



Imam Khomeini International University
Vol. 9, No. 1, Spring 2024



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

Research Paper

Developing a Discrete Fracture Network through Applying Roughness for Simulating Discontinuities Properties of Rock Mass

Ameri E.¹, Jalali S.M.E.^{2*}, Rabiee M.R.³, Noroozi M.⁴

1- Ph.D. Student, Dept. of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Professor, Dept. of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Associate Professor, Dept. of Mathematical Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

4- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 21 Nov. 2022

Accepted: 25 Feb. 2023

Abstract: Accurate simulation of geometrical properties of fractures is an important goal in rock engineering. One of the most capable methods for simulating the random nature of geometrical properties of fractures is Discrete Fracture Network (DFN) random modelling, which presents the heterogeneous nature of fractured rock mass with statistically defined geometrical properties. Up to now, all properties of fractures such as location, shape, orientation, size (persistence), spacing, and opening of joints have been simulated and applied in 3D DFN modelling. In this research, a statistical solution based on Kernel's non-parametric distribution is used for simulating roughness. Through this method, even those geometric properties of fractures which do not have their own specific distribution functions can be simulated. After simulating the roughness value, the roughness geometry should also be simulated in a way that evokes the roughness value. Therefore, in order to simulate the surface of fractures in this research, the DRS method is applied in 2D and then, developed into 3D. At the end, simulation of discontinuity's roughness is added as a separate package to DFN-FRAC^{3D} computer program. DFN-FRAC^{3D} computer program, as one of the most capable tools in this field, is able to develop a 3D fracture network block model by using the surveyed data and then simulating geometrical properties of the fracture; thus, by applying the results of this research in this compute software, all geometrical properties of fractures can be simulated. Finally, in order to explain the results of this research, outcomes of DFN-FRAC^{3D} computer program for both with and without applying the roughness property on DFN are compared.

Keywords: DFN-FRAC^{3D}, Roughness, Simulation, JRC, DRS.

How to cite this article

Ameri, E., Jalali, S. M. E., Rabiee, M. R., and Noroozi, M. (2024). "Developing a Discrete Fracture Network through Applying Roughness for Simulating Discontinuities Properties of Rock Mass". Journal of Mineral Resources Engineering, 9(1): 87-101.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.18080.1616

*Corresponding Author Email: jalalime@shahroodut.ac.ir

COPYRIGHTS



©2024 by the authors. Published by Imam Khomeini International University.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

INTRODUCTION

Determining the exact value of rock properties and better understanding of its behavior have resulted in extensive development of rock mass modelling [1]. The most important step in numerical modelling of the rock mass is accurate defining of discontinuities' network (geometric model creation). accurate defining the rock mass structure and creating an accurate geometric model will provide us with a better starting point for numerical modelling and mechanical and hydraulic analyses.

In order to accurately model the rock mass, joints' location inside the model have to be as much similar to the distribution of discontinuities inside the real rock mass as possible. One of the strongest simulation methods for joints' geometric properties is random 3D modelling through Discrete Fracture Network, which is also used for describing the modes of rock mass failures [2].

Up till now, many different rock characteristics such as spacing, orientation, trace length, and opening are simulated and used in Discrete Fracture Network; though not much work has been performed on the simulation of probability of discontinuities' roughness in limited extents. The most important research has been done on Rough Discrete Fracture Network in 2D by Wang et. al. In this method, the roughness is added to the separate joint network through sinusoidal, triangular or fractal methods and is used for studying the shear behavior of the rock mass [3]. In this research, roughness characteristic of the rock mass's discontinuities is simulated and used in DFN-FRAC^{3D}.

MATERIALS AND METHODS

Nearly half a century ago, the first models for random modelling were presented. During this period, random models of the network of discontinuity have been improved and many properties of discontinuities of the rock mass have been simulated.

In order to model the position of discontinuities, Poisson's homogenous model and heterogenous models, cluster models, and cox models are used [4]. In case of the size of discontinuities, many researches have come up with negative exponential distribution function, while some others have suggested normal log functions and many others have proposed the gamma distribution function [5-7]. For the orientation of discontinuities set, the three functions of normal distribution, Fisher distribution, and Bingham distribution have been focused on [8]. Hu et. al. used the negative exponential probability distribution function and were satisfied with it [9]. Opening of joints is another characteristic that different geological conditions and various scales show whether to use power distribution function or log normal [10].

In order to implicate the probability distribution functions of geometric properties of discontinuities, many computer programs have been developed. One of these computer programs for simulating the properties of discontinuities of the rock mass is DFN-FRAC^{3D}. This program is able to produce a graphical image of the discontinuities' network in different orientations in addition to the numeral output through the gathered data. Some sampling tools such as planar and longitudinal sampling are also supported by this program in order to define the validation level of the model. This program is also capable of producing sections in different orientations and analyzing statistical effects of joints on sections. The main input for this program includes the volume of modelling, generation method of discontinuities location, form of discontinuity, volumetric intensity, orientation of discontinuities, persistence, spacing, and number of discontinuities, all as a text file. In addition to producing text output, DFN-FRAC^{3D} is capable of showing the network of produced joints through another program developed in Mathematica.

Roughness is one of the geometric properties which shows the convexes and concaves in laboratory and field scales. Quantifying the roughness is actually transforming the geometric image of convexes and concaves on the surface of a discontinuity into numbers through different empirical, experimental, and analytical methods, in which despite other properties of discontinuities, the simulation of roughness is performed in two steps; First, the simulation of the value of the roughness and second, the simulation of the geometry of the roughness. Since no specific distribution function has been proposed for determining the value of roughness of discontinuities, in this paper, Kernel function has been used for simulating the roughness. The method of using Kernel function for estimating the roughness value is presented in a paper by Ameri et al. [11].

FINDINGS AND ARGUMENT

Despite other properties of discontinuities of the rock mass, the numerical value of roughness is

determined through indirect methods. As previously explained, the roughness value is simulated through Kernel method; but, since different discontinuities with different convexes and concaves can have equal roughness values, a specific roughness value can be assumed for discontinuities with different convexes and concaves. Although, even if the roughness value is specifically determined, still the surface of the discontinuity should be simulated for the specific roughness value. In other words, the goal for measuring the roughness is to quantify it. Since quantifying the roughness requires analysis and engineering judgment, many researches have been performed on measuring and quantifying the roughness of the discontinuity for determining a numerical value that correctly represent the roughness of the surface. In this research, Barton's field measuring method is used for simulating the geometry of the roughness. Based on this method, JRC in large scale discontinuities is determined through a simple, diagram-based method, by measuring the length of the field profile and the distance between the minimum and the maximum convexes and concaves of the surface of the discontinuity. In this method, at the beginning, a specific length of the discontinuity is assumed in meters, then its largest depth is measured by millimeters. After that, these values are drawn on a diagram and the value of JRC which is relevant to the roughness of the surface of the discontinuity, is determined.

In this method, a selection has to be made from the different surfaces of discontinuity which have equal roughness value or, in other words, to be simulated. This method is previously explained through DRS method [12]. Steps of roughness simulation is explained in Figure 1.

DRS method is a 2D one; Thus, in order to describe the roughness in 3D, the largest diameter of the discontinuity should be determined in DFN-FRAC^{3D} computer software at first, which is defined as a plate (plane polygon). Then, the DRS method which is 2D, is implicated on this line (the largest diameter of the discontinuity). Implicating the roughness on the largest diameter covers the surface of the discontinuity in a better way; Therefore, the largest diameter is chosen as a section of the discontinuity on which the roughness is implicated on. After that, the roughness profile is developed perpendicular to the main diameter up to the borders of the discontinuity. In Figure 2-A, a plane discontinuity is shown with its largest diameter specified. After implicating the roughness, this surface transforms from plane into undulant (Figure 2-B).

Step 1:	JRC value and the length of the field profile are determined.
Step 2:	Considering Bartone's roughness field measuring method, the maximum depth of the roughness (a) relevant to JRC value and L is calculated.
Step 3:	Length of the discontinuity is divided into n sections, so that the length of each section is a random value between zero and L, whilst each section has a convex or concave as large as a.
Step 4:	Considering a random value between zero and a as the height of the convex and a random value between zero and L as the distance between a two adjacent convexes, the geometric location of the convexes of the discontinuity is determined in 2D.
Step 5:	Using a random value between zero and the distance between 2 adjacent convexes, the distance between the concave from its adjacent convex is determined and by using the value of a, the geometric location of the concave is determined.
Step 6:	By determining the geometric locations of convexes and concaves and connecting these locations, the roughness of the discontinuity is determined with JRC value.

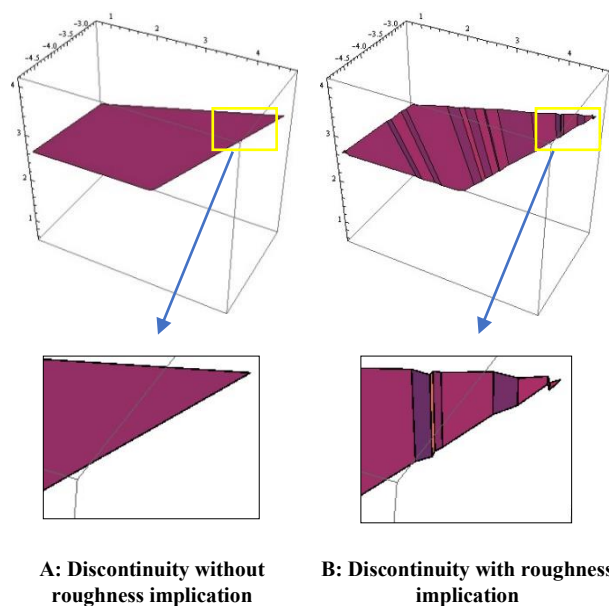


Figure 2. Implicating the roughness on the surface of a discontinuity

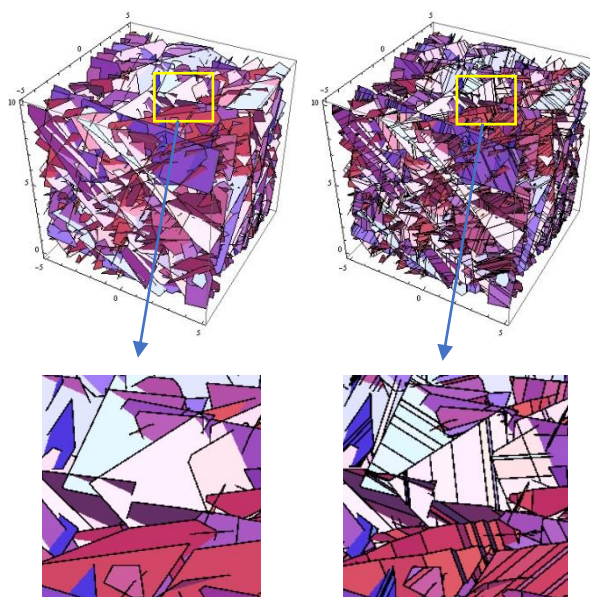
Figure 1. 2D DRS algorithm for simulating the roughness of the discontinuity's surface [12]

Steps of developing DRS from 2D into 3D are presented in Figure 3.

Since discontinuities are randomly simulated, the largest diameters of discontinuities are also random in essence. It should be noted that the presented algorithm is written in C++ programming language and is added to DFN-FRAC^{3D} as a module. By adding roughness property to DFN-FRAC^{3D}, an effective step is taken in improving DFN. Figure 4-A shows the output of DFN-FRAC^{3D} in Mathematica environment in which 1377 discontinuities are simulated without implicating roughness. Figure 4-B shows the same simulated discontinuities with roughness implication.

Step 1:	Selecting one of the surfaces of the discontinuity
Step 2:	Attributing one of the roughness data (which is randomly produced) to the surfaces of the selected discontinuity
Step 3:	Determining the largest diameter of the discontinuity
Step 4:	Implicating the roughness on the largest diameter through 2D DRS method
Step 5:	Developing the roughness profile from the largest diameter to the sides up to the borders of the discontinuity
Step 6:	Creating of a polygon as the surface of the discontinuity with specific roughness

Figure 3. Algorithm for developing DRS method from 2D into 3D



A: Graphical output of DFN-FRAC^{3D} without implication of roughness
B: Graphical output of DFN-FRAC^{3D} with implication of roughness

Figure 4. Implication of roughness on simulated discontinuities

In fact, after implicating roughness on each discontinuity, the discontinuity transforms into several discontinuities which are different in slope and size.

CONCLUSIONS

Improving DFN in order to make the simulated geometric model more similar to the real one has always been under focus by researchers. Different properties of discontinuities have been simulated, but no one has simulated the roughness property. Roughness has a great effect on the mechanical properties of the rock mass; Thus, this research has taken a big step on improving the geometric modelling by simulating the geometry of the roughness through DRS method and adding it to DFN. Also, a computer program compatible with DFN-FRAC^{3D} has also been developed which is to be a step towards developing DFN.

REFERENCES

- [1] Noroozi, M., Jalali, S. E., and Kakaie, R. (2014). "Development of a random joint network model considering the statistical feature of the joint size". 5th Iranian Rock Mechanics Conference. Tehran.
- [2] Yin, T., and Chen, Q. (2020). "Simulation-based investigation on the accuracy of discrete fracture network (DFN) representation". Computers & Geosciences, 121:103487.
- [3] Wang, P., Ren, F., and Cai, M. (2020). "Influence of joint geometry and roughness on the multiscale shear behaviour of fractured rock mass using particle flow code". Arabian Journal of Geosciences, 13(4): 1-14.
- [4] Xu, C., and Dowd, P. (2010). "A new computer code for discrete fracture network modelling". Computers & Geosciences,

36(3): 292-301.

- [5] Sari, M., Karpuz, C., and Ayday, C. (2010). "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites". *Computers & Geosciences*, 36(7): 959-969.
- [6] Zadhesh, J., Jalali, S. E., and Ramezanzadeh, A. (2014). "Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks". *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6): 2353-2361.
- [7] Kulatilake, P. S., Chen, J., Teng, J., Shufang, X., and Pan, G. (1996). "Discontinuity geometry characterization in a tunnel close to the proposed permanent shiplock area of the three gorges dam site in China". In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 33(3): 255-277.
- [8] Einstein, H. H., and Baecher, G. B. (1983). "Probabilistic and statistical methods in engineering geology". *Rock mechanics and rock engineering*, 16(1): 39-72.
- [9] Hu, X., Wu, F., and Sun, Q. (2011). "Elastic modulus of a rock mass based on the two parameter negative-exponential (TPNE) distribution of discontinuity spacing and trace length". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(2): 255-263.
- [10] Baghbanan, A. (2008). "Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses" (Doctoral dissertation, KTH).
- [11] Ameri, E., Jalali, S. E., and Rabiei, M. R. (2018). "Generating a random sample from the estimation of probability distribution function by kernel method". 14th Iranian Statistics Conference Iranian Statistical Society. Shahrood.
- [12] Ameri, E., Jalali, S. E., and Rabiei, M. R. (2021). "Simulation of the roughness of rock mass discontinuity using the DRS method". *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 11(27): 55-66.



توسعه شبکه شکستگی مجزا با اعمال زبری برای شبیه‌سازی ویژگی‌های ناپیوستگی توده‌سنگ

عین الله عامری^۱، سید محمد اسماعیل جلالی^{۲*}، محمدرضا ربیعی^۳، مهدی نوروزی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۲- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۳- دانشیار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود
- ۴- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰

چکیده

شبیه‌سازی دقیق ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، یکی از اهداف مهم در مهندسی سنگ است. یکی از توانمندترین روش‌های شبیه‌سازی ماهیت تصادفی ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه ناپیوستگی‌های مجزا (DFN) است که طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های درزه‌دار با ویژگی‌های هندسی که به طور آماری تعریف شده‌اند را آرایه می‌دهد. تاکنون ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها از جمله موقعیت، شکل، جهت‌داری، اندازه (پایایی)، فاصله‌داری و بازشدگی درزه‌ها شبیه‌سازی و در مدل تصادفی سه بعدی شبکه ناپیوستگی‌های مجزا به کار گرفته شده است. در این پژوهش، برای شبیه‌سازی زبری از یک راهکار آماری بر پایه برآورد ناپارامتری توزیع به روش کرنل استفاده شده است. با این روش می‌توان حتی آن دسته از ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها که توابع توزیع مشخصی برای آن‌ها آرایه شده است را نیز شبیه‌سازی کرد. پس از شبیه‌سازی مقدار زبری، هندسه زبری نیز باید به گونه‌ای شبیه‌سازی شود که مقدار زبری را تداعی کند. بر این اساس، در این پژوهش، شبیه‌سازی سطح ناپیوستگی با استفاده از روش دو بعدی شبیه‌سازی زبری ناپیوستگی (DRS) انجام و سپس از دو بعد به سه بعد توسعه داده شده است. در نهایت شبیه‌سازی زبری ناپیوستگی به عنوان یک بسته مجزا به برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} اضافه شده است. برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} به عنوان یکی از توانمندترین ابزار در این حوزه قادر است با استفاده از داده‌های برداشت شده و سپس شبیه‌سازی ویژگی‌های ناپیوستگی، مدل بلوکی سه بعدی شبکه ناپیوستگی‌ها را آرایه دهد، بنابراین با اعمال دستوردهای این پژوهش در برنامه کامپیوتری یاد شده، از این پس می‌توان با تمامی ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی را شبیه‌سازی کرد. برای نشان دادن نتایج حاصل از این پژوهش، خروجی برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} برای شرایط بدون اعمال ویژگی زبری و با اعمال آن در شبکه ناپیوستگی‌های مجزا مقایسه شده است.

کلمات کلیدی

DFN-FRAC^{3D}، زبری، شبیه‌سازی، JRC و DRS.

استناد به این مقاله

عامری، ع.، جلالی، س. م.، ا.، ربیعی، م. ر.، نوروزی، م.؛ ۱۴۰۳؛ "توسعه شبکه شکستگی مجزا با اعمال زبری برای شبیه‌سازی ویژگی‌های ناپیوستگی توده‌سنگ". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره نهم، شماره ۱، ص ۸۷-۱۰۱.

DOI: 10.30479/JMRE.2023.18080.1616



حق مؤلف © نویسنندگان

ناشر: دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)

* نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات Email: jalalisme@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

۲- ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها

تعیین مقادیر دقیق ویژگی‌های توده‌سنگ و بهبود درک رفتار آن سبب توسعه مدل‌سازی توده‌سنگ به طور فراگیر شده است [۱]. مهم‌ترین مرحله در مدل‌سازی عددی توده‌سنگ، تعریف دقیق شبکه ناپیوستگی‌ها (ساخت مدل هندسی) است. تعریف دقیق ساختار توده‌سنگ و ساخت مدل هندسی دقیق، نقطه شروع بهتری را برای مدل‌سازی‌های عددی و تحلیل‌های مکانیکی و هیدرولیکی فراهم می‌کند. برای مدل‌سازی دقیق توده‌سنگ، باید جانمایی درزه‌ها در داخل مدل به گونه‌ای باشد که توزیع درزه‌ها تا حد امکان مشابه توزیع ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ واقعی باشد. یکی از توانمندترین روش‌های شبیه‌سازی ویژگی‌های هندسی درزه‌ها، مدل‌سازی تصادفی سه بعدی شبکه درزه‌های مجزا^۱ (DFN) است که از آن برای توصیف الگوهای شکست توده‌سنگ نیز استفاده می‌شود [۲].

مدل‌های تصادفی شبکه درزه، طبیعت ناهمگن توده‌سنگ‌های درزه‌دار را با استفاده از نمایش سه بعدی شبکه درزه به صورت عناصری گسسته، با خصوصیات هندسی و ویژگی‌هایی که به طور آماری تعریف شده‌اند، ارائه می‌دهد [۳]. از مهم‌ترین پارامترهای ناپیوستگی‌ها می‌توان شیب، جهت شیب، مواد پرکننده، درصد پرشدگی، زبری و نظایر آن را نام برد [۴].

تاکنون ویژگی‌های مختلف توده‌سنگ مانند فاصله‌داری، جهت‌داری، خطاثر، بازشدگی شبیه‌سازی شده و در مدل تصادفی شبکه درزه مجزا مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق ویژگی زبری ناپیوستگی توده‌سنگ شبیه‌سازی و در شبکه درزه مجزا استفاده شده است.

وانگ و همکاران مدل شبکه درزه‌های مجزا زبری^۲ (RDFN) را برای حالت دو بعدی ارائه داده‌اند. در این روش زبری بسته به شرایط به یکی از سه روش سینوسی، مثلثی و فرکتال به شبکه درزه‌های مجزا اضافه می‌شود و برای بررسی رفتار برشی توده سنگ به کار می‌رود [۵].

۲- پیشینه تحقیق

از زمان ارائه اولین مدل‌ها برای مدل‌سازی تصادفی، نزدیک به نیم قرن می‌گذرد. در طول این زمان مدل‌های تصادفی شبکه ناپیوستگی توسعه‌های فراوانی یافته و ویژگی‌های زیادی از ناپیوستگی‌های توده‌سنگ شبیه‌سازی شده است.

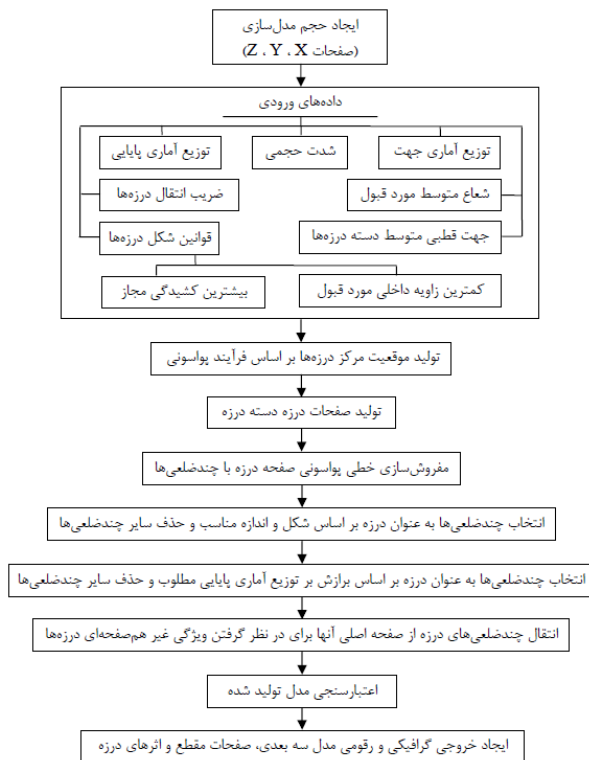
برای اغلب ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی تابع توزیع مناسب ارائه شده است. در زمینه شبیه‌سازی شکل هندسی ناپیوستگی‌ها، مطالعات تجربی و نظری نشان داده‌اند که شکل واقعی ناپیوستگی‌ها ترکیبی از شکل‌های منظم هندسی از قبیل بیضی، دایره، مستطیل، مربع و نظایر آن است، اما یک چندضلعی را می‌توان به عنوان مدل عمومی و نزدیک به حقیقت برای ناپیوستگی‌ها پذیرفت [۶].

برای مدل‌سازی موقعیت ناپیوستگی‌ها، مدل همگن پواسون^۳ و مدل‌های غیرهمگن، خوشه‌ای^۴ و کاکس^۵ استفاده می‌شود [۷].

در مورد اندازه ناپیوستگی، محققان زیادی تابع توزیع نمایی منفی را برای اندازه ناپیوستگی‌ها پیشنهاد دادند [۸، ۹]. همچنین گروهی از محققان نیز تابع توزیع لاگ نرمال را برای اندازه ناپیوستگی‌ها پیشنهاد دادند [۱۰، ۱۱]. در این خصوص، کولاتیلاک و همکاران [۱۲]، تابع توزیع گاما، کولاتیلاک [۱۳]، نیز هر دو تابع توزیع نمایی منفی و تابع توزیع گاما را با بهتر بودن تابع توزیع گاما برای بیان آماری اندازه ناپیوستگی‌ها پیشنهاد داده‌اند. زیب و همکاران [۱۴] پس از بررسی توابع توزیع لاگ‌نرمال و نمایی منفی بر روی اندازه ناپیوستگی‌ها، تابع توزیع لاگ‌نرمال را مناسب‌تر تشخیص داده‌اند. بیچر [۱۵] توابع توزیع لاگ‌نرمال و نمایی منفی را پیشنهاد دادند. لی و همکاران [۱۶] نیز توابع توزیع لاگ‌نرمال و نمایی منفی را پیشنهاد و تابع توزیع نمایی منفی را مناسب‌تر تشخیص داده‌اند. ارتگا و مارت [۱۷]، زهانگ و انیشتن [۱۸] و پیریست [۱۹] نشان داده‌اند که برآورد دقیق تابع توزیع خط اثر بسیار دشوار است و با این حال توابع توزیع لاگ نرمال و نمایی منفی را نیز پیشنهاد داده‌اند. سونگ [۲۰]، توابع توزیع نمایی منفی و لاگ نرمال، دوپوران و همکاران [۲۱]، توابع توزیع گاما و نمایی منفی، کولاتیلاک و همکاران [۲۲]، هر سه تابع گاما، نمایی منفی و لاگ‌نرمال را پیشنهاد داده‌اند.

برای ویژگی جهت‌داری دسته ناپیوستگی‌ها نیز سه تابع توزیع نرمال، تابع توزیع فیشر و تابع توزیع بینگهام مورد توجه قرار دارد [۲۳]. تابع توزیع فیشر که تابعی پرکاربردتر است، توزیع متقارن جهت‌داری ناپیوستگی‌ها حول مقدار میانگین را توصیف می‌کند [۲۴].

برای فاصله‌داری ناپیوستگی بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، پیریست و هادسون [۲۵] نشان داده‌اند که توزیع



شکل ۱: روند نمای ساخت مدل ارائه شده در JRC DFN-FRAC^{3D} [۱]

[۳۰].

در مطالعات توده‌سنگ، در اختیار داشتن تصویری از شبکه درزه‌ها، اطلاعات ارزشمندی را در اختیار مهندسان قرار می‌دهد. DFN-FRAC^{3D} قادر است هم‌زمان با تولید خروجی متنی، به وسیله برنامه توسعه داده شده در محیط Mathematica شبکه درزه‌های تولید شده را نمایش دهد.

۳- شبیه‌سازی ویژگی زبری ناپیوستگی

زبری یک ویژگی هندسی است که پستی و بلندی‌های سطح ناپیوستگی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صحرایی را نشان می‌دهد. کمی‌سازی زبری در واقع تبدیل کردن تصویر هندسی پستی و بلندی‌های سطح ناپیوستگی به مقدار عددی با استفاده از روش‌های مختلف تجربی، آزمایشگاهی و تحلیلی است. این بدان معنی است که برخلاف دیگر ویژگی ناپیوستگی، شبیه‌سازی زبری در دو مرحله، ابتدا شبیه‌سازی مقدار زبری، سپس شبیه‌سازی هندسه زبری انجام می‌شود که در ادامه به توضیح آن‌ها پرداخته می‌شود.

فاصله‌داری ناپیوستگی برای انواع گوناگون سنگ‌های رسوبی با تابع توزیع احتمال نمایی منفی منطبق می‌شود. هو و همکاران [۲۶] نیز در انجام پروژه پایداری دیواره سدی در جنوب غربی چین از تابع توزیع احتمال نمایی منفی به صورت رضایت‌بخش استفاده کرده‌اند.

بازشدگی دیگر ویژگی ناپیوستگی است که تحقیقات متعدد در شرایط زمین‌شناسی متفاوت و مقیاس‌های مختلف نشان می‌دهد که تابع توزیع آن تابع توزیع توانی یا لاگ‌نرمال است [۲۷].

۲-۲- معرفی برنامه DFN-FRAC^{3D}

برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} یک برنامه بومی است که اکثر قابلیت‌های نرم‌افزارهای تجاری و برنامه‌های کامپیوتری که تاکنون توسعه داده شده‌اند را دارد. این برنامه توسط نوروزی و همکاران در سال ۱۳۹۳ برای برآورد دقیق مقاومت توده‌سنگ، با استفاده از روش توده‌سنگ ترکیبی^۶ (SRM) تهیه شده است [۱]. این روش مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی رفتار شکست در توده‌سنگ‌های دارای درزه‌های ناپایا است. از برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} در موارد متعدد از جمله در برآورد ویژگی مقاومتی توده‌سنگ آهکی-دولومیتی ساختگاه و نیروگاه رودبار لرستان [۲۸] استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، این برنامه قادر است با استفاده از داده‌های برداشت شده، علاوه بر تولید خروجی رقومی، نمایش گرافیکی از شبکه ناپیوستگی‌ها را در راستاهای مختلف ارائه دهد. برخی ابزارهای نمونه‌برداری، مانند نمونه‌برداری صفحه‌ای و مغزه‌ای برای تعیین سطح اعتبار مدل در این برنامه فراهم شده است. این برنامه دارای قابلیت ایجاد مقاطع در راستاهای مختلف و بررسی آماری اثر درزه‌ها بر روی مقاطع است. ورودی‌های اصلی مورد نیاز برنامه شامل حجم مدل‌سازی، مدل تولید موقعیت ناپیوستگی، شکل ناپیوستگی، شدت حجمی، جهت‌داری ناپیوستگی، اندازه (پایایی)، فاصله‌داری، تعداد دسته ناپیوستگی‌ها به صورت یک فایل متنی است.

روابط تجربی مقادیر متوسطی برای خواص مکانیکی توده‌سنگ ارائه می‌دهند، بنابراین برای مطالعه توده‌سنگ با رفتار ناهمسانگرد ناشی از ناپیوستگی معتبر نیستند [۲۹]. مدل‌سازی سه‌بعدی DFN اثر مقیاس و ناهمسانگردی ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ را به طور موثر تحلیل می‌کند.

۳-۱- شبیه‌سازی مقادیر زبری

تمامی ویژگی‌هایی که بیان شد در نرم‌افزار DFN-^{3D} FRAC اعمال شده است، ولی تاکنون تابع توزیعی مشخصی برای ویژگی زبری ناپیوستگی‌ها به کار نرفته است. به همین دلیل در این تحقیق برای شبیه‌سازی ویژگی زبری از تابع کرنل استفاده شده است.^۷

به طور کلی برای برآورد تابع چگالی^۸، دو روش پارامتری و ناپارامتری وجود دارد. در روش پارامتری شکل تابع چگالی مشخص است و فقط کافی است پارامترهای تابع، تخمین زده شوند، ولی در روش ناپارامتری شکل تابع چگالی مشخص نیست و به کمک روش‌های خاصی، تابع چگالی برآورد می‌شود. در مسایل کاربردی، حالت‌هایی رخ می‌دهد که ساختار داده‌ها، از توابع توزیع شناخته شده پیروی نمی‌کند. در این شرایط، بیان روشی برای تولید متغیرهای تصادفی، اهمیت خاصی دارد. برای برآورد تابع چگالی احتمال توابع، با توزیع ناشناخته می‌توان از روش‌های برآورد ناپارامتری مانند روش‌های ساده، بافت‌نگار^۹، کرنل^{۱۰}، کرنل تطبیقی^{۱۱}، نزدیکترین همسایگی^{۱۲}، نزدیکترین همسایگی تعمیم یافته^{۱۳}، سری‌های متعامد^{۱۴} و بیشینه درست‌نمایی جریمه شده^{۱۵} استفاده کرد [۳۲، ۳۱].

۳-۲- شبیه‌سازی هندسه زبری

برخلاف دیگر ویژگی‌هایی ناپیوستگی توده‌سنگ، مقدار عددی زبری از روش‌های غیرمستقیم تعیین می‌شود. هرچند تاکنون، تجهیزات و روش‌های متعددی در سال‌های اخیر برای توصیف سطح درزه‌ها در مطالعات آزمایشگاهی و برجا توسعه داده شده است، در میان آن‌ها، فتوگرامتری مقبولیتی روزافزون دارد [۳۳].

علاوه بر توسعه روش‌های یاد شده، تحقیقات زیادی توسط پژوهشگران همچون بارتن و چوبی [۳۴]، دویلی و همکاران [۳۵]، گراسلی و همکاران [۳۶] و هرذا [۳۷] در مورد برداشت زبری در حالت‌های دو بعدی و سه بعدی در مقیاس‌های آزمایشگاهی و صحرایی انجام شده است. حتی پژوهشگران سایر زمینه‌های مهندسی نیز روش‌هایی برای بیان زبری ارائه داده‌اند. متداول‌ترین روش در مهندسی سنگ، ضریب زبری ناپیوستگی^{۱۶} (JRC) بارتن است، به طوری که پژوهشگران زیادی همچون تسه و کوردن [۳۸]، یو و وایساده [۳۹]، تاتون و گراسلی [۴۰]، جانگ و همکاران [۴۱] و زهانگ و همکاران [۴۲] به ارائه رابطه بین JRC و دیگر روش‌های بیان

زبری پرداخته‌اند. یانگ و همکاران [۴۳] ضمن بررسی تاثیر آنیزوتروپی درزه‌های صحرایی بر روی زبری نشان داده‌اند که با افزایش ابعاد نمونه، ضریب صافی زبری^{۱۷} افزایش می‌یابد و مقدار آن در جهات مختلف به هم نزدیک می‌شود.

همان‌طور که بیان شد با استفاده از روش کرنل مقادیر زبری شبیه‌سازی می‌شود ولی از آنجا که چندین ناپیوستگی با پستی و بلندی‌های مختلف ممکن است مقدار زبری یکسانی داشته باشند، بنابراین برای یک مقدار زبری مشخص نیز می‌توان ناپیوستگی‌های با پستی و بلندی‌های مختلفی فرض کرد. با این وجود حتی با فرض مشخص بودن مقدار زبری، به شبیه‌سازی سطح ناپیوستگی برای مقدار زبری مشخص نیاز است. به بیان دیگر هدف از اندازه‌گیری زبری در نهایت، کمی‌سازی آن است. از آنجا که کمی‌سازی زبری نیاز به تحلیل و قضاوت مهندسی دارد، پژوهش‌های زیادی در زمینه اندازه‌گیری و کمی‌سازی زبری ناپیوستگی با هدف ارائه یک مقدار عددی که نماینده درستی از ناهمواری سطح باشد، انجام شده است. در این پژوهش، شبیه‌سازی هندسی زبری دقیقاً در جهت معکوس پژوهش‌های پیشین انجام می‌شود. بدین صورت که با مشخص بودن مقدار JRC، ناهمواری سطح ناپیوستگی به شکلی شبیه‌سازی شود که نماینده درستی از مقدار JRC زبری مشخص باشد. از آنجا که اندازه‌گیری مقدار زبری در محل و به صورت بزرگ‌مقیاس و درک اثر مقیاس بر زبری ناپیوستگی، تاثیر قابل توجهی بر تغییر شکل توده‌سنگ و رفتار هیدرومکانیک آن دارد [۴۴]، در این تحقیق، از روش اندازه‌گیری صحرایی زبری بارتن برای شبیه‌سازی هندسه زبری استفاده شده است. بر اساس این روش، در ناپیوستگی‌های بزرگ‌مقیاس، JRC با یک روش ساده، مبتنی بر نمودار و با اندازه‌گیری طول نیمرخ پیمای صحرایی و فاصله میان بیشینه و کمینه پستی بلندی‌های سطح ناپیوستگی تعیین می‌شود. در این روش، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، ابتدا طول مشخصی از ناپیوستگی بر حسب متر و بیشترین فرورفتگی آن بر حسب میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود و با پیاده کردن این اعداد بر روی شکل ۲، مقدار JRC متناسب با زبری سطح ناپیوستگی به دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل ۳-الف مشاهده می‌شود، قسمتی از ناپیوستگی که زیر نیمرخ پیمای صحرایی قرار دارد در چندین نقطه با نیمرخ پیمای صحرایی در تماس است، ولی آنچه در روش صحرایی بارتن مهم است، بیشینه فاصله بین

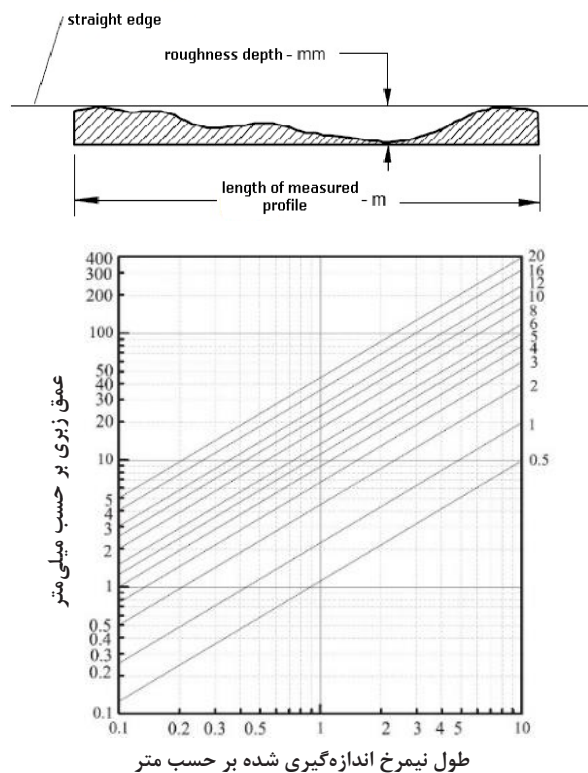
این‌که از بین سطوح ناپیوستگی مختلفی که مقدار زبری برابری دارند کدام یک انتخاب شود یا به عبارت دیگر شبیه‌سازی شود پیش از این و با ارایه روش DRS^{18} توضیح داده شده است [۴۷]. به اختصار می‌توان گفت در روش DRS ، فرض بر این است که طول ناپیوستگی در فضای دو بعدی از اتصال چندین قطعه خط راست تشکیل شده به طوری که طول هر قطعه کمتر از مقدار طول شاخص L و دارای یک ناهمواری به اندازه بیشینه عمق ناهمواری a متناسب با مقدار JRC باشد. مراحل انجام شبیه‌سازی زبری در شکل ۴ نشان داده شده است.

گام اول:	مقدار JRC و مقدار طول نیمرخ پیمای صحرایی (L) مشخص می‌شود.
گام دوم:	مقدار بیشینه عمق ناهمواری (a) با استفاده از شکل ۲ متناسب با مقدار JRC و مقدار L محاسبه می‌شود.
گام سوم:	طول ناپیوستگی به n قطعه تقسیم می‌شود، به طوری که طول هر قطعه عدد تصادفی بین صفر و L باشد و هر قطعه یک ناهمواری به اندازه a داشته باشد.
گام چهارم:	با در نظر گرفتن یک عدد تصادفی بین صفر و a به عنوان ارتفاع برآمدگی و مقداری تصادفی بین صفر و L به عنوان فاصله بین دو برآمدگی مجاور، مکان هندسی نقاط برآمدگی ناپیوستگی در حالت دو بعدی تعیین می‌شود.
گام پنجم:	با مقداری تصادفی بین صفر و اندازه فاصله بین دو برآمدگی مجاور، فاصله نقطه فرورفتگی از برآمدگی مجاورش مشخص و با استفاده از مقدار a ، مکان هندسی نقاط فرورفتگی تعیین می‌شود.
گام ششم:	با مشخص شدن مکان هندسی نقاط برآمدگی و فرورفتگی و اتصال این نقاط به هم، زبری ناپیوستگی با مقدار JRC مشخص تعریف می‌شود.

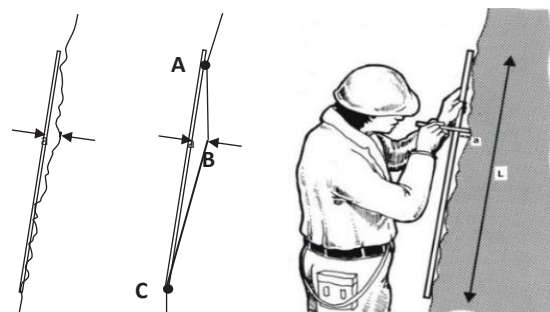
شکل ۴: الگوریتم روش DRS دو بعدی برای شبیه‌سازی زبری سطح ناپیوستگی [۴۶]

در شکل ۵، هفت حالت از بی‌شمار حالت ممکن نشان داده شده است که مقدار JRC یکسانی را برای سطح ناپیوستگی نشان می‌دهد، زیرا فاصله بین شاخص با بیشترین فرورفتگی در هر هفت حالت برابر است و با توجه به روش اندازه‌گیری صحرایی زبری بارتن مقدار JRC برای هر هفت حالت یکسان است، بنابراین سطوح مختلف ناپیوستگی با پستی و بلندی‌های متفاوت ممکن است مقدار JRC یکسان داشته باشد.

سطح ناپیوستگی تا نیمرخ پیمای صحرایی (a) است، بنابراین ساده‌سازی زبری به گونه‌ای که در شکل ۳-ب، نشان داده شده است، تأثیری بر مقدار زبری ناپیوستگی روش صحرایی بارتن ندارد. نکته حایز اهمیت این است که موقعیت مکانی سه نقطه A ، B و C ممکن است به گونه‌ای تغییر کند که مقدار JRC آن تغییری نکند.

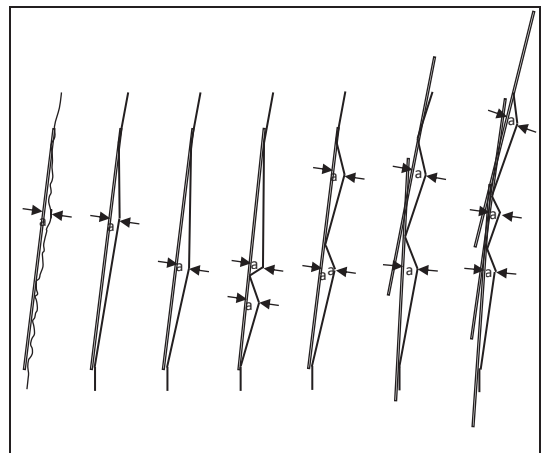
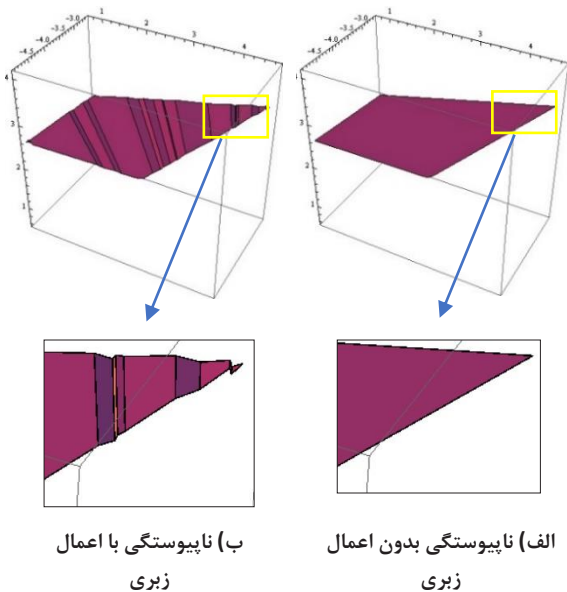


شکل ۲: نمودار چگونگی تعیین JRC پیشنهادی بارتون در مقیاس صحرایی [۴۵]



شکل ۳: ساده‌سازی زبری ناپیوستگی (الف) اندازه‌گیری زبری صحرایی با شاخص به طول L [۴۶] (ب) سطوح ناپیوستگی با مقدار a برابر در طول L

شکل ۳: ساده‌سازی زبری ناپیوستگی



شکل ۵: ناپیوستگی‌های با هندسه متفاوت و JRC، صحرایی یکسان

شکل ۶: اعمال زبری بر روی سطح یک ناپیوستگی

۴- توسعه شبکه ناپیوستگی مجزا DFN-FRAC^{3D}

از آنجا که روش DRS روشی دو بعدی است، برای سه بعدی کردن زبری ابتدا بزرگترین قطر ناپیوستگی که در برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} به صورت یک صفحه (پلیگون مستوی) تعریف شده است، تعیین می‌شود، سپس روش DRS که ماهیت دو بعدی دارد بر روی این خط (بزرگترین قطر ناپیوستگی) اعمال می‌شود. دلیل انتخاب بزرگترین قطر ناپیوستگی بهتر پوشش دادن سطح ناپیوستگی، به وسیله پستی بلندی‌های زبری است، ولی از آنجا که اعمال زبری بر روی بزرگترین قطر سطح ناپیوستگی را بهتر پوشش می‌دهد آن اعمال می‌شود انتخاب شده است. سپس پروفیل زبری در جهت عمود بر قطر اصلی تا رسیدن به مرزهای ناپیوستگی تعمیم داده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶-الف، مشاهده می‌شود یک ناپیوستگی به صورت مستوی که بزرگترین قطر آن نیز مشخص است رویت می‌شود. این سطح، پس از اعمال زبری به صورت شکل ۶-ب از حالت مستوی تغییر شکل داده و به صورت شکسته تبدیل شده است.

گام اول:	انتخاب یکی از سطوح ناپیوستگی
گام دوم:	تخصیص یکی از داده‌های زبری (که به صورت تصادفی تولید شده است) به سطوح ناپیوستگی انتخاب شده
گام سوم:	تعیین بزرگترین قطر ناپیوستگی
گام چهارم:	اعمال زبری بر روی بزرگترین قطر به روش DRS دو بعدی
گام پنجم:	تعمیم پروفیل زبری از بزرگترین قطر به طرفین تا رسیدن به مرزهای ناپیوستگی
گام ششم:	تشکیل یک چندضلعی به عنوان صفحه ناپیوستگی با زبری مشخص

شکل ۷: الگوریتم تعمیم روش DRS از حالت دو بعدی به سه بعدی

با اضافه شدن ویژگی زبری به برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} گامی موثری در جهت ارتقای شبکه ناپیوستگی مجزا برداشته شده است. شکل ۸-الف، خروجی نرم‌افزار DFN-FRAC^{3D} در محیط Mathematica است که ۱۳۷۷ ناپیوستگی شبیه‌سازی شده را بدون اعمال زبری و شکل ۸-ب، همان ناپیوستگی‌ها شبیه‌سازی شده با اعمال ویژگی زبری را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه اساس روش DRS بر مبنای روش صحرایی بارتن است، بنابراین ذات دو بعدی دارد. از طرفی برای استفاده ویژگی زبری در شبکه شکستگی مجزا لازم است زبری به صورت سه بعدی مدل شود، بنابراین ابتدا روش DRS

مراحل انجام تعمیم روش DRS از دو بعدی به سه بعدی در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به این که ناپیوستگی‌ها به صورت تصادفی شبیه‌سازی شده‌اند بزرگترین قطر ناپیوستگی نیز ماهیت تصادفی دارد. شایان ذکر است که الگوریتم بیان شده به زبان برنامه نویسی ++C نوشته شده و به عنوان یک ماژول به برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} اضافه شده است.

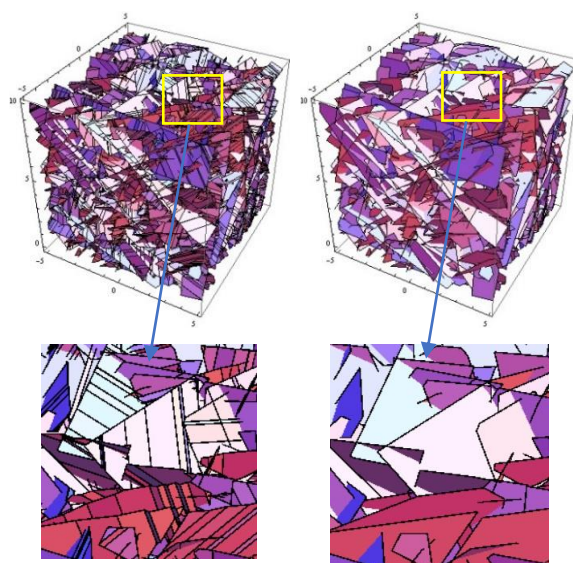
برای شبیه‌سازی هندسی زبری از روش DRS استفاده شده است. در تحقیق حاضر، زبری اعمال شده به ناپیوستگی در واقع نشان دهنده یک مدل ۲/۵ بعدی است. انتظار می‌رود در آینده توسعه مدل زبری از ۲/۵ به ۳ بعد به طور کامل انجام پذیرد. از آنجا که روش DRS دو بعدی است، این روش برای اضافه شدن به برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} به سه بعد تعمیم داده شده است. اضافه شدن زبری به شبکه ناپیوستگی مجزا گامی موثری برای ارتقا، بهبود و تکمیل تر شدن شبکه ناپیوستگی مجزا است و موجب دقیق‌تر شدن مدل شبیه‌سازی شده به مدل واقعی می‌شود. این مساله در برآورد ویژگی‌های مقاومتی توده‌سنگ، به ویژه مقاومت برشی و شکل‌پذیری آن بسیار مهم است.

۶- نتیجه‌گیری

ارتقای مدل شبکه ناپیوستگی مجزا در راستای نزدیک‌تر شدن مدل هندسی شبیه‌سازی شده به مدل واقعی همواره مورد توجه محققان بوده است. در این تحقیق، با شبیه‌سازی هندسی زبری به روش DRS و اضافه کردن آن به شبکه ناپیوستگی مجزا گامی موثر در ارتقای مدل‌سازی هندسی برداشته شده است. در همین راستا نیز یک برنامه کامپیوتری سازگار با برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} تهیه شده است تا ضمن اضافه شدن به برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D}، گامی در راستای توسعه شبکه ناپیوستگی مجزا باشد.

۷- مراجع

- [۱] نوروزی، م.، جلالی، س. ا.، کاکایی، ر.؛ ۱۳۹۳؛ "توسعه مدل تصادفی شبکه درزه‌ها با در نظر گرفتن ویژگی آماری اندازه درزه". پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران.
- [2] Yin, T., and Chen, Q. (2020). "Simulation-based investigation on the accuracy of discrete fracture network (DFN) representation". *Computers and Geotechnics*, 121: 103487.
- [3] Noroozi, M., Kakaie, R., and Jalali, S. E. (2015). "3D Geometrical-Stochastical Modeling of Rock mass Joint Networks (Case Study: the Right Bank of Rudbar Lorestan Dam Plant)". *Journal of Geology and Mining Research*, 7(1): 1-10. DOI: 10.5897/jgmr14.0213.
- [4] Mohebbi, M., Yarahmadi Bafghi, A. R., Fatehi Marji, M., and Gholamnejad, J. (2017). "Rock mass structural data analysis using image processing techniques (Case study: Choghart iron ore mine northern slopes)". *Journal of Mining and Environment*, 8(1): 61-74.



شکل ۸: اعمال زبری بر روی ناپیوستگی‌های شبیه‌سازی شده
الف) خروجی نرم‌افزار DFN-FRAC^{3D} بدون اعمال زبری
ب) خروجی نرم‌افزار DFN-FRAC^{3D} با اعمال زبری

بر روی قطر اعمال شده و در راستای عمود بر بزرگترین قطر گسترش یافته است که ارایه آن به عنوان زبری سه‌بعدی همراه با اشکالاتی است. برای اینکه بتوان ارایه بهتری از زبری سه بعدی داشت، می‌توان روش DRS بر روی تمامی قطرهای ناپیوستگی اعمال کرد، سپس با انجام تمهیداتی تصویر سه‌بعدی بهتری از زبری ارایه داد.

۵- جمع‌بندی

یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه تاثیر سیستم ناپیوستگی‌های توده‌سنگ، تولید مدل شبکه ناپیوستگی مجزا بر مبنای خصوصیات هندسی ناپیوستگی است. تاکنون تحقیق‌های بسیاری در خصوص شبیه‌سازی ویژگی‌های ناپیوستگی و اضافه شدن آن به مدل شبکه ناپیوستگی مجزا انجام شده است. برنامه کامپیوتری DFN-FRAC^{3D} اکثر ویژگی‌های ناپیوستگی را شبیه‌سازی می‌کند. یکی از ویژگی‌های ناپیوستگی که تاکنون شبیه‌سازی نشده بود، زبری است. اندازه‌گیری زبری، روش‌های مختلفی دارد که متداول‌ترین آن JRC است. در این تحقیق، ویژگی زبری به مدل شبکه ناپیوستگی مجزا اضافه شده است. به این منظور، ابتدا مقدار JRC و سپس هندسه متناسب با JRC شبیه‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی مقدار زبری از تابع کرنل گوسی و

- Carlo Technique". Applied Sciences, 12(22): 11385.
- [17] Ortega, O., and Marrett, R. (2000). "Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico". Journal of Structural Geology, 22(5): 571-588.
- [18] Zhang, L., and Einstein, H. H. (2000). "Estimating the intensity of rock discontinuities". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(5): 819-837.
- [19] Priest, S. D. (2004). "Determination of discontinuity size distributions from scanline data". Rock Mechanics and Rock Engineering, 37(5): 347-368.
- [20] Song, J. J. (2006). "Estimation of a joint diameter distribution by an implicit scheme and interpolation technique". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43(4): 512-519.
- [21] Doyuran, V., Ayday, C., and Karahanoglu, N. (1993). "Statistical analyses of discontinuity parameters of Gölbaşı (Ankara) Andesites, Süpren (Eskişehir) marble, and Porsuk Dam (Eskişehir) peridotite in Turkey". Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 48(1): 15-31.
- [22] Kulatilake, P. H., Um, J. G., Wang, M., Escandon, R. F., and Narvaiz, J. (2003). "Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA". Engineering Geology, 70(1-2): 131-155.
- [23] Einstein, H. H., and Baecher, G. B. (1983). "Probabilistic and statistical methods in engineering geology". Rock Mechanics and Rock Engineering, 16(1): 39-72.
- [24] Piteau, D. R. (1973). "Characterizing and extrapolating rock joint properties in engineering practice". In: Geomechanik Fortschritte in der Theorie und deren Auswirkungen auf die Praxis/Geomechanics—Progress in Theory and Its Effects on Practice, 5-31.
- [25] Priest, S. D., and Hudson, J. A. (1981). "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 18(3): 183-197.
- [26] Hu, X., Wu, F., and Sun, Q. (2011). "Elastic modulus of a rock mass based on the two parameter negative-exponential (TPNE) distribution of discontinuity spacing and trace length". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 70(2): 255-263.
- [27] Baghbanan, A. (2008). "Scale and stress effects on hydro-mechanical properties of fractured rock masses".
- [5] Wang, P., Ren, F., and Cai, M. (2020). "Influence of joint geometry and roughness on the multiscale shear behaviour of fractured rock mass using particle flow code". Arabian Journal of Geosciences, 13(4): 1-14.
- [6] Zhang, L., and Einstein, H. H. (2010). "The planar shape of rock joints". Rock mechanics and rock engineering, 43(1): 55-68.
- [7] Xu, C., and Dowd, P. (2010). "A new computer code for discrete fracture network modelling". Computers and Geosciences, 36(3): 292-301.
- [8] Robertson, A. (1970). "The Interpretation of geological factors for use in slope theory". In: Planning Open Pit Mines-Symp. on the theoretical background to the planning of open pit mines with special reference to slope st., 55-71.
- [9] Sari, M., Karpuz, C., and Ayday, C. (2010). "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites". Computers and Geosciences, 36(7): 959-969.
- [10] Baecher, G. B., Lanney, N. A., and Einstein, H. H. (1977). "Statistical description of rock properties and sampling". In: The 18th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.
- [11] Zadhesh, J., Jalali, S. M. E., and Ramezanzadeh, A. (2014). "Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks". Arabian Journal of Geosciences, 7(6): 2353-2361.
- [12] Kulatilake, P. H. S., Chen, J., Teng, J., Shufang, X., and Pan, G. (1996). "Discontinuity geometry characterization in a tunnel close to the proposed permanent shiplock area of the three gorges dam site in China". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 33(3): 255-277.
- [13] Kulatilake, P. H. S. W. (1993). "Application of probability and statistics in joint network modeling in three dimensions". In: Conference on Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering, 63-78.
- [14] Zeeb, C., Gomez-Rivas, E., Bons, P. D., Virgo, S., and Blum, P. (2013). "racture network evaluation program (FraNEP): A software for analyzing 2D fracture trace-line maps". Computers and Geosciences, 60: 11-22.
- [15] Baecher, G. B. (1983). "Statistical analysis of rock mass fracturing". Mathematical Geology, 15(2): 329-348.
- [16] Li, A., Li, Y., Wu, F., Shao, G., and Sun, Y. (2022). "Simulation Method and Application of Three-Dimensional DFN for Rock Mass Based on Monte-

- their roughness parameters". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 28(4): 333-336.
- [40] Tatone, B. S. A., and Grasselli, G. (2010). "A new 2D discontinuity roughness parameter and its correlation with JRC". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47: 1391-1400.
- [41] Jang, H. S., Kang, S. S., and Jang, B. A. (2014). "Determination of joint roughness coefficients using roughness parameters". Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(6): 2061-2073.
- [42] Zhang, H., Zhang, C., Yang, Z., Li, Z., and Wang, C. (2021). "A Novel Discontinuity Roughness Parameter and Its Correlation with Joint Roughness Coefficients". Energies, 14(22): 7631.
- [43] Yong, R., Huang, L., Hou, Q., and Du, S. (2020). "Class Ratio Transform with an Application to Describing the Roughness Anisotropy of Natural Rock Joints". Advances in Civil Engineering 2020, 1-14.
- [44] Feng, Q., Fardin, N. Jing, L. and Stephansson, O. (2003). "A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces". Rock Mechanics and Rock Engineering, 36(1): 3-25.
- [45] Barton, N. (1982). "Shear strength investigations for surface mining". Proceedings of the 23rd US Rock Mechanics Symposium Vancouver, 178-180.
- [46] Palmström, A., Sharma, V. I., and Saxena, K. (2001). "Measurement and characterizations of rock mass jointing". Chap. 2 in In-situ characterization of rocks, 1-40.
- [47] عامری، ع.، جلالی، س. م.، ا.، ربیعی، م. ر.؛ ۱۴۰۰؛ "ارایه روشی جدید برای شبیه‌سازی هندسی آماری زبری ناپیوستگی‌ها". نشریه روش‌های تحلیلی و عددی مهندسی معدن، دوره ۲۷، ص ۵۵-۶۶.
- [48] عامری، ع.، جلالی، س. م.، ا.، ربیعی، م. ر.؛ ۱۳۹۷؛ "تولید نمونه تصادفی از برآورد تابع توزیع احتمال به روش کرنل (مطالعه موردی تعیین زبری درزه توده سنگ)". چهاردهمین کنفرانس بین‌آمار، شاهرود.
- PhD Diss., KTH.
- [28] نوروزی، م.، جلالی، س. ا.، کاکایی، ر.؛ ۱۳۹۳؛ "شبیه‌سازی هندسی سه بعدی شبکه‌ی ناپیوستگی‌های توده سنگ در محل احداث تونل دسترسی سد رودبار لرستان". مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره اول، شماره ۱، ص ۵۳-۶۸.
- [29] Esteban, N., Galindo, R., and Serrano, A. (2021). "Analytical formulation for the deformability assessment of rock masses with filled discontinuities". Computers and Geotechnics, 136: 104111.
- [30] Wu, N., Liang, Z., Zhang, Z., Li, S., and Lang, Y. (2022). "Development and verification of three-dimensional equivalent discrete fracture network modelling based on the finite element method". Engineering Geology, 306: 106759.
- [31] Hastie, T., Tibshirani, R., and Friedman, J. (2001). "The Elements of Statistical Learning". Springer series in statistics, New York, NY, USA
- [32] Wand, M. P., and Jones, M. C. (1994). "Kernel smoothing". First Edition, CRC press, New York, pp. 224.
- [33] Bahaaddini, M., Serati, M., Khosravi, M. H., and Hebblewhite, B. (2022). "Rock joint micro-scale surface roughness characterisation using photogrammetry method". Journal of Mining and Environment, 13(1): 87-100.
- [34] Barton, N., and Choubey, V. (1977). "The shear strength of rock joints in theory and practice". Rock Mechanics and Rock Engineering, 10(1): 1-54.
- [35] Develi, K., Babadagli, T. T., and Comlekci, C. (2001). "A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness". Computers and Geosciences, 27(3): 265-277.
- [36] Grasselli, G., Wirth, J., and Egger, P. (2002). "Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39(6): 789-800.
- [37] Herda, H. H. W. (2006). "An algorithmic 3D rock roughness measure using local depth measurement clusters". Rock Mechanics and Rock Engineering, 39(2): 47-158.
- [38] Tse, R., and Cruden, D. M. (1979). "Estimating joint roughness coefficients". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 16(5): 303-307. DOI: 10.1016/0148-9062(79)90241-9.
- [39] Yu, X., and Vayssade, B. (1991). "Joint profiles and

¹ Discrete Fracture Network

² Rough Discrete Fracture Network

³ Poisson

⁴ Cluster

⁵ Cox

⁶ Synthetic Rock Mass

⁷ اطلاعات تکمیلی در مقاله‌ای با عنوان "تولید نمونه تصادفی از برآورد تابع توزیع احتمال به روش کرنل (مطالعه موردی تعیین زبری درزه توده سنگ)" [۴۸] که توسط نویسندگان این دست نوشته منتشر شده، آمده است.

⁸ Density Estimation

⁹ Histogram

¹⁰ Kernel

¹¹ Adaptive

¹² Nearest Neighborhood

¹³ Generalized Nearest Neighborhood

¹⁴ Orthogonal Series

¹⁵ Penalized Likelihood Maximum

¹⁶ Joint Roughness Coefficients

¹⁷ Roughness Smooth Coefficient

¹⁸ Discontinuity Roughness Simulation