



Imam Khomeini International University  
Vol. 8, No. 3, Autumn 2023



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

## Research Paper

# Numerical Analysis of the Pile Movement Resulting from Rock Blasting in Open Pit Mines

Bahadori M.<sup>1,2\*</sup>, Bakhshandeh Amnieh H.<sup>3</sup>

- 1- Ph.D, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran  
2- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Faculty of Engineering, University of Gonabad, Khorasan Razavi, Iran  
3- Associate Professor, School of Mining Engineering, Technical Education College, Tehran University, Tehran, Iran

Received: 25 Sep. 2021

Accepted: 24 Nov. 2021

**Abstract:** Pile movement is one of the rock blasting outcomes that, considering the type of haulage machines, has a direct effect on the efficiency of the loading process. In this study, using UDEC discrete element software, the pile movement of fragmented material caused by the blasting operation is modeled. Since UDEC is not capable of modeling the whole process of rock blasting, to accurately model the pile movement of fragmented material, the damping coefficients must be changed in a way to allow the move freely out of the split blocks after the blast, be modeled. The numerical modeling results show that implementing a negative exponential function with three (the initial, threshold, and power) eigenvalues, as the fish-function to the damping coefficient, can model the results pile movement. With the help of this damping function, three blasting blocks with one and two rows of blast holes were modeled. The results of these modeling show that the pile movement for the two rows of blast holes depends on the inter-row delay time, and for the delay times of 17 ms and 50 ms, the maximum horizontal movement of the pile was 30 m and 55 m, respectively. These values show good agreement with the values measured in an actual blast operation. The results of this study show that by changing the negative exponential function eigenvalues defined for damping, the velocity of the fragmented blocks, the displacement, and the geometry of the pile, could be modeled. This shows the capability of the discrete element method in the modeling of the results of rock blasting.

**Keywords:** Blasting, Numerical modeling, Damping coefficient, Fish-functions, Pile movement.

### How to cite this article

Bahadori, M., and Bakhshandeh Amnieh, H. (2023). "Numerical analysis of the pile movement resulting from rock blasting in open pit mines". Journal of Mineral Resources Engineering, 8(3): 57-73.

DOI: [10.30479/JMRE.2022.16268.1547](https://doi.org/10.30479/JMRE.2022.16268.1547)

\*Corresponding Author Email: [moein.bahadori@gonabad.ac.ir](mailto:moein.bahadori@gonabad.ac.ir)

COPYRIGHTS



©2023 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

To investigate the numerical modeling capability of the fragmented rock mass and pile movement by blasting using the discrete element method, the UDEC software has been used. This software can model the types of contacts between rock blocks that are next to each other due to discontinuities, and future contacts between these blocks that rotated or displaced after applying forces and come close again. In addition, the UDEC software can model dynamic loadings such as blasting and earthquakes. Therefore, by combining these two properties, an acceptable analysis of how the fragmented rocks move after the blasting can be obtained, which can be very helpful in diluting minerals (especially at the boundary between the ore and waste). It is also possible to determine the final shape of the pile movement, which plays a significant role in the efficiency of loading and hauling operations. In general, methods of predicting and controlling the results of blasting operations are divided into three general categories: analytical studies, field, and laboratory studies, and numerical modeling. Due to time and cost savings, high flexibility, and continuous development of computer systems, although numerical modeling has its drawbacks and limitations, it has a particular share in predicting the results of blasting operations [1]. The main categories of numerical modeling that have been done till now can be divided into continuous [2-4], discontinuous [5-7], and combined [8,9] logic. Each type of mentioned modeling the rock fragmentation by blasting has its advantages and limitations, and none of these methods can simulate the whole process and results. In this paper, using rectangle discontinuities the area of the blasting is divided into pre-fractured rocks, by applying the dynamic loads of the blasting operations is modeled for single and two rows of the drilled hole and with different inter-row delays time. The results of this study show that by applying some simplifications and defining a time-variant of the damping coefficient, the UDEC software can simulate the pile movement caused by blasting operation with acceptable accuracy.

## METHODS

In the first step, to model the pile movement caused by blasting operations, a hypothetical rock slope with a height of 15 m and a width of 19m with a slope of  $75^\circ$  has been modeled in the UDEC discrete element software. It is assumed that a row of blast holes with a depth of 17m (including 2m of sub-drilling), with a diameter of 250mm and a stemming length of 3m was drilled. The non-reflective (viscous) boundary conditions have been used to avoid unwanted reflection of waves from the model boundaries. The area of blasting has been pre-fractured using two perpendicular sets of joints with statistical variation in spacing, in which that the size distribution of produced particle is similar to the reality. The size of generated particles has been calculated, and the semi-log graph of these particles generated using existing fish functions in UDEC logic. As the charge is detonated with a specific velocity, the blast hole is divided into several cylindrical parts that detonates consecutively so that the total time of loading of the whole cylinders equals the actual time of the blasting process is a real blast hole. It is assumed that the detonation velocity of the charge is 4500m/s, and for the 14m of the charge length, the whole time of the detonation process for such a hole equals 3.11ms. On the other hand, based on the mathematical behavior of the pressure-time dynamic pulse proposed by Yoon and Jeon (2009), for the rise time of  $28\mu\text{s}$ , the duration time of the pulse has to be  $222\mu\text{s}$ . So, in each step of the dynamic loading (for the mentioned time duration), considering the detonation velocity, the height of each small cylinder has to be 1m. The rise time of the dynamic pulse loading is calculated as the time required to detonate the cross-section circle of the cylinder (considering the charge radius of 125mm and detonation velocity of 4500m/s). As the mechanical damping in UDEC can affect the consequences of the dynamic process, while the pile movement needs different damping coefficients to move freely, a time-variant fish function is proposed to model the whole process of the rock blasting and the pile movements. The results of this combination of dynamic loadings and time-variant damping coefficient show a real process of pile movement. Based on the obtained results from the first step, in the second step, a numerical model of two rows of blast holes is modeled, and the effect of inter-row delay times is investigated. The results show that the shape of the final pile is a function of inter-row delay time and separation and displacements of fragmented rocks have reverse relation with it. The results show a good agreement with the actual blasting operations. Figure 1 shows the geometry, boundary condition of the numerical modeling. The size distribution and dynamic pulse pressure for modeling blast loading showed in Figure 1.



## CONCLUSIONS

The movement of the fragmented rocks caused by blasting operations and the estimation of the grade distribution within the pile become of great importance in the efficiency of the loading machines and the blending and dilution of the mineral. There are various methods for predicting blasting results, among which numerical modeling has become more popular among researchers due to its time and cost savings and high flexibility. In this study, using the orthogonal artificial joints algorithm, the range of the blasting block is broken into pieces and their semi-log graph of cumulative size distribution is calculated and scattered by the fish functions in the UDEC software. Since this software cannot model the behavior of explosion gas products, a pressure-time pulse has been used to model the dynamic loading of blast shock waves. It has been tried to use step-by-step loading similar to field conditions. The results of this study show that by changing the values of the negative exponential function, a wide range of displacement results of the fragmented rock mass caused by blasting can be modeled. Based on the results of numerical modeling, the maximum horizontal displacement of the fragmented rocks for two rows of blast holes that with 17ms and 50ms inter-row delay times, is 30m and 55m, respectively. On the other hand, in a field blasting experiment, the maximum horizontal displacement of 52m was measured for the inter-row delay of 50 ms, which indicates the accuracy of numerical modeling in estimating the motion of the fragmented mass. Based on the results of this study, by accepting some simplifications and assumptions, it is possible to model pile movement caused by blasting and its final shape and grad distribution in the UDEC discrete element software.

## REFERENCES

- [1] Bahadori, M., Bakhshandeh Amnieh, H., and Khajezadeh, A. (2016). "A New Geometrical-Statistical Algorithm for Predicting Two-Dimensional Distribution of Rock Fragments Caused by Blasting". *International Journal of Rock Mechanics Mining Sciences*, 86: 55-64.
- [2] Yoon, J., and Jeon, S. (2010). "Use of a Modified Particle-Based Method in Simulating Blast-Induced Rock Fracture. *Rock Fragmentation by Blasting*". Taylor & Francis Group, London, 371-380.
- [3] Zhu, Z., Xie, H., and Mohanty, B. (2008). "Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(2): 111-121.
- [4] Ma, G., and An, X. M. (2008). "Numerical simulation of blasting-induced rock fractures". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45(6): 966-975.
- [5] Harries, G. (1987). "The calculation of heave and muck-pile profile". In: *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, Fragblast, 248-256.
- [6] Yang, R. L., and Kavetsky, A. (1990). "A Three Dimensional Model of Muckpile Formation and Grade Boundary Movement in Open Pit Blasting". *International Journal of Mining Geological Engineering*, 8(1): 13-34.
- [7] Preece, D. S., and Knudsen, S. D. (1991). "Coupled Rock Motion and Gas Flow Modeling in Blasting". Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- [8] Wang, Z., Konietzky, H., and Shen, R. F. (2009). "Coupled finite element and discrete element method for underground blast in faulted rock masses". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6): 939-945.
- [9] Furtney, J., Cundall, P., and Chitombo, G. (2009). "Developments in numerical modeling of blast induced rock fragmentation: Updates from the HSBM project". In: *Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting*, pp. 335.



## تحلیل عددی حرکت توده‌ی خردشده حاصل از انفجار در معادن روباز

معین بهادری<sup>۱\*</sup>، حسن بخشنده امنیه<sup>۲</sup>

- ۱- دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان
- ۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، خراسان رضوی
- ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۰۳

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۳

### چکیده

یکی از نتایج عملیات انفجار، حرکت توده خرد شده است که با توجه به نوع ماشین‌آلات، ممکن است نقش مستقیمی در راندمان عملیات بارگیری داشته باشد. در این بررسی با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC نحوه حرکت توده خرد شده حاصل از انفجار مدلسازی شده است. از آنجا که نرم‌افزار المان مجزای UDEC قابلیت مدلسازی تمامی فرآیند انفجار را ندارد، برای مدلسازی حرکت توده خرد شده باید ضرایب میرایی را به گونه‌ای تغییر داد تا حرکت آزادانه بلوک‌ها پس از انفجار را مدلسازی کند. بر اساس نتایج مدلسازی عددی با استفاده از یک تابع نمایی منفی و تعیین سه مقدار مشخصه برای آن (مقدار اولیه، حد آستانه و توان) می‌توان نتایج جابه‌جایی توده خرد شده بر اثر انفجار را مدلسازی کرد. به کمک این تابع میراکننده بلوک‌های انفجاری با یک و دو ردیف چال مدلسازی شده است. نتایج این مدلسازی‌ها نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی توده خرد شده برای انفجار دو چال انفجاری، وابسته به زمان تاخیر بین دو ردیف بوده و برای زمان‌های تاخیر ۱۷ms و ۵۰ms بیشترین جابه‌جایی افقی توده خرد شده به ترتیب برابر ۳۰m و ۵۵m بوده است. این مقادیر انطباق مناسبی با مقادیر اندازه‌گیری شده در عملیات میدانی انفجار نشان می‌دهد. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با تغییر در مقادیر مشخصه تابع نمایی منفی تعریف شده برای تغییرات ضریب میرایی در مدل، می‌توان سرعت حرکت بلوک‌ها، جابه‌جایی آن‌ها و هندسه کپه در قرار نهایی را تعیین کرد که بیانگر قابلیت بالای روش المان مجزا در مدلسازی عددی حرکت توده خرد شده است.

### کلمات کلیدی

انفجار، مدلسازی عددی، ضرایب میرایی، توابع کتابخانه‌ای، حرکت توده خرد شده.

### استناد به این مقاله

بهادری، م.، بخشنده امنیه، ح.؛ ۱۴۰۲؛ "تحلیل عددی حرکت توده‌ی خردشده حاصل از انفجار در معادن روباز". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هشتم، شماره ۳، ص ۷۳-۵۷.

DOI: 10.30479/JMRE.2022.16268.1547



## ۱- مقدمه

علیرغم پیشرفت تکنولوژی و توسعه و تنوع ماشین‌آلات حفاری مکانیکی، حفاری و انفجار همچنان به عنوان یک روش ساده، انعطاف‌پذیر و مقرون به صرفه کاربرد گسترده‌ای در پروژه‌های معدنی و عمرانی دارد [۱]. انفجار یک فرآیند فیزیکی شیمیایی بسیار سریع است که با آزاد شدن نور، حرارت و فشار بسیار بالا همراه است [۴-۲]. تغییر فاصله ناگهانی بین مولکول‌های مواد منفجره از چند آنگستروم تا چند میلی‌متر که در کسری از ثانیه اتفاق می‌افتد، موجب اعمال امواج ضربه‌ای به توده‌سنگ مجاور چال انفجار می‌شود [۳،۲]. انرژی اولیه حاصل از انفجار به قدری زیاد است که موجب پودر شدن محدوده مشخصی از دیوار بلافاصله چال انفجاری می‌شود [۵-۲]. با افزایش فاصله و استهلاک ناشی از تغییر شکل‌های شدید، در خارج از محدوده پودر شده محدوده دیگری از تغییر شکل‌های پلاستیک اطراف چال انفجار پدیدار می‌شود که به آن ناحیه ترک خورده گفته می‌شود. این ترک‌ها با انتشار محصولات گازی انفجار توسعه و تکمیل می‌شوند [۶-۲]. پس از عبور جبهه موج انفجار و برخورد با سطح آزاد، امواج فشاری به صورت کششی منعکس شده و دسته دیگری از شکستگی‌ها را به شکل پوسته‌پوسته شدن پدید می‌آورند [۳،۲]. به طور کلی مهم‌ترین نتایج عملیات انفجار خردشدگی، لرزش زمین، انفجار هوا، جابه‌جایی توده خرد شده، عقب‌زدگی و پرتاب سنگ هستند که پیش‌بینی و کنترل آن‌ها نقش مستقیمی در هزینه‌های جاری عملیات معدنکاری دارد [۳،۲]. از بین این نتایج خردشدگی، مطلوب‌ترین و به جز جابه‌جایی توده خرد شده سایر عوامل در دسته خروجی‌های نامطلوب همراه انفجار دسته‌بندی می‌شود [۳]. بسته به نوع ماشین‌آلات مورد استفاده در فرآیند بارگیری، شکل نهایی توده خرد شده پس از انفجار تاثیر مستقیمی بر راندمان عملیات دارد. هنگام استفاده از شاول کابلی، علیرغم قابلیت دستیابی این ماشین به ارتفاع بالا، گسترش هندسی توده خرد شده نباید از حد مشخصی فراتر رود. چرا که با توجه به قدرت مانور پایین شاول کابلی، گسترش بیش از حد توده خرد شده موجب کاهش توان تولید ماشین خواهد شد. علاوه بر این در به کارگیری لودر چرخ لاستیکی در عملیات بارگیری (که قدرت مانور بالایی دارد)، کنترل ارتفاع توده خرد شده اهمیت دارد [۲].

به طور کلی روش‌های پیش‌بینی و کنترل نتایج عملیات انفجار به سه دسته عمومی بررسی‌های تحلیلی، مطالعات

میدانی و آزمایشگاهی و مدلسازی‌های عددی تقسیم می‌شوند. از میان روش‌های یاد شده، اگرچه مدلسازی عددی با نقایص و محدودیت‌هایی همراه است، اما به سبب صرفه‌جویی در زمان و هزینه، انعطاف‌پذیری بالا و توسعه مداوم سیستم‌های کامپیوتری کاربرد گسترده‌تری دارد [۷]. کربی و همکاران و هریس از آزمایشگاه ملی سندیا، یک کد تجاری تحت عنوان SABREX برای تحلیل انفجار ارایه کرده‌اند که در آن توده خرد شده پیش از انفجار به قطعاتی با ابعاد واحد شکسته شده و حرکت آن‌ها از سطح آزاد شروع می‌شود [۸،۹]. اگرچه بر اساس مطالعات هریس نتایج مدلسازی‌های عددی با کد SABREX انطباق مناسبی با نتایج انفجار میدانی نشان داد، اما این کد در برآورد ویژگی‌های برجای توده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها، ویژگی‌های ماده منفجره و خردشدگی حاصل از انفجار ناتوان است [۹]. یانگ و کاوتسکی و یانگ و همکاران به ترتیب در سال‌های ۱۹۸۸ و ۱۹۹۰ با هدف برآورد پتانسیل جابه‌جایی توده خرد شده به وسیله مواد منفجره مختلف و کنترل اختلاط ماده معدنی و باطله یک کد کامپیوتری ارایه کرده‌اند. این کد قابلیت پیاده‌سازی الگوهای متنوع حفاری، مرزبندی مواد باطله و کانسنگ قبل از انفجار، زمان‌های تاخیر بین ردیف‌های متوالی، میرایی انرژی منتقل شده به بلوک‌های سنگی و ضریبی برای تعیین قدرت مواد منفجره مختلف را داشته و مقاطع عرضی متنوعی از هندسه کپه و توزیع عیار درون آن را نشان می‌دهد. در کد پیشنهادی یانگ و کاوتسکی همانند کد تجاری SARBREX فرض ابعاد واحد و یکسان بلوک‌های خرد شده و عدم وجود نیروهای مقاوم بین آن‌ها مهم‌ترین نقاط ضعف به شمار می‌آیند [۱۰]. برای مدلسازی عددی انفجار، پریس و نادسن از آزمایشگاه ملی سندیا، مدل‌های دوبعدی متعددی از حرکت توده‌ی خرد شده بر اثر انبساط گازهای حاصل از انفجار با نام DMC ارایه کردند. مهم‌ترین ویژگی این کد استفاده از بارگذاری فشار-حجم تحت معادله حالت 'JWL' برای مدلسازی بارگذاری بوده اما همانند مدل‌های پیشین، توده‌سنگ تحت بارگذاری قبل از آغاز انفجار به کره‌هایی با ابعاد یکنواخت که هیچ نیروی مقاومی بین آن‌ها برقرار نیست، شکسته شده است [۱۱]. پریس و چانگ برای کاهش آسیب وارد شده به لایه‌های زغال سطحی، قابلیت تحلیل خصوصیات مقاومتی زغال را به کد DMC وارد کرده و در مدلسازی عددی انفجار روباره‌برداری استفاده کردند [۱۲]. برای بررسی توزیع عیار ماده معدنی در توده خرد شده حاصل از انفجار، فیرث و تیلور با استفاده از منطق المان مجزا در

ترکیبی محیط‌های پیوسته و ناپیوسته در برآورد نتایج انفجار استفاده می‌کند. اساس منطق محاسباتی به کار رفته در مدل‌های پیشنهادی HSBM از روش محاسبات DMC اقتباس شده است. در کد HSBM فرآیند انفجار به واسطه سه محدوده مجزای ستون ماده‌ی منفجره، محدوده پودر شده (۲٫۵ برابر شعاع چال) و ترک‌های حاصل از انفجار به وسیله سه منطق محاسباتی مدل‌سازی می‌شود. برای مدل‌سازی محدوده ترک‌خورده از منطق PFC استفاده شده و به واسطه آن توده‌سنگ قبل از انفجار به قطعاتی با ابعاد یکنواخت مشخص شکسته شده است. این قطعات به واسطه معادله کلین-ویت (فنر و میراگر به صورت موازی) و مقاومت کششی به یکدیگر اتصال دارند. در این مدل شدت خردشدگی برآورد شده، وابسته به ابعاد شبکه بوده و با توجه به آنکه تمام محدوده خردشدگی (خارج از محدوده پودر شده) با استفاده از این شبکه مدل‌سازی می‌شود، کاهش ابعاد شبکه موجب افزایش قابل توجه زمان انجام محاسبات می‌شود [۱۸]. نینگ و همکاران در برآورد هندسه توده خرد شده پس از انفجار از روش DDA دو بعدی استفاده کرده‌اند. در این بررسی محدوده بلوک انفجار، قبل از بارگذاری به وسیله مثلث‌های یکنواخت خرد شده است [۱۹]. برای کنترل و بهینه‌سازی ابعاد و یکنواختی مناسب بلوک‌های خرد شده، بهبود کیفیت انفجارهای کنترل شده و پیش‌شکافی و طراحی بهینه‌ی کلواک معدن اورانیم بیلیتون برای حداکثر بهره‌وری ماشین‌آلات بارگیری و جلوگیری از سقوط مواد خرد شده به پله‌های پایین دست، در-برایان و همکاران یک کد کامپیوتری ترکیبی ارائه کرده‌اند. لازم به ذکر است که در این مدل، فرآیند خردایش قبل از بارگذاری انفجار در مدل اعمال شده و بلوک‌های معرف خردشدگی تنها به واسطه مقاومت کششی به یکدیگر متصل شده‌اند [۲۰، ۲۱]. شرفی‌صفا و همکاران در مدل‌سازی نتایج عملیات انفجار پیش‌شکافی در نرم‌افزار المان مجزای UDEC، گسترش تغییر شکل پلاستیک در مجموعه‌ای از المان‌های مجاور را هم‌ارز توسعه مناطق پلاستیک ارزیابی کرده‌اند. در این بررسی تاثیر وجود ناپیوستگی‌های موجود بر نتایج عملیات انفجار پیش‌شکافی با استفاده از الگوریتم‌های متنوع ناپیوستگی بررسی شده است. این محققان از اختلاف زمانی بارگذاری چال‌های مجاور (با توجه به سرعت انفجار فیله‌ی کورتکس) که سهم قابل توجهی بر نحوه انتشار ترک و هدایت آن در مسیر پیش‌شکاف دارد صرف‌نظر کرده و تمامی چال‌های پیش‌شکافی را به طور هم‌زمان بارگذاری کرده‌اند [۲۲].

نرم‌افزار UDEC فرآیند انفجار یک چال را مدل‌سازی کرده‌اند. در این بررسی برای مدل‌سازی خردشدگی حاصل از انفجار دو دسته درزه (۱۵ و ۱۳۵ درجه) با زاویه اصطکاک ۲۰ درجه و سختی 1000 GPa استفاده شده و فرض بر صلب بودن بلوک‌ها است. در این مدل از مقاومت‌های چسبندگی و کششی بین بلوک‌ها و اثر گازهای حاصل از انفجار صرف‌نظر شده و خردشدگی محدوده به وسیله دسته‌درزه‌های متقاطع منظم انجام گرفته است [۱۳]. مرتضوی و کاتسابانیس در بررسی تاثیر ابعاد بارسنگ بر فرآیند انفجار در توده‌سنگ، از روش DDA استفاده کرده‌اند. در تحلیل عددی مرتضوی و کاتسابانیس توده‌سنگ تحت بارگذاری، پیش از انفجار به وسیله دسته‌های ناپیوستگی مصنوعی به ابعاد کاملا یکنواخت خرد شده و تاثیر شیب این ناپیوستگی‌ها بر نحوه حرکت بارسنگ ارزیابی شده است [۱۴]. ژو و همکاران در بررسی آسیب‌های وارده به نمونه‌های سنگی استوانه‌ای در اثر بارگذاری انفجار، از نرم‌افزار المان مجزای AUTODYN استفاده کرده‌اند. این محققان توسعه المان‌های تغییر شکل پلاستیک یافته در راستای مشخص را نماد رشد ترک‌ها دانسته‌اند [۱۵]. ما و آن در بررسی تاثیر نحوه بارگذاری بر گسترش مناطق پلاستیک اطراف چال انفجار، از نرم‌افزار المان محدود LS-DYNA استفاده کرده‌اند. در این بررسی چگونگی تغییر توزیع شکستگی‌ها اطراف چال انفجار با تغییر در زمان اعمال بارگذاری انفجار برای یک پالس فشار-زمان با فشار حداکثر ثابت مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد با افزایش زمان اعمال بار دینامیکی، شعاع مناطق اطراف چال از حالت پودرشدگی خالص به سمت ترک‌های شعاعی خالص (پودرشدگی ناچیز) تغییر می‌یابد. همچنین ما و آن تغییر شکل پلاستیک المان‌های مجاور در یک راستای مشخص را نماد گسترش ترک‌ها فرض کرده‌اند [۱۶]. وانگ و همکاران نحوه انتشار ترک اطراف چال انفجار را با استفاده از الگوریتم‌های دسته درزه‌های متعامد (اورتوگونال) و الگوریتم سنگ‌فرش (ورونویی) در نرم‌افزارهای UDEC و LS-DYNA مدل‌سازی کرده‌اند. این محققان استفاده از الگوریتم سنگ‌فرشی در برآورد مسیر رشد ترک را مناسب‌تر ارزیابی کرده‌اند [۱۷]. علاوه بر این‌ها از سال ۲۰۰۱ یک پروژه بین‌المللی برای ارائه یک روش عددی دقیق با قابلیت مدل‌سازی فرآیند انفجار، شکستگی و خردشدگی در توده‌سنگ و جابه‌جایی نهایی توده خرد شده با همکاری دانشگاه‌های کوئینزلند استرالیا، کمبریج و لیدز انگلستان و گروه ITASCA آغاز شده است. این پروژه با نام "مدل ترکیبی تنش‌های انفجاری (HSBM)" از محاسبات

در راندمان عملیات بارگیری دارند را تعیین کرد.

## ۲- مدلسازی عددی

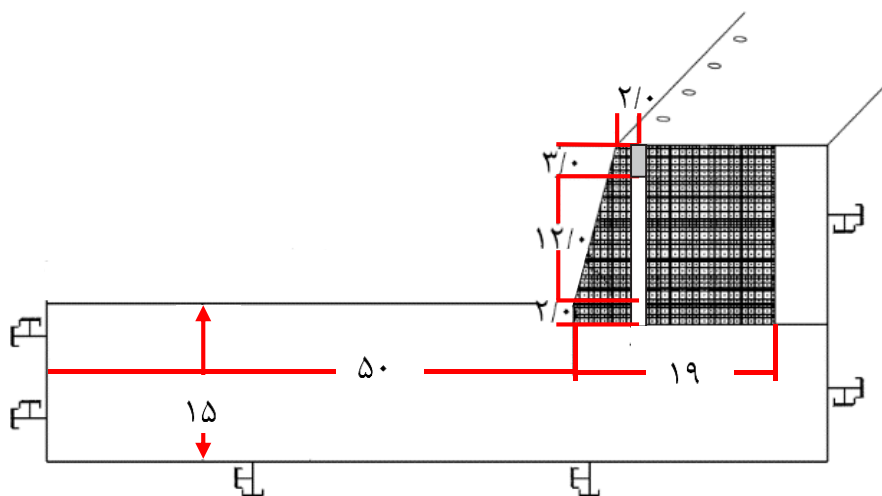
نظر به کاربرد گسترده مدلسازی‌های عددی، در این بخش نحوه حرکت توده خرد شده پس از انفجار با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC مدلسازی شده است. در این راستا مفروضات و ساده‌سازی‌هایی لازم است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۱- هندسه و ابعاد مدل و شرایط مرزی

برای مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده ناشی از انفجار، در محیط نرم‌افزار المان مجزای UDEC یک شیروانی سنگی فرضی به ارتفاع ۱۵m، عرض ۱۹m با شیب ۷۵ درجه مدلسازی شده است. فرض شده که یک ردیف چال انفجاری به عمق ۱۷m (با احتساب ۲m اضافه حفاری)، قطر ۲۵۰m و با طول گل‌گذاری ۳m در آن حفر شده است. برای اجتناب از انعکاس ناخواسته امواج از مرزهای مدل، از شرایط مرزی غیربازتابنده استفاده شده است. در شکل ۱ هندسه، ابعاد مدل و شرایط مرزی بلوک انفجاری و در شکل ۲ توزیع دانه‌بندی مواد خرد شده حاصل از تلاقی دسته‌های ناپیوستگی نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، در این مدل برای کاهش حجم محاسبات از تلاقی دو دسته ناپیوستگی متعامد با زوایای صفر و ۹۰ درجه استفاده شده است.

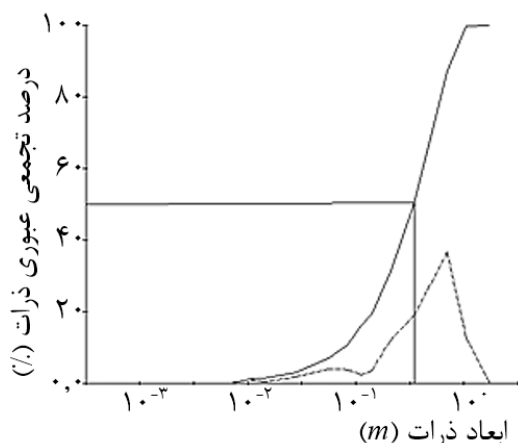
علاوه بر این روش‌های نوینی برای مدلسازی انتشار ترک‌ها مانند روش المان محدود توسعه یافته (XFEM) در حال توسعه‌اند که امکان مدلسازی مسیر انتشار ترک‌های منحصر به فرد را در یک محیط پیوسته فراهم می‌کنند. این روش‌ها از سه جهت نقص دارند. اول آنکه صحت برآوردهای عددی آن‌ها هنوز کاملاً تایید نشده، دوم هنگام نزدیک شدن نوک ترک در حال رشد به گره‌های محیط المان‌بندی شده خطای محاسبات افزایش می‌یابد و سوم زمان اجرای محاسبه با استفاده از این روش برای مدل‌هایی با ابعاد واقعی به طور قابل ملاحظه‌ای زیاد است.

در این مقاله برای بررسی قابلیت مدلسازی عددی توده خرد شده حاصل از انفجار به کمک روش المان مجزا، از نرم‌افزار UDEC استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر است انواع تماس بین بلوک‌های سنگی که به واسطه ناپیوستگی‌ها در کنار هم هستند را به خوبی مدلسازی کرده و تماس‌های آینده بین این بلوک‌ها که پس از اعمال نیرو دچار چرخش یا جابه‌جایی شده و مجدداً بهم نزدیک شده‌اند را در محاسبات منظور کند. علاوه بر این نرم‌افزار المان مجزای UDEC قادر است به خوبی فرآیندهای بارگذاری دینامیکی انفجار را مدلسازی کند، بنابراین با ترکیب این دو خاصیت، می‌توان تحلیل قابل قبولی از نحوه جابه‌جایی توده خرد شده پس از انفجار که ممکن است در اختلاط و ترقیق مواد معدنی (به ویژه در مرز باطله و ماده معدنی) بسیار کمک کننده باشد به دست آورد. همچنین می‌توان شکل نهایی توده خرد شده که نقش قابل ملاحظه‌ای



شکل ۱: هندسه، ابعاد مدل و شرایط مرزی بلوک انفجاری فرضی در مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده (ابعاد به متر)





شکل ۲: خروجی توابع کتابخانه‌ای در برآورد توزیع تجمعی (خط پیوسته) و فراوانی (منحنی خط چین) دانه‌بندی، هم‌ارز با خردشدگی حاصل از تقاطع دسته‌دانه‌های مصنوعی نشان داده شده شکل ۱

شده است. در نهایت این دو دسته اعداد (لگاریتم اعداد محور افقی در مقابل فراوانی آنها در محور قائم) ترسیم شده است. تمامی مراحل محاسبه این نمودار دانه‌بندی با استفاده از توابع کتابخانه‌ای و تابع table در محیط نرم‌افزار UDEC انجام شده است.

### ۲-۳- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مواد

از آنجا که در خردشدگی حاصل از انفجار، انرژی تولیدی ماده منفجره صرف غلبه بر مقاومت‌های ماده‌سنگ می‌شود، برای مدلسازی منطقی، خواص مقاومتی ناپیوستگی‌های مصنوعی برابر با خواص ماده‌سنگ منظور شده و برای اجتناب از میرایی غیرواقعی ناشی از تغییر شکل پلاستیک، از معیار رفتاری الاستیک استفاده شده است. در جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ماده‌سنگ و ناپیوستگی‌ها در مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده ارائه شده است.

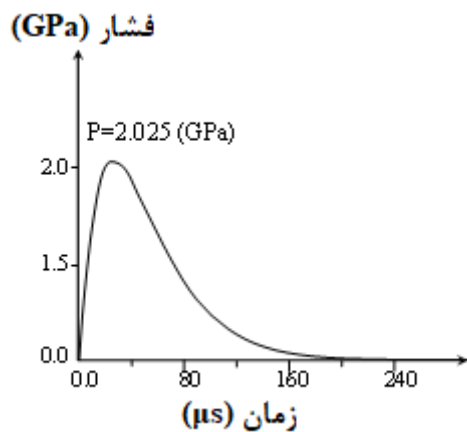
### ۲-۴- مدلسازی عددی بارگذاری انفجار

برای مدلسازی بارگذاری دینامیکی امواج حاصل از انفجار، از یک پالس فشار- زمان استفاده شده است. در هر پالس فشار- زمان باید حداقل سه پارامتر زمان خیز و زمان افت فشار و حداکثر فشار انفجار باید معلوم باشند. بر اساس نظر کوک مقدار فشار انفجار مواد منفجره، برابر حاصلضرب سه کمیت سرعت ذرات در صفحه  $C-J^4$ ، سرعت انفجار و چگالی ماده

### ۲-۲- مدلسازی هندسی خردشدگی حاصل از انفجار

به طور کلی برای مدلسازی ناپیوستگی‌ها در مدلسازی عددی از سه روش عمومی روش‌های پیش‌شکسته<sup>۲</sup>، روش‌های پیوسته<sup>۳</sup> یا روش‌های ترکیبی نوین مانند XFEM استفاده می‌شود. از بین این روش‌ها روش پیش‌شکسته که عمدتاً در منطق المان مجزا استفاده می‌شود، علاوه بر امکان مدلسازی لغزش و تصادم بلوک‌ها، توزیع مناسبی از دانه‌بندی مواد خرد شده دارد. در روش پیوسته تغییر شکل پلاستیک المان‌های مجاور، هم‌ارز با توسعه ناپیوستگی‌ها قلمداد می‌شود. در مدل‌های ترکیبی نوین نقاط وضعی مانند لزوم معلوم بودن نقطه‌ی آغاز توسعه شکستگی، حجم و زمان بالای محاسبات و افزایش خطای مدلسازی هنگام رسیدن موقعیت نوک ترک به گره‌های شبکه موجب عدم کارایی این روش در مدلسازی خردشدگی حاصل از انفجار شده است، بنابراین هنگام استفاده از روش پیش‌شکسته در منطق المان مجزا، با فرض آنکه بلوک‌های خرد شده، توزیع دانه‌بندی مشابهی با مواد خرد شده حاصل از انفجار داشته و پارامترهای مقاومتی اتصال بین آن‌ها، با ویژگی‌های مقاومتی ماده‌سنگ برابر باشد، می‌توان گفت که انرژی صرف شده برای جدا شدن این بلوک‌ها از یکدیگر هم‌ارز با انرژی مصرف شده در عملیات میدانی انفجار برای خردشدگی توده‌سنگ است. به طور کلی مشهورترین الگوریتم‌های هندسی- آماری به کار رفته در مدلسازی عددی خردشدگی حاصل از انفجار شامل الگوریتم‌های اورتوگونال، ورونویی، درزه‌های تصادفی و ابتکاری هستند [۷]. در این بررسی فرض بر آن است که متوسط ابعاد مواد خرد شده ۳۵cm بوده و از توزیع دانه‌بندی مشابه شکل ۲ استفاده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، منحنی نیمه لگاریتمی توزیع تجمعی ذرات با خط پیوسته و فراوانی دانه‌ها با یک منحنی خط چین نشان داده شده است. یکی از قابلیت‌های نرم‌افزار المان مجزای UDEC، ارائه گزارش‌های متنوع از شرایط هندسی مدل است. بر این اساس پس از اتمام مدلسازی هندسی، گزارش مساحت بلوک‌های ایجاد شده در محدوده بلوک انفجاری (در اثر تقاطع درزه‌های مصنوعی) گرفته شده و با استفاده از یک تابع کتابخانه‌ای مساحت‌های به دست آمده در بازه‌های اندازه‌ای مشخص شمرده شده است. در مرحله بعد فراوانی تعداد بلوک‌ها در هر بازه اندازه‌ای در مقابل اندازه ترسیم شده و با استفاده از یک تابع کتابخانه‌ای دیگر اعداد محور افقی (پیش از رسم نمودار) لگاریتم‌گیری

در تابع پیشنهادهای یون و ژئون مقدار زمان افت فشار به صورت خودکار تعیین شده و مقدار آن تقریباً ده برابر زمان خیز منظور می‌شود. در شکل ۳ نمونه‌ای از پالس فشار-زمن به کار رفته در مدلسازی عددی نشان داده شده است. نظر به اهمیت نقطه شروع انفجار در چال، بر نتایج عملیات انفجار در مدلسازی عددی، ارتفاع چال (ستون ماده منفجره) به بخش‌هایی تقسیم شده است تا تاثیر جهت بارگذاری در ستون ماده منفجره در مدلسازی عددی دیده شود [۲۵]. برای این منظور با فرض سرعت انفجار  $4500 \text{ m/s}$  و ارتفاع ستون خرج‌گذاری  $14 \text{ m}$ ، کل فرآیند انفجار چال باید در  $312 \text{ ms}$  اتفاق بیفتد. از طرفی ارتفاع استوانه‌های کوچک تقسیم شده از چال انفجار باید به نحوی در نظر گرفته شود که مجموع بارگذاری این بخش‌ها، از زمان  $312 \text{ ms}$  تجاوز نکند، بنابراین همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده، با فرض آنکه در یک مقطع دایره‌ای از ماده منفجره، انفجار از مرکز دایره آغاز شده و به سمت حاشیه توزیع یابد، مدت زمان خیز بارگذاری فشار



شکل ۳: منحنی پیشنهادهای یون و ژئون، با زمان خیز  $28 \mu\text{s}$  حداکثر فشار  $21025 \text{ GPa}$  [۲۴]

منفجره است. کوک با استفاده از عکسبرداری اشعه ایکس نشان داده است که سرعت ذرات در صفحه C-J یک‌چهارم سرعت انفجار ماده منفجره است [۲۳]، بنابراین فشار انفجار ماده منفجره از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$P_d = \frac{\rho_e \times VOD^2}{4} \quad (1)$$

که در آن:

$P_d$ : فشار انفجار (Pa)

$\rho_e$ : چگالی ماده منفجره ( $\text{gr/cm}^3$ )

VOD: سرعت انفجار ( $\text{m/s}$ ) است.

این در حالی است که بر اساس نظر هاسترولید، مقدار فشار اعمال شده به دیواره چال انفجار نصف فشار انفجار است [۲]، بنابراین فشار چال از رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$P_h = \frac{P_d}{2} = \frac{\rho_e \times VOD^2}{8} \quad (2)$$

بر این اساس مقدار فشار انفجار تئوری و فشار انفجار روی دیواره چال انفجار آنفو (با چگالی  $800 \text{ kg/m}^3$  و سرعت انفجار  $4500 \text{ m/s}$ ) به ترتیب برابر  $4105 \text{ GPa}$  و  $21025 \text{ GPa}$  برآورد می‌شود. همچنین برای بارگذاری دینامیکی فشار-زمن از منحنی پیشنهادهای یون و ژئون استفاده شده که فرم عمومی آن به شکل رابطه ۳ است [۲۴]:

$$P(t) = P_h \frac{e^{-t/t_r}}{t_r} \quad (3)$$

که در آن:

$P_h$ : فشار انفجار اعمال شده به دیواره چال انفجار

$t_r$ : زمان خیز بارگذاری است.

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ و ناپیوستگی‌ها در مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده [۲۶]

ردیف	ویژگی‌های ماده سنگ				ویژگی‌های ناپیوستگی			
	کمیت	نماد	واحد	مقدار	کمیت	نماد	واحد	مقدار
۱	چگالی	$\rho_r$	$\text{kg/m}^3$	۲۷۰۰	سختی قائم	$K_n$	GPa/m	۱۰۰۰
۳	مدول حجمی	K	GPa	۲۲۶۲	سختی برشی	$K_s$	GPa/m	۱۰۰
۴	مدول برشی	G	GPa	۱۱۰۵	مقاومت کششی	$\sigma_t$	MPa	۱۵۸
۵	زاویه اصطکاک	$\phi$	درجه	۴۲	زاویه اصطکاک	$\phi$	درجه	۴۲
۶	مقاومت کششی	$\sigma_t$	MPa	۱۵۸	چسبندگی	$C_0$	MPa	۶۷۲
۷	چسبندگی	$C_0$	MPa	۶۷۲				

استفاده کرد، اما میرایی خودکار و میرایی رایلی غالباً و به ترتیب در تحلیل مسایل استاتیکی و دینامیکی کاربرد دارند. در توده‌سنگ و خاک طبیعی عملکرد میرایی شدید است و عموماً برای میرا ساختن نوسانات طبیعی سیستم از معادلات میراکننده رایلی استفاده می‌شود. معادله میرایی رایلی به صورت یک ماتریس است و در آن ماتریس جذب  $C$  از ترکیب دو مولفه ماتریسی  $M$  (مولفه جرمی) و  $K$  (مولفه سختی) تشکیل شده است [۲۶].

$$C = \alpha M + \beta K \quad (۴)$$

که در آن:

$\alpha$ : متناسب با جرم میراکننده

$\beta$ : متناسب با سختی میراکننده است.

مولفه جرمی میرایی در بسامدهای زاویه‌ای کم و مولفه سختی میرایی در بسامدهای زاویه‌ای زیاد، سهم بیشتری در میرایی کل دارند.

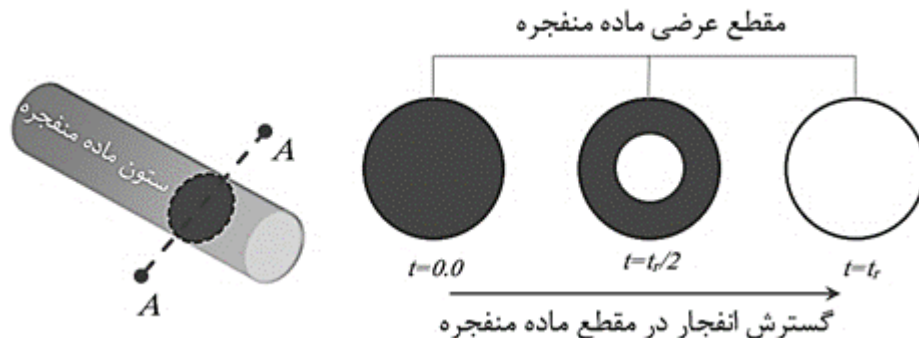
بخش عمده انرژی لازم برای جابه‌جایی توده خرد شده، به وسیله کار انبساطی محصولات گازی انفجار تامین می‌شود. از طرفی با توجه به عدم توانایی نرم‌افزار المان مجزای UDEC در مدلسازی این فرآیند، می‌توان ضرایب میرایی را به گونه‌ای تعیین کرد که انرژی امواج ضربه‌ای حاصل از بارگذاری دینامیکی، توده خرد شده را جابه‌جا کند. نظر به تلاقی متعدد ناپیوستگی‌ها و تعداد بسیار زیاد بلوک‌های موجود در مدل (۱۲۰۰ بلوک)، از میرایی رایلی در مدلسازی عددی استفاده شده است. از آنجا که میرایی رایلی اساساً وابسته به فرکانس بوده و تلفیق مولفه‌های سختی و جرمی در آن، شدت جذب انرژی را برای فرکانس بخصوصی (فرکانس غالب) در مدل بیشینه می‌کند، استفاده از مقادیر ثابت ضریب میرایی برای

انفجار و به دنبال آن کاهش فشار (که با توجه به ماهیت رابطه فشار-زمان یون و ژئون تعیین می‌شود) به ترتیب برابر  $28\mu s$  و  $222\mu s$  تعیین می‌شود. از طرفی فاصله قائمی که انفجار در مدت زمان  $222\mu s$  در ستون ماده منفجره طی می‌کند حدوداً برابر یک متر است، بنابراین ارتفاع ۱۴ متری چال انفجار با تابع فشار-زمان نشان داده شده در شکل ۳ در چهارده گام ۱ متری در چال مدلسازی شده است. این ۱۴ گام یک متری جمعاً در  $10^{-6} \times 222 \times 14$  برابر با  $3.1ms$  منفجر شده است که با شرط اولیه تطابق دارد.

## ۲-۵- تعیین ضرایب میرایی مناسب در مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده

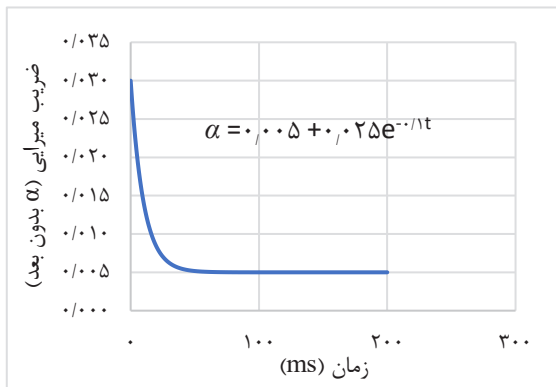
در هر سیستم طبیعی بخشی از انرژی امواج لرزشی انتشار یافته، میرا می‌شود. این پدیده برای یک سیستم با نوسانات نامحدود (درجات آزادی نامحدود) هنگامی که تحت یک نیروی محرک (مانند انفجار) قرار گیرد، به خوبی قابل درک است. عموماً میرایی به علت افت انرژی در عکس‌العمل داخلی مواد و لغزش‌های درونی در طول سطوح مشترک ناپیوستگی‌های ساختاری پدیدار می‌شود. یکی از پارامترهایی که اساساً تعیین مقدار دقیق آن مشکل بوده و در منطق المان مجزا در دسترس است، ضریب میرایی است. به طور کلی در نرم‌افزار المان مجزای UDEC نیروهای نامتعادل کننده<sup>۵</sup> که موجب واگرایی مساله و ناپایداری عددی می‌شوند را از سه روش میرایی خودکار<sup>۶</sup> (میرایی بسیار شدید)، میرایی محلی<sup>۷</sup> و میرایی رایلی<sup>۸</sup> مستهلک می‌سازند.

برخلاف دو نوع دیگر، میرایی محلی را می‌توان در مسایل استاتیکی و تحلیل‌های دینامیکی ساده که تاثیر فرکانس غالب<sup>۹</sup> امواج منتشر شده در محیط قابل صرف‌نظر کردن است

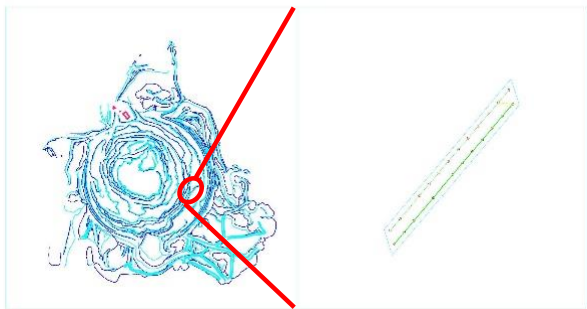


شکل ۴: تصویر شماتیک برآورد زمان خیز انفجار برای پالس فشار- زمان

بوده است. لازم به ذکر است که این اندازه‌گیری‌ها با استفاده از دوربین نقشه‌برداری انجام گرفته است.



شکل ۵: استفاده از تابع نمایی منفی برای تغییر ضریب میرایی با زمان در مدلسازی عددی حرکت توده خرد شده



شکل ۶: موقعیت بلوک انفجاری انتخاب شده در آزمایش میدانی انفجار



شکل ۷: موقعیت بلوک انتخابی پیش از آغاز عملیات انفجار

مدلسازی عددی جابجایی توده خرد شده مناسب نیست. بر اساس نتایج مدلسازی‌های انجام شده، استفاده از مقادیر ثابت ضریب میرایی، موجب می‌شود تا انرژی حاصل بارگذاری دینامیکی در پالس فشار- زمان پس از اندکی جابه‌جایی در توده، به شدت افت کرده و فرآیند جابه‌جایی به صورت واقعی مدلسازی نشود. بر این اساس، با توجه به فرض الاستیک بودن رفتار بلوک‌ها، باید ضریب میرایی به گونه‌ای تعریف شود که علاوه بر نشان دادن کاهش انرژی امواج انفجار در اثر تغییر شکل‌های پلاستیک، در یک محدوده زمانی به بلوک‌های خرد شده آزادی عمل لازم برای جابه‌جایی و استقرار در موقعیت نهایی را بدهد. این توضیح رفتار منحنی‌های نمایی منفی را در ذهن متبادر می‌سازد. همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در یک منحنی نمایی منفی با گذشت زمان از مقدار آن کاسته شده ولی از یک مقدار کمینه کمتر نمی‌شود (این مقدار کمینه در مدلسازی نیروهای پسا و وزن بلوک‌ها مفید است). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود برای استفاده از این تابع، باید سه کمیت مقدار اولیه، حد آستانه و توان (که در این شکل به ترتیب برابر ۰٫۲۵، ۰٫۰۵ و ۰٫۱- انتخاب شده) مشخص باشند. این مقادیر به ترتیب تعیین‌کننده بیشینه میرایی عملکردده به مدل در لحظه آغاز انفجار، کمینه میرایی اعمال شده به مدل در زمان جابه‌جایی بلوک‌های خرد شده و دوره زمانی اعمال ضریب میرایی متغیر هستند.

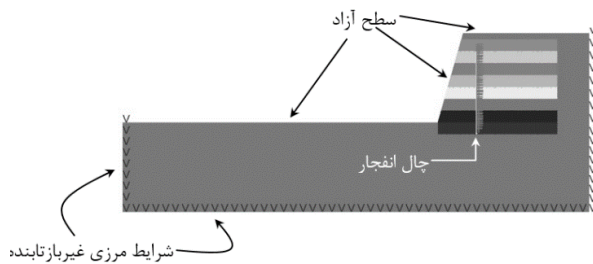
### ۳- کیفیت جابه‌جایی توده خرد شده در آزمایش میدانی انفجار

برای صحت‌سنجی قابلیت مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده، از داده‌های یک آزمایش میدانی عملیات انفجار در معدن مس میدوک استفاده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده، در عملیات میدانی انفجار دو ردیف چال انفجاری با قطر ۱۰ اینچ در آرایش مربعی ۵٫۵×۷ متر با عمق ۱۷ متری و گل‌گذاری ۵ متری در مدار کوردتکس با زمان تاخیر بین ردیفی ۵۰ms و ماده منفجره آنفو به عنوان ماده منفجره اصلی اجرا شده و میزان جابه‌جایی توده خرد شده در آن ثبت شده است. در شکل‌های ۸ و ۹ وضعیت نهایی توده خرد شده پس از انفجار و طرح شماتیک وضعیت قرار نهایی توده خرد شده نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، بیشینه ارتفاع توده و حداکثر جابه‌جایی افقی آن به طور متوسط به ترتیب ۱۲ و ۵۲ متر

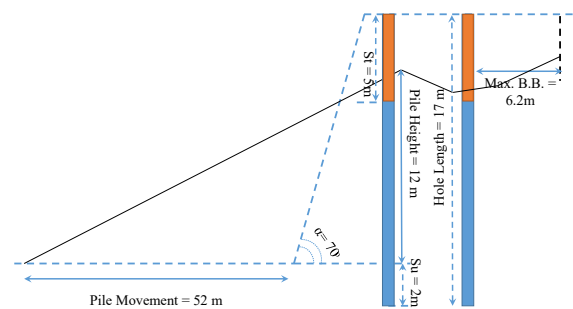
۴۰۰ ms از آغاز حرکت توده خرد شده رخ داده و حرکت بلوک سنگی با وجود خطای همپوشانی تا پایان مدلسازی حرکت توده خرد شده ادامه پیدا کرده است. منشا اصلی این گونه خطاها در نرم‌افزار UDEC، نحوه تماس بلوک‌های مجاور است<sup>۱۰</sup>. برای جلوگیری از بروز این خطا بر اساس راهنمای



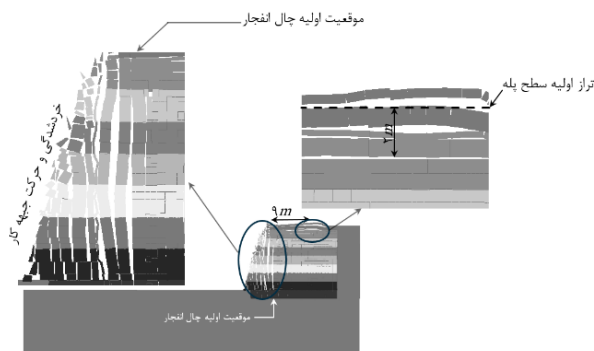
شکل ۸: موقعیت نهایی توده خرد شده پس از انفجار



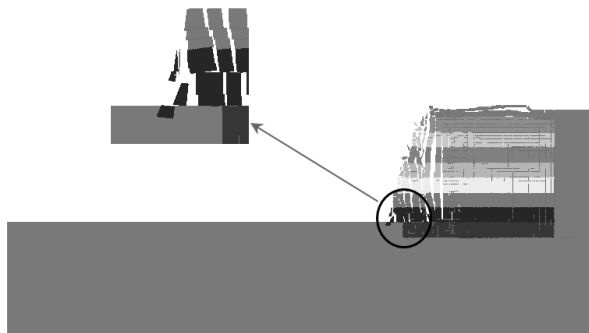
شکل ۱۰: هندسه مدل، موقعیت چال انفجار و شرایط مرزی در مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده



شکل ۹: طرح شماتیکی متوسط هندسه نهایی توده خرد شده پس از عملیات انفجار



شکل ۱۱: آغاز حرکت توده خرد شده در زمان ۲۵۰ms پس از تکمیل فرآیند بارگذاری دینامیکی انفجار



شکل ۱۲: خطای همپوشانی بلوک‌ها در مدلسازی عددی جابه‌جایی توده خرد شده با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC در زمان ۴۰۰ms از تکمیل فرآیند بارگذاری دینامیکی انفجار

#### ۴- تحلیل نتایج

برای بررسی نحوه حرکت توده خرد شده پس از انفجار، مدل عددی نشان داده شده در شکل ۱ در محیط نرم‌افزار المان مجزای UDEC اجرا و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل ۱۰ شرایط مرزی، هندسه مدل، موقعیت چال انفجاری و لایه‌بندی افقی که برای تفکیک موقعیت ذرات پس از جابه‌جایی توده، در محیط نرم‌افزار المان مجزای UDEC و قبل از آغاز بارگذاری دینامیکی انفجار مدلسازی شده نشان داده شده است.

در شکل ۱۱ وضعیت حرکت توده خرد شده در زمان ۲۵۰ms پس از تکمیل بارگذاری دینامیکی انفجار، نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در این زمان بلوک‌های سنگی واقع در سینه‌کار و بالای سر پله از موقعیت اولیه خود جابه‌جا شده‌اند. بیشینه عمق آسیب‌های وارد شده در فاصله ۹m از پشت چال (هم‌ارز با عقب‌زدگی) انفجار ۲m بوده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، مدلسازی حرکت توده خرد شده با استفاده از نرم‌افزار المان مجزای UDEC با یک خطا ناشی از همپوشانی و تداخل بلوک‌های خرد شده همراه بوده است. این خطا در زمان



شکل ۱۴: مدل‌سازی عددی حرکت توده خرد شده در اثر انفجار در زمان ۳۵ms پس از تکمیل بارگذاری دینامیکی انفجار با ضریب میرایی کوچکتر

#### ۴-۱- مدل‌سازی عددی حرکت توده خرد شده در اثر انفجار دو ردیف چال انفجاری

برای توسعه معیارهای انتخاب شده برای مدل‌سازی عددی حرکت توده خرد شده، در محیط نرم‌افزار المان مجزای UDEC دو چال پشت سر هم (نماینده دو ردیف چال انفجاری) مدل‌سازی شده و مشخصات هندسی آن تماماً مشابه مدل‌سازی تک چال انتخاب شده است. مقدار بار سنگ بین دو ردیف چال برابر ۵/۵m و زمان تاخیر بین انفجار این دو چال انفجاری ۱۷ms انتخاب شده است. همچنین تابع تغییر ضرایب میرایی پس از آغاز بارگذاری هرچال، مجدداً فراخوانی شده و شدت میرایی انرژی با گذشت زمان کاهش می‌یابد تا قابلیت درست حرکت توده سنگ خرد شده فراهم آید. همان‌طور که در شکل ۱۵ ملاحظه می‌شود، حداکثر جابه‌جایی توده خرد شده از پای پله حدوداً ۳۰ متر برآورد شده که با برداشت‌های عملیاتی تطابق قابل قبولی دارد.

#### ۴-۲- تاثیر انتخاب زمان تاخیر بین ردیفی بر شکل نهایی توده سنگ خرد شده

برای بررسی تاثیر زمین تاخیر بین ردیفی بر نحوه قرارگیری توده سنگ خرد شده حاصل از انفجار، مدل نشان داده شده در شکل ۱۵، با زمان تاخیر بین ردیفی ۵۰ms مدل‌سازی شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، استفاده از زمان‌های تاخیر بزرگتر در بین ردیف‌های انفجار، شکل توده خرد شده و میزان جابه‌جایی آن را به میزان قابل توجهی تحت تاثیر قرار می‌دهد، بنابراین باید با توجه به هندسه ایده‌آل برای افزایش بازدهی ماشین آلات بارگیری (لودر یا شاول) در انتخاب زمان‌های تاخیر بین ردیفی دقت لازم را داشت. این نتایج نشان‌دهنده قابلیت بالای نرم‌افزار المان مجزای UDEC

نرم‌افزار UDEC، باید با استفاده از تابع fraction گام‌های زمانی حل مساله کوتاه‌تر انتخاب شود تا تماس بلوک‌های در حال نزدیک شدن به هم به وسیله نرم‌افزار درک شده و در محاسبات منظور شود. در شکل ۱۳ نحوه حرکت توده خرد شده در زمان‌های ۶۷۳ms تا ۲/۵s و رسیدن به موقعیت نهایی نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بلوک سنگی همراه با پیشرفت حل برنامه به صورت همپوشانی درون مدل حرکت کرده و از محدوده خارج شده است. همچنین بیشینه جابه‌جایی افقی توده خرد شده ۱۳m و بیشترین ارتفاع آن در وضعیت قرار نهایی ۲m بوده است.

این در حالی است که استفاده از حد آستانه‌ای برابر صفر برای منحنی نشان داده شده در شکل ۵ با کاهش استهلاک انرژی حرکتی توده خرد شده موجب جابه‌جایی بزرگ و غیرواقعی بلوک‌های خرد شده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده در اثر انتخاب اعداد حد آستانه‌ای کوچک برای حد آستانه‌ای میرایی، بلوک‌های سنگی خرد شده پس از جدا شدن از سینه‌کار به سرعت به حرکت خود ادامه داده و نتایج غیرواقعی را به دست می‌دهند.



(الف)



(ب)



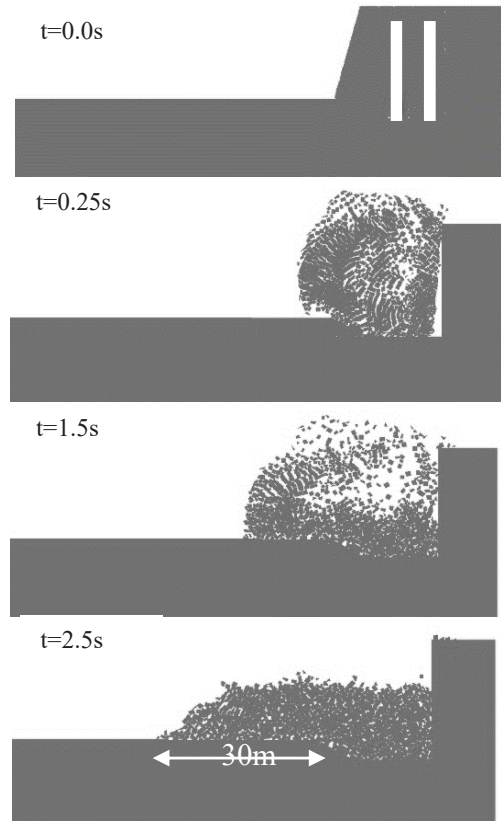
(ج)

شکل ۱۳: مدل‌سازی عددی حرکت توده خرد شده در زمان‌های (الف) ۶۷۳ms، (ب) ۱/۱s و (ج) ۲/۵s از تکمیل فرآیند انفجار

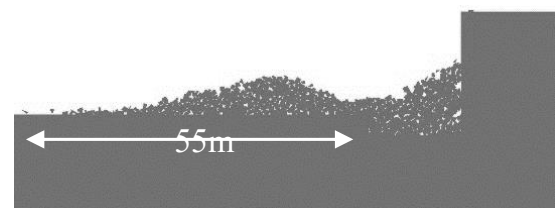
## ۵- نتیجه‌گیری

جابجایی توده خرد شده و برآورد توزیع عیار درون آن اهمیت بالایی در راندمان عملکرد ماشین آلات بارگیری و کاهش اختلاط و ترفیق ماده معدنی می‌شود. به طور کلی روش‌های متنوعی برای پیش‌بینی نتایج انفجار وجود دارد که از بین آن‌ها مدل‌سازی عددی با توجه به صرفه‌جویی در زمان و هزینه و انعطاف‌پذیری بالا، مقبولیت بیشتری در میان محققان یافته است. روش‌های عددی مدل‌سازی انفجار به سه دسته محیط‌های پیوسته، محیط‌های ناپیوسته و روش‌های ترکیبی تقسیم می‌شوند که از بین آن‌ها تنها روش محیط‌های ناپیوسته با تکیه بر ساده‌سازی‌های محدود، قابلیت مدل‌سازی فرآیند جابه‌جایی توده خرد شده را دارند. در این روش‌ها پیش از آغاز بارگذاری دینامیکی، محدوده مساله با استفاده از ناپیوستگی‌های مصنوعی به بلوک‌هایی شکسته شده که قابلیت جابه‌جایی و لغزش بر روی یکدیگر را داشته و می‌توانند به صورت مستقل در محیط حرکت کنند. در این بررسی با استفاده از الگوریتم درزه‌های مصنوعی اورتوگونال محدوده بلوک انفجاری به قطعاتی شکسته شده و توزیع تجمعی دانه‌بندی آن‌ها به وسیله توابع کتابخانه‌ای در محیط نرم‌افزار المان مجزای UDEC محاسبه و ترسیم شده است. از آنجا که این نرم‌افزار قابلیت مدل‌سازی رفتار محصولات گازی انفجار را ندارد، از یک پالس فشار- زمان برای مدل‌سازی بارگذاری دینامیکی امواج ضربه‌ای حاصل از انفجار استفاده شده و سعی شده تا با استفاده از بارگذاری گام‌به‌گام نحوه بارگذاری انفجار مشابه شرایط میدانی باشد. با توجه به محدودیت مدل‌سازی رفتار محصولات گازی انفجار و نقش آن‌ها در جابه‌جایی توده خرد شده، در این بررسی روش ابتکاری جایگزینی برای مدل‌سازی عددی این رفتار ارایه شده که در آن با استفاده از یک تابع کتابخانه‌ای به فرم نمایی منفی برای تعیین مقدار ضریب میرایی (تعیین مقادیر اولیه، حد آستانه و توان) نحوه جابه‌جایی توده خرد شده مدل‌سازی شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با تغییر مقادیر تابع نمایی منفی می‌توان بازه گسترده‌ای از نتایج جابه‌جایی توده خرد شده پس از انفجار را مدل‌سازی کرد. نکته‌ای که هنگام مدل‌سازی عددی با استفاده از منطق المان مجزا به آن توجه شود آن است که، هرچند این شیوه محاسباتی قابلیت تماس جدید بین بلوک‌هایی که بهم نزدیک می‌شوند را دارد، اما اگر سرعت نزدیک شدن این بلوک‌های زیاد باشد، نیاز است که با کاهش طول گام زمانی در

در پیش‌بینی جابه‌جایی توده خرد شده پس از انفجار است و بنابراین محدودیتی در تعداد ردیف‌ها برای مدل‌سازی عددی انفجار وجود نخواهد داشت.



شکل ۱۵: مدل‌سازی عددی حرکت توده خرد شده پس از انفجار دو ردیف چال انفجاری در زمان‌های مختلف پس از آغاز انفجار



شکل ۱۶: جابه‌جایی توده خرد شده در اثر انفجار دو ردیف چال انفجاری با زمان تاخیر بین ردیفی ۵۰ms، پس از گذشت ۳ ثانیه از آغاز بارگذاری انفجار درون چال

همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، نتایج مدل‌سازی‌های عددی توانسته انطباق مناسبی با نتایج آزمایش میدانی عملیات انفجار داشته باشد.

- "ICI's Computer Blasting Model SABREX - Blast Principles and Capabilities". In: Proceedings of the 13th Conference on Explosives and Blasting Technique, Miami, Florida. ISEE - International Society of Explosives Engineers, 1-6.
- [9] Harries, G. (1987). "The calculation of heave and muckpile profile". In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Fragblast, 248-256.
- [10] Yang, R., and Kavetsky, A. (1990). "A three dimensional model of muckpile formation and grade boundary movement in open pit blasting". International Journal of Mining and Geological Engineering, 8(1): 13-34.
- [11] Preece, D. S., and Knudsen, S. D. (1991). "Coupled rock motion and gas flow modeling in blasting". Sandia National Labs., Albuquerque, NM (United States).
- [12] Preece, D., and Chung, S. (1999). "Modeling coal seam damage in cast blasting". In: Proceedings of the Annual Conference on Explosives and Blasting Technique, International Society of Explosives Engineers, 233-240.
- [13] Firth, I., and Taylor, D. (2001). "Bench blast modeling using numerical simulation and mine planning software". In: SME Annual Meeting, Denver, Colorado. Citeseer, 1-4.
- [14] Mortazavi, A., and Katsabanis, P. D. (2001). "Modelling burden size and strata dip effects on the surface blasting process". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38(4): 481-498.
- [15] Zhu, Z., Xie, H., and Mohanty, B. (2008). "Numerical investigation of blasting-induced damage in cylindrical rocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(2): 111-121.
- [16] Ma, G., and An, X. M. (2008). "Numerical simulation of blasting-induced rock fractures". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(6): 966-975.
- [17] Wang, Z., Konietzky, H., and Shen, R. F. (2009). "Coupled finite element and discrete element method for underground blast in faulted rock masses". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 29(6): 939-945.
- [18] Furtney, J., Cundall, P., and Chitombo, G. (2009). "Developments in numerical modeling of blast induced rock fragmentation: Updates from the HSBM project". In: Proceedings of the 9th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 335.
- [19] Ning, Y., Yang, J., Ma, G., and Chen, P. (2011). "Modelling rock blasting considering explosion gas penetration using discontinuous deformation analysis". Rock Mechanics and Rock Engineering, 44(4): 483-490.
- هر سیکل، امکان درک نزدیک شدن بلوک‌ها و منظور کردن تماس جدید آنها در محاسبات فراهم آید. در غیراینصورت احتمال تداخل غیر واقعی بلوک‌هایی که با سرعت زیاد بهم نزدیک می‌شوند زیاد است.
- بر اساس نتایج مدلسازی‌های عددی میزان حداکثر جابه‌جایی افقی توده خرد شده برای دو ردیف چال انفجاری که با زمان‌های تاخیر ۱۷ms و ۵۰ms منفجر می‌شوند، به ترتیب برابر با ۳۰ و ۵۵ متر است. از طرفی در آزمایش میدانی انفجار برای تاخیر بین ردیفی ۵۰ms، مقدار حداکثر جابه‌جایی افقی ۵۲ متر اندازه‌گیری شده است که نشان‌دهنده صحت مدلسازی عددی در برآورد حرکت توده خرد شده است. بر اساس نتایج این بررسی با پذیرفتن برخی ساده‌سازی‌ها و مفروضات، می‌توان نحوه جابه‌جایی توده خرد شده را در محیط نرم‌افزار المان مجزای UDEC مدلسازی کرد. در نهایت نتایج این بررسی نشان‌دهنده قابلیت بالای روش المان مجزا در مدلسازی عددی حرکت توده خرد شده است.
- ۶- مراجع
- [1] Soltani-Mohammadi, S., Bakhshandeh Amnieh, H., and Bahadori, M. (2011). "Predicting ground vibration caused by blasting operations in Sarcheshmeh copper mine considering the charge type by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)". Archives of Mining Sciences, 56(4): 701-710.
- [2] Hustrulid, W. (1999). "Blasting Principles for Open Pit Mining". AA Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- [3] Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., and Carcedo, F. J. A. (1995). "Drilling and Blasting of Rocks". AA Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- [4] Bhandari, S. (1997). "Engineering rock blasting operations". A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 370.
- [5] Wyllie, D. C., and Mah, C. (2004). "Rock slope engineering". CRC Press, pp. 431.
- [6] Konya, C. J., and Walter, E. J. (1990). "Surface blast design". Prentice-Hall, pp. 303.
- [7] Bahadori, M., Bakhshandeh Amnieh, H., and Khajezadeh, A. (2016). "A new geometrical-statistical algorithm for predicting two-dimensional distribution of rock fragments caused by blasting". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 86: 55-64.
- [8] Kirby, I. J., Harries, G. H., and Tidman, J. P. (1987).



- [25] Bakhshandeh Amnieh, H., and Bahadori, M. (2017). "Numerical Analysis of the Primer Location Effect on Ground Vibration Caused by Blasting". International Journal of Mining and Geo-Engineering, 51(1): 53-62.
- [26] Itasca, C. G. (2004). "UDEC". UDEC 4 Manual, Itasca.
- [20] Dare-Bryan, P., Mansfield, S., and Schoeman, J. (2013). "Blast optimisation through computer modelling of fragmentation, heave and damage". In: Rock Fragmentation by Blasting: The 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2012 (Fragblast 10), Taylor & Francis Books Ltd, 95-104.
- [21] Dare-Bryan, P., Pugnale, B., and Brown, R. (2013). "Computer modelling of cast blasting to calculate the variability of swell in a muckpile". In: Rock Fragmentation by Blasting: The 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, 2012 (Fragblast 10), Taylor & Francis Books Ltd, 283-293.
- [22] Sharafisafa, M., Aliabadian, Z., Alizadeh, R., and Mortazavi, A. (2014). "Distinct element modelling of fracture plan control in continuum and jointed rock mass in presplitting method of surface mining". International Journal of Mining Science and Technology, 24(6): 871-881. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.10.022.
- [23] Cook, M. A. (1958). "The science of high explosives". RE Krieger Pub. Co., New York, 139: pp. 440.
- [24] Yoon, J., and Jeon, S. (2010). "Use of a Modified Particle-Based Method in Simulating Blast-Induced Rock Fracture. Rock Fragmentation by Blasting". In: London, Taylor & Francis Group, 371-380

<sup>1</sup> Jones-Wilkins-Lee equation of state for explosives

<sup>2</sup> Pre-fractured methods

<sup>3</sup> Continuous method

<sup>4</sup> Chapman-Jouguet

<sup>5</sup> Unbalanced forces

<sup>6</sup> Damp Auto

<sup>7</sup> Damp Local

<sup>8</sup> Damp Rayleigh

<sup>9</sup> Predominant frequency

<sup>10</sup> به طور کلی سه نوع تماس دامنه با دامنه، دامنه با گوشه و گوشه با گوشه در نرم‌افزار UDEC وجود دارند که در حالت تماس گوشه به گوشه احتمال خطای همپوشانی بیش از حالات دیگر است.