



Validation of Ansys Fluent and Rocky Software by Investigating the Effect of Rotating Cylindrical Sieve Performance Parameters on Rice Grain Cleanliness

Kamran Safari Hosseinabadi¹ | Mehrnoosh Jafari² | Mahdi Naderinezhad³ |
Yasamin Tavakoli⁴

1. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: k.safari@ag.iut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. E-mail: m.jafari@iut.ac.ir

3. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Razavi Khorasan, Iran. E-mail: mahdi.naderinezhad@mail.um.ac.ir

4. Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran E-mail: tavakoli_yasamin@alumni.iut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Jan. 25, 2025

Revised: May. 16, 2025

Accepted: May. 20, 2025

Published online: Spring 2025

Keywords:

*Computational fluid dynamic,
Cylinder sieve,
Cleaning system,
Discrete element method.*

ABSTRACT

A cylindrical sieve, characterized by its simple structure, lightweight, negligible vibration, and lower energy consumption compared to other separation systems used in combines. This type of screen can serve as an alternative cleaning system for rice-threshed mixture when combined with air flow. This research employed computational fluid dynamics (CFD) and the discrete element method (DEM) to explore and enhance the understanding of the operational parameters influencing the performance of the cleaning sieve. The study examined the impact of air flow velocity and the rotational speed of the sieve on various separation indices, such as the cleanliness ratio, loss ratio, and efficiency. Findings indicated that air flow velocity significantly influences the average axial speed of the mixture components. The rotational speed of the sieve has a significant effect on both the loss ratio and the sieve's efficiency. In this study, Rocky DEM software was utilized as an alternative to EDEM for simulating the discrete flow of granular materials. The results of this study were validated through comparisons with earlier research that utilized EDEM software for simulations. Rocky DEM software developed by the provider of ANSYS Fluent, Rocky DEM enables the simulation of interactions between discrete particles and fluid flow using the coupled CFD-DEM method. Consequently, it serves as a viable replacement for EDEM, which has been extensively applied in agricultural research and engineering.

Cite this article: Safari Hosseinabadi, K., Jafari, M., Naderinezhad, M., Tavakoli, Y., (2025) Validation of Ansys Fluent and Rocky Software by Investigating the Effect of Rotating Cylindrical Sieve Performance Parameters on Rice Grain Cleanliness, *Iranian Journal of Biosystem Engineering*, 56 (1),1-16. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388956.665584>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388956.665584>





EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The rotary cylindrical sieve is distinguished by its simple design, low weight, negligible vibration, user-friendly operation, and higher energy efficiency when compared to other separation systems. When combined with airflow, it functions as a supplementary cleaning method for threshed rice. A limited amount of research has been carried out on particle theory and the factors affecting separation in rotary cylindrical sieves. Previous research has primarily centered on experimental approaches or mathematical models, treating the mass of biological entities as separate entities, with each entity interacting with its surrounding counterparts.

Method

This research utilized a combination of coupled computational fluid dynamics (CFD) and discrete element method (DEM) to gain a deeper understanding of the operational parameters affecting the sieve's capacity to distinguish grains from non-grain materials. The density of air, approximately 1.29 kg/m^3 at standard atmospheric pressure, is notably lower than that of each component in the harvested rice mixture, which spans a range of 300 to 1300 kg/m^3 , thereby requiring the application of one-way CFD-DEM coupling. The material flow was simulated using the Rocky DEM software, known for its sophisticated particle modelling abilities, whereas the airflow was modelled with ANSYS Fluent software, which is valued for its reliable computational fluid dynamics platform. This combined strategy demands additional computational time, yet it offers a detailed representation of interactions between particles, as well as between gas and solid phases, and between solid and gas phases, all of which are crucial for conducting a precise analysis of separation performance.

Results

Given the size of the threshed rice components, the dimensions of the sieve were carefully chosen to optimize separation efficiency: hole diameter of 10 mm , length of 700 mm , and diameter of 300 mm . A 3D model of rice grains and straw was created using Rocky DEM software, incorporating additional parameters recommended by the software to enhance the simulation accuracy. Upon conducting the simulations, it was observed that certain grains move toward the sieve surface, and upon contact, they pass through the holes and existed the sieve. Most of the straw and empty grains were expelled from the end of the sieve because of their low density and the influence of airflow.

The study investigated how the airflow velocity and rotational speed of the sieve affected the movement rules and screening characteristics, such as the cleanliness ratio, loss ratio, and efficiency of the components of the rice-threshed mixture (grains, shriveled grains, and stalks). The results indicate that the airflow velocity significantly influences the average axial speed of the mixture components and consequently affects the cleanliness, loss ratio, and screening efficiency. Conversely, although the rotational speed of the sieve does not affect the cleanliness ratio, it does have a notable impact on both the loss ratio and the sieve efficiency.

Conclusions

The results of this study were validated by comparing them with those of previous studies that used EDEM software for simulations and experimental assessments. The Rocky DEM software is a convenient alternative to EDEM software for simulating discrete material flows because of its compatibility with ANSYS Fluent software during the coupling process.

Author Contributions

Conceptualization, M.J. and M.N.; methodology, K.S.H.; software, K.S.H. and M.N.; validation, K.S.H., M.J. and M.N.; formal analysis, K.S.H., M.J. and M.N.; investigation, M.J.; resources, M.J.; data curation, K.S.H.; writing—original draft preparation, K.S.H., Y.T.; writing—review and editing, K.S.H., M.J. and Y.T.; visualization, K.S.H.; supervision, M.J.; project administration, M.J. and M.N.; funding acquisition, M.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support from IUT (Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran).

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

اعتبارسنجی کوپل نرم افزارهای Ansys Fluent و Rocky با بررسی اثر پارامترهای عملکردی غربال استوانه ای دوار بر تمیزی دانه های برنج

کامران صفری حسین آبادی^۱ | مهرنوش جعفری^۲ | مهدی نادری نژاد^۳ | یاسمین توکلی^۴

۱. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: k.safari@ag.iut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: m.jafari@iut.ac.ir

۳. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی، ایران. رایانامه:

mahdi.naderinezhad@mail.um.ac.ir

۴. گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: tavakoli_yasamin@alumni.iut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	غربال استوانه‌ای دوار در مقایسه با سایر سیستم‌های تمیز کننده استفاده شده در کمباین‌ها، دارای ویژگی‌هایی همچون ساختار ساده‌تر، وزن سبک‌تر، لرزش و مصرف انرژی کمتر است. این نوع غربال همراه با جریان هوا می‌تواند به عنوان سیستم تمیز کننده جایگزین برای مخلوط برنج کوبیده شده، استفاده شود. در این پژوهش، برای تحلیل بهتر پارامترهای کاری غربال استوانه‌ای بر عملکرد جداسازی دانه از کاه، از کوپل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و روش المان گسسته (DEM) استفاده شد. تاثیر سرعت جریان هوا و سرعت دورانی غربال بر شاخص‌های جداسازی شامل نسبت تمیزی، نسبت تلفات و بازده جداسازی بررسی شد. نتایج نشان داد که سرعت جریان هوا تاثیر قابل توجهی بر سرعت متوسط محوری اجزای مخلوط دارد. سرعت چرخش غربال تاثیر معنی‌داری بر نسبت تلفات و بازده جداسازی دارد. در این مطالعه به منظور شبیه سازی جریان گسسته مواد دانه‌ای، از نرم افزار Rocky DEM به عنوان جایگزین نرم افزار EDEM استفاده شد. نتایج پژوهش حاضر به کمک مطالعات گذشته که از نرم افزار EDEM برای شبیه‌سازی بهره برده بودند، صحت‌سنجی و تایید گردید. نرم افزار Rocky DEM توسط شرکت توسعه دهنده ANSYS Fluent ارائه شده، از این رو در شبیه‌سازی تعامل ذرات گسسته و جریان سیال به روش کوپل CFD-DEM می‌تواند جایگزین نرم افزارهایی مانند EDEM که پیش‌تر به طور گسترده در حوزه کشاورزی استفاده شده، گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۵	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۳۰	
تاریخ انتشار: بهار ۱۴۰۴	
واژه‌های کلیدی: دینامیک سیالات محاسباتی، روش المان گسسته، غربال استوانه‌ای، سیستم‌های تمیزکننده.	

استناد: صفری حسین آبادی؛ کامران، جعفری؛ مهرنوش، نادری نژاد؛ مهدی، توکلی؛ یاسمین، (۱۴۰۴) اعتبارسنجی کوپل نرم افزارهای Ansys Fluent و Rocky با بررسی اثر پارامترهای عملکردی غربال استوانه ای دوار بر تمیزی دانه های برنج، مجله مهندسی بیوسیستم ایران/ ایران، ۵۶ (۱)، ۱-۱۶.



<https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388956.665584>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijbse.2025.388956.665584>

مقدمه

محصولات کشاورزی منبع اصلی ذرات زیستی^۱ بوده که ویژگی‌های آن‌ها مانند شکل، اندازه، چگالی و سایر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی متفاوت هستند. ذرات زیستی غالباً به شکل یک توده ناهمگن شامل ناخالصی‌ها و مواد خارجی مانند شن، سنگ، چوب، کاه و بذر علف‌های هرز می‌باشند. ناخالصی‌ها عمدتاً هنگام برداشت و یا پس از برداشت ظاهر می‌شوند (Simonyan & Yiljep, 2008). بنابراین قبل از فرآوری، جداسازی دانه‌ها از ناخالصی‌ها فرآیندی ضروری در فرآوری مواد غذایی و تجارت غلات محسوب می‌شود.

کمباین‌ها مرسوم‌ترین ماشین‌های برداشت محصولات کشاورزی از جمله غلات می‌باشند که لازم است اثر پارامترهای عملکردی مختلف بر سیستم تمیز کننده به کار برده شده در آن‌ها بررسی شود (Emam et al., 2021). کمباین چهار عمل اصلی شامل برش، خرم‌نکوبی، تمیز کردن و جمع‌آوری محصول (دانه) را به صورت همزمان انجام می‌دهد. سیستم تمیز کننده یکی از اصلی‌ترین اجزای تشکیل دهنده کمباین محسوب می‌شود و نحوه عملکرد آن مستقیماً بر روی کیفیت محصول برداشته شده تأثیرگذار است. بازده جداسازی^۲ نسبت تلفات^۳ و نسبت تمیزی^۴ از شاخص‌های مهم ارزیابی عملکرد سامانه‌های جداسازی دانه از مواد غیردانه^۵ (MOG) به شمار می‌روند. در طی سال‌های اخیر همواره بهبود عملکرد و کارایی سیستم تمیز کننده در کمباین‌ها یکی از مهم‌ترین بخش‌های تحقیقاتی بوده است (Yuan et al., 2020b).

از مهم‌ترین عوامل افزایش کارایی قسمت‌های مختلف کمباین مانند برش، کوبش، تمیز کننده و جدا کننده، تنظیمات صحیح این بخش‌ها است. با این حال در فرآیند برداشت، همواره مقداری از محصول روی زمین ریخته و یا محصول برداشت شده از کیفیت قابل قبولی برخوردار نیست (دچار شکستگی، ترک خوردگی و خرد شدگی می‌شود). در شرایط بهینه، افت کمباین بین ۳ تا ۵ درصد است. با تنظیمات جزئی تا حد زیادی می‌توان مقدار محصول برداشته شده از مزرعه را افزایش داد (Yuan et al., 2020a).

پژوهش‌های اندکی از لحاظ تئوری ذرات و همچنین عوامل موثر بر جداسازی مواد در واحدهای تمیز کننده کمباین‌ها از جمله تمیز کننده نوع غربال استوانه‌ای دوار^۶ انجام شده است. اکثر مطالعات انجام شده به روش‌های تجربی یا مدل‌های ریاضی محدود بوده‌اند. حال آنکه همواره مطالعه حرکت ماکروسکوپی مواد با حجم زیاد ضرورت دارد (Yuan et al., 2020a). همچنین با توجه به اینکه تحقیقات اندکی در رابطه با پارامترهای کاری بهینه غربال‌های استوانه‌ای دوار انجام شده و روش‌های تجربی نیز محدود به فصل برداشت و مستلزم صرف هزینه‌های زیاد است، از غربال استوانه‌ای دوار در کمباین‌های غلات به ندرت استفاده شده است. این در حالی است که مطالعات گذشته نشان می‌دهد این سیستم می‌تواند در مزارع کوچک با شرایط کشت پیچیده و مزارع گل‌آلود، عملیات تمیز کردن دانه را بهبود بخشد و در کاهش توان مصرفی نیز موثر باشد.

امروزه بهبود طراحی و عملکرد دستگاه‌های برداشت و پس از برداشت مانند کمباین، خشک‌کن‌ها، جداکننده‌های آئرو دینامیکی و غیره به یک نیاز مبرم در صنعت تبدیل شده است. مطالعات تجربی، مدل‌های ریاضی و روش‌های محاسباتی^۷ از جمله ابزارهای موجود برای حل مسائل حاکم بر دستگاه‌های جداسازی بر پایه جریان سیال می‌باشند (Emam et al., 2021). در مدل سازی ریاضی دستیابی به یک معادله تعمیم یافته کاری پر زحمت بوده و فقط برای حالت‌های نسبتاً ساده کاربرد دارد. روش‌های تجربی هر چند بسیار دقیق هستند اما همان‌طور که اشاره شد محدود و بسیار پرهزینه می‌باشند و به تاسیسات تخصصی با هزینه ساخت و دقت بالا نیاز دارند.

توده ذرات زیستی به عنوان اجزای گسسته در نظر گرفته می‌شوند، که در آن هر ذره یک جزء است، که با اجزاء مجاور خود در تعامل است. روش اجزای گسسته^۸ (DEM) یک تکنیک شبیه‌سازی عددی رایج و قدرتمند برای پیش‌بینی و مدل‌سازی جریان ذرات گسسته بر اساس قوانین حرکت نیوتن است (Horabik & Molenda, 2016).

DEM به کمک کامپیوترهای دارای پردازنده با عملکرد بالا، امکان شبیه‌سازی تعداد زیادی از ذرات را به صورت مستقیم فراهم می‌کند. DEM می‌تواند حرکت ذرات در یک سامانه را به حرکت چرخشی و انتقالی بشکند و با در نظر گرفتن نیروهای تماس و جفت

1 Bio-particles

2 Separation efficiency

3 Loss ratio

4 Clean ratio

5 Material other than grain

6 Rotary sieve cylinder

7 Computational methods

8 Discrete element method

برهمکنش‌های ذره-ذره و ذره-مرز، رفتار ذرات را به صورت دینامیکی شبیه‌سازی کند (Almeida et al., 2016; El-Emam et al., 2019; Fonte et al., 2015).

معادلات روش المان گسسته نسبتاً ساده هستند. روش المان گسسته سه گام اصلی دارد. ابتدا نوع تماس تعیین می‌شود، سپس نیروها و گشتاورهای متقابل ذره-ذره محاسبه می‌گردد و در انتها معادلات حرکت ادغام می‌شوند. تمام نرم‌افزارهای موجود در حوزه DEM از این چارچوب پیروی می‌کنند. با این حال، توسعه و اصلاحات مختلفی به منظور بهبود عملکرد محاسباتی این نرم‌افزارها انجام شده است. در نتیجه تفاوت‌های متعددی بین نرم‌افزارهای مورد استفاده در این حوزه وجود دارند که لازم است مورد بررسی قرار گیرند (Dosta et al., 2024). از نرم‌افزارهای پرکاربرد این حوزه می‌توان به EDEM، Blaze DEM، GranOO، Yade، Rocky DEM و LIGGGHTS اشاره نمود (Dosta et al., 2024).

مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی^۱ (CFD) اساساً برای پیش بینی رفتار آئرویدینامیکی استفاده می‌شوند (Chu et al., 2011). برای جریان‌های ذره-سیال، مدل‌های چند فازی CFD به دلیل وجود محدودیت‌های زیاد برای شبیه‌سازی رفتار ذرات و همچنین عدم توانایی مدل‌سازی ذرات با اشکال هندسی پیچیده کارایی لازم را ندارند. با کوپل کردن CFD-DEM می‌توان از این محدودیت‌ها عبور کرد (Norourzi et al., 2016). اگر چه فرآیند محاسباتی کوپل شده CFD-DEM زمان شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد، اما به خوبی برهمکنش ذره-ذره همراه با فعل و انفعالات مدل‌سازی شده از سیال به جامد و از جامد به سیال را ممکن می‌سازد (Emam et al., 2021).

در فرآیند شبیه‌سازی CFD-DEM، دانه‌های غلات به صورت مواد مجزا با شکل و اندازه نامنظم در نظر گرفته می‌شوند. در حال حاضر روش المان گسسته همراه با دینامیک سیالاتی محاسباتی، به عنوان روشی موثر برای شبیه‌سازی مسیر حرکت هر ذره در جریان سیال ارائه شده است (Emam et al., 2021). روش المان گسسته در سال‌های اخیر به صورت گسترده در زمینه شبیه‌سازی جریان مواد در حوزه‌های مختلف کشاورزی بکار رفته است (Emam et al., 2021).

امروزه ترکیب‌های مختلفی از نرم‌افزارهای تجاری یا منبع باز برای شبیه‌سازی‌های CFD-DEM مانند Rocky DEM که می‌تواند با ANSYS Fluent جفت شود، EDEM که می‌تواند با ANSYS Fluent جفت شود، PFC که دارای اتصال داخلی برای توصیف جریان سیال می‌باشد، CFDEM شامل الگوریتم CFD-DEM در زبان C++، OpenFOAM برای CFD و LIGGGHTS برای DEM و غیره توسعه یافته‌اند (Dosta et al., 2024).

پیشینه پژوهش

پیشینه نظری

DEM یکی از تکنیک‌های مدل‌سازی عددی است که اولین بار توسط کاندل و استرک (۱۹۷۹) منتشر شد (Cundall & Strack, 1979). این روش عمدتاً برای تکمیل روش اجزا محدود^۲ (FEM) و حل مسائل پیچیده مهندسی، همچنین بررسی پدیده‌های حاکم بر حرکت ذرات دانه‌ای با شکل‌های متفاوت توسعه یافته است (Dewicki, 2003). شبیه‌سازی DEM می‌تواند اطلاعات دینامیکی مانند مسیر حرکت ذرات، نیروی‌های گذرا بر روی ذرات و غیره را که بدست آوردن آنها با آزمایش‌های تجربی بسیار دشوار یا غیر ممکن است، ارائه دهد (Boac et al., 2014; Emam et al., 2021). با استفاده از رایانه‌های پیشرفته، نرم افزار قادر است محاسبات را تا میلیون‌ها بار در طول یک ثانیه برای هر ذره از سیستم تکرار کند (Berger et al., 2015).

در اکثر کاربردهای علم مکانیک سیالات برای تحلیل میدان سرعت و جریان سیال از معادلات ناویر-استوکس^۳ استفاده می‌شود. این معادلات اولین بار در سال ۱۸۲۲ توسط ناویر بیان و بعدها توسط استوکس برای حالات خاصی تکمیل شد. معادلات ناویر-استوکس به صورت ریاضی قانون بقای تکانه را بیان می‌کنند و به همراه معادله بقای جرم، مسائل مکانیک سیالات را خوش وضع می‌کنند، یعنی تعداد مجهولات با تعداد معادلات برابر و حل مسئله به صورت عددی امکان‌پذیر می‌شود. با توجه به حضور ترم‌های غیرخطی در این معادلات، این دسته از معادلات به غیر از چند حالت خاص، دارای حل ریاضی دقیق نیستند و برای حل آنها از روش‌های عددی موجود در

1 Computational fluid dynamic

2 Finite element method

3 Navier- Stokes equations

علم دینامیک سیالات محاسباتی مانند روش تفاضل محدود^۱ (FDM) و روش حجم محدود^۲ (FVM) استفاده می‌شود (Emam et al., 2021; Guzman Quinonez, 2024; Korn, 2020). بنابراین مدل‌های دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) اساساً برای شبیه‌سازی ویژگی‌های جریان هوا یا دیگر سیالات مورد استفاده قرار می‌گیرند تا رفتار آئرو دینامیکی را پیش‌بینی کنند (Ullah et al., 2019). شبیه‌سازی CFD باید با شبیه‌سازی DEM ادغام شود تا تأثیر نیروهای آئرو دینامیک که نقشی اساسی در رفتار و حرکت ذرات دارند، در نظر گرفته شوند. هنگامی که یک ذره کروی در هوا حرکت می‌کند، معمولاً با روش پیچیده ماکسی-رایلی^۳ مدل‌سازی می‌شود (Maxey & Riley, 1983). این روش میدان جریان هوا در اطراف ذره و تنش‌های حاصل از این میدان را در نظر می‌گیرد. محققان زیادی مانند (Casas et al., 2017)، (Ren et al., 2012) و (Sturm et al., 2010) این معادلات را با ترکیب برهمکنش نیروهای برخورد ذرات، نیروی پسا، نیروی بالابر مگنوس^۴، نیروی بالابر سافمن^۵ و نیروی جاذبه ساده کرده‌اند.

استفاده از کوپل CFD-DEM در کاربردهای کشاورزی و فرآوری مواد غذایی به طور قابل توجهی در حال توسعه است تا بتوان جریان ذرات در سیستم‌های انتقال آئرو دینامیکی (Sturm et al., 2010; Wee Chuan Lim et al., 2006)، جداسازی دانه و کاه در سیستم تمیزکننده کمباین (Korn, 2020)، بذر کارهای نیوماتیک (Han et al., 2017)، خشک کن‌های غلات و غیره را توصیف کرد.

پیشینه تجربی

اخیراً با پیشرفت و افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها، کوپل CFD-DEM به طور گسترده برای مدل‌سازی، پیش‌بینی رفتار و حل مسائل ذره-سیال استفاده شده است. در ماشین آلات برداشت مدرن مانند کمباین‌ها، جداسازی و تمیز کردن دانه از مواد غیردانه‌ای عمدتاً توسط غربال‌ها و به کمک جریان هوا انجام می‌شود (Badretdinov et al., 2019). شبیه‌سازی عددی چنین سیستم‌هایی در حال توسعه است. به عنوان مثال (Li et al., 2012) از کوپل CFD-DEM برای شبیه‌سازی واحد تمیز کننده ارتعاشی یک کمباین استفاده کردند. هدف تجزیه و تحلیل اثر سرعت جریان هوای ورودی بر نحوه جداسازی دانه برنج و کاه‌های کوتاه از یکدیگر بود. دانه‌های برنج به صورت ذره کروی و کاه‌های کوتاه به شکل استوانه در نرم‌افزار EDEM مدل‌سازی شدند. همچنین برای شبیه‌سازی جریان هوا از نرم‌افزار ANSYS Fluent استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد هر چه سرعت هوا بیشتر باشد جداسازی ذرات بهبود یافته اما تلفات دانه‌ها نیز افزایش می‌یابد. بعدها این مطالعه توسط (Y. Li et al., 2018) به منظور بررسی اثر پارامترهای عملیاتی بر نسبت تمیزی در همان سیستم توسعه داده شد.

همچنین (Yuan et al., 2020b; Yuan et al., 2018) در مطالعاتی از یک غربال استوانه‌ای دوار که دارای جریان هوا در قسمت داخلی بود، به عنوان سیستم تمیز کننده برای مخلوط برنج کوبیده شده استفاده کردند و به بررسی پارامترهای عملیاتی این سیستم تمیز کننده پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی ذرات مخلوط برنج کوبیده شده از نرم‌افزار EDEM و برای شبیه‌سازی جریان هوا از نرم‌افزار ANSYS Fluent بهره بردند و سپس نتایج بدست آمده را با نتایج تجربی مقایسه کردند.

غربال‌های استوانه‌ای دوار در گذشته کاربردهای متعددی داشته است که از بین آن‌ها می‌توان به بهره‌گیری در درجه‌بندی مواد توده‌ای، طبقه‌بندی سنگ، خاک و جداسازی طلا از سنگ معدن اشاره کرد (Rosales, 1896). در پژوهشی از یک غربال استوانه‌ای دوار برای جمع‌آوری زباله‌های جامد شهری شهر شیکاگو، به منظور اصلاح و بهبود ساختار خاک استفاده کردند و توانستند محیطی مناسب برای رشد گیاه فراهم نمایند (Walker et al., 2008). در پژوهش دیگری از یک غربال استوانه‌ای دوار برای جداسازی بلغور گندم براساس اندازه استفاده شد (Bellocq et al., 2017). (X. Li et al., 2018; Wan et al., 2018) به ترتیب از یک نوع غربال استوانه‌ای دوار برای تمیز کردن ارزن و از نوع ارتقا یافته آن در کمباین، به منظور بهبود عملکرد جداسازی دانه از مخلوط کلزا کوبیده شده، استفاده کردند.

چگونگی عملکرد کوپل دینامیک سیالات محاسباتی- روش المان گسسته (CFD-DEM)

کوپل CFD-DEM وابسته به نوع فرآیندی که مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد به دو صورت یک‌طرفه و دوطرفه می‌تواند انجام شود. زمانی که چگالی جریان از چگالی هر یک از ذرات موجود در سیال بسیار کمتر باشد (سیال‌های رقیق)، از کوپل یک‌طرفه استفاده می‌شود. در

1 Finite difference method

2 Finite volume method

3 Maxey- Riley

4 Magnus lift force

5 Saffman lift force

کوپل یک طرفه، میدان سیال بر حرکت ذرات تاثیر می گذارد اما ذرات بر جریان سیال تاثیر نمی گذارند. در شرایطی که چگالی سیال نزدیک به چگالی ذرات و همچنین بارگذاری ذرات در سیستم با نرخ بالا باشد باید از کوپل دوطرفه استفاده کرد، در این حالت میدان سیال بر حرکت ذرات تاثیر می گذارد و حرکت ذرات نیز بر جریان سیال اثرگذار است.

اهداف

با توجه به پژوهش های گذشته، هدف از پژوهش حاضر صحت سنجی نتایج حاصل از کوپل Rocky DEM و ANSYS Fluent در شبیه سازی جریان مخلوط برنج کوبیده شده درون غربال استوانه ای دوار است که پیشتر توسط یوان و همکاران با کوپل نرم افزار EDEM و ANSYS Fluent انجام شده و نتایج حاصل را با نتایج تجربی تایید کرده اند (Yuan et al., 2020b). نرم افزار Rocky DEM توسط شرکت ارائه کننده نرم افزار ANSYS توسعه داده شده و از این رو سازگاری بیشتری با نرم افزار ANSYS Fluent دارد. این نرم افزار همچنین توانایی مدل سازی ذرات بدون مش را دارد. در واقع Rocky DEM به جای استفاده از یک مش ساختار یافته که بر روی ذرات اعمال می شود، قانون دوم نیوتن را برای هر ذره حل می کند. این رویکرد امکان شبیه سازی ذرات با هندسه و تعاملات پیچیده را فراهم می کند. روش بدون مش به طور قابل توجهی محدودیت های محاسباتی معمول در روش های سنتی را کاهش می دهد. عدم وابستگی به شبکه این توانایی را به Rocky DEM می دهد که سامانه های شامل میلیون ها ذره را مدیریت کند و در عین حال نتایجی نزدیک به واقعیت از فرآیندهایی همچون شکست، خرد شدن و دیگر رفتارهای ذرات فراهم کند. با این وجود لازم است نتایج حاصل از این نرم افزار با نتایج حاصل از نرم افزار EDEM که در مقالات گذشته در شبیه سازی جریان ذرات بکار رفته، بررسی گردد. لذا در پژوهش حاضر ویژگی های محصول، هندسه غربال و برخی متغیرهای آزمایش مشابه با پژوهش انجام شده توسط (Yuan et al., 2020a) انتخاب شد تا مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با دو نرم افزار EDEM و Rocky DEM امکانپذیر گردد.

با توجه به مطالب بیان شده، اهداف انجام این پژوهش عبارتند از:

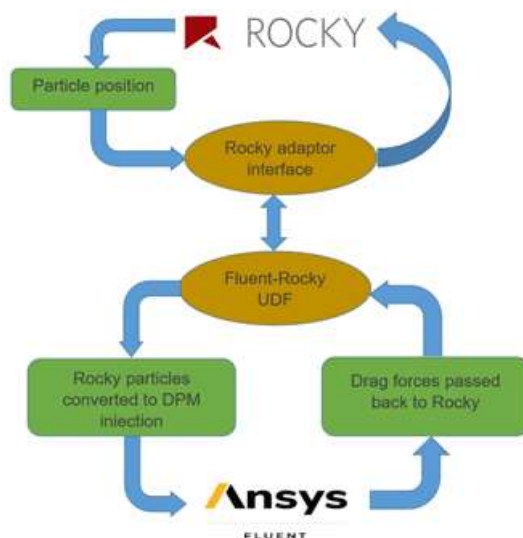
درک بهتر حرکت ذرات و پدیده های ماکروسکوپی موثر بر آن در طول فرآیند جداسازی دانه برنج از مواد غیردانه ای (MOG)، به کمک شبیه سازی این فرآیند، توسط کوپل CFD-DEM
بررسی اثر پارامترهای متفاوت طراحی بر شاخص های عملکردی غربال استوانه ای دوار از طریق شبیه سازی به روش کوپل CFD-DEM.

اعتبارسنجی نتایج حاصل از کوپل نرم افزارهای Rocky DEM و ANSYS Fluent در این مطالعه با نتایج حاصل از کوپل نرم افزارهای EDEM و ANSYS Fluent که در مطالعات قبلی بدست آمده است.

روش شناسی پژوهش

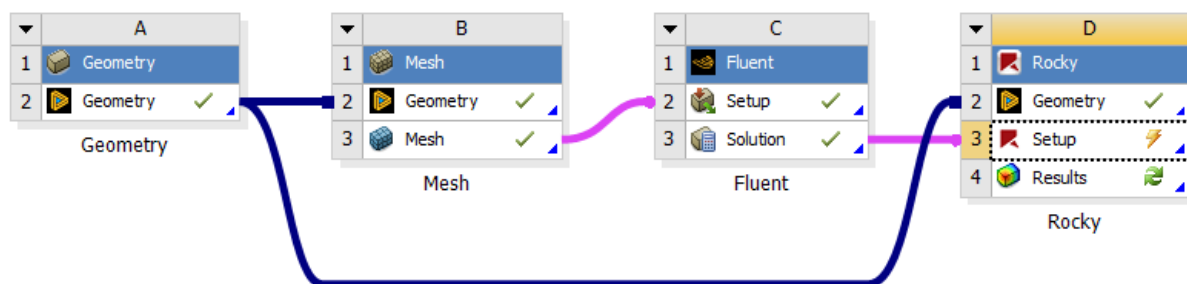
مدل سازی فرآیند تمیز کردن دانه

چگالی هوا (تقریباً ۱/۲۹ کیلوگرم بر مترمکعب در فشار یک اتمسفر) بسیار کوچک تر از چگالی هر جزء از مخلوط برنج برداشت شده (۳۰۰ تا ۱۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب) است. در این شرایط می توان از تاثیر ذرات بر جریان هوا چشم پوشی کرد و فقط تاثیر جریان بر ذرات را مورد بررسی قرار داد (Yuan et al., 2020a). بنابراین در این مطالعه، از کوپل CFD-DEM به صورت یک طرفه استفاده شد. فاز ذرات به عنوان منبع جرم و تکانه ی فاز جریان هوا محسوب می شود (Norourzi et al., 2016). در این پژوهش، نتایج حاصل از شبیه سازی جریان هوا در نرم افزار ANSYS Fluent 2022 R2 پس از همگرا شدن به نرم افزار Rocky DEM 2022 R2 انتقال داده می شود. حلگر المان گسسته، به صورت صریح معادلاتی را که بر حرکت ذرات و انرژی حاکم است، حل می کند. برای محاسبه کسر حجمی فاز ذرات که دارای سرعت است و همچنین انرژی رد و بدل شده بین ذرات و فاز سیال، نرم افزار Rocky DEM از فشار و سرعتی که توسط حلگر CFD بدست آمده است، استفاده می کند و پارامترهای مربوط به ذرات را تعیین می کند. سپس این مقادیر به حلگر CFD منتقل می شوند تا بتواند فشار و سرعت سیال را به روز کند. این تبادل اطلاعات تا پایان زمان شبیه سازی برای هر گام زمانی طی می شود تا شبیه سازی به طور کامل انجام شود (شکل ۱).



شکل ۱. الگوریتم نحوه کوپل شدن Rocky DEM و ANSYS Fluent

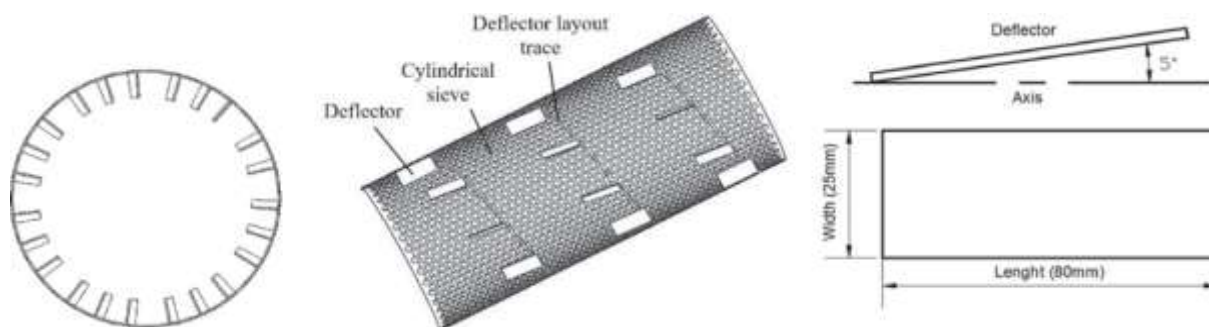
کوپل دو نرم افزار در محیط Ansys Workbench مطابق با شکل ۲ انجام شد.



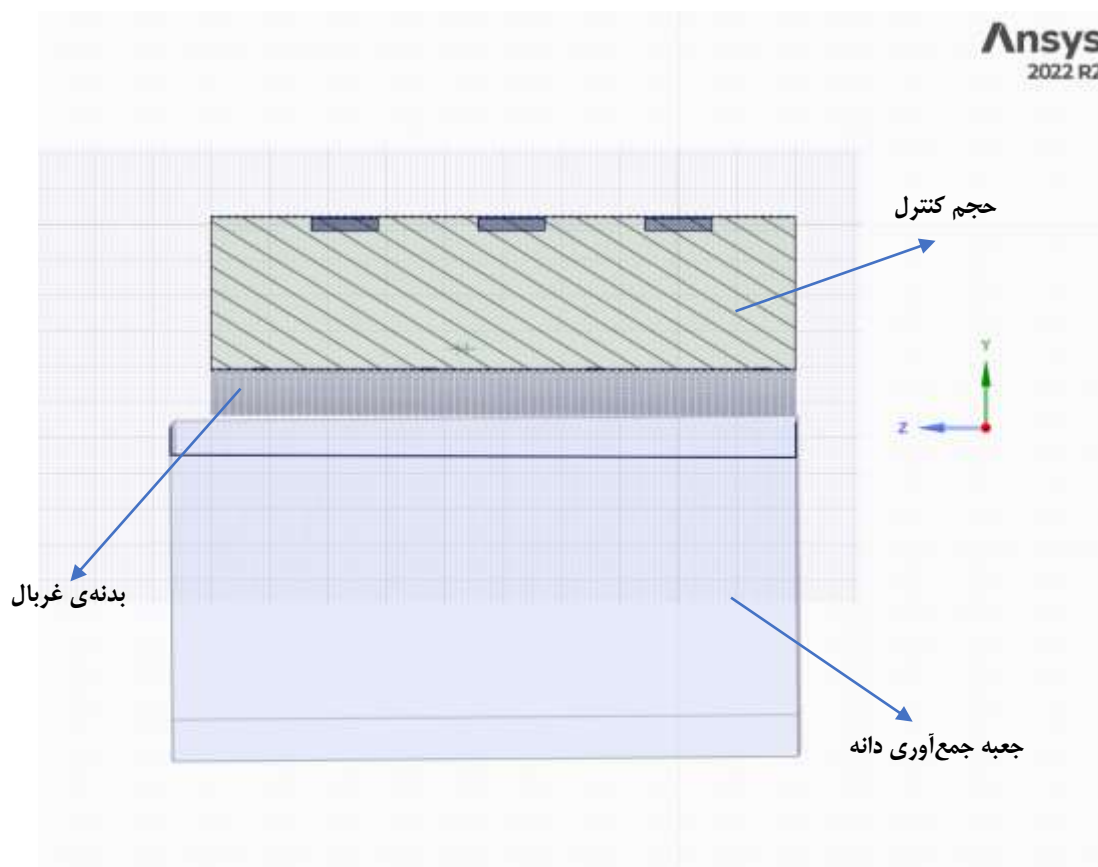
شکل ۲. بلوک دیاگرام کوپل CFD-DEM در محیط Ansys workbench

طراحی و مدل سازی غربال استوانه

با توجه به اندازه اجزای تشکیل دهنده مخلوط برنج کوبیده شده، قطر روزنه ها، طول و قطر غربال استوانه ای به ترتیب برابر با ۱۰، ۷۰۰ و ۳۰۰ میلی متر مطابق با پژوهش (Yuan et al., 2020b) انتخاب شد. به منظور ایجاد یک جریان منظم و پایدار محوری برای توده مواد در غربال استوانه ای، تعدادی منحرف کننده با فواصل مساوی در امتداد یک خط ماریپیچ خلاف جهت عقربه های ساعت مطابق با شکل ۳ در نظر گرفته شد. در زیر غربال جعبه هایی با اندازه های یکسان قرار داده شد تا دانه هایی که از غربال خارج می شوند در آن ها جمع شود. هندسه مربوط به غربال استوانه ای و حجم کنترل توسط محیط مدل سازی SpaceClaim در نرم افزار Ansys Workbench ایجاد شد. هندسه مربوط به غربال شامل بدنه غربال، منحرف کننده ها و هندسه حوزه محاسباتی CFD شامل فضای داخلی غربال ترسیم شد. نمای برش خورده مدل در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳. طرحواره منحرف کننده ها (Yuan et al., 2018)



شکل ۴. مدل ترسیم شده در محیط Space claim

حوزه مورد مطالعه برای شبیه سازی عددی سامانه شامل دو قسمت است:

۱- بدنه یا دیواره هایی که ذرات با آنها تعامل خواهند داشت که برای مطالعه DEM مورد نیاز است.

۲- حوزه مورد مطالعه برای CFD که شامل ناحیه ای از مدل است که سیال در آنجا جریان دارد.

فرآیند تمیز کردن را می توان به صورت زیر شرح داد:

ابتدا مخلوط برنج کوبیده شده با اجزای معین و با نرخ تغذیه مشخص تولید شده و توسط نیروی گرانش وارد غربال می شود. به واسطه ی جریان هوایی که فن ایجاد می کند، مواد در امتداد محور غربال به جریان درمی آیند. دانه ها به دلیل وزن بیشتری که دارند با سطح غربال برخورد می کنند، از روزنه ها عبور کرده و داخل جعبه های جمع آوری دانه جمع می شوند. دانه های پوک به همراه کاه ها توسط جریان هوا از قسمت انتهایی غربال خارج می شوند. در نهایت مقادیر بازده جداسازی (P)، نسبت تمیزی (C) و نسبت تلفات (L) به ترتیب از طریق روابط (۱)، (۲) و (۳) محاسبه می شوند.

$$P = \frac{W_{gl}}{W_g} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$C = \frac{W_{gl}}{W_l} \quad \text{رابطه ۲}$$

$$L = \frac{W_g - W_{gt} - W_{gl}}{W_g} \quad \text{رابطه ۳}$$

که W_g ، W_{gl} ، W_{gt} به ترتیب جرم کل دانه های ورودی (kg)، جرم دانه های داخل غربال پس از اتمام عملیات (kg)، جرم دانه های موجود در کل جعبه ها (kg) و جرم کل مخلوط داخل جعبه ها (kg) می باشد.

مدل های ذرات و اجزای مخلوط برنج کوبیده شده

در مرحله اول، هندسه ای سه بعدی از دانه، دانه های پوک و کاه با ابعاد هندسی طبق جدول ۱ تولید شد. سپس سایر ویژگی های هندسی اجزاء تشکیل دهنده مخلوط، براساس موارد پیشنهادی نرم افزار و مطابق با جدول ۲ تعریف شد. شکل ۵ هندسه های ایجاد شده در نرم

افزار Rocky DEM را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ابعاد هندسی واقعی اجزاء مخلوط برنج کوبیده شده (Yuan et al., 2020a)

اجزا	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
دانه	۸/۵۰	۳/۰۰	۲/۳۰
دانه پوک	۹/۰۰	۲/۹۰	۱/۴۰
-	طول (mm)	قطر (mm)	ضخامت (mm)
کاه	۴۳/۰۰	۲/۰۰	-

جدول ۲. پارامترهای هندسی برنج در نرم‌افزار Rocky DEM

تصویر	صافی	تعداد گوشه‌ها	Superquadric Degree
	۰/۹۶۴	۱۶	۲



شکل ۴. هندسه ایجاد شده از اجزاء برنج در نرم‌افزار Rocky DEM
(الف کاه، ب دانه پوک، پ دانه)

بیکربندی شبیه‌سازی

با توجه به مخلوط برنج کوبیده شده مورد استفاده در مطالعه (Yuan et al., 2020a) به ترتیب درصد جرمی دانه، کاه، دانه پوک و ناخالصی‌ها تعیین شد (به دلیل اینکه جرم ناخالصی‌ها شبیه دانه پوک بود، ناخالصی‌ها با دانه پوک جایگزین شدند). همچنین تمام خواص بیوفیزیکی ذرات طبق جدول ۳ تعریف شد (Yuan et al., 2018). خواص بیومکانیکی^۲ طبق جدول ۴ برای هر قسمت از مخلوط در نرم‌افزار Rocky DEM تعیین گردید. با توجه به نرخ تغذیه در کمباین‌های ریزدانه، نرخ تغذیه برای دانه، دانه پوک (دانه‌های پوک و ناخالصی‌ها) و کاه به ترتیب برابر با ۴۳، ۴۵۰ و ۸ گرم بر ثانیه تعریف شد (Yuan et al., 2020a).

جدول ۳. خواص فیزیکی بین اجزا (Yuan et al., 2020a)

اجزا	ضریب بازگشت	ضریب اصطکاک ایستایی	ضریب اصطکاک غلتشی
کاه- غربال	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۰۱
کاه- کاه	۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۰۲
دانه پوک- غربال	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۰۱
دانه پوک- کاه	۰/۳۲	۰/۴۶	۰/۰۲
دانه پوک- دانه پوک	۰/۳۸	۰/۶۶	۰/۰۲
دانه- غربال	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۰۱
دانه- کاه	۰/۳۷	۰/۳۵	۰/۰۲
دانه- دانه پوک	۰/۳۵	۰/۶۳	۰/۰۲
دانه- دانه	۰/۴۶	۰/۶۱	۰/۰۲

1 Biophysical properties

2 Biomechanical properties

جدول ۴. خواص مکانیکی اجزاء (Yuan et al., 2020a)

اجزا	ضریب پواسون	چگالی (kg/m^3)	مدول برشی (Mpa)
غربال	۰/۳	۷۸۰۰	۷۰۰۰
کاه	۰/۴	۶۲۳	۰/۲۳
دانه پوک	۰/۳۵	۴۷۸	۱/۳۵
دانه	۰/۳	۱۱۳۷	۸/۲۴

برای بدست آوردن نتایج محاسباتی دقیق از حرکت ذرات، گام زمانی DEM به طور کلی بسیار کوچکتر از گام زمانی CFD انتخاب شد. زیرا ذرات در یک گام زمانی DEM جابجایی قابل توجهی ندارند. معمولاً نسبت گام زمانی DEM به CFD حدود ۱:۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین گام زمانی در نرم افزار ANSYS Fluent و Rocky DEM به ترتیب ۰/۳۵ و ۰/۰۰۰۳۵ ثانیه تنظیم شد (Yuan et al., 2020a). همچنین سطح داخلی غربال استوانه به عنوان مرز میدان جریان هوا، دهانه ابتدایی غربال استوانه‌ای در سمت تغذیه مواد به عنوان ورودی جریان هوا و دهانه دیگر غربال به عنوان خروجی جریان هوا در نرم‌افزار ANSYS Fluent تعریف شد. شبیه سازی کوپل شده برای ۳ ثانیه اجرا شد، که برای سه سطح سرعت هوا و دو سطح سرعت دورانی غربال حدود ۸ روز در یک سیستم با CPU، ۸ هسته‌ای ۲،۳ گیگاهرتز اینتل، رم ۱۶ گیگابایت به طول انجامید.

اعتبارسنجی مدل

پارامترهایی همچون سرعت هوا، قطر روزنه‌های غربال، سرعت دورانی غربال، قطر دهانه غربال، تعداد منحرف کننده‌های موجود در غربال برای جداسازی ذرات برنج کوبیده شده در مطالعات انجام شده توسط (Yuan et al., 2020a; Yuan et al., 2018) بررسی شده اند. برای اعتبار سنجی نتایج حاصل از کوپل ANSYS Fluent و Rocky EDM تعدادی از سطوح مشابه، شبیه سازی شد. متغیرهای شبیه سازی شامل دو سطح سرعت دوران غربال (۲۵ و ۲۹ دور در دقیقه) و سه سطح سرعت جریان هوا (۹، ۱۰ و ۱۱ متر در ثانیه) انتخاب شد.

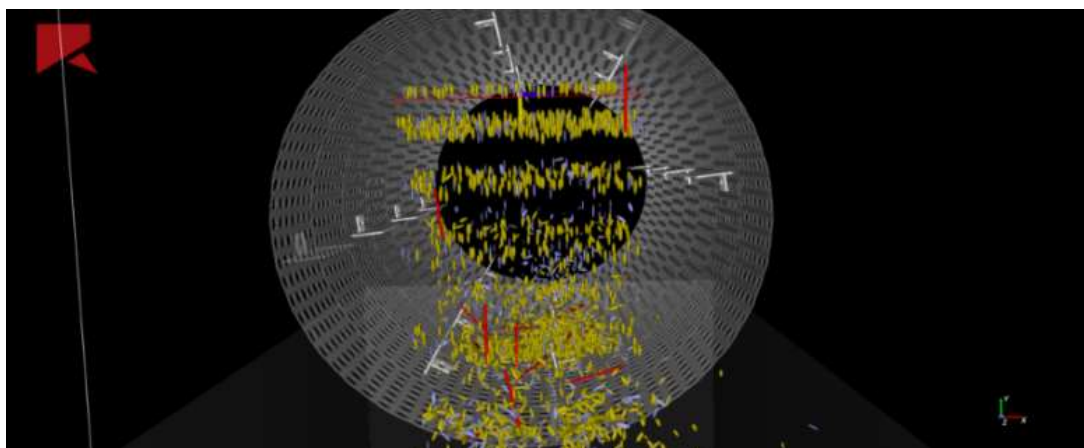
نتایج و بحث

اجزای مخلوط برنج کوبیده شده پس از تولید در کارخانه ذرات تعریف شده در نرم افزار، تحت تاثیر گرانش و جریان هوا تفکیک شده و در امتداد محور غربال جریان یافتند (شکل ۶ الف و ب). برخی دانه‌ها به سطح غربال نزدیک شده، پس از تماس با سطح غربال از روزنه‌ها عبور کرده و سپس از غربال خارج می‌شوند. اکثر کاه‌ها و دانه‌های پوک به دلیل چگالی کمتر تحت تاثیر جریان هوا از قسمت انتهایی غربال خارج می‌شوند. با گذشت زمان و افزایش تعداد ذرات موجود در غربال، برخی ذرات به منحرف کننده‌ها برخورد کرده، در جهت محیطی غربال حرکت می‌کنند. ذرات با چگالی بیشتر تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز و گرانش به سطح غربال برخورد کرده و از روزنه‌های غربال خارج می‌شوند (شکل ۷). در این فرآیند برخی دانه‌ها دچار بادبردگی شده و برخی از دانه‌های پوک از روزنه‌های غربال عبور می‌کنند. شکل ۸ بردار سرعت جریان هوا را درون غربال نشان می‌دهد.

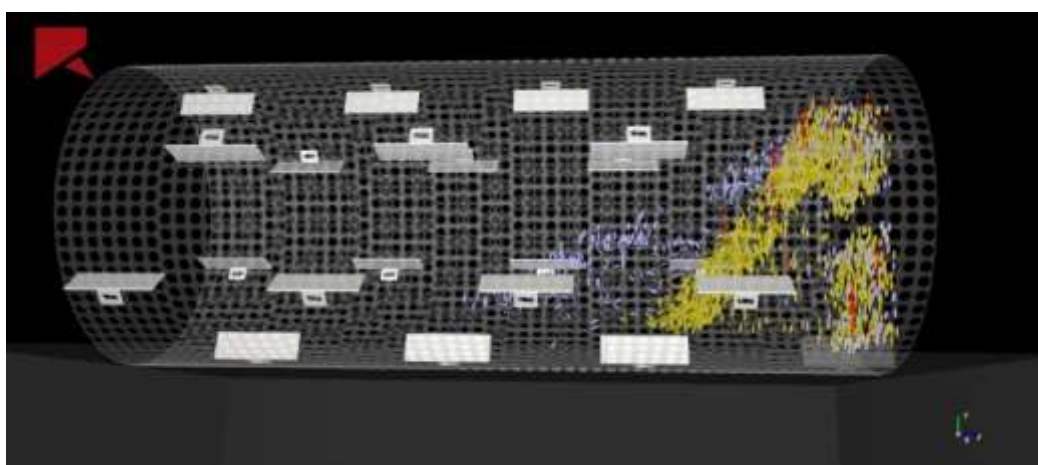
پس از انجام شبیه‌سازی‌ها، شاخص‌های نسبت تمیزی، نسبت تلفات و بازده جداسازی مطابق با جدول ۵ محاسبه شد. همچنین نتایج مربوط به دوران غربال با سرعت ۲۵ دور بر دقیقه و سرعت جریان هوای ۱۰ متر بر ثانیه با نتایج پژوهش انجام شده توسط (Yuan et al., 2020b) مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۶). همانطور که مشاهده می‌شود درصد خطا در مقدار بازده، نسبت تلفات و نسبت تمیزی، به ترتیب ۴/۵، ۹/۷ و ۴/۲ درصد تخمین زده شد.

بررسی نتایج نشان داد که افزایش سرعت هوا در غربال موجب افزایش سرعت ذرات در امتداد محور غربال شده، که عامل جداسازی سریعتر ذرات از یکدیگر است. با افزایش سرعت هوا نسبت تمیزی و بازده جداسازی افزایش یافت (شکل‌های ۹ و ۱۰). افزایش سرعت هوا باعث بادبردگی دانه‌ها می‌شود و در نتیجه نسبت تلفات را نیز افزایش می‌دهد (شکل ۱۱).

افزایش سرعت دورانی غربال نیز موجب افزایش برخورد ذرات به یکدیگر و به بدنه غربال و در نتیجه افزایش مقادیر تکانه می‌شود. این موضوع سبب افزایش سرعت ذرات در جهت شعاعی غربال است که کاهش بازده جداسازی را به همراه دارد (شکل ۹). افزایش سرعت دورانی غربال تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار نسبت تمیزی نداشت (شکل ۱۰). این موضوع نشان دهنده عدم تاثیر این پارامتر بر نرخ جداسازی دانه، دانه پوک و کاه است. با افزایش سرعت دورانی غربال، مقدار تکانه افزایش می‌یابد. در نتیجه دانه‌های بیشتری از انتهای غربال خارج شده و نسبت تلفات افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

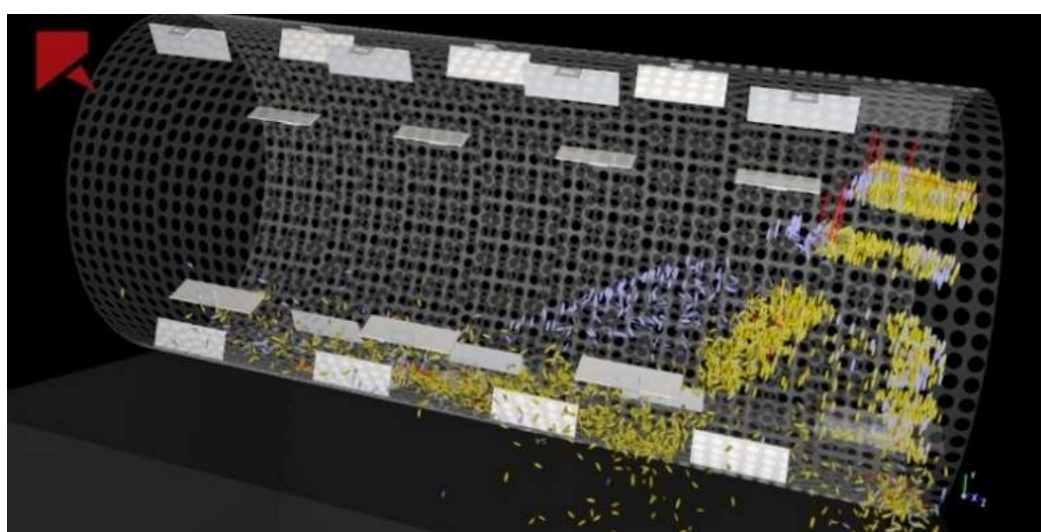


(الف)

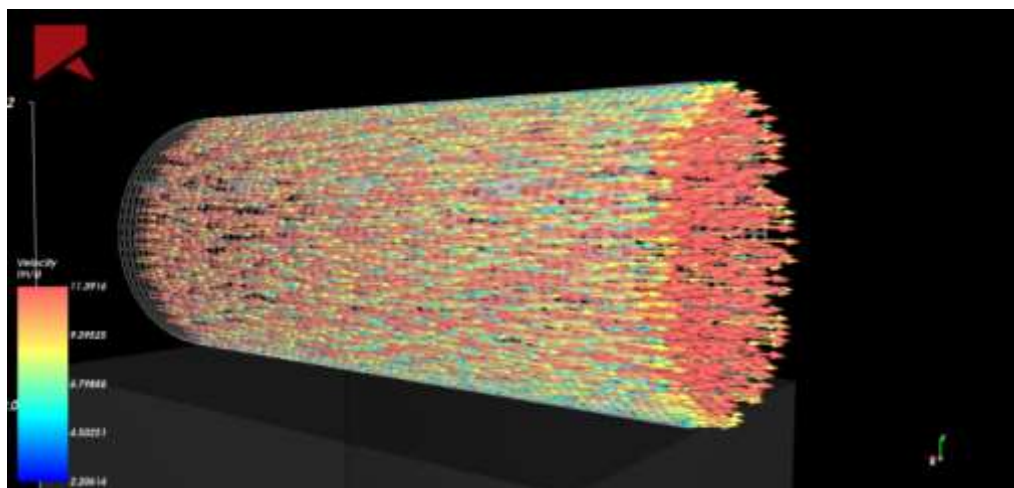


(ب)

شکل ۶. جدا شدن ذرات از یکدیگر در لحظات ابتدایی شبیه سازی، (الف) نمایی از دهانه ورودی غربال و (ب) نمای کنار



شکل ۷. جدا شدن ذرات از یکدیگر پس از گذشت زمان و برخورد ذرات به سطح غربال و منحرف کننده‌ها



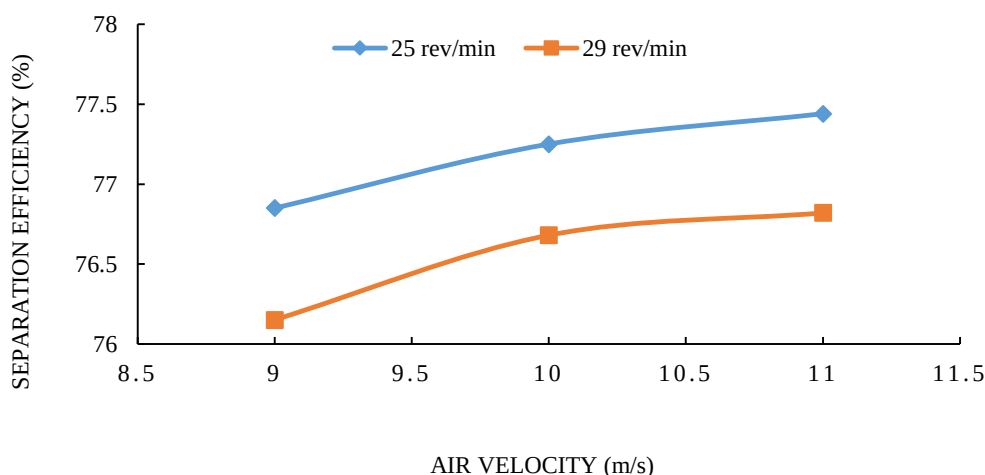
شکل ۸. بردارهای سرعت جریان هوا در نقاط مختلف غریبال (لایه مرزی و قسمت میانی)

جدول ۵. نتایج حاصل از شبیه سازی برای دو سطح سرعت دورانی غریبال و سه سطح سرعت جریان هوا

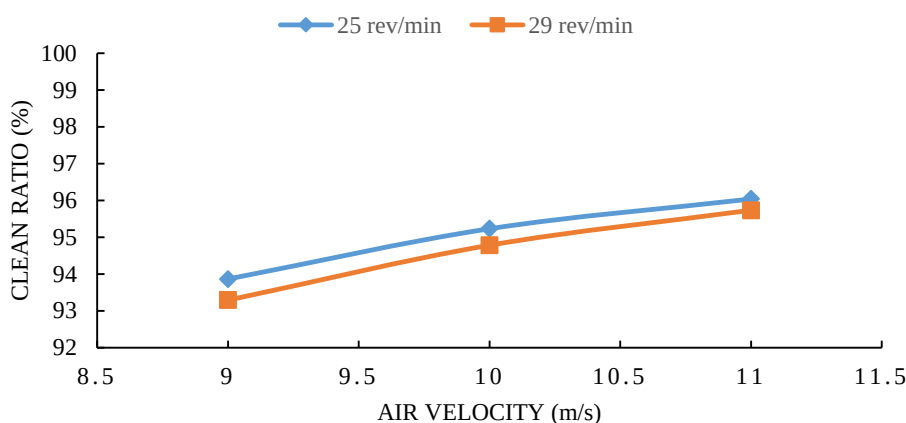
شماره شبیه سازی	متغیرهای شبیه سازی			شاخص های ارزیابی	
	سرعت دوران غریبال (rpm)	سرعت جریان هوا (m/s)	بازده (%)	نسبت تلفات (%)	نسبت تمیزی (%)
۱	۲۵	۹	۷۶/۸۵	۲/۴۸	۹۳/۸۶
۲	۲۵	۱۰	۷۷/۲۵	۲/۸۱	۹۵/۲۳
۳	۲۵	۱۱	۷۷/۴۴	۳/۰۳	۹۶/۰۴
۴	۲۹	۹	۷۶/۱۵	۲/۵۹	۹۳/۲۹
۵	۲۹	۱۰	۷۶/۶۸	۲/۹۸	۹۴/۷۸
۶	۲۹	۱۱	۷۶/۸۲	۳/۱۱	۹۵/۷۳

جدول ۶. مقایسه نتایج با مطالعه انجام شده توسط (Yuan et al., 2020b)

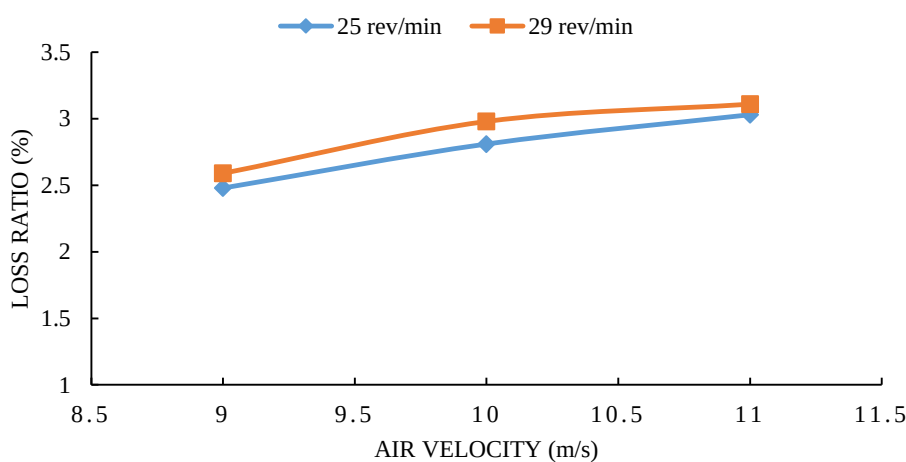
نتایج حاصل از	بازده (%)	نسبت تلفات (%)	نسبت تمیزی (%)
مطالعه انجام شده توسط (Yuan et al., 2020b)	۸۰/۹۷	۲/۵۶	۹۹/۴۴
شبیه سازی پژوهش حاضر	۷۷/۲۵	۲/۸۱	۹۵/۲۳
خطا (%)	۴/۵	۹/۷	۴/۲



شکل ۹.۵. تاثیر سرعت جریان هوا و سرعت دورانی غریبال بر بازده



شکل ۱۰. تاثیر سرعت جریان هوا و سرعت دورانی غربال بر نسبت تمیزی



شکل ۱۱. تاثیر سرعت جریان هوا و سرعت دورانی غربال بر نسبت تلفات

نتایج بدست آمده در رابطه با تاثیر سرعت دورانی و سرعت جریان هوا بر روی سه متغیر نسبت تمیزی، نسبت تلفات و بازده با نتایج حاصل از مطالعه‌ی یوان و همکاران با سیستم تمیز کننده مشابه که توسط کوپل نرم‌افزارهای EDEM و ANSYS Fluent در سال‌های (۲۰۱۸) و (۲۰۲۰) انجام شده، مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد نرم‌افزار Rocky DEM از دقت مشابهی برخوردار است.

نتیجه‌گیری کلی

از مدل کوپل شده CFD-DEM برای شبیه‌سازی فرآیند جداسازی دانه از مخلوط برنج کوبیده شده در غربال استوانه‌ای دوار دارای جریان هوا استفاده شد. نتایج کلی به شرح زیر است:

سرعت جریان هوا بر روی هر سه پارامتر بازده جداسازی، نسبت تمیزی، نسبت تلفات تاثیرگذار است. این تاثیر بر روی بازده جداسازی قابل توجه بوده و به طور خاص با افزایش سرعت جریان هوا بازده جداسازی ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. همچنین افزایش سرعت هوا، تاثیر مثبتی بر نسبت تمیزی دارد، اما نرخ تلفات را نیز افزایش می‌دهد. افزایش سرعت جریان هوا سبب افزایش مقدار دانه‌های خارج شده از انتهای غربال گردید.

سرعت دورانی غربال استوانه‌ای بر روی سرعت محوری دانه‌ها و دانه‌های پوک تاثیر می‌گذارد. در نتیجه افزایش آن سبب افزایش نسبت تلفات و کاهش بازده شد، اما اثر قابل توجهی بر نسبت تمیزی نداشت.

به طور کلی، از نتایج پژوهش حاضر می‌توان نتیجه گرفت که، کوپل CFD-DEM می‌تواند برای شبیه‌سازی فرآوری مواد دانه‌ای استفاده شود. به دلیل محدودیت‌های سخت افزاری کامپیوترها، شبیه‌سازی برای ذرات با حجم زیاد به تجهیزات گران قیمتی نیاز دارد. همچنین نتایج نشان داد نرم‌افزار Rocky DEM نرم‌افزاری کارآمد برای شبیه‌سازی جریان ذرات زیستی است. این نرم افزار توسط شرکت

ارائه دهنده نرم افزار ANSYS Fluent عرضه شده است. به همین دلیل سازگاری بیشتری با نرم افزار ANSYS Fluent دارد. همچنین عدم نیاز به تعریف مش می‌تواند به شبیه سازی به روش کوپل CFD-DEM کمک کرده تا با دقت و سرعت مناسبی انجام شود و نتایجی نزدیک به نتایج تجربی ارائه دهد.

REFERENCES

- Almeida, E., Spogis, N., & Silva, M. (2016). Computational study of the pneumatic separation of sugarcane bagasse.
- Badretdinov, I., Mudarisov, S., Lukmanov, R., Permyakov, V., Ibragimov, R., & Nasyrov, R. (2019). Mathematical modeling and research of the work of the grain combine harvester cleaning system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104966. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104966>
- Bellocq, B., Ruiz, T., Delaplace, G., Duri, A., & Cuq, B. (2017). Screening efficiency and rolling effects of a rotating screen drum used to process wet soft agglomerates. *Journal of Food Engineering*, 195, 235-246. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.09.023>
- Berger, R., Kloss, C., Kohlmeyer, A., & Pirker, S. (2015). Hybrid parallelization of the LIGGGHTS open-source DEM code. *Powder Technology*, 278, 234-247. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.03.019>
- Boac, J. M., Ambrose, R. P. K., Casada, M. E., Maghirang, R. G., & Maier, D. E. (2014). Applications of Discrete Element Method in Modeling of Grain Postharvest Operations. *Food Engineering Reviews*, 6(4), 128-149. <https://doi.org/10.1007/s12393-014-9090-y>
- Casas, G., Mukherjee, D., Celigueta, M. A., Zohdi, T. I., & Onate, E. (2017). A modular, partitioned, discrete element framework for industrial grain distribution systems with rotating machinery. *Computational Particle Mechanics*, 4(2), 181-198. <https://doi.org/10.1007/s40571-015-0089-9>
- Chu, K. W., Wang, B., Xu, D. L., Chen, Y. X., & Yu, A. B. (2011). CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*, 66(5), 834-847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.11.026>
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- Dewicki, G. (2003). Bulk material handling and processing - Numerical techniques and simulation of granular material. 23, 110-113.
- Dosta, M., Andre, D., Angelidakis, V., Caulk, R. A., Celigueta, M. A., Chareyre, B.,... Weinhardt, T. (2024). Comparing open-source DEM frameworks for simulations of common bulk processes. *Computer Physics Communications*, 296, 109066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cpc.2023.109066>
- El-Emam, M. A., Shi, W., & Zhou, L. (2019). CFD-DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter. *Advanced Powder Technology*, 30(11), 2686-2702. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.08.015>
- Emam, M., Zhou, L., Shi, W., Chen, H., Bai, L., & Agarwal, R. (2021). Theories and Applications of CFD-DEM Coupling Approach for Granular Flow: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09568-9>
- Fonte, C. B., Oliveira, J. A. A., & Almeida, L. C. (2015). dem-cfd coupling : mathematical modelling and case studies using rocky-dem ® and ansys fluent ®.
- Guzman Quinonez, L. J. (2024). Simulation of agricultural air seeding systems using the discrete element method and computational fluid dynamics.
- Han, D., Zhang, D., Yang, L., Li, K., Zhang, T., Wang, Y., & Cui, T. (2017). EDEM-CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33, 23-31. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2017.13.004>
- Horabik, J., & Molenda, M. (2016). Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review. *Biosystems Engineering*, 147, 206-225. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.02.017>
- Korn, C. (2020). Application of coupled CFD-DEM simulation to separation process in combine harvester cleaning devices. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61638-3>
- Li, H., Li, Y., Gao, F., Zhao, Z., & Xu, L. (2012). CFD-DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device. *Computers and Electronics in Agriculture*, 88, 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.07.006>



- Li, X., Meng, Y., Zhang, J., Geng, L., & Ji, J. (2018). Design and Test of Cleaning Device for Roller Rubbing Cylinder Sieve of Millet. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 49, 92-102 and 136. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.011>
- Li, Y., Xu, L., Zhou, Y., Li, B., Zhenwei, L., & Li, Y. (2018). Effects of throughput and operating parameters on cleaning performance in air-and-screen cleaning unit: A computational and experimental study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 152, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.07.019>
- Maxey, M. R., & Riley, J. J. (1983). Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. *The Physics of Fluids*, 26(4), 883-889. <https://doi.org/10.1063/1.864230>
- Norourzi, H., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R., & Mostoufi, N. (2016). *Coupled CFD-DEM Modeling: Formulation, Implementation and Application to Multiphase Flows*. <https://doi.org/10.1002/9781119005315>
- Ren, B., Zhong, W., Chen, Y., Chen, X., Jin, B., Yuan, Z., & Lu, Y. (2012). CFD-DEM simulation of spouting of corn-shaped particles. *Particology*, 10(5), 562-572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.03.011>
- Rosales, H. (1896). Classifying Crushed Ore by Trommels. *Nature*, 53(1378), 487-488. <https://doi.org/10.1038/053487d0>
- Simonyan, K., & Yiljep, Y. (2008). Investigating grain separation and cleaning efficiency distribution of a conventional stationary rasp-bar sorghum thresher. 10.
- Sturm, M., Wirtz, S., Scherer, V., & Denecke, J. (2010). Coupled DEM-CFD Simulation of Pneumatically Conveyed Granular Media. *Chemical Engineering & Technology*, 33(7), 1184-1192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ceat.201000162>
- Ullah, A., Hong, K., Gao, Y., Gungor, A., & Zaman, M. (2019). An overview of Eulerian CFD modeling and simulation of non-spherical biomass particles. *Renewable Energy*, 141, 1054-1066. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.074>
- Walker, P. M., Kelley Tr Fau - Smiciklas, K. D., & Smiciklas, K. D. (2008). Evaluation of pulverized trommel fines for use as a soil amendment. (0960-8524 (Print)).
- Wan, X., Shu, C., Xu, Y., Jiacheng, Y., Li, H., & Liao, Q. (2018). Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 34, 27-35. <https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.14.004>
- Wee Chuan Lim, E., Wang, C.-H., & Yu, A.-B. (2006). Discrete element simulation for pneumatic conveying of granular material. *AIChE Journal*, 52(2), 496-509. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aic.10645>
- Yuan, J., Li, H., Qi, X., Hu, T., Bai, M., & Wang, Y. (2020a). Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 871-881. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540>
- Yuan, J., Li, H., Qi, X., Hu, T., Bai, M., & Wang, Y. (2020b). Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14, 871-881. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540>
- Yuan, J., Wu, C., Li, H., Qi, X., Xiao, X., & Shi, X. (2018). Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 320-329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.012>