

Simulation and Analysis of the Discharge Flow of Persian Lilac Fruit using Discrete Element Method

MOHSEN NAZARI¹, AHMAD GHAZANFARI MOGHADDAM^{1*}

1. Department of Mechanic of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

(Received: Feb. 14, 2019- Revised: Jan. 18, 2020- Accepted: Jan. 23, 2021)

ABSTRACT

Discrete element method has been identified as a suitable method for studying the flow of granular materials. In this research, the motion of Persian lilac fruit was initially investigated experimentally in a sloped hopper and then it was simulated using discrete element method. The experiments were carried out on the basis of factorial design with two factors of height and discharge area, each at four levels. The ANOVA tests indicated that the height of the fruits in the hopper and the surface area of the discharge and their interaction had a significant effect on the outflow of the fruits. The developed regression equation between the mass flow rate and discharge area and the interaction of discharge area and height was linear ($R^2 = 0.99$), however, height of the fruits in the hopper had a negative impact on the discharge rate. The simulation results indicated that and the outlet size, the discharge flow and the output velocity increase, but they did not exactly follow the fluid flow relationships. The effect of fruits friction showed that the discharge rate increased with decreasing internal friction. In general, comparing the simulation results with laboratory tests showed that the discrete element method was well able to simulate the flow of particles within and through the hopper.

Keywords: Discrete element method, hopper, Persian lilac fruit, simulation, output flow.

*Corresponding Author's Email: aghazanfari@uk.ac.ir

شبیه‌سازی و آنالیز جریان خروجی میوه زیتون تلخ با استفاده از روش المان گسسته

محسن نظری^۱، احمد غضنفری مقدم^{*}

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱۱/۴)

چکیده

روش المان گسسته یک روش مناسب برای مطالعه و بررسی لحظه‌ای جریان مواد گرانولی، تشخیص داده شده است. در این تحقیق حرکت میوه زیتون تلخ در یک مخزن شیب‌دار با استفاده از دو روش آزمایشگاهی و المان گسسته مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها بر اساس آزمون فاکتوریل با دو عامل ارتفاع و دهانه خروج هر یک در چهار سطح انجام شدند. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که سطح دهانه خروجی و ارتفاع محصول و اثر متقابل آن‌ها بر مقدار دبی جرمی معنی‌دار بود. بررسی رابطه رگرسیونی نشان داد که دبی جرمی با سطح دهانه خروج به صورت خطی مستقیم رابطه دارد ولی ارتفاع میوه درون مخزن دارای اثر خطی منفی است. اثر متقابل این دو فاکتور هم بر دبی جرمی به صورت خطی مستقیم است ($R^2=0/99$). در مجموع اثر تغییرات سطح خروج موثر تر از اثر تغییرات ارتفاع می‌باشد. نتایج بررسی شبیه‌سازی المان گسسته نشان داد در هنگام تخلیه سرعت دانه‌ها یکنواخت نبوده و تحت تاثیر موقعیت هر دانه نسبت به سایر دانه‌ها قرار می‌گیرند. نمودارهای ترسیم شده نشان دادند که با افزایش ارتفاع، در صورتیکه سطح دهانه خروج ثابت باشد، سرعت خروج مواد کاهش پیدا می‌کند که این نتیجه کاملاً متضاد قوانین سیالات نیوتنی است. همچنین با افزایش سطح دهانه خروج، دبی جرمی خروجی و سرعت خروجی افزایش می‌یابند ولی کاملاً از روابط سیالاتی تبعیت نمی‌کنند. در مجموع نتایج شبیه‌سازی نشان داده که این شبیه‌سازی می‌تواند جزئیاتی از جریان مواد گرانولی را به نمایش بگذارد که روش‌های معمول آزمایشگاهی قادر به ارائه آن‌ها نیستند.

واژه‌های کلیدی: روش المان گسسته، مخزن، میوه زیتون تلخ، شبیه‌سازی، جریان خروج.

مقدمه

زیتون تلخ (*Melia azedarach L*) درختی است با ارتفاع حدود ۱۰ متر که بومی نواحی هیمالیا می‌باشد. اخیراً از این درخت در توسعه فضای سبز شهری و پارک‌ها استفاده زیادی شده است. میوه این درخت کروی و دانه‌های آن حاوی روغن است. روغن زیتون تلخ به دلیل داشتن ماده سمی آلوپاتیک غیرخوراکی بوده ولی از آن می‌توان برای مصارف صنعتی استفاده کرد (Zarandi & Ghazanfari., 2011). برای فرآوری صنعتی، میوه خشک زیتون تلخ پس از نگهداری در انبار به واحدهای مختلف فرآوری منتقل می‌شوند. انتقال و جریان این میوه‌ها مشابه حرکت و جریان مواد گرانولی^۱ صنعتی و معدنی است (Ghobadian & Rahimi, 2004). به منظور طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌های فرآوری رفتار مکانیکی و جریان مواد گرانولی در طی فرآیندهای صنعتی همواره مورد توجه محققان بوده است (Abbaspour Fard et al., 2009). عوامل متعددی بر چگونگی جریان و میزان خروج مواد گرانولی از یک مخزن نقش دارند. این عوامل را می‌توان به دو

گروه عوامل مربوط به مخزن و عوامل مربوط به محصول گروه‌بندی کرد. عوامل مربوط به مخزن شامل جهت، اندازه و شکل دهانه تخلیه، ارتفاع، اصطکاک سطح داخلی و زاویه کف مخزن می‌باشند و عوامل مربوط به محصول شامل اندازه، شکل، چگالی، رطوبت و ضریب اصطکاک داخلی محصول هستند (Nedderman, 1985; Mohammadi et al., 2016).

پژوهشگران زیادی پدیده جریان مواد گرانولی از مخازن را مورد مطالعه قرار داده‌اند (Casandroui & Mieila, 2010). در پژوهشی نرخ جریان جرمی و توزیع سرعت دو ذره کروی و بیضوی و مقایسه الگوی جریان شبیه‌سازی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و متذکر شدند که جریان جرمی ذرات بیضوی کمتر از ذرات کروی است (Tao et al., 2014). در بررسی تحلیلی چگونگی حرکت میوه زیتون تلخ پوست شده و پوست نشده درون مخزن مکعب مستطیلی با دهانه خروجی دایره‌ای شکل گزارش شد که سرعت هر دانه میوه تحت تاثیر موقعیت اولیه آن قرار می‌گیرد و در این حرکت سه منطقه افزایش سرعت، کاهش

* نویسنده مسئول: aghazanfari@uk.ac.ir

با محاسبه کلیه نیروها و گشتاورهای اعمالی به آن، حرکت و موقعیت دانه‌ها در فاصله‌های زمانی مشخص پیش بینی و شبیه‌سازی می‌شود. در حالیکه روش‌های تحلیلی یک روند کلی از مجموعه دانه‌های تحت بررسی در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهند (Sadeghi & Salehpour Scoie, 2012).

پژوهشگران متعددی برای بررسی حرکت محصولات کشاورزی درون مخازن، سیلوها، هلیس‌ها و بروی تسمه نقاله‌ها از روش DEM استفاده کرده و از نتایج آن‌ها برای طراحی دقیق تر و بهینه این گونه تجهیزات استفاده کرده‌اند. در پژوهشی جریان دانه ذرت در یک سیلو با خروجی قیفی شکل با استفاده از DEM مدل‌سازی شد و تاثیر پارامترهای شکل، چگالی، مدول برشی، اصطکاک غلتشی و اصطکاک ایستایی ذرات بر الگوی جریان ذرت مورد بررسی قرار گرفت. (Gonzalez-Montellano *et al.*, 2011). در پژوهشی Balevicius *et al.* (2011) با استفاده از روش المان گسسته، الگوی جریان ذرات نخود را در سه مخزن با شکل‌های مختلف و همچنین اصطکاک بین ذرات در سطح‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. گفته شد که شبیه‌سازی جریان مواد گرانولی بر اساس شکل مخزن، تعداد و سایز و خواص ذرات با استفاده از روش المان گسسته امکان پذیر است.

هدف اصلی این پروژه بررسی جریان حرکت دانه‌های زیتون تلخ در یک مخزن است تا بتوان با بررسی الگوی حرکت نسبت به بهینه سازی آن اقدام کرد. در این بررسی ابتدا تاثیر اندازه دهانه خروجی و ارتفاع مخزن هریک در سه سطح بر روی مقدار جریان خروجی مورد به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. سپس جریان و سرعت خروجی میوه زیتون تلخ از مخزن با استفاده از روش المان گسسته شبیه سازی و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

میوه زیتون تلخ مورد نیاز این پژوهش از درختان موجود در منطقه شهرستان رفسنجان برداشت شدند، میوه‌های برداشت شده کاملاً بر روی درخت خشک شده بودند و پس از برداشت از خوشه جدا و تمیز گشته و در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا رطوبت آن‌ها یکنواخت گردد.

برای بررسی‌های آزمایشگاهی نیاز به دانستن برخی از خصوصیات فیزیکی و مکانیکی دانه‌های زیتون تلخ شامل ضریب کرویت، میانگین قطر هندسی، چگالی ظاهری، چگالی واقعی و اصطکاک ایستایی بود. برای محاسبات شبیه سازی المان گسسته علاوه بر این خصوصیات، برخی دیگر از خصوصیات فیزیکی و

سرعت و افزایش مجدد سرعت قابل تمایز بود (Mohammadi *et al.*, 2016). اندازه دهانه خروجی مخزن اگر از حد مشخصی کوچکتر باشد مواد گرانولی بر روی دهانه خروجی پل زده و جریان خروجی مواد از مخزن کاهش یافته یا کاملاً متوقف می‌شود (Casandriou & Mieila, 2010). این پدیده علاوه بر عامل اندازه دهانه خروجی وابسته به خصوصیات فیزیکی ماده چون اصطکاک داخلی و شکل آن دارد. پل زدن برای دانه‌های زیتون تلخ هم گزارش شده است (Mohammadi *et al.*, 2016).

اصولاً رطوبت محصولات دانه‌ای بر مقدار اصطکاک داخلی آنها تاثیر گذاشته و با کاهش رطوبت مقدار چروکیدگی دانه افزایش یافته و اصطکاک داخلی دانه‌ها را افزایش می‌دهد. در بررسی حرکت چهار نمونه دانه ذرت با رطوبت‌های مختلف نشان داده شده است که با افزایش رطوبت ذرت، مقدار جریان افزایش می‌یابد. (Chang & Converse, 1988). همچنین در گزارش دیگر نشان داده شد که با افزایش اصطکاک داخلی مواد گرانولی، مقدار جریان خروجی کاهش می‌یابد. از طرفی هر چه سطح داخلی مخزن زبرتر باشد اصطکاک بین محصول و سطح مخزن بیشتر شده و سرعت حرکت مواد کمتر می‌شود (Nedderman, 1985; Mobrouk *et al.*, 2008). ولی در بررسی تاثیر مقدار رطوبت بر حرکت پلت‌های تهیه شده از کاه ذرت گزارش شد که با افزایش رطوبت جریان پلت کاهش می‌یابد زیرا افزایش رطوبت باعث افزایش چگالی شده و در نتیجه نیروی محرکه بیشتری به پلت‌ها وارد می‌شود (Crowford *et al.*, 2016).

در بررسی رفتار مواد گرانولی به دلیل تعداد زیاد این مواد در یک مخزن و برهمکنش مکانیکی این دانه‌ها بر یکدیگر، مواد در حین حرکت رفتار پیچیده‌ای از خود نشان داده و روش‌های تحلیلی کلاسیک بخوبی نمی‌توانند این رفتار را شبیه سازی نمایند. بکارگیری روش‌های عددی ابزار مناسبی برای بررسی رفتار حرکتی این مواد می‌باشد. در مقایسه با روش‌های تحلیلی و آزمایشگاهی، روش‌های عددی بسیار انعطاف پذیر بوده و قادرند بطور لحظه‌ای مشخصات حرکت هر دانه چون سرعت، شتاب، دبی خروجی، موقعیت هر دانه و نیروهای برخورد بین دانه‌ها را در اختیار پژوهشگر قرار دهند (Abbaspour Fard *et al.*, 2009).

روش‌های عددی مختلف مانند اجزا محدود، تفاضل محدود و حجم محدود و المان‌های گسسته^۱ (DEM) برای مطالعه حرکت مواد مورد استفاده قرار گرفته است. در این میان روش المان‌های گسسته بهترین روش برای بررسی جریان مواد گرانولی تشخیص داده شده است (Rong *et al.*, 1995). اساس روش المان گسسته بر این است که هر دانه به طور مجزا در مسیری که حرکت می‌کند،

(2007). مقادیر خصوصیات اندازه‌گیری شده برای میوه زیتون تلخ مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است.

مکانیکی شامل مقادیر اصطکاک غلتشی، مدول برشی و نسبت پواسون بود که تمامی این خصوصیات با روش‌های معمول آزمایشگاهی مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (Razavi & Akbari,

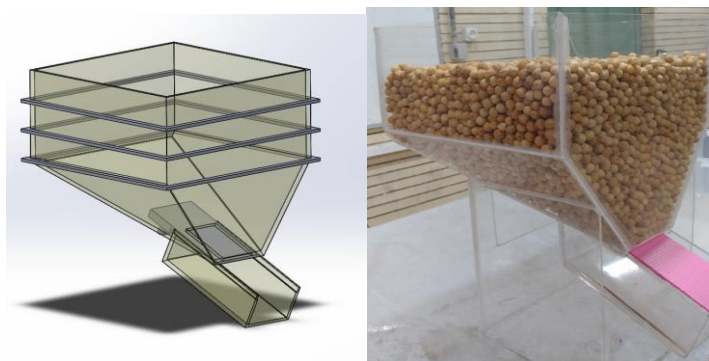
جدول ۱- میانگین خصوصیات میوه زیتون تلخ استفاده شده در بررسی آزمایشگاهی و شبیه سازی جریان

نسبت پواسون	مدول برشی (MPa)	اصطکاک غلتشی	اصطکاک ایستایی	چگالی واقعی (g/cm^3)	چگالی ظاهری (g/cm^3)	میانگین قطر هندسی (mm)	ضریب کروییت	میانگین
۰/۳	۰/۱۱	۰/۱	۰/۲۶۵	۰/۸۷۲	۰/۴۹۹	۱۰/۹۲۵	۰/۹۷	

۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی متر و مساحت دهانه خروجی مخزن در چهار سطح ۱۸، ۲۱، ۲۴ و ۲۷ سانتی مترمربع، با استفاده از آزمون فاکتوریل بر پایه طرح کامل تصادفی در سه تکرار بر روی دبی متوسط مخزن مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مشاهده چگونگی حرکت دانه‌های درون مخزن آن‌ها را به دو رنگ مختلف رنگ زده شدند و به صورت لایه لایه درون مخزن ریخته شدند و با استفاده از یک دوربین دیجیتال از حرکت دانه‌ها فیلم تهیه شد تا با وضعیت حرکت دانه‌ها در شبیه سازی المان گسسته مقایسه شوند.

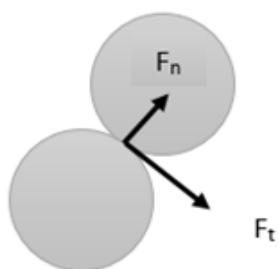
برای انجام آزمایش‌ها مخزنی که در شکل (۱) نشان داده شده است از جنس پلاکسی گلاس ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت. این نمونه مخزن‌ها در ابعاد مختلف در منطقه رفسنجان برای فرآوری پسته استفاده می‌شود. دهانه خروجی با عرض ثابت ۶ سانتی متر و طول متغیر از ۰ تا ۹ سانتی متر در نظر گرفته شده است. محصول از بالا داخل مخزن تا ارتفاع مشخص شده ریخته شد. با باز کردن دهانه، زمان و جرم محصول تخلیه شده در هر بار اندازه‌گیری و دبی متوسط جرمی مخزن \dot{m} (g/s) محاسبه گردید.

در این پژوهش تأثیر دو عامل ارتفاع محصول در چهار سطح



شکل ۱- مخزن پلاکسی گلاس (بالا) استفاده شده در آزمایشگاه و شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار (پایین)

(θ) جسم را در هر لحظه نسبت به یک موقعیت مرجع نشان می‌دهد. نیروی اعمال شده می‌تواند به دو مولفه نیروی نرمال (F_n) و نیروی مماسی (F_t) تجزیه گردد (شکل ۲).



شکل ۲- موقعیت هندسی دو دانه و وضعیت نیروی بین آنها

شبیه سازی خروجی مخرن با روش المان گسسته

در شبیه سازی حرکت مواد گرانولی با روش المان گسسته فرض بر این است که دو جسم i و j در تماس با هم حرکت کرده و به یکدیگر نیرو و گشتاور وارد می‌کنند. با استفاده از قانون دوم نیوتن نیرو و گشتاور وارده به جسم i در هر لحظه به ترتیب با روابط (۲) و (۳) بیان می‌شوند:

$$F_i(t) = m_i \frac{d^2 x_i(t)}{dt^2} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

$$T_i(t) = I_i \frac{d^2 \theta_i(t)}{dt^2} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که m_i جرم و I_i ممان اینرسی (گشتاور ماند) ذره i است. که حل دو معادله دیفرانسیل (۱) و (۲) به ترتیب موقعیت (x) و زاویه

حالات محاسبه نشده و در نتیجه شبیه سازی دانه‌ها رفتاری غیرعادی نشان می‌دهند. میزان گام زمانی برای اجرای این شبیه سازی با استفاده از رابطه (۱۰) تخمین زده شد (Li et al., 2005).

$$T = \frac{\pi R}{0.1631v + 0.8766} \sqrt{\frac{\rho}{G}} \quad (\text{رابطه } 10)$$

در رابطه (۱۰) R ، ρ و G به ترتیب میزان شعاع، نسبت پواسون، چگالی و مدول برشی جسم می باشند. میزان گام زمانی محاسبه شده، برابر با $10^{-4} \times 3/3$ ثانیه در نظر گرفته شد و هر شبیه سازی حدود ۴ ساعت بطول انجامید.

نتایج و بحث

الف: بررسی آزمایشگاهی

نتایج تجزیه واریانس دبی جرمی محصول زیتون تلخ در جدول (۲) نشان داده شده است. بررسی این جدول نشان داد که سطح دهانه خروجی و ارتفاع محصول در سطح یک درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح پنج درصد بر مقدار دبی جرمی معنی دار گردید. شکل (۳) مقدار دبی جرمی آزمایشگاهی میوه زیتون تلخ در دهانه‌ها و ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود دبی جرمی با افزایش ارتفاع و افزایش مساحت دهانه خروج تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد ولی تاثیر سطح خیلی بیشتر از تاثیر ارتفاع می‌باشد. با استفاده از داده‌های بدست آمده رابطه خطی بین دبی جرمی، ارتفاع و سطح دهانه به صورت

$$\text{رابطه } (11)$$

$$\dot{m} = 0.0079A - 0.0061H + 0.0004A \times H \quad R^2 = 99.91 \%$$

این رابطه نشان می‌دهد که سطح دهانه خروج با دبی جرمی رابطه خطی مستقیم دارد ولی ارتفاع دارای رابطه خطی معکوس است. بنابراین، در صورتیکه سطح خروجی ثابت باشد، با افزایش ارتفاع مقدار خروجی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش به دلیل افزایش اصطکاک داخلی دانه‌ها تحت تاثیر افزایش ارتفاع صورت می‌گیرد. همین رابطه ناشن می‌دهد که اثر متقابل ارتفاع و سطح دهانه خروج تاثیر مستقیم بر دبی جرمی دارد ولی تاثیر آن به اندازه تاثیر سطح به تنهایی نیست. این استدلال نشان می‌دهد که در شکل ۳ افزایش جزئی دبی جرمی با افزایش ارتفاع در حقیقت مربوط به ارتفاع نبوده بلکه به دلیل اثر متقابل ارتفاع و سطح دهانه خروج است. اگرچه رابطه (۱۱) با دقت بالا در داده‌های آزمایشگاهی برازش شده ولی تنها وضعیت کلی (میانگین) دبی خروجی را تحت تاثیر ارتفاع دانه درون مخزن و سطح دهانه خروج

نیروی نرمال (F_n) با رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Ai et al., 2011).

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \delta_n^{\frac{3}{2}} \quad (\text{رابطه } 3)$$

در رابطه بالا E^* مدول یانگ معادل، R^* شعاع معادل هستند که به ترتیب با روابط (۴) و (۵) قابل محاسبه هستند:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_j^2)}{E_j} \quad (\text{رابطه } 4)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \quad (\text{رابطه } 5)$$

R_i ، ν_j ، ν_i ، E_j ، E_i به ترتیب مدول یانگ، نسبت پواسون و شعاع جسم i و j هستند که با یکدیگر در تماس هستند.

نیروی مماسی (F_t) با رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$F_t = -S_t \delta_t \quad (\text{رابطه } 6)$$

که در این رابطه δ_t و S_t به ترتیب همپوشانی مماسی و سختی مماسی می‌باشند. مقدار سختی مماسی با رابطه (۷) محاسبه می‌گردد.

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \delta_n} \quad (\text{رابطه } 7)$$

در این رابطه G^* مدول برشی معادل است. نیروی مماسی توسط اصطکاک کولمب $\mu_s F_n$ محدود شده است که در آن μ_s ضریب اصطکاک استاتیکی است. گشتاور اصطکاک^۱ بین دو ذره i و j که با هم در تماس هستند با رابطه (۸) قابل محاسبه است.

$$\vec{\tau}_i = \vec{\tau}_j = -\mu_r F_n R^* \hat{\omega}_{rel} \quad (\text{رابطه } 8)$$

که μ_r ضریب اصطکاک غلتشی، R^* شعاع معادل دو المان در تماس و $\hat{\omega}_{rel}$ بردار واحد سرعت چرخش نسبی است. ضریب اصطکاک غلتشی (μ_r) میوه زیتون تلخ برای رابطه (۹) مورد نیاز است که از رابطه (۹) اندازه‌گیری شد (Ai et al., 2011).

$$\mu_r = \frac{vg}{t} \quad (\text{رابطه } 9)$$

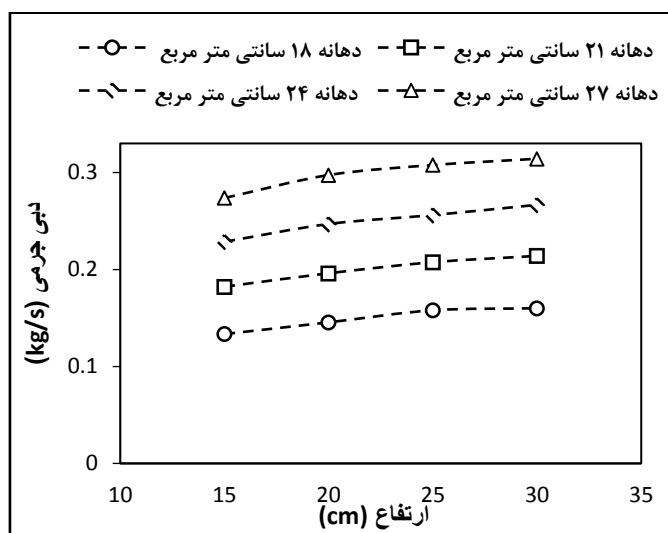
شبیه‌سازی المان گسسته با استفاده از نرم‌افزار EDEM که یکی از پیشرفته و متداول‌ترین نرم‌افزارهای در زمینه المان گسسته است استفاده گردید (Discrete Element Method Solutions Ltd, Edinburgh, England). ابتدا مشخصات فیزیکی و مکانیکی دانه (جداول ۱) و ابعاد مخزن به نرم افزار داده شدند. نرم افزار با حل عددی معادلات (۱) و (۲) موقعیت هر دانه را بطور لحظه‌ای محاسبه و بر این اساس سرعت خروجی و دبی مخزن در هر لحظه محاسبه شد. در حل عددی معادلات ذکر شده با روش DEM مقدار گام زمانی^۲ داده شده به نرم افزار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گام زمانی، مقدار فاصله زمان بین تکرار چرخه محاسبات در شبیه ساز است که مقداری ثابت است و باید برای نرم افزار تعریف شود. اگر گام زمانی کوچک باشد شبیه سازی طولانی خواهد شد و اگر گام زمانی بیش از حد بزرگ باشد بعضی

نشان می‌دهد و تغییرات لحظه ای را نمی‌تواند نشان دهد. برای بررسی تغییرات لحظه‌ای لازم است که از شبیه سازی المان

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس دبی جرمی

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مجزورات	میانگین مربعات	F	P
سطح دهانه	۳	۱۴۷۰۹۱	۴۹۰۳۰**	۲۹۰۳,۴	۰,۰۰۰
ارتفاع محصول	۳	۷۳۸۷	۲۴۶۲**	۱۴۵,۸۲	۰,۰۰۰
اثر متقابل	۹	۳۶۴	۴۰*	۲,۴۰	۰,۰۳۳
خطا	۳۲	۵۴۰	۱۷		
کل	۴۷	۱۵۵۳۸۳			

** و * به ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد و ۵ درصد



شکل ۳- تغییر دبی جرمی با ارتفاع در سطوح مختلف دهانه خروج

شتاب کمتری بخود می‌گیرند. در مجموع می‌توان گفت که در مخزن در اثر حرکت دانه‌ها ابتدا یک جریان کیفی نسبتاً منظم بوجود می‌آید که باعث تشکیل یک حفره در وسط مخزن می‌شود. سپس با افزایش شیب حفره و ریزش دانه‌ها به داخل حفره، جریان منظم کیفی به یک جریان مغشوش تبدیل می‌شود.

شکل (۵) مقدار دبی جرمی شبیه سازی شده میوه زیتون تلخ در زمان و ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. بررسی نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش دهانه خروج، زمان تخلیه کاهش ولی دبی جرمی افزایش می‌یابد. دبی جرمی پس از باز شدن حد اکثر مقدار را داشته و سپس بتدریج کاهش می‌یابد. این وضعیت در دوره حرکت کیفی (شکل ۴) اتفاق می‌افتد و هرچه سطح دهانه خروج کوچکتر باشد این دوره کاهش تدریجی ولی طولانی‌تر است. سپس دبی خروج به شدت کاهش یافته تا مخزن تخلیه می‌شود. این دوره شدت کاهش دبی در دوره حرکت مغشوش دانه‌ها اتفاق می‌افتد که برای

ب: بررسی جریان خروجی شبیه سازی شده

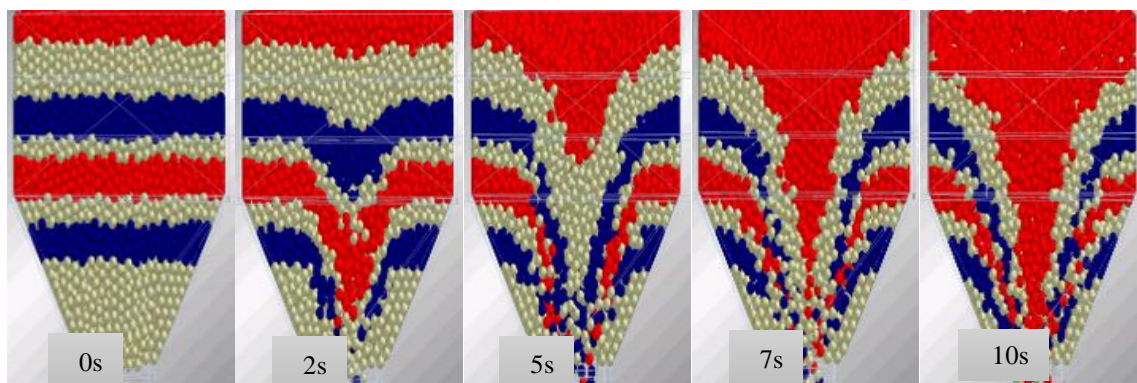
شکل (۴) الگوی جریان ذرات را هنگام تخلیه از مخزن برای ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر با دهانه ۲۱ سانتی‌متر مربع برای مشاهدات خروجی‌های آزمایشگاهی (الف) و شبیه سازی (ب) در لحظه‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که حرکت دانه‌های درون مخزن در حالت‌های آزمایشگاهی و شبیه سازی شده رفتاری کاملاً مشابه دارند که نشان می‌دهد روش المان گسسته بخوبی توانسته رفتار حرکت دانه‌های درون مخزن را شبیه سازی نماید. همان‌طور که شکل‌ها نشان می‌دهند در هنگام تخلیه سرعت دانه‌ها یکنواخت نبوده و تحت تاثیر موقعیت هر دانه نسبت به سایر دانه‌ها قرار می‌گیرند. اصولاً دانه‌های قرار گرفته در مرکز مخزن حرکت سریع‌تری نسبت به دانه‌های جانبی مخزن دارند. زیرا دانه‌ها در مجاور و چسبیده به مخزن به دلیل اصطکاکی که بین آن‌ها و بدنه بوجود می‌آید، تحت تاثیر این نیروی بازدارنده،

اصطکاک داخلی است که از طرف دانه‌ها (با شکل های نامنظم) در زمان‌های مختلف بر یکدیگر وارد کرده و مقدار خروج را تحت تاثیر آن قرار می‌دهند. مقایسه مقادیر دبی جرمی متوسط استخراج شده از این نمودارها (بدون در نظر گرفتن داده‌ی دبی در زمان صفر و سه نقطه آخر که در آنها دبی به شدت افت می‌نماید) با دبی متوسط بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی (شکل ۳) نشان داد که روند و زمان تخلیه شبیه سازی شده و آزمایشگاهی بسیار بهم نزدیک هست.

تمام دهانه‌ها حدود سه تا ۴ ثانیه طول می‌کشد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که افزایش ارتفاع محصول (شکل های ۵ الف، ب، ج، د) درون مخزن تاثیر چندانی بر دبی جرمی نداشته و با رابطه (۱۱) مطابقت دارد. مقایسه این شکل‌ها با یکدیگر نشان میدهد که با افزایش ارتفاع مقدار دبی خروجی مواد افزایش می‌یابد ولی این افزایش چندان زیاد نیست و همانطور که قبلاً گفته شد بخاطر اثر متقابل دهانه خروج و ارتفاع است. در نمودارها، نوسانات زیادی در دبی خروجی مشاهده می‌شود این نوسانات به دلیل نیروهای متفاوت



(الف)



(ب)

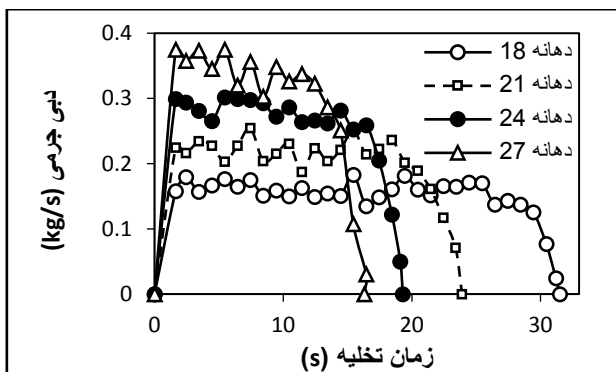
شکل ۴- وضعیت حرکت دانه‌ها در زمان‌های مختلف (الف) عکس‌های تهیه شده در آزمایشگاه، (ب) تصاویر شبیه سازی شده با نرم افزار

مقایسه نمودارهای شکل (۶) در ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد که در همه با گذشت زمان سرعت خروجی دانه‌ها کاهش می‌یابد زیرا پس از شروع به حرکت اگر چه نیروی اصطکاک ایستایی کم می‌شود و در مقابل نیروهای باز دارنده دینامیکی افزایش می‌یابند و مقداری از انرژی جنبشی دانه‌ها به دلیل برخورد با یکدیگر کاهش یافته و در نتیجه از سرعت خروجی دانه‌ها کاسته می‌شود. همچنین نمودارها نشان می‌دهند که در سه ثانیه آخر تخلیه سرعت خروجی بشدت کاهش پیدا می‌کند. این کاهش در زمانی رخ میدهد که تقریباً قسمت میانی مخزن خالی شده و حرکت دانه‌ها عمده‌تاً بر روی سطح شیب دار مخزن صورت می‌گیرد. بررسی دقیق‌تر تصاویر نهایی تهیه شده از نرم افزار نشان داد که گاهی در پایان تخلیه چند دانه در اطراف دهانه خروجی بر روی

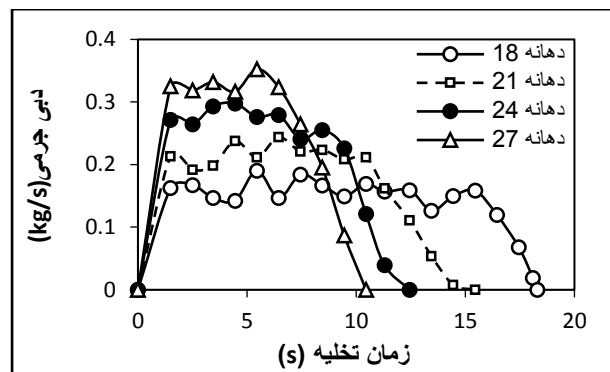
شکل (۶) مقدار سرعت شبیه سازی شده را در لحظه خروج از مخزن در زمان و ارتفاع‌های مختلف نشان می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهند که با افزایش دهانه خروج، سرعت خروجی افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که در سیالات سرعت خروج تنها تحت تاثیر ارتفاع سیال قرار می‌گیرد و اندازه دهانه خروج ارتباطی با سرعت ندارد. پس از روابط مربوط به سیالات نمی‌توان مستقیماً برای حرکت مواد گرانولی استفاده کرد. در این مواد حرکت تحت تاثیر نیروهای مختلفی از جمله نیروی ثقل، اصطکاک داخلی، نیروهای برخورد لحظه‌ای که این مواد به هم وارد می‌کنند و اصطکاک بین آنها و بدنه مخزن قرار می‌گیرد. اغلب این نیروها بازدارنده بوده و با بزرگ شدن دهانه خروج اثر آنها کاهش یافته و در نتیجه دانه‌ها با سرعت بیشتری از مخزن خارج می‌شوند.

مورد لزوم برای حرکت دانه و خروج دانه است.

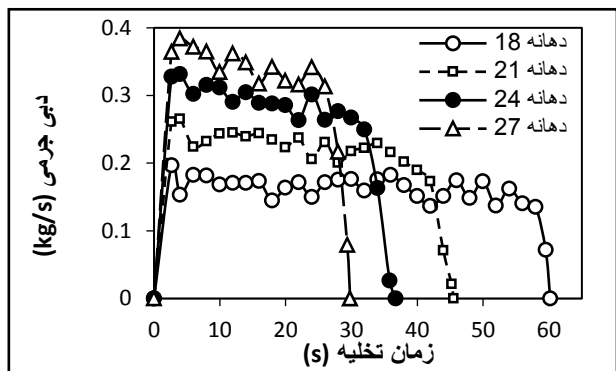
سطح شیب‌دار باقی مانده و خارج نمی‌شوند. در اینگونه مواقع نیروی اصطکاک ایستایی بین دانه و بدنه مخزن زیادتر از نیروی



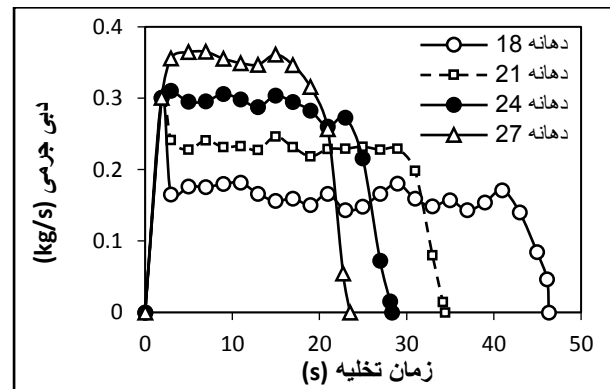
(ب)



(الف)

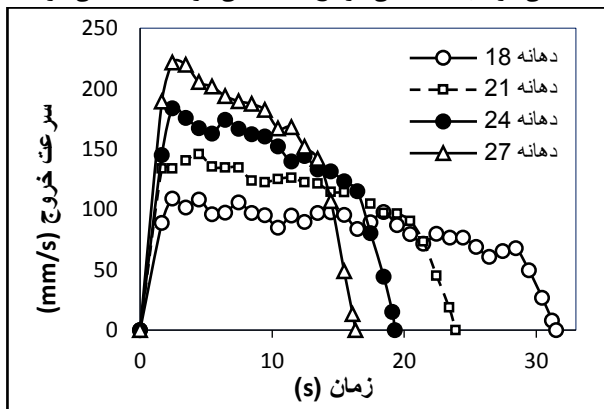


(د)

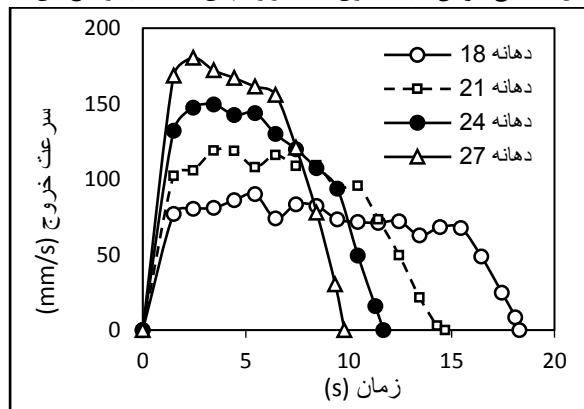


(ج)

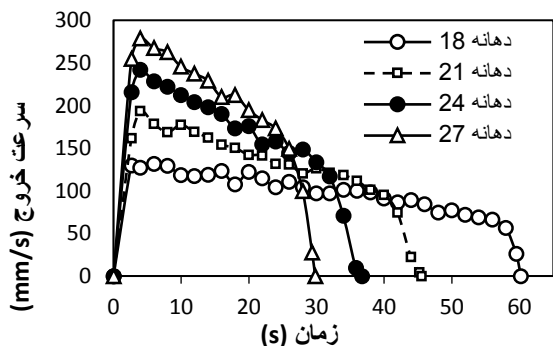
شکل ۵- دبی جریان شبیه سازی شده در زمانهای مختلف با ارتفاع‌های: (الف) ۱۵ سانتی‌متر، (ب) ۲۰ سانتی‌متر، (ج) ۲۵ سانتی‌متر، (د) ۳۰ سانتی‌متر



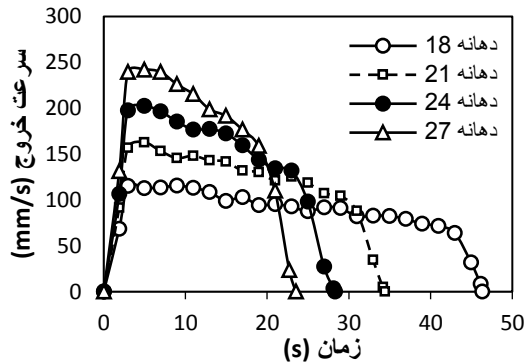
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶- سرعت خروجی شبیه سازی شده در زمانهای مختلف با ارتفاع‌های: (الف) ۱۵ سانتی‌متر، (ب) ۲۰ سانتی‌متر، (ج) ۲۵ سانتی‌متر، (د) ۳۰ سانتی‌متر

نتیجه گیری

درون مخزن با تصاویر تهیه شده توسط نرم افزار بسیار شبیه به هم بودند که نشان می دهد روش المان گسسته بخوبی قادر به شبیه سازی جریان دانه های درون مخزن می باشد. بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی، با افزایش سطح دهانه خروج دبی خروجی و سرعت خروجی افزایش می یابد ولی کاملاً از روابط سیالات تبعیت نمی کنند و در حقیقت حرکت درون مخزنی و دبی خروجی دانه های زیتون تلخ بیشتر تحت تاثیر نیروهای بازدارنده مانند اصطکاک داخلی، نیروی برخوردی لحظه ای و فشار دانه های مجاور قرار می گیرند.

هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

در این پژوهش جریان خروجی میوه زیتون تلخ از یک مخزن به صورت آزمایشگاهی بررسی و با استفاده از روش المان گسسته مورد شبیه سازی قرار گرفت. نتایج بررسی آزمایشگاهی نشان داد که ارتفاع و سطح دهانه خروجی تاثیر معنی داری بر جریان محصول دارند ولی ارتفاع مخزن دارای اثر خطی منفی، و سطح خروجی مخزن دارای اثر خطی مثبت و اثر متقابل این دو فاکتور هم درای اثر خطی مثبت است ($R^2=0.99$). تصاویر تهیه شده توسط نرم افزار نشان داد که دانه ها در مخزن یک جریان کیفی ایجاد می کنند بطوریکه سرعت دانه ها در وسط بیشتر از سرعت دانه های اطراف مخزن است. تصاویر گرفته شده از حرکت دانه های

REFERENCES

- Abbaspour Fard, M., Emadi, H. & Khojasteh Pour, M. (2009). Investigation of the effect grain shape on substrate structure and flow characteristics of silos using numerical simulations by discrete element method (DEM). *Journal of Agricultural Science and Natural Resources*, 15(6), 233-242. (In Farsi).
- Ai, J., Chen, J. F., Rotter, J.M. & Ooi, J. Y. (2011). Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Journal of Powder Technology*, 206(3), 269-282.
- Balevicius, R., Kacianauskas, R., Mroz, Z. & Sielamowicz, I. (2010). Analysis and DEM simulation of granular material flow patterns in hopper models of different shapes. *Advanced Power Technology*, 22(2), 226-235.
- Casandriou, T. & Mieila, C. (2010). Theoretical development of a mathematical model to evaluate gravimetric flow rate of seeds through orifices. *University Politehnica of Bucharest (UPB) Scientific Bulletin: Series: D, Mechanical Engineering*, 72(4), 269-280.
- Chang, C. S. & Converse, H. H. (1988). Flow rates of wheat and sorghum through horizontal orifices. *American society of Agricultural and Biological Engineers*, 31(1), 300-304.
- Crowford, N. C., Nagle, N., Sievers, D. A. & Stickel, J. J. (2016). The effects of physical and chemical preprocessing on the flo ability of corn stover. *Biomass and Bioenergy*, 85, 126-134.
- Ghobadian, B. & Rahimi, H. (2004). Biofuels-past, present and future perspective. In *International Iran and Russian Congress of Agricultural and Natural Science*. Shahre-Kord University, Shahre Kord, Iran. (In Farsi)
- Gonzales-Montellano, C., Ayuga, F. & Ooi, J. Y. (2011). Discrete element modelling of grain flow in a planar silo: influence of simulation parameters. *Granular Matter*, 13(2), 149-158.
- Li, Y., Xu, Y. & Thornton, C. (2005). A comparison of discrete element simulations and experiments for sand piles composed of spherical particles. *Powder Technology*, 160(3), 219-228.
- Mabrouk, R. Chaouki, J. & Guy, C. (2008). Wall surface effects on particle-wall friction factor in upward gas-solid flows. *Powder Technology*, 186(1), 80-88.
- Mohammadi, A., Ghazanfari Moghaddam, A. & Noorbakhsh, Sh. (2016). Modeling the path of the flow of peeled and unpeeled bitter olives from a hopper. *Journal of Agricultural Engineering*, 16(1), 95-105. (In Farsi)
- Nedderman, R. M. (1985). The flow of granular materials through orifices. *Particle Technology*, 91, 281-294.
- Razavi, M. & Akbari, R. (2007). *Biophysical properties of agricultural products and food stuffs*. Ferdowsi University Press, Mashhad. (In Farsi).
- Rong, G. Negi, S. C., & Jofriet, J. C. (1995). Simulation of the flow behavior of bulk solids in bins, Part 1: Model development and validation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(4), 247-256.
- Sadeghi, M. & Salehpour Scoie, F. (2012). Development of numerical model of motion of spherical granular materials under vibration and investigation of the effect of vibration acceleration on particle flow based on discrete element method (DEM). In: *12th Iranian Manufacturing Engineering Conference*, 6-8 Jan 2009. (In Farsi)
- Tao, H., Zhong, W. & Jin, B. (2014). Flow behavior of non-spherical particle flowing in hopper. *Journal of Frontiers in Energy*, 8(3), 315-321.
- Zarandi, M. & Ghazanfari, A. (2011). Chemical peeling of bitter olives using sodium hydroxide. In: *1st National Conference on Mechanization and Modern Technologies in Agriculture*. 27-29th Feb., Ahvaz. (In Farsi)