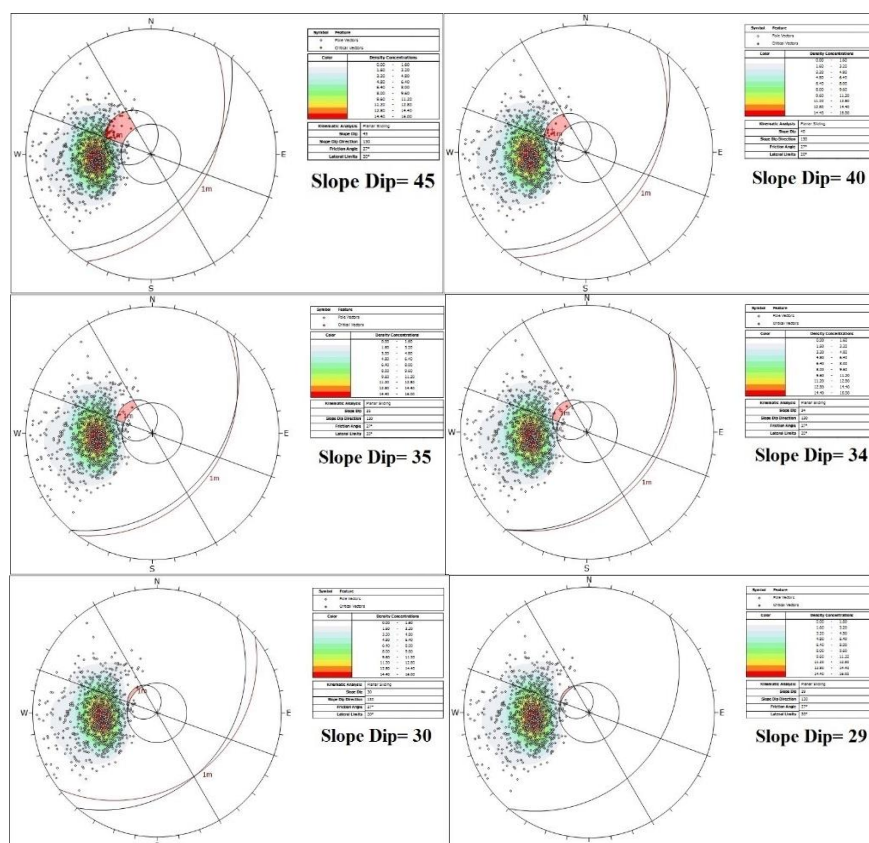
توزیع لاگ لوجستیک برای مقدار شیب و توزیع ویبل ۳ پارامتری برای جهت شیب به عنوان بهترین ترکیب. (ب) - ترکیب توزیع گامای ۳ پارامتری برای مقدار شیب و جهت شیب به عنوان بدترین ترکیب

## ۳-۲. تحلیل پایداری با استفاده از توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها

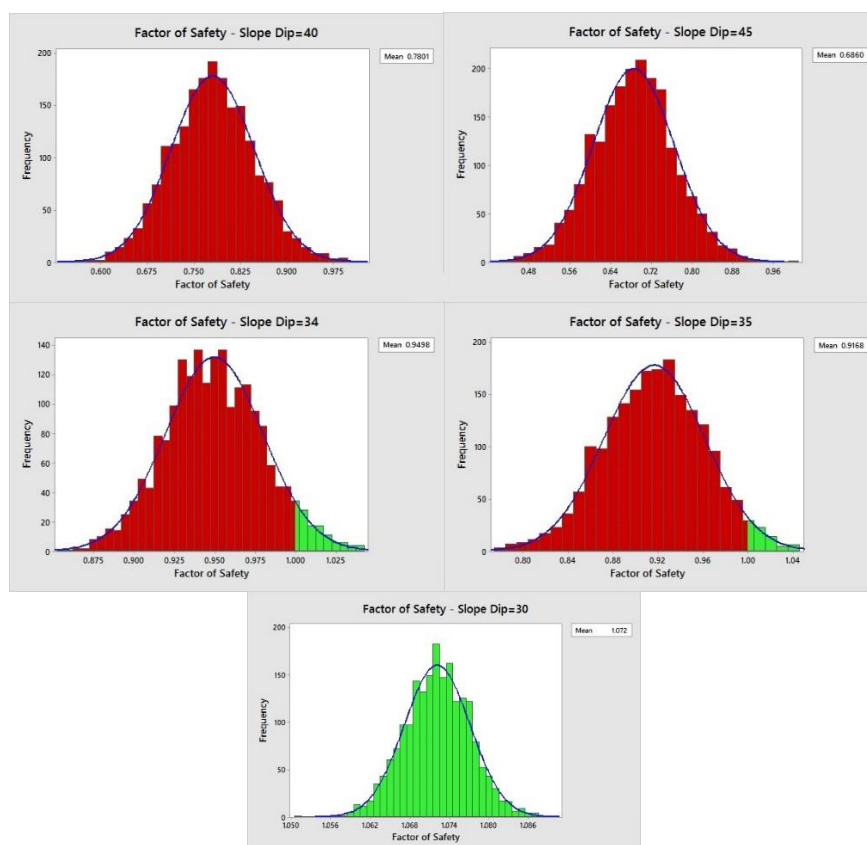
تعیین شیب بهینه دیواره‌نهایی معدن که تحت آن با باطله-برداری حداقل، پایداری دیواره نیز تأمین گردد از مهم‌ترین بخش‌های طراحی معادن محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی پایداری شیب‌های سنگی فاکتور ایمنی است، این فاکتور به طور کلی به صورت نسبت نیروهای مقاوم در برابر ریزش به نیروهای مخرب و عامل ریزش تعریف می‌شود. مقدار حدی فاکتور ایمنی ۱ است، اما در مباحث مربوط به طراحی فاکتور ایمنی ۱/۲ برای شیب‌های غیر حساس معدن و ۱/۵ برای شیب‌های دارای رمپ خطرناک یا زیرساخت‌هایی مانند سنگ شکن‌های داخل کواک در نظر گرفته می‌شود [۲۸]. در این

ناقص از خواص مصالح مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۴]. روش‌های بررسی قابلیت اطمینان مکمل‌هایی مفید برای روش‌های قطعی جهت افزایش اطمینان به نتایج محسوب می‌شوند [۲۹]. از آنجایی که پارامترهای ورودی به تحلیل در بررسی پایداری و تعیین فاکتور ایمنی کاملاً دقیق نیستند و تعیین این پارامترها اغلب با خطا همراه است، عدم قطعیت با خروجی‌های تحلیل پیوند خورده است. عدم استفاده از روش‌های بررسی قابلیت اطمینان در اینگونه موارد باعث بیش از حد پایین یا بیش از حد بالا ارزیابی کردن فاکتور ایمنی می‌گردد. در نتیجه طراحان در اکثر موارد سعی در حداکثر کردن فاکتور ایمنی دارند تا احتمال شکست طراحی را به حداقل مقدار ممکن برسانند، این روش نمی‌تواند فاکتور ایمنی بهینه را برای طراحی تعیین کند [۳۰]، در نتیجه نیاز به استفاده از روش‌های بررسی قابلیت اطمینان در تحلیل احساس می‌شود. روش‌های بررسی قابلیت اطمینان از جمله روش شبیه‌سازی مونت کارلو شرایط لازم را برای بهبود تحلیل‌های ژئوتکنیکی و محاسبه احتمال شکست و فاکتور ایمنی فراهم نموده است [۳۱]. در بررسی‌های قابلیت اطمینان به دلیل محدودیت‌های موجود اغلب از مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌های اولیه استفاده می‌شود و ارتباط و همبستگی بین توابع توزیع پارامترهای درزه‌ها در محاسبات نادیده گرفته شده است [۳۱]. با تعیین مناسب‌ترین توابع توزیع برای پارامترهای ورودی به تحلیل و استفاده از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو در بررسی قابلیت اطمینان پایداری شیب‌های سنگی می‌تواند با کاهش عدم قطعیت نتایج خروجی، اطمینان به نتایج تحلیل را افزایش داد [۱۰ و ۳۱]. از آنجایی که در تعیین و محاسبه پارامترهای مربوط به جهت‌داری ناپیوستگی‌ها عدم قطعیت‌هایی وجود دارد، در این بخش با توجه به تعیین مناسب‌ترین توابع توزیع ترکیبی جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها با استفاده از الگوریتم ارائه شده، اقدام به تعیین فاکتور ایمنی برای شیب‌های مختلف دیواره‌نهایی غربی معدن مس سرچشمه با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو گردید و رخداد ناپایداری تحت شیب‌های مختلف دیواره‌نهایی و نیز تحت درزه‌های بحرانی مستعد برای ریزش بررسی شد. به این منظور، بعد از تعیین بهترین تابع توزیع ترکیبی جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها برای دسته درزه اصلی موجود در دیواره غربی معدن مس سرچشمه، درزه‌هایی از این دسته درزه که با توجه به این تابع توزیع پتانسیل ریزش نوع صفحه‌ای را داشتند،

به ازای شیب‌های مختلف دیواره تعیین شدند، شکل (۶) درزه‌های بحرانی مستعد برای ریزش نوع صفحه‌ای به ازای شیب‌های مختلف دیواره‌نهایی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش شیب دیواره تعداد درزه‌های بحرانی نیز کاهش می‌یابد، به گونه‌ای که کاهش تا شیب دیواره ۲۹ درجه موجب می‌شود که هیچ درزه بحرانی که مستعد ریزش است وجود نداشته باشد و احتمال ریزش تحت درزه‌های بحرانی به صفر کاهش یابد. باید توجه داشت که ایجاد فصل مشترک با دیواره به تنهایی باعث اینکه درزه‌ها عامل ایجاد ریزش شوند نیست، بلکه فقط مستعد بودن درزه‌ها را برای ریزش نشان می‌دهد، در نتیجه بایستی فاکتور ایمنی را برای درزه‌های مستعد برای ریزش تعیین کرد، تا این موضوع که ریزش تحت درزه‌های مستعد رخ خواهد داد یا خیر مشخص گردد. با استفاده از تحلیل تعادل حدی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو فاکتور ایمنی درزه‌های مستعد برای ریزش تعیین گردید، برای این منظور تحت شیب‌های مختلف دیواره‌نهایی، درزه‌های مستعد برای ریزش از تابع توزیع ترکیبی شناسایی شده برای جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها استخراج شده و از آنجایی که مقدار شیب این درزه‌ها در فاکتور ایمنی دیواره مؤثر است، مقدار شیب آن‌ها وارد روابط محاسبه فاکتور ایمنی شد و تابع توزیع فاکتور ایمنی دیواره‌نهایی به روش شبیه‌سازی مونت کارلو و تحت شیب‌های مختلف دیواره شبیه‌سازی گردید. نتایج این شبیه‌سازی به ازای مقادیر مختلف شیب دیواره-نهایی در شکل (۷) آورده شده است. در شکل (۷) ستون‌های فراوانی قرمز رنگ، فراوانی فاکتورهای ایمنی کمتر از مقدار حدی ۱، و ستون‌های فراوانی سبز رنگ، فراوانی فاکتورهای ایمنی بیشتر از مقدار حدی ۱ را نشان می‌دهند. با در نظر گرفتن موقعیت ناپیوستگی‌ها با توجه به تابع توزیع ترکیبی آن‌ها و شیب‌های ۴۵، ۴۰، ۳۵، ۳۴، ۳۰ و ۲۹ درجه برای دیواره، موقعیت درزه‌های بحرانی مستعد برای ریزش تعیین گردید، سپس اقدام به محاسبه و بررسی فاکتور ایمنی تحت درزه‌های مستعد برای ریزش شد و احتمال رخداد ناپایداری تحت این درزه‌ها بررسی گردید. نتایج نشان داد، در این مورد مطالعاتی و تحت شیب‌های دیواره‌نهایی مورد بررسی و نیز در حالت حدی فاکتور ایمنی ۱، دیواره‌نهایی غربی تحت شیب دیواره ۴۵ درجه و شیب دیواره ۳۰ درجه به ترتیب بیشترین و کمترین احتمال رخداد ریزش و ناپایداری را دارد.



شکل (۶). درزه‌های بحرانی مستعد برای ریزش نوع صفحه‌ای به ازای شیب‌های مختلف دیواره



شکل (۷). تابع توزیع فاکتور ایمنی تحت شیب‌های مختلف دیواره

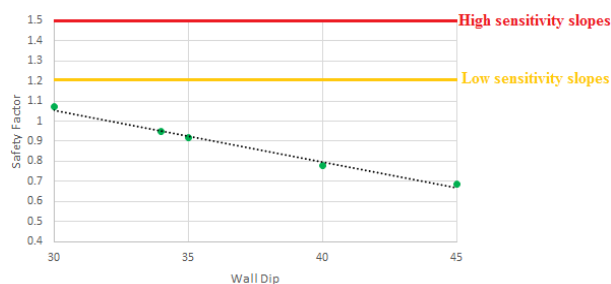
توزیع ورودی‌ها را فراهم می‌کند و می‌توان با کاهش عدم قطعیت موجود در خروجی‌های تحلیل از طریق کاهش عدم قطعیت ورودی‌ها احتمال شکست طراحی را به حداقل مقدار ممکن رساند. بر اساس بررسی‌های انجام شده در بخش‌های قبل، الگوریتمی جهت تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری برای توصیف موقعیت ناپیوستگی‌ها ارائه شد که در شکل (۹) آورده شده است. به این منظور ابتدا دسته درزه مورد نظر و درزه‌های متعلق به آن با استفاده از شبکه استریونوت شناسایی و تعیین می‌گردند. سپس برای استفاده از الگوریتم پیشنهادی به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- تعیین و رتبه‌بندی توابع توزیع مقدار شیب و جهت شیب درزه‌های متعلق به دسته درزه مورد مطالعه با استفاده از آزمون-های اندرسون - دارلینگ، کولموگروف - اسمیرنوف و کای ۲، به صورت مستقل.

۲- انتخاب توابع توزیعی که با توجه به نتایج هر یک از سه آزمون بالا رتبه‌های اول تا سوم را دارند.

۳- شبیه‌سازی  $n$  داده از روی توابع توزیع شناسایی شده در مرحله قبل به وسیله روش شبیه‌سازی مونت کارلو و بر اساس ماهیت داده‌ها، به این ترتیب که شبیه‌سازی داده‌های مقدار شیب تنها در بازه ۰-۹۰ درجه و جهت شیب تنها در بازه ۰-۳۶۰ درجه انجام می‌شود. روند انجام این شبیه‌سازی به صورت زیر می‌باشد: ابتدا پارامتر اولیه مورد نظر را به عنوان یک تابع توزیع تجمعی احتمال رسم کرده، به نحوی که مقادیر متغیر روی بعد افقی یا محور  $x$ ها و احتمال‌های مربوطه از ۰ تا ۱ روی بعد عمودی یا محور  $y$ ها باشند، سپس به وسیله یک مولد اعداد تصادفی، یک عدد اعشاری تصادفی بین ۰ تا ۱ انتخاب می‌شود و از نقطه‌ای روی محور  $y$ ها که متناظر با این عدد اعشاری تصادفی است خطی به موازات محور  $x$ ها رسم می‌شود تا منحنی توزیع تجمعی را قطع کند. در ادامه از نقطه برخورد فوق خطی عمود بر محور  $x$ ها رسم می‌شود و مقدار متغیر  $x$  متناظر با این نقطه تقاطع یادداشت شده و این مقدار  $x$  به عنوان یک مقدار نمونه اختیار می‌شود. مراحل ذکر شده را تکرار کرده تا آن تعداد از متغیرهای تصادفی که مورد نیاز می‌باشند، شبیه‌سازی گردند و در نهایت توابع توزیع شبیه‌سازی شده بر اساس نوع و خصوصیات توابع توزیع اولیه تعیین می‌گردند.

۴- ترکیب توابع توزیع شبیه‌سازی شده با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو. در این مرحله توابع توزیع شبیه‌سازی شده در مرحله قبل برای مقدار شیب و جهت شیب دو به دو با هم ترکیب می‌گردند. برای ترکیب توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب، هر یک از داده‌های موجود در تابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب به صورت کاملاً تصادفی با یک داده موجود در تابع توزیع شبیه‌سازی شده برای



شکل (۸). فاکتور ایمنی تحت شیب‌های مختلف دیواره

از آنجایی که در این مورد مطالعاتی در شیب دیواره ۳۰ درجه فاکتور ایمنی ۱/۰۷۲ است، شیب بهینه دیواره‌نهایی ۲۹ درجه در نظر گرفته می‌شود تا هیچگونه درزه بحرانی برای آوردن فاکتور ایمنی زیر حد مجاز ذکر شده برای شیب‌ها [۲۸]، وجود نداشته باشد (شکل (۸)). با داشتن تابع توزیع فاکتور ایمنی دیواره‌نهایی که تحت شیب‌های مختلف دیواره شبیه‌سازی شده است و با محاسبه درصد احتمال وجود فاکتور ایمنی کمتر از حد مجاز از این تابع توزیع، می‌توان رخداد ناپایداری را به ازای شیب‌های مختلف دیواره‌نهایی مورد مطالعه قرار داد. لازم به ذکر است که با در دسترس بودن تابع توزیع فاکتور ایمنی دیواره‌نهایی که تحت شیب‌های مختلف دیواره شبیه‌سازی شده است، می‌توان برای مقادیر مختلف فاکتور ایمنی با توجه به اهداف مورد نظر، احتمال رخداد ناپایداری را بررسی نمود.

### ۳. نتایج و بحث

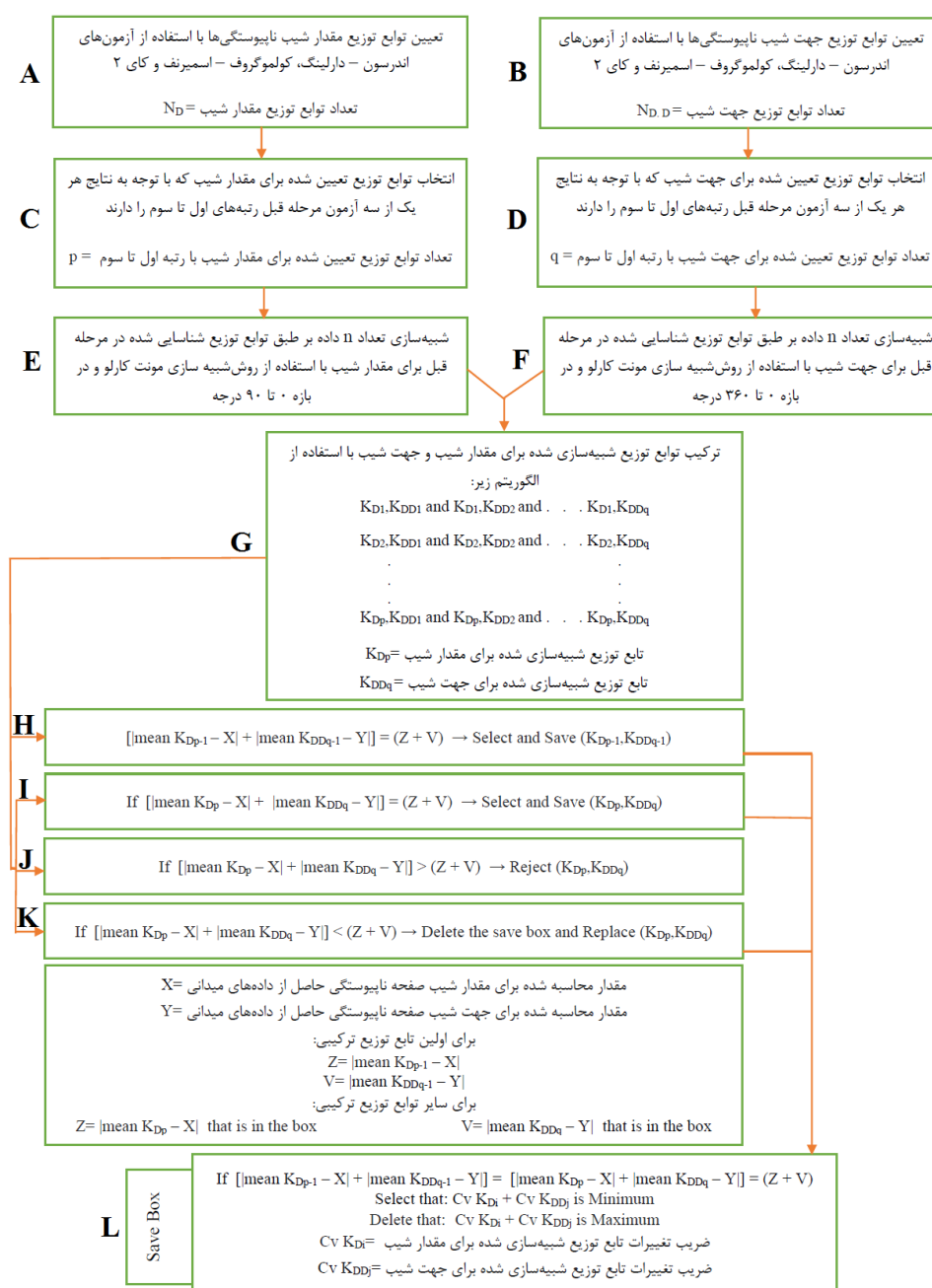
#### ۳-۱. ارائه الگوریتمی برای تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها

توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب اکثراً به صورت فرضی و یا به دلیل سادگی و سهولت کاربرد یک توزیع نسبت به سایر توزیع‌ها تعیین گردیده‌اند، در صورتی که توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری باید بر اساس واقعیت‌های موجود تعیین شوند، همچنین تعیین توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب در اغلب موارد به صورت مستقل از یکدیگر صورت گرفته، و وابستگی فضایی این پارامترها در تعیین توابع توزیع آن‌ها نادیده گرفته شده است. در این مطالعه با استفاده از روش‌های احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان، اقدام به ارائه الگوریتمی جهت تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا گردید. ارائه این الگوریتم ضمن ایجاد وحدت رویه در روند تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها، امکان استفاده از تحلیل‌های دقیق احتمالاتی و قابلیت اطمینان از طریق تعیین توابع توزیع پارامترهای خروجی مورد نظر با استفاده از توابع

مقدار شیب و جهت شیب با مقدار شیب و جهت شیب محاسبه شده حاصل از برداشت‌های میدانی برای دسته درزه مورد مطالعه مقایسه شده و اولین ترکیب انتخاب می‌گردد. سپس این روند برای سایر ترکیب‌های شناسایی شده در مرحله ۴ نیز انجام می‌شود و چنانچه برای ترکیبی اختلاف بین میانگین توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب با مقدار شیب و جهت شیب محاسبه شده حاصل از برداشت‌های میدانی کمتر از ترکیب اول باشد جایگزین ترکیب اول شده و به عنوان بهترین تابع توزیع ترکیبی جهت‌داری ناپیوستگی‌ها تعیین می‌گردد.

جهت شیب ترکیب می‌گردد و یک قطب شبیه‌سازی شده که نشان دهنده موقعیت یک ناپیوستگی در فضا است شکل می‌گیرد. این روند آنقدر ادامه می‌یابد تا کلیه داده‌های مقدار شیب و جهت شیب به صورت کاملاً تصادفی با یکدیگر ترکیب شده و توزیع شبیه‌سازی شده شکل گیرد.

۵- تعیین ترکیبی از توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب، که جهت‌داری صفحه ناپیوستگی حاصل از آن کمترین اختلاف را با مقدار محاسبه شده برای جهت‌داری صفحه ناپیوستگی حاصل از برداشت‌های میدانی دارد. به این منظور اختلاف بین میانگین توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای



شکل (۹). الگوریتم ارائه شده برای تعیین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا

#### ۴. نتیجه‌گیری

جهت‌داری از مهم‌ترین ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها محسوب می‌شود و تعیین تابع توزیع آن در تحلیل‌های مهندسی سنگ نقشی اساسی دارد. بررسی مطالعات پیشین نشان داد، توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب اغلب به صورت فرضی و یا به دلیل سادگی و سهولت کاربرد یک توزیع نسبت به سایر توزیع‌ها تعیین گردیده‌اند، در صورتی که توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری باید بر اساس واقعیت‌های موجود تعیین شوند، همچنین تعیین توابع توزیع پارامترهای جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب به صورت مستقل از یکدیگر صورت گرفته، و وابستگی فضایی این پارامترها در تعیین توابع توزیع آن‌ها نادیده گرفته شده است. در این مطالعه با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در بررسی قابلیت اطمینان، اقدام به ارائه الگوریتمی جهت تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا گردید. الگوریتم ارائه شده از قابلیت بالایی در مدل‌سازی شبکه ناپیوستگی‌ها در توده سنگ بر اساس جهت‌داری برخوردار است. الگوریتم ارائه شده ضمن سهولت کاربرد، بر اساس واقعیت‌های موجود در برداشت‌های میدانی عمل کرده و وابستگی فضایی داده‌های جهت‌داری شامل مقدار شیب و جهت شیب را در نظر می‌گیرد. الگوریتم ارائه شده قابلیت کاربرد در مورد هر دو نوع جهت‌داری‌های متمرکز در یک سوی مرز شبکه و جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه را دارد. با تعیین بهترین تابع توزیع ترکیبی جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا می‌توان بهترین تابع توزیع مستقل جهت‌داری برای توصیف مقدار شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها را نیز تعیین نمود. بر این اساس در این مطالعه مناسب‌ترین توابع توزیع مستقل برای برازش بر داده‌های مقدار شیب ناپیوستگی‌ها توابع، لاگ نرمال، ویبل ۳ پارامتری، لاگ لوجستیک، گاما، گامای ۳ پارامتری و نرمال و جهت شیب ناپیوستگی‌ها توابع، گامای ۳ پارامتری، لاگ نرمال ۳ پارامتری، ویبل ۳ پارامتری، لوجستیک و ویبل ۳ پارامتری بهترین تابع توزیع ترکیبی جهت‌داری برای توصیف موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها محسوب می‌شود، در نتیجه بهترین تابع توزیع مستقل جهت‌داری برای توصیف موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها تابع لاگ لوجستیک برای مقدار شیب و ویبل ۳ پارامتری برای جهت شیب می‌باشند. از توابع توزیع تعیین شده بر اساس الگوریتم ارائه شده می‌توان در مطالعاتی نظیر تحلیل احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان پایداری سازه‌های حفر شده در سنگ‌ها و به طور کلی هر تحلیلی در مهندسی سنگ که جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها از پارامترهای تأثیرگذار در آن می‌باشند،

۶- در صورتی که اختلاف بین میانگین توابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب و جهت شیب با مقدار شیب و جهت شیب محاسبه شده حاصل از برداشت‌های میدانی در مورد چند ترکیب یکسان و کمینه باشد، ترکیبی با حداقل ضریب تغییرات، ترکیب برتر خواهد بود.

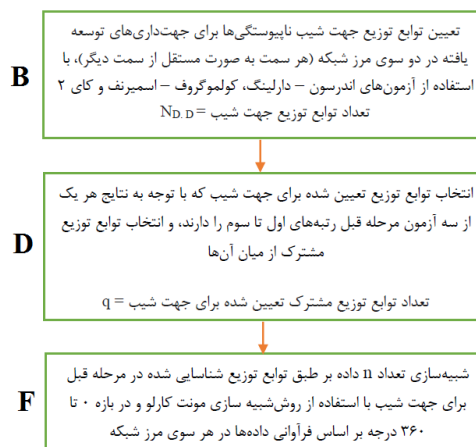
۷- در نهایت ترکیب حاصل از روند محاسباتی - احتمالاتی انجام شده به عنوان بهترین تابع توزیع ترکیبی جهت‌داری برای توصیف موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها و توابع توزیع مستقل حاصل از آن به عنوان بهترین توابع توزیع مستقل جهت‌داری برای توصیف مقدار شیب و جهت شیب تعیین می‌گردند.

جهت استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه (OEBELHP) با تغییر در مراحل ۱ تا ۳ (شکل ۱۰)، به صورت زیر عمل می‌شود:

۱- تعیین و رتبه‌بندی توابع توزیع جهت شیب درزه‌های متعلق به دسته درزه مورد مطالعه با استفاده از آزمون‌های اندرسون - دارلینگ، کولموگروف - اسمیرنوف و کای ۲، به صورت مستقل. تعیین و رتبه‌بندی این توابع توزیع برای درزه‌های هر سوی مرز شبکه به صورت جداگانه صورت می‌گیرد.

۲- انتخاب توابع توزیعی که با توجه به نتایج هر یک از سه آزمون بالا برای درزه‌های هر سوی مرز شبکه رتبه‌های اول تا سوم را دارند و نهایتاً انتخاب توابع توزیع مشترک بین آن‌ها.

۳- شبیه‌سازی  $n$  داده از روی توابع توزیع شناسایی شده در مرحله قبل به وسیله روش شبیه‌سازی مونت کارلو و با در نظر گرفتن فراوانی داده‌های توزیع شده در هر سوی مرز شبکه. این شبیه‌سازی بر اساس ماهیت داده‌ها صورت می‌گیرد، به این ترتیب که شبیه‌سازی داده‌های جهت شیب تنها در بازه ۰-۳۶۰ درجه انجام می‌شود و فراوانی شبیه‌سازی در هر سو براساس فراوانی داده‌های اولیه توزیع شده در هر سوی شبکه می‌باشد.



شکل ۱۰). سه مرحله تغییر داده شده در الگوریتم پیشنهادی، برای جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه

ناپیوستگی‌ها در فضا یکی از مهم‌ترین مباحث مربوط به مهندسی سنگ است، که با ارائه آن امکان استفاده از تحلیل‌های دقیق احتمالاتی از طریق تعیین توابع توزیع پارامترهای خروجی مورد نظر با استفاده از توابع توزیع ورودی‌ها فراهم می‌شود و می‌توان با کاهش عدم قطعیت موجود در خروجی‌های تحلیل از طریق کاهش عدم قطعیت ورودی‌ها با تعیین توابع توزیع دقیق آن‌ها، احتمال شکست طراحی را به حداقل مقدار ممکن رساند.

implementation,” *Computers and Geotechnics*, vol. 61 pp. 266-276, 2014.

[14] J. Zheng, J. Deng, G. Zhang, and X. Yang, “Validation of Monte Carlo simulation for discontinuity locations in space,” *Computers and Geotechnics*, vol. 67 pp. 103-109, 2015.

[15] X. G. Wang, Z. X. Jia, Z. Y. Chen, and Y. Xu, “Determination of discontinuity persistent ratio by Monte-Carlo simulation and dynamic programming,” *Engineering Geology*, vol. 203 pp. 83-98, 2016.

[16] J. Zhan, P. Xu, J. Chen, Q. Wang, W. Zhang and X. Han, “Comprehensive characterization and clustering of orientation data: A case study from the Songta dam site, China,” *Engineering Geology*, vol. 225 pp. 3-18, 2017.

[17] J. Liu, X. D. Zhao, and Z. H. Xu, “Identification of rock discontinuity sets based on a modified affinity propagation algorithm,” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 94 pp. 32-42, 2017.

[18] S. He, Y. Li, and A. Aydin, “A comparative study of UDEC simulations of an unsupported rock tunnel,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 72 pp. 242-249, 2018.

[19] C. Ma, W. Yao, Y. Yao, and J. Li, “Simulating Strength Parameters and Size Effect of Stochastic Jointed Rock Mass using DEM Method,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22 pp. 4872-4881, 2018.

[20] P. G. Hoel, S. C. Port, and C. J. Stone, “Introduction to Probability Theory,” Houghton Mifflin Company, 1971.

[21] K. Iiyama, A. Yoshiyuki, K. Fujita, T. Ichimura, H. Morikawa, and M. Hori, “A point-estimate based method for soil amplification estimation using high resolution model under uncertainty of stratum boundary geometry,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 121 pp. 480-490, 2019.

[22] A. H. S. Ang, and W. H. Tang, “Probability concepts in engineering planning and design,” John Wiley & Sons, 1984.

[23] H. Fattahi, Z. Varmazyari and N. Babanouri, “Feasibility of Monte Carlo simulation for predicting deformation modulus of rock mass,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 89 pp. 151-156, 2019.

[24] G. B. Baecher, and J. T. Christen, “Reliability and statistics in geotechnical engineering,” John Wiley & Sons, 2003.

[25] C. Robert, and G. Casella, “Monte Carlo Statistical Methods,” 2nd Edition, Springer, New York, 2004.

[26] J. Omrani, P. Agard, H. Whitechurch, M. Benoit, G. Prouteau, and L. Jolivet, “Reply to: Comment by Aftabi and Atapour on «Arc magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences»,” vol. 113 pp. 847-849, 2009.

[27] S. Dargahi, M. Arvin, Y. Pan, and A. Babaei, “Petrogenesis of post-collisional A-type granitoids from the Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, Southwestern Kerman, Iran: Constraints on

استفاده کرد. در این مطالعه از تابع توزیع ترکیبی تعیین شده برای جهت‌داری و موقعیت ناپیوستگی‌ها برای بررسی پایداری در دیواره غربی معدن مس سرچشمه استفاده شد. و برای اولین بار، با در نظر گرفتن موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها با توجه به تابع توزیع ترکیبی آن‌ها و همچنین روش شبیه‌سازی مونت کارلو اقدام به بررسی پایداری گردید. نتایج این مطالعه نشان داد شیب بهینه دیواره غربی معدن مس سرچشمه ۲۹ درجه است. ارائه الگوریتمی جهت تعیین بهترین توابع توزیع جهت‌داری و موقعیت

## ۵. مراجع

[1] C. Xu, and P. Dowd, “A New Computer Code for Discrete Fracture Network Modeling,” *Computers & Geosciences*, vol. 36 pp. 292-301, 2010.

[2] C. Wanga, D. D. Tannant, and P. A. Lilly, “Numerical Analysis of the Stability of Heavily Jointed Rock Slopes using PFC2D,” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 40 pp. 415-424, 2003.

[3] W. Zheng, X. Zhuang, D. D. Tannant, Y. Cai, and S. Nunoo, “Unified continuum/discontinuum modeling framework for slope stability assessment,” *Engineering Geology*, vol. 179 pp. 90-101, 2014.

[4] S. V. Alavi Nezhad Khalil Abad, A. Tugrul, C. Gokceoglu, and D. Jahed Armaghani, “Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design,” *Engineering Geology*, vol. 200 pp. 94-103, 2016.

[5] Z. N. Flynn, and R. J. Pine, “Fracture characterisation determined by numerical modeling analyses,” 11th Congress of the international Society for Rock Mechanics, Taylor & Francis Group, London, 2007.

[6] E. T. Hoek, “Reliability of the Hoek-Brown Estimates of Rock Mass Properties and their Impact on Design,” *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, vol. 35 pp. 63-68, 1998.

[7] Y. Wang, and O. V. Akeju, “Quantifying the cross-correlation between effective cohesion and friction angle of soil from limited site-specific data,” *Soils and Foundations*, vol. 56 pp. 1057-1072, 2016.

[8] M. Rabiei Vaziri, H. Tavakoli, and M. Bahaaddini, “Statistical analysis on the mechanical behaviour of non-persistent jointed rock masses using combined DEM and DFN,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 81 pp. 177-200, 2022.

[9] M. Bahaaddini, and E. Hosseinpour Moghadam, “Evaluation of Empirical Approaches in Estimating the Deformation Modulus of Rock Masses,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78 pp. 3493-3507, 2019.

[10] H. J. Park, T. R. West, and I. Woo, “Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA,” *Engineering Geology*, vol. 79 pp. 230-250, 2005.

[11] A. Baghbanan, “Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses,” PhD Thesis, KTH Land and Water Resources Engineering, 2008.

[12] B. Tokhmechi, H. Memarian, B. Moshiri, V. Rasouli, and H. Ahmadi Noubari, “Investigating the validity of conventional joint set clustering methods,” *Engineering Geology*, vol. 118 pp. 75-81, 2011.

[13] J. Zheng, J. Deng, X. Yang, J. Wei, H. Zheng, and Y. Cui, “An improved Monte Carlo simulation method for discontinuity orientations based on Fisher distribution and its program

[30] P. Kok-Kwang, "Reliability-Based design in geotechnical engineering," Taylor & Francis e-Library: Taylor & Francis, 2008.

[31] A. E. Aladejare, and Y. Wang, "Influence of rock property correlation on reliability analysis of rock slope stability: From property characterization to reliability analysis," *Geoscience Frontiers*, vol. 9 pp. 1639-1648, 2018.

the Arabian-Eurasian continental collision. *Lithos*," vol. 115 pp. 190-204, 2010.

[28] J. Wesseloo, and J. Read, "Guidelines for open pit slope design. Chapter 9: Acceptance Criteria," CSIRO Publishing, Collingwood, pp. 219-234, 2009.

[29] W. Wang, and C. Costantino, "Reliability analysis of slope stability at nuclear power plant site," 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Finland, 2009.