Archive of SID

نشریه علمی «مهندسی معدن» دوره ۱۶، شماره ۵۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه ۶۳ تا ۷۷
Journal of Mining Engineering (JME) Vol 16, No 52, 2021, pp 63-77

مقاله پژوهشی

# تعیین صفحه معرف دسته درزه‌ها با رویکرد افزایش قابلیت اطمینان

مجتبی ربیعی وزیری[۱]،حسین توکلی[۲]، مجتبی بهاالدینی[*۳]

۱. دانشجوی دکتری مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، mojtabavaziri@yahoo.com
۲. استادیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، tavakoli@uk.ac.ir
۳. دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران ، تهران، ایران، m.bahaaddini@ut.ac.ir
دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران، m_bahaaddini@uk.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۹ - پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴)

## چکیده

**ارایه تخمینی مطمئن از جهت‌داری صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به یک دسته درزه اهمیت ویژه‌ای در مطالعات و تحلیل‌های مکانیک‌سنگ دارد. روش‌های رایج در تعیین این جهت‌داری به صورت قطعی و بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان موجود در محاسبات ارایه شده‌اند. امروزه در علوم مهندسی روش‌های آماری و احتمالاتی برای بررسی عدم اطمینان موجود در داده‌ها و همچنین اعتبارسنجی جواب‌ها و روش‌های محاسباتی، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند و تاکید آن‌ها بر مشخص کردن موارد مجهول و ناشناخته موجود در تحلیل‌ها است. در این مطالعه روشی جدید در محاسبه صفحه ناپیوستگی حاصل از یک سری درزه متعلق به یک دسته درزه بر مبنای روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو ارایه شده است و برای بررسی آن، نتایج حاصل با روش برداری رایج مقایسه شده است. بررسی دو روش قطعی و احتمالاتی با تحلیل عددی المان مجزا نشان داد که روش جدید به دلیل در نظر گرفتن افزایش قابلیت اطمینان و شبیه‌سازی بر مبنای تمامی حالات از طریق تعیین توابع توزیع آماری و نمونه‌برداری تصادفی از آن‌ها، نسبت به روش رایج مناسب‌تر است. این برتری در مورد جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه به طور بارز دیده می‌شود. همچنین بررسی تعیین جهت شیب و مقدار شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از یک دسته درزه نشان داد که در شرایطی که قطب درزه‌های یک دسته درزه در یک سوی شبکه استریونت قرار گیرند، محاسبات روش رایج، قابلیت اطمینان بیش از ۹۸ درصد برای جهت شیب و مقدار شیب دارند. در حالی که این محاسبات برای جهت‌داری‌هایی که در دو سوی مرز شبکه باشند، قابلیت اطمینان آن‌ها به بیش از ۹۵ درصد برای جهت شیب و بیش از ۸۷ درصد برای مقدار شیب کاهش خواهد یافت.**

## کلمات کلیدی

**تحلیل احتمالاتی، تحلیل قابلیت اطمینان، جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، توابع توزیع احتمال.**

* نویسنده مسئول مکاتبات.

www.SID.ir

Archive of SID

## ۱- مقدمه

در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ، ناپیوستگی‌ها به عنوان عامل تعیین‌کننده در عملکرد توده سنگ شناخته می‌شوند [۱]. واژه ناپیوستگی عبارتی کلی برای کلیه سطوح جدایش موجود در سنگ اعم از درزه، سطوح لایه‌بندی، گسل، زون برشی و نظایر آن بوده است و درزه‌ها به عنوان متداول‌ترین نوع ناپیوستگی شناخته می‌شوند. ارزیابی ویژگی‌های درزه‌ها بخش مهمی از فرآیند مهندسی توده سنگ را تشکیل داده [۲] و گامی ضروری و بنیادی برای طبقه‌بندی توده سنگ و طراحی‌های مهندسی ژئوتکنیک است [۳، ۴ و ۵]. پرایس[1] درزه‌ها را به عنوان شکاف‌ها و شکستگی‌های موجود در سنگ‌ها که در طول آن‌ها یا هیچ‌گونه حرکتی روی نداده است و یا دارای حرکت بسیار اندکی باشند، تعریف کرده است [۶].

مساله اصلی در مدل‌سازی توده سنگ، منتج شدن اطلاعات جمع‌آوری شده به تعریفی سه‌بعدی و دقیق از ساختارها از جمله درزه‌های موجود در توده سنگ است [۷]. توده سنگ ذاتا ناهمگن و ناهمسانگرد است که این ویژگی تغییرپذیری ذاتی، در خواص هندسی درزه‌ها از جمله جهت‌داری، خط اثر و فاصله‌داری نیز دیده می‌شود. بنابراین، برای آنالیزی دقیق از رفتار مکانیکی توده سنگ لازم است ماهیت تصادفی درزه‌ها در مدل‌سازی توده سنگ در نظر گرفته شود. مطالعات قبلی حاکی از تاثیر قابل ملاحظه ماهیت تصادفی خواص هندسی درزه بر روی خواص مقاومتی و مکانیکی توده سنگ است [۸، ۹، ۱۰ و ۱۱]. وجود طبیعت ناهمگن و تصادفی خواص هندسی درزه‌های موجود در توده سنگ، مبین لزوم استفاده از آنالیزهای آماری برای درک مناسب‌تری از رفتار توده سنگ است [۹]. در بسیاری از شیوه‌های متداول مدل‌سازی توده سنگ، از پیش‌فرض‌هایی غیرواقعی در مورد قطعی بودن ویژگی‌های درزه‌ها، تعداد بسیار کم درزه‌ها، استقلال درزه‌ها، احتمال رخداد یکسان و یکنواخت در توده سنگ، گسترش بی‌نهایت درزه‌ها و نظایر آن بهره گرفته می‌شود [۱۲]. درزه‌های موجود در توده سنگ از هیچ ساختار و الگوی منظمی تبعیت نمی‌کنند و توزیع اتفاقی و تغییرپذیری این درزه‌ها عملا باعث پیچیده‌تر شدن محیط مورد بررسی می‌شود.

در بسیاری از سازه‌های مهندسی مانند ترانشه‌های حفر شده در سنگ در پروژه‌های راه‌سازی، بررسی لغزش‌های سنگی در نزدیکی مناطق مسکونی، شیب پله‌های معدن و شیب نهایی معادن دانستن الگوی ناپیوستگی‌ها و جهت‌داری آن‌ها اهمیت قابل توجه‌ای دارد. با این اطلاعات می‌توان احتمال رخداد ریزش‌های سنگی را بررسی کرد و نوع ریزش‌ها را نیز تعیین کرد و همچنین در صورت احتمال وقوع برای جلوگیری از ریزش اقدامات لازم را انجام داد. اگر چه روش‌های تحلیل استریوگرافیک روش‌های مناسبی برای بدست آوردن بالقوه بودن حرکت بلوک‌های سنگی‌اند اما این روش‌ها عواملی مانند عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی (جهت‌داری ناپیوستگی‌ها) را در محاسبات خود لحاظ نکرده‌اند و همچنین میزان اطمینان به پردازش داده‌ها مشخص نیست. در نتیجه نیاز است قبل از هر اقدام، عدم قطعیت موجود در پارامترهای ورودی و خروجی تحلیل و همچنین میزان اطمینان به محاسبات انجام گرفته، تعیین شود. با دانستن این موارد خطای تحلیل به حداقل می‌رسد. برای این منظور می‌توان از روش‌های آماری، احتمالاتی و بررسی عدم قطعیت بهره گرفت. مفهوم تحلیل احتمالاتی زمانی روشن‌تر می‌شود که در مقابل تحلیلی قطعی مطرح و مورد بحث قرار گیرد. در تحلیل قطعی، پارامترهای معین بدون پراکندگی و خطا در نظر گرفته می‌شوند و به هر پارامتر موثر، تنها یک مقدار عددی اختصاص داده می‌شود اما زمانی که خطا در اندازه‌گیری پارامترها به حدی باشد که میزان اعتبار محاسبات را کاهش دهد، استفاده از روش‌های تحلیل احتمالاتی برای اطمینان‌سنجی جواب‌های بدست آمده از محاسبات، راه حل مناسبی است [۱۳].

برای تحلیل و درک بهتر ویژگی‌های ساختاری ناپیوستگی‌ها از جمله جهت‌داری آن‌ها، بررسی‌هایی توسط محققان مختلف با استفاده از روش‌های آماری، احتمالاتی و بررسی قابلیت اطمینان انجام شده است که یا سبب تصحیح روش‌های پیشین شده و یا در مواردی به ارایه روشی جدید در تحلیل ختم شده است. به عنوان مثال، لی[2] و همکاران در سال ۲۰۰۹، پایداری گوه‌های سنگی با حالت‌های شکست همبسته را ارزیابی کردند و به آنالیز حساسیت پارامترهای تاثیرگذار در ریزش گوه‌ای پرداختند. آن‌ها برای بررسی قابلیت اطمینان سیستم یاد شده در ارزیابی ریزش‌های گوه‌های سنگی، از روش درخت شکست، روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش معادل N بعدی بهره گرفتند [۱۴]. در زمین‌شناسی ساختاری فرض بر استوانه‌ای بودن ساختار چین‌ها است اما این ساختارها اکثرا مخروطی شکل‌اند. مولچرون[3] و همکاران در سال ۲۰۱۳، برنامه‌ای را برای انتخاب مناسب‌ترین مخروط بر اساس توابع توزیع آماری بینگهام و نرمال توسعه دادند که از جمله ویژگی‌های این برنامه قابلیت محاسبه ماتریس جهت‌داری و شکل توزیع است [۱۵]. کاردوزو و

1-Price

2-Li
3-Mulchrone


www.SID.ir

Archive of SID

آلمندینگر[1] در سال ۲۰۱۳، با ارایه یک برنامه کامپیوتری تحت سیستم عامل مکینتاش با عنوان OSXStereonet امکان رسم ساختارهای خطی و صفحه‌ای به صورت دو یا سه‌بعدی و در شبکه استریونت را فراهم کردند. اکثر محاسبات این برنامه بر اساس جبر خطی است. از جمله پارامترهای محاسبه شده با این برنامه می‌توان به جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، تقاطع بین خطوط و صفحات و تجزیه و تحلیل آماری بهترین استوانه یا مخروط برازش شده بر ناپیوستگی‌ها اشاره کرد [۱۶]. ژنگ[2] و همکاران در سال ۲۰۱۴، به معرفی روشی با عنوان روش بهبود یافته شبیه‌سازی مونت کارلو برای تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها بر اساس توزیع فیشر پرداختند. در هنگام استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، جهت‌داری‌های مربوط به قطب‌هایی که به مرز شبکه استریونت نزدیک و از طرف دیگر وارد استریونت می‌شوند، تاثیر مهمی بر میانگین داده‌ها و ثابت فیشر داشته و سبب انحراف در مقادیر نهایی این پارامترها می‌شوند. ژنگ و همکاران الگوریتمی را برای شناسایی و تنظیم جهت‌داری این قطب‌ها توسعه دادند [۱۷]. در مطالعه ژنگ و همکاران بدون اعتبارسنجی محاسبات و نتایج حاصل از روش رایج و روش پیشنهادی، سعی در تنظیم نتایج روش پیشنهادی بر اساس نتایج روش رایج کردند. در نتیجه با توجه به انحراف میانگین داده‌های حاصل از جهت‌داری درزه‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه، الگوریتمی برای شناسایی و تنظیم جهت‌داری این قطب‌ها منطبق بر نتایج روش رایج توسعه داده ش. اما این در حالی است که دلیل اصلی این انحراف بررسی نشده و هیچ اعتبارسنجی بر روی نتایج و محاسبات روش پیشنهادی توسط این محققان انجام نگرفته است. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۵، به بررسی اعتبار روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای تعیین موقعیت ناپیوستگی‌ها در فضا پرداختند. نتایج بررسی این محققان نشان داد زمانی که فاصله‌داری از توزیع نمایی پیروی می‌کند، توزیع یکنواخت برای شبیه‌سازی موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها مناسب است [۱۸].

نتایج بررسی ژان[3] و همکاران در سال ۲۰۱۷، در زمینه خوشه‌بندی داده‌های جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، نشان داد که جهت‌داری ناپیوستگی‌ها در توده سنگ دارای توزیع تصادفی بوده است و همچنین قطب‌های این ناپیوستگی‌ها نیز در طبیعت و شبکه استریونت دارای توزیع تصادفی‌اند [۱۹]. لیو[4] و همکاران در سال ۲۰۱۷، اقدام به شناسایی دسته درزه‌های موجود در توده سنگ بر اساس الگوریتمی موسوم به الگوریتم انتشار شباهت[5] (AP) کردند. این محققان در مطالعات خود ضمن استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو، از توزیع فیشر برای توصیف جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به دلیل سهولت کاربرد در شبیه‌سازی استفاده کردند [۲۰]. دیویس و تایتوس[6] در سال ۲۰۱۷، با تاکید بر مفهوم سه‌بعدی ساختارهای زمین‌شناسی در فضا و با مطالعه تئوری‌های مختلفی که برای این مفهوم سه‌بعدی توسط محققان مختلف توسعه داده شده است، به بررسی چگونگی اعمال ویژگی‌های آماری به داده‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی پرداختند [۲۱].

زمانی که متغیرهای تاثیرگذار در فرآیند، خاصیت عدم‌قطعیت و تغییرپذیری را نشان می‌دهند، لازم است ماهیت این ویژگی‌ها به صورت آماری و تصادفی تعریف و وارد فرآیند شود. با توجه به عدم قطعیت و تغییرپذیری ذاتی موجود در پارامترهای مرتبط با جهت‌داری ناپیوستگی‌ها، نیاز است این عدم قطعیت‌ها در محاسبات مربوطه مورد توجه قرار گیرند. با توجه به موارد یاد شده ، در این مطالعه به بررسی آماری و احتمالاتی جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار در رفتار توده سنگ و کمی‌سازی عدم قطعیت‌های موجود در محاسبات مربوط به آن‌ها (به ویژه محاسبات مربوط به جهت‌داری صفحه ناپیوستگی معرف درزه‌های متعلق به یک دسته درزه) پرداخته شده است.

بر این اساس در این مقاله روش جدیدی برای محاسبه جهت‌داری صفحه ناپیوستگی معرف یک دسته درزه، بر مبنای روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو ارایه شده است. نتایج حاصل از این روش با نتایج روش برداری رایج در محاسبه جهت‌داری صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌ها مقایسه شده و برتری روش جدید مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار المان مجزا UDEC و همچنین تحلیل ناپیوستگی‌های دیواره شمالی معدن سنگ آهن گل گهر میزان اطمینان به محاسبات روش رایج و روش احتمالاتی، تعیین شده است.

## ۲- روش رایج در محاسبه صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به یک دسته درزه

در اغلب موارد، برای نمایش، تجزیه و تحلیل الگوی ناپیوستگی‌ها و همچنین جهت‌داری‌های آن‌ها از شبکه‌های استریوگرافیک استفاده می‌شود. نرم‌افزارهای کامپیوتری متعددی وجود دارد که برای مطالعات ساختاری و تعیین ریزش‌های سنگی طراحی شده‌اند و می‌توان به رایج‌ترین آن‌ها مانند DIPS، Stereonet، Spheristat و Rock work اشاره کرد.

1-Cardozo and Allmendinger
2-Zheng
3-Zhan
4-Liu

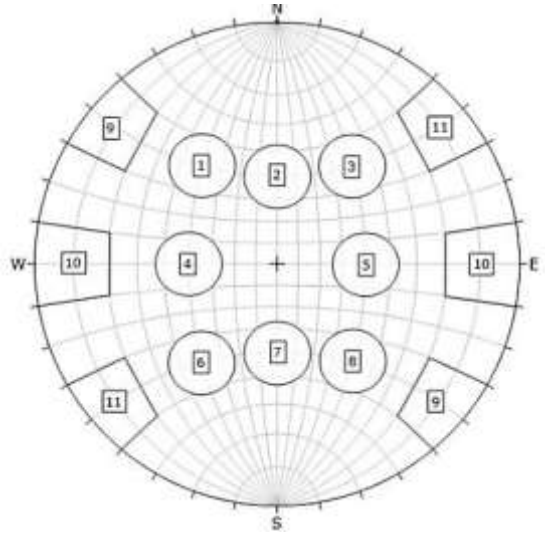
5-Affinity Propagation algorithm
6-Davis and Titus


www.SID.ir

Archive of SID

این نرم‌افزارها اقدام به تحلیل قطعی اطلاعات مربوط به جهت‌داری ناپیوستگی‌ها می‌کنند. در نتیجه جهت‌داری صفحات ناپیوستگی و نوع ریزش‌های سنگی حاصل از آن‌ها را به صورت قطعی و بدون در نظر گرفتن قابلیت اطمینان به نتایج خروجی تعیین می‌کنند که این خود باعث عدم اطمینان طراح به تحلیل‌های انجام شده می‌شود.

روش قطعی رایج برای تعیین صفحه ناپیوستگی معرف یک دسته درزه با توجه به نحوه توزیع درزه‌های برداشت شده بر روی شبکه استریونت، به طور کلی به دو صورت انجام می‌شود: حالت اول زمانی است که قطب‌های درزه‌ها به طور مشخص در یک طرف شبکه قرار می‌گیرند (زون‌های ۱ تا ۸ در شکل ۱). در این حالت میانگین برداری بر اساس روند و میل مربوط به قطب‌های درزه‌ها (جهت شیب و مقدار شیب مربوط به درزه‌ها) محاسبه شده و به عنوان قطب صفحه ناپیوستگی معرفی می‌شود. سپس صفحه مربوط به این قطب رسم می‌شود. حالت دوم زمانی است که تعدادی از درزه‌های متعلق به یک دسته درزه به محیط شبکه نزدیک شده و از طرف دیگر وارد شبکه می‌شوند (زون‌های ۹ تا ۱۱ در شکل ۱). در این مورد از روشی موسوم به قطب منفی استفاده می‌شود. در این روش روند قطب‌های یک طرف با ۱۸۰ درجه جمع شده و سپس با روند قطب‌های طرف دیگر میانگین‌گیری می‌شود. در مورد میل، میل‌های قطب‌های یک سو منفی شده و بعد از آن با میل‌های قطب‌های طرف دیگر میانگین‌گیری می‌شوند. اگر حاصل مثبت شود، مکان قطب همان طرفی است که قطب‌ها به آن طرف منتقل شده‌اند و مقدار محاسبه شده همان میل قطب صفحه ناپیوستگی است. در غیر این صورت مکان قطب به طرف دیگر شبکه منتقل می‌شود [۲۲].




**شکل ۱- ناحیه‌های مورد بررسی در شبکه استریونت.**

## ۳- روش‌های احتمالاتی در حل مسایل مهندسی و بررسی قابلیت اطمینان

برای حل مسایل مهندسی از جمله مکانیک سنگ و زمین‌شناسی مهندسی، روش‌های متعددی وجود دارد که با گذشت زمان تکمیل شده‌اند و هر یک از آن‌ها کمبودهای روش‌های دیگر را برطرف کرده‌اند. در یک تقسیم‌بندی کلی این روش‌ها را می‌توان به دو گروه روش‌های قطعی و احتمالاتی تقسیم‌بندی کرد. مفهوم تحلیل احتمالاتی هنگامی روشن‌تر می‌شود که در مقابل تحلیل قطعی مطرح و مورد بحث قرار گیرد. در تحلیل قطعی، پارامترهای معین، بدون پراکندگی و خطا در نظر گرفته می‌شوند. سپس با تعیین یک ضریب اطمینان پارامترهای طراحی محاسبه و استفاده می‌شوند. زمانی که خطاها در اندازه‌گیری پارامترها به حدی باشد که میزان اعتبار محاسبات را تحت تاثیر قرار دهد، استفاده از روش تحلیل احتمالاتی برای بررسی قابلیت اطمینان جواب‌های بدست آمده از محاسبات، راه حلی مناسب است. روش‌های ارایه شده برای تحلیل احتمالاتی، مبتنی بر وجود خطا به علت نقص دانش بشری و همچنین نبود اطلاعات کافی از خواص مصالح و شرایط بارگذاری اند. امروزه می‌توان موارد نامطمئن (مجهولات) موجود در تجزیه و تحلیل مسایل مربوط به مهندسی سنگ، به ویژه اطلاعات وضعیت هندسی توده سنگ و خواص مقاومتی آن را با استفاده از روش‌های احتمالاتی مورد بحث و بررسی قرار داد. در شرایط کلی، روش‌های احتمالاتی در انواع بررسی‌های مربوط به مهندسی سنگ و نیز مطالعات گسیختگی‌های سازه‌های سنگی کاربرد دارند.

اغلب پدیده‌هایی که در زندگی ما اتفاق می‌افتند، دارای عدم قطعیت‌هایی‌اند که ما قادر به پیش‌بینی آن‌ها نیستیم. بدین صورت که پارامترهای مختلف در مکان و یا زمان‌های متفاوت دارای فراوانی‌های متفاوتی بوده‌اند و بنابراین خروجی‌های چندگانه و بدون هیچ الگوی مشخصی با عباراتی همچون شانس و یا احتمال بیان می‌شوند. روش مقابله با این عدم قطعیت‌ها، بهره‌گیری از تحلیل قابلیت اطمینان است. بنابراین روش‌هایی در طراحی که مساله عدم قطعیت‌ها و برآیند آن‌ها را در نظر می‌گیرند، برای این موارد بسیار مفید و با ارزش‌اند. این روش‌ها به نام روش‌های تعیین قابلیت اطمینان مشهورند. هدف اصلی در تحلیل قابلیت اطمینان، ارزیابی و بررسی ویژگی‌های آماری خروجی‌های یک سیستم به صورت تابعی از پارامترهای غیرقطعی موثر در آن است. در طراحی‌ها و شبیه‌سازی‌های مربوط به مهندسی ژئوتکنیک، پارامترهای


www.SID.ir

Archive of SID

طراحی و خروجی‌های سیستم، تابعی از پارامترهای متعددند که مقدار و اندازه بسیاری از آن‌ها را نمی‌توان به صورت کاملا دقیق و صحیح تعیین کرد. هدف اصلی تحلیل قابلیت اطمینان تعیین عدم قطعیت‌های خروجی سیستم، به صورت تابعی از عدم قطعیت‌های خود مدل و پارامترهای تاثیرگذار در سیستم‌اند. این روش تحلیل، در واقع یک چارچوب مشخص و نظام‌مند برای کمی کردن عدم قطعیت خروجی سیستم، ایجاد می‌کند. به علاوه این تحلیل به طراح کمک می‌کند تا دید مناسبی نسبت به میزان مشارکت هر یک از پارامترهای غیرقطعی در عدم قطعیت کلی خروجی سیستم و نیز محاسبات انجام گرفته برای تعیین خروجی‌های سیستم پیدا کند[۱۳].

در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های بررسی قابلیت اطمینان به سه دسته روش‌های تحلیلی مانند روش ترکیب توزیع متغیرها[1] [۲۳]، روش‌های تقریبی مانند روش‌های تخمین نقطه‌ای[2] [۲۴ و ۲۵]، و مرتبه اول ممان دوم[3] [۲۶]، و در نهایت روش‌های شبیه‌سازی مانند روش مونت کارلو تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۷ و ۲۸]، که در این میان روش مونت کارلو با توجه به سهولت در کاربری و دقت جواب‌های بدست آمده، کاربرد بیشتری نسبت به سایر روش‌ها دارد [۱۳ و ۲۹].

### ۱-۳- روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو

روش شبیه‌سازی مونت کارلو یک ابزار قوی مهندسی برای تجزیه و تحلیل احتمالاتی عدم قطعیت‌ها در مسایل مهندسی است [۳۰]. در این روش با استفاده از یکسری اعداد تصادفی استخراج شده از تابع توزیع احتمال متغیرها، تابع نهایی شبیه‌سازی می‌شود. امروزه روش مونت کارلو در مسایل بسیار پیچیده که دارای ماهیتی غیرقطعی‌اند، کاربرد پیدا کرده است. روش نمونه‌گیری در روش مونت کارلو کاملا تصادفی است، به این معنی که در زمان انجام نمونه‌گیری، هر نمونه به شکل کاملا تصادفی از بازه توزیع داده‌های ورودی انتخاب می‌شود [۱۳ و ۳۱].

به طور کلی مراحل مختلف این روش به شرح زیر است [۳۰]:

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

## ۴- روش تحقیق

در این مطالعه برای استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو در تحقیق به صورت زیر عمل می‌شود:

- شناسایی قطب‌های شکل دهنده یک دسته درزه.
- تبدیل روند و میل قطب‌ها به جهت شیب و مقدار شیب صفحه درزه‌ها.
- برآورد و تعیین نوع توزیع آماری حاکم بر داده‌های مقدار شیب و جهت شیب و همچنین تعیین پارامترهای آماری آن‌ها.
- شبیه‌سازی مقادیر تصادفی برای داده‌های مقدار شیب و جهت شیب برحسب نوع توزیع آماری تطابق یافته در مرحله قبل و مشخص کردن پارامترهای جدید آماری توزیع مربوطه.
- تعیین میانگین توزیع آماری مقادیر شبیه‌سازی شده در مرحله قبل به عنوان مقادیر شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به یک دسته درزه و ارزیابی عملکرد سیستم.

شبیه‌سازی مقادیر تصادفی بر اساس نوع توزیع آماری که در مرحله قبل عنوان شد، طبق روش زیر انجام می‌گیرد:

- پارامتر اولیه مورد نظر را به عنوان یک تابع توزیع تجمعی احتمال رسم یا جدول‌بندی می‌کنند، به نحوی که مقادیر متغیر روی بعد افقی یا محور xها و احتمال‌های مربوطه از ۰ تا ۱ روی بعد عمودی یا محور yها باشند.
- به وسیله یک مولد اعداد تصادفی، یک عدد اعشاری تصادفی بین ۰ تا ۱ (تا هر رقم اعشار) انتخاب می‌شود.
- از نقطه‌ای روی محور yها که متناظر با این عدد اعشاری تصادفی است، خطی به موازات محور xها رسم می‌شود تا منحنی توزیع تجمعی را قطع کند.
- از نقطه برخورد فوق خطی عمود بر محور xها رسم می‌شود.
- مقدار متغیر x متناظر با این نقطه تقاطع یادداشت شده و این مقدار x به عنوان یک مقدار نمونه اختیار می‌شود.
- مراحل ۲ الی ۵ را تکرار کرده تا آن تعداد از متغیرهای تصادفی که مورد نیاز است، شبیه‌سازی شوند.

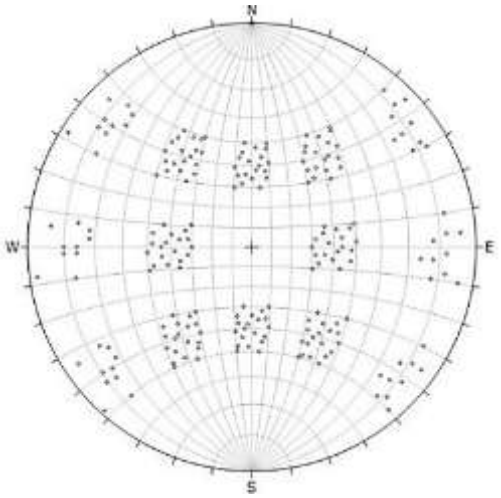
1-Jointed distribution method
2-Point estimate
3-First order second moment


www.SID.ir

Archive of SID

## ۵- تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها در محاسبه صفحه نماینده یک دسته درزه

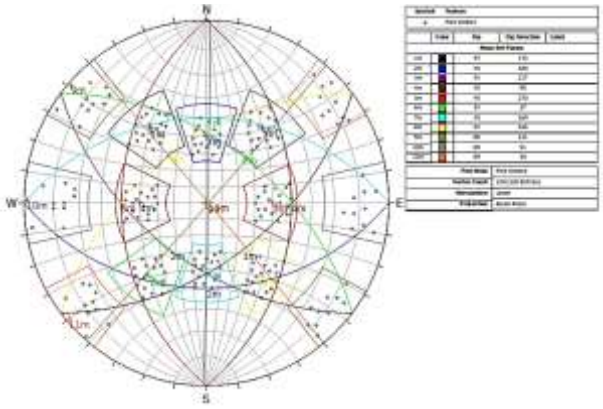
اولین مرحله در تحلیل، شناسایی جهت‌داری درزه‌های شکل‌دهنده صفحات ناپیوستگی است. با توجه به بررسی نواحی مختلف شبکه، توزیع فضایی درزه‌ها در هر ناحیه یکسان در نظر گرفته شد تا نتایج تنها تحت عملکرد محاسبات در هر ناحیه قرار گیرد. برای تولید داده‌های مورد نظر، هر ناحیه به صورت کاملا متقارن و طبق شبکه استریونت شبکه‌بندی شد و به هر یک از راس‌های این شبکه یک عدد به عنوان شاخص شناسایی نسبت داده شد. سپس از بین این اعداد شاخص به طور کاملا تصادفی تعداد ۲۰ داده انتخاب شد. در مرحله بعد این داده‌های تصادفی تولید شده در قالب قطب درزه‌های شکل‌دهنده صفحات ناپیوستگی در هر یک از ۱۱ ناحیه مورد بررسی به صورت جداگانه توزیع شدند (شکل ۲). قطب درزه‌های شکل‌دهنده صفحات ناپیوستگی در این نواحی و جهت شیب و مقدار شیب مربوط به آن‌ها به عنوان ورودی‌های روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفتند.




**شکل ۲- قطب درزه‌های شکل‌دهنده صفحات ناپیوستگی.**

### ۵-۱- تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به روش رایج

برای استفاده از روش رایج در محاسبه صفحه ناپیوستگی حاصل از یک سری درزه که متعلق به یک دسته درزه‌اند، درزه‌های موجود در هر ناحیه به صورت درزه‌های متعلق به یک دسته درزه در نظر گرفته شده و بر اساس روش محاسباتی شرح داده شده در بخش ۲، جهت‌داری صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های موجود در هر ناحیه محاسبه شد (شکل ۳).




**شکل ۳- جهت‌داری صفحات ناپیوستگی حاصل از محاسبات روش رایج.**

### ۵-۲- تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها به روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو

برای استفاده از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در محاسبه صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به هر دسته درزه، با توجه به محل قرارگیری قطب‌ها در هر ناحیه مقدار شیب و جهت شیب درزه متعلق به هر قطب محاسبه شد. سپس توزیع آماری منطبق شده بر داده‌های مقدار شیب و جهت شیب برای قطب‌های موجود در هر ناحیه بر اساس واقعیت تعیین شد. در بسیاری از مطالعات تابع توزیع آماری منطبق شده بر داده‌های مقدار شیب و جهت شیب به صورت پیش‌فرض و بر اساس مطالعات پیشین و یا سهولت کاربرد یک توزیع نسبت به سایر توزیع ها تعیین شده است که این عمل نمی‌تواند به نتیجه‌ای بهینه منجر شود. در نتیجه تعیین تابع توزیع باید بر اساس واقعیت‌های موجود و با استفاده از داده‌های مورد مطالعه انجام گیرد. در این تحقیق برای تعیین نوع تابع توزیع از سه آزمون اندرسون-دارلینگ[1]، کولموگروف-اسمیرنف[2] و کای[3] استفاده شد و بهترین توابع توزیع بر اساس نتایج این آزمون‌ها برای مقدار شیب و جهت شیب تعیین شد. بر این اساس توزیع آماری نرمال با پارامترهای متفاوت برای داده‌های مربوط به مقدار شیب و جهت شیب درزه‌ها در هر ناحیه تعیین شد. سپس با توجه به توزیع نرمال شناسایی شده، برای هر ناحیه تعداد ۲۰۰ داده از توزیع مربوطه به طور کاملا تصادفی شبیه‌سازی شد و این داده‌های شبیه‌سازی شده در ارزیابی عملکرد سیستم مورد استفاده قرار گرفتند. به عبارت دیگر، این داده‌ها به عنوان داده‌های مقدار شیب و جهت شیب در

1-Anderson-Darling
2-Kolmogorov-Smirnov
3-Chi-Squared


www.SID.ir

Archive of SID

محاسبات روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شدند. در این روش برای محاسبه مقدار شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به هر دسته درزه، میانگین حاصل از تابع توزیع شبیه‌سازی شده برای مقدار شیب هر دسته درزه به عنوان مقدار شیب صفحه ناپیوستگی معرفی شد. برای محاسبه جهت شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به هر دسته درزه، برای حالتی که درزه‌های شکل‌دهنده دسته درزه مورد مطالعه به طور کامل در یک سوی شبکه استریونت قرار دارند، میانگین حاصل از تابع توزیع شبیه‌سازی شده برای جهت شیب هر دسته درزه به عنوان جهت شیب صفحه ناپیوستگی معرفی شد. برای حالتی که درزه‌های شکل‌دهنده دسته درزه مورد مطالعه به مرز شبکه نزدیک و از سوی دیگر وارد شبکه می‌شوند (جهت‌داری‌های توسعه‌یافته در دو سوی مرز شبکه)، جهت شیب داده‌های آن سمت از مرز که فراوانی کمتری دارند تبدیل به جهت شیب داده‌های سمتی با فراوانی بیشتر شد و سپس میانگین‌گیری از تابع توزیع تجمیع‌شده انجام گرفت. میانگین حاصل از تابع توزیع شبیه‌سازی شده برای جهت شیب هر دسته درزه در این حالت به عنوان جهت شیب صفحه ناپیوستگی معرفی شد. در حالت ۵۰ درصد داده‌های عبوری از مرز، توصیه می‌شود برای محاسبه جهت شیب صفحه ناپیوستگی، داده‌های هر طرف به طور جداگانه به صورت داده‌های جهت شیب یک دسته درزه در نظر گرفته شده و میانگین حاصل از تابع توزیع شبیه‌سازی شده برای جهت شیب هر طرف به عنوان جهت شیب صفحه ناپیوستگی معرفی شود. جهت‌داری صفحات ناپیوستگی حاصل از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در شکل ۴، آورده شده است. مطالعات انجام گرفته در جهت استفاده از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در تحلیل جهت‌داری ناپیوستگی‌ها با نرم‌افزارهای Minitab 18 و RISK@ انجام شده است.

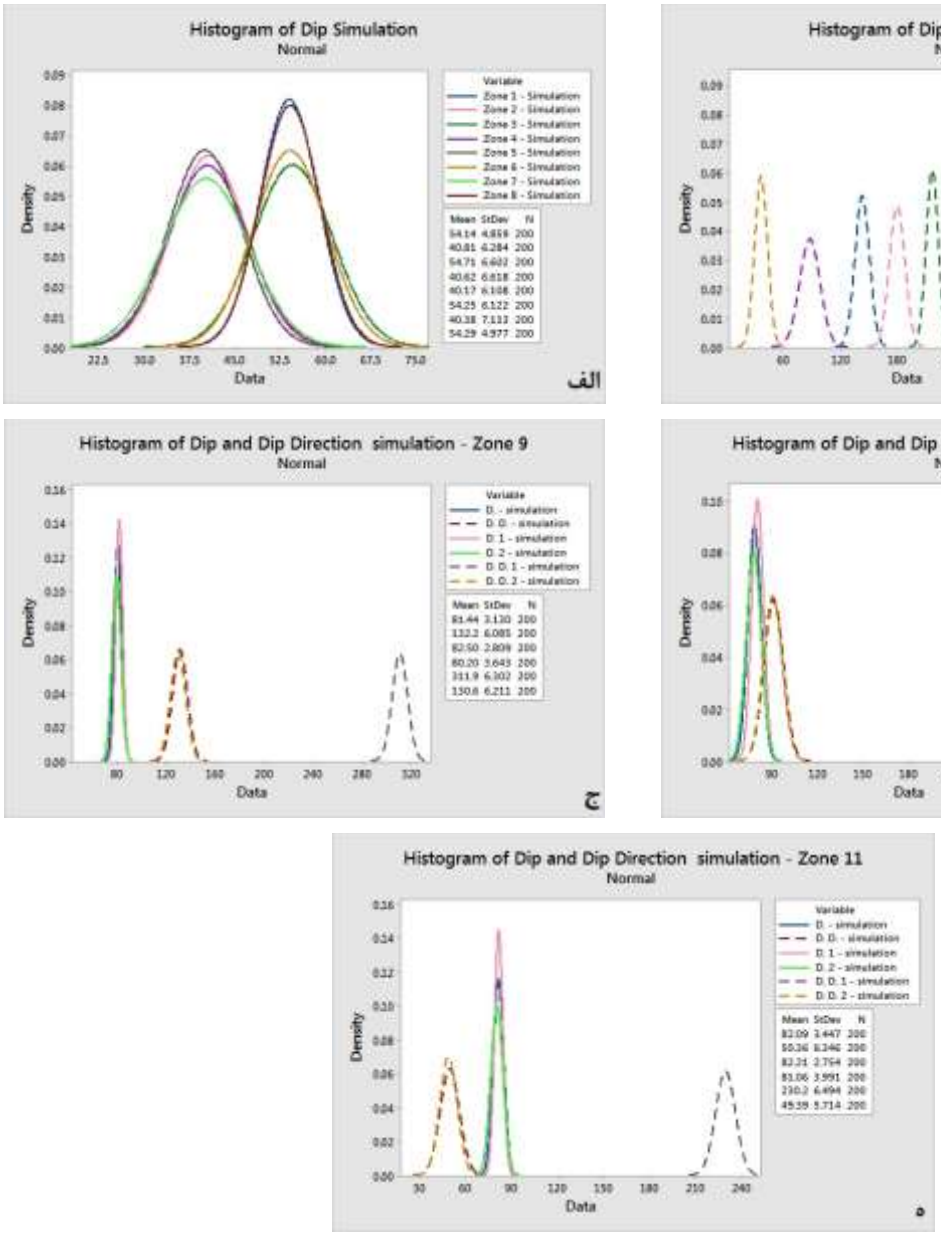
همانطور که از جهت‌داری‌های محاسبه شده برای صفحات ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به هر دسته درزه با روش رایج (شکل ۳) و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو (شکل ۴) مشاهده می‌شود، نتایج دو روش در مورد جهت‌داری صفحات ناپیوستگی حاصل از درزه‌های موجود در هر یک از نواحی ۱ تا ۸ (دسته درزه مربوطه به طور مشخص در یک سوی مرز شبکه واقع شده است)، تقریبا یکسان است اما نتایج دو روش در مقدار شیب ارایه شده برای صفحات ناپیوستگی حاصل از جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه (درزه‌های موجود در نواحی ۹ تا ۱۱) با یکدیگر تفاوت دارد (شکل‌های ۳ و ۴ و جدول ۱). طبق یافته‌های ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۴، جهت‌داری‌های مربوط به قطب‌هایی که به مرز شبکه استریونت نزدیک و از طرف دیگر وارد شبکه می‌شوند، تاثیر مهمی بر میانگین داده‌ها و ثابت فیشر داشته و سبب انحراف در مقادیر نهایی این پارامترها می‌شوند [۱۷]. نتایج بررسی‌های انجام شده در این مطالعه بر روی جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه نشان داد، جهت شیب درزه‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه تاثیر قابل ملاحظه‌ای در انحراف میانگین داده‌ها ندارد، در حالی که مقدار شیب درزه‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه در انحراف میانگین داده‌ها تاثیرگذار است (شکل‌های ۳ و ۴). با توجه به انحراف میانگین داده‌ها در مورد مقدار شیب درزه‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه، در هنگام استفاده از روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در محاسبات مربوط به جهت‌داری درزه‌ها، باید اعتبارسنجی بر روی نتایج دو روش انجام گیرد تا معتبرترین روش تعیین شود. در ادامه این تحقیق برای اعتبارسنجی محاسبات مربوط به مقدار شیب درزه‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه از روش عددی المان مجزا بهره گرفته شد.

**جدول ۱- مقایسه بین جهت‌داری صفحات ناپیوستگی حاصل از محاسبات روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو و روش قطعی رایج برای جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه.**

| ناحیه | مقدار شیب (درجه) | | درصد اختلاف | جهت شیب (درجه) | | درصد اختلاف |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | روش مونت‌کارلو | روش رایج | | روش مونت‌کارلو | روش رایج | |
| ۹ | ۸۱ | ۸۹ | ۹٫۲۸ | ۱۳۲ | ۱۳۱ | کمتر از ۱ |
| ۱۰ | ۷۸ | ۸۹ | ۱۲٫۷۳ | ۹۲ | ۹۱ | کمتر از ۱ |
| ۱۱ | ۸۲ | ۸۹ | ۸٫۴۲ | ۵۰ | ۵۰ | کمتر از ۱ |


www.SID.ir

Archive of SID




**شکل ۴- جهت‌داری صفحات ناپیوستگی حاصل از محاسبات روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو.**
**الف- مقدار شیب نواحی ۱ تا ۸؛ ب- جهت شیب نواحی ۱ تا ۸؛ ج- مقدار شیب و جهت شیب ناحیه ۹؛**
**د- مقدار شیب و جهت شیب ناحیه ۱۰؛ ه- مقدار شیب و جهت شیب ناحیه ۱۱.**

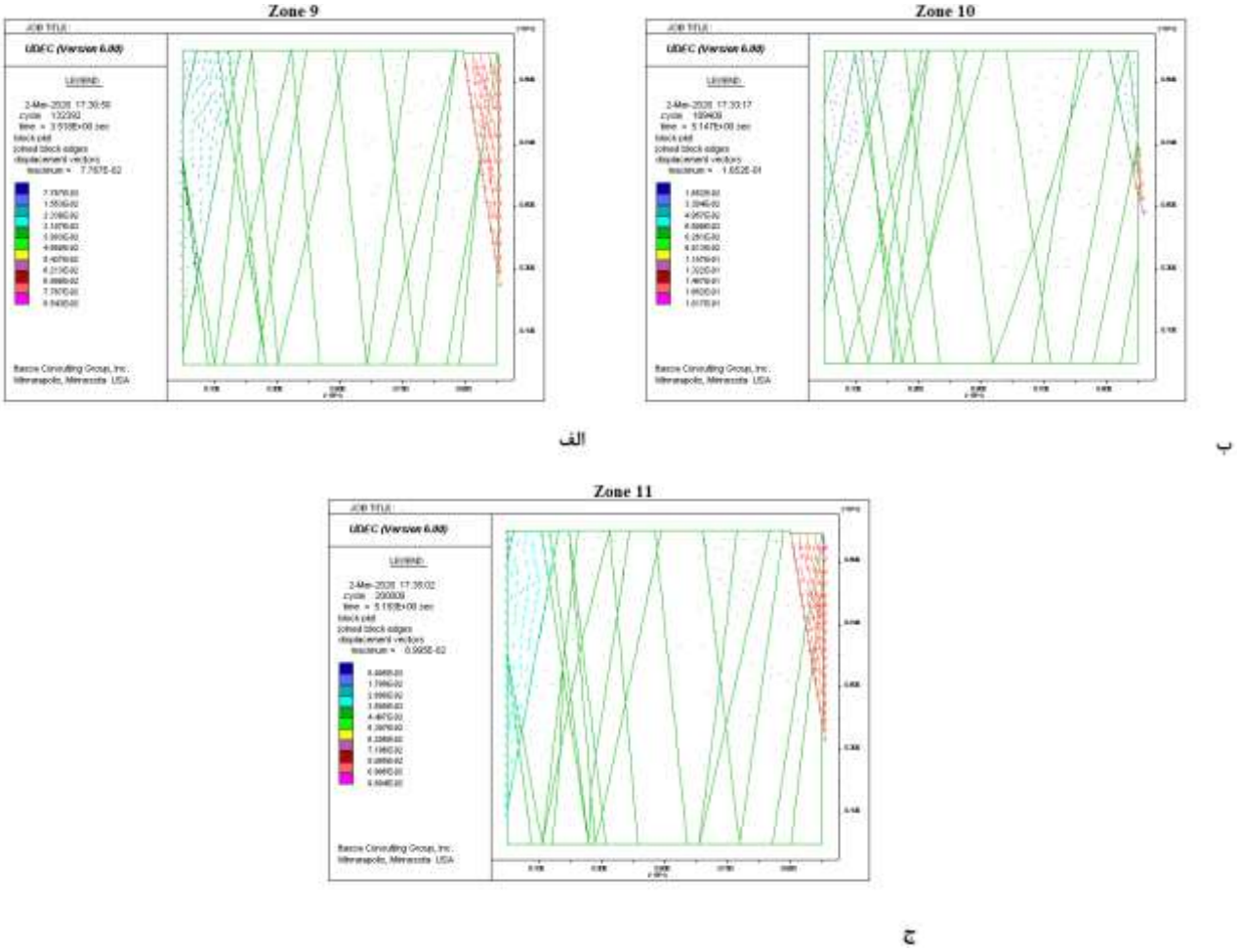
### ۵-۳- تحلیل عددی مقدار شیب جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه

در این بخش با توجه به تفاوت نتایج روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در محاسبه مقدار شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه، باید اعتبار نتایج دو روش یاد شده با روش سوم مورد ارزیابی قرار گیرد تا روش معتبر تعیین شود. در نتیجه در این بخش تصمیم به تحلیل و بررسی تاثیر مقدار شیب این نوع از جهت‌داری‌ها به کمک روش عددی المان مجزا گرفته شد. برای بررسی اعتبار نتایج دو روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو از نرم‌افزار UDEC بهره گرفته شد. به این منظور الگوی جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه و در ناحیه‌های ۹، ۱۰ و ۱۱، به صورت کاملا تصادفی مدل‌سازی شد. به این ترتیب که ۲۰ داده اولیه مربوط به قطب درزه‌های شکل‌دهنده صفحات ناپیوستگی که جهت شیب و مقدار شیب مربوط به آن‌ها به عنوان ورودی‌های روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو محسوب می‌شود (بیان شده در بخش ۵)، با استفاده از نرم‌افزار UDEC و با توجه به میانگین و انحراف معیارشان در یک


www.SID.ir

Archive of SID

بلوک ۱۰ در ۱۰ متر شبیه‌سازی شدند (شکل ۵). خواص مواد و ناپیوستگی‌ها در جدول۲ و نتایج بدست آمده برای مقدار شیب صفحه گسیختگی در جدول ۳ آورده شده است. شکست از محل درزه‌ها رخ می‌دهد و نتایج شکست از محل صفحه‌ای با مقدار شیب شناسایی شده با روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو را تایید می‌کند.




**شکل ۵- موقعیت گسیختگی‌های شناسایی شده با روش عددی. الف- ناحیه ۹؛ ب- ناحیه ۱۰؛ ج- ناحیه ۱۱.**

**جدول ۲- خواص مواد و ناپیوستگی‌ها برای توده سنگ [۳۲].**

| خواص ماده | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| چگالی ($kg/m^3$) | مدول الاستیسیته (GPa) | ضریب پواسون | چسبندگی (MPa) | مقاومت کششی (MPa) | زاویه اصطکاک داخلی (درجه) |
| ۲۶۵۰ | ۲۰ | ۰/۳ | ۷/۵ | ۳/۳ | ۵۸ |
| **خواص ناپیوستگی** | | | | | |
| سختی نرمال (GPa/m) | سختی برشی (GPa/m) | چسبندگی (MPa) | مقاومت کششی (MPa) | زاویه اصطکاک داخلی (درجه) | |
| ۵۰ | ۰/۵ | ۰ | ۰ | ۳۰ | |

**جدول ۳- مقایسه نتایج روش‌های احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو، قطعی رایج و روش عددی برای مقدار شیب صفحه گسیختگی.**

| ناحیه | روش عددی | میانگین | روش احتمالاتی شبیه سازی مونت کارلو | میانگین | روش قطعی رایج |
|---|---|---|---|---|---|
| ۹ | ۷۹/۵۰ و ۸۱ | ۸۰/۲۵ | ۸۰/۲۰ و ۸۲/۵۰ | ۸۱/۴۴ | ۸۹ |
| ۱۰ | ۷۶/۵۰ و ۷۹ | ۷۷/۷۵ | ۷۸/۴۴ و ۸۰/۹۱ | ۷۸/۹۵ | ۸۹ |
| ۱۱ | ۸۰ و ۸۱ | ۸۰/۵۰ | ۸۱/۰۶ و ۸۲/۲۱ | ۸۲/۰۹ | ۸۹ |


www.SID.ir

Archive of SID

## ۶- بحث و مقایسه نتایج

بررسی عددی انجام گرفته در این مطالعه با نرم‌افزار UDEC که بر روی جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه انجام گرفت، شکست از محل درزه‌ها را تایید می‌کند. این شکست از محل درزه‌ها با روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو نیز شناسایی شده است اما روش رایج شکست از حدود زاویه نیمساز مقدار شیب دو گروه درزه که متعلق به یک دسته درزه هستند و در دو سوی مرز شبکه توسعه یافته‌اند را به عنوان محل گسیختگی و صفحه ناپیوستگی شکل گرفته معرفی می‌کند. بررسی‌های آزمایشگاهی و عددی انجام شده توسط محققانی مانند کائو[1] و همکاران ۲۰۱۸، کائو و لین[2] ۲۰۱۷، لیو و همکاران ۲۰۱۷ و واسانتا و رنجیت[3] ۲۰۱۴، نیز که بر روی درزه‌های متقاطع با جهت‌داری‌های مختلف انجام گرفته است، نشان‌دهنده این موضوع است که در حالتی که درزه‌ها در دو جهت مخالف به صورت متقاطع و با مقدار شیب تقریبا یکسان یکدیگر را قطع می‌کنند، (مانند حالت جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه با میانگین و انحراف معیار مشخص) شکست از محل درزه‌ها رخ خواهد داد [۳۳، ۳۴، ۳۵ و ۳۶]. بررسی عددی انجام شده جهت تعیین موقعیت گسیختگی در نواحی ۹ تا ۱۱ و در بحرانی‌ترین حالت که ۵۰ درصد درزه‌ها به محیط شبکه استریونت نزدیک شده و از طرف دیگر وارد شبکه شده‌اند، نشان داد، مقدار شیبی که روش عددی برای صفحه گسیختگی تعیین می‌کند به مقدار شیب تعیین شده به وسیله روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در مقایسه با روش رایج نزدیک‌تر است (جدول ۳).

با توجه به موارد یاد شده روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه جهت‌داری صفحه ناپیوستگی معرف یک دسته درزه در مقایسه با روش رایج مناسب‌تر است و قابلیت اطمینان بالاتری دارد. در نتیجه وجود این برتری، از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای اطمینان‌سنجی نتایج روش رایج استفاده شد.

بررسی‌های انجام شده نشان داد، زمانی که درزه‌های متعلق به یک دسته درزه به طور مشخص در یک سوی شبکه قرار می‌گیرند، محاسبات انجام شده با روش رایج برای تعیین مقدار شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌ها بیش از ۹۸ درصد با محاسباتی که روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه بر مبنای افزایش قابلیت انجام داده است، منطبق است (جدول ۴). در حالتی که تعدادی از قطب‌های درزه‌های متعلق به یک دسته درزه به محیط شبکه استریونت نزدیک شده و از طرف دیگر وارد شبکه می‌شوند (جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه)، در این حالت نتایج محاسبات مربوط به جهت شیب که با روش رایج انجام می‌گیرد، بیش از ۹۵ درصد با نتایج محاسباتی که روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو برای محاسبه بر مبنای افزایش قابلیت اطمینان به نتیجه محاسبات انجام داده است، منطبق است اما در مورد مقدار شیب این عدد به بیش از ۸۷ درصد کاهش می‌یابد (جدول ۵).

**جدول ۴- درصد انطباق نتایج حاصل از محاسبات روش رایج با نتایج روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نواحی ۱ تا ۸ (درصد قابلیت اطمینان به نتایج حاصل از روش رایج).**

| ناحیه | درصد انطباق جهت شیب | درصد انطباق مقدار شیب |
|---|---|---|
| ۱ | ۹۹٫۳۷ | ۹۹٫۷۴ |
| ۲ | ۹۹٫۷۲ | ۹۸٫۰۱ |
| ۳ | ۹۹٫۸۱ | ۹۸٫۷۰ |
| ۴ | ۹۸٫۷۱ | ۹۸٫۴۷ |
| ۵ | ۹۹٫۸۵ | ۹۹٫۵۷ |
| ۶ | ۹۸٫۱۶ | ۹۹٫۵۳ |
| ۷ | ۹۹٫۷۲ | ۹۹٫۰۵ |
| ۸ | ۹۹٫۸۷ | ۹۹٫۴۶ |

**جدول ۵- درصد انطباق نتایج حاصل از محاسبات روش رایج با نتایج روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در نواحی ۹ تا ۱۱ (درصد قابلیت اطمینان به نتایج حاصل از روش رایج).**

| ناحیه | نسبت درصد عبوری | درصد انطباق جهت شیب | درصد انطباق مقدار شیب |
|---|---|---|---|
| ۹ | ۵۰-۵۰ | ۹۹٫۶۹ | ۹۰٫۷۲ |
| ۱۰ | | ۹۹٫۹۱ | ۸۷٫۲۷ |
| ۱۱ | | ۹۸٫۷۶ | ۹۱٫۵۸ |
| ۹ | ۶۰-۴۰ | ۹۹٫۷۰ | ۹۲٫۳۵ |
| ۱۰ | | ۹۹٫۸۵ | ۸۹٫۶۳ |
| ۱۱ | | ۹۵٫۳۱ | ۹۲٫۳۶ |
| ۹ | ۷۰-۳۰ | ۹۹٫۹۲ | ۹۵٫۲۱ |
| ۱۰ | | ۹۸٫۴۶ | ۹۳٫۲۴ |
| ۱۱ | | ۹۷٫۲۵ | ۹۲٫۶۲ |
| ۹ | ۸۰-۲۰ | ۹۹٫۱۷ | ۹۶٫۰۳ |
| ۱۰ | | ۹۸٫۶۴ | ۹۵٫۲۶ |
| ۱۱ | | ۹۶٫۸۵ | ۹۶٫۰۳ |

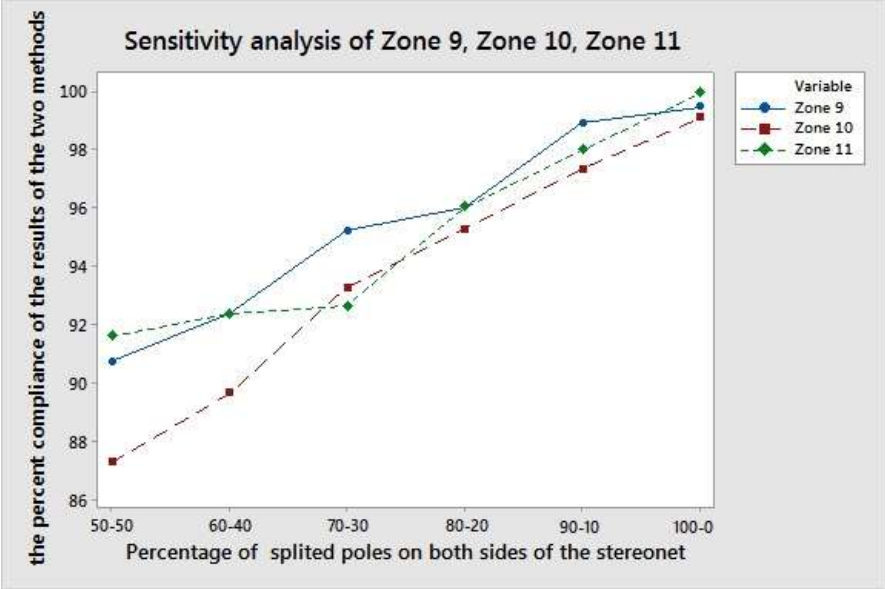
1-Cao
2-Cao and Lin
3-Wasantha and Ranjith


www.SID.ir

Archive of SID

| ناحیه | نسبت درصد عبوری | درصد انطباق جهت شیب | درصد انطباق مقدار شیب |
|---|---|---|---|
| ۹ | ۹۰-۱۰ | ۹۸/۳۱ | ۹۸/۸۹ |
| ۱۰ | | ۹۸/۵۴ | ۹۷/۳۲ |
| ۱۱ | | ۹۹/۱۹ | ۹۷/۹۸ |
| ۹ | ۱۰۰-۰ | ۹۹/۹۲ | ۹۹/۴۶ |
| ۱۰ | | ۹۹/۹۸ | ۹۹/۰۹ |
| ۱۱ | | ۹۹/۳۴ | ۹۹/۹۲ |

تحلیل حساسیت انجام گرفته بر روی جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه نشان داد که انطباق نتایج روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو با درصد قطب‌های عبوری از مرز شبکه در ارتباط است. با کاهش درصد عبوری و نزدیک شدن به حالت‌های قرارگیری قطب‌ها به صورت مشخص در یک سوی شبکه، انطباق بین نتایج دو روش و در نتیجه قابلیت اطمینان به محاسبات روش رایج در مورد جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه افزایش می‌یابد (شکل ۶).




**شکل ۶- تحلیل حساسیت درصد انطباق نتایج دو روش، با توجه به درصد قطب‌های تقسیم شده در دو طرف شبکه استریونت.**

## ۷- بررسی یک مورد مطالعاتی

در بخش قبل، برتری روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو نسبت به روش قطعی رایج در محاسبه جهت‌داری صفحه نماینده دسته درزه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه به بررسی یک مورد مطالعاتی در دیواره شمالی معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر و مقایسه تحلیل سینماتیکی ریزش‌های سنگی با استفاده از محاسبات روش رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو پرداخته شده است.

در دیواره شمالی معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر تعداد سه دسته درزه شناسایی شد (شکل ۷). در این مورد مطالعاتی دسته درزه شماره دو و سه از نظر سینماتیکی در شیب مورد نظر ریزش نوع گوه‌ای را ایجاد می‌کنند. توزیع آماری منطبق شده بر داده‌های جهت‌داری دسته درزه‌های مورد مطالعه در جدول ۶ آورده شده است.

**جدول ۶- تابع توزیع آماری جهت‌داری دسته درزه‌ها.**

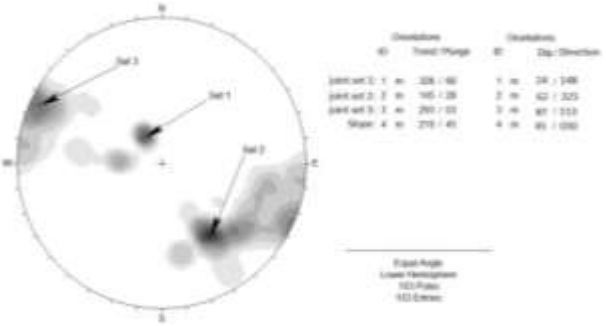
| جهت شیب | مقدار شیب | دسته درزه |
|---|---|---|
| لاگ لوجستیک ۳ پارامتری | ویبل | ۱ |
| لوجستیک | ویبل | ۲ |
| نرمال | ویبل ۳ پارامتری | ۳ |

در ادامه جهت‌داری صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌های متعلق به هر یک از این سه دسته درزه با استفاده از محاسبات روش رایج و همچنین روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو (شرح داده شده در بخش‌های قبل) تعیین شد (شکل ۷ و ۸). همانطور که مشاهده می‌شود برای دسته درزه‌های شماره ۱ و ۲ که درزه‌های متعلق به آن‌ها در یک طرف شبکه استریونت قرار دارند، نتایج دو روش تقریبا یکسان است اما برای دسته درزه شماره ۳ که درزه‌های متعلق به آن به محیط شبکه نزدیک شده و از طرف دیگر وارد شبکه می‌شوند (جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه)، در این مورد مطالعاتی اختلاف ۵

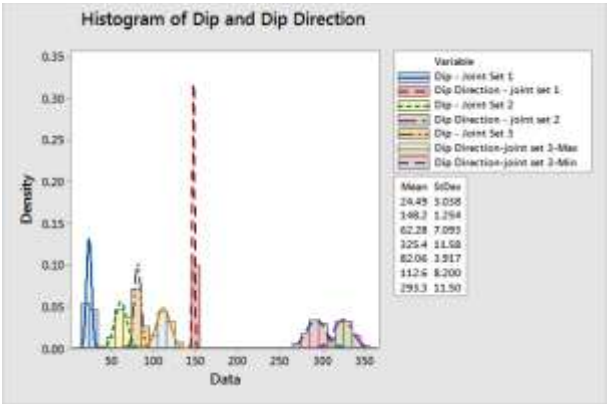

www.SID.ir

Archive of SID

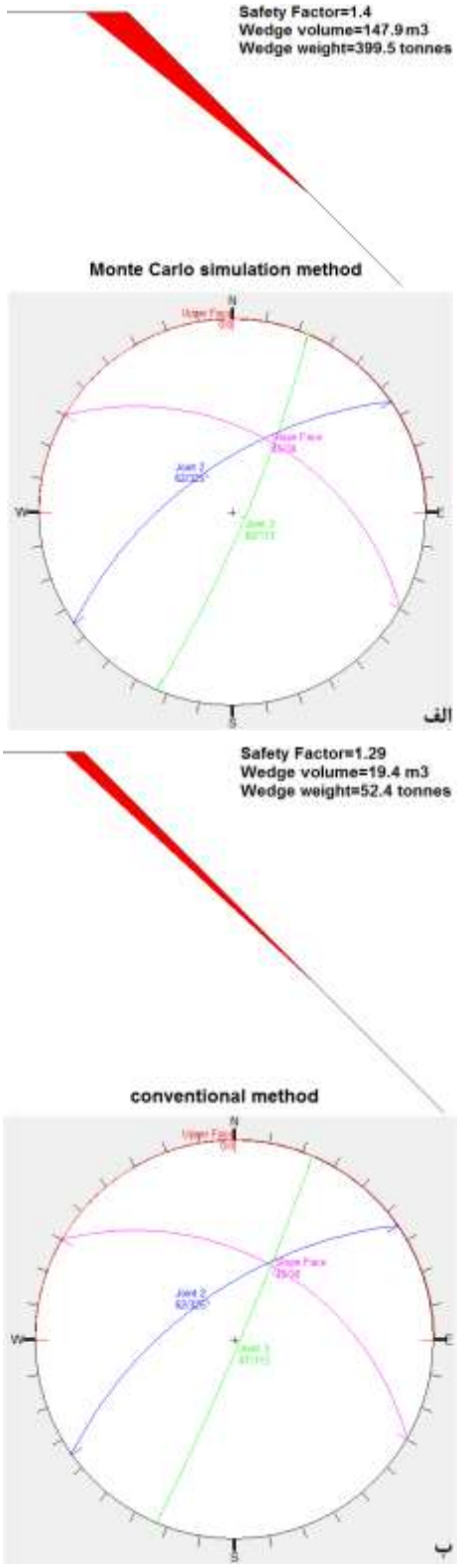
درجه‌ای در مقدار شیب محاسبه شده، مشاهده می‌شود. این اختلاف سبب می‌شود، گوه شناسایی شده با نرم‌افزارهای Swedge و Dips در حالتی که از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو در تعیین جهت‌داری صفحه معرف مربوط به دسته درزه‌ها استفاده شده است در مقایسه با روش رایج بزرگ‌تر باشد (شکل ۹). روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقدار شیب دسته درزه شماره ۳ را ۵ درجه کمتر تعیین می‌کند. شیب کمتر سبب افزایش فاکتور ایمنی می‌شود اما در این حالت حجم و وزن گوه شکل گرفته افزایش می‌یابد. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در این مورد مطالعاتی تنها با وجود یک دسته درزه از نوع جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه و اختلاف ۵ درجه‌ای در جهت‌داری محاسبه شده با دو روش اختلاف قابل ملاحظه‌ای در حجم و وزن بلوک و تا حدی در فاکتور ایمنی ایجاد می‌شود. بررسی‌های بخش قبل نشان داد، اختلاف دو روش با توجه به پراکندگی و توزیع درزه‌های مورد مطالعه می‌تواند تا بیش از ۱۰ درجه نیز افزایش یابد، همچنین اگر دسته درزه‌های تاثیرگذار در ریزش تعداد بیشتری از نوع دسته درزه با جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه باشند (بسته به تعداد آن‌ها) نتایج تحلیل به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد.



**شکل ۷- جهت‌داری صفحات ناپیوستگی شناسایی شده با استفاده از روش رایج.**




**شکل ۸- جهت‌داری صفحات ناپیوستگی شناسایی شده با استفاده از روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو.**




**شکل ۹- اختلاف میان روش قطعی رایج و روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو درتعیین جهت‌داری ناپیوستگی‌ها و ریزش‌های سنگی. الف- روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارل؛ ب- روش قطعی رایج.**


www.SID.ir

Archive of SID

## ۸- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی جدید در محاسبه صفحه ناپیوستگی حاصل از یک سری درزه که متعلق به یک دسته درزه‌اند، بر مبنای روش احتمالاتی شبیه‌سازی مونت‌کارلو ارایه شد. در ادامه نتایج حاصل از این روش با روش برداری رایج مقایسه شد. اعتبارسنجی که بر روی دو روش یاد شده به وسیله روش عددی انجام گرفت، نشان داد که روش پیشنهادی در این تحقیق نسبت به روش رایج مناسب‌تر است. روش ارایه شده در این تحقیق روشی بر مبنای افزایش قابلیت اطمینان به محاسبات است و با در نظر گرفتن تمامی حالات ممکن برای متغیرها از طریق تعیین تابع توزیع آماری آن‌ها و نمونه‌گیری از آن تابع نهایی را شبیه‌سازی می‌کند. نتایج این بررسی نشان داد، به طور کلی محاسبات روش رایج در تعیین جهت شیب و مقدار شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از یک سری درزه که متعلق به یک دسته درزه‌اند، در شرایطی که قطب‌های درزه‌های متعلق به یک دسته درزه به طور مشخص در یک سوی شبکه قرار می‌گیرند، قابلیت اطمینان بیش از ۹۸ درصد برای جهت شیب و مقدار شیب دارد اما محاسبات برای جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه از قابلیت اطمینان به مقدار بیش از ۹۵ درصد برای جهت شیب و بیش از ۸۷ درصد برای مقدار شیب کاهش می‌یابد.

قابلیت اطمینان به محاسبات روش رایج در مورد جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه، تحت تاثیر درصد داده‌های عبوری از مرز شبکه قرار دارد و با کم شدن تعداد جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه این قابلیت اطمینان افزایش می‌یابد، به طوری که در مورد مقدار شیب صفحه ناپیوستگی محاسبه شده، در درصد داده‌های عبوری (درصد داده‌های تقسیم شده در دو سوی مرز شبکه)، ۲۰ تا ۸۰ و ۱۰ تا ۹۰ درصد قابلیت اطمینان مجددا افزایش یافته و به بالای ۹۵ درصد می‌رسد.

قابلیت اطمینان پایین در تعیین مقدار شیب صفحه ناپیوستگی محاسبه شده با روش رایج در حالت جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه، به دلیل عدم در نظر گرفتن تئوری محاسباتی مناسب است. در جهت‌داری‌های توسعه یافته در دو سوی مرز شبکه، مقدار شیب‌هایی وجود دارد که هم از نظر زمین‌شناسی و هم آماری و احتمالاتی تک گروهه بودن را از خود نشان می‌دهند. در چنین مواردی استفاده از روش‌هایی مانند قطب منفی برای محاسبه مقدار شیب صفحه ناپیوستگی حاصل از درزه‌ها که بر مبنای دو گروهه بودن داده‌ها استوار است، می‌تواند نتایج گمراه کننده‌ای به دنبال داشته باشد. در اینگونه موارد می‌توان مقدار شیب صفحه ناپیوستگی را با اطمینان بالا و با روش‌های آماری و احتمالاتی مانند روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو محاسبه کرد.

## منابع


1. Xu C; Dowd P; 2010; "*A New Computer Code for Discrete Fracture Network Modeling*" Computers & Geosciences, 36, 292–301.
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, 415–424.
3. Alavi Nezhad Khalil Abad S. V; Tugrul A; Gokceoglu C; Jahed Armaghani D; 2016; "*Characteristics of weathering zones of granitic rocks in Malaysia for geotechnical engineering design*" Engineering Geology, 200, 94–103.
4. ISRM; 1978; "*International Society for Rock Mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*" Int. J. Rock Mech. Min. Sci, Geomech, 15, 319–368.
5. Zheng W; Zhuang X; Tannant D. D; Cai Y; Nunoo S; 2014; "*Unified continuum/discontinuum modeling framework for slope stability assessment*" Engineering Geology, 179, 90–101.
6. Price N. J; 1966; "*Fault and joint development in Brittle and semi-Brittle rock*" Pergamon, Oxford.
7. Flynn Z. N; Pine R. J; 2007; "*Fracture characterisation determined by numerical modeling analyses*" 11th Congress of the international Society for Rock Mechanics, Taylor & Francis Group, London.
8. El-Ramly H; Morgenstern N. R; Cruden D. M; 2002; "*Probabilistic slope stability analysis for practice*" Canadian Geotechnical Journal, 39, 665-683.
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, 63–68.
10. Park H. J; West T. R; 2001; "*Development of a Probabilistic Approach for Rock Wedge*



www.SID.ir

Archive of SID

*Failure*" Engineering Geology, 59, 223-251.

11. Priest S. D; 1993; "*Discontinuity Analysis for Rock Engineering*" Published by Chapman & Hall, London.
12. 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, Taylor & Francis Group, London.
13. Baecher. G. B; Christen. J. T; 2003; "*Reliability and statistics in geotechnical engineering*" John Wiley& Sons.
14. Li. D; Zhou. C; Lu. W; Jiang. Q; 2009; "*A system reliability approach for evaluating stability of rock wedges with correlated failure modes*" Computers and Geotechnics, 36, 1298-1307.
15. Mulchrone. K. F; Galan. D. P; Alonso. G. G; 2013; "*Mathematica code for least-squares cone fitting and equal-area stereonet representation*" Computers & Geosciences, 54, 203-210.
16. Cardozo. N; Allmendinger. R. W; 2013; "*Spherical projections with OSXStereonet*" Computers & Geosciences, 51, 193-205.
17. Zheng. J; Deng. J; Yang. X; Wei. J; Zheng. H; Cui. Y; 2014; "*An improved Monte Carlo simulation method for discontinuity orientations based on Fisher distribution and its program implementation*" Computers and Geotechnics, 61, 266-276.
18. Zheng. J; Deng. J; Zhang. G; Yang. X; 2015; "*Validation of Monte Carlo simulation for discontinuity locations in space*" Computers and Geotechnics. 67, 103-109.
19. Zhan. J; Xu. P; Chen. J; Wang. Q; Zhang. W; Han. X; 2017; "*Comprehensive characterization and clustering of orientation data: A case study from the Songta dam site, China*" Engineering Geology, 225, 3-18.
20. Liu. J; Zhao. X. D; Xu. Z. H; 2017; "*Identification of rock discontinuity sets based on a modified affinity propagation algorithm*" International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 94, 32-42.
21. Davis. J. R; Titus. S. J; 2017; "*Modern methods of analysis for three-dimensional orientational data*" Journal of Structural Geology, 96, 65-89.
22. Rocscience; 2018; "*Dips v. 7.0 Tutorial Manual*" Www.rocscience.com.
23. Hoel P. G; Port S. C; Stone C. J; 1971; "*Introduction to Probability Theory*" Houghton Mifflin Company.
24. Rosenblueth E; 1975; "*Point estimates for probability moments*" Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 72, 3812–3814.
25. Iiyama K; Yoshiyuki A; Fujita K; Ichimura T; Morikawa H; Hori M; 2019; "*A point-estimate based method for soil amplification estimation using high resolution model under uncertainty of stratum boundary geometry*" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 121, 480–490.
26. Ang A. H. S; Tang W. H; 1984; "*Probability concepts in engineering planning and design*" John Wiley & Sons.
27. Metropolis N; Ulam S; 1949; "*The Monte Carlo method*" Journal of the American Statistical Association, 44, 335-341.
28. Fattahi H; Varmazyari Z; Babanouri N; 2019; "*Feasibility of Monte Carlo simulation for predicting deformation modulus of rock mass*" Tunnelling and Underground Space Technology, 89, 151-156.
29. Tobutt D. C; 1982; "*Monte Carlo Simulation Methods for Slope Stability*" Computers & Geosciences, 8, 199-208.
30. Rao S. S; 1992; "*Reliability – based design*" McGraw-Hill, University of Michigan.
31. Robert C; Casella G; 2004; "*Monte Carlo Statistical Methods*" 2nd Edition, Springer, New York.
32. Barla. G; Bonini. M; Cammarata. G; 2004; "*Stress and seepage analyses for a gravity dam on a jointed granitic rock mass*" Numerical Modeling of Discrete Materials, 263-268.
33. Cao. R; Lin. H; Cao. P; 2018; "*Strength and failure characteristics of brittle jointed rock-like specimensunder uniaxial compression: Digital speckle technology and a particlemechanics approach*" International Journal of Mining Science and Technology, 28, 669–677.
34. Cao. R; Lin. H; 2017; "*Experimental and Numerical Study of Failure Behavior and Energy Mechanics of Rock-Like Materials Containing Multiple Joints*" Advances in Materials Science and Engineering, Hindawi.


www.SID.ir

Archive of SID

35. Liu. J; Sun. S; Yue. L; Wei. J; Wu. J; 2017; "*Mechanical and failure characteristics of rock-like material with multiple crossed joint sets under uniaxial compression*" Advances in Mechanical Engineering, 9(7),1-18.

36. Wasantha. P.L.P; Ranjith. P.G; 2014; "*Distinct Element Model Analysis of Mechanical Behavior of Rock withInterconnected Non-persistent Joints*" GeoHubei International Conference on Sustainable Infrastructure 2014, Yichang Hubei, China.


www.SID.ir