



Imam Khomeini International University  
Vol. 7, No. 2, Summer 2022



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

## Research Paper

# An Investigation of Various Particle Shapes Load Structure in Tumbling Mills by DEM Method

Bibak Z.<sup>1</sup>, Banisi S.<sup>2\*</sup>

1- P.h.D Student, Kashigar Mineral Processing Research Center, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran  
2- Professor, Dept. of Mining Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

Received: 27 Oct. 2020

Accepted: 12 Jun. 2021

**Abstract:** Load movement in tumbling mills involving spherical particles has been extensively studied with the discrete element method (DEM) in the past. This assumption is legitimized by the added complexity of non-spherical shape representation, contact detection and computational cost. Simulation of particles with realistic shape helps to capture the essential aspects of mechanical behavior of the particulate material. In this research, an in-house developed DEM software called  $KMPC_{DEM}^{\circ}$  was used to simulate the charge movement with spherical and non-spherical particles. At the first to calibrate the model parameters, a model tumbling mill (100 cm diameter and 10.8 cm length) with one transparent end was used. The tests were performed with steel balls and wood cubes. After calibration, a number of mill simulations were performed with the different shape of particles (spherical, cubical, and tetrahedron) to study the effect of particle shape. Comparison of the simulation and experimental results showed that the difference between the measured and predicted impact toe, shoulder angle and bulk toe angles were within  $3^{\circ}$ - $5^{\circ}$  of the measured values in the model mill. The amount of in-flight of charge when using spherical and non-spherical particles was significantly different (17%). The marked difference was attributed to higher interlocking of non-spherical particles in comparison to spherical balls. The results showed that the elongation of charge was increased (50) by considering the non-spherical shape of particles. The simulation computation time increased by 35 times when the shape of particles changed from spherical to cubical.

**Keywords:** Discrete element method (DEM), Tumbling mills, Simulation, Particle shape, Non-spherical particles.

### How to cite this article

Bibak, Z., and Banisi, S. (2022). "An investigation of various particle shapes load structure in tumbling mills by DEM method". Journal of Mineral Resources Engineering, 7(2): 139-156.

DOI: [10.30479/JMRE.2021.14442.1461](https://doi.org/10.30479/JMRE.2021.14442.1461)

\*Corresponding Author Email: [banisi@mail.uk.ac.ir](mailto:banisi@mail.uk.ac.ir)

### COPYRIGHTS



©2022 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

Particles could have markedly different mechanical properties on account of a difference in shape. At least 70% of industries consist of granular systems; pharmaceuticals, agriculture, mining, environment, civil engineering, geological engineering and segregation and packing of particles are just a few examples [1,2]. The consideration of particles with realistic shape helps capture the essential aspects of mechanical behavior of the particulate material. For example, the strength of the microstructure principally arises from the geometric interlocking of the particles with non-spherical shape [2]. In order to assess and control the performance of various unit operations, it is necessary to obtain a fundamental understanding of the underlying physics of granular systems. The DEM, first proposed by Cundall and Strack [3], is recognized as an effective tool for modelling the flow of granular materials in a variety of industrial applications.

Govender et al. [4] performed a number of ball mill simulations with four additional polyhedral particle systems to study the effect of particle shape. They found that there exist significant differences in charge profiles and force chain networks between the various particle systems. Cleary and Owen [5] studied the effect of particle shape on the structure of the charge in SAG mills by DEM simulations. They showed that when the particles in a mill are non-spherical, the structure of the charge changes.

The present work was carried out to characterize the effect of particle shape on load movement in mill using DEM modeling. The  $KMPC_{DEM}^{\circ}$  software was coded to handle non-spherical particles to be used to simulate the charge trajectory. The calibration was performed through experiments in a model mill using non-spherical shape particles.

## METHODS

An in-house developed DEM software called  $KMPC_{DEM}^{\circ}$  has been used to simulate the behavior of spherical particles in different processes. To calibrate the model parameters, a model tumbling mill (100 cm diameter and 10.8 cm length) with one transparent end was used which made accurate photography possible (Figure 1). The tests were performed at filling of 20% and mill speed of 85% of critical speed with steel balls and wood cubes. In the simulation, each cube particle was represented with clusters of spheres (with identical size) by particle packing algorithm for contact detection and contact-force calculation. The tests performed in the model mill were simulated by the  $KMPC_{DEM}^{\circ}$  software at the same conditions (size and shape of particles and operating conditions).



**Figure 1.** Model mill with control and data acquisition systems

## FINDINGS AND ARGUMENT

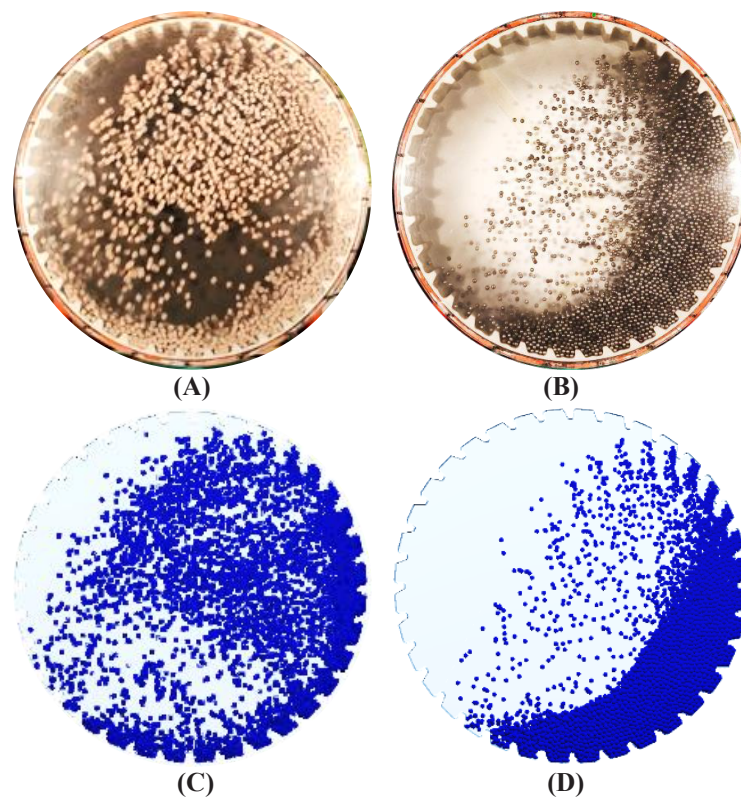
Simulation results of the  $KMPC_{DEM}^{\circ}$  software were compared with physical experiments to accurately calibrate the model parameters in the software used to simulate non-spherical particles behavior. The structure of charge and the amount of in-flight charge were used to perform this task. This was achieved by comparing the shoulder, toe and charge impact toe of the charge which were measured in degrees starting from the horizontal line passing the mill center (i.e., 3 o'clock position) and moving counter clockwise.

The charge trajectories obtained from the tests and simulations at 20% total filling are shown in Figure 2.

The results showed that the difference between the averages of measured and predicted charge impact toe was  $2.8^\circ$ . Given the measurement error of  $1.8^\circ$  obtained from the repeated tests, the difference was not found significant at 95% confidence level. Comparison of the measured and simulated shoulder angles showed that the simulated positions on average were  $3.8^\circ \pm 2.2^\circ$  (95% confidence level) larger than that of the measured shoulder.

Due to the higher lift of the charge in the simulation, the value of simulated bulk toe angle was  $4.7^\circ$  higher than the measured angle, but given the standard deviation of  $3.1^\circ$  it was believed to be insignificant. It could be concluded that there is a good agreement between the simulated and measured positions of shoulder, bulk toe, and impact toe.

The other important feature that must be considered is the amount of in-flight charge. It was found that the amount of in-flight charge in the DEM simulation and model mill for the cubes was significantly different from that of the spheres (Figure 2). The amounts of in-flight charges were 58.6% and 41.5% for the cubical and the spherical shapes, respectively. It can be seen that the cascading region of the charge became more compact for spherical particles. Cubical shape encourages exposure of more particles to the in-flight region due to interlocking of particles which in turn affects the comminution mechanisms (impact and abrasion).



**Figure 2.** Comparison of the simulated and laboratory charge trajectories at 85% of critical speed and 20% filling (A and C: wood cubes, B and D: steel balls)

Non-spherical particles were found to change the charge structure, such as head, shoulder, impact toe, and bulk toe. The head of charge is about  $13^\circ$  higher for the non-spherical particles. Due to bridging between the non-spherical particles, interlocking of particles, the charge was lifted to a higher point by  $16^\circ$ . This is a consequence of the interlocking of cubical particles allowing it to be carried higher in the mill by the mill rotation leading to the higher shoulder position. The higher position of shoulder for the non-spherical particles affects the mill power draw and the contribution of various breakage mechanisms

in comminution [6]. The higher mill power draw for the non-spherical particles was a result of charge elongation where the shoulder position was higher and the bulk toe position shifted to the left compared to that of the spherical particles.

This moved the charge center of mass further from the center of the mill and increased the moment arm resulting in higher power draw [5,7]. The elongated charge of the non-spherical particles was characterized by a higher shoulder position and the impact toe closer to 9 o'clock position (Figure 2). Changing the mill load from spherical balls to cubes at the same operational conditions at 20% filling decreased the charge impact toe by 29° (from 213° to 184°) and the bulk toe by 5°.

It was found that when considering cubical particles, the computation time increased approximately by 35 times compared to that of spherical particles at identical operating conditions. In other words, for a 20 seconds simulation which included 11887 cubical particles, the required computation time was about 3.5 hours in our system (main board: Asus X99 E WS; CPU: Intel Xeon E5 2650 v3; GPU: Nvidia GTX Titan Xp; RAM: 16 GB DDR4 3000 MHz); whereas for spheres (10198 particles) it reduced to less than 6 minutes.

## CONCLUSIONS

- The effect of particles shape on the charge behavior was investigated by using steel balls and wood cubes in a model mill with the diameter of 100 cm.
- The packing density of cubical and spherical particle was found to be 70% and 60%, respectively.
- The KMPC<sub>DEM</sub><sup>®</sup> software was revised by addition of codes to simulate the non-spherical particles flow.
- The effect of particle shape was found to be significant on the load shape. The in-flight charge was found to be 58.6%, and 41.5% (v/v) for cubical and spherical particles, respectively. The non-spherical shape particle essentially exerted an additional force to the layers of charge and increased the amount of particles in free flight zone by 17%.
- The experimental calibration of the simulation results obtained by the KMPC<sub>DEM</sub><sup>®</sup> indicated that the predicted positions of shoulder, bulk toe and impact toe were within 3°-5° of the measured values in the model mill.
- The significant change in the charge movement and structure on account of non-spherical particles was reflected in the amount of in-flight charge (17%), and positions of shoulder (16°), impact toe (29°) and bulk toe (5°). The marked difference was attributed to higher interlocking of non-spherical particles in comparison to spherical balls.
- Investigation of particle shape effects on comminution mechanisms showed the non-spherical particles were mostly located outside of the bulk of the charge (i.e., in the cataracting zone). This indicated that the elongation of charge was increased (5°) by considering the non-spherical shape of particles.
- When the shape of particles was changed from spherical to cubical, it resulted in an increase of the computation time from less than 6 minutes to 3.5 hours for a 20-second simulation. This meant a reduction of 35 times in the computation speed.

## REFERENCES

- [1] Höhner, D., Wirtz, S., Kruggel-Emden, H., and Scherer, V. (2011) "Comparison of the multi-sphere and polyhedral approach to simulate non-spherical particles within the discrete element method: Influence on temporal force evolution for multiple contacts". Powder Technology, 208: 643-656.
- [2] Zhong, W., Yu, A., Liu, X., Tong, Z., and Zhang, H. (2016) "DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications". Powder Technology, 302: 108-152.
- [3] Cundall, P.A., and Strack, O. D. (1979) "A discrete numerical model for granular assemblies". Geotechnique, 29: 47-65.
- [4] Govender, N., Rajamani, R., Wilke, D. N., Wu, Ch. Y., Khinast, J., and Glasser, B. J. (2018) "Effect of Particle Shape in Grinding Mills Using a GPU Based DEM Code". Minerals Engineering, 129: 71-84.

- [5] Cleary, P. W., and Owen, P. (2019) "*Effect of particle shape on structure of the charge and nature of energy utilisation in a SAG mill*". Minerals Engineering, 132: 48-68.
- [6] Shahbazi, B., Jafari, M., Parian, M., Rosenkranz, J., and Chelgani, S. C. (2020) "*Study on the impacts of media shapes on the performance of tumbling mills–A review*". Minerals Engineering, 157: 106490.
- [7] Wang, S., Fan, Y., and Ji, S. (2018) "*Interaction between super-quadric particles and triangular elements and its application to hopper discharge*", Powder Technology, 339: 534-549.



## بررسی ساختار بار درون آسیاهای گردان برای شکل‌های مختلف ذرات با روش اجزای گسسته

زهرا بی‌باک<sup>۱</sup>، صمد بنیسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکترا، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

۲- استاد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۶

### چکیده

روش اجزای گسسته (راگ) با فرض شکل کروی برای ذرات، تاکنون به طور گسترده‌ای برای بررسی حرکت بار در آسیاهای گردان، استفاده شده است. اگرچه فرض کروی به دلیل پیچیدگی ارایه شکل ذرات غیرکروی و تاثیر بارز آن بر سرعت محاسبات و پیچیدگی تشخیص برخورد بین ذرات است، شبیه‌سازی ذرات با شکل واقعی، به در نظر گرفتن رفتار مکانیکی آن‌ها کمک می‌کند. در این تحقیق، از نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circ}$  برای شبیه‌سازی حرکت بار استفاده شد. کالیبراسیون پارامترهای ورودی شبیه‌سازی با استفاده از آسیای آزمایشگاهی (با قطر ۱۰۰ و طول ۱۰/۸ سانتی‌متر) انجام شد. آزمایش‌های کالیبراسیون با گلوله‌های فلزی و مکعب‌های چوبی انجام شدند. پس از کالیبراسیون، شبیه‌سازی‌هایی با شکل‌های مختلف ذرات (کروی، مکعبی و چهاروجهی) برای مطالعه تاثیر شکل ذرات بر ساختار بار انجام شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمایشگاهی نشان داد که تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده برای نقطه برخورد، شانه و پاشنه بار به ترتیب ۳، ۴ و ۵ درجه بود. به دلیل قفل‌شدگی بیشتر ذرات غیرکروی، تفاوت معناداری (۱۷٪) بین میزان بار در پرواز ذرات کروی و غیرکروی وجود داشت. نتایج نشان داد که کشیدگی بار در نظر گرفتن شکل غیرکروی، حدود ۵ درجه بیشتر بود. با تغییر شکل ذرات از کروی به غیرکروی، زمان انجام محاسبات برای ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی، ۳۵ برابر افزایش یافت.

### کلمات کلیدی

روش اجزای گسسته، آسیاهای گردان، شبیه‌سازی، شکل ذرات، ذرات غیرکروی.

### استناد به این مقاله

بی‌باک، ز.، بنیسی، ص.؛ ۱۴۰۱؛ "بررسی ساختار بار درون آسیاهای گردان برای شکل‌های مختلف ذرات با روش اجزای گسسته". نشریه مهندسی منابع معدنی، دوره هفتم، شماره ۲، ص ۱۵۶-۱۳۹.

DOI: 10.30479/JMRE.2021.14442.1461



## ۱- مقدمه

حدود ۷۰ درصد از فرآیندهای صنعتی شامل جریان‌های ذره‌ای‌اند. دامنه مسایل علمی یا مشکلات صنعتی که می‌توانند با شبیه‌سازی ذرات با شکل واقعی بررسی شوند، وسیع است [۱]. بنابراین به دست آوردن یک فهم اساسی از فیزیک جریان‌های ذره‌ای نه تنها اهمیت علمی دارد، بلکه برای کاربردهای صنعتی نیز مهم است.

برای بررسی تاثیر شکل ذرات بر جریان‌های ذره‌ای از دو روش مدل‌سازی فیزیکی (آزمایشگاهی) و شبیه‌سازی ریاضی (نرم‌افزاری) استفاده می‌شود. به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن روش مدل‌سازی فیزیکی، روش نرم‌افزاری اهمیت ویژه‌ای دارد. روش‌های نرم‌افزاری مانند روش اجزای گسسته<sup>۱</sup> (راگ)، اولین بار توسط کاندل<sup>۲</sup> و استراک<sup>۳</sup> در سال ۱۹۷۹ [۲] پیشنهاد شده است که امروزه به عنوان ابزاری برای شبیه‌سازی حرکت ذره استفاده می‌شود [۳، ۴]. در شبیه‌سازی با راگ، با توجه به قوانین فیزیکی و روابط بنیادی، در هر لحظه ویژگی‌های متغیر ذرات شامل شتاب، سرعت و موقعیت محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، اساس شبیه‌سازی حرکت ذرات با راگ بر پایه مدل کردن نیروی متقابل میان ذرات در هر برخورد است که در نهایت موقعیت جدید ذرات در هر لحظه محاسبه می‌شود [۵].

آسیاهای گردان مهم‌ترین تجهیزات خردایش در کارخانه‌های فرآوری موادند که بخش زیادی از انرژی کارخانه را مصرف می‌کنند. به همین دلیل، مطالعه عوامل موثر بر کارایی آن‌ها حایز اهمیت است. از عوامل موثر بر کارایی آسیاها، نحوه حرکت و ساختار بار است. شبیه‌سازی حرکت بار به طوری که بتواند تخمین دقیقی از مسیر حرکت بار را در آسیا به دست دهد، همواره مورد توجه طراحان، سازندگان و کارکنان کارخانه‌ها بوده است تا از نتایج آن برای بررسی فرآیندهای وابسته (ضربه، نیرو و ساییش) استفاده کنند. بررسی ساختار بار در آسیاهای گردان شامل ذرات کروی شکل به طور گسترده با روش اجزای گسسته در گذشته مطالعه شده است [۶، ۷].

دلیل اصلی این مساله در ساده‌سازی شرایط دینامیکی بار داخل آسیا است. مهم‌ترین ویژگی ذرات، شکل آن‌هاست که معمولاً در شبیه‌سازی‌ها کروی فرض می‌شود. این فرض به دلیل سادگی در تشخیص برخورد بین ذرات کروی و توصیف آن‌ها (گره با یک شعاع توصیف می‌شود)، وجود مدل‌های برخورد توسعه‌یافته و مدل کردن برخورد بین ذرات با یک

نقطه (نقطه برخورد)، در نظر گرفته می‌شود [۸]. از طرفی تعداد کمی از محققان به بررسی تاثیر شکل ذرات در زمینه آسیاکنی و خردایش، به دلیل پیچیدگی رفتار جریان‌های ذره‌ای و زمان محاسباتی قابل ملاحظه پرداخته‌اند [۹، ۱۰].

گاوندر<sup>۴</sup> و همکاران تاثیر شکل ذرات (کروی، مکعبی، چهاروجهی، منشور شش‌وجهی و چندضلعی) بر کارایی آسیاکنی با روش اجزای گسسته با استفاده از کارت گرافیک (GPU) را بررسی کردند [۶]. آن‌ها برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، از یک آسیای آزمایشگاهی (با قطر ۰٫۹ متر) استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که تفاوت معناداری در میزان ساییش در آسیای گردان برای شکل‌های مختلف وجود دارد. البته، در این کار تاثیر شکل ذرات در محاسبه تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نشده است. عدم تناسب بین اندازه و تعداد آسترها با ابعاد ذرات از دیگر محدودیت‌ها است که با واقعیت تفاوت دارد و تعمیم دادن نتایج آن به آسیاهای صنعتی بزرگ‌مقیاس را با ابهام زیادی روبه‌رو می‌کند. کلیری<sup>۵</sup> و اوون<sup>۶</sup>، تاثیر شکل ذرات بر ساختار بار و نحوه مصرف انرژی در آسیای نیمه‌خودشکن را بررسی کردند [۹]. در این کار، تاثیر سرعت آسیا، ارتفاع بالابر، پرشدگی و ترکیب بار (نسبت حجمی سنگ به گلوله) بر عملکرد آسیاکنی بررسی شد. آن‌ها نشان دادند که شکل ذرات بر محیط برخورد و توزیع انرژی درون بار تاثیر می‌گذارد، اما میزان انرژی اتلاف شده با تغییر شرایط عملیاتی، تغییر نمی‌کند. همچنین اتلاف انرژی را به دو مولفه نرمال و برشی تقسیم کردند و نشان دادند که وقتی شکل ذرات غیرکروی است، یک کاهش بارز در انرژی اتلاف شده نرمال و در مقابل افزایش در انرژی اتلاف شده برشی وجود دارد. همچنین محیط برخورد زمانی که ذرات غیرکروی‌اند، بیشتر برشی است. مشابه کار قبلی [۶]، تاثیر شکل ذرات در محاسبه تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته نشده است.

مدلسازی دقیق شکل ذرات غیرکروی یکی از چالش‌های مهم شبیه‌سازی با راگ است [۱۴-۱۰]، زیرا روش‌های مختلف مطرح شده در زمینه ارایه شکل ذرات، مساله‌محور است و جامعیت خاصی وجود ندارد. چالش‌ها و پیچیدگی‌های عددی برای در نظر گرفتن شکل واقعی ذرات در شبیه‌سازی با راگ شامل چرخش ذره [۱۳]، ممان اینرسی [۱۱، ۱۴]، ارایه شکل ذره [۱۲] و زمان محاسبات [۱۰، ۱۴] است. علاوه بر این از مساله‌های اصلی برای در نظر گرفتن شکل ذرات با روش‌های

میزان بار در پرواز و ایجاد خودحفاظتی ذرات برای آسترهای آسیا در برابر ضربه، پرداخته شد. در این تحقیق، از نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$  برای شبیه‌سازی حرکت ذرات استفاده شده است. با پیاده‌سازی شکل ذرات و الگوریتم‌های مورد نیاز در نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$ ، حرکت ذرات با شکل غیرکروی در آسیا شبیه‌سازی شد. ضرایب مدل مورد استفاده در راگ بر اساس نتایج حاصل از مدلسازی فیزیکی (آسیای آزمایشگاهی) کالیبره شدند. در مرحله بعد، با استفاده از ضرایب کالیبره شده، شکل‌های مختلفی از ذرات، شبیه‌سازی شد. تفاوت‌های مشاهده شده نشان دادند که یافته‌های حاصل از سیستم ذرات کروی را نمی‌توان به آسانی به سیستم ذرات غیرکروی شکل تعمیم داد.

## ۲- روش انجام تحقیق

### ۲-۱- نرم‌افزار $KMPC_{DEM}^{\circledast}$

توسعه الگوریتم روش اجزای گسسته در نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$  از سال ۱۳۹۲ در مرکز تحقیقات فرآوری مهندس کاشی‌گر در دانشگاه شهید باهنر کرمان- بخش مهندسی معدن، آغاز شده است. روند کلی الگوریتم راگ، یک چرخه شامل تشخیص برخورد، محاسبه نیروی برخورد هر ذره و در نهایت به روزرسانی موقعیت ذرات است. جزئیات روش اجزای گسسته و نحوه پیاده‌سازی کامپیوتری آن، در منابع دیگر [۴،۳] موجود است. بومی بودن این نرم‌افزار و دسترسی کامل به کدهای آن، امکان هرگونه توسعه و استفاده از آن را فراهم کرده است [۳]. تاکنون از نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$  برای شبیه‌سازی تجهیزات مختلف مانند خشک‌کن گردان [۳]، آسیای نیمه‌خودشکن تر [۴]، آسیای گلوله‌ای [۲۱] با در نظر گرفتن شکل کروی برای ذرات، استفاده شده است.

### ۲-۲- پیاده‌سازی شکل ذرات در نرم‌افزار $KMPC_{DEM}^{\circledast}$

برای شبیه‌سازی حرکت بار در آسیا، اجرای دقیق شکل ذرات در محیط نرم‌افزار ضروری است. شکل ذره معمولاً با مثلث (مش) یا گره تقریب زده می‌شود. در این تحقیق، هر ذره با استفاده از اسکنر سه‌بعدی اسکن می‌شود، که خروجی آن یک فایل مثلث‌بندی شده از سطح ذره است که برای نمایش آن در زمان شبیه‌سازی، به عنوان داده ورودی وارد نرم‌افزار می‌شود.

برای تشخیص برخورد و محاسبه نیرو، شکل ذره با چند

مختلف، تشخیص برخورد ذره با ذرات در همسایگی آن، محاسبه همپوشانی و نقطه برخورد است. تاکنون در این حوزه، الگوریتم تشخیص برخورد جامعی برای شکل‌های مختلف ذرات ارائه نشده است و معمولاً الگوریتم‌های موجود، مرتبط با روش ارائه شکل ذرات‌اند.

اساساً دو رویکرد کلی شامل تک ذره و ذرات مرکب برای تقریب شکل ذرات وجود دارد. در رویکرد اول، برای نمایش، از یک ذره با شکل پیچیده مانند بیضوی [۱۴،۱۳،۱۰]، Super-quadric [۱۵،۱۲] و چندوجهی [۱۷،۱۶] استفاده می‌شود. در روش ذرات مرکب، شکل‌های هندسی ساده مانند گره برای تشکیل یک ذره مرکب با شکل نامتقارن، به هم وصل می‌شوند [۱۸]. معیارهای مختلفی برای ارزیابی روش‌های تقریب شکل ذرات مانند صحت، کارایی عددی و میزان پیچیدگی وجود دارد.

یکی دیگر از مشکلات موجود برای شبیه‌سازی شکل واقعی ذرات در جریان‌های ذره‌ای، این است که اگر ذره شکل پیچیده‌ای داشته باشد، برای انجام شبیه‌سازی در یک زمان منطقی و عملی، تعداد بسیار کمی از ذرات را می‌توان در سیستم در نظر گرفت [۱۹]. اگرچه برای شبیه‌سازی با راگ از ذرات غیرکروی هم استفاده می‌شود، اما بیشتر محققان هنوز از ذرات کروی شکل به دلیل نیاز به زمان محاسباتی کمتر استفاده می‌کنند [۲۰،۱۲]. در شبیه‌سازی با راگ، محاسبات مربوط به تشخیص برخورد و محاسبه نیرو، بخش قابل توجهی از زمان محاسبات کل را به خود اختصاص می‌دهد، که این برای ذرات با شکل غیرکروی به دلیل سختی در تشخیص برخورد بین ذرات و دیواره شکل پیچیده، بیشتر می‌شود [۲۰]. به هر حال، بیشتر کارهای انجام شده منحصراً بر ذرات کروی شکل تمرکز کرده‌اند. جای سوال است که آیا می‌توان نتایج به دست آمده از سیستم ذرات کروی را به رفتار جریان ذرات غیرکروی شکل نسبت داد؟

هدف اصلی این تحقیق، بررسی تاثیر شکل ذرات بر مسیر حرکت بار درون آسیا بود. تفاوت این کار با کارهای انجام شده در این زمینه [۹،۶] در نظر گرفتن تاثیر شکل ذرات بر میزان فضای خالی بین آن‌ها و در نتیجه تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی در یک پرشدگی معین و همچنین در نظر گرفتن شرایط واقعی برای انجام شبیه‌سازی‌ها (مانند میزان پرشدگی و تناسب بین ابعاد ذرات و تعداد و اندازه بالابرها) بود. علاوه بر این، در این تحقیق به بررسی تاثیر شکل بر



برای شبیه‌سازی حرکت ذره، باید همه مقادیر پارامترهای فیزیکی ذره مانند سرعت زاویه‌ای و موقعیت آن ذخیره شود. برای محاسبه این مقادیر، باید مقادیر فیزیکی گره‌ها مانند سرعت، موقعیت و فاصله نسبی از مرکز جرم ذره به روزرسانی شود. جزییات روش اجزای گسسته و نحوه محاسبات آن، در منبع دیگر [۴] موجود است. هرگام محاسباتی شامل تشخیص برخورد و محاسبه نیرو، گشتاور و به روزرسانی موقعیت گره‌ها و ذره است.

## ۲-۴- آسیای آزمایشگاهی

چون امکان بررسی مستقیم حرکت بار در آسیاهای صنعتی وجود ندارد، این کار با شبیه‌سازی فیزیکی (آزمایشگاهی) یا ریاضی (نرم‌افزاری) انجام می‌شود. در مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر (KMPC)، برای مدلسازی فیزیکی از آسیای آزمایشگاهی استفاده می‌شود [۵-۳].

در این پژوهش، از آسیای آزمایشگاهی (با قطر ۱۰۰ و طول ۱۰/۸ سانتی‌متر)، برای کالیبراسیون پارامترهای شبیه‌سازی استفاده شد (شکل ۲). دیواره‌ی جلویی آسیای آزمایشگاهی، شفاف است و امکان عکس‌برداری با سرعت بالا و بررسی مسیر حرکت بار در شرایط عملیاتی مختلف وجود دارد.



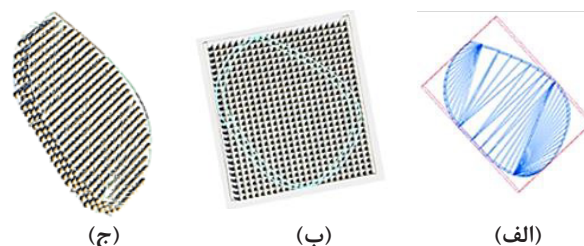
شکل ۲: آسیای آزمایشگاهی با قطر یک متر

## ۲-۵- کالیبراسیون پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی

کالیبراسیون، فرآیند برقراری ارتباط بین ورودی‌های شبیه‌سازی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ذرات برای کسب نتایج نزدیک به واقعیت است. برای کالیبراسیون پارامترهای

گره به هم چسبیده (با اندازه یکسان) با استفاده از الگوریتم چینش ذرات (particle packing algorithm) تقریب زده می‌شود. مزیت تقریب زدن با گره این است که سرعت شبیه‌سازی و دقت نتایج به انتخاب کاربر است. با افزایش تعداد گره‌های سازنده هر ذره، سرعت محاسبات کاهش و دقت نتایج افزایش می‌یابد و بالعکس.

در الگوریتم چینش ذرات، برای پر کردن هر ذره با گره، ابتدا یک مکعب بر ذره محاط می‌شود (شکل ۱-الف)، سپس گره‌ها با اندازه یکسان داخل مکعب چیده شده (شکل ۱-ب) و در نهایت، موقعیت گره‌ها نسبت به محدوده سطح درونی ذره بررسی و گره‌های خارج از محدوده، حذف می‌شوند (شکل ۱-ج).



شکل ۱: مراحل مختلف الگوریتم چینش ذره: الف) تعریف یک مکعب محاط، ب) چینش گره‌های با اندازه یکسان در این مکعب، ج) حذف گره‌های خارج از سطح مثلث‌بندی شده

## ۲-۳- شبیه‌سازی حرکت ذره غیرکروی با راگ

حرکت هر ذره به صورت انتقالی و چرخشی است. حرکت انتقالی، حرکت مرکز جرم ذره را توصیف می‌کند، در حالی که حرکت چرخشی، حرکت ذره را حول مرکز جرمش بیان می‌کند [۲۲]. در حرکت انتقالی، فهم محاسبات حرکت مرکز جرم ذره، ساده است، زیرا مشابه حرکت یک ذره کروی است [۵-۳]. با توجه به اینکه تشخیص برخورد بین ذرات کروی آسان است و از طرفی هر ذره با تعدادی گره پر شده، بنابراین تشخیص برخورد بین ذره‌های غیرکروی نیز می‌تواند به سادگی مشخص شود.

نیروی برخورد بین گره‌ها، با به کارگیری معادلات بنیادی روش راگ محاسبه می‌شود [۳]. در نهایت نیروی وارد به ذره با جمع نیروهایی که به گره‌های داخل ذره وارد شده است، به دست می‌آید. بعد از محاسبه نیروی وارد به ذره، گشتاور و سرعت زاویه‌ای آن به دست می‌آید.

خالی و حجم ذرات) است، محاسبه شد. مجموع فضای خالی و دانسیته چینش برابر با یک است.

هر ذره مکعبی شکل با ۲۷ گره با استفاده از الگوریتم چینش ذره، تقریب زده شد. در شبیه‌سازی، ویژگی‌های ذرات (مدول الاستیسیته، ضریب اصطکاک و نظایر آن) و پارامترهای مدل بر رفتار ذرات و دقت نتایج تاثیر می‌گذارند، که باید کالیبره شوند. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی برای ذرات کرووی و مکعبی، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار اولیه	مقدار کالیبره شده	واحد
مدول الاستیسیته	۱٫۸	مگاپاسکال	
ضریب استرداد	۰٫۳۵	۰٫۷۵	-
نسبت پواسون	۰٫۳۰	۰٫۲۵	-
ضریب اصطکاک	۰٫۷۵	-	-

گام زمانی مورد نیاز با توجه به اندازه ذرات،  $10^{-4} \times 2.6$  ثانیه برای ذرات مکعبی و  $10^{-4} \times 7.7$  ثانیه برای ذرات کرووی محاسبه شد.

با وارد کردن مشخصات آسترها، شکل ذرات، میزان پرشدگی و سرعت آسیا در محیط نرم‌افزار  $^{c}KMPC_{DEM}$ ، شبیه‌سازی‌ها انجام شدند. بعد از رسیدن بار به پایداری، تعداد ۱۰ عکس از مسیر بار شبیه‌سازی شده برای تحلیل مسیر حرکت بار گرفته شد.

برای تحلیل بار، موقعیت‌های مشخصه بار (شانه<sup>۸</sup>، نقطه برخورد<sup>۹</sup> و پاشنه‌ی<sup>۱۰</sup> بار) با استفاده از مقاله دیجیتالی (نرم‌افزار MBRuller V. 5.3) اندازه‌گیری شدند (شکل ۴). در این اندازه‌گیری‌ها راس مقاله منطبق بر مرکز آسیا و مبدا اندازه‌گیری‌ها در راستای ساعت ۳ و جهت مثبت زاویه‌ها در خلاف جهت عقربه‌های ساعت در نظر گرفته شد، سپس میانگین و انحراف معیار این اندازه‌گیری‌ها به دست آمد.

حرکت بار همچنین با استفاده از نرم‌افزار آنالیز تصویر ImageJ تحلیل شد. پس از آنالیز سطح مواد با نرم‌افزار و مشخص کردن موادی که در پروازند، سطح کلی آن‌ها به دست آمد (شکل ۵). با تقسیم مساحت به دست آمده از این مواد

مورد استفاده برای شبیه‌سازی با روش راگ، باید نتایج آن با یک آزمایش فیزیکی مقایسه شود.

همان‌طور که در مطالعات گذشته [۲۳] مشخص شده است، دانسیته ذرات بر حرکت بار تاثیر ندارد و تمرکز این کار بر بررسی تاثیر شکل ذرات است. برای انجام آزمایش‌ها، پرشدگی آسیا برابر ۲۰٪ و سرعت آسیا، ۸۵ درصد سرعت بحرانی در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها با استفاده از سه ردیف آستر با طول ۳۶ سانتی‌متر (مجموع ۱۰٫۸ سانتی‌متر)، ارتفاع بالای ۲٫۲ سانتی‌متر و زاویه‌هایی ۳۰ درجه، انجام شدند. برای بررسی تاثیر شکل ذرات از گلوله‌های فلزی (قطر ۱۲ میلی‌متر) و مکعب‌های چوبی (ابعاد  $12 \times 12 \times 12$  میلی‌متر) استفاده شد (شکل ۳).



(ب)



(الف)

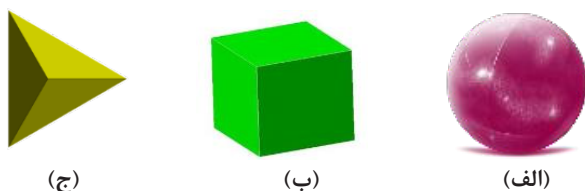
شکل ۳: ذرات مورد استفاده در آزمایش‌ها؛ الف) مکعب‌های چوبی و ب) گلوله‌های فلزی

دلیل انتخاب ذرات مکعبی شکل برای مقایسه، علاوه بر هزینه ساخت کمتر، وجود تفاوت بنیادی این شکل با ذرات کرووی شکل است. دانسیته چینش<sup>۷</sup> برای ذرات مکعبی بیشتر از ذرات کرووی شکل است. همچنین نسبت سطح به حجم ذرات مکعبی شکل ۲۴ درصد بیشتر از ذرات کرووی شکل است [۲۴]. پس از شروع چرخش، به مدت ۲۰ ثانیه به آسیا فرصت داده شد تا به حالت پایدار برسد، سپس تعداد ۱۰ عکس با استفاده از یک دوربین (Canon PowerShot G6) از مسیر حرکت بار گرفته شد.

برای تعیین تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی، ابتدا فضای خالی برای هر شکل باید محاسبه شود. برای تعیین این پارامتر، ابتدا آسیای آزمایشگاهی تا پرشدگی معین (۲۰٪) با ذرات مورد نظر پر شد. در مرحله بعد آسیا تخلیه و تعداد ذرات شمرده شد. باتوجه به تعداد ذرات و حجم هر ذره، دانسیته چینش که برابر با نسبت حجم ذرات به حجم کل (حجم فضای

## ۲-۶- بررسی تاثیر شکل مختلف ذرات بر مسیر حرکت بار

بعد از کالیبراسیون پارامترهای مدل با استفاده از آسیای آزمایشگاهی، ذرات با شکل‌های مختلف شبیه‌سازی شدند. ذرات در نظر گرفته شده که در شکل ۶ نشان داده شده است، حجم برابری دارند و تفاوت آن‌ها تنها شکل ذرات است. ذرات غیرکروی با گره‌های به هم چسبیده برای محاسبات با راگ، مدل شدند.



شکل ۶: شکل ذرات در نظر گرفته شده؛ الف) کروی، ب) مکعبی و ج) چهاروجهی

شاخص‌های عملیاتی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: شاخص‌های عملیاتی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها

مقدار	متغیر
۱۲	اندازه ذرات (قطر معادل، میلی‌متر)
$0.905 \times 10^{-6}$	حجم ذرات (مترمکعب)
۸۵	سرعت چرخش آسیا (% سرعت بحرانی)
۲۵	پرشدهگی (%)

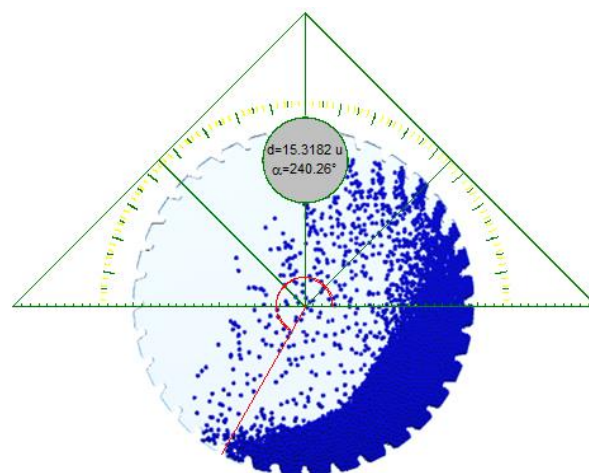
برای مقایسه نتایج شبیه‌سازی با مدلسازی فیزیکی، از هر شبیه‌سازی بعد از رسیدن به زمان پایداری، تعداد ۱۰ عکس گرفته شد، سپس با استفاده از آنالیز تصویر و مقاله دیجیتالی، ساختار بار بررسی و میانگین و انحراف معیار این اندازه‌گیری‌ها تعیین شد.

## ۳- ارزیابی و تحلیل نتایج

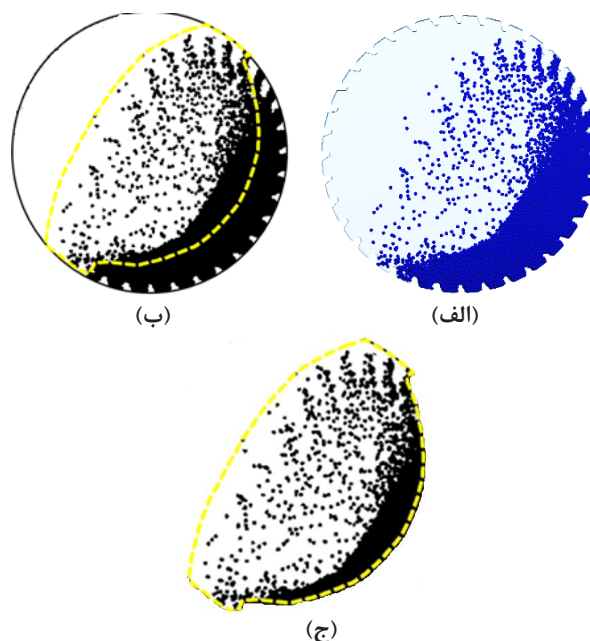
### ۳-۱- تاثیر شکل ذرات بر دانسیته چینش

در شبیه‌سازی باید تعداد ذرات معادل پرشدگی معین برای شکل‌های مختلف مشخص شود. میزان فضای خالی برای ذرات مکعبی و کروی شکل به ترتیب ۳۰٪ و ۴۰٪ محاسبه شد.

بر مساحت کل مواد، درصد مواد در پرواز برای شکل ذرات مختلف، تعیین شد، بنابراین با استفاده از آنالیز تصویر، میزان بار در پرواز برای هر تصویر اندازه‌گیری، سپس میانگین و انحراف معیار این اندازه‌گیری‌ها به دست آمد.



شکل ۴: نحوه اندازه‌گیری موقعیت (زاویه) پاشنه بار با استفاده از نرم‌افزار MBRuler



شکل ۵: نمایی از مسیر حرکت بار شبیه‌سازی شده با ذرات کروی در پرشدگی ۲۰ درصد و سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی؛ الف) نمای معمولی، ب) نمای آنالیز شده به وسیله نرم‌افزار آنالیز تصویر ImageJ و ج) نمایی از سهم بار در پرواز

پارامترهای شبیه‌سازی لازم و ضروری است. در این پژوهش، از آسیای آزمایشگاهی مرکز تحقیقات کاشی‌گر (با قطر یک متر)، برای کالیبراسیون پارامترهای مورد استفاده در نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$  برای شبیه‌سازی شکل ذرات غیرکروی استفاده شد. این مقایسه با بررسی ساختار بار و میزان بار در پرواز انجام شد.

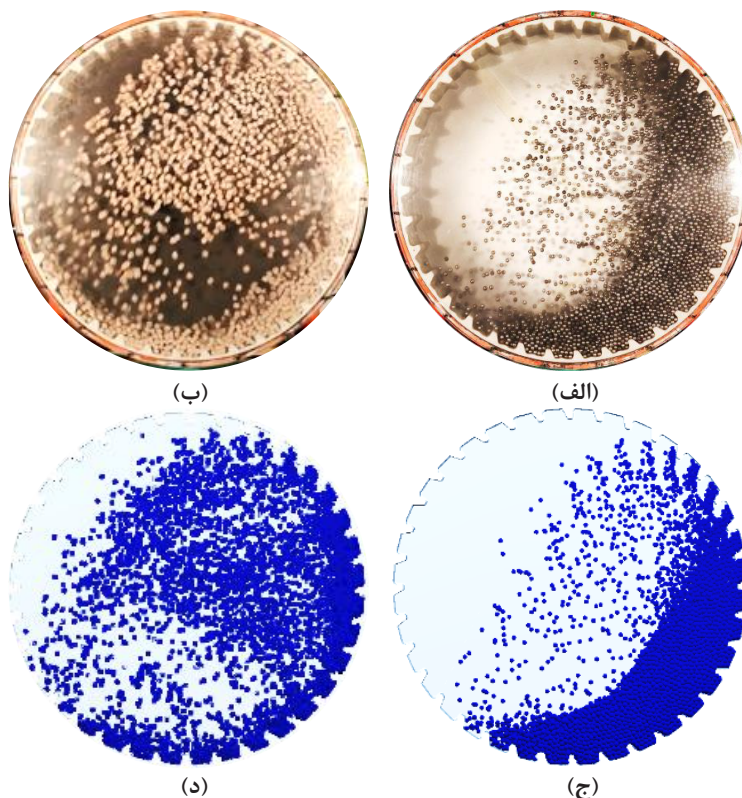
برای بررسی ساختار بار، موقعیت‌های مشخصه بار (شانه، پاشنه و نقطه برخورد) برای دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مقایسه شدند. شکل بار در آسیای آزمایشگاهی و آسیای شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$  برای ذرات مکعبی و کروی در شکل ۷، نشان داده شده است. این نتایج در سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی و پرشدگی ۲۰ درصد به دست آمده‌اند.

مالکی و همکاران [۲۵] بیان کردند شکل بار هلالی<sup>۱۱</sup> است و در نظر گرفتن شکل لوبیایی<sup>۱۲</sup> بار صحیح نیست. در هلال بار، ذرات نزدیک به جداره، با چرخش آسیا به سمت بالا حرکت می‌کنند. ذرات در مکانی که نیروی گرانش بر نیروی گریز از

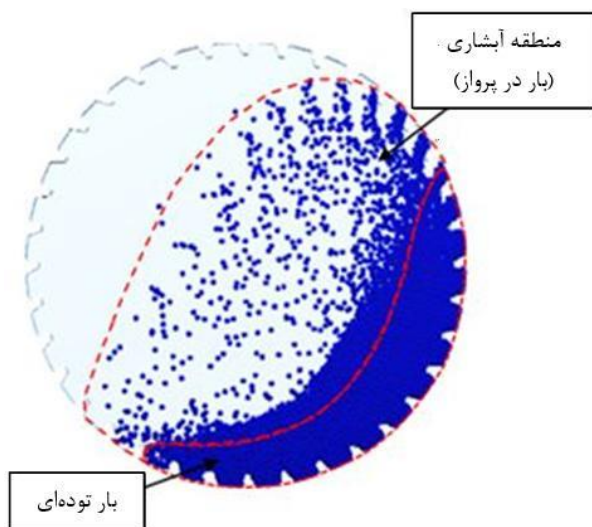
برای ذرات مکعبی شکل در پرشدگی معین، فضای خالی به دلیل قفل‌شدگی بیشتر ذرات کمتر است، بنابراین تعداد ذرات بیشتری برای شبیه‌سازی نیاز است. در این کار اندازه ذرات با یکدیگر برابر است، اما حجم ذرات با یکدیگر مساوی نیست و حجم ذرات مکعبی بیشتر است. به همین دلیل تعداد ذرات مکعبی شکل برای پرشدگی مشخص، کمتر است. به عبارت دیگر اثر تفاوت حجم ذرات نسبت به تفاوت فضای خالی (۱۰٪) بیشتر است که باعث می‌شود تعداد ذرات کروی شکل برای شبیه‌سازی بیشتر شود. تعداد ذرات مکعبی شکل برای پرشدگی ۲۰٪، با توجه به ۴۰٪ فضای خالی، ۴۹۸۴ ذره بود، در حالی که تعداد ذرات برای شکل کروی، ۸۱۵۹ ذره محاسبه شد.

### ۳-۲- کالیبراسیون پارامترهای مدل مورد استفاده در نرم‌افزار $KMPC_{DEM}^{\circledast}$ با نتایج آزمایشگاهی

استفاده از روش راگ بدون کالیبراسیون همواره خطا دارد و باید با مدلسازی فیزیکی مقایسه شود [۳]. به همین دلیل، استفاده از مدل آزمایشگاهی برای کالیبراسیون



شکل ۷: رفتار بار- تصاویر؛ الف و ج) به ترتیب نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ذرات کروی و تصاویر، ب و د) به ترتیب نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی ذرات مکعبی (سرعت آسیا ۸۵ درصد سرعت بحرانی)



شکل ۸: نمایش شماتیک از حرکت بار درون آسیا با ذرات کروی شکل و نواحی مختلف بار

مقدار بار در پرواز برای ذرات کروی و مکعبی به ترتیب ۴۱٫۵ و ۵۶٫۶ درصد است. این تفاوت ۱۷ درصدی میزان بار در پرواز نشان‌دهنده تفاوت ساختاری بین شکل‌های مکعبی و کروی است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص است، برای ذرات کروی، تعداد ذراتی که در پروازند، کمتر است و بیشتر مواد در بخش توده‌ای قرار دارند.

در حالی که ذرات مکعبی شکل به دلیل قفل‌شدگی بین ذرات، بالاروی بیشتری دارند، موقعیت شانه بار بالاتر است، در نتیجه باعث پخش شدن بیشتر ذرات در سطح مقطع آسیا می‌شوند. این افزایش میزان بار در پرواز وقتی شکل ذرات مکعبی است، به معنی افزایش تعداد ضربات در بخش خردایش ضربه‌ای است. نتایج نشان داد که شکل ذرات بر شکل و نحوه حرکت بار تأثیرگذار است و به تبع آن کارایی خردایش در آسیا تحت تأثیر قرار می‌گیرد. نتایج مشابه همچنین توسط کلیری و اوون گزارش شده است [۹]. شهبازی و همکاران گزارش کردند که موقعیت شانه برای ذرات غیرکروی بالاتر است که این بر توان‌کشی و سهم مکانیزم‌های مختلف شکست ذرات تأثیر می‌گذارد [۲۷].

### ۳-۳- بررسی تأثیر شکل بر عمل قفل‌شدگی ذرات

در ذرات کروی، بخش توده‌ای بار، متراکم‌تر است (شکل ۷-الف)، در حالی که برای ذرات مکعبی، هلال بار توده‌ای، کشیده‌تر شده و با چرخش آسیا، مواد بالاتر رفته و به بخش

مرکز غلبه می‌کند (شانه بار)، شروع به سقوط می‌کنند. بررسی زاویه شانه بار نشان داد که مقدار شبیه‌سازی شده این شاخص به طور متوسط حدود ۴ درجه بیش از مقدار اندازه‌گیری شده است.

ذرات در حال حرکت رو به پایین در نقطه برخورد به بدنه آسیا و در محدوده‌ی پایین‌تر به بستر بار برخورد می‌کنند. متوسط نتایج به دست آمده برای نقطه برخورد نشان داد، تفاوت بین نقطه اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده، ۲٫۸ درجه با انحراف معیار ۱٫۸ درجه است که این تفاوت با سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار نیست.

به دلیل بالاروی بیشتر بار در شبیه‌سازی نسبت به آسیای آزمایشگاهی، مقدار زاویه پاشنه بار شبیه‌سازی شده، ۴٫۷ درجه بیش از زاویه اندازه‌گیری شده است و انحراف معیار ۳٫۱ درجه را ایجاد می‌کند. انحراف معیار تعیین موقعیت پاشنه نسبت به محل مشخصه‌های دیگر بالاتر است. دلیل بالا بودن انحراف معیار محل پاشنه، دشواری تشخیص دقیق محل پاشنه نسبت به موقعیت‌های دیگر است. بررسی آماری نشان داد با اطمینان ۹۵٪، مقادیر شبیه‌سازی، مطابق با مقادیر مشاهده شده در آزمایش‌ها بودند.

سطح مقطع بار درون آسیا را می‌توان به دو ناحیه‌ی اصلی بار توده‌ای و بخش آبخاری (بار از هم باز شده در پرواز) تقسیم‌بندی کرد. شکل ۸ نمایشی از حرکت بار درون آسیا برای ذرات با شکل کروی و نواحی مختلف بار است. ذرات با چرخش آسیا به سمت بالا حرکت می‌کنند و زمانی به ناحیه بار در پرواز وارد می‌شوند که نیروی گرانش بر نیروی گریز از مرکز غلبه کند. ذرات بار در پرواز هنگام چرخش آسیا، در حالت حرکت بدون تماس با یکدیگراند و یا اگر با دیگر ذرات تماس دارند، این تماس نه از نوع برخورد بلکه تماس حین همراهی است [۲۶].

برای کالیبره کردن شبیه‌سازی‌ها، مقدار بار در پرواز با استفاده از نرم‌افزار ImageJ اندازه‌گیری شد. متوسط بار در پرواز در نتایج شبیه‌سازی برای ذرات مکعبی شکل ۲٫۷ درصد با انحراف معیار ۲٫۱ درصد بیشتر از نتایج آزمایشگاهی است.

برای ذرات کروی شکل، مقدار شبیه‌سازی شده این شاخص به طور متوسط حدود  $۲٫۷ \pm ۴٫۵$  درصد (با ۹۵ درصد اطمینان) بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده است که نشان از افزایش دقت شبیه‌سازی به دلیل کالیبراسیون پارامترهای راگ مورد استفاده در نرم‌افزار است.

## ۳-۵- تاثیر شکل ذرات بر مسیر حرکت بار

بعد از کالیبراسیون پارامترهای راگ، ذرات با شکل‌های مختلف (کروی، مکعبی و چهاروجهی) با پرشدگی متفاوت نسبت به آزمایش‌های کالیبراسیون شبیه‌سازی شدند. تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی شکل‌های مختلف با توجه به پرشدگی ۲۵ درصد و درصد فضای خالی مربوط به هر شکل، محاسبه و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴: تعداد ذرات مورد نیاز برای شبیه‌سازی شکل‌های مختلف

شکل	فضای خالی (%)	تعداد
کروی	۴۰	۱۰۱۹۸
مکعبی	۳۰	۱۱۸۸۷
چهاروجهی	۶۰	۶۷۹۷

ذرات مکعبی شکل با توجه به اینکه کمترین فضای خالی را (۳۰ درصد) دارند، برای پرشدگی ۲۵ درصد، تعداد ذرات بیشتری را شامل می‌شوند.

شکل ۹ نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی حرکت بار درون آسیا برای شکل‌های مختلف ذرات است. این نتایج در پرشدگی ۲۵ درصد و سرعت ۸۵ درصد سرعت بحرانی به دست آمده است. متوسط و انحراف معیار موقعیت‌های زاویه‌ای مشخصه‌های بار، برای شکل‌های مختلف در جدول ۵ آورده شده است.

بخش بار توده‌ای برای شکل‌های مختلف همچنان هلالی شکل است، اما ضخامت هلال بار برای شکل‌های مختلف، متفاوت است. ذرات کروی به دلیل چرخش آزادانه آن‌ها، بیشترین ضخامت را دارند. کمترین ضخامت هلال بار مربوط به ذرات مکعبی شکل است، این ذرات به دلیل قفل‌شدگی بیشتر بین آن‌ها، بالاروی بیشتری دارند که شانه بار به میزان ۹ درجه نسبت به ذرات کروی، بالاتر است و ذرات بیشتر به بخش بار در پرواز منتقل شده‌اند، که باعث افزایش تعداد ضربات در بخش خردایش ضربه‌ای می‌شود. همچنین برای ذرات چهاروجهی موقعیت شانه بار، حدود ۵ درجه بیشتر از ذرات کروی است، که نشان از تفاوت مکانیزم خردایش برای شکل‌های مختلف ذرات دارد. نتایج مشابه، تاثیرگذاری شکل ذرات بر مکانیزم‌های خردایش توسط گاوندر و همکاران نیز گزارش شده است [۶]. کشیدگی<sup>۱۴</sup> بار (فاصله زاویه‌ای بین شانه و پاشنه بار) با افزایش وجوه شکل ذرات، به میزان ۵ درجه بیشتر شده است و

در پرواز بار وارد می‌شوند. برای ذرات مکعبی، بار کاملاً باز شده است (شکل ۷-ب). به عبارت دیگر، موقعیت پاشنه بالاتر رفته که در مقایسه با ذرات کروی، موقعیت شانه بار برای ذرات مکعبی، ۱۶ درجه بیشتر است. علاوه بر این، موقعیت پاشنه به سمت چپ حرکت کرده و برای ذرات کروی موقعیت پاشنه، ۵ درجه بیشتر است، که باعث بازشدگی بار برای ذرات غیرکروی می‌شود. این بازشدگی بار برای ذرات غیرکروی بر توان‌کشی آسیا به واسطه اینکه مرکز ثقل بار عوض می‌شود (تغییر مرکز ثقل بار موجب تغییر بازو گشتاور و در نتیجه توان‌کشی تغییر می‌کنند)، تاثیر می‌گذارد [۲۸،۹].

بخش دیگر ذرات در حال سقوط، در محدوده‌های بین شانه و نقطه‌ی سر<sup>۱۳</sup> بار در ارتفاع بالاتری به حرکت پرتابی وارد می‌شوند، که این ذرات، بار در پرواز را تشکیل می‌دهند. ذرات مکعبی به دلیل قفل‌شدگی بیشتر بین ذرات، بالاروی بیشتری دارند که به افزایش ۱۳ درجه‌ای موقعیت سر بار نسبت به ذرات کروی منجر می‌شود. همچنین موقعیت نقطه برخورد برای ذرات مکعبی را ۲۹ درجه افزایش می‌دهد.

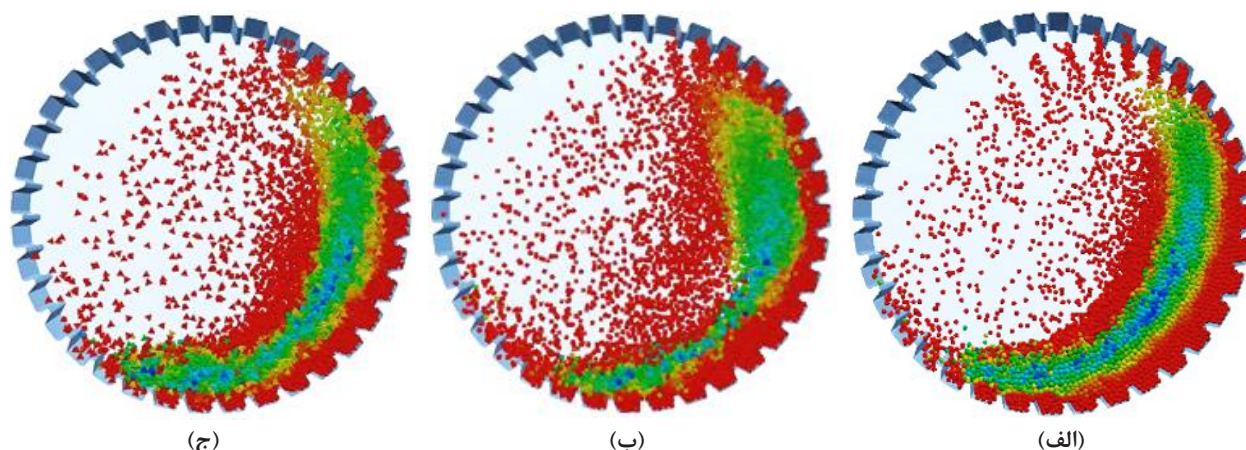
## ۳-۴- مقایسه زمان محاسبات

بر اساس نتایجی که بیان شد تفاوت بارزی بین شکل بار (ساختار بار و قسمت‌های مختلف آن) برای حالت کروی و مکعبی وجود دارد. اما همان‌طور که بیان شد به دلیل افزایش زمان محاسبات، محققان زیادی از شکل کروی در مطالعات با راگ، استفاده می‌کنند [۲۰،۱۹،۱۲]. در نظر گرفتن شکل غیرکروی برای ذرات، حجم محاسباتی بیشتری دارد.

با در نظر گرفتن شکل مکعبی برای ذرات، زمان شبیه‌سازی ۳۵ برابر افزایش یافت. برای شبیه‌سازی ۲۰ ثانیه از حرکت ذرات، مدت زمان محاسبات برای ذرات مکعبی ۳،۵ ساعت بود، ولی برای ذرات کروی، این زمان به کمتر از ۶ دقیقه کاهش یافت. مشخصات سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات سیستم مورد استفاده برای شبیه‌سازی‌ها

نام	مدل
برد اصلی (Main Board)	Asus X99 E WS
پردازنده اصلی (CPU)	Intel Xeon E5 2650 v3
پردازنده گرافیکی (GPU)	Nvidia GTX Titan Xp
حافظه تصادفی (RAM)	32 GB DDR4 3000 MHz



شکل ۹: نتایج شبیه‌سازی حرکت بار درون آسیا برای شکل‌های مختلف: الف) کروی، ب) مکعبی و پ) چهاروجهی برای پرتشدگی ۲۵ درصد (رنگ ذرات نشان‌دهنده سرعت ذرات است، قرمز (بیشترین سرعت) و آبی (کمترین سرعت))

جدول ۵: موقعیت‌های زاویه‌ای مشخصه‌های بار درون آسیای شبیه‌سازی شده برای شکل‌های مختلف

متغیرها شکل	شانه (درجه)	سر بار (درجه)	پاشنه (درجه)	نقطه برخورد (درجه)
کروی	متوسط	۶۳٫۱	۲۳۸٫۴	۱۸۹٫۷
	انحراف معیار	۱٫۹	۲٫۰	۲٫۴
مکعبی	متوسط	۷۵٫۶	۲۲۴٫۲	۱۷۹٫۹
	انحراف معیار	۳٫۴	۴٫۵	۳٫۵
چهاروجهی	متوسط	۶۵٫۳	۲۲۸٫۵	۱۸۶٫۹
	انحراف معیار	۱٫۸	۳٫۳	۳٫۷

با انحراف معیار ۵٫۴ درجه است. بخش عمده‌ای از موادی که در پروازند به پاشنه بار برخورد می‌کنند که در نتیجه، مواد در پرواز که خودشان مستعد خرد شدن‌اند، مواد حاضر در پاشنه بار را نیز خرد کنند. این نکته باید در طراحی آستر بر اساس نتایج شبیه‌سازی با شکل کروی در نظر گرفته شود.

وقتی شکل ذرات همگن باشد (مانند گره)، جهت‌گیری آن‌ها فرقی نمی‌کند. به همین دلیل، انحراف معیار برای اندازه‌گیری‌های مربوط به ذرات کروی کمتر است، اما در شکل‌های کروی، جهت‌گیری (از کدام سطح آن نسبت به ذرات دیگر در تماس باشد) معنا پیدا می‌کند. وقتی شکل ذرات وجوه بیشتری دارند، میزان همگنی بیشتر شده و حرکت ذرات احتمالاتی‌تر خواهد شد [۱۲]، به همین دلیل برای ذرات غیرکروی، انحراف معیار موقعیت‌های مشخصه بار بیشتر است. در عمل، شکل ذرات نه کروی و نه منتظم غیرکروی است و این شکل‌ها در این پژوهش، برای نمایش تفاوت‌ها استفاده

تعداد ذرات در پرواز نیز افزایش یافته است. برای ذرات کروی، بیشتر ذرات روی هم می‌غلطند و سهم مکانیزم سایش بیشتر است. این نکته همچنین توسط گاوندر و همکاران بیان و تاکید شده که باید در هنگام در نظر گرفتن شکل کروی برای ذرات، این نکات را مد نظر قرار داد [۶].

مسیر حرکت ذراتی که بیشترین بالاروی را دارند، بسیار مهم است. با چرخش آسیا بخشی از ذراتی که به وسیله بالابرها بالا رفته‌اند، به آسترهای جداره آسیا برخورد می‌کنند. این امر باعث می‌شود بخشی از انرژی آسیا، به جای وارد شدن به بار در پاشنه، به بدنه آسیا وارد شود که باعث کاهش کارایی خردایش و سایش بیش از حد آسترها می‌شود. بیشترین فاصله بین نقطه برخورد و پاشنه بار، به طور متوسط حدود ۴۹ درجه با انحراف معیار ۱٫۶ درجه، برای ذرات کروی است. برای ذرات غیرکروی، این فاصله کمتر است. این فاصله برای ذرات چهاروجهی ۴۶٫۷ درجه با انحراف معیار ۳٫۶ درجه و ذرات مکعبی ۴۴٫۲ درجه با

## ۵- سپاس‌گزاری

بدین وسیله از کلیه اعضای محترم مرکز تحقیقات فرآوری مواد کاشی‌گر، به ویژه آقای قاسمی، خانم نعمت‌اللهی، آقایان راضی و مرتضوی که ما را در راستای انجام آزمایش‌ها یاری کردند، کمال تقدیر و تشکر به عمل می‌آید.

## ۶- مراجع

- [1] Höhner, D., Wirtz, S., Kruggel-Emden, H., and Scherer, V. (2011). "Comparison of the multi-sphere and polyhedral approach to simulate non-spherical particles within the discrete element method: Influence on temporal force evolution for multiple contacts". *Powder Technology*, 208: 643-656.
- [2] Cundall, P. A., and Strack, O. D. L. (1979). "A discrete numerical model for granular assemblies". *Geotechnique*, 29: 47-65.
- [3] Ghasemi, A., Hasankhoei, A., Parsapour, Gh., Razi, E., and Banisi, S. (2020). "A combined physical and DEM modelling approach to improve performance of rotary dryers by modifying flights design". *Drying Technology*, 1-18.
- [4] Bibak, Z., Rahmani, S., and Banisi, S. (2018). "An investigation of particle shape effects on load movement in tumbling mills by discrete element method (DEM)". XXIX International Mineral Processing Congress (IMPC), Moscow, Russia, pp. 10. DOI: <http://kmpchemmat.ir/pii/243105>.
- [5] Ghasemi, A., Mousavi, O., and Banisi, S. (2014). "Effect of time step on the accuracy of DEM calculation". XXVII International Mineral Processing Congress (IMPC), Chile, <https://www.researchgate.net/publication/339133315>.
- [6] Govender, N., Rajamani, R., Wilke, D. N., Wu, Ch.Y., Khinast, J., and Glasser, B. J. (2018). "Effect of particle shape in grinding mills using a GPU based DEM code". *Minerals Engineering*, 129: 71-84.
- [7] Cleary, P. W. (2009). "Industrial particle flow modelling using discrete element method". *Engineering Computations*, 26(6): 698-743.
- [8] Kodam, M., Bharadwaj, R., Curtis, J., Hancock, B., and Wassgren, C. (2010a). "Cylindrical object contact detection for use in discrete element method simulations. Part I - contact detection algorithms". *Chemical Engineering Science*, 65: 5852-5862.
- [9] Cleary, P. W., and Owen, P. (2019). "Effect of particle shape on structure of the charge and nature of energy utilisation in a SAG mill". *Minerals Engineering*, 132:

شده است. تفاوت بارزی بین ذرات با شکل‌های مختلف در ساختار بار و میزان بار در پرواز وجود دارد که بر مکانیزم‌های خردایش و توان‌کشی تاثیر می‌گذارد. تفاوت‌های مشاهده شده نشان دادند که یافته‌های حاصل از سیستم ذرات کروی را نمی‌توان به آسانی به سیستم ذرات غیرکروی شکل تعمیم داد. به عبارت دیگر، اگر در شبیه‌سازی شکل ذرات، کروی در نظر گرفته شد، باید به این نکات توجه کرد.

## ۴- نتیجه‌گیری

- تاثیر شکل ذرات بر ساختار بار با استفاده شکل‌های مختلف ذرات (کروی، مکعبی و چهاروجهی) بررسی شد.
- شکل ذرات بر دانسیته چینش تاثیر می‌گذارد و میزان فضای خالی برای ذرات کروی (۴۰٪)، مکعبی (۳۰٪) و چهاروجهی (۶۰٪) به دست آمد.
- نرم‌افزار  $KMPC_{DEM}^{\circledast}$  با اضافه کردن الگوریتم‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی رفتار ذرات غیرکروی شکل، توسعه یافت.
- نتایج نشان داد که شکل ذرات بر ساختار بار تاثیرگذار است. میزان بار در پرواز برای ذرات مکعبی و کروی به ترتیب ۵۸٫۶٪ و ۴۱٫۵٪ محاسبه شد.
- مقایسه موقعیت‌های مشخصه بار در شبیه‌سازی‌ها و مدل‌سازی‌ها نشان داد که بیشترین اختلاف بین نتایج روش اجزای گسسته و مدل‌سازی فیزیکی در محل پاشنه بار و کمتر از ۵ درجه است که با توجه به نوسان اندازه‌گیری‌ها این مقدار اختلاف معنادار نبود و نشان از دقت قابل‌قبول نرم‌افزار در پیش‌بینی مسیر حرکت بار داشت.
- در نظر گرفتن شکل مکعبی برای ذرات، باعث تغییرات معنادار در ساختار و حرکت بار مانند میزان بار در پرواز (۱۷٪)، موقعیت شانه (۱۶ درجه)، نقطه برخورد (۲۹ درجه) و پاشنه بار (۵ درجه) شد.
- بررسی تاثیر شکل ذرات بر مکانیزم خردایش نشان داد که ذرات غیرکروی بیشتر خارج از توده بار قرار می‌گیرند (در منطقه آبهاری حضور دارند) که نشان‌دهنده غالب بودن مکانیزم ضربه برای ذرات غیرکروی است.
- وقتی شکل ذرات از کروی به مکعبی تغییر کرد باعث افزایش زمان محاسبات از حدود ۶ دقیقه به ۳٫۵ ساعت برای ۲۰ ثانیه شبیه‌سازی شد. این به معنای کاهش ۳۵ برابر در سرعت محاسبات است.



- [21] Ghasemi, A., Haankhoei, A., Parsapour, Gh., and Bannisi, S. (2016). "Modifying the design of drying chamber flights of the Gol-E-Gohar pelletizing plant ball mill". XXVIII International Mineral Processing Congress (IMPC), Quebec City, Canada, <https://www.researchgate.net/publication/334638246>.
- [22] Baraff, D. (1997). "An introduction to physically based modeling: rigid body simulation 1—unconstrained rigid body dynamics". SIGGRAPH '97 Course Notes, <http://www.cs.cmu.edu/~baraff/pbm/rigid1.pdf>.
- [23] Hasankhoei, A. R., Maleki-Moghaddam, M., Haji-Zadeh, A., Barzgar, M. E., and Banisi, S. (2019). "On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design". Minerals Engineering, 141: 105835.
- [24] Fraige, F.Y., Langston, P. A., and Chen, G. Z. (2008). "Distinct element modelling of cubic particle packing and flow". Powder Technology, 186: 224-240.
- [25] Maleki-Moghaddam, M., Ghasemi, A., Yahyaei, M., and Banisi, S. (2015). "The impact of end-wall effect on the charge trajectory in tumbling model mills". International Journal of Mineral Processing, 144: 75-80.
- [26] Morrison, A., Govender, I., A. Mainza, A., and Parker, D. (2016). "The shape and behaviour of a granular bed in a rotating drum using Eulerian flow fields obtained from PEPT". Chemical Engineering Science, 152: 186-198.
- [27] Shahbazi, B., Jafari, M., Parian, Rosenkranz, J., and Chelgani, S. C. (2020). "Study on the impacts of media shapes on the performance of tumbling mills—A review". Minerals Engineering, 157: 106490.
- [28] Wang, S., Fan, Y., and Ji, S. (2018). "Interaction between super-quadric particles and triangular elements and its application to hopper discharge". Powder Technology, 339: 534-549.
- [10] Cleary, P. W., and Sawley, M. L. (2002). "DEM modeling of industrial granular flows: 3D case studies and the effect of particle shape on hopper discharge". Applied Mathematical Modeling, 26: 89-111.
- [11] Khazeni, A., and Mansourpour, Z. (2018). "Influence of non-spherical shape approximation on DEM simulation accuracy by multi-sphere method". Powder Technology, 332: 265-278.
- [12] Höhner, D., Wirtz, S., and Scherer, V. (2014). "A study on the influence of particle shape and shape approximation on particle mechanics in a rotating drum using the discrete element method". Powder Technology, 253: 256-265.
- [13] Markauskas, D., Kacianauskas, R., Dziugys, A., and Navakas, R. (2010). "Investigations of adequacy of multi-sphere approximation of elliptical particles for DEM simulations". Granular Matter, 12: 107-123.
- [14] Ma, H., and Zhao, Y. (2017). "Modelling of the flow of ellipsoidal particles in a horizontal rotating drum based on DEM simulation". Chemical Engineering Science, 172: 636-651.
- [15] Cleary, P. W., Stokes, N., and Hurley, J. (1997). "Efficient collision detection for three dimensional super ellipsoidal particles". Proceedings of 8th International Computational Techniques and Applications Conference, Adelaide, Australia, 139-144.
- [16] Hosseininia, E. S., and Mirghasemi, A. A. (2006). "Numerical simulation of breakage of two-dimensional polygon-shaped particles using discrete element method". Powder Technology, 166: 100-112.
- [17] Govender, N., Wilke, D. N., Kok, S., and Els, R. (2014). "Development of a convex polyhedral discrete element simulation framework for Nvidia Kepler based GPUs". Journal of Computational and Applied Mathematics, 270: 386-400.
- [18] Parteli, E. J. R. (2013b). "DEM Simulation of particles of complex shapes using the multisphere method: application for additive manufacturing". AIP Conference Proceedings, 1542: 185-188.
- [19] Latham, J. P., Munjiza, A., Xavier Garcia, X., Xiang, J., and Guises, R. (2008). "Three-dimensional particle shape acquisition and use of shape library for DEM and FEM/DEM simulation". Minerals Engineering, 21: 797-805.
- [20] Gan, J. Q., Zhou, Z. Y., and Yu, A. B. (2016). "A GPU-based DEM approach for modelling of particulate systems". Powder Technology, 30: 1172-1182.

<sup>1</sup> The discrete element method (DEM)

<sup>2</sup> Cundall

<sup>3</sup> Strack

<sup>4</sup> Govender

<sup>5</sup> Cleary

<sup>6</sup> Owen

<sup>7</sup> Packing density

<sup>8</sup> Shoulder

- <sup>9</sup> Impact toe
- <sup>10</sup> Bulk toe
- <sup>11</sup> Crescent-like
- <sup>12</sup> Kidney-type
- <sup>13</sup> Head
- <sup>14</sup> Elongation