

طراحی و شبیه‌سازی دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای مبتنی بر روش نیروی مرکز گرا

فرزاد محمدی^۱، حسین موسی‌زاده^{۲*}، علی جعفری^۳، علی کیاپی

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (Email: FarzadMohammadi@ut.ac.ir)
 ۲. دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (Email: hmousazade@ut.ac.ir)
 ۳. استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران (Email: Jafarya@ut.ac.ir)
 ۴. کارشناس خبره سازمان بنادر و دریانوردی، تهران، ایران (Email: ali.kiapey60@gmail.com)
- *نویسنده مسئول: گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران، کرج، ایران. تلفکس: ۰۱۱-۳۲۸۰۱-۲۶-۰۰۹۸

چکیده

اندازه‌گیری دقیق، قابل اعتماد، بلادرنگ، پیوسته و غیرانسدادی نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای در خطوط انتقال یک چالش فنی بوده است، که برای دستیابی به استفاده کارآمد از انرژی و مواد اولیه و کاهش ضایعات به طور فزاینده‌ای قابل توجه است. به هر حال، یافتن ساده‌ترین و مقاوم‌ترین روش اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای یکی از چالش‌های اساسی مهندسان و محققان بوده است. در این مطالعه، روش‌های قلیل استفاده در اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای، از لحاظ طراحی مهندسی ارزیابی شدند. از بین روش‌های ارزیابی شده، بعد از انتخاب بهترین گزینه، یک دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای مبتنی بر روش نیروی مرکز گرا در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شد و تحلیل تنش و کرنش دستگاه در نرم‌افزار Ansys انجام گرفت. نتایج حاصل از تحلیل تنش و کرنش دستگاه و محاسبات انجام گرفته در طراحی دستگاه نشان داد که این روش، روشی قابل اطمینان در به کارگیری این فناوری برای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای است.

کلمات کلیدی:

تحلیل اجزا محدود، مواد جامد فله‌ای، روش اندازه‌گیری مستقیم، نرخ جریان جرمی جامدات، نیروی مرکز گرا.

۱- مقدمه

انتقال مواد جامد فله به طور گسترده‌ای در تعدادی از فرایندهای صنعتی مانند تولید برق، ساخت فولاد، مواد شیمیایی، دارویی، فرآوری مواد غذایی، فرآوری گرانول کشاورزی و فرایندهای انتقال کالا مورد توجه است. متغیرهایی مانند نرخ جریان حجمی، غلظت حجمی، سرعت انتقال جامدات و نرخ جریان جرمی مواد جامد، از ویژگی‌های مهمی هستند که برای دستیابی به استفاده بهینه از انرژی و مواد اولیه، معمولاً لازم است آن‌ها اندازه‌گیری و کنترل شوند. روش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان جرم مواد جامد در یک خط لوله پنوماتیک را می‌توان به اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم و اندازه‌گیری‌های مستقیم تقسیم کرد [۳۴]. طی دو دهه گذشته، روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد جامد در سامانه‌های انتقال مورد مطالعه و توسعه قرار گرفته است. با این حال، در شرایط مختلف کارکرد، هر تکنیک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارد. تحقیقات بیشتر باید از نظر دقت، قابلیت اطمینان، مقاومت و حساسیت ابزار اندازه‌گیری انجام شود. در تحقیقی یان (۱۹۹۶)، تمام روش‌های پیشنهادی را با تأکید خاص به اصول سنجش، ویژگی‌های انحصاری و وضعیت توسعه آن بررسی کرد [۲]. مروری بر برخی از روش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان جرم غیرتهاجمی که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرد توسط محققان دیگری ارائه شده است [۳]. پژوهشگران دیگری خلاصه‌ای از اصول اندازه‌گیری، تحولات ابزار اندازه‌گیری و محدودیت‌های اصلی سه نوع روش را که عبارت بودند از: روش‌های خازنی، روش‌های فراصوت و روش‌های میکروویو ارائه دادند [۵]. در پژوهشی دیگر مروری بر طیف وسیعی از روش‌های موجود برای اندازه‌گیری غلظت و سرعت جامدات در جریان‌های جامد-گاز ارائه شده است [۳]، برخی از فناوری‌های رایج که در سامانه انتقال پنوماتیک به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند عبارتند از: حسگرهای خازنی، حسگرهای الکترواستاتیک و توموگرافی خازنی الکتریکی (ECT¹). در پژوهشی دیگر برخی از موضوعات کلیدی در اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای در خطوط انتقال پنوماتیک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش چندین مسئله اصلی، که اغلب به ساختار حسگرها یا روش‌های اندازه‌گیری متکی هستند در اندازه‌گیری جریان جرمی غیرمستقیم مواد فله‌ای از راه پنوماتیک خلاصه و برجسته شده است [۳۸].

طی دو دهه گذشته به منظور برآوردن نیازهای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای، روش‌های بسیاری مبتنی بر اندازه‌گیری غیرمستقیم پایش غلظت حجمی و سرعت جامدات ارائه شده است (جدول ۱).

جدول ۱- روش‌های غیرتماسی اندازه‌گیری غلظت حجمی و سرعت مواد جامد

دسته‌بندی	روش	روش سنجش	منابع
اندازه‌گری	الکتریکی	خازنی	[۲۴، ۲۳، ۱۲]
غلظت		الکترواستاتیک	[۳۹، ۳۶، ۳۰، ۲۱، ۲]
	میرایی و پراکندگی	پرتو گاما مایکروویو	[۷]
		نوری	[۳۴ و ۱۹]
		صوتی/آلتراسونیک	[۲۸]
	رزونانس (تشدید)	مغناطیس	[۳۴]
		مایکروویو	

1. Electrical Capacitance Tomography (ECT)

دسته بندی	روش	روش سنجش	منابع
		صوت	
	توموگرافی	خازنی/مقاومتی	[۱۳، ۲۷ و ۴۰]
		نوری	[۴۰]
		پرتو گاما/مایکروویو	[۴۴]
	تصویربرداری دیجیتال	صفحه لیزر و دوربین CCD	[۹ و ۳۶]
اندازه گیری	همبستگی متقابل	نوری	[۴۱]
سرعت		الکترواستاتیک	[۱۶ و ۲۴]
		خازنی	[۳۵]
		پرتو گاما	[۴۴]
	حسگر الکترونیکی و روش جدید پردازش سیگنال	حسگر الکترواستاتیک و تجزیه و تحلیل موجک	[۳۷]
		حسگر خازنی و تبدیل فوریه	
		حسگر صوتی و تبدیل فوریه و تبدیل موجک	[۱۱ و ۱۵]
	دابلر	دابلر لیزر	[۱۴ و ۳۱]
		دابلر مایکروویو	[۴۴]
	فیلتر مکانی (فضایی)	خازنی / الکترواستاتیک	[۳۲ و ۳۳]
		مایکروویو	
		نوری	[۲۲]

وانگ و همکاران (۲۰۱۴) حسگرهای خازنی و الکترواستاتیک یکپارچه برای اندازه گیری نرخ جریان سه فاز ذغال سنگ / زیست توده / هوا و ایجاد یک سیستم استنتاج فازی مبتنی بر شبکه تطبیقی برای استنباط غلظت حجمی هر فاز را توسعه دادند [۳۰].

برخی از روش های اندازه گیری غیرمستقیم بر اساس اصول خازنی یا الکترواستاتیک ارزان و ساده اجرا می شوند، اما تحقیقات نشان داده است که این حسگرها کاملاً به محتوای رطوبت، اندازه ذرات و ترکیب شیمیایی جامد حساس هستند [۳۹]. علاوه بر این، هرگونه عدم یکنواختی جریان عبور مواد در محل سنجش می تواند اندازه گیری غلظت و سرعت را به روشی کاملاً پیچیده تحت تأثیر قرار دهد [۳۴].

روش های مایکروویو و رادیومتریک، به دلیل ساختار پیچیده حسگر ممکن است هزینه بیشتری داشته باشد. در حالی که گرد و غبار مشکل اصلی حسگرهای نوری است. یکی از مشکلات اصلی حسگرهای صوتی این است که فرکانس مطلوب به اندازه ذره مرتبط است. با ذرات کوچک و سبک، فرکانس بهینه حدود ۳۰ کیلوهرتز است، اما با ذرات بزرگ، به حدود ۴۰۰ کیلوهرتز می رسد. علاوه بر این، برای تشخیص در کل سطح مقطع لوله باید از چندین مبدل استفاده شود [۳۴].

روش های توموگرافی از توموگرافی رایانه ای پزشکی (CT^2) مشتق شده اند و یک ابزار قدرتمند برای تولید خصوصیات غیر تهاجمی در مورد توزیع مواد در تقاطع اندازه گیری یک لوله انتقال پنوماتیک است. انواع مختلفی از سامانه های اندازه گیری توموگرافی برای اندازه گیری جریان چند فاز در حال توسعه است، به عنوان مثال

توموگرافی ظرفیت خازنی (ECT^3)، توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT^4)، توموگرافی مغناطیسی الکتریکی (EMT^5)، توموگرافی نوری الکتریکی (EOT^6) و حسگر توموگرافی مایکروویو (MWT^7).

طراحی، شبیه سازی عددی و ارزیابی تجربی یک سامانه اندازه گیری جدید مبتنی بر اصل تضعیف و روش توموگرافی نوری برای اندازه گیری سرعت جریان جرم مواد جامد در یک خط لوله انتقال ناوبری جاذبه توسعه یافته است [۴۰]. نتایج آزمون نشان داد که بین داده های جریان جرم واقعی و داده های تخمینی همبستگی خوبی وجود دارد. بزرگترین خطای گزارش شده ۱/۳۲ درصد با نرخ جریان جرمی ۲۱/۸ گرم در ثانیه بود. در حالی که خطاهای اندازه گیری کمتر از ۱ درصد را می توان در اکثر داده های اندازه گیری از ۱۹/۱ گرم در ثانیه تا ۳۴/۲ گرم در ثانیه به دست آورد. در مطالعه ای یک حسگر توموگرافی مایکروویو برای اندازه گیری غلظت و یک حسگر داپلر مایکروویو برای اندازه گیری سرعت برای تعیین نرخ جریان جرم جریان دو فازی جامد-گاز در یک خط لوله ارائه شده است [۴۴]. نتایج آزمایش این گروه نشان می دهد که می توان از MWT برای اندازه گیری غلظت مواد جامد فله استفاده کرد و توزیع ذرات را می توان به صورت تصویری از سطح مقطع مشاهده کرد. علاوه بر این، سرعت متوسط مواد جامد فله را می توان با اصل MWD و FFT کوتاه مدت اندازه گیری کرد. سرانجام می توان با استفاده از روش پیشنهادی محاسبه جریان جرم با حسگر MWT و حسگر MWD، نرخ جریان جرم و کل جرم مواد جامد فله را محاسبه کرد. نتایج آزمایش آن ها نشان می دهد که خطاهای اندازه گیری نرخ جریان جرم ۹ درصد است.

روش مستقیم اندازه گیری جریان جرم جامدات در مقایسه با اندازه گیری غیر مستقیم نسبتا ساده تر است. در روش مستقیم، به طور معمول، از یک عنصر حسگر مناسب برای پاسخگویی مستقیم به نرخ جریان جرم از طریق میدان حسگر جریان سنج مانند مواردی که بر اساس نیروی کوریولیس [۴، ۸، ۱۰ و ۱۷]، اصل انتقال حرارت [۶، ۱۸، ۴۲ و ۴۳]، تأثیر ضربه، نیروی مرکز گرا و نیروی گریز از مرکز ساخته شده اند، استفاده می شود.

روش اندازه گیری نیروی مرکز گرا بسیار مشله روش اندازه گیری مبتنی بر ضربه است. فقط نیرویی که اندازه گیری می شود متفاوت است. در اینجا نیروی مورد اندازه گیری به سمت مرکز بوده که یک نیروی عکس العمل ناشی از نیروی گریز از مرکز می باشد. طبق قانون دوم نیوتن، وقتی جسمی با سرعت ثابتی حرکت می کند تمایل دارد که وضعیت خود را حفظ کند و برای تغییر این وضعیت نیروی خارجی لازم است.

با توجه به مطالب ارائه شده در بالا، اندازه گیری نرخ جریان جرمی مواد فله ای یک از نیازهای اساسی بسیاری از صنایع می باشد و تحقیقات مختلفی نیز در رابطه با موضوع فوق انجام شده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، ارائه روشی است، که بتواند با کمترین هزینه و بدون نیاز به نگهداری یا کالیبراسیون های پیوسته، نرخ مواد فله ای را در مقیاس زیاد اندازه گیری نماید. طراحی و تحلیل استاتیکی و مقاومتی سامانه ارائه شده، از اهداف دیگر این تحقیق می باشد.

۲- مواد و روش

همان طور که در مقدمه اشاره شد، روش های مختلفی برای اندازه گیری نرخ جریان جرمی مواد فله ای پیشنهاد شده و مورد بررسی قرار گرفته اند. هر یک از روش های ارائه شده، تحت شرایط خاصی می تواند شرایط حاکم بر

3. Electrical Capacitance Tomography (ECT)
4. Electrical Resistance Tomography (ERT)
5. Electrical Magnetic Tomography (EMT)
6. Electrical Optical Tomography (EOT)
7. Microwave Tomography (MWT)

مساله را بر آورد نمایند. بنابراین برای انتخاب از بین سامانه‌هایی که وجود داشته‌اند، لازم است با مفهوم طراحی مهندسی، بهترین گزینه را برای شرایط این تحقیق انتخاب نمود. از جمله شرایط قابل توجه در این تحقیق، اندازه‌گیری مواد فله‌ای گرانولی تا دبی تقریباً ۸۰۰ ton/h به صورت پیوسته می‌باشد.

جدول (۲) مقایسه میان روش‌های مختلف اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد جامد را بر اساس روش طراحی مهندسی نشان می‌دهد. در این جدول تعداد ۱۰ مورد از پارامترهای تأثیرگذار در مطلوبیت یک طرح مشخص شده و تعداد ۱۱ مورد دستگاه اندازه‌گیری مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. مطابق مقایسه جدول (۲)، روش ECT بیشترین نمره را به خود اختصاص داده است (۷۴ از ۱۰۰). بعد از آن روش‌های مکانیکی Centripetal و Impact به صورت مشترک در جایگاه دوم (هر دو با ۶۹ نمره) و روش‌های آلتراسونیک و مایکروویو به صورت مشترک در جایگاه سوم قرار می‌گیرند. در این ارزیابی، روش‌های Gravimetric، Optical و Nuclear در کل قابلیت استفاده در شرایط ذکر شده را ندارند گرچه حتی ممکن است نمره بالاتری را نیز کسب نموده باشند. در واقع عدد صفر جزو شرایط رد کامل طرح می‌باشد. در هر طرح، برای هر پارامتر نمره ای بین ۱-۱۰ اختصاص داده شد. در اکثر موارد، مبنای اختصاص نمره، منابع بررسی شده می‌باشند.

جدول ۲- انتخاب از بین روش‌های بررسی شده بر اساس روش طراحی مهندسی

حسگر	عدم مناسب	مستقل	حساسیت کمتر به رطوبت	غیر نفوذی	دقت	صرفه صرفه اقتصادی	سادگی و دسترسی از تکنولوژی ارتعاش	استقلال عملکرد از ۱۰۰	مداومت	جمع
Centripetal	۷	۸	۷	۲	۹	۹	۱۰	۳	۶	۶۹
Impact	۷	۸	۷	۲	۹	۹	۱۰	۳	۶	۶۹
Coriolis	۱	۸	۷	۰	۹	۴	۶	۳	۴	۵۰
Gravimetric	۸	۹	۴	۷	۹	۴	۵	۳	۴	۵۳
Loss in weight ECT	۶	۸	۴	۲	۸	۱	۴	۳	۳	۴۸
Electrostatic	۶	۸	۵	۳	۱۰	۴	۲	۸	۸	۵۹
Ultrasonic	۱	۸	۷	۹	۳	۵	۴	۸	۸	۶۰
Microwave	۱	۸	۷	۹	۳	۳	۳	۸	۸	۶۰
Optical	۰	۸	۵	۷	۹	۲	۷	۸	۷	۶۱
Nuclear	۶	۸	۷	۹	۷	۰	۰	۸	۷	۶۰

به هر حال، در پژوهش حاضر یک دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای بر مبنای نیروی مرکز گرا طراحی و شبیه‌سازی شد.

۲-۱- تئوری روش اندازه‌گیری

نیروی مرکز گرا نیروی داخلی است که برای حرکت یک جسم در یک مسیر دایره‌ای مورد نیاز است. این نیرو یک نیرو و یا برابندی از نیروها است، که این نیرو می‌تواند هر نیروی از جمله نیروی وزن، کشش تناب، نیروی عمودی تکیه‌گاه، نیروی اصطکاک، نیروی الکتریکی و غیره باشد. می‌توان نشان داد که جسمی که در یک مسیر دایره‌ای حرکت

می‌کند، در امتداد شعاع به سمت مرکز دایره شتاب دارد. این شتاب شعاعی، شتاب مرکز گرا نامیده می‌شود، به گونه‌ای که اگر جسمی هنگام حرکت در یک مسیر دایره‌ای از شعاع (r) بر حسب (cm)، دارای سرعت خطی یا مماسی (v) بر حسب (m.s⁻¹) باشد، شتاب مرکز گرا آن v²/r بر حسب (m.s⁻²) است. اگر جسم تحت شتاب مرکز گرا دارای جرم (m) بر حسب (kg) باشد، طبق قانون دوم نیوتن، نیروی مرکز گرا (F_c) بر حسب (N) در جهت شتاب بوده و با رابطه (۱) بیان می‌شود.

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

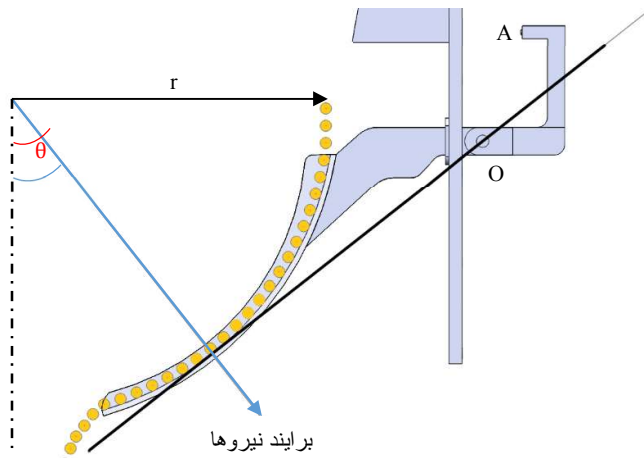
در اینجا نیروی عمودی تکیه‌گاه (F_N) نقش نیروی مرکز گرا را ایفا می‌کند (F_c = F_N). با توجه به شکل (۱) نیروی مرکز گرای حاصل از حرکت دانه‌ها روی صفحه اندازه‌گیری از رابطه (۲) الی (۴) قابل محاسبه است.

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

$$F_c - mg \cos \theta = \frac{mv^2}{r} \quad (3)$$

$$F_c = \frac{mv^2}{r} + mg \cos \theta \quad (4)$$

که در این روابط F_r نیروها در راستای شعاع بر حسب (N)، F_c نیروی مرکز گرا بر حسب (N) در جهت شتاب، r شعاع مسیر دایره‌ای بر حسب (m)، v سرعت خطی یا مماسی بر حسب (m.s⁻¹) زاویه نیروی وزن با محور yها (امتداد شعاع دایره) بر حسب درجه و m جرم جسم بر حسب (kg) می‌باشد.



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

در طراحی این ابزار اندازه‌گیری مکانیزمی مطابق شکل (۱) مدل سازی شد، که با عبور مواد گرانوله روی صفحه نیروی مرکز گرا F_c به صفحه وارد می‌شود. با تعیین محل دقیق نقطه دوران O که روی خط عمود بر برایند نیروی‌های وارد بر صفحه اندازه‌گیری قرار دارد، می‌توان با قرار دادن نیروسنجی در نقطه A به صورت بلادرنگ نرخ جریان جرمی را محاسبه کرد. شکل (۲) برایند 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 و عمود بر شعاع (مماسی) وارد می‌کنند به ترتیب برابر F_{c1} و F_{c2} است، که در آن با توجه به طراحی دستگاه، زاویه θ از ۱۵° تا ۷۹° تغییر می‌کند. برایند این نیروها به مرکز سطح بار پخشی وارد می‌شود و مقدار آن برابر با مساحت بار

گسترده است. 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 θ در نرم افزار SolidWorks انجام شد که مقدار $\theta=38^\circ$ به دست آمد) (شکل ۲). 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 می شود. برای محاسبه برآیند بار پخشی در مرکز حجم بار پخشی مطابق روابط (۵) الی (۱۰) داریم.

$$F_{Ceq} = \frac{Mv^2}{r} + q_r \quad (5)$$

$$q_r = \gamma V \cos \theta \quad (6)$$

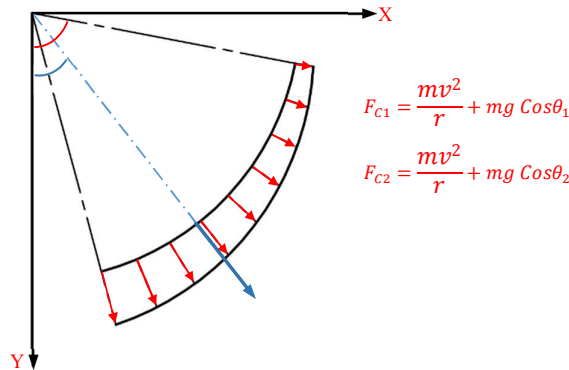
$$\gamma = \rho g \quad (7)$$

$$V = blt \quad (8)$$

$$l = \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{360} 2\pi r \quad (9)$$

$$M = \rho V \quad (10)$$

که در این روابط F_{Ceq} برآیند نیروی وارد بر صفحه اندازه گیری بر حسب (N)، M جرم کل مواد فله ای روی صفحه اندازه گیری بر حسب (kg)، r شعاع مسیر دایره ای بر حسب (m)، v دارای سرعت خطی یا مماسی بر حسب ($m.s^{-1}$)، q_r بار متمرکز معادل بار گسترده ناشی از وزن بر حسب (N)، γ وزن مخصوص بر حسب ($N.m^{-3}$)، ρ جرم واحد حجم بر حسب ($kg.m^{-3}$)، g شتاب گرانش بر حسب ($m.s^{-2}$)، b عرض صفحه اندازه گیری بر حسب (m)، l طول کمان صفحه بر حسب (m)، t ضخامت مواد روی صفحه بر حسب (m) و $\theta_1=15^\circ$ و $\theta_2=79^\circ$ متناسب با مدل سازی صفحه می باشند.



شکل ۲- برآیند نیروهای وارد شده بر صفحه اندازه گیری طراحی شده

با توجه به رابطه (۵) و با توجه به ثابت بودن شعاع انحنا، نیروی گرانش، زاویه θ (مرکز سطح (یا حجم) بار پخشی، θ_1 و θ_2 ثابت) و با فرض ثابت بودن سرعت مماسی (فرض جریان یکنواخت)، جریان برابر با جرم است. به این ترتیب، سیگنال جریان یک جریان جرمی واقعی است. بنابراین دستگاه اندازه گیری نرخ جریان جرمی تأثیر نیروی ضربه ذرات ناشی از برخورد را اندازه گیری نمی کند. زیرا ذرات هرگز روی صفحه اندازه گیری تأثیر ضربه نمی زند. بلکه، ذرات برای مدت طولانی تری روی صفحه قرار می گیرند و در نتیجه سیگنال دقیق تری به دست می آید.

از طرفی برای اینکه تأثیر نیروی اصطکاک (f_s) بر محاسبات ناچیز شود، مطابق رابطه (۱۱) الی (۱۴) داریم.

$$f_s \ll mg \sin \theta \quad (11)$$

$$\mu_s F_N \ll mg \sin \theta \quad (12)$$

$$\mu_s \left(\frac{mv^2}{r} + mg \cos \theta \right) \ll mg \sin \theta \quad (13)$$

$$\mu_s \ll \frac{rg \sin \theta}{v^2 + rg \cos \theta} \quad (14)$$

در روابط فوق، مقدار سرعت با توجه به قانون پایستگی انرژی در سقوط آزاد از رابطه (۱۵) به دست می‌آید [۲۹].

$$v = \sqrt{2gh} \quad (15)$$

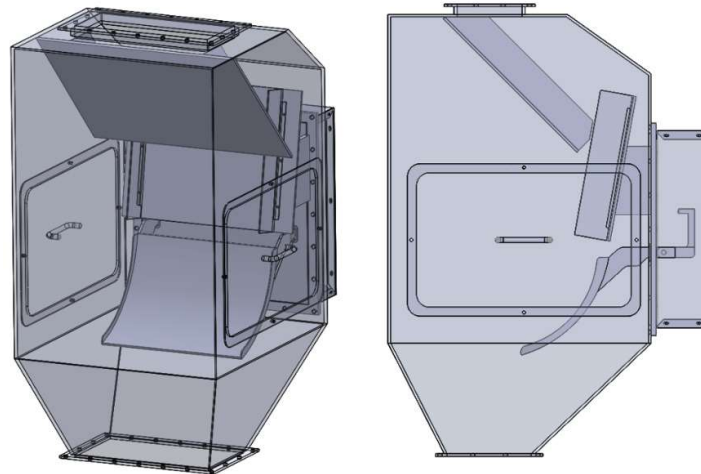
که در آن v سرعت دانه روی صفحه اندازه‌گیری بر حسب $(m.s^{-1})$ و h ارتفاع نقطه رها شدن دانه (m) است.

۲-۲- طراحی و شبیه‌سازی دستگاه

بر اساس تئوری ذکر شده در بخش قبل، مدل‌سازی دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای مبتنی بر نیروی مرکز گرا مطابق شکل (۳) در نرم‌افزار SolidWorks-2018 انجام شد. پهنای صفحه اندازه‌گیری به طور نمونه ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، که این اندازه بسته به نرخ جریان جرمی مواد ورودی می‌تواند متفاوت باشد. جدول (۳) مشخصات صفحه اندازه‌گیری طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳- مشخصات صفحه اندازه‌گیری طراحی شده

عرض (cm)	ضخامت صفحه (cm)	شعاع (cm)	θ (درجه)
۶۰	۰/۸	۴۶/۸	۳۸°



شکل ۳- دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد گرانوله مبتنی بر نیروی مرکز گرا

۲-۳- تعریف مسئله المان محدود

در این بخش مبتنی بر مفهوم مهندسی به کمک رایانه، تمامی تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی روی قطعات شبیه‌سازی شده در رایانه انجام می‌گیرد. از جمله موارد استخراج شده، توزیع تنش و تغییر مکان در حین عبور مواد با نرخ جریان جرمی مختلف است. بنابراین مدل طراحی شده در SolidWorks از طریق دستور Import به نرم‌افزار Ansys

وارد شد. تحلیل تنش دستگاه، در نرخ‌های مختلف جریان جرمی انجام شد. به عبارتی ریزش مواد با ارتفاع‌های مختلف (۱ الی ۸ سانتی‌متر با گام‌های ۱ سانتی‌متر) به‌عنوان بارگذاری‌های مختلف مدنظر قرار گرفت. تحلیل دستگاه در نرم‌افزار ANSYS-18.2 محیط Workbench انجام شد. در جدول (۴) برخی از خواص مکانیکی و فیزیکی مواد مورد استفاده در طراحی مکانیزم مورد نظر ارائه شده است. از این خواص برای مدل‌سازی المان محدود دستگاه استفاده شد.

جدول ۴- خواص مکانیکی و فیزیکی مواد مکانیزم مدل‌سازی شده

چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	مدول برشی (GPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)
۷۸۵۰	۲۰۰	۰/۳	۷۶/۲	۴۶۰	۲۵۰

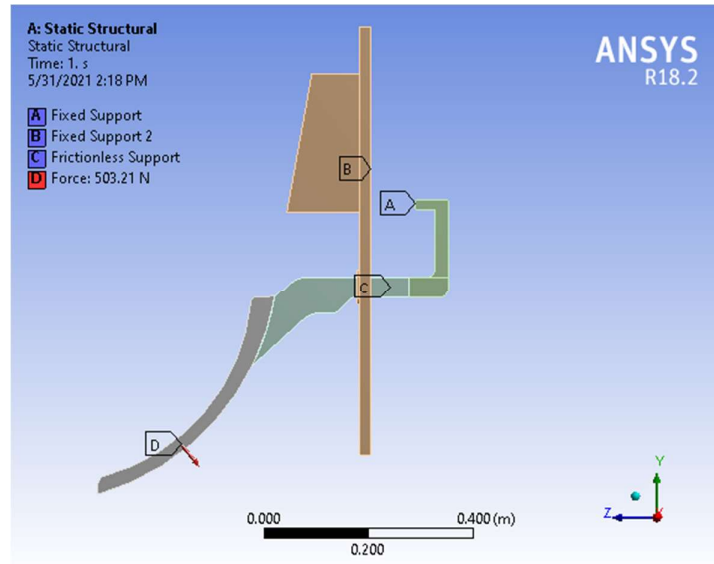
در ادامه، مکانیزم مدل‌سازی شده در شکل (۳)، در محیط Ansys مش‌بندی شد. مش‌بندی یا شبکه‌بندی، به تبدیل جسم یا مدل به بخش‌های کوچک‌تر، محدود و منظم گفته می‌شود. شبکه‌بندی از مهم‌ترین مراحل برای حل مسائل است. برای ایجاد یک شبکه مناسب از سلول‌ها باید نسبت به روش‌های موجود در شبکه‌بندی دانش کافی داشت. انواع مش‌بندی در Ansys، روش‌های Cartesian، O-grid، C-grid، Y-grid، Hybrid، Octree و Delaunay هستند، که در این تحقیق با توجه به پیچیده نبودن مدل از مش‌بندی براساس انتخاب خود نرم‌افزار استفاده شد (مش‌بندی خودکار). کل گره‌ها و المان‌های مورد استفاده برای مکانیزم مورد تحلیل به ترتیب ۲۲۵۷۹ و ۱۰۸۱۱ می‌باشد.

تحلیل دستگاه طی ریزش مواد فله‌ای با ضخامت‌های مختلف روی صفحه (۱ الی ۸ سانتی‌متر با گام‌های ۱ سانتی‌متر) صورت گرفت، که در اینجا از خواص گندم نرم (لاین C7916) برای محاسبه نیروهای وارده جهت انجام تحلیل‌ها استفاده شد. با دانستن حجم مواد عبوری و چگالی توده گندم (۰/۷۶۹ g.cm⁻³) [1]، جرم مواد عبوری مشخص می‌شود و با استفاده از رابطه (۵) نیروی‌های مختلف وارد بر صفحه اندازه‌گیری به دست می‌آید (جدول ۵). در رابطه (۱۵) برای محاسبه سرعت حرکت مواد روی صفحه، ارتفاع ریزش مواد ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد، که به تناسب سرعت حرکت ۳/۴۳ m.s⁻¹ ایجاد می‌کند. قاب اصلی دستگاه با قید fixed support در تمامی جهات محدود شد (نقطه B در شکل ۴) و محل قرارگیری نیروسنج (نقطه A در شکل ۴) نیز با همین قید در تمامی جهات محدود شد. قید frictionless support روی محل دوران (نقطه C در شکل ۴) اعمال شد. برآیند نیروها نیز به مرکز حجم نیروهای گسترده (نقطه D در شکل ۴) وارد شد. پس از اعمال قیود و نیروهای وارد شده، در نهایت تحلیل تنش بر اساس معیار فون میسز^۸ و میزان تغییر شکل حاصل از نیروها به دست آمد.

جدول ۵- مشخصات ریزش مواد جامد فله‌ای با ضخامت‌های مختلف مواد روی صفحه اندازه‌گیری

ضخامت مواد (m)	حجم مواد (m ³)	جرم مواد (kg)	نرخ جرمی (kg/s)	نیروی وارد بر صفحه (N)
۰/۰۱	۰/۰۰۳۱۱	۲/۳۹۳	۱۱/۶۴۱	۶۲/۹۰
۰/۰۲	۰/۰۰۶۱۶	۴/۷۳۴	۳۱/۲۸۲	۱۲۵/۸۰
۰/۰۳	۰/۰۰۹۱۳	۷/۰۲۴	۴۶/۹۲۲	۱۸۸/۷۰
۰/۰۴	۰/۰۱۲۰۴	۹/۲۶۲	۶۲/۵۶۳	۲۵۱/۶۱

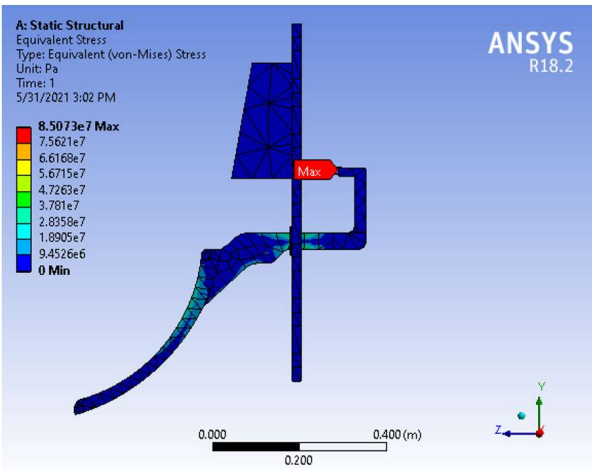
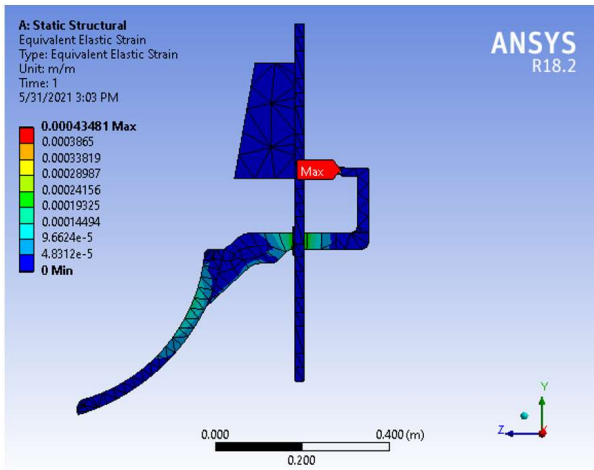
۳۱۴/۵۱	۷۸/۲۰۴	۱۱/۴۴۸	۰/۰۱۴۸۹	۰/۰۵
۳۷۷/۴۱	۹۳/۸۴۵	۱۳/۵۸۳	۰/۰۱۷۶۶	۰/۰۶
۴۴۰/۳۱	۱۰۹/۴۸۶	۱۵/۶۶۶	۰/۰۲۰۳۷	۰/۰۷
۵۰۳/۲۱	۱۲۵/۱۲۷	۱۷/۶۹۷	۰/۰۲۳۰۱	۰/۰۸



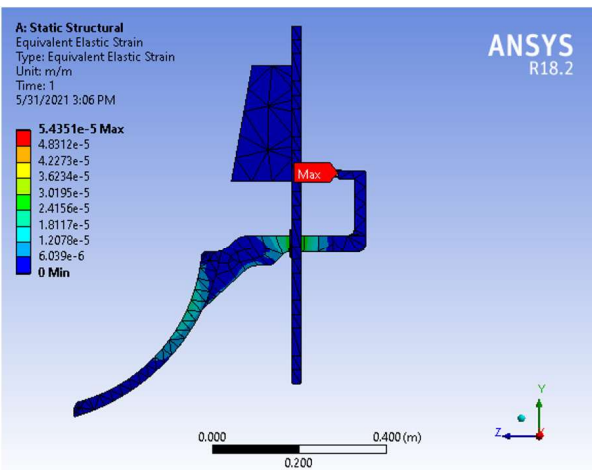
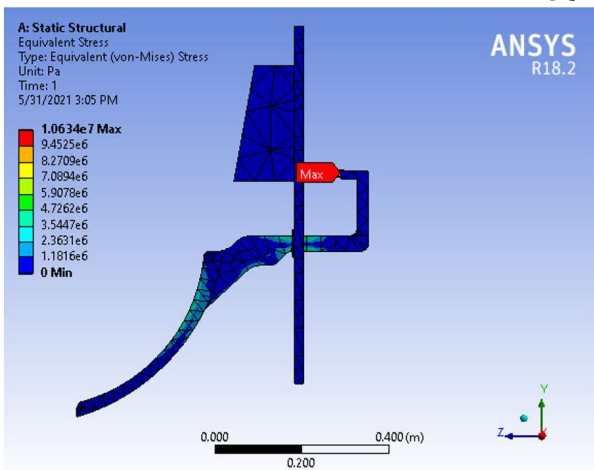
شکل ۴- قیدگذاری و اعمال نیرو روی دستگاه

۳- نتایج و بحث

شکل‌های (۵ و ۶) خروجی نرم‌افزار Ansys و نحوه توزیع تنش و کرنش در قسمت‌های مختلف دستگاه را برای اعمال بیشترین بار (۵۰۳/۲۱ نیوتن، معادل نرخ جرمی ۱۲۵/۱۲۷ kg/s) و کمترین بار (۶۲/۹۰ نیوتن، معادل نرخ جرمی ۱۱/۶۴۱ kg/s) روی صفحه اندازه‌گیری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین تنش و کرنش بر اساس معیار فون میسز به محل قرارگیری لوسل وارد شده است. جدول (۶) بیشترین مقدار تنش و کرنش بر اساس معیار فون میسز برای محل تعیین شده جهت نصب لودسل را نشان می‌دهد.



شکل ۵- کانتورهای تنش (سمت راست) و کرنش (سمت چپ) فون میسز برای دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی برای اعمال نیروی ۵۰۳/۲۱ نیوتن

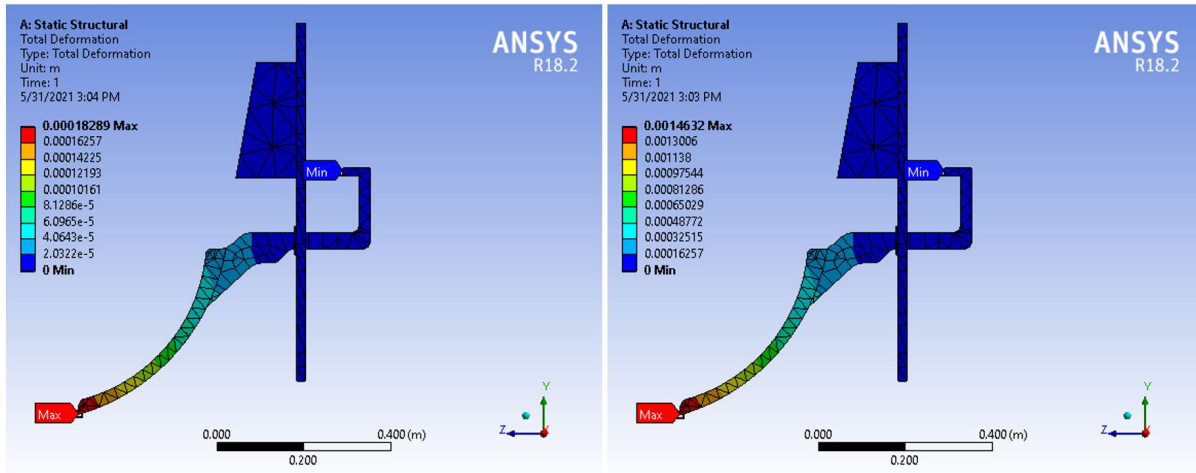


شکل ۶- کانتورهای تنش (سمت راست) و کرنش (سمت چپ) فون میسز برای دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی برای اعمال نیروی ۶۲/۹۰ نیوتن

جدول ۶- مقدار تنش و کرنش بیشینه در محل تعیین شده جهت نصب لودسل روی دستگاه طراحی شده

ضریب اطمینان	کرنش ((m/m).e-5)	تنش (Pa.e7)	نیروی وارد بر صفحه (N)
۱۵-۱۵	۵/۸۳۱۲	۱/۰۶۳۴	۶۲/۹۰
۱۱/۱۵-۷۶	۱۰/۸۷۰	۲/۱۲۶۸	۱۲۵/۸۰
۷/۱۵-۸۴	۱۶/۳۰۵	۳/۱۹۰۲	۱۸۸/۷۰
۵/۱۵-۸۸	۲۱/۷۴۱	۴/۲۵۳۸	۲۵۱/۶۱
۴/۱۵-۷۰	۲۷/۱۷۶	۵/۳۱۷۲	۳۱۴/۵۱
۳/۱۵-۹۲	۳۲/۶۱۱	۶/۳۸۰۵	۳۷۷/۴۱
۳/۱۵-۳۶	۳۸/۰۴۶	۷/۴۴۳۹	۴۴۰/۳۱
۲/۱۵-۹۴	۴۳/۴۸۱	۸/۵۰۷۳	۵۰۳/۲۱

مقدار جابجایی کل نیز از خروجی نرم‌افزار Ansys به دست آمد. با توجه به شکل (۷) با اعمال بیشترین بار (۵۰۳/۲۱ نیوتن، معادل نرخ جرمی ۱۲۵/۱۲۲ kg/s) و کمترین بار (۶۲/۹۰ نیوتن، معادل نرخ جرمی ۱۱/۶۴۱ kg/s) روی صفحه اندازه‌گیری، مقدار جابجایی بیشینه برای هر دو حالت به ترتیب برابر ۰/۰۰۰۱۸۲۹ و ۰/۰۰۰۱۴۶۳۲ متر در انتهای پایینی صفحه به دست آمد.



شکل ۷- جابجایی کل برای اعمال بیشترین (سمت راست) و کمترین (سمت چپ) برای دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی

با توجه به بیشترین تنش‌های وارد شده روی دستگاه و تنش تسلیم فولاد و همچنین با توجه به ضریب اطمینان به دست آمده برای دستگاه (جدول ۶)، سامانه طراحی شده از استحکام لازم برخوردار می‌باشد. همچنین با توجه به این که بیشترین نیروی وارد شده به محل مدنظر جهت نصب لودسل وارد می‌شود، می‌توان با نصب لودسل در این قسمت از این دستگاه به منظور اندازه‌گیری برخط نرخ جریان جرمی مواد گرانوله استفاده کرد. ذکر این نکته ضروری است که تحلیل‌های تکمیلی دستگاه بر اساس قوانین مومنتوم برای جریان‌های حجمی، تحلیل رفتار مواد گرانوله با روش المان گسسته (DEM⁹) و ساخت دستگاه در فازهای بعدی پژوهش مدنظر است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر یک دستگاه اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای بر مبنای نیروی مرکز گرا طراحی و شبیه‌سازی شد. در این راستا بر اساس تئوری نیروی مرکز گرا و با طراحی ابتکاری، محل دقیق برابند نیروهای وارد شده روی صفحه اندازه‌گیری و به تناسب محل دقیق لولای صفحه تعیین شد. تحلیل تنش دستگاه، در نرخ‌های مختلف جریان جرمی انجام شد، که نتایج حاصل از تنش و کرنش و همچنین بهره‌مندی از تئوری‌های ذکر شده در طراحی دستگاه نشان از روشی قابل اطمینان برای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد فله‌ای است.

سپاسگزاری

9. Discrete Element Method (DEM)

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

مراجع:

۱. رضا صالحیون، ا.، خوش تقاضا، ه. و هاشمی‌پور، س.ع. ۱۳۹۲. تعیین چگالی، تخلخل و حجم منافذ داخلی دانه‌های غلات (گندم و ذرت) بوسیله پیکنومتر گازی. هشتمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی (بیوسیستم) و مکانیزاسیون، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.
2. Abbas, F., Wang, L. and Yan, Y. 2020. Mass flow rate measurement of solids in a pneumatic conveying pipeline in different orientations. Measurement: Sensors, 10-12, 100021.
3. Ahmed, Wael H. and Ismail, Basel I. 2008. Innovative Techniques for Two-Phase Flow Measurements. Recent Patents on Electrical Engineering, 1: 1-13.
4. Anklin, M., Drahm, W. and Rieder, A. 2006. Coriolis mass flow meters: overview of the current state of the art and latest research. Flow Measurement and Instrumentation, 17 (6): 317-323.
5. Arakaki, C., Ghaderi, A., Datta, B.K. and Lie, B. 2006. Non-intrusive mass flow measurements in pneumatic transport, in: CHoPS-05, 2006 the 5th International Conference for Conveying and Handling of Particulate Solids, Sorrento, Italy, 27th–30th August.
6. Avila, R. and Cervantes, J. 1995. Analysis of the heat transfer coefficient in a turbulent particle pipe flow. International Journal of Heat and Mass Transfer, 38 (11): 1923–1932.
7. Barratt, I.R., Yan, Y., Byrne, B. 2001. A parallel-beam radiometric instrumentation system for the mass flow measurement of pneumatically conveyed solids. Measurement Science and Technology, 12 (9): 1515–1528.
8. Beck, M.S., Green, R.G. and Thorn, R. 1987. Non-intrusive measurement of solids mass flow in pneumatic conveying. Journal of Physics, E. Scientific Instrumentation, 20 (7): 835-840.
9. Carter, R. and Yan, Y. 2005. An instrumentation system using combined sensing strategies for online mass flow rate measurement and particle sizing. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54 (4): 1433-1437.
10. Coulthard, J., Byrne, B. and Yan, Y. 1991. Non-restrictive measurement of solids mass flow rate in pneumatic conveying systems. Measurement and Control, 24: 113-119.
11. He, L., Zhou, Y., Huang, Z., Wang, J., Lungu, M. and Yang, Y. 2014. Acoustic analysis of particle-wall interaction and detection of particle mass flow rate in vertical pneumatic conveying. Industrial and Engineering Chemistry Research, 53: 9938-9948.

12. Hu, H.L., Xu, T.M., Hui, S.E. and Zhou, Q.L. 2006. A novel capacitive system for the concentration measurement of pneumatically conveyed pulverized fuel at power stations. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17 (2):87-92.
13. Jaworski, A.J. and Dyakowski, T. 2001. Application of electrical capacitance tomography for measurement of gas–solids flow characteristics in a pneumatic conveying system. *Measurement Science and Technology*, 12 (9): 1109-1119.
14. Le Duff, A., Valiere, J.-C. and Bosch, T. 2002. Velocity measurement in a fluid using LDV: low-cost sensor and signal processing design, *Sensors. Proceedings of IEEE 17.4*, 1347-1350.
15. Li, H., 2002. Application of wavelet multi-resolution analysis to pressure fluctuations of gas–solid two-phase flow in a horizontal pipe. *Powder Technology*, 125, 61-73.
16. Ma, J. and Yan, Y. 2000. Design and evaluation of electrostatic sensors for the measurement of velocity of pneumatically conveyed solids. *Flow Measurement and Instrumentation*, 11 (3): 195–204.
17. Mathur, M.P. and Klinzing, G.E. 1983. Dense phase pneumatic transport of coal powders. *Measurement and Analysis*, MS 335.
18. Moriyama, T., Fujii, S., Abe, K. and Kobayashi, M. 1985. Mass flow meter using heat transfer for dense phase solid gas two-phase flow, in: *Proceedings of International Conference on Fluid Control and Measurement*. Tokyo, Japan, September, pp. 795–800.
19. Nieuwland, J.J., Meijer, R., Kuipers, J.A.M. and Swaaij, W.P.M. 1996. Measurements of solids concentration and axial solids velocity in gas–solid two-phase flows. *Powder Technology*, 87 (2): 127- 139.
20. Otsu, N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9 (1): 62-66.
21. Peng, L., Zhang, Y. and Yan, Y. 2008. Characterization of electrostatic sensors for flow measurement of particulate solids in square-shaped pneumatic conveying pipelines. *Sensors and Actuators A*, 141: 59-67.
22. Petrak, D. 2002. Simultaneous measurement of particle size and particle velocity by the spatial filtering technique. *Particle and Particle Systems Characterization* 19 (6): 391-400.
23. Sen, S., Das, P.K., Dutta, P.K., Maity, B., Chaudhuri, S., Mandal, C. and Roy S.K. 2000. PC-based gas–solids two-phase mass flowmeter for pneumatically conveying systems. *Flow Measurement and Instrumentation*, 11 (3):205-212.
24. Shao, F., Lu, Z., Wu, E. and Wang, S. 2000. Study and industrial evaluation of mass flow measurement of pulverized coal for iron-making production. *Flow Measurement and Instrumentation*, 11 (3): 159-163.
25. Shao, J., Krabicka, J. and Yan, Y. 2010, Velocity measurement of pneumatically conveyed particles using intrusive electrostatic sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59 (5): 1477–1484.
26. Song, D., Peng, L., Lu, G., Yang, S. and Yan, Y. 2009. Digital image processing based mass flow rate measurement of gas/solid two-phase flow, in: *The 6th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows*. *Journal of Physics: Conference Series*, 147 (1): 1–8.

27. Sun, M., Liu, S., Lei, J. and Li, Z. 2008. Mass flow measurement of pneumatically conveyed solids using electrical capacitance tomography, *Measurement Science and Technology* 19 (4): 1-6.
28. Tallon, S. and Davies, C.E. 1997. Use of the attenuation of acoustic pulsed waves for concentration measurement in gas–solid pipe flow. *Advances in Fluidization and fluid particle systems*, AICHE Symposium Series, 93 (317): 136–140.
29. Walker, J., David, H. and Robert, R. .2014. *Fundamentals of Physics, Volum 1: Mechanics and Heat*. 10 th. Wiley (publisher), 1450 P.
30. Wang, X., Hu, H. and 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.
31. Woodhead, S.R., Pittman, A.N. and Ashenden, S.J. 1995. Laser doppler velocimetry measurements of particle velocity profiles in gas–solid two-phase flows, pp. 770–773. <https://ieeexplore.ieee.org/document/515420>
32. 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.
33. Xu, C., Zhou, B., Yang, D., Tang, G. and Wang, S. 2008. Velocity measurement of pneumatically conveyed solid particles using an electrostatic sensor. *Measurement Science and Technology*, 19 (2): 1-9.
34. Yan, Y. 1996. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Measurement Science and Technology*. 7 (12): 1687-1706.
35. Zangl, H., Fuchs, A., Brasseur, G. and 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, 17–19 May, pp. 1773-1778.
36. Zhang, J. and Coulthard, J. 2005. Theoretical and experimental studies of the spatial sensitivity of an electrostatic pulverised fuel meter. *Journal of Electrostatics*, 63 (12): 1133-1149.
37. Zhang, J., Guo, Y. and Shen, Y. 2004. A wavelet-based method for measuring particulate velocity by an active electrostatic sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 53 (4): 1345-1351.
38. Zheng, Y. and 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.
39. Zheng, Y. and Liu, Q. 2011. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement*, 44: 589-604.
40. Zheng, Y., Li, Y. and 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.
41. Zheng, Y., Liu, Q. and Li, C. 1996. Calibration and error analysis of the measurement system for the dry fiber mass in paper pulp. *Measurement Technique*, 9: 19-23.

42. Zheng, Y., Pugh, J., McGlinchey, D. and Ansell, R. 2008. Simulation and experimental study of gas-to-particle heat transfer for noninvasive mass flow measurement, *Measurement*, 41 (4): 446–454.
43. Zheng, Y., Pugh, J., McGlinchey, D. and Knight E. 2009. Investigation of heat transfer coefficient in a gas–solids dense phase pneumatic pipe flow. *Bulk Solids and Powder Science and Technology*, 4 (4):169–174.
44. Zou, J., Liu, C., Wang, H. and Wu, Z.P. 2020. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods. *Powder Technology*, 360: 112-119.

Design and simulation of a mass flow rate measurement device based on centripetal force for bulk solids

Farzad Mohammadi¹, Hossen Mousazadeh^{2*}, Ail Jafari³, Ali Kiapey⁴

1. Ph.D Candidate in Mechanical Engineering of Biosystems, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Associate Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran
3. Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran
4. Professional Researcher of Ports and Maritime Organization, Tehran, Iran

*Corresponding author

*Corresponding author: Department of Mechanical Engineering of Biosystems, University of Tehran,
P.O. Box 4111, Karaj, Iran T: (98) 26 32801011
Email: hmousazade@ut.ac.ir

Abstract

An accurate, reliable, on-line, continuous and non-invasive measurement of solids' mass flow rate in conveying pipelines has been a technically challenging area, which becomes increasingly significant to achieve efficient utilization of energy and raw materials and to reduce waste. However, determining the simplest and most robust method for measuring the mass flow rate of bulk solids has been one of the major challenges for engineers and scientists. In this study, the methods that can be used to measure the mass flow rate of bulk materials were evaluated in terms of engineering design. Among the evaluated methods, after selecting the best option, a mass flow rate measuring device for bulk solids based on centripetal force method was designed in SolidWorks software and the stress and strain analysis of the device was performed in Ansys software. The results of stress and strain analysis of the device and calculations performed in the design of the device showed that this method is a reliable method in using this technology to measure the mass flow rate of bulk materials.

Key words: Finite element analysis, bulk solids flow, direct measurement method, solids mass flow rate, centripetal force.