

## مدل سازی مسیر جریان میوه پوست گیری شده و پوست گیری نشده زیتون تلخ از یک مخزن

آسیه محمدی، احمد غضنفری مقدم\* و شهین نوربخش\*\*

\* نگارنده مسئول: کرمان، پژوهشکده باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص. پ. ۱۳۳-۷۶۱۶۹،  
تلفن: ۳۱۳۲۲۶۲۶ (۰۳۴)، پیام‌نگار: aghazanfari@uk.ac.ir

\*\* به ترتیب: دانشجوی بخش مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ استاد و عضو هیات علمی پژوهشکده  
باغبانی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان  
تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۲۰

### چکیده

در این پژوهش میوه زیتون تلخ به دو صورت پوست گیری شده و پوست گیری نشده تهیه و خصوصیات سیالی آنها شامل میانگین قطر هندسی، ضریب کرویت، چگالی ظاهری، زاویه اصطکاک ایستایی، زاویه اصطکاک داخلی اندازه گیری شد. چگونگی حرکت و مقدار جریان خروجی آنها درون مخزن مکعب مستطیلی نیز بررسی و مدل سازی شد. در این بررسی، حداقل قطر خروج از مخزن برای میوه پوست گیری شده و پوست گیری نشده به ترتیب  $4/4$  و  $3/3$  سانتی متر به دست آمد. مقایسه مقدار جریان خروجی از دهانه‌ای با قطر  $5/5$  سانتی متر نشان می‌دهد که سرعت جریان خروجی میوه پوست گیری شده و پوست گیری نشده به ترتیب برابر با  $586$  و  $554$  سانتی متر مکعب در ثانیه است. در مخزن سه منطقه افزایش سرعت، کاهش سرعت و افزایش مجدد سرعت از یکدیگر قابل تمایز بود. برای بیان موقعیت افقی دانه به صورت تابعی از زمان یک تابع نمایشی و برای بیان موقعیت عمودی و سرعت لحظه‌ای به صورت تابعی از زمان دو رابطه درجه سه پیشنهاد شد که با ضریب تبیین بالا از داده‌های آزمایشگاهی عبور کردند. سرعت جریان در دهانه خروجی به صورت تابعی از قطر دهانه با استفاده از دو مدل بورلو و گرگوری بررسی شد. مقایسه این دو نشان می‌دهد که مدل بورلو با  $R^2=0/997$  بهتر از مدل گرگوری در داده‌های آزمایشگاهی برازش شده است.

### واژه‌های کلیدی

جریان خروج دانه، زیتون تلخ، مخزن، مدل سازی

### مقدمه

(Khanavi et al., 2007). هر میوه زیتون تلخ ۶ هسته

حاوی روغن دارد ولی به دلیل داشتن ماده آللوپاتیک این روغن غیر خوراکی است و از آن برای مصارف صنعتی استفاده می‌شود (Zarandi et al., 2011). برای فراوری‌های صنعتی، لازم است میوه زیتون تلخ بعد از خشک شدن به صورت پوست گیری شده یا پوست نشده در انبار ذخیره شود و در مواقع لزوم از انبار تخلیه و به

درخت زیتون تلخ (*Meliaazedarach* L.) از خانواده شال سنجد و از شاخه ملیاسه است که پنج گونه از آن در دنیا وجود دارد و دو گونه آن در ایران می‌روید (Karimi, 2005). میوه زیتون تلخ به دلیل داشتن ترکیبات آللوپاتیک<sup>۱</sup> دارای تأثیرات ضد قارچ، ضد عفونی کننده و دافع حشرات است

شد (Chang & Converse, 1998). آزمایش سه گونه گندم با رطوبت ۱۲/۹ تا ۱۵/۱ درصد و ۴ گونه ذرت با رطوبت ۱۱/۲ تا ۱۷/۷ درصد نشان داده است که مقدار جریان با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد. افزایش رطوبت بر جریان خروج ذرت تأثیر بیشتری دارد (Chang & Converse, 1998). در مجموع می‌توان گفت که مقدار جریان خروجی دانه از مخزن به رطوبت آن دانه وابسته است.

اصطکاک بین مواد گرانولی و بین این مواد و سطح داخلی سیلو در وضعیت جریان مواد گرانولی در سیلو مؤثر است. هرچه سطح داخلی مخزن صاف‌تر باشد اصطکاک کمتر است و جریان یکنواخت‌تر برقرار می‌شود. زبر بودن سطح داخلی مخزن سرعت حرکت موادی که در تماس با این سطح هستند کند می‌کند ولی این وضعیت با فاصله گرفتن مواد از سطح سیلو کمتر می‌شود. بدین ترتیب سرعت حرکت مواد در داخل سیلو یکنواخت نیست و ذرات بسته به اینکه در کدام قسمت سیلو هستند سرعت‌های متفاوتی دارند (Nedderman, 1992; Mabrouk & Chaouki, 2007). مواد درون مخزن تحت تأثیر نیروی وارده از مواد مجاور، مسیر حرکت مشخصی ندارد ولی مسیر و سرعت موادی که نزدیک به هم هستند تقریباً یکسان است (Choi et al., 2005). تحقیقات نشان می‌دهد که با افزایش اصطکاک داخلی مواد مقدار جریان خروجی افزایش می‌یابد. یک راه تخمین اصطکاک داخلی مواد اندازه‌گیری زاویه ریپوز آنهاست. زاویه ریپوز به اصطکاک داخلی مواد بستگی دارد. هرچه اصطکاک داخلی بیشتر باشد زاویه ریپوز نیز بیشتر می‌شود (Razavi & Akbari, 2006).

دیگر عامل تأثیرگذار روی مقدار جریان خروجی در سیلوها شکل ذرات تشکیل دهنده مواد گرانولی است (Nedderman, 1985; Cleary, 1999). در یک پژوهش

واحدهای مختلف فراوری منتقل شود. حرکت و جریان درون مخزنی این میوه‌ها که کروی هستند، مشابه حرکت و جریان مواد گرانولی<sup>۱</sup> صنعتی و معدنی است.

عوامل متعددی بر چگونگی جریان و میزان خروج مواد گرانولی از مخزن نقش دارند. مطالعات آزمایشگاهی روی جریان مواد دانه‌ای در سیلوها نشان می‌دهد که یکی از عوامل مهم در رفتار این گونه مواد در سیلوها اندازه دهانه خروجی است (Nedderman, 1985). تحقیقات نشان می‌دهد که اگر قطر دهانه خروجی کمتر از ۱۵ برابر قطر ذرات باشد مواد گرانولی به خوبی جریان پیدا نمی‌کنند. در این دهانه‌های کوچک، مواد گرانولی روی دهانه خروجی پل تشکیل می‌دهند که باعث متوقف شدن جریان خروجی خواهد شد. با افزایش اندازه دهانه خروجی، مواد گرانولی شروع به حرکت می‌کنند و مقدار جریان خروجی افزایش می‌یابد (Razavi & Akbari, 2006; Casandroiu & Mieila, 2010). شکل دهانه خروجی نیز در مقدار خروج مواد نقش دارد. مقایسه دو دهانه دایره‌ای و مربعی با قطر و طول برابر نشان می‌دهد که مقدار جریان در دهانه مربعی بیش از مقدار جریان در دهانه دایره‌ای است ولی اگر سطح دایره و مربع برابر باشد خروجی از دهانه دایره‌ای بیشتر است (Mieila & Casandroiu, 2009). برای جلوگیری از متوقف شدن جریان لازم است یک قطر کمینه برای هر ماده گرانولی مشخص شود (Mortazavi et al., 2009).

در هنگام طراحی سیلو، ذخیره‌سازی و بسته‌بندی موادی نظیر حبوبات، بقولات، دانه‌های روغنی، انواع پودرها و آردها دانستن خاصیت چگالی توده سیال بسیار با اهمیت است. هر تغییری در چگالی، روی مقدار جریان تأثیر دارد (Beverloo, 1961). آزمایش‌ها روی گندم و ذرت نشان می‌دهد که با افزایش چگالی گندم و ذرت مقدار جریان آنها در مخزن افزایش می‌یابد. در این آزمایش‌ها تغییر چگالی با تغییر رطوبت محصول انجام

می‌یابد (Fowler & Glastonbury, 1958). آزمایش در محدوده ارتفاع بیشتر نشان می‌دهد که اگر ارتفاع از دو برابر قطر سیلو بیشتر شود مقدار جریان خروجی تقریباً ثابت و مستقل از ارتفاع است (Chang & Converse, 1998).

پیش‌بینی مقدار جریان خروجی مواد از سیال نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته و از مدل‌های متفاوتی استفاده شده است. بیشترین مدل ریاضی که برای پیش‌بینی مقدار جریان خروجی استفاده می‌گردد مدل بورلو<sup>۱</sup> است که در آن مقدار جریان به‌صورت تابعی از چگالی و اندازه دهانه خروجی بیان می‌شود (Chang & Converse 1998; Beverloo, 1961). از مدل گرگوری<sup>۲</sup> نیز برای پیش‌بینی مقدار جریان مواد گرانولی از سیلو استفاده شده است. در این مدل، مقدار جریان مواد بستگی دارد به چگالی، اندازه دهانه خروجی و ضریب کشش مواد (Gregory & Fedler, 1987; Fedler, 1988). اخیراً پرورش درخت زیتون تلخ در سطح شهرها و مناطق جنگلی ایران توسعه یافته و استفاده از میوه این درخت برای فراوری‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. برای این فراوری‌ها لازم است که دانه‌ها به‌صورت پوست‌گیری شده یا پوست‌گیری نشده در سیلو ذخیره شوند. هدف از این پژوهش بررسی و مقایسه مقدار جریان میوه زیتون تلخ پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده از دهانه‌های خروجی یک مخزن با مقطع دایره‌ای و چگونگی حرکت آنها در حین تخلیه است.

### مواد و روش‌ها

برای اجرای آزمایش حدود ۱۰ کیلوگرم میوه زیتون تلخ مورد نیاز تهیه شد. این میوه‌ها در آذر ماه سال ۱۳۹۰ از درختان موجود در منطقه هفت باغ استان کرمان برداشت شدند. میوه‌ها که کاملاً روی درخت خشک شده بودند به‌صورت دستی از خوشه جدا و تمیز شدند. برای

برای بررسی اثر شکل ذرات، با انتخاب دانه‌هایی به شکل کشیده و کروی با حجم ثابت، وضعیت خروج آنها از یک مخزن با دهانه دایره‌ای بررسی شد. نتایج بررسی نشان می‌دهد که دانه‌های میله‌ای در هنگام تخلیه به دلیل ایجاد پل روی دهانه خروجی، از خود مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. تشکیل و شکسته شدن مکرر پل در بستر این‌گونه مواد سبب ایجاد جریان تخلیه نامنظم و بهمن‌وار می‌شود و در نتیجه این‌گونه رفتار مواد میله‌ای، نسبت به مواد کروی، شدت جریان خروجی کمتری به‌دست می‌آید (Abbaspour Fard *et al.*, 2009).

آزمایش با شن برای بررسی تاثیر اندازه ذرات بر مقدار خروجی نشان می‌دهد که در اثر کاهش قطر ذرات تا قطر ۰/۲ میلی‌متر، میزان جریان افزایش می‌یابد و از آن به بعد با کاهش قطر ذرات میزان جریان خروجی مخزن کاهش می‌یابد. در قطرهای خیلی کوچک، مواد گرانولی خاصیت جریان‌پذیری خود را از دست می‌دهند و میل به کلوخه‌شدن پیدا می‌کنند و برای حرکت نیاز به ضربه زدن به بدنه مخزن خواهند داشت (Fowler & Glastonbury, 1958). در آزمایش‌هایی مشابه که در آنها از گندم استفاده شد، معلوم گردید که برای یک قطر دهانه ثابت به قطر ۲۵ سانتی‌متری، سرعت جریان گندم با میانگین قطر هندسی مشخص، حدود ۱۰ درصد بیشتر از سرعت جریان سورگم با همان میانگین قطر هندسی بود (Chang & Converse, 1998).

در مواد سیال مقدار جریان خروجی از مخزن تابعی از ارتفاع سیال است ولی در مواد گرانولی مقدار جریان خروجی وابسته به ارتفاع نیست و بیشتر تحت تاثیر فشار لایه‌های بالایی و اصطکاک داخلی آنها قرار می‌گیرد (Oldal *et al.*, 2011). بررسی‌ها روی مقدار جریان خروجی مواد گرانولی در مقیاس آزمایشگاهی و در محدوده ارتفاع ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر نشان داده است که با افزایش ارتفاع مقدار جریان تا حدی افزایش

1- Beverloo Model

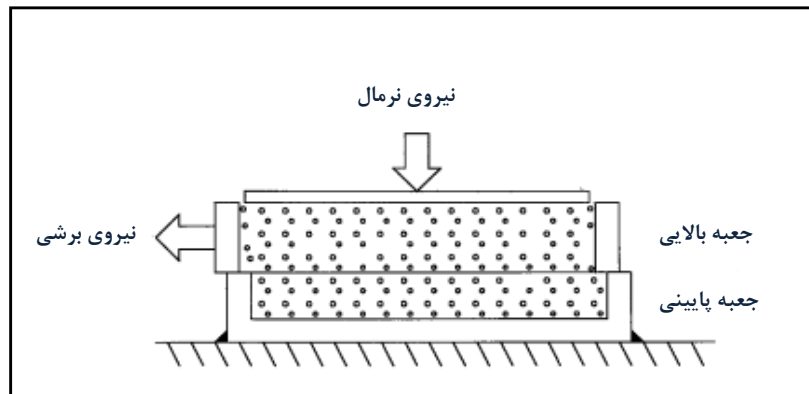
2- Gregory Model

جریان آن در درون مخزن تأثیر می‌گذارند اندازه گرفته شدند. این ویژگی‌ها شامل میانگین قطر هندسی، ضریب کرویت، چگالی ظاهری، زاویه اصطکاک ایستایی، زاویه اصطکاک داخلی بودند که با روش‌های معمول مورد اندازه‌گیری شدند (Mohsenin, 1978; Razavi & Akbari, 2006). برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی از روش جعبه برش مستقیم استفاده شد که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این اندازه‌گیری جعبه پایینی روی سطح کاملاً ثابت است ولی جعبه بالایی می‌تواند روی آن سر بخورد. میوه زیتون تلخ درون جعبه‌ها ریخته شد و بعد از پرشدن جعبه‌ها دریچه بسته شد و یک وزنه ۳۰۰ گرمی روی آن قرار داده شد. سپس جعبه بالایی با استفاده از یک نیروسنج کشیده شد و نیروی مورد لزوم در لحظه به حرکت در آمدن آن اندازه‌گیری شد (Abou-Chakra & Tuzun, 1999).

اجرای آزمایش، میوه‌ها به دو گروه تقسیم شدند. یک گروه پوست‌گیری نشده و گروه دیگر برای پوست‌گیری نشدن. برای پوست‌گیری میوه زیتون تلخ از محلول هیدروکسید سدیم استفاده شد (Zarandi et al., 2011). بدین منظور ۴ لیتر محلول هیدروکسید سدیم در غلظت ۶ درصد تهیه شد. میوه‌ها درون محلول به مدت ۱۰ دقیقه جوشانیده و هم زده شدند و بدین ترتیب پوست میوه جدا شد. بعد از پوست‌گیری هر دو گروه میوه در محیط آزمایشگاه قرار داده شدند تا رطوبت آنها به حالت تعادل با محیط آزمایشگاه برسد. کلیه آزمایش‌ها به نحوی که توضیح داده می‌شود به صورت یکسان روی دو گروه میوه‌های پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده ادامه یافت.

#### اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی مؤثر بر جریان

برخی از ویژگی‌های فیزیکی میوه زیتون تلخ که بر



شکل ۱- روش جعبه برش مستقیم

$\sigma$  و  $\tau$  به ترتیب تنش برشی و تنش نرمال هستند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\tau = \frac{\tau_s}{A} \times 100 \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \times 100 \quad (3)$$

از رابطه ۱ زاویه اصطکاک داخلی به دست آمد:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\tau}{\sigma} \right) \quad (1)$$

که در آن،

زاویه اصطکاک ایستایی، در نظر گرفته شد. دهانه نوع دایره‌ای و با خروجی قابل تعویض ساخته شد.

برای تعیین مسیر حرکت دانه‌ها، مخزن از کف تا ارتفاع حدود ۴۰ سانتی‌متری از میوه زیتون تلخ پر شد، آنگاه ۴ میوه زیتون تلخ رنگ زده شده (با هدف متمایز بودن از بقیه دانه‌ها) در سطح بالایی میوه‌ها در فواصل منظم از پهلو تا وسط قرار داده شدند. اندازه دريچه خروجی برای آزمایش‌ها تعیین مسیر، موقعیت و سرعت ثابت انتخاب شد. از دريچه، همزمان با باز شدن دهانه خروجی، با یک دوربین دیجیتال از مراحل حرکت دانه‌ها در فواصل زمانی مشخص عکس گرفته شد. تصاویر گرفته شده به کامپیوتر منتقل شدند و از نرم افزار CATIA برای مشخص کردن موقعیت (x, y) دانه‌های رنگ شده در هر ثانیه در تصاویر استفاده شد. با مشخص بودن مکان هر میوه x و y در هر لحظه، مسیر حرکت آن میوه رسم شد. موقعیت افقی و عمودی در هر لحظه برای هر ۴ میوه رنگ شده به دست آمد. برای به دست آوردن سرعت لحظه‌ای میوه از داده‌های موقعیت در راستای عمودی استفاده شد. سرعت اولیه میوه‌ها درون مخزن صفر بود و با باز شدن دريچه خروجی میوه‌ها به سمت آن جریان می‌یابند. بعد از شروع حرکت میوه‌ها، در هر نیم ثانیه با داشتن موقعیت اولیه و ثانویه سرعت در راستای عمودی تعیین شد.

علاوه بر مکان‌یابی آزمایشگاهی، در مدل‌سازی موقعیت میوه با استفاده از نرم‌افزار MATLAB یک رابطه چند جمله‌ای برای موقعیت عمودی و یک رابطه نمایی برای موقعیت افقی میوه‌ها در هر لحظه درون مخزن به دست آمد و سپس ضرایب ثابت برای معادله مربوط به هر میوه محاسبه شدند. در پایان ضریب تبیین برای مدل‌های موقعیت‌های عمودی و افقی میوه‌های مشخص شده به دست آمد.

سرعت لحظه‌ای نیز با توجه به توابع ریاضی مدل‌سازی شد. برای بررسی ریاضی روند تغییرات سرعت

که در روابط بالا،  $\tau_s$  = نیروی برشی؛ و  $N$  = نیروی عمودی است.

### تعیین حداقل قطر دهانه خروجی مخزن

در مقدمه گفته شد که اگر قطر دهانه خروجی کوچک باشد مواد گرانولی روی دهانه خروجی پل تشکیل می‌دهند و از مخزن خارج نمی‌شوند. برای تعیین حداقل قطر دهانه خروجی مخزن از رابطه ۴ استفاده شد (Mortazavi et al., 2009):

$$D_b = \left( \frac{c}{\rho} \right) [1 + \sin \phi] \quad (4)$$

در این رابطه،  $D_b$  = حداقل قطر مورد نیاز دريچه خروجی برای جلوگیری از ایجاد پل توسط مواد در بالای دريچه خروجی است و به عامل چسبندگی طبیعی<sup>۱</sup> (C) بستگی دارد که طی اندازه‌گیری زاویه اصطکاک داخلی تعیین می‌شود. این عامل مقدار عرض از مبدا روی محور تنش برشی در نمودار تنش برشی در مقابل تنش فشاری است. همچنین در این رابطه  $\phi$  و  $\rho$  به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و چگالی میوه زیتون تلخ هستند. با جای‌گذاری این سه پارامتر در رابطه بالا حداقل قطر مورد نیاز دريچه خروجی برای میوه زیتون تلخ پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده محاسبه شد. برای خروج پیوسته مواد گرانولی از مخزن، لازم است که قطر دهانه خروجی از قطر حداقل محاسبه شده بزرگتر باشد.

### بررسی موقعیت و سرعت میوه در مخزن

برای بررسی موقعیت و سرعت حرکت دانه‌ها از یک مخزن مکعب مستطیلی با کف شیب‌دار از جنس پلاکسی‌گلاس استفاده شد. قسمت بالای مخزن به شکل مکعب مستطیلی با ابعاد ۲۵×۲۵×۳۰ سانتی‌متر و قسمت پایین آن شیب‌دار و با شیب ۲۵/۵ درجه، برابر با متوسط

قطر مؤثر (سانتی‌متر مربع) هستند. برای تعیین قطر مؤثر از رابطه ۶ استفاده شد:

$$D_e = D - 1.4d \quad (۶)$$

که در آن،

$D$  و  $d$  به ترتیب قطر دهانه و میانگین اندازه ذرات برحسب سانتی‌متر هستند. میزان جریان حجمی دانه در دهانه‌ها با شکل‌ها و اندازه‌های متنوع مواد با استفاده از فرمول بالا محاسبه شد و همچنین ضریب ثابت تخلیه  $C$  برای میوه زیتون تلخ به دست آمد.

گرگوری و فدلر (Gregory & Fedler, 1987) براساس یک نیروی رو به پایین متعادل در جهت جریان و یک نیروی رو به بالا خلاف جریان، رابطه ۷ را برای پیش‌بینی مقدار جریان حجمی  $Q$  در دهانه به دست آوردند (Chang & Converse, 1998):

$$Q_e = \frac{\pi g}{16k} \rho D^3 \quad (۷)$$

که  $g$ ،  $\rho$ ،  $D$  و  $k$  به ترتیب شتاب گرانشی (سانتی‌متر بر مجذور ثانیه)؛ چگالی حجمی (گرم بر مترمکعب)؛ قطر دهانه (سانتی‌متر) و ضریب کشش (گرم بر ثانیه بر سانتی‌متر مربع) هستند.

### نتایج و بحث

میانگین خصوصیات اندازه‌گیری شده برای دو میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده زیتون تلخ در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که جدول نشان می‌دهد با توجه به بزرگتر بودن قطر میوه پوست‌گیری شده انتظار می‌رود، اگر سایر خصوصیات یکسان باشند، مقدار خروج میوه پوست‌گیری شده بیشتر باشد ولی سایر خصوصیات میوه در الگوی حرکت و مقدار خروج مؤثر

به عنوان تابعی از زمان بیان شد. با استفاده از نرم‌افزار MATLAB یک رابطه سه جمله‌ای برای سرعت لحظه‌ای میوه درون مخزن ارائه و ضرایب ثابت برای هر میوه مشخص شده درون مخزن، محاسبه شد.

### بررسی جریان خروجی میوه

برای بررسی مقدار جریان خروج (سانتی‌متر مکعب بر ثانیه) میوه‌های پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده به صورت تابعی از قطر دهانه خروجی، حجم مشخصی از آنها را داخل مخزن پلاکسی گلاس ریخته و زمان خالی شدن مخزن اندازه‌گیری شد. قطر دهانه خروجی برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در پنج سطح و به ترتیب در محدوده ۴۰ تا ۶۰ میلی‌متر و ۵۵ تا ۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد (با توجه به رابطه ۴). حداقل قطر دهانه برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده به ترتیب ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر برابر با مقدار آزمایشگاهی آن در نظر گرفته شد. مقایسه مقدار خروج میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در یک دهانه با قطر یکسان (۵۵ میلی‌متر) صورت گرفت.

برای مدل‌سازی جریان خروجی از مخزن از دو مدل بورلو و گرگوری استفاده شد. مدل بورلو بیشترین کاربرد را برای پیش‌بینی مقدار جریان دهانه‌ها دارد (Beverloo, 1961) که با استفاده از تئوری آنالیز ابعادی اعمال شده برای پدیده جریان دانه‌ها توسعه یافته است. جریان محاسبه شده از معادله بورلو:

$$Q = CA_e \sqrt{gD_e} \quad (۵)$$

که در آن،

$Q$  = مقدار جریان حجمی (سانتی‌متر مکعب بر ثانیه)؛  $g$ ،  $C$  و  $A_e$  به ترتیب شتاب گرانشی (سانتی‌متر بر مجذور ثانیه)؛ ضریب ثابت تخلیه و مساحت دهانه مؤثر محاسبه شده از

مدلسازی مسیر جریان میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری...

میوه پوست‌گیری نشده کمتر از زاویه اصطکاک میوه پوست‌گیری شده است که نشان می‌دهد میوه‌ها کمتر به یکدیگر نیروی مقاومتی وارد می‌کنند و جریان‌پذیری بهتری دارند. حداقل قطر دهانه خروجی در میوه پوست‌گیری نشده بیشتر از حداقل قطر دهانه خروجی میوه پوست‌گیری شده به دست آمد. مقدار کمتر حداقل اندازه دهانه خروجی مورد نیاز نشان دهنده افزایش بیشتر جریان با افزایش قطر خروجی است. با این بررسی از مجموعه این خصوصیات نمی‌توان پیش‌بینی کرد که خروجی کدام نوع میوه از دیگری بیشتر است.

هستند. کروییت میوه پوست‌گیری نشده نیز از میوه زیتون تلخ پوست‌گیری شده بزرگتر است، غلتیدن آن هم راحت‌تر است و در نتیجه میوه پوست‌گیری نشده باید بهتر جریان یابد. چگالی ظاهری میوه زیتون تلخ پوست‌گیری نشده از چگالی میوه پوست‌گیری شده کمتر است که در نتیجه تحت تأثیر نیروی گرانشی کمتری قرار می‌گیرد و باعث کاهش سرعت آن می‌شود. زاویه اصطکاک ایستایی میوه پوست‌گیری نشده کمتر از زاویه اصطکاک میوه پوست‌گیری شده است که سبب می‌شود کمتر تحت تأثیر اصطکاک دیواره مخزن قرار گیرد و در نتیجه مقدار سرعت میوه پوست‌گیری نشده می‌انجامد. زاویه اصطکاک داخلی

جدول ۱- خصوصیات میوه زیتون تلخ پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده

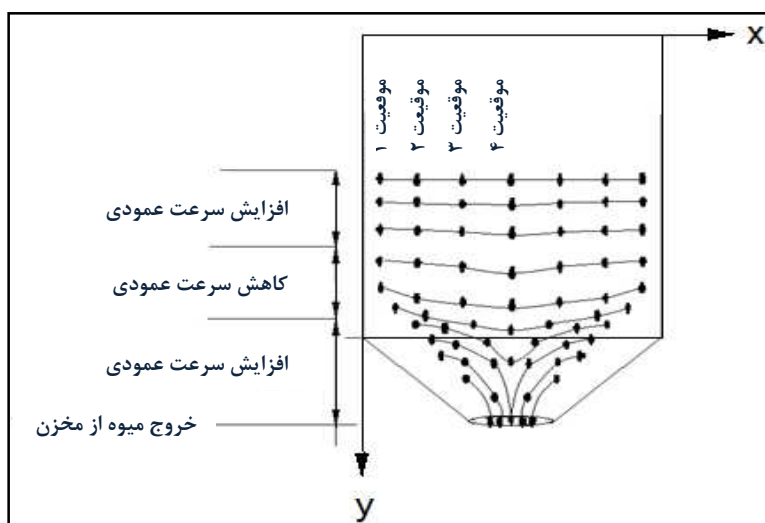
میوه	میانگین قطر هندسی (میلی‌متر)	کروییت	چگالی ظاهری (کیلوگرم بر متر مکعب)	زاویه اصطکاک ایستایی (درجه)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	حداقل قطر دریچه (سانتی‌متر)
پوست‌گیری شده	۷/۹	۰/۸۶	۵۵۲/۱	۲۷/۳	۴۰/۶	۴/۶
پوست‌گیری نشده	۱۰/۳	۰/۹۴	۴۸۱/۰	۲۴/۰	۳۲/۷	۶/۳

توضیح: مقادیر رنگ شده نشان دهنده انتظار بیشتر جریان است.

### بررسی مسیر جریان

جریان میوه‌هایی را که در بالای مخزن قرار گرفته‌اند با گذشت زمان نشان می‌دهد. موقعیت ۱ نزدیکترین میوه به دیواره مخزن است و به همین ترتیب میوه‌ها از دیواره مخزن فاصله می‌گیرند تا میوه شماره ۴ که دقیقاً در وسط قرار دارد.

مسیر جریان هر میوه تحت تأثیر میوه‌های مجاور و همچنین موقعیت اولیه آن قرار می‌گیرد. به محض باز شدن دریچه خروجی، میوه‌های نزدیک دهانه مانند یک ستون از دهانه خارج می‌شوند و بقیه دانه‌ها به سمت این ستون حرکت می‌کنند. شکل ۲ مسیر کلی



شکل ۲- نمودار جابه‌جایی برای میوه زیتون تلخ

$$X = Ae^{-bt} \quad (۸)$$

که در آن،

$t$  = زمان؛  $A$  = موقعیت اولیه میوه؛ و  $b$  پارامتری است که با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی تعیین می‌شود و نشان دهنده سرعت و تغییر وضعیت افقی دانه است. پس از برازش داده‌ها در این مدل پارامتر آن و مقدار  $R^2$  برای موقعیت‌های مختلف و برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر بالای  $R^2$  نشان‌دهنده مناسب بودن مدل ارائه شده برای موقعیت افقی میوه است.

عکس‌های تهیه شده از حرکت دانه در مخزن نشان می‌دهند که میوه‌ها در بخش بالایی مخزن تقریباً به صورت عمودی حرکت می‌کنند و حرکت افقی چندانی ندارند. با تخلیه بیشتر مخزن و نزدیک شدن میوه‌ها به کف شیب‌دار مخزن، حرکت در راستای افقی شروع می‌شود و این حرکت به تدریج افزایش می‌یابد و بدین ترتیب میوه‌ها به سمت مرکز مخزن حرکت می‌کنند. آزمایش نشان می‌دهد که این حرکت از فاصله‌ای تقریباً برابر با یک چهارم عرض مخزن شروع می‌شود. با بررسی داده‌های موقعیت لحظه‌ای هر میوه در راستای افقی، برای پیش‌بینی موقعیت افقی هر دانه ( $X$ ) به صورت تابعی از زمان یک مدل نمایی به صورت زیر پیشنهاد شد:

جدول ۲- مقدار ضرایب در رابطه ۸ برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده زیتون تلخ

$R^2$		B		A		موقعیت
پوست‌گیری نشده	پوست‌گیری شده	پوست‌گیری نشده	پوست‌گیری شده	پوست‌گیری نشده	پوست‌گیری شده	
۰/۹۳۲	۰/۹۵۱	۰/۰۷۱	۰/۰۷۶	۱۰/۵۰۰	۱۰/۲۰۰	موقعیت ۱
۰/۹۰۶	۰/۹۹۰	۰/۰۷۲	۰/۰۹۸	۷/۵۰۰	۶/۲۰۰	موقعیت ۲
۰/۹۳۶	۰/۹۳۴	۰/۱۳۳	۰/۰۷۷	۳/۹۰۰	۳/۰۰۰	موقعیت ۳
۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۰۰	۰/۰۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	موقعیت ۴



$t =$  زمان است و  $a, b, c$  و  $d$  ضرایب معادله درجه سه هستند. داده‌های آزمایشگاهی در مدل بالا برازش شد و ضرایب هر مدل برای هر موقعیت و نوع میوه از نظر پوست گرفته شده است یا نه محاسبه شد. این ضرایب به همراه ضریب تبیین هر یک در جدول ۳ آورده شده‌اند. مقادیر بالای ضریب تبیین  $R^2$  نشان‌دهنده مناسب بودن مدل تعیین موقعیت عمودی ارائه شده است.

همچنین، با توجه به تغییرات موقعیت عمودی هر دانه با زمان و با توجه به شکل این تغییرات، برای موقعیت عمودی در هر لحظه یک مدل درجه ۳ به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$Y = a + bt + ct^2 + dt^3 \quad (9)$$

که در آن،

جدول ۳- مقدار ضرایب در رابطه ۹ برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده زیتون تلخ

موقعیت	میوه	a	b	c	d	$R^2$
موقعیت ۱	پوست‌گیری شده	-۳/۴۳۲	۶/۷۰۷	-۱/۵۹۲	۰/۱۵۹	۰/۹۹۶
	پوست‌گیری نشده	-۴/۲۰۶	۵/۹۹۱	-۰/۶۴۳	۰/۰۳۶	۰/۹۸۸
موقعیت ۲	پوست‌گیری شده	-۲/۸۷۴	۶/۰۹۵	-۱/۴۸۵	۰/۱۶۹	۰/۹۹۸
	پوست‌گیری نشده	-۴/۰۳۷	۵/۶۸۵	-۰/۵۱۹	۰/۰۲۸	۰/۹۸۵
موقعیت ۳	پوست‌گیری شده	-۳/۶۲۲	۷/۵۳۷	-۲/۰۷۳	۰/۲۴۴	۰/۹۹۸
	پوست‌گیری نشده	-۲/۸۵۴	۴/۲۸۵	-۰/۱۴۳	۰/۰۰۷	۰/۹۹۵
موقعیت ۴	پوست‌گیری شده	-۴/۰۴۶	۸/۸۲۱	-۲/۵۶۹	۰/۳۱۴	۰/۹۹۳
	پوست‌گیری نشده	-۲/۶۷۹	۴/۲۴۷	-۰/۱۲۵	۰/۰۱۳	۰/۹۹۷

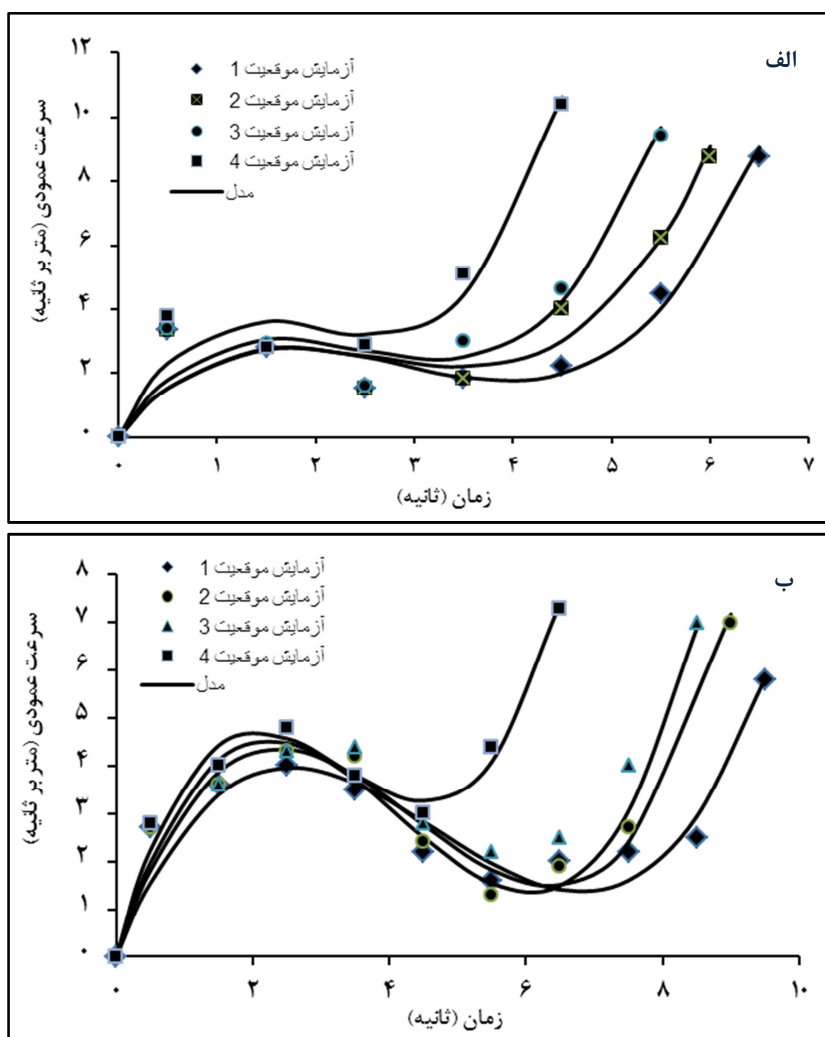
شکل ۳ نشان داده شده است و مدل پیشنهاد شده برای تعیین سرعت لحظه‌ای ( $v$ ) میوه به صورت زیر است:

$$v = at + bt^2 + ct^3 \quad (10)$$

در این رابطه،  $t =$  زمان است و  $a, b, c$  ضرایب معادله هستند. مقدار ضرایب رابطه ۱۰ برای هر میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در جدول ۴ ارائه شده است. مدل برای سرعت لحظه‌ای به خوبی در داده‌های آزمایشگاهی برازش شده است که نشان‌دهنده مناسب بودن این مدل است.

### بررسی پروفیل سرعت عمودی

بررسی شکل ۳ نشان می‌دهد که سرعت میوه در هر لحظه در مخزن تغییر می‌کند. در مخزن سه منطقه افزایش سرعت، کاهش سرعت و مجدداً افزایش سرعت از هم قابل تمایز هستند. در ابتدای باز شدن خروجی، سرعت میوه‌های سطحی افزایش می‌یابد. سپس با نزدیک شدن میوه‌ها به سطح شیب‌دار مخزن سرعت کاهش می‌یابد و میوه‌ها به سمت مرکز مخزن متمایل می‌شوند. با نزدیک شدن میوه‌ها به مرکز، سرعت آنها مجدداً افزایش می‌یابد و رو به پایین حرکت می‌کنند تا از مخزن خارج شوند. وضعیت کلی این حرکت برای دو نوع میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در



شکل ۳- وضعیت کلی سرعت در موقعیت‌های مختلف مدل عبور داده شده از آنها: (الف) پوست‌گیری شده و (ب) پوست‌گیری نشده

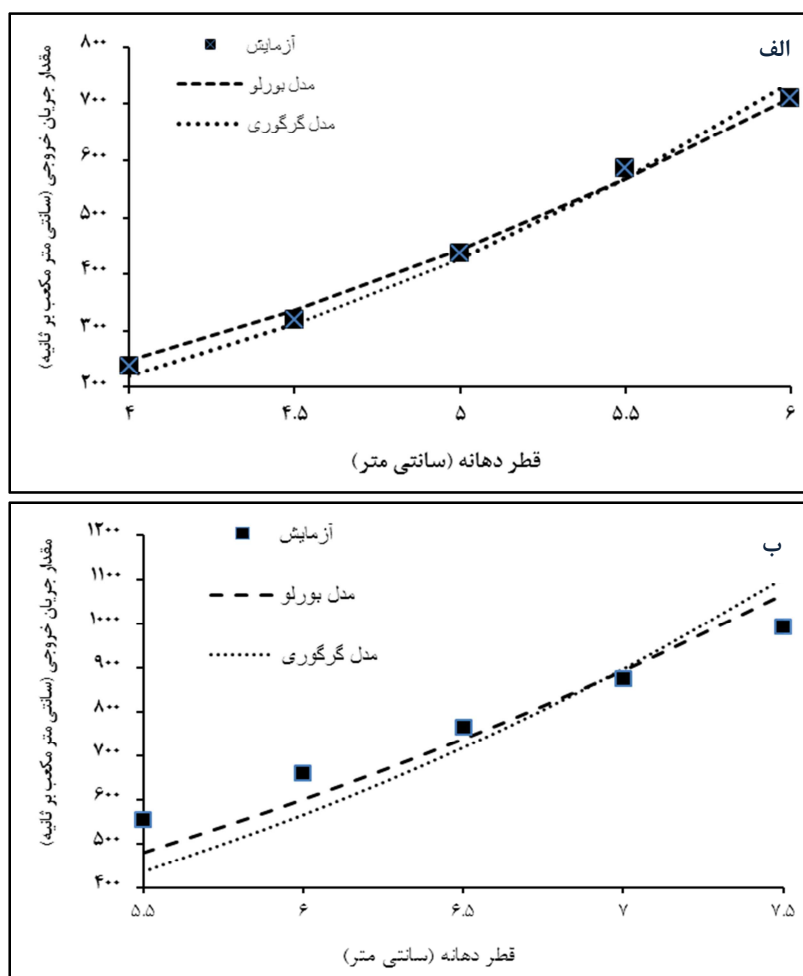
جدول ۴- مقدار ضرایب در رابطه ۱۰ برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده زیتون تلخ

موقعیت	میوه	a	b	c	$R^2$
موقعیت ۱	پوست‌گیری شده	۳/۸۱۸	-۱/۵۹۶	۰/۱۸۸	۰/۹۱۳
	پوست‌گیری نشده	۳/۵۳۶	-۰/۹۵۰	۰/۰۶۷	۰/۸۸۹
موقعیت ۲	پوست‌گیری شده	۳/۸۳۱	-۱/۶۵۱	۰/۲۱۰	۰/۹۰۶
	پوست‌گیری نشده	۴/۱۸۴	-۱/۲۰۹	۰/۰۹۲	۰/۹۵۱
موقعیت ۳	پوست‌گیری شده	۴/۵۸۱	-۲/۱۳۷	۰/۲۹۵	۰/۹۲۶
	پوست‌گیری نشده	۴/۶۰۷	-۱/۴۰۹	۰/۱۱۳	۰/۹۲۸
موقعیت ۴	پوست‌گیری شده	۶/۱۶۲	-۳/۳۳۱	۰/۵۵۲	۰/۹۴۷
	پوست‌گیری نشده	۵/۳۴۳	-۱/۸۷۹	۰/۱۸۹	۰/۹۷۶

### بررسی جریان خروجی

مقایسه مقدار جریان خروجی در دهانه دایره‌ای با قطر ۵۵ میلی‌متر نشان می‌دهد که مقدار جریان خروجی میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده به ترتیب برابر با ۵۸۶ و ۵۵۴ سانتی‌متر مکعب بر ثانیه است. دلیل بیشتر بودن میزان تخلیه میوه پوست‌گیری شده اندازه کوچکتر و چگالی بیشتر آن است. با افزایش اندازه دهانه، مقدار جریان خروجی میوه نیز افزایش پیدا می‌کند و این افزایش در میوه پوست‌گیری شده بیشتر است تا در میوه پوست‌گیری نشده. دلیل این موضوع چگالی بیشتر و اندازه کوچکتر در میوه پوست‌گیری شده است (شکل ۴).

مقدار جریان خروجی میوه زیتون تلخ با دو رابطه ذکر شده مدل‌سازی شد و داده‌های آزمایشگاهی در مدل برازش شدند. ضریب ثابت تخلیه (c) در رابطه بورلو، مقدار ضریب کشش (k) برای رابطه گرگوری و ضریب تبیین  $R^2$  هر مدل برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده زیتون تلخ در جدول ۵ ارائه شده است. تغییرات قطر دهانه در مقدار جریان خروجی دو مدل با داده‌های آزمایشگاهی در شکل ۴ مقایسه شده است. مقادیر بالای ضریب تبیین  $R^2$  برای مدل‌های بورلو و گرگوری در جدول ۵ نشان می‌دهند که هر دو مدل در داده‌های آزمایشگاهی به خوبی برازش شده‌اند ولی مدل بورلو در مجموع بهتر است.



شکل ۴- مقایسه مقدار جریان خروجی میوه زیتون تلخ: (الف) پوست‌گیری شده و (ب) پوست‌گیری نشده آزمایشگاهی با مدل‌ها در دهانه دایره‌ای

جدول ۵- مقدار ضرایب و  $R^2$  در مدل‌های مقدار جریان خروجی برای میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده در دهانه دایره‌ای

$R^2$	ضرایب		میوه	مدل
	k	c		
۰/۹۹۷	-	۰/۳۵۰	پوست‌گیری شده	بورلو
۰/۹۹۷	-	۰/۳۰۰	پوست‌گیری نشده	
۰/۹۹۵	۳۱/۰۹۷	-	پوست‌گیری شده	گرگوری
۰/۹۹۵	۳۵/۴۳۹	-	پوست‌گیری نشده	

### نتیجه‌گیری

درجه سه از زمان است و موقعیت افقی به‌صورت تابعی

نمایی از زمان است.

- در مخزن، سرعت هر میوه تحت تأثیر موقعیت اولیه قرار می‌گیرد بدین معنی که سه منطقه افزایش سرعت، کاهش سرعت و افزایش مجدد سرعت قابل تمایز هستند. سرعت عمودی لحظه‌ای هر میوه را می‌توان با معادله‌ای درجه سه به‌صورت تابعی از زمان بیان کرد.

- با افزایش قطر دهانه خروجی مقدار جریان افزایش می‌یابد. این افزایش با استفاده از دو مدل بورلو و گرگوری به‌صورت تابعی از قطر دهانه خروجی مدل‌سازی و مدل بورلو در داده‌ها بهتر برازش شد.

در این پژوهش چگونگی جریان میوه زیتون تلخ در یک مخزن مکعب مستطیلی با کف شیب‌دار بررسی و موقعیت، سرعت و جریان خروج میوه‌ها مدل‌سازی شد. نتایج کلی به‌دست آمده به شرح زیر است:

- بررسی کلی خصوصیات سیالی محاسبه شده برای دو میوه پوست‌گیری شده و پوست‌گیری نشده نمی‌تواند مشخص کند که کدام میوه خروجی بیشتری دارد.

- موقعیت لحظه‌ای هر میوه در مخزن تحت تأثیر موقعیت اولیه آن قرار می‌گیرد. موقعیت عمودی به‌صورت تابعی

### مراجع

- Abbaspour Fard, M. H., Emadi, B. and Khojastehpour, M. 2009. Effect of particle shape on bed structure and flow characteristics of materials discharged from a Hopper using a DE model. J. Agric. Sci. Nat. Res. 15(6): 233-242. (in Farsi)
- Abou-Chakra, H. and Tuzun, U. 1999. Coefficient of friction of binary granular mixtures in contact with a smooth wall. PART I: Direct shear box measurements of the effects of particle size ratio and particle surface roughness. Chem. Eng. Sci. 54, 5901-5912.
- Beverloo, R. 1961. The flow of granular solids through orifices. Chem. Eng. Sci. 15, P 262.
- Casandroi, T. and Mieila, C. 2010. Theoretical development of a mathematical model to evaluate gravimetric flow rate of seeds through orifices. U. P. B. Sci. Bull. 72, 269-280.
- Chang, C. S. and Converse. H. H. 1998. Flow rates of wheat and sorghum through horizontal orifices. Ame. Soc. Agric. Eng. 31, 300-304.
- Choi, J., Kudrolli, A. and Bazant, M. Z. 2005. Velocity profile of granular flows inside silos and hoppers. J. Physics. 17, 2533-2548.

- Cleary, P. W. 1999. The Effect of particle Shape on hopper discharge. 2<sup>nd</sup> International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. Melbourne, Australia. 111-122.
- Fedler, C. B. 1988. Modelling applications in agricultural engineering: Mathematical models describing the flow of granular material. J. Matt. Comput. Model. 11, 510-513.
- Fowler, R. T. and Glastonbury, J. R. 1958. The flow of granular solids through orifices. Chem. Eng. Sci. 10, 150-156.
- Gregory, J. M. and Fedler, C. B. 1987. Equation describing granular flow through circular orifices. Trans. ASAE. 30(2), 529-532.
- Karimi, H. 2005. Iran herbs Culture (trees, shrubs, flowers, homemade types of plants). Flag Pub. 2, 295. (in Farsi)
- Khanavi, M., Haj Akhundi, A., Sadeghi pour, H. R., Vosughi, M. and Arbabi, R. A. 2007. The influence of alcohol extracts of neem fruits (*Meliaindica* L.) and Persian lilac (*Meliaazedarach* L.) fruits on fertility of rats. J. Reproduct. Infer. 7-16. (in Farsi)
- Mabrouk, R. and Chaouki, J. 2007. Wall surface effects on particle-wall friction factor in upward gas-solid flows. Powder Technol. 186, 80-88.
- Mieila, C. and Casandriou, T. 2009. Aspects regarding influence of geometrical shape of orifices about seeds gravimetric flow rate. Agric. Eng. 28(2): 43-48.
- Mohsenin, N. N. 1978. Physical properties of plant and animal materials. Gordon and breach science publishers, NewYork.
- Mortazavi, A. Saifkordi, A. Sadeghi, A. Gholamhossein Pour, A. 2009. Introduction to Food Engineering. Ferdowsi University of Mashhad Pub. Vol(1). (in Farsi)
- Nedderman, R. M. 1985. The Flow of Granular Materials through Orifices. Particle Technol. 91, 281-294.
- Nedderman, R. M. 1992. Statics and Kinematics of Granular Materials. Cambridge: Cambridge University Press.
- Oldal, I., Keppler, I., Csizmadia, B. and Fenyvesi, L. 2011. Outflow properties of silos: The effect of arching. Adv. Powder Technol. 23, 290-297.
- Razavi, M. A. and Akbari, R. 2006. Biophysical Properties of Agricultural and Food Materials. Ferdowsi University of Mashhad Pub. (in Farsi)
- Zarandi, M., Ghazanfari Moghadam, A. and Noorbakhsh, S. 2011. Investigating and Modeling the process of dehulling Persian Lilac fruits using Sodium Hydroxide with different concentrations and temperatures. Sci. J. Agric. 34(1): 57-64. (in Farsi)

## **Flow Pattern of Peeled and Unpeeled Persian Lilac Fruit in a Hopper**

**A. Mohamadi, A. Ghazanfari-Moghadam\* and SH. Nourbakhsh**

\* Corresponding author: Professor, Horticulture Research Institute. Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, P. O. Box: 76169-133, Kerman, Iran. Email: aghazanfari@uk.ac.ir  
Received: 3 May 2014, Accepted: 9 February 2015

In this research, unpeeled and peeled fruit from the Persian lilac were prepared and the flow properties, mean geometric diameter, sphericity coefficient, bulk density, coefficient of static friction and coefficient of internal static friction were determined. The flow patterns and discharge flow rates from a cubic hopper was investigated. The results indicate that the minimum discharge diameter for peeled fruit was 4.6 cm and for unpeeled was 6.3 cm. A comparison of discharge through a 5.5 cm diameter discharge outlet showed that the flow for the peeled and unpeeled fruits were 586 and 554 cm<sup>3</sup>/s, respectively. Three flow patterns were distinguished within the hopper: the increasing zone, the decreasing zone and the re-increasing zone. Exponential and two third-degree polynomial models were chosen and presented to predict the instantaneous horizontal and vertical positions and speed of the fruits within the hopper. The discharge rate was modeled using the Beverloo and Gregory models. Both models were well-fitted to the experimental data; however the Beverloo model resulted in a higher accuracy ( $R^2 = 0.97$ ).

**Keywords:** Discharge Flow, Hopper, Modeling, Persian Lilac, Seeds