

عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی مجزا به منظور کاهش ریسک شبیه سازی بر اساس توابع توزیع

آماري تصادفي؛ مطالعه موردی تونل امامزاده هاشم

مهین اعتمادی فر^۱، غلامرضا شعاعی^{۲*}، مرتضی جوادی اسطهباناتی^۳، آرش هاشم نژاد^۴

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

توده سنگ، متشکل از سنگ بکر و ناپیوستگی هایی مانند شکستگی ها می باشد که این شکستگی ها تأثیر به سزایی بر خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی آن دارند. از جمله در تحلیل های حساس مانند شبیه سازی پایداری تونل، عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی می تواند نتایج شبیه سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار دهد. از این رو تعیین دقیق پارامترهای درزه داری سنگ مانند جهت داری و طول اثر بسیار حائز اهمیت است. استفاده از شبکه شکستگی مجزا یکی از روش های متداول به منظور شبیه سازی سنگ درزه دار می باشد. از آنجاکه ساخت شبکه شکستگی با استفاده از توابع توزیع آماری صورت می گیرد، همواره عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی یکی از چالش های بزرگ مهندسیین بوده است و مخصوصاً ارزیابی دقیقی از تأثیر استفاده از توابع آماری بر تولید پارامترهای درزه داری ارائه نشده است. از اینرو، در این مطالعه به وسیله یک کد توسعه داده شده در متلب و همچنین نرم افزار 3DEC شبکه شکستگی تونل امام زاده هاشم ساخته شده است و به بررسی تأثیر توابع توزیع آماری از جمله نرمال، توانی و نمایی منفی بر عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی پرداخته شده است. نتایج حاکی از این است که توزیع نمایی منفی می تواند موجب خطا نسبتاً زیادی در ساخت شبکه شکستگی شود مخصوصاً هنگامی که از این توزیع برای تولید جهت شیب استفاده می شود. همچنین نتایج مطالعه پارامتریک نشان داد که استفاده از توابع توزیع آماری که واریانس داده ها در تابع توزیع احتمال آن ها در نظر گرفته شده است می تواند موجب افزایش دقت در تولید پارامترهای شکستگی مانند شیب، جهت شیب و طول اثر شود و باعث کاهش عدم قطعیت در تولید شبکه شکستگی شود.

کلید واژه ها: شبکه شکستگی مجزا، عدم قطعیت، 3DEC، توزیع آماری.

۱. دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، m.etemadifar@modares.ac.ir

۲. * مسئول مکاتبات. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، shoaei@modares.ac.ir

۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی معدن، نفت و ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، m.javadi@shahroodut.ac.ir

۴. دکتری زمین شناسی مهندسی، شرکت مهندسیین مشاور ساحل امید ایرانیان، arash.hashemnejad@gmail.com

۱. مقدمه

توده سنگ ترکیبی از سنگ بکر و ناپیوستگی‌هایی مانند درزه ها، صفحات لایه‌بندی، گسل‌ها و دیگر صفحات ضعیف است. برای تجزیه و تحلیل تأثیر شکستگی بر رفتار هیدرولیکی و مکانیکی توده سنگ، توصیف هندسه شکستگی توده سنگ درزه‌دار ضروری است (Wittke 2014). در بسیاری از ساختارهای زمین‌شناسی نفوذپذیری بدنه صلب سنگ در مقایسه با نفوذپذیری شکستگی‌های موجود در توده سنگ بسیار ناچیز بوده و شکستگی‌ها مسیر اصلی جریان سیال هستند. شکستگی‌ها به شدت بر روی خصوصیات مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگ به خصوص سنگ‌های کریستاله با نفوذپذیری پایین تأثیر می‌گذارند (Adler and Thovert 1999). بنابراین برای چنین ساختارهایی رفتار هیدرولیکی توده سنگ به وسیله شکستگی‌ها کنترل می‌شود و برآورد رفتار هیدرولیکی توده سنگ نیازمند درک مناسبی از خصوصیات هیدرولیکی شکستگی و شبکه شکستگی‌ها است. تأثیر ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ، بر ویژگی‌های مهندسی توده سنگ، به مراتب بیش از نقشی است که خود سنگ بکر می‌تواند در این مورد داشته باشد (Feng 2001). در بسیاری از کاربردهای مهندسی ناپیوستگی‌ها عامل بحرانی بوده و قابلیت توده سنگ مثل مقاومت ساختارهای سنگی یا کیفیت جریان سیال در توده سنگ را کنترل می‌کنند. در این شرایط، توده سنگ به دلیل وجود ناپیوستگی‌ها، رفتاری ناهمسان‌گرد و وابسته به مقیاس (Scale size) از خود نشان می‌دهد (Wang and Cai 2020).

به منظور شبیه‌سازی شکستگی‌ها روش‌های مختلفی طی پنج دهه گذشته ارائه شده است. در مراحل اولیه شبکه شکستگی از طریق سه گروه عمود بر هم از صفحات نامحدود با فواصل ثابت یا تصادفی مدل‌سازی شده است (Snow 1969). در مطالعات گذشته، فاصله یک صفحه شکستگی نامحدود از یک مبدأ قراردادی با به‌کارگیری مدل‌های توزیع پواسون پیشنهاد داده شده است (Priest and Hudson 1976; Andersson et al. 1984; Andersson and Thunvik 1986).

جهت‌داری شکستگی‌ها به صورت تصادفی و یا با استفاده از جهت‌داری دسته درزه‌های غالب به دست می‌آید. فرض درزه‌های بینهایت که در روش آن‌ها اعمال می‌شود، ویژگی است که با شرایط واقعی و طبیعی توده سنگ تطابق ندارد. از این رو شبکه شکستگی متشکل از صفحات محدود با بهبود مدل صفحه‌ای پواسون پیشنهاد شد (Long et al. 1985; Andersson and Dverstorp 1987; Rouleau and Gale 1990; Cacas et al. 1987). در رویکرد لانگ برای هر شکستگی طولی محدود با جهت‌گیری دل‌خواه تعریف می‌شد و از این نظر نسبت به روش تحلیلی اسنو با واقعیت تطابق بیشتری داشت (Cacas et al. 1990). روش مادر-فرزند به منظور تولید دسته‌هایی از شکستگی در یک فرآیند ناهمگن توسط بیلوکس پیشنهاد گردید. در این روش مادر به یک شی ساختگی متشکل از اشیاء واقعی اشاره می‌کند (Billaux et al. 1989). به منظور تولید الگوهای شکستگی سنگ روش آماری مبتنی بر الگوریتم قانون محور (Rule-Based) توسط رایلی پیشنهاد شد (Riley 2004). یک روش جامع مهندسی به منظور تحلیل پایداری حفریه قائم در توده سنگ سخت توسط جان و همکاران پیشنهاد شده است. آن‌ها ابتدا شبکه شکستگی مجزای توده سنگ را به منظور ثبت پیچیدگی‌های ساختاری تولید کردند. در نهایت سیستم شکستگی‌های تولید شده به منظور تحلیل تنش با روش المان مجزا ترکیب شد (Hadjigeorgiou et al. 2009). در مطالعه دیگری حسینی و همکاران (۲۰۲۱) یک کد به منظور ساخت شبکه شکستگی توسعه دادند و به بررسی تأثیر پارامترهای درزه‌داری پرداختند.

با پیشرفت علم محققین از روش‌های نوین شبکه شکستگی مجزا به منظور شبیه‌سازی توده سنگ درزه‌دار استفاده کردند. در این روش‌ها امکان شبیه‌سازی شکستگی‌های با طول محدود و با جهت‌گیری دل‌خواه امکان‌پذیر می‌باشد. به منظور ساخت شبکه شکستگی مجزا اطلاعاتی از قبیل چگالی، جهت‌داری، طول و بازشدگی شکستگی‌ها مورد نیاز است. کد محاسباتی FracIUT به منظور تولید شبکه شکستگی مجزا بر مبنای توابع توزیع احتمال پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها و

شامل بررسی و استنتاج موقعیت، پایداری، جهت داری و دیگر ویژگی های هندسی درزه ها به عنوان متغیرهای تصادفی با توزیع های آماری است که مبنای تصادفی بودن مدل سازی ها خواهد بود. از آنجاکه در ساخت شبکه شکستگی از توابع آماری استفاده می شود لذا همواره با عدم قطعیت همراه بوده است که در فرایندهای حساس مانند پایداری تونل می تواند با چالش هایی همراه باشد (Wu et al. 2022). همچنین مطالعات گذشته حاکی از این است که به منظور ارزیابی شکستگی در توده سنگ نیاز به بررسی دقیق موقعیت شکستگی ها می باشد (Wu et al. 2022). از این رو در این پژوهش به مطالعه عدم قطعیت در تولید شبکه شکستگی پرداخته شده است. بدین منظور شبکه شکستگی با استفاده از یک کد توسعه داده شده در متلب بر اساس تکنیک مونت کارلو ساخته شده و با نتایج نرم افزار 3DEC و داده های تونل امام زاده هاشم مقایسه شده است.

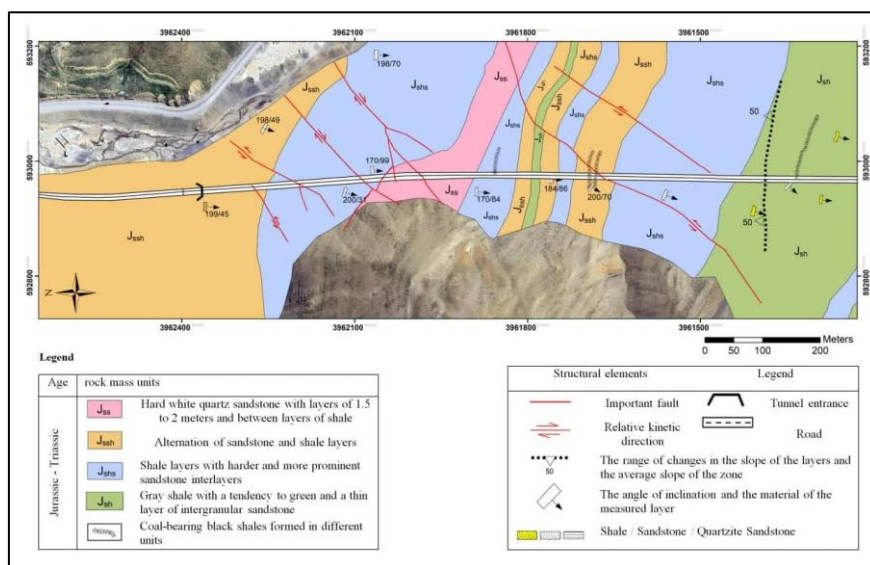
۲. روش تحقیق

در این مطالعه شبکه شکستگی سه بعدی بر اساس داده های تونل امام زاده هاشم ساخته شده است. این تونل واقع در شمال شرق تهران بوده و سنگ میزبان تونل عمدتاً رسوبی کامبرین، رسوبات کربناته و نهشته های رسوبی تخریبی ژوراسیک می باشد. نقشه زمین شناسی و یک نما از سینه کار تونل در شکل ۱ نشان داده شده است. به منظور مدل سازی، در گام نخست داده های شکستگی تونل امام زاده هاشم در مقاطع ۳ متری برداشت و وارد نرم افزار DIPS شده و سپس بر اساس تمرکز و شدت قطب شکستگی در نواحی مختلف استریون، چهار دسته درزه غالب در منطقه شناسایی شدند (شکل ۲).

بر اساس برازش انجام شده بر روی داده های برداشت شده با استفاده از نرم افزار Microsoft Excel، توابع آماری هر یک از دسته درزه ها مشخص شده است که در جدول ۱ ارائه شده است.

با استفاده از الگوریتم مونت کارلو توسعه داده شد (Joolaei Baghbanan, 2013). نوروزی و جلالی با استفاده از داده های سد رودبار لرستان شبکه ناپیوستگی های توده سنگ را در این منطقه شبیه سازی کردند (Noroozi et al. 2015). یک روش سه بعدی متکی بر هندسه با هدف مدل سازی لایه های چین خورده سنگ توسط فرشته نژاد و یاراحمدی بافقی پیشنهاد شد (Fereshtenejad et al. 2016). برخی از محققین از روش زمین آمار به منظور مدل سازی شبکه شکستگی مجزا استفاده کردند. آن ها با استفاده از داده های برداشت شده از دیواره گمانه ها و رخنمون های سطحی، چگالی و جهت داری شکستگی ها را با به کارگیری روش زمین آمار شبیه سازی کردند (Wang et al. 2019; Lotfi et al. 2019).

همچنین در مطالعات گذشته به بررسی تأثیر عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی بر جریان سیال ورود به داخل تونل پرداخته شده است (Javadi et al. 2015). لی و همکاران جدیدترین فناوری های شبکه های شکستگی مجزا (DFN) را به منظور مدل سازی ویژگی های هندسی، تکامل ژئومکانیکی و رفتار هیدرومکانیکی (HM) شبکه های شکستگی طبیعی در سنگ ارائه کردند (Lei et al. 2017). لایوین، با تقویت مدل ژنتیکی (UFM) بر اساس مفاهیم ساده هسته زایی، رشد و توقف با قوانین سلسله مراتبی، همبستگی بین شکستگی ها را معرفی کرد (Lavoine et al. 2020). برای انجام این کار، هسته زایی شکستگی های جدید با انرژی کرنش الاستیک اعوجاج ذخیره شده در ماتریس که تابعی از شکستگی های قبلی است، مرتبط می شود. آکارا الگوریتمی پیشنهاد کرد که تصاویر وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV) را با خصوصیات هندسی شبکه شکستگی گسسته و کمی سازی جریان سیال ادغام می کرد (Akara et al. 2020). در بسیاری از شیوه های مدل سازی توده سنگ، درزه ها با استفاده از فرض های غیر واقعی شبیه سازی می شوند، برای مثال فرض درزه های بینهایت که معمولاً در مدل سازی ها به کار می رود، ویژگی است که با شرایط واقعی و طبیعی توده سنگ تطابق ندارد (Rogers et al. 2007). در مدل سازی های تصادفی، شیوه کلی

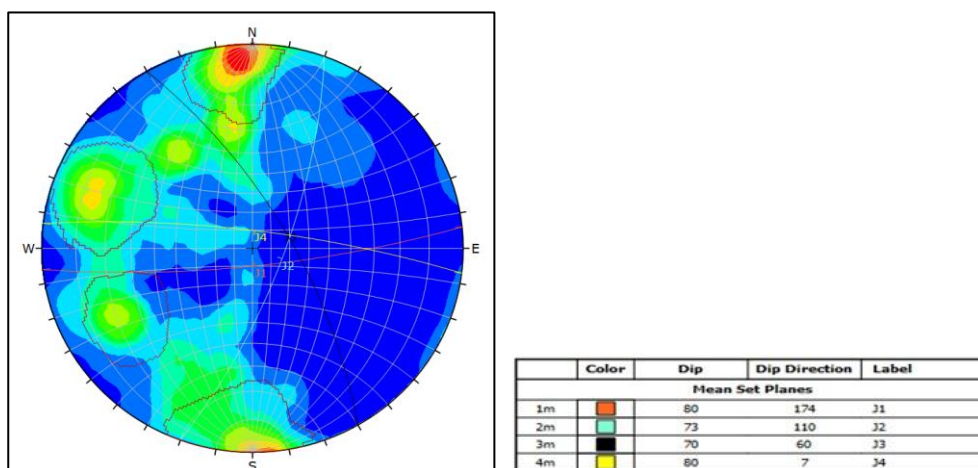


(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) نقشه زمین شناسی (ب) یک نما از سینه کار تونل امام زاده هاشم به همراه ناپیوستگی‌های موجود در سینه کار.



شکل ۲. دسته درزه‌های شناسایی شده با استفاده از نرم افزار DIPS.

جدول ۱. پارامترهای آماری هر یک از دسته درزه‌ها.

Parameters	Distribution Modle	characteristics	Joint set
Variance=35 D=3.3832	Mean=175 Min=64	Normal Power	Dip direction Dip
$\lambda=0.27$	Min=1, Max=10	Negative exponential	Length
Variance=139 Variance=98	Mean=110 Mean=72	Normal Normal	Dip direction Dip
Min=0.8, Max=8.5	A=23.5, D=0.1406	Power	Length
Variance=104 Variance=85	Mean=58 Mean=66	Normal Normal	Dip direction Dip
Min=1, Max=7.9	$\lambda=0.31$	Negative exponential	Length
$\lambda=0.9341$		Negative exponential	Dip direction
Variance=39	Mean=81	Normal	Dip
Min=0.9, Max=10	$\lambda=0.2623$	Negative exponential	Length

تعیین پارامترهای درزه‌داری با استفاده از تکنیک مونت کارلو شبکه شکستگی ساخته می‌شود. مطالعات گذشته نشان داده است که روش مونت کارلو بهترین روش برای ساخت شبکه شکستگی است (Fu et al 2016). در این روش هر شکستگی به صورت یک دیسک یا متوازی اضلاع در فضای سه‌بعدی و با طول متناهی در این مطالعه، یک کد محاسباتی در نرم‌افزار متلب به منظور ساخت شبکه شکستگی توسعه داده شده است. این کد توانایی در نظرگیری توابع آماری نرمال، لاگ نرمال، توانی، نمایی و یکنواخت را دارا است. همچنین در کد توسعه داده شده امکان نمایش سه‌بعدی صفحات شکستگی وجود دارد و می‌توان همه پارامترهای هر یک از شکستگی‌ها را به صورت فایل اکسل خروجی گرفت. الگوریتم کلی ساخت شبکه شکستگی با استفاده از کد توسعه داده شده در شکل ۳ آورده شده است.

در این مطالعه با استفاده از تکنیک مونت کارلو و براساس کد توسعه داده شده در متلب، ۱۰ مدل تصادفی برای شبکه شکستگی تونل امام زاده هاشم ساخته شده است. این ده شبکه به منظور حذف اثر تصادفی در ساخت شبکه شکستگی و با

۳. توسعه کد ساخت شبکه شکستگی مجزا

حداقل پارامترهای مورد نیاز برای ساخت شبکه شکستگی جهت‌داری، طول اثر و دانسیته شکستگی می‌باشد. این پارامترها عموماً به وسیله برداشت‌های میدانی، اطلاعات گمانه‌ها و یا با استفاده تجهیزات برداشت‌های مجازی مانند لیدار (LiDAR) تعیین می‌شوند (Vazaios, 2015). پس از شبیه‌سازی می‌شود. مختصات مرکز صفحه شکستگی در فضای سه‌بعدی عبارت است از (Priest 1993):

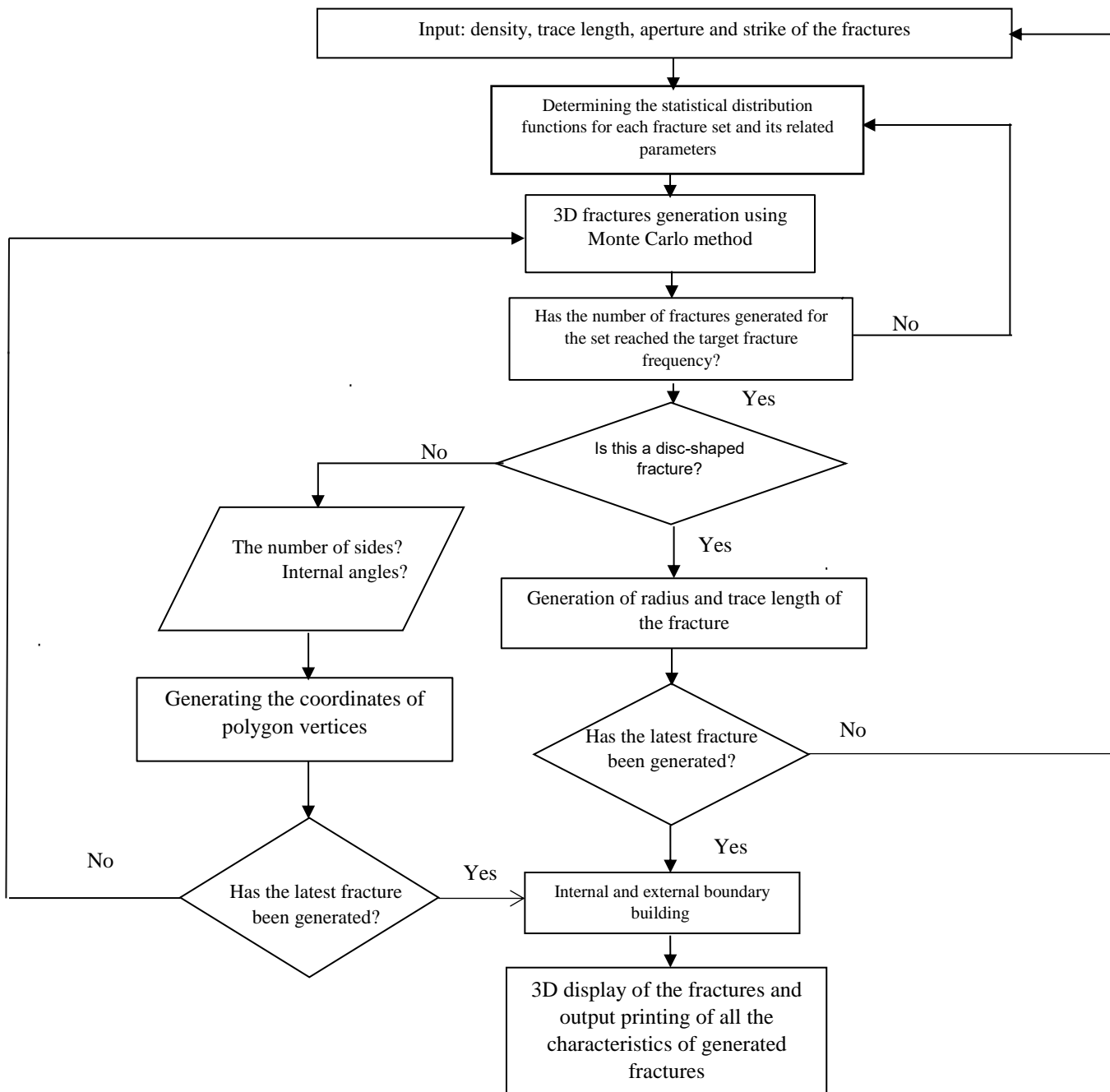
$$\begin{aligned} x_i &= x_{g1} + R_i(x_{g2} - x_{g1}) \\ y_i &= y_{g1} + R_i(y_{g2} - y_{g1}) \end{aligned} \quad (1)$$

$z_i = z_{g1} + R_i(z_{g2} - z_{g1})$
که در آن x_{g1} ، y_{g1} و z_{g1} و x_{g2} ، y_{g2} و z_{g2} مختصات محدوده مورد نظر است. همچنین طول شکستگی از رابطه زیر به دست می‌آید.

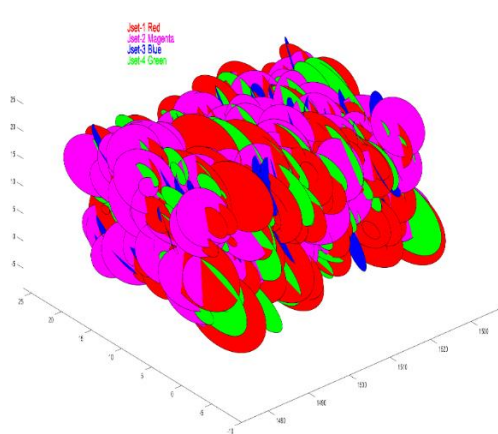
$$l = [l_{\min}^{-D} + R_i(l_{\max}^{-D} - l_{\min}^{-D})]^{-1/D} \quad (2)$$

l_{\min} و l_{\max} به ترتیب کوچکترین و بزرگترین طول شکستگی، D بعد فرکتال شکستگی و R_i عدد تصادفی می‌باشد (Baghbanan and Jing, 2008). همچنین شیب و جهت شیب با استفاده از توابع توزیع آماری شکستگی تولید می‌شود.

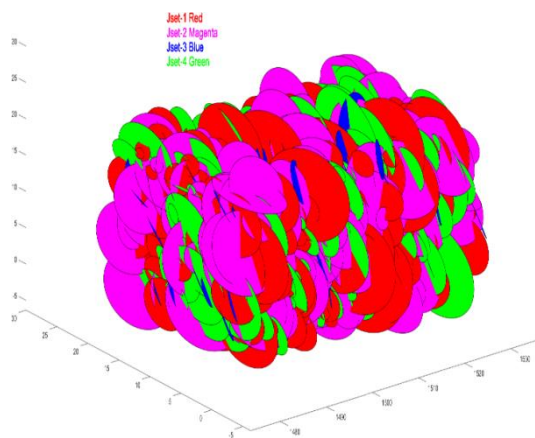
تغییر عددی تصادفی تولید شده اند که در شکل ۴ آورده شده اند.



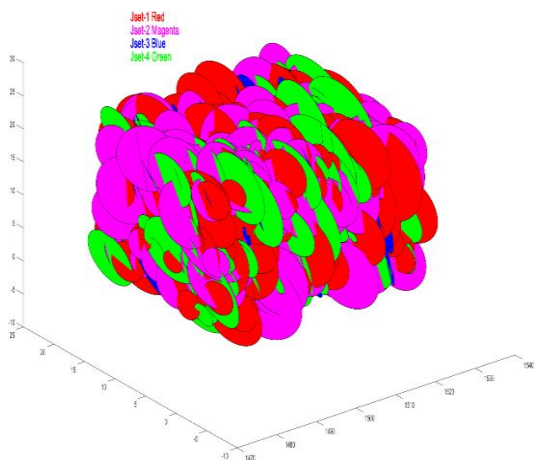
شکل ۳. الگوریتم تولید شبکه شکستگی سه بعدی کد توسعه داده شده در محیط نرم افزار متلب.



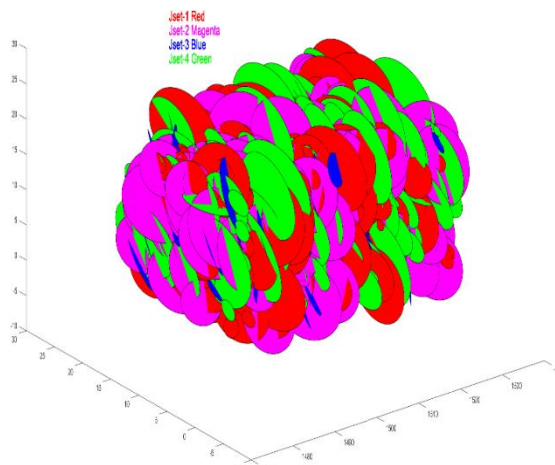
2 Model



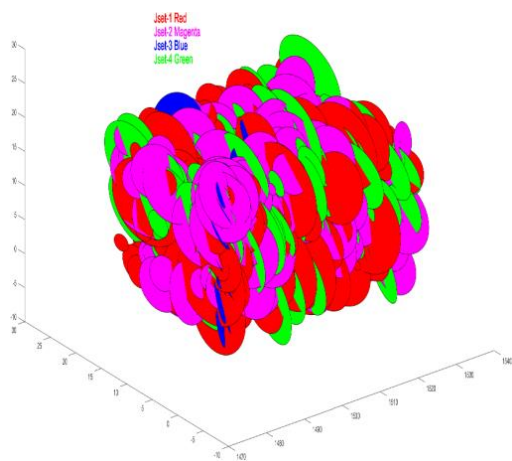
1 Model



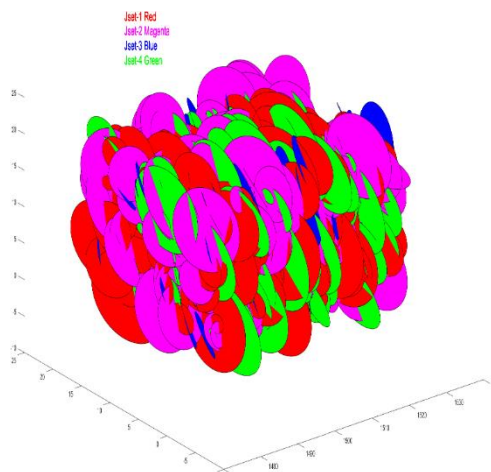
4 Model



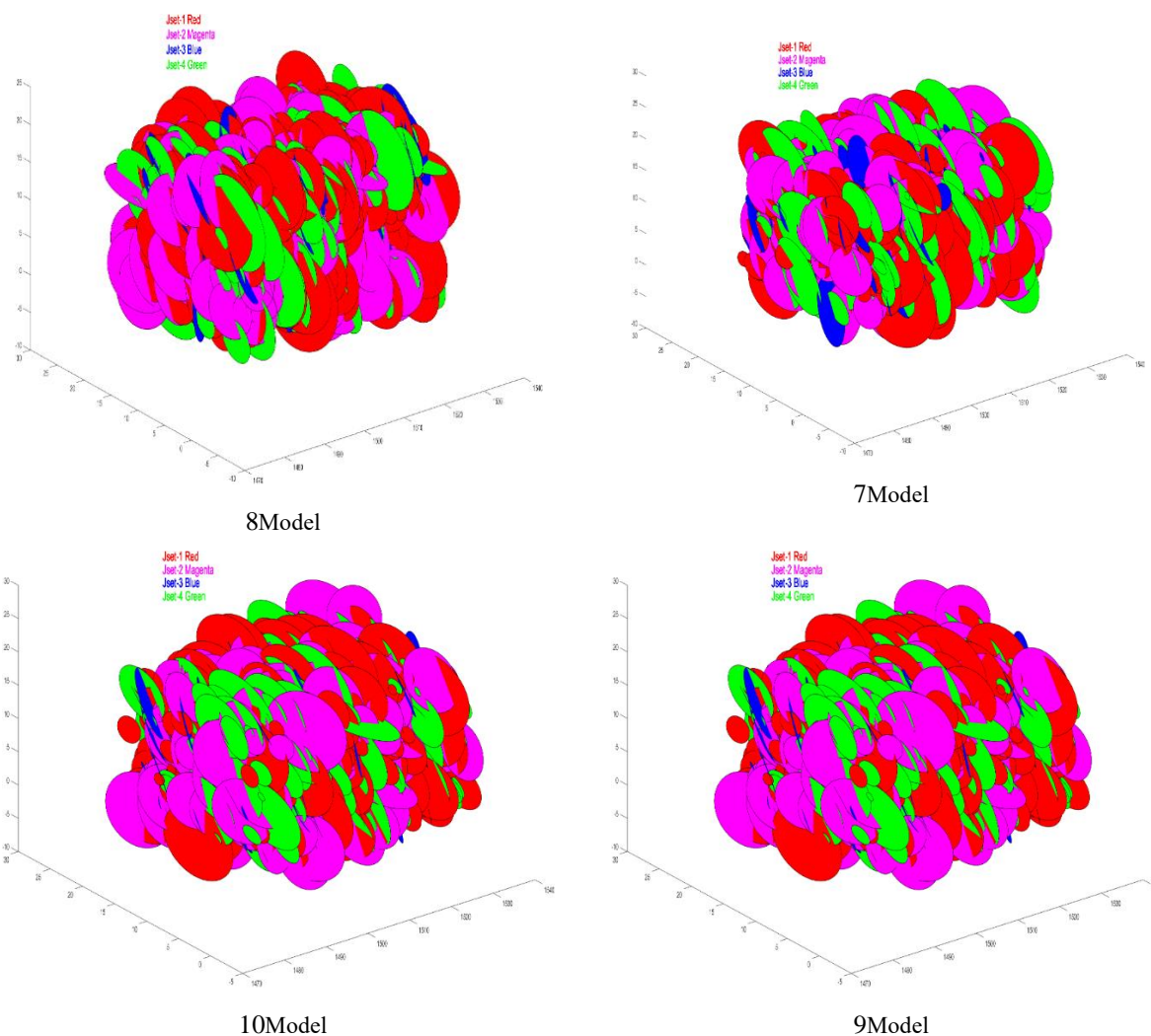
3 Model



6 Model



5 Model



شکل ۴. ده شبکه شکستگی ساخته شده با کد توسعه داده شده.

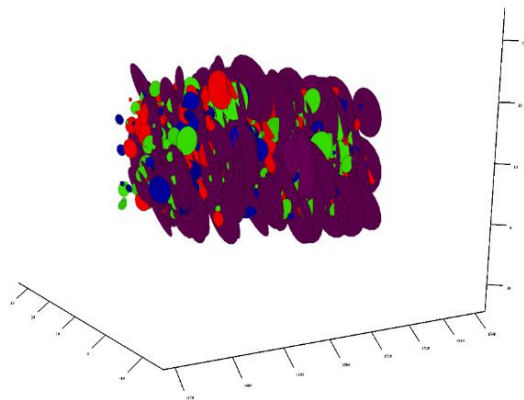
حجم محدوده برداشت)، P21 (طول همه شکستگی‌ها در واحد سطح محدوده برداشت) مدل‌سازی کرد. سایر روشهای اندازه‌گیری دانسیته دسته درزه در شکل ۵ ارائه شده است (3DEC User's guide, 2013).

با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH در نرم افزار 3DEC، ۱۰ شبکه شکستگی تصادفی تونل امام زاده هاشم ساخته شده است که در شکل ۶، آورده شده است. این ده شبکه متفاوت مانند آنچه برای کد توسعه داده شده بیان شد با تغییر اعداد تصادفی تولید شده اند.

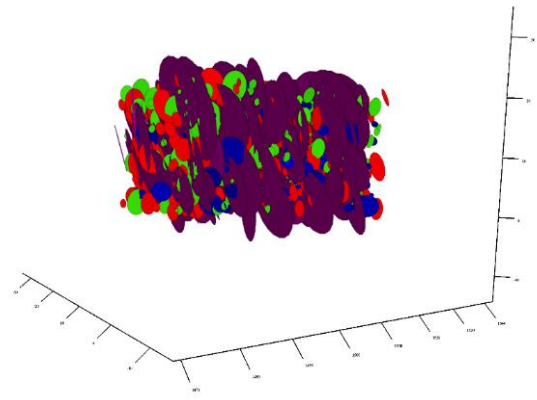
۴. ساخت شبکه شکستگی با استفاده از نرم افزار 3DEC در نرم‌افزار المان مجزا 3DEC، از صفحات دیسکی یا متوازی اضلاع با ابعاد محدود به منظور نمایش شکستگیها در فضای سه بعد استفاده میشود. در این نرم‌افزار بر اساس توابع آماری طول، موقعیت و جهت‌داری شکستگی می‌توان شبکه شکستگی را تولید کرد. برخی از توابع آماری مانند توانی، یکنواخت و گوس در این نرم‌افزار موجود است و سایر توابع را میتوان با استفاده از زبان برنامه‌نویسی FISH توسعه داد (3DEC User's guide, 2013). همچنین دانسیته دسته درزه را می‌توان با حالت‌های مختلفی مانند P32 (سطح شکستگی به

		Dimension of Feature				
		Number of Fractures	Fracture Trace Length	Fracture Area	Fracture Volume	
		0	1	2	3	
Dimension of Sampling Region	Point	P_{00} Number of fracture samples per point sample of rock mass				Point Measures
	Line (Borehole)	P_{10} Number of fractures per unit length of scanline (frequency or linear density)	P_{11} Total fracture aperture per unit length of scanline (linear porosity)			Linear Measures
	Area (Traceplane)	P_{20} Number of trace centers per unit area of sampling surface (areal density or trace density)	P_{21} Length of fracture traces per unit area of sampling surface (areal intensity or trace intensity)	P_{22} Area of fractures per unit area of sampling plane (areal porosity)		Areal Measures
	Volume	P_{30} Number of fracture centers per unit volume of rock mass (volumetric density)		P_{32} Area of fractures per unit volume of rock mass (volumetric intensity)	P_{33} Volume of fractures per unit volume of rock mass (volumetric porosity)	Volumetric Measures
						↑ Density ↑ Intensity ↑ Porosity

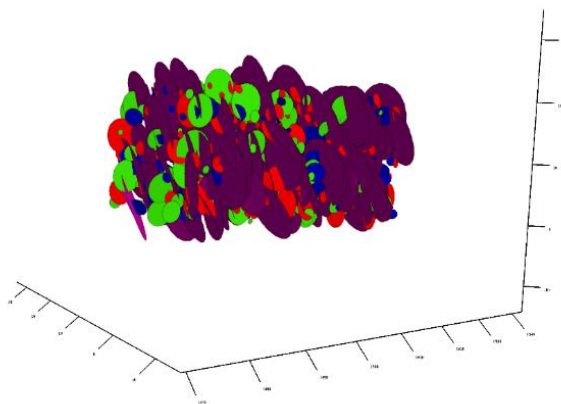
شکل ۵. روش های اندازه گیری دانسیته درزه داری (guide DEC User's 2013).



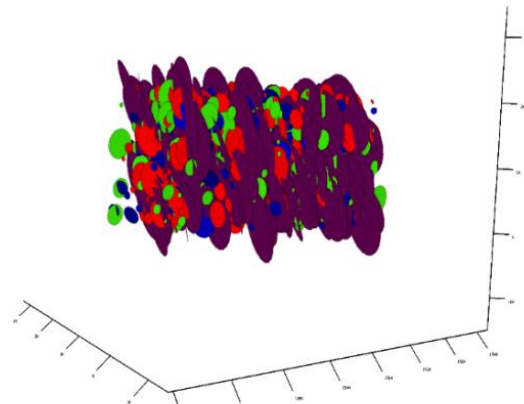
2 Model



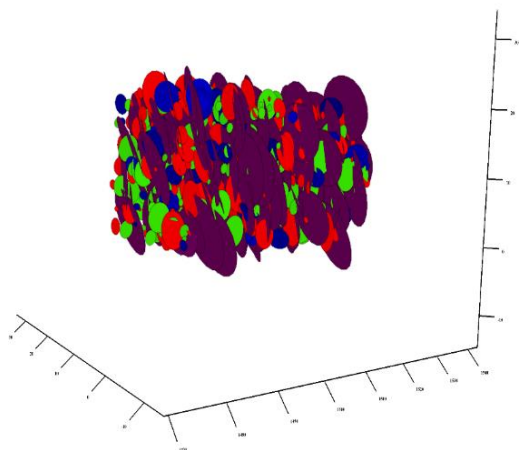
1 Model



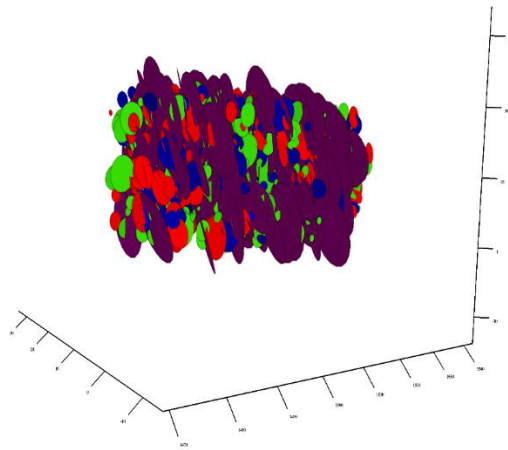
4 Model



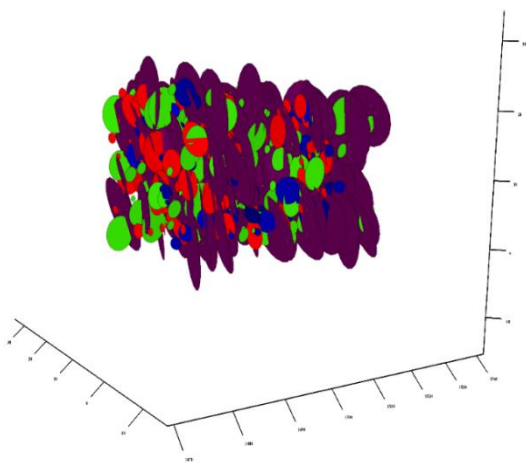
3 Model



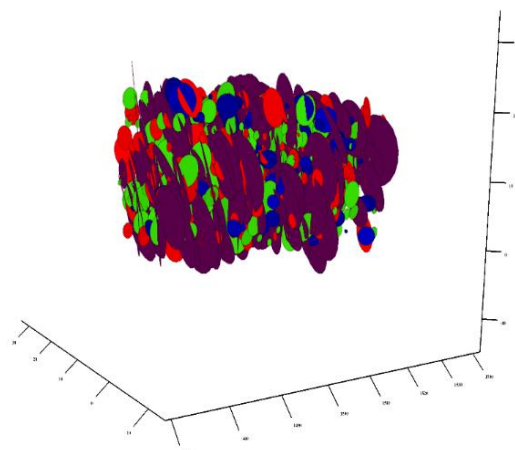
6 Model



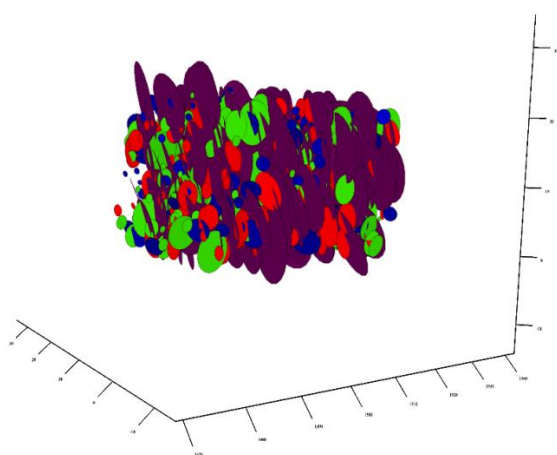
5 Model



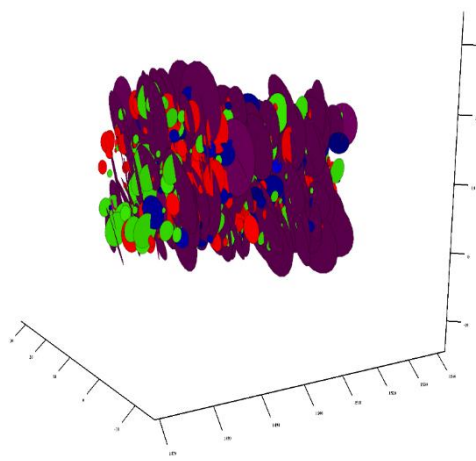
8 Model



7 Model



10Model



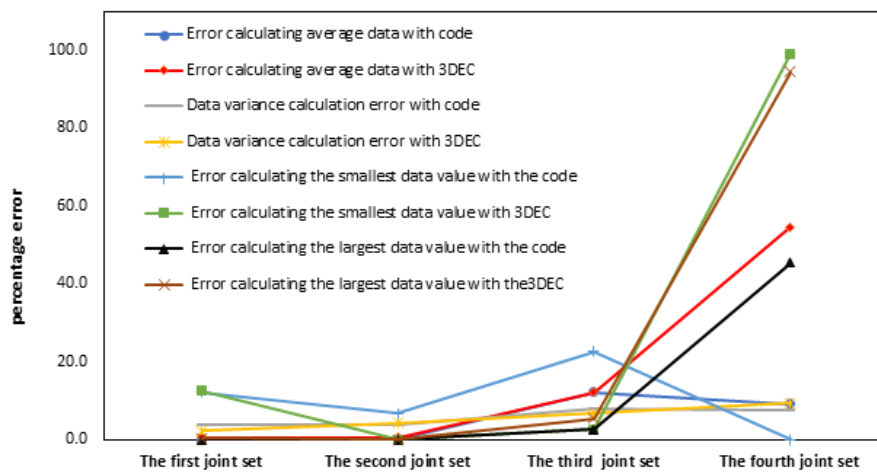
9 Model

شکل ۶. ده مدل تصادفی تولید شده از شبکه شکستگی تونل امام زاده هاشم در نرم افزار 3DEC.

داری، طول اثر و موقعیت شکستگی ها نسبت به داده های ورودی مقایسه شده است.

۵-۱. جهت داری شکستگی ها تونل امام زاده هاشم

به منظور اعتبارسنجی پارامتر جهت داری (شیب و جهت شیب)، داده های اولیه با نتایج حاصل از کد توسعه داده شده و نرم افزار 3DEC مقایسه شده است. نتایج محاسبه جهت شیب شکستگی ها تونل امام زاده هاشم با استفاده از کد توسعه داده شده در شکل ۷ ارائه شده است.

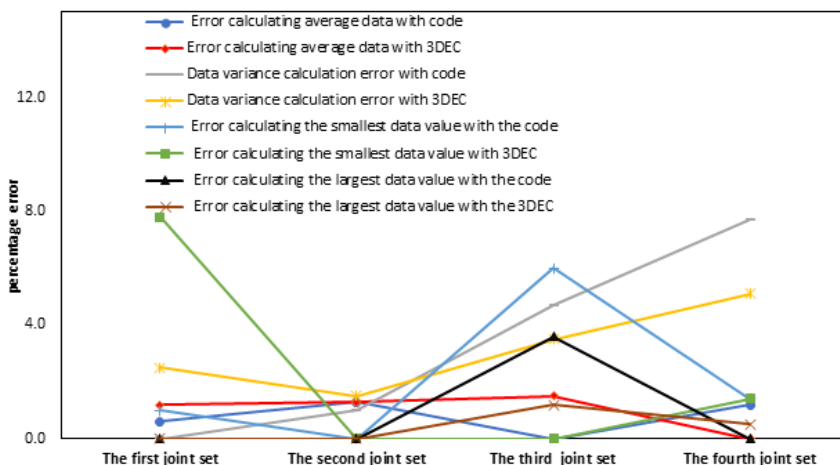


شکل ۷. نتایج مقایسه جهت شیب محاسبه شده با کد توسعه داده شده و نرم افزار 3DEC با داده های حاصل از برداشت میدانی.

همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می شود جهت شیب دسته درزه اول و چهارم به وسیله کد توسعه داده شده از خطای کمتری برخوردار است و تنها برای دسته درزه سوم است که نرم افزار 3DEC تخمین مناسب تری نسبت به کد توسعه داده شده داشته است. لذا می توان بیان کرد که استفاده از کد توسعه داده شده به منظور تولید جهت شیب موجب کاهش عدم قطعیت در مقادیر تولید شده می شود. مخصوصاً هنگامی که تابع توزیع جهت شیب نمایی منفی می باشد. البته برای توزیع نرمال با کاهش میانگین داده ها، مشاهده می شود که دقت نرم افزار 3DEC بیشتر است. نکته قابل توجه این است که هر دو روش هنگام استفاده از توزیع نمایی منفی کمترین دقت را دارا

۵. آنالیز اطمینان شبکه شکستگی

به منظور اعتبارسنجی شبکه شکستگی روش های متعددی وجود دارد. از جمله می توان به استفاده از مقاطع مختلف برای مقایسه با نتایج پنجره برداشت اشاره کرد. باید توجه داشت که روش پنجره برداشت دارای معایبی می باشد که از جمله آن می توان به عدم توانایی در برداشت شکستگی هایی که موازی با پنجره هستند اشاره نمود. روش دیگر، مقایسه شبکه شکستگی ساخته شده با داده های ورودی می باشد (Suzuki et al. 2017). این روش نیاز به برداشت کامل همه شکستگی ها در جبهه کار تونل دارد. در این مطالعه جهت-

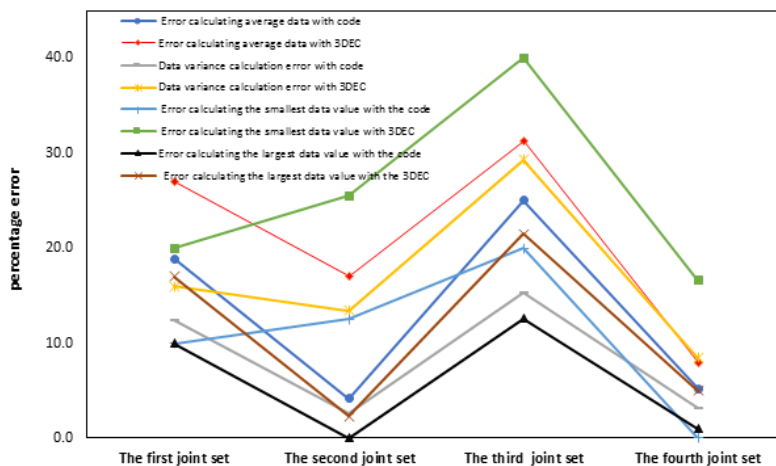


شکل ۸. نتایج مقایسه شیب محاسبه شده با کد توسعه داده شده و نرم افزار 3DEC با داده‌های حاصل از برداشت میدانی.

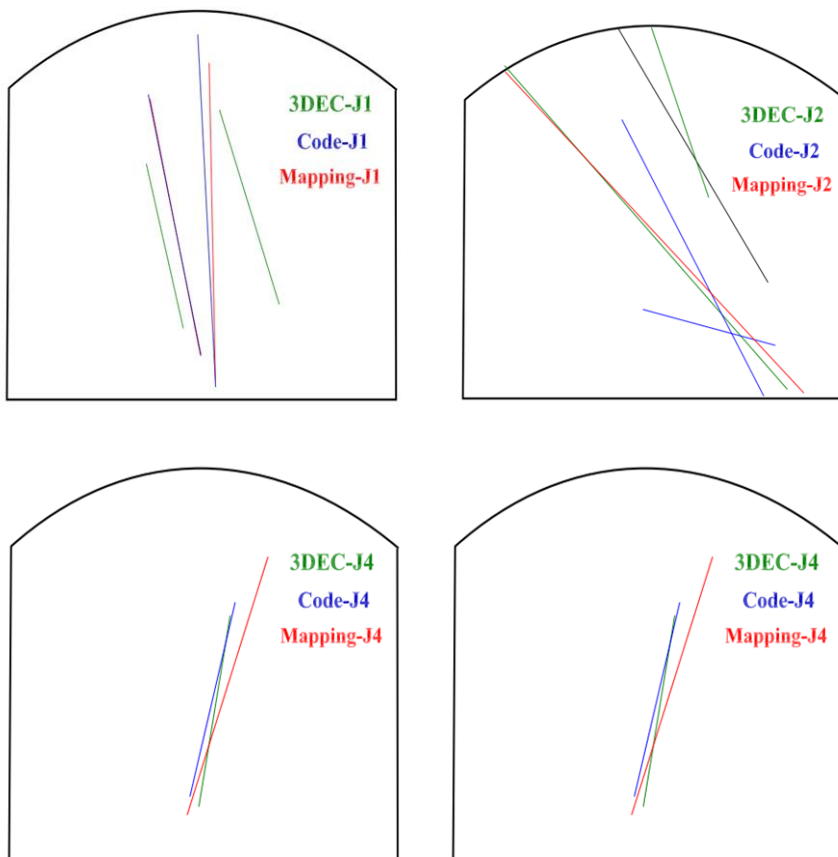
اما مقادیر حداقل بیشترین خطا را در صحت شبکه شکستگی ساخته شده ایجاد می‌کند. از این رو استفاده از آن‌ها در ساخت شکستگی‌های ریز بیشتر است. در شکل ۱۰ مقایسه نتایج تولید شکستگی با کد توسعه داده شده و نرم‌افزار 3DEC در یک مقطع از تونل به تفکیک دسته درزه آورده شده است. بهترین تطابق میان کد توسعه داده شده و داده‌های واقعی برای دسته درزه یک مشاهده می‌شود. همچنین بهترین تطبیق بین نتایج نرم افزار 3DEC و داده‌های واقعی در دسته درزه دوم دیده می‌شود. لازم به ذکر است که دسته درزه دوم تنها دسته درزه‌ایی است که در آن هیچ کدام از پارامترهای درزه‌داری از توزیع نمایی منفی پیروی نمی‌کند.

۵-۲. طول اثر شکستگی‌ها تونل امام زاده هاشم

نتایج مقایسه طول اثر محاسبه شده در شکل ۹ ارائه شده است. در این مورد بیشترین خطا در تخمین برای هر دو روش مربوط به تابع توزیع آماری نمایی منفی است. همچنین مشاهده می‌شود که برای دسته درزه سوم که میانگین طول اثر شکستگی‌ها کمتر است، خطا تخمین برای کد توسعه داده شده و برای نرم افزار 3DEC بیشتر از سایر حالات می‌باشد. از مقایسه شکل‌های ۷ تا ۹ مشاهده می‌شود که بیشترین خطا کد و نرم‌افزار 3DEC در محاسبه کوچکترین مقادیر شیب، جهت شیب و طول شکستگی می‌باشد. نکته جالب توجه این است که در اکثر موارد مقدار ماکزیمم شیب، جهت شیب و یا طول توسط کد و نرم‌افزار 3DEC به درستی محاسبه می‌شود



شکل ۹. نتایج مقایسه طول اثر محاسبه شده با کد توسعه داده شده و نرم‌افزار 3DEC با داده‌های حاصل از برداشت میدانی.



شکل ۱۰. مقایسه شکستگی‌های تولید شده با داده‌های واقعی در یک سکشن از تونل (J1, J2, J3 و J4 به ترتیب دسته درزه‌های اول تا چهارم است).

۱۰. مطالعه پارامتری
 ۱۰ مدل سناریو متفاوت براساس پارامترهای ارائه شده، در جدول ۲ در نظر گرفته شده است تا بتوان تأثیر پارامترهای مختلف را بر عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی بررسی کرد.

در این مطالعه به منظور ارزیابی تأثیر توابع توزیع آماری بر عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی با کد توسعه داده شده برای هر یک از پارامترهای شیب، جهت شیب و طول اثر

جدول ۲. مدل‌های متفاوت در نظر گرفته شده به منظور ارزیابی عدم قطعیت در تولید شبکه شکستگی.

Distribution					Model	Joint set
Variance	Mean	Maximum	Minimum			
35	164	175	150	Normal	۱	Dip direction
35	195	205	180	Normal	۲	
35	114	125	100	Normal	۳	
43	114	135	100	Normal	۴	
25	114	125	105	Normal	۵	
57	26	37	15	Negative exponential	۶	
57	56	6	45	Negative exponential	۷	
57	111	122	100	Negative exponential	۸	
30	113	122	100	Negative exponential	۹	
19	113	122	105	Negative exponential	۱۰	
54	81	90	65	Power	۱	Dip
54	61	70	45	Power	۲	
54	31	40	15	Power	۳	
62	31	60	15	Power	۴	
88	31	65	10	Power	۵	
72	78	90	70	Normal	۶	
72	58	70	50	Normal	۷	
72	19	32	10	Normal	۸	
37	24	39	10	Normal	۹	
23	25	35	15	Normal	۱۰	
4.7	7.2	11.9	5	Negative exponential	۱	Fracture length
22	7.2	20	1	Negative exponential	۲	
87	7.2	41	1	Negative exponential	۳	
76	13	35	5	Negative exponential	۴	
76	9	31	1	Negative exponential	۵	
6	12.7	16.6	8.8	Power	۶	
25	18.6	26	1	Power	۷	
41	18.6	33	1	Power	۸	
53	18.6	33	1	Power	۹	
6	17	23	9	Power	۱۰	

۶-۱. تأثیر توابع آماری در عدم قطعیت تولید جهت شیب

شکستگی

بر اساس داده‌های جدول ۲ مدل‌های ۱ تا ۱۰ به منظور مقایسه نتایج کد توسعه داده شده با داده‌های اولیه برای تولید جهت شیب شکستگی‌ها ساخته شده است. لازم به ذکر است به منظور حذف اثر تصادفی از هر یک از مدل‌ها، ۱۰ شبکه شکستگی متفاوت ساخته شده است و بهترین آن برای مقایسه با داده‌های واقعی در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۱ مقایسه نتایج برای ۵ مدل اول که جهت شیب از نرمال پیروی می‌کند آورده شده است. واضح است که بیشترین اختلاف کد توسعه داده شده در محاسبه جهت شیب برای مدل‌های ۴ مشاهده می‌شود. این دو مدل، کمترین مقدار میانگین داده و بیشترین واریانس داده را دارند. اما برای مدل‌های ۱ و ۲ که میانگین داده‌ها بیشتر از سایر مدل‌ها می‌باشند مشاهده می‌شود که نتایج کد توسعه داده شده بسیار نزدیک به داده‌های واقعی می‌باشد.

۶-۲. تأثیر توابع آماری در عدم قطعیت تولید جهت شیب شکستگی

مانند آنچه که برای جهت شیب بیان شد، به منظور ارزیابی عدم قطعیت در تولید جهت شیب شکستگی، مدل‌های متفاوتی مطابق با آنچه در جدول ۲ بیان شده است؛ ساخته شد. نتایج مقایسه کد توسعه داده شده با داده‌های واقعی برای ۵ مدل اول که از توزیع توانی پیروی می‌کند در شکل ۱۳ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای مدل‌های ۱ تا ۳ تقریباً دقت کد توسعه داده شده جهت محاسبه جهت شیب شکستگی بسیار مناسب بوده است اما برای مدل‌های ۴ و ۵ با کاهش میانگین و افزایش واریانس داده‌ها دقت کد به شدت کاهش یافته است که این نتیجه مشابه با تأثیر توزیع نرمال در تولید جهت شیب شکستگی‌ها می‌باشد.

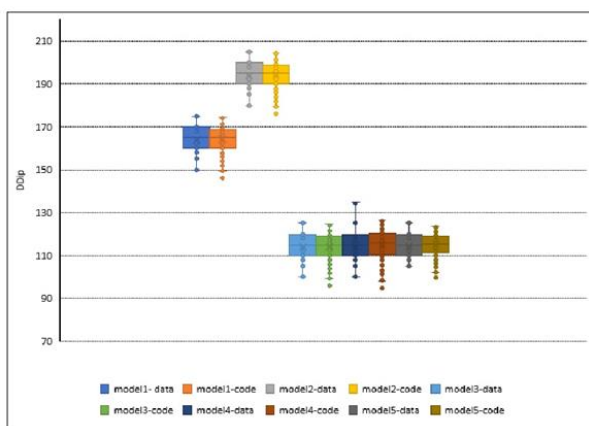
برای ۵ مدل دیگر که جهت شیب از توزیع نرمال پیروی می‌کند مطابق با شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که با کاهش واریانس داده‌ها دقت کد توسعه داده شده به شدت افزایش یافته است. این

تأثیر مشابه با تأثیر واریانس بر دقت کد در تولید جهت شیب شکستگی‌ها می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که به طور کلی هنگام استفاده از توزیع نرمال دقت کد در محاسبه جهت شیب شکستگی بیشتر از زمانی است که جهت شیب از توزیع توانی پیروی می‌کند.

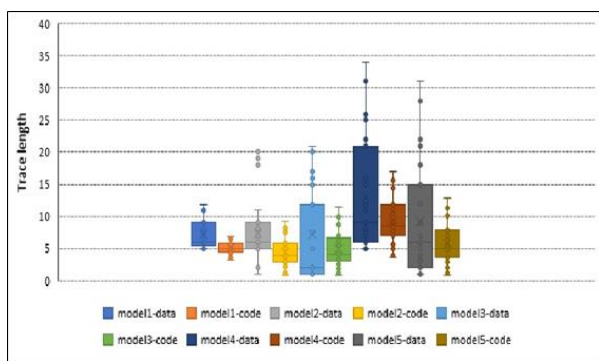
۶-۳. تأثیر توابع آماری در عدم قطعیت تولید طول اثر

شکستگی

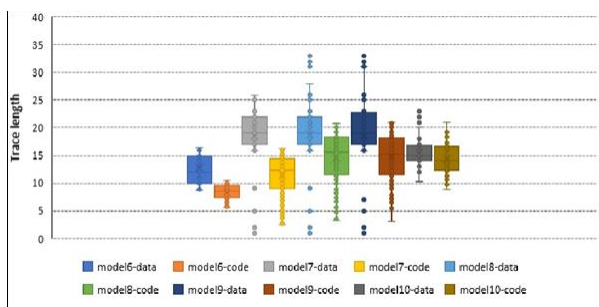
نتایج محاسبه طول اثر شکستگی با کد توسعه داده شده برای مدل‌هایی که از توزیع نمایی منفی پیروی می‌کند در شکل ۱۵، ارائه شده است. مشاهده می‌شود که برای مدل‌های ۳ تا ۵ که واریانس و میانگین داده‌ها بیشتر است دقت کد در تولید طول اثر کاهش داشته است. همچنین برای مدل‌های دیگر که از توزیع توانی پیروی می‌کند مشاهده می‌شود که با افزایش واریانس دقت کد توسعه داده شده در تولید طول اثر شکستگی‌ها کاهش یافته است (شکل ۱۶).



شکل ۱۱. تأثیر تابع توزیع نرمال بر عدم قطعیت در تولید جهت شیب شکستگی‌ها.



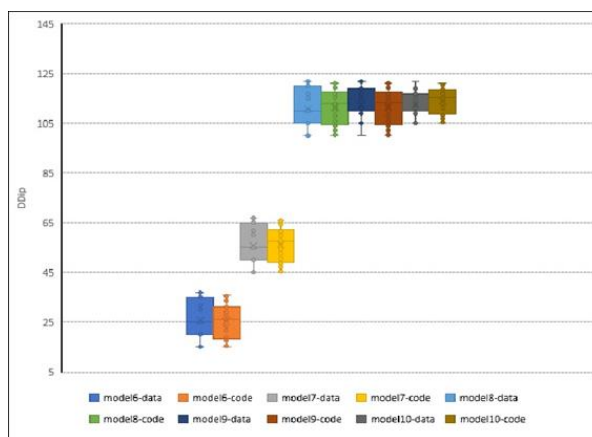
شکل ۱۵. تاثیر تابع توزیع نمایی منفی بر عدم قطعیت در تولید طول اثر شکستگی ها.



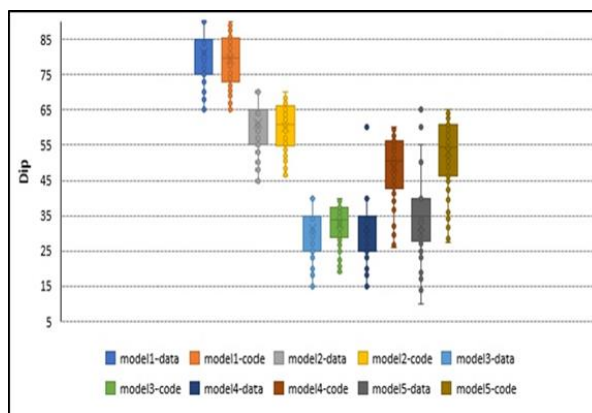
شکل ۱۶. تاثیر تابع توزیع توانی بر عدم قطعیت در تولید طول اثر شکستگی ها.

۷. نتیجه گیری

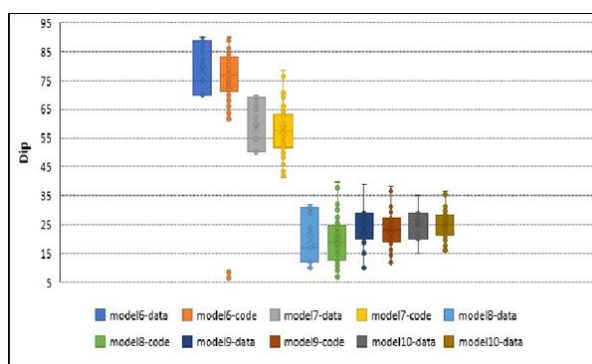
عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی در تحلیل های مهم مانند پایداری تونل می تواند تأثیر به سزایی بر نتایج شبیه سازی داشته باشد. با این وجود در مطالعات پیشین ارزیابی دقیقی از تاثیر توابع آماری متفاوت بر تولید پارامترهای درزه داری مانند شیب، جهت و طول اثر ارائه نشده است. در این مطالعه با استفاده از یک کد توسعه داده شده در نرم افزار متلب و همچنین نرم افزار 3DEC به بررسی تأثیر توابع توزیع آماری بر صحت ساخت شبکه شکستگی تونل امام زاده هاشم پرداخته شده است. نتایج این مطالعه نشان داد که بیشترین خطا در تولید پارامترهای درزه داری توسط کد توسعه داده شده و نرم افزار 3DEC هنگامی رخ میدهد که از تابع توزیع نمایی منفی استفاده می شود. از طرفی دیگر با کاهش میانگین و واریانس توزیع نرمال، دقت کد توسعه داده شده به منظور تولید شیب و جهت شیب شکستگی کاهش می یابد. نتایج این مطالعه بیانگر این است که استفاده از توزیع نمایی در تولید



شکل ۱۲. تاثیر تابع توزیع نمایی منفی بر عدم قطعیت در تولید جهت شیب شکستگی ها.



شکل ۱۳. تاثیر تابع توزیع توانی بر عدم قطعیت در تولید شیب شکستگی ها.



شکل ۱۴. تاثیر تابع توزیع نرمال بر عدم قطعیت در تولید شیب شکستگی ها.

با توجه نتایج حاصل از این پژوهش، استفاده از کد توسعه داده شده می‌تواند موجب کاهش عدم قطعیت در ساخت شبکه شکستگی شود. مخصوصاً هنگامی که از توابع نمایی و یا توانی برای تولید شکستگی استفاده شود استفاده از کد توسعه داده شده به جای نرم افزارهای دیگر، موجب افزایش صحت شبکه شکستگی می‌شود. باید توجه شود که اگرچه استفاده از روش های آماری، در پاره ای از موارد بسیار مناسب به منظور ساخت شبکه شکستگی می‌باشند، اما استفاده از روش های زمین آمار می‌تواند موجب کاهش عدم قطعیت در ساخت شکستگی ها مخصوصاً تعیین موقعیت آن ها در فضا شود. اگرچه استفاده از توابع چگالی دم بریده (Truncated) می‌تواند موجب محدود کردن مقادیر تولیدی در محدوده واقعی تر شود اما می‌بایست به مقادیر واریانس داده های اولیه نیز توجه شود. اگر واریانس داده ها در یک دسته درزه زیاد باشد، این امر می‌تواند موجب افزایش خطا در تولید پارامترهای درزه داری شود. لذا در این موارد بهتر است که براساس مقادیر واریانس داده ها، هر دسته درزه را به چند قسمت کوچکتر تقسیم کرده و به صورت جداگانه آن ها را تولید کرد. بدین صورت خطا ناشی از واریانس داده‌ها کاهش یافته و انطباق میان داده‌های اولیه و شکستگی های تولید شده با روش آماری افزایش می‌یابد.

شبکه شکستگی تونل امام زاده هاشم میتواند موجب خطا نسبتاً زیادی شود. به منظور بررسی دقیقتر به مطالعه پارامتریک تأثیر توابع آماری مختلف بر تولید پارامترهای شکستگی (شیب، جهت شیب و طول اثر) پرداخته شد. نتایج نشان داد که:

استفاده از توابع توزیع مانند نرمال که به طور مستقیم واریانس داده‌ها در تابع PDF در نظر گرفته می‌شود می‌تواند به شدت موجب افزایش دقت کد توسعه داده شده در تولید پارامترهای شکستگی شود.

کاهش واریانس داده‌ها تأثیر به‌سزایی بر دقت کد هنگام تولید پارامترهای شکستگی با استفاده از توزیع نرمال دارد.

بیشترین تأثیر توابع آماری مختلف در تولید مقدار حداقل پارامترهای شکستگی است و در اکثر موارد کد توسعه داده شده مقدار حداکثر را درست محاسبه می‌کند.

توابع توزیع نمایی منفی و توانی که در آن‌ها واریانس به صورت مستقیم در تابع PDF لحاظ نشده است می‌تواند بیشترین خطا در تولید پارامترهای شکستگی ایجاد کند.

تنها جایی که افزایش واریانس داده‌ها موجب افزایش دقت کد توسعه داده شده می‌شود مربوط به استفاده از توزیع نمایی منفی برای تولید جهت شیب شکستگی می‌باشد. البته باید توجه شود که در این حالت مقدار میانگین داده‌ها افزایش داشته است و در اکثر مدل‌ها با افزایش میانگین داده‌ها دقت کد هنگام استفاده از توزیع نمایی منفی کاهش می‌یابد.

منابع

- Adler PM, Thovert J-F (1999) Fractures and fracture networks. Springer Science & Business Media
- Akara MEM, Reeves DM, Parashar R (2020) Caracterização de rede de fraturas melhorada e simulação de rede discreta da fraturas com levantamentos de alta resolução usando veículos aéreos não tripulado. *Hydrogeology Journal* 28:2285–2302
- Andersson J, Dverstorp B (1987) Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. *Water Resources Research* 23:1876–1886
- Andersson J, Shapiro AM, Bear J (1984) A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information. *Water Resources Research* 20:79–88
- Andersson J, Thunvik R (1986) Predicting mass transport in discrete fracture networks with the aid of geometrical field data. *Water Resources Research* 22:1941–1950
- Baghbanan, A. and Jing, L. 2007. Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44, 704–719.

- Billaux, D., Chiles, J., Hestir, K., & Long, J. C. (1989). Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass: an example from the Fanay-Augères mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26(3), 281-299.
- Cacas M-C, Ledoux E, de Marsily G, et al (1990) Modeling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation: 1. The flow model. *Water Resources Research* 26:479-489
- Feng Q (2001) Novel methods for 3-D semi-automatic mapping of fracture geometry at exposed rock faces. PhD Thesis, Institutionen för anläggning och miljö
- Fereshtenejad S, Afshari MK, Bafghi AY, et al (2016) A discrete fracture network model for geometrical modeling of cylindrically folded rock layers. *Engineering Geology* 215:81-90
- Fu GY, Ma GW, Qu X, Huang D (2016) Stochastic analysis of progressive failure of fractured rock masses containing non-persistent joint sets using key block analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology* 51:258-269
- Gattinoni P, Scesi L, Terrana S (2009) Water flow in fractured rock masses: numerical modeling for tunnel inflow assessment. In: EGU General Assembly Conference. p 468
- Hadjigeorgiou J, Esmaili K, Grenon M (2009) Stability analysis of vertical excavations in hard rock by integrating a fracture system into a PFC model. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24:296-308
- Hosseini M, Baghbanan A, Seifabad MC (2021) Using effective medium theory to calculate permeability of rock with complex fractures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering* 176:242-253
- Itasca Consulting Group Inc, 3DEC User's guide, ver 5.0, Minneapolis, Minnesota, 2013.
- Javadi, Morteza, Mostafa Sharifzadeh, and Kourosh Shahriar (2016). "Uncertainty analysis of groundwater inflow into underground excavations by stochastic discontinuum method: Case study of Siah Bisheh pumped storage project, Iran." *Tunnelling and Underground Space Technology* 51: 424-438.
- Lavoine E, Davy P, Darcel C, Munier R (2020) A discrete fracture network model with stress-driven nucleation: Impact on clustering, connectivity, and topology. *Frontiers in Physics* 8:9
- Lei Q, Latham J-P, Tsang C-F (2017) The use of discrete fracture networks for modelling coupled geomechanical and hydrological behaviour of fractured rocks. *Computers and Geotechnics* 85:151-176
- Long JC, Gilmour P, Witherspoon PA (1985) A model for steady fluid flow in random three-dimensional networks of disc-shaped fractures. *Water Resources Research* 21:1105-1115.
- R Lotfi, A Baghbanan, H Hashemolhosseini, S Namdari (2019). 3D generation of discrete fracture network by geo-statistical approach. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*.
- Miyoshi, T., Elmo, D., & Rogers, S. (2018). Influence of data analysis when exploiting DFN model representation in the application of rock mass classification systems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(6), 1046-1062.
- Noroozi M, Kakaie R, Jalali SE (2015) 3D Geometrical-Stochastic modeling of rock mass joint networks: case study of the right bank of Rudbar Lorestan Dam plant. *Journal of Geology and Mining Research* 7:1-10.
- Priest SD (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*. London. Published by Chapman & Hall.
- Priest SD, Hudson JA (1976) Discontinuity spacings in rock. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Elsevier, pp 135-148
- Riley MS (2004) An algorithm for generating rock fracture patterns: mathematical analysis. *Mathematical geology* 36:683-702
- Rogers SF, Kennard DK, Dershowitz WS, Van As A (2007) Characterising the in situ fragmentation of a fractured rock mass using a discrete fracture network approach. In: *ARMA Canada-US Rock Mechanics Symposium*. ARMA, p ARMA-07

-
- Rouleau A, Gale JE (1987) Stochastic discrete fracture simulation of groundwater flow into an underground excavation in granite. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier, pp 99–112
- Snow DT (1969) Anisotropic permeability of fractured media. *Water resources research* 5:1273–1289
- Suzuki A, Watanabe N, Li K, Horne RN (2017) Fracture network created by 3-D printer and its validation using CT images. *Water Resources Research* 53:6330–6339.
- Wang, C.J. and Vecchiarelli, A., 2019, June. A geostatistical approach to modelling DFN: a block size perspective. In ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium (pp. ARMA-2019). ARMA.
- Wang, X., & Cai, M. (2020). A DFN–DEM multi-scale modeling approach for simulating tunnel excavation response in jointed rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53, 1053-1077.
- Wittke W (2014) Rock mechanics based on an anisotropic jointed rock model (AJRM). John Wiley & Sons
- Wu N, Liang Z, Zhang Z, et al (2022) Development and verification of three-dimensional equivalent discrete fracture network modelling based on the finite element method. *Engineering Geology* 306:106759.
- Vazaios, I., Vlachopoulos, N., & Diederichs, M. S. (2015, May). DFN generation for mechanical stability analysis of underground works. In ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly, Dubrovnik, Croatia (pp. 22-28).