

## اندازه‌گیری بلادرنگ دبی جرمی مواد جامد فله‌ای مبتنی بر نیروی مرکزگرا

فرزاد محمدی<sup>۱</sup>، حسین موسی‌زاده<sup>۲\*</sup> و علی جعفری<sup>۳</sup>

### چکیده

اندازه‌گیری دقیق، قابل اعتماد، بلادرنگ، بدون تأثیر از مواد عبوری، پیوسته و غیرانسدادی نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای در خطوط انتقال یک چالش فنی بوده است، که برای دستیابی به استفاده کارآمد از انرژی، مواد اولیه و کاهش ضایعات به‌طور فزاینده‌ای قابل توجه است. در این پژوهش یک دستگاه دبی‌سنج مواد دانه‌ای مبتنی بر نیروی مرکزگرا طراحی، ساخته و ارزیابی شد. در ابتدا به‌منظور بررسی عبور آسان مواد دانه‌ای بدون انسداد مسیر عبور در دستگاه و همچنین تعیین سرعت ریزش مواد روی صفحه اندازه‌گیری برای سه نرخ ریزش مختلف گندم ۱۵/۶۲، ۳۲/۹۰ و ۶۶/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه، تحلیل روش اجزای گسسته صورت گرفت. با توجه به نتایج این بخش، برای سه نرخ ریزش مختلف، سرعت مواد روی صفحه اندازه‌گیری  $0.18 \pm 2/55$  متر بر ثانیه به‌دست آمد. در مرحله نخست ارزیابی واقعی دستگاه، واسنجی بارسنج با استفاده از وزنه‌های استاندارد از ۱۰۰ تا ۱۸۰۰ نیوتن با گام ۱۰۰ نیوتن و برای اعتبارسنجی از ۵ تا ۵۰۰ نیوتن با گام ۵ نیوتن صورت گرفت. در نهایت واسنجی بارسنج با ضریب تبیین بالای ۹۹٪ با میانگین مربعات خطای ۳/۸۸ نیوتن تأیید شد. سپس ارزیابی دستگاه برای مقادیر معین گندم در هفت مقدار مختلف از ۵ تا ۳۵ کیلوگرم با گام‌های ۵ کیلوگرمی با نرخ ریزش تصادفی صورت گرفت. نتایج حاصل نشان داد که دستگاه با دقت بسیار بالایی (ضریب تبیین بالای ۹۹٪ و میانگین خطای مطلق ۰/۵۵٪) قادر به اندازه‌گیری بلادرنگ نرخ ریزش مواد دانه‌ای است.

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل اجزای گسسته، مواد دانه‌ای، نرخ جریان جرمی جامدات، نیروی مرکزگرا.

ارجاع: محمدی ف. موسی‌زاده ح. و جعفری ع. ۱۴۰۲. اندازه‌گیری بلادرنگ دبی جرمی مواد جامد فله‌ای مبتنی بر نیروی مرکزگرا. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۸: ۲۳-۳۵. <https://dx.doi.org/10.22034/JRMAM.2023.14068.614>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج.

۲- دانشیار، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج.

۳- استاد، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج.

\* نویسنده مسئول: [hmousazade@ut.ac.ir](mailto:hmousazade@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

## مقدمه

اندازه‌گیری و کنترل نرخ جریان مواد جامد فله‌ای با توان عملیاتی بالا یک نیاز ضروری است و در بسیاری از صنایع مختلف که با استخراج، تولید و مصرف این دسته از مواد سر و کار دارند با آن مواجه می‌شویم. معمولاً تجهیزات اندازه‌گیری با ظرفیت بالا از نظر فیزیکی بزرگ، پیچیده، پرهزینه و دست و پاگیر هستند و از لحاظ عملکرد دقت پایینی را ارائه داده و پایداری ضعیفی در طولانی مدت دارند. یکی از چالش‌های اساسی در بنادر سرعت تخلیه و بارگیری کشتی‌ها است. فرایند توزین دو مرحله‌ای کامیون‌ها (توزین کامیون خالی و پر) باعث کند شدن فرایند تخلیه و بارگیری می‌شود. از طرفی خطاهای اندازه‌گیری ناشی از جذب و دفع رطوبت توسط مواد مورد توزین و همچنین ریزش‌های ناشی از نشستی اتاق کامیون‌ها از جمله مشکلات دیگر در توزین فعلی مواد در بنادر است. بنابراین نیاز به یک دستگاه که بتواند نرخ جریان جرم مواد جامد فله‌ای را به صورت بلادرنگ، با دقت و سرعت بسیار بالا، بدون متوقف نمودن و دخالت در فرایند انتقال مواد و بدون نیاز به واسنجی‌های مداوم انجام دهد، ضروری است. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نرخ جریان جامدات در سامانه‌های حمل و نقل نیوماتیکی در دو دهه گذشته مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته‌اند (Zhang *et al.*, 2004; Zhang & Coulthard, 2005; Zangl *et al.*, 2005; Zheng *et al.*, 2007; Xu *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2009; Zheng & Liu, 2010; Zheng & Liu, 2011; Wang *et al.*, 2014; Zou *et al.*, 2020). متغیرهایی مانند سرعت جریان حجمی، غلظت حجمی، سرعت جامدات و سرعت جریان جرمی جامدات، مشخصه‌های مهمی هستند که اغلب برای دستیابی به استفاده کارآمد از انرژی و مواد خام نیاز به اندازه‌گیری (و کنترل) دارند. روش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی جامدات در یک خط لوله را می‌توان به اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم (استنتاجی) و اندازه‌گیری‌های مستقیم تقسیم کرد (Yan, 1996; Zheng & Liu, 2011). در طول دو دهه گذشته، به‌منظور پاسخگویی به نیازی اندازه‌گیری نرخ جریان مواد جامد فله‌ای، روش‌های زیادی مبتنی بر اندازه‌گیری غیرمستقیم غلظت حجمی و سرعت جامدات پیشنهاد شده است.

در سال ۲۰۰۶ آراکاکاکی به‌طور خلاصه اصول اندازه‌گیری، پیشرفت‌های ابزار اندازه‌گیری و محدودیت‌های اصلی سه نوع روش را خلاصه کرد که عبارتند از: روش‌های خازنی، روش‌های اولتراسونیک و روش‌های مایکروویو (Arakaki *et al.*, 2006). احمد و اسماعیل در سال ۲۰۰۸ مروری بر طیف وسیعی از روش‌های موجود برای اندازه‌گیری غلظت و سرعت جامدات در جریان‌های دو فازی گاز- جامد ارائه کردند، مانند روش‌هایی که به‌طور گسترده در سامانه انتقال نیوماتیک استفاده می‌شوند، که از جمله این روش‌ها می‌توان به حسگرهای خازن، حسگرهای الکترواستاتیک و سامانه‌های توموگرافی با ظرفیت الکتریکی اشاره کرد (Ahmad & Ismail, 2008). بررسی‌های ذکر شده در بالا بر اصل ویژگی‌های انحصاری و وضعیت هر روش در مراحل مختلف توسعه متمرکز بود.

برای اندازه‌گیری غیرمستقیم نرخ جریان جرمی جامدات بایستی غلظت حجمی و سرعت مواد به صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری شوند (Yan, 1996; Mousazadeh *et al.*, 2023). به‌طور خلاصه، برخی از روش‌های اندازه‌گیری غیرمستقیم مبتنی بر اصول خازنی یا الکترواستاتیکی، برای پیاده‌سازی ارزان و ساده هستند، اما تحقیقات نشان داده است که این حسگرها نسبت به رطوبت، اندازه ذرات و ترکیب شیمیایی جامدات کاملاً حساس‌اند (Coulthard *et al.*, 1991). علاوه بر این، هر گونه غیریکنواختی باقی مانده در میدان سنجش می‌تواند بر اندازه‌گیری غلظت و سرعت به شدت تأثیر بگذارد (Yan, 1996).

به دلیل ساختار پیچیده حسگر، برای روش‌های مایکروویو و سنجش رادیویی، ممکن است هزینه ساخت و پیاده‌سازی بالاتر رود. از طرفی دیگر یک مشکل اصلی حسگرهای نوری گرد و غبار است. یکی از مشکلات اصلی حسگرهای صوتی، وابسته بودن فرکانس بهینه به اندازه ذره است، که با ذرات کوچک و سبک، فرکانس بهینه حدود ۳۰ کیلوهرتز است، اما با ذرات بزرگ، به حدود ۴۰۰ کیلوهرتز می‌رسد. علاوه بر این، چندین مبدل باید برای بررسی کل مقطع لوله استفاده شود (Yan, 1996). روش مستقیم اندازه‌گیری جریان جرم جامدات در مقایسه با اندازه‌گیری غیرمستقیم (استنتاجی) ساده‌تری است (Zheng & Liu, 2011). در مورد نرخ جریان مواد جامد فله‌ای معمولاً جریان جرمی اندازه‌گیری می‌شود و جریان حجمی را نمی‌توان به اندازه کافی دقیق در نظر

حاکمی از رابطه خطی بالا بین دبی‌های مختلف ریزش مواد و سیگنال‌های دریافتی از حسگرها بود. نتایج این پژوهش نشان داد که ارتعاش می‌تواند روی دقت حسگر پیزوالکتریک اثر گذار باشد. نتایج کامل مربوط به حسگر پیزوالکتریک و نحوه عملکرد آن در اندازه‌گیری دبی جرمی مواد دانه‌ای موجود است (Ranjbari *et al.*, 2023).

دبی‌سنج مرکزگرا: یک دبی‌سنج مواد فله‌ای مرکزگرا، مواد را از طریق یک صفحه حسگر منحنی، که به یک یا چند بارسنج متصل است، هدایت می‌کند. ماده در هنگام ورود به صفحه منحنی باید به موازات صفحه حسگر به صورت یکنواخت هدایت شود و نیروی مماسی وارد شده بر بارسنج(ها) به انتگرالگیر منتقل شده و سپس به نرخ جریان تبدیل می‌شود (News, 2002; Basu, 2018).

دبی‌سنج کوریولیس: اصل اندازه‌گیری در دبی‌سنج کوریولیس جامدات متفاوت از اصل کوریولیس دبی‌سنج مایع است. در کاربرد جامدات، مواد وارد دبی‌سنج شده و به سمت پره‌های دوار که به وسیله یک الکتروموتور کنترل می‌شوند، هدایت می‌شود. الکتروموتور به بازوی گشتاور متصل است که به یک بارسنج مجهز شده است. با افزایش مقدار مواد وارد شده به دبی‌سنج کوریولیس، گشتاور موتور افزایش می‌یابد. بارسنج این افزایش را تشخیص می‌دهد و سیگنالی را به یک انتگرالگیر ارسال می‌کند که آن را به نرخ جریان تبدیل می‌کند. در این روش مواد ساینده می‌توانند تیغه‌های دبی‌سنج را زودتر فرسوده کنند و تعویض شوند. همچنین در این روش امکان چسبیدن مواد به ابزار زیاد است، که باعث افت دقت دستگاه می‌شود. در حالی که دبی‌سنج کوریولیس اندازه‌گیری دقیقی را ارائه می‌دهد، در عملکرد نویز دارد و تمیز کردن آن نیز دشوار است (Norden, 1998; Marcus & Maletic, 2003; Basu, 2018).

یک دبی‌سنج مواد جامد فله‌ای ایده آل نه تنها باید دارای دقت عملکرد بالا باشد، بلکه باید طراحی ساده، پایداری عملیاتی طولانی مدت، تعمیر و نگهداری کم یا عدم وجود آن، عدم حساسیت به شرایط محیطی، دوام و توانایی عملکرد بدون وقفه در تولید را نیز داشته باشد. برای دستیابی به عملکرد بهینه، ضروری است که دبی‌سنج‌های متناسب با شرایط کار انتخاب شوند. برخی از شرایط از جمله: عدم محدودیت در دبی زیاد، مناسب برای سقوط آزاد، مستقل از چگالی و نوع مواد، حساسیت کمتر به

گرفت، زیرا اندازه‌گیری جریان حجمی به شدت وابسته به چگالی توده مواد عبوری است و با توجه به تغییرات زیاد نحوه جریان توده مواد و تغییر در میزان توده هوای موجود در بین مواد و به تناسب آن تغییرات چگالی توده، دقت اندازه‌گیری جریان حجمی مواد توده در حال حرکت پایین می‌آید.

تمام سامانه‌های توزینی که در آن‌ها مواد نسبت به ماشین توزین دارای حرکت نسبی هستند را می‌توان سامانه توزین دینامیکی نامید. سامانه‌های توزین دینامیکی همچنین شامل روش‌های توزین مستقیم، مانند اندازه‌گیری‌های کوریولیس، ضربه و/یا اندازه‌گیری از نوع مرکزگرا می‌شوند (Basu, 2018).

دبی‌سنج ضربه‌ای: دبی‌سنج ضربه‌ای یکی از دبی‌سنج‌های پرکاربرد و محبوب برای مواد جامد است، که اغلب به آن‌ها ضربه‌سنج‌ها گفته می‌شود. این نوع از دبی‌سنج‌ها مواد را از طریق یک لوله ورودی یا ناودان هدایت می‌کند و یک مسیر مشخص برای برخورد مواد به صفحه حسگر مسطح ایجاد می‌کند (Liptak, 2003; Zhao *et al.*, 2011; Basu, 2018; Borgelt, 2015). مقدار نیرویی که ضربه ایجاد می‌کند، با استفاده از بارسنج یا ترانسفورماتور دیفرانسیل متغیر خطی (LVDT<sup>1</sup>) اندازه‌گیری می‌شود. زمانی که صفحه به وسیله نیروی دانه منحرف می‌شود، بارسنج یا ترانسفورماتور منحرف شده و سیگنالی تولید می‌کند که پس از عبور از یک انتگرالگیر به نرخ جریان تبدیل می‌شود (Basu, 2018). اصول کارکرد این نوع از تجهیزات به گونه‌ای است که دقت توزین از حد خاصی بالاتر نبوده و به واسنجی‌های متوالی و تنظیم مکانیکی جدید با تغییر جزیی در مواد عبوری نیاز دارد (Ranjbari *et al.*, 2023). دقت اندازه‌گیری در این روش به چگالی ظاهری ثابت و شرایط پایدار بستگی دارد. برخورد ناشی از ضربه نیز می‌تواند به مواد فله‌ای حساس آسیب برساند.

در پژوهشی دو حسگر خازنی و پیزوالکتریک (ضربه‌ای) برای اندازه‌گیری نرخ ریزش مواد عبوری در لوله سقوط خطی کارها توسعه داده شدند (Ranjbari *et al.*, 2020). آزمایش‌ها در نرخ‌های مختلف ریزش مواد، سه نوع ماده دانه‌ای گندم، بذر یونجه و کود شیمیایی و در دو شرایط عملکرد استاتیکی و دینامیکی انجام شدند. نتایج پژوهش

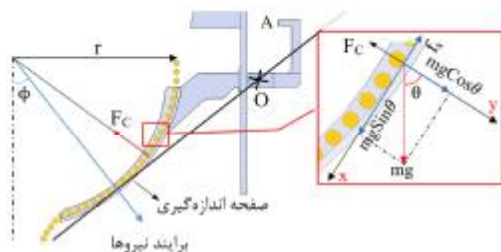
1- Linear Variable Differential Transformer (LVDT)

می‌توان نشان داد جسمی که در یک مسیر دایره‌ای حرکت می‌کند، در امتداد شعاع به سمت مرکز دایره شتاب دارد. این شتاب شعاعی، شتاب مرکزگرا نامیده می‌شود، به گونه‌ای که اگر جسمی هنگام حرکت در یک مسیر دایره‌ای از شعاع ( $r$ )، دارای سرعت خطی یا مماسی ( $v$ ) باشد، شتاب مرکزگرای آن  $v^2/r$  است (Basu, 2018). اگر جسم تحت شتاب مرکزگرا دارای جرم ( $m$ ) باشد، طبق قانون دوم نیوتن، نیروی مرکزگرا ( $F_C$ ) در جهت شتاب بوده و با  $mv^2/r$  بیان می‌شود.

در اینجا نیروی عمودی تکیه‌گاه ( $F_N$ ) نقش نیروی مرکزگرا ( $F_C = F_N$ ) را ایفا می‌کند. مطابق شکل ۱، نیروی مرکزگرای حاصل از حرکت دانه‌ها روی صفحه اندازه‌گیری را می‌توان از معادلات (۱) و (۲) محاسبه کرد.

$$\sum F_r = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

$$F_C = \frac{mv^2}{r} + mg \cos\theta \quad (2)$$



شکل ۱- اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد جامد فله‌ای مبتنی بر نیروی مرکزگرا

بنابراین برای اندازه‌گیری نیروی ناشی از حرکت مواد روی صفحه اندازه‌گیر لازم است محلی دقیق برای دوران صفحه اندازه‌گیر تعیین شود تا با قرار دادن یک یا چند بارسنج نیروی منتقل شده را اندازه‌گیری کرد. بهترین محل دوران برای انتقال نیرو حول یک نقطه باید روی خط عمود بر نیرو قرار گیرد. باتوجه به اینکه در هر لحظه هر جز از مواد عبوری در تمام طول صفحه اندازه‌گیر نیرویی ناشی از حرکت مواد در مسیر منحنی شکل را به صفحه اندازه‌گیر وارد می‌کنند، مطلوب آن است که محل دوران صفحه اندازه‌گیر (نقطه O در شکل ۱) روی خط عمود بر برآیند نیروی‌های وارد بر صفحه اندازه‌گیر باشد. سپس با مجهز کردن طرف دیگر نقطه دوران صفحه اندازه‌گیر (نقطه A در شکل ۱) به یک بارسنج، نیروی ناشی از حرکت مواد روی صفحه اندازه‌گیر به طور پیوسته قابل

رطوبت، غیر نفوذی، دقیق، همراه با صرفه اقتصادی، سادگی و دسترسی آسان فناوری، استقلال از ارتعاش، مداومت عملکرد و ... در پژوهش حاضر مدنظر است.

بنابراین هدف اصلی این تحقیق ارائه روشی است که بتواند با کمترین هزینه و بدون نیاز به نگهداری و واسنجی مداوم، نرخ مواد جامد فله‌ای را در مقیاس بزرگ اندازه‌گیری کند. در این راستا و با توجه به درخواست سازمان بندر و دریانوردی بندر امیرآباد، هدف پژوهش حاضر طراحی، ساخت و ارزیابی دبی‌سنج جرمی بلادرنگ مواد جامد فله‌ای مبتنی بر نیروی مرکزگرا در هنگام بارگیری و تخلیه در بندر است.

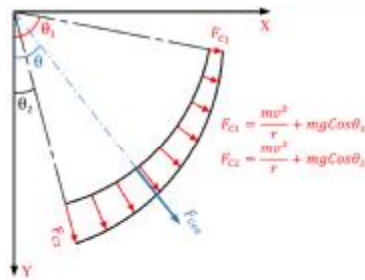
#### فهرست علائم

r	شعاع دایره (m)
v	سرعت مماسی (m/s)
m	جرم (kg)
$F_C$	نیروی مرکزگرا (N)
$F_N$	نیروی عمودی تکیه‌گاه (N)
$F_r$	نیروی شعاعی (N)
$\theta$	زاویه نیرو وزن با محور عمودی (deg)
g	شتاب گرانشی ( $m/s^2$ )
$F_{C1}$	نیروی مرکزگرا در ابتدای صفحه اندازه‌گیر (N)
$F_{C2}$	نیروی مرکزگرا در انتهای صفحه اندازه‌گیر (N)
$\theta_1$	زاویه نیروی وزن ابتدای صفحه اندازه‌گیر با محور عمودی (deg)
$\theta_2$	زاویه نیروی انتهای صفحه اندازه‌گیر با محور عمودی (deg)
$\phi$	زاویه برآیند نیروهای وارد شده به صفحه اندازه‌گیر و محور عمودی (deg)
$F_{Ceq}$	برآیند نیروی وارد بر صفحه اندازه‌گیر (N)
M	جرم کل مواد فله‌ای روی صفحه اندازه‌گیر (kg)
$q_r$	بار متمرکز معادل بار گسترده ناشی از وزن (N)
k	ضریب تصحیح بر حسب ( $kg/N.s$ )
$M_s$	جرم نمونه (kg)
F	نیروی محاسبه شده به وسیله بارسنج (N)
Volt	ولتاژ خوانده شده از پین ADC میکروکنترلر (V)

#### مواد و روش‌ها

##### تئوری مسئله

نیروی مرکزگرا نیرویی داخلی سوی است که برای حرکت یک جسم در یک مسیر دایره‌ای مورد نیاز است. این نیرو یک نیرو و یا برآیندی از نیروها است، که می‌تواند هر نیرویی از جمله نیروی وزن، کشش طناب، نیروی عمودی تکیه‌گاه، نیروی اصطکاک، نیروی الکتریکی و ... باشد.



شکل ۲- برآیند نیروهای وارد شده بر صفحه اندازه‌گیری

برای محاسبه برآیند بار پخشی در مرکز حجم بار پخشی مطابق معادلات (۳) و (۴) داریم.

$$F_{ceq} = \frac{Mv^2}{r} + q_r \quad (3)$$

$$q_r = MC \cos \theta \quad (4)$$

### طراحی و ساخت دبی‌سنج

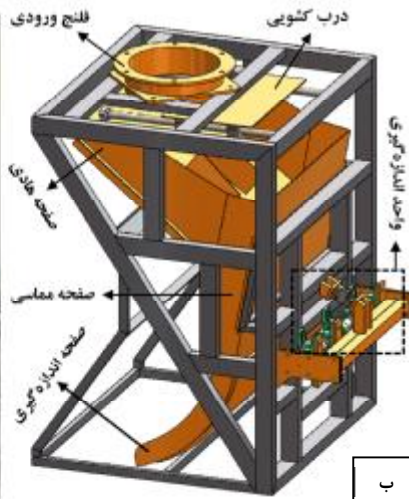
بر اساس تئوری ذکر شده در بخش قبل، مدل‌سازی دستگاه اندازه‌گیری دبی جرمی مواد فله‌ای بر اساس نیروی مرکزگرا مطابق شکل ۳ در نرم‌افزار SolidWorks 2020 انجام شد. این دستگاه از دو بخش مکانیکی و الکترونیکی تشکیل شده است. بخش مکانیکی وظیفه نگهداری بدنه و مواد در حال عبور، ایجاد محفظه‌ای برای وزن‌کشی، حذف ارتعاشات، محافظت از بخش الکترونیکی و تشکیل مسیر عبور ثابتی که به حسگرهای موجود در بخش الکترونیکی در کمتر کردن محاسبات کمک می‌کند را به عهده دارد.

اندازه‌گیری است و با توجه به رابطه ۲ دو پارامتر سرعت و جرم مواد عبوری روی این نیرو تأثیرگذار هستند، که اگر با طراحی مناسب دستگاه بتوان مواد عبوری روی صفحه اندازه‌گیر را با سرعتی ثابت هدایت کرد، نرخ جریان جرمی مواد با نیروی اندازه‌گیری شده به وسیله بارسنج ذکر شده در بالا قابل اندازه‌گیری است.

شکل ۲ برآیند نیروهای وارد شده بر صفحه اندازه‌گیری طراحی شده را نشان می‌دهد. نیرویی که هر یک از دانه‌ها در هر نقطه از صفحه اندازه‌گیری از ابتدای صفحه اندازه‌گیری تا انتهای آن به صورت شعاعی یوارد می‌کنند به ترتیب برابر  $F_{c1}$  و  $F_{c2}$  است، که در آن با توجه به طراحی دستگاه، زاویه  $\theta$  از  $\theta_1$  تا  $\theta_2$  متغیر است. برآیند نیروها از ابتدا تا انتهای صفحه اندازه‌گیر  $(F_{ceq})$  به مرکز سطح بار پخشی وارد می‌شود و مقدار آن برابر با مساحت بار گسترده است (Mohammadi et al., 2021). مرکز سطح بار گسترده با گشتاورگیری اول سطح حول محور x و y قابل محاسبه است. محاسبه مرکز سطح بار پخشی و به تناسب زاویه  $\theta$  در نرم‌افزار SolidWorks-2020 انجام شد. با توجه به این که شکل صفحه متقارن بوده و جرم مواد در راستای عرض صفحه در تقارن است، لذا برآیند نیروی وارد بر صفحه به مرکز حجم بار پخشی وارد می‌شود.



الف



ب

شکل ۳- الف) نمای واقعی دستگاه و ب) طراحی سه بعدی دبی‌سنج مبتنی بر نیروی مرکزگرا در نرم‌افزار SolidWorks

اندازه‌گیری، بازوی صفحه اندازه‌گیری، محور چرخشی و بلبرینگ بلوک بالشی است. بخش الکترونیکی نیز وظیفه

بخش مکانیکی دستگاه شامل: شاسی اصلی، فلنج، ورودی، صفحه مماسی، صفحه هدایت کننده، صفحه

سانتی‌متر و به ضخامت ۲ میلی‌متر که به هم جوش خورده‌اند، قسمت انتهایی دو بازوی نگه‌دارنده جانبی با اتصال پیچ و مهره به هم متصل می‌شوند و بارسنج در قسمت وسط این پروفیل اتصال دهنده به صورت زاویه‌دار قرار می‌گیرد، به نحوی که بارسنج در راستای مؤلفه نیروی وارد شده که به صورت مؤلفه‌ای از گشتاور وارد شده حول نقطه دوران وارد می‌شود، قرار بگیرد تا بتواند بیشترین نیرو را بدون از دست دادن هیچ مؤلفه‌ای از نیرو اندازه‌گیری کند.

با توجه به اینکه روش کلی وزن‌کشی دبی‌سنج بر این اساس است که مسیر عبور مواد جامد فله‌ای از روی صفحه اندازه‌گیری همواره ثابت باشد، نقش صفحه‌های مماسی و هادی، ایجاد این مسیر ثابت و فاصله‌ای برای سقوط مواد است. با این کار زاویه ورودی انبوه مواد به صفحه اندازه‌گیری همواره ثابت می‌ماند. به منظور توزیع یکنواخت مواد در حین جریان دو صفحه فولادی با طول ۲۰ سانتی‌متری و به ارتفاع ۱۵ سانتی‌متر روی صفحه هادی اولیه با زاویه ۱۰ درجه در جهت مسیر عبور مواد نصب شد. به دلیل پرش مواد پس از برخورد با سطح صفحه مماسی، یک ورق فولادی با ضخامت ۱ میلی‌متر به صفحه مماسی اضافه شد که از برگشت مواد جلوگیری کند. طراحی صفحه‌های هادی و مماسی این امکان را می‌دهد که سرعت سقوط ذرات به صفحه اندازه‌گیری به گونه‌ای کنترل شود که سرعت مواد در ابتدای صفحه اندازه‌گیری با سرعت آن در انتها تقریباً برابر گردد و از این طریق محدوده مورد اطمینان هر واسنجی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، برای باز و بسته کردن فلنج ورودی از شیر کشویی استفاده شد، که به وسیله یک الکتروموتور DC (نوع PMDC، ولتاژ نامی: ۲۴ ولت، توان اسمی: ۶۰۰ وات، گشتاور اسمی: ۱۰ نیوتن متر، سرعت بدون بار ۵۰۰ RPM) با مکانیزم پیچ بال اسکرو (گام پیچ ۱۰ میلی‌متر) کنترل می‌شود. شاسی اصلی دستگاه از قوطی مستطیل شکل فولادی ۶۰×۴۰ میلی‌متر با ضخامت ۲ میلی‌متر ساخته شد. صفحه اندازه‌گیری از فولاد ضد زنگ ۳۰۴ با ضخامت ۴ میلی‌متر و سایر صفحات از ورق‌های فولادی ملایم با ضخامت ۳ میلی‌متر ساخته شده است. جدول ۱ مشخصات دبی‌سنج جریان جرمی را نشان می‌دهد.

گرفتن اطلاعات ورودی از بارسنج و تحلیل آن‌ها، ایجاد محیطی برای ارتباط با کاربر و ورود و خروج داده‌ها و نمایش آن‌ها به کاربر را به عهده دارد. بخش الکترونیکی دستگاه شامل: منبع تغذیه، بارسنج (بارسنج S شکل مدل US5، کلاس دقت مطابق با OIML R-60: C3 با دقت kg ۰/۰۸۳، درجه آبنندی: IP67، ظرفیت: ۲۵۰ kg، نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ تحریک:  $0.03 \pm 3/0$  mV/V، خطای مجموع (%FS)  $\geq \pm 0.200$ ، ولتای تغذیه توصیه شده:  $5-12$  v) و ۲- برد آردوینو UNO-R3 (برای جمع‌آوری و انتقال داده‌ها)، تقویت کننده AD620 (برای تقویت سیگنال خروجی بارسنج) و نمایشگر LCD برای نمایش داده‌ها است. میزان نیروی وارد شده به بارسنج ناشی از عبور مواد روی صفحه اندازه‌گیری در هر کسری از ثانیه (در اینجا ۰/۰۱ ثانیه) به واحد کنترل کننده منطقی برنامه‌پذیر ارسال می‌شود. یک رابط در محیط برنامه‌نویسی آردوینو (Arduino-ver.1.8.14) برای دریافت و پردازش جریان داده ایجاد شد.

اساسی‌ترین بخش مکانیکی دستگاه صفحه اندازه‌گیری است، که وظیفه هدایت جریان جرمی ذرات را در یک قطعه از دایره به عهده دارد. ذرات عبوری با حرکت در این مسیر دایره‌ای نیروی مرکزگرای  $F_c$  را در جهت شعاع به صفحه وارد می‌کنند و صفحه نیروی عکس‌العمل  $F_N$  را در جهت عکس به این ذرات وارد می‌نماید. مؤلفه عمودی نیروی مرکزگرا به بارسنج منتقل می‌شود و با انجام محاسبات لازم که در ادامه توضیح داده می‌شود داده‌های حاصل از این بخش به محاسبه نهایی وزن می‌انجامد.

تعیین موقعیت مناسب قرارگیری بارسنج برای اندازه‌گیری دقیق بسیار مهم است، به گونه‌ای که باید بتواند کوچکترین تغییرات روی صفحه اندازه‌گیری را با بزرگنمایی مناسب اندازه‌گیری کند. انتقال نیرو از صفحه اندازه‌گیری به بارسنج به وسیله بازوهای صفحه اندازه‌گیری که در نقطه‌ای مناسب حول محور یک شفت دوار داخل بلبرینگ‌های بلوک بالشی می‌چرخند، صورت می‌گیرد. همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد، محل محور دوار روی خط عمود بر برآیند نیروی‌های وارد بر صفحه اندازه‌گیری قرار دارد تا انتقال نیرو به بهترین شکل صورت بگیرد. بارسنج به انتهای بازوی نگه‌دارنده صفحه اندازه‌گیری متصل می‌شود، به گونه‌ای که با استفاده از دو پروفیل به طول ۸۰ سانتی‌متر با سطح مقطع مربعی ۴\*۴

جدول ۱- مشخصات دبی‌سنج جریان جرمی

مقدار	مشخصات	مقدار	مشخصات
۷۹۴/۵ mm	عرض صفحه مماسی	۹۷۱ mm	عرض دستگاه
۱۰/۵ deg	زاویه $\gamma$ - صفحه مماسی	۱۲۳۰ mm	ارتفاع دستگاه
۸۰۰ mm	عرض صفحه اندازه‌گیری	۳۰۰ mm	قطر فلنج ورودی
۴ mm	ضخامت صفحه اندازه‌گیری	۷۰ mm	ارتفاع فلنج ورودی
۴۷۳ mm	شعاع صفحه اندازه‌گیری	۰ deg	زاویه نصب
۵۳۲/۵ mm	طول محیطی صفحه اندازه‌گیری	۷۹۶ mm	عرض صفحه هادی
۱۰ mm	ضخامت بازوی صفحه اندازه‌گیری	۳۸/۸ deg	زاویه X- صفحه هادی

مقادیر مؤلفه‌های اصلی مورد استفاده در این شبیه‌سازی مطابق جدول ۲ فهرست شده‌اند (Malone & Xu, 2008; Boac et al., 2010; Guo et al., 2013 Lei et al., 2016).

### واسنجی بارسنج

ابتدا واسنجی ثابت بارسنج با استفاده از وزنه‌های استاندارد از ۱۰۰ تا ۱۸۰۰ نیوتن با گام‌های ۱۰۰ نیوتن و برای اعتبارسنجی از ۵ تا ۵۰۰ نیوتن با گام‌های ۵ نیوتن صورت گرفت. برای هر قسمت اندازه‌گیری‌ها در ۳ تکرار انجام شد.

### ارزیابی واقعی دبی‌سنج

به‌منظور ارزیابی دبی‌سنج جرمی مرکزگرا، سامانه مطابق شکل ۳-الف در آزمایشگاه میکاترونیک گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تهران نصب گردید. سامانه ارزیابی مجهز به بالابر دانه از نوع نوار نقاله قاشقی با قاشق‌های فایبرگلاس برای انتقال مواد از مخزن دانه پایین به مخزن دانه بالایی با ظرفیت انتقال دانه ۲۲۰۰ کیلوگرم در ساعت بود. در ابتدا واسنجی دستگاه انجام شد. به عبارت ساده‌تر اساس کار دستگاه را این‌گونه می‌توان بیان نمود، که ابتدا یک نمونه با جرم مشخص برای واسنجی وارد دستگاه شد. داده‌های بارسنج به‌طور پیوسته ثبت شدند. با محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو- زمان در مرحله واسنجی مجموع نیروهای وارد شده ناشی از مواد عبوری به‌دست آمد و با تقسیم جرم واقعی به این عدد، ضریب تصحیح  $k$  به‌دست آمد (معادله (۵)). در مراحل اعتبارسنجی وزن‌کشی، نیروهای وارد شده ناشی از عبور جرم در ضریب  $k$  ضرب شد و به جرمی مواد عبوری تبدیل گردید و دبی جرمی مواد عبوری با نسبت میزان جرم عبوری بر گستره زمانی به‌دست آمد.

### تجزیه و تحلیل روش اجزای گسسته (DEM)

با توجه به اینکه این دستگاه بر اساس نیروی مرکزگرا طراحی شده است و سرعت عبور مواد یکی از مشخصه‌های مهم در محاسبات است، لذا به‌منظور اندازه‌گیری دبی جرمی مواد عبوری با دقت بالا، لازم است سرعت عبور مواد روی صفحه اندازه‌گیری در نرخ‌های مختلف ریزش بررسی و محاسبه شود.

در این راستا شبیه‌سازی مواد دانه‌ای (در این پژوهش گندم رقم پیشگام) باید در هنگام عبور از دستگاه انجام شود، تا علاوه بر تحلیل عددی و شبیه‌سازی مواد عبوری، رفتار و الگوی مواد عبوری نیز به‌طور کامل قابل مشاهده باشد. همچنین از داده‌های این قسمت می‌توان ظرفیت اندازه‌گیری دستگاه را به‌صورت دقیق استخراج کرد. به‌منظور بررسی اثر دبی‌های جرمی مختلف بر سرعت عبور مواد روی صفحه اندازه‌گیری با انتخاب سه موقعیت مختلف فاصله قطری بازشدگی دریچه کشویی فلنج ورودی (۱۰، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر) شبیه‌سازی مواد عبوری در نرم افزار EDEM-ver.4.0.0 برای دانه گندم انجام شد. روش اجزای گسسته به‌منظور شبیه‌سازی حرکت ذرات در سامانه‌های فرآوری کاربرد وسیعی دارد. اساس این روش محاسبه نیروهای متقابل میان ذرات در هر برخورد و مدل کردن موقعیت جدید ذرات است. برای این شبیه‌سازی از مدل نیروی برخورد هرتز-میندلین استفاده شد، که در آن نیروی برخورد متناسب با ناحیه برخورد است. طبق این مدل، برخورد دو ذره در یک نقطه صورت نمی‌گیرد، بلکه در یک ناحیه محدود که به علت تغییر شکل ذرات به وجود می‌آید، اتفاق می‌افتد (Mindlin & Deresiewicz 1953; Cundall 1988).

$$k = \frac{M_s}{\int F dt} \quad (5)$$

این محاسبه با انجام آزمایش‌های مختلف با نمونه‌گیری‌های مختلف و در دبی‌های مختلف برای دانه‌های گندم (رقم پیشگام) انجام شد. به‌منظور ارزیابی دستگاه، وزن‌های معین گندم در هفت مقدار مختلف از ۵ تا ۳۵ کیلوگرم با گام‌های ۵ کیلوگرمی با نرخ ریزش تصادفی از دبی‌سنج عبور داده شد، که با تغییر میزان بازشدگی دریچه فلنج ورودی نرخ‌های تصادفی ایجاد شد.

سه تکرار برای واسنجی و سه تکرار دیگر برای اعتبارسنجی دستگاه استفاده شد. خواص فیزیکی بذر گندم طبق استانداردها و منابع اندازه‌گیری شد (ASAE, 1994; Mohsenin, 1986; Balasubramanian, 2001; Dursun & Dursun, 2005; Kabas et al., 2007). جدول ۳ خواص فیزیکی بذر گندم مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مؤلفه‌های محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازی اجزای گسسته

مقادیر برای آلیاژ فولاد	مقادیر برای دانه گندم	مؤلفه‌ها	فاز جامد
-	کروی	نوع ذرات	
	۲	شعاع کره (mm)	
۷۸۵۰	۱۳۵۰	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	
۰/۳۱	۰/۴۲	ضریب پواسون	
$7/692 \times 10^{10}$	$5/1 \times 10^7$	مدول برشی (Pa)	
-	۰/۴۲	ضریب استرداد <sup>۱</sup>	دانه با دانه
-	۰/۳۵	ضریب اصطکاک استاتیکی <sup>۲</sup>	
-	۰/۰۵	ضریب اصطکاک غلتشی <sup>۳</sup>	
-	۰/۵	ضریب استرداد	دانه با فلز
-	۰/۴	ضریب اصطکاک استاتیکی	
-	۰/۰۵	ضریب اصطکاک غلتشی	
	هرتز- میندلین <sup>۴</sup>	مدل تماسی	
	$10^{-5} \times 5/13$	گام زمانی	

جدول ۳- خواص فیزیکی بذر گندم رقم پیشگام

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۴۸/۹۶	وزن هزار دانه (gr)	۵/۹۵	طول (mm)
۹/۶۳	رطوبت بر پایه خشک (%)	۲/۹۵	عرض (mm)
۲۸	زاویه پایدار خالی کردن (درجه)	۳/۵۶	ضخامت (mm)
۷۵۸/۳۹	چگالی ظاهری (kg/m <sup>3</sup> )	۰/۶۷	ضریب کروییت
۱۲۸۰/۷۵	چگالی واقعی (kg/m <sup>3</sup> )	۳/۸۶	قطر متوسط هندسی (mm)
-	-	۴/۱۵	قطر متوسط حسابی (mm)

1- Coefficient of restitution  
 2- Coefficient of static friction  
 3- Coefficient of static friction  
 4- Hertz-Mindlin

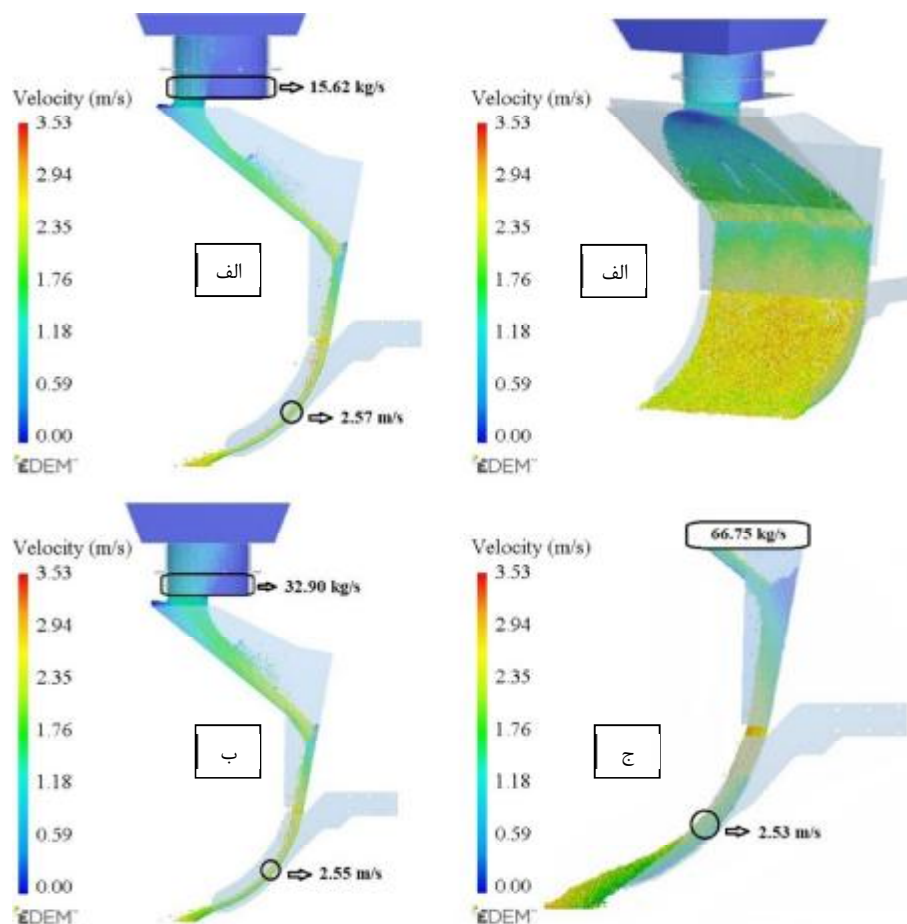


## نتایج و بحث

## نتایج تحلیل نرم‌افزار EDEM

از نتایج تحلیل EDEM، علاوه بر مشاهده نحوه ریزش مواد و استفاده در باز طراحی بخش‌هایی از دستگاه در راستای جریان یکنواخت مواد حین عبور از دستگاه، برای تعیین دبی جریان مواد در موقعیت‌های مختلف دریچه فلنج ورودی استفاده شد، که برای سه موقعیت بازشدگی دریچه ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متری به ترتیب ۱۵/۶۲، ۳۲/۹۰ و ۶۶/۷۵ کیلوگرم بر ثانیه به دست آمد. همچنین سرعت دانه‌ها روی صفحه اندازه‌گیری برای سه نرخ مختلف  $۰/۰۱۸ \pm ۲/۵۵$  متر بر ثانیه به دست آمد. این نشان می‌دهد که خطای ناشی از تغییر سرعت مواد دانه‌ای در اندازه‌گیری دستگاه اتفاق نخواهد افتاد. این مطلب در بخش ارزیابی واقعی دستگاه با اعمال نرخ‌های تصادفی بررسی شد. ذکر این نکته لازم است که ثابت بودن سرعت مواد و یکنواختی الگوی عبور مواد در

نرخ‌های مختلف ریزش روی صفحه اندازه‌گیری نشان از طراحی مناسب دستگاه بود. همچنین از مشاهده بصری شبیه‌سازی الگوی ریزش، این نتیجه حاصل شد که با افزایش نرخ ریزش، مواد به صورت یکنواخت‌تر روی صفحه اندازه‌گیری توزیع می‌شوند، که این نکته می‌تواند یک عامل مهم در تعیین پایین‌ترین ظرفیت اندازه‌گیری دستگاه باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد عامل یکنواختی ریزش در دقت اندازه‌گیری دستگاه بسیار مؤثر است، که صفحه‌های هادی یکنواختی ریزش را فراهم می‌کنند و اگر در نرخ‌های پایین این عامل تأمین نشود، باید حداقل ظرفیت دستگاه تعیین شود. البته این محدودیت می‌تواند با ارزیابی‌های بیشتر برای نرخ‌های پایین و محاسبه دقت اندازه‌گیری دستگاه در این نرخ‌ها به صورت دقیق‌تر تعیین شود. شکل ۴ تحلیل EDEM برای سه موقعیت بازشدگی دریچه ۱۰، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - تحلیل EDEM برای موقعیت دریچه (الف) ۱۰، (ب) ۱۵ و (ج) ۳۰ سانتی‌متر باز شده

وزن‌های مشخص گندم به مساحت زیر نمودار نیرو- زمان به‌دست آمد، که میانگین مقدار ضریب تصحیح برای وزن‌های مختلف در نرخ‌های جریان جرمی تصادفی  $(\text{kg/N.s})$   $0.013 \pm 0.0775$  حاصل شد. پایین بودن انحراف استاندارد مقدار ضریب تصحیح نشان از دقت بالای دستگاه در اندازه‌گیری وزن‌های مختلف گندم با نرخ‌های جریان جرمی تصادفی است. داده‌های این بخش حاصل از میانگین شش تکرار از داده‌ها برای هر وزن مشخص است.

جدول ۴- نتایج واسنجی بارسنج

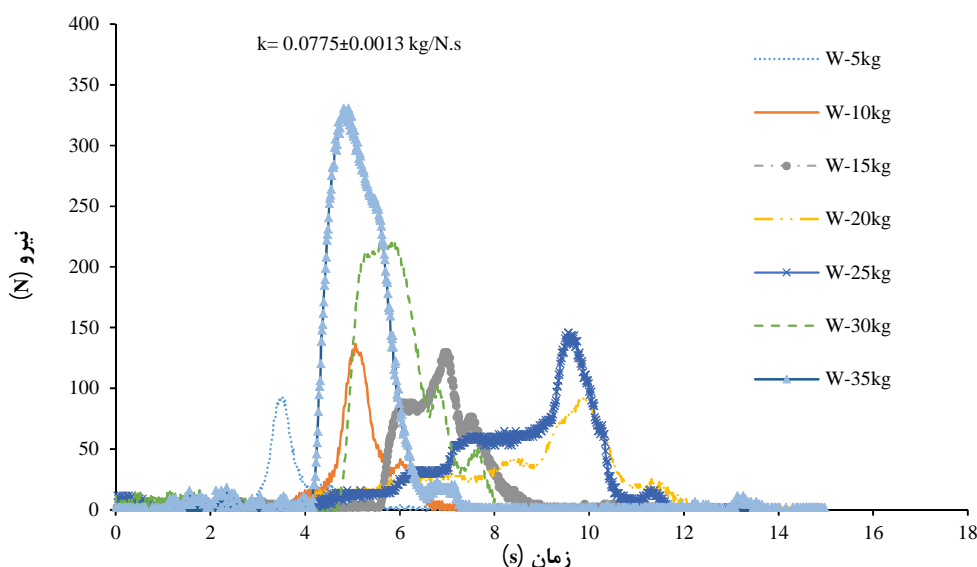
مقادیر	پارامترهای ارزیابی
$F = 474/17 \times \text{Volt} + 1/149$	مدل پیش‌بینی
۰/۹۹	$R^2$ - واسنجی
۰/۹۹	$R^2$ - اعتبارسنجی
۳/۸۸	RMSE (N)
۴/۹۵	MAPE (%)
-۳/۷۸	MBE (N)

### نتایج واسنجی بارسنج

جدول ۴ نتایج واسنجی ثابت و اعتبارسنجی بارسنج را نشان می‌دهد. در این جدول علاوه بر مدل پیش‌بینی، پارامترهای آماری؛ میانگین مربعات خطا، میانگین انحراف خطا و درصد میانگین خطای مطلق آمده است. نتایج نشان داد که بین سیگنال بارسنج و مقادیر متناظر وزن استاندارد همبستگی قوی وجود دارد. یک مدل خطی هویت واسنجی را برای بارسنج بیان می‌کند. بارسنج قادر به اندازه‌گیری دقیق نیرو در محدوده تعریف شده خود با دقت پیش‌بینی بیش از ۹۹ درصد با میانگین مربعات خطای  $3/88$  نیوتن بود.

### نتایج ارزیابی دبی سنج

شکل ۵ نمودار نیرو- زمان را برای یک تکرار از وزن‌های مختلف گندم نشان می‌دهد. ضریب تصحیح برای محاسبه وزن تجمعی و وزن لحظه‌ای گندم عبوری از طریق نسبت



شکل ۵- نمودار نیرو- زمان برای وزن‌های مختلف گندم

دبی‌سنج مرکزگرا قادر به اندازه‌گیری دقیق وزن در محدوده تعریف شده خود با دقت پیش‌بینی بیش از ۹۹ درصد با میانگین مربعات خطای  $0.065$  کیلوگرم و میانگین خطای مطلق  $0.55\%$  بود. همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد برای انجام آزمایش‌ها وزن‌های مختلف گندم در نرخ‌های مختلف و به‌صورت تصادفی در دستگاه جریان یافت. میانگین انحراف معیار داده‌ها برای

شکل ۶ نتایج واسنجی (الف) و اعتبارسنجی (ب) دبی‌سنج را برای وزن‌های مختلف گندم با نرخ ریزش تصادفی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که بین داده‌های حاصل از مساحت سطح زیر نمودار نیرو- زمان و اندازه‌گیری مستقیم وزن گندم همبستگی قوی  $0.99$  وجود دارد. بهترین مدل یافت شده بین داده‌های تجمعی حاصل از دبی‌سنج و مقادیر واقعی متناظر، معادله رگرسیون خطی بود.

شد. سپس نحوه الگوی ریزش مواد و سرعت دانه‌های گندم در هنگام عبور از صفحه اندازه‌گیری دستگاه در نرم‌افزار EDEM صورت گرفت. همچنین از نتایج این بخش در بازطراحی دستگاه در راستای جریان یکنواخت مواد حین عبور از دستگاه استفاده شد. واسنجی و راه‌اندازی دستگاه بسیار ساده و قابل اعتماد بود. نتایج ارزیابی واقعی دستگاه برای مواد دانه‌ای گندم، قابلیت اطمینان بودن این روش را با ضریب تبیین بالای ۹۹ درصد برای اندازه‌گیری بلادرنگ نرخ عبور مواد دانه‌ای نشان داد.

### سپاسگزاری

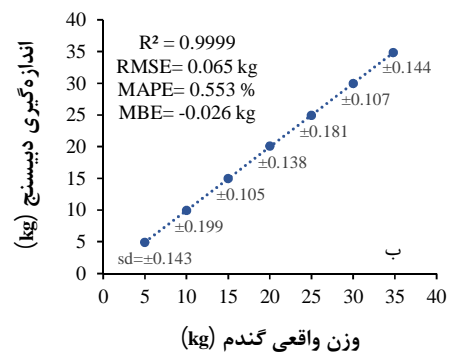
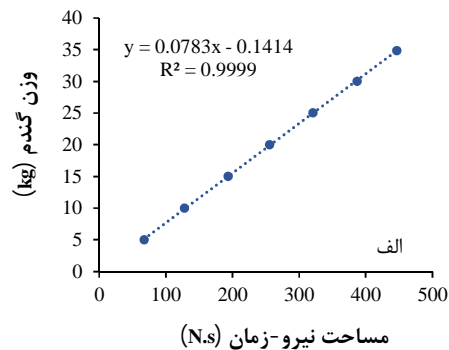
بدینوسیله از سازمان بنادر و دریانوردی امیرآباد که منابع مالی این تحقیق را در قالب قرارداد ۶۶۶۸/ص ۲۰ (از مورخ ۱۳۹۹-۱۴۰۱) فراهم نمودند تشکر می‌شود.

### منابع

- Ahmed, W. H., & Ismail, B. I. (2008). Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements. *Recent Patents on Electrical & Electronic Engineering (Formerly Recent Patents on Electrical Engineering)*, 1(1): 1-13.
- Arakaki, C., Ghaderi, A., Datta, B. K., & Lie, B. (2006). Non-intrusive mass flow measurements in pneumatic transport. in: CHoPS-05, *the 5<sup>th</sup> International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids*, Sorrento, Italy.
- ASAE. (1994). ASAE Standards S352.3-Moisture measurement-ungrounded grains and seeds. In: M. I. St. Joseph, ASAE Standards, ASAE, 469p.
- Balasubramanian, D. (2001). PH—Postharvest technology: Physical properties of raw cashew nut. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(3): 291-297.
- Basu, S. (2018). *Plant Flow Measurement and Control Handbook: Fluid, Solid, Slurry and Multiphase Flow*. Chapter 8 - Solid Flow Measurement, Academic Press; 1st edition, 677-801.
- Boac, J. M., Casada, M. E., Maghirang, R. G., & Harner III, J. P. (2010). Material and interaction properties of selected grains and oilseeds for modeling discrete particles. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53(4): 1201-1216.
- Borgelt, S.C. (2015). Sensing and measurement Technologies for site Specific Management. pp. 139-157. In: Robert, P.C., Rust, R. H.

وزن‌های مختلف در نرخ‌های تصادفی ۰/۱۴۵ کیلوگرم بود، که نشان دهنده این واقعیت بود، که تنوع نرخ و نوع ریزش تأثیری بر دقت اندازه‌گیری دستگاه ندارند و این مهم از نتایج تحلیل EDEM نیز قابل استنباط بود.

لازم به ذکر است که ارزیابی دستگاه برای توزین یک نمونه ۶۱۶ کیلوگرمی از گندم در سه تکرار انجام شد. در این حالت نیز میزان باز بودن دریچه فلنج ورودی به صورت تصادفی انتخاب شد. نتیجه عددی حاصل از این اندازه‌گیری به وسیله دستگاه ۰/۲۳۲ ± ۶۱۶ کیلوگرم بود.



شکل ۶- برازش بین داده‌های مساحت زیر نمودار نیرو-زمان و وزن‌های مختلف گندم (الف) و برازش بین گندم اندازه‌گیری شده با دیسنج و وزن‌های واقعی (ب)

### نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری بلادرنگ نرخ ریزش مواد فله‌ای در بسیاری از صنایع مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. انتخاب روش اندازه‌گیری و طراحی دستگاه باید متناسب با شرایط کار صورت گیرد. در این پژوهش یک دیسنج بر اساس نیروی مرکزگرا به منظور اندازه‌گیری بلادرنگ نرخ ریزش مواد جامد دانه‌ای طراحی، ساخته و ارزیابی شد. در این راستا بر اساس تئوری نیروی مرکزگرا و با طراحی ابتکاری، محل دقیق برآیند نیروهای وارد شده روی صفحه اندازه‌گیری و به تناسب محل دقیق لولای صفحه تعیین

- Flow Rate Measurement Based on Electrical Capacitance Tomography with Feasibility Application in Cereal Combines and Assessment of Discretization on Field Potential. *Journal of Agricultural Mechanization*, 8(1): 23-31. (In Persian).
- News. (2002). Bulk ingredient flow meter uses centripetal force measurement. *Plastics, Additives and Compounding*, 4(1): p. 15.
- Norden, K.E. (1998). *Handbook of Electronic Weighing*, Wiley-VCH, 1st edition, 488 pp.
- Ranjbari, S., Maleki, M.R., Khodaei, J., & Mollazadeh, K. (2020). Development and implementation of real-time mass flow measuring system for using in drill applicators tube. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture. University of Kurdistan, Iran. (In Persian).
- Ranjbari, S., Maleki, M.R., Mohammadi, F., Khodaei, J., & Mollazadeh, K. (2023). Real-time monitoring of the mass flow rate of granular materials in the seeder tube using a piezoelectric sensor. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 54 (1): 17-36. (In Persian).
- Wang, X., Hu, H., & Zhang, A. (2014). Concentration measurement of three-phase flow based on multi-sensor data fusion using adaptive fuzzy inference system. *Flow Measurement and Instrumentation*, 39: 1-8.
- Xu, C., Zhou, B., Yang, D., Tang, G., & Wang, S. (2008). Velocity measurement of pneumatically conveyed solid particles using an electrostatic sensor. *Measurement Science and Technology*, 19 (2): 1-9.
- Xu, C., Tang, Zhou, G., B., & Wang, S. (2009). The spatial filtering method for solid particle velocity measurement based on an electrostatic sensor. *Measurement Science and Technology*, 20 (3): 1-8.
- Yan, Y. (1996). Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Measurement Science and Technology*, 7(12): 1687-1706.
- Zangl, H., Fuchs, A., Brasseur, G., & Petriu, E.M. (2005). Random-data cross-correlator for flow measurement of bulk solids in pneumatic conveyor pipes. in: *IMTC 2005 – Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, Canada: 1773-1778.
- Zhang, J., & Coulthard, J. (2005). Theoretical and experimental studies of the spatial sensitivity of an electrostatic pulverised fuel meter. *Journal of Electrostatics*, 63 (12): 1133-1149.
- Zhang, J., Guo, Y., & Shen, Y. (2004). A wavelet-based method for measuring particulate velocity by an active electrostatic sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53 (4): and Larson, W.E. (Eds). *Proceeding of Soil Specific. Crop management* John Wileyandsonns, Ltd.
- Coulthard, J., Byrne, B., & Yan, Y. (1991). Non-restrictive measurement of solids mass flow rate in pneumatic conveying systems. *Measurement and Control*, 24: 113-119.
- Cundall, P. A. (1988). Computer Simulations of Dense Sphere Assemblies. *Studies in Applied Mechanics*, 20: 113-123.
- Dursun, E., & Dursun, I. (2005). Some physical properties of caper seed. *Biosystems Engineering*, 92(2): 237-245.
- Guo, Y., Wassgren, C., Hancock, B., Ketterhagen, W., & Curtis, J. (2013). Validation and time step determination of discrete element modeling of flexible fibers. *Powder Technology*, 249: 386-395.
- Kabas, O., Yilmaz, E., Ozmerzi, A., & Akinci, I. (2007). Some physical and nutritional properties of cowpea seed (*Vigna sinensis* L.). *Journal of Food Engineering*, 79: 1405-1409.
- Malone, K.F., & Xu, B.H. (2008). Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems. *Particology*, 6 (6): 521-528.
- Lei, X., Liao, Y., & Liao, Q. (2016). Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 131: 29-39.
- Liptak, b. (2003). *Instrument Engineers' Handbook. Process Measurement and Analysis*, 1(4): 1861-1861.
- Marcus, A., & Maletic, J. I. (2003). Recovering Documentation-to-Source-Code Traceability Links using Latent Semantic Indexing. in *Proceedings 25<sup>th</sup> IEEE/ACM International Conference on Software Engineering (ICSE'03)*, Portland, OR: 125-137.
- Mindlin, R. D., & H. Deresiewicz. (1953). Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Forces. *Journal of Applied Mechanics*, 20 (3): 327-344.
- Mohammadi, F., Mousazadeh, H., & Jafari, A. (2021). Design and simulation of a mass flow rate measurement device based on centripetal force for bulk solids. *13<sup>th</sup> National Congress on Biosystems Engineering and Agricultural Mechanization*, Tehran, Iran. (In Persian).
- Mohsenin, N.N. (1986). *Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties*. Gordon and Breach Science Publishers, 31(7): 702-702.
- Mousazadeh, H., Tarabi, N., Taghizadeh-Tameh, J., Mohammadi, F., & Kiapei A. (2023). Evaluation of mechanized Mass

- 1345-1351.
- Zhao, Z., Li, Y., Chen, J., & Xu, J. (2011). Grain separation loss monitoring system in combine harvester. *Computers and Electronics in Agriculture*, 76(2): 183-188.
- Zheng, Y., & Liu, Q. (2010). Review of certain key issues in indirect measurements of the mass flow rate of solids in pneumatic conveying pipelines. *Measurement*, 43: 727-734.
- Zheng, Y., & Liu, Q. (2011). Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement*, 44: 589-604.
- Zheng, Y., Li, Y., & Liu, Q. (2007). Measurement of mass flow rate of particulate solids in gravity chute conveyor based on laser sensing array. *Optics and Laser Technology*, 39 (2): 298-305.
- Zou, J., Liu, C., Wang, H., & Wu, Z.P. (2020). Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods. *Powder Technology*, 360: 112-119.

