مروری بر روش‌های اندازه‌گیری تراکم حجمی مواد جامد در لوله‌های انتقال پنوماتیک مواد

هادی عظیمی نژادیان[۱]، سید حسین کارپرورفرد[۲*]، مجتبی محمدی

[۱]دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (hadiazimi883287@yahoo.com).

[۲]دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (karparvr@shirazu.ac.ir).

[۳]دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (mojtaba_58@yahoo.com)

چکیده

دستیابی به روشی دقیق، قابل اعتماد، برخط، پیوسته و غیر مخرب برای اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد جامد در لوله‌های انتقال پنوماتیکی مواد همواره یک موضوع چالش برانگیز بوده است. کاهش مصرف انرژی، حفظ محیط زیست و کاهش ضایعات، محرک‌های اصلی محققین در توسعه روش‌های اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد است. در این مطالعه روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری تراکم مواد جامد به منظور اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد بررسی می‌شوند. بر اساس اصول و پیکربندی هر روش، عملکرد، محدودیت‌ها، اصول سنجش آن‌ها، ویژگی‌های انفرادی هر روش و وضعیت توسعه‌ی هر روش بررسی می‌شود.

کلمات کلیدی: انتقال پنوماتیک مواد، تراکم حجمی، نرخ جریان جرمی مواد.

Review of methods for volumetric concentration measurement of solids in pneumatic conveying pipelines.

Hadi Azimi Nejadian[1], Seyed Hossein Karparvarfard[* 2], Mojtaba Mohamadi[3]

[1]PhD student of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. (hadiazimi883287@yahoo.com).

[2]Associate Professor of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. (karparvr@shirazu.ac.ir).

[3]MSc student of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. (mojtaba_58@yahoo.com).

ABSTRACT

Achieving an accurate, reliable, online, continuous and non-destructive method for measuring the mass flow rate of solids in pneumatic conveying pipelines has always been a challenging issue. Reducing energy consumption, protecting the environment and reducing waste are the main motivating factors for researchers in developing methods for measuring the mass flow rates of solids in pneumatic conveying. This study offers a review of methods for volumetric concentration measurement of solids in pneumatic conveying pipelines. Based on the principles and configuration of each method, the operation, limitations, principles of measurement, individual features and also status of the development of each method are investigated.

Keywords: Pneumatic conveying, volumetric concentration, Mass flow rate.

۱- مقدمه

انتقال‌دهنده‌های پنوماتیک به طور گسترده در صنعت به منظور انتقال مواد پودری و دانه‌ای از یک سطح به سطح دیگر استفاده می‌شوند. . از مهم‌ترین مزیت‌های این روش می‌توان به کنترل آسان و خودکار، پایین بودن هزینه نگهداری و نیروی انسانی، حمل و نقل مواد بدون ایجاد گرد و غبار، ایمنی کافی و اطمینان خاطر در زمان انتقال با مقادیر زیاد، استفاده چند منظوره از یک لوله جهت انتقال مواد مختلف و انعطاف پذیری در انتخاب مسیر انتقال لوله‌ها به صورت عمودی، افقی و مورب اشاره کرد (Karparvarfard, 1996). تحقیقات زیادی به منظور تعیین ارتباط بین پارامترهای مختلف یک جریان دو فازی انجام شده و تاثیر هر یک از پارامترها روی نرخ جریان جرمی مواد برسی شده است. در همین راستا در تحقیقی با شیاردار کردن لوله‌های انتقال مواد اثر نوع شیار و عمق شیار روی نرخ جریان جرمی مواد بررسی شد (Karparvarfard, 2005). دستیابی به روشی دقیق، قابل اعتماد، برخط، پیوسته و غیر مخرب برای اندازه‌گیری جریان جرمی مواد جامد در لوله‌های انتقال پنوماتیکی مواد همواره مورد توجه محققین بوده است. در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری جریان جرمی مواد مورد مطالعه قرار گرفته و توسعه داده شده‌اند. با این حال هر یک از روش‌ها در شرایط مختلف دارای مزیت‌ها و معایب مربوط به خود است. در تحقیقی تمام روش‌های پیشنهادی با توجه به اصول سنجش آن‌ها، ویژگی‌های انفرادی هر روش و وضعیت توسعه‌ی هر روش بررسی شد (Yan, 1996). یک مطالعه مروری روی سه روش غیر مخرب اندازه‌گیری جریان جرمی مواد (روش خازنی[۱] روش اولتراسونیک[۲] و روش مایکروویو[۳]) ارائه شد. اصول مطالعه انجام شده به توسعه ابزارهای اندازه‌گیری و محدودیت‌های هر روش خلاصه می‌شود (Arakaki et al., 2006). در تحقیقی دیگر گستره وسیعی از تکنیک‌های مورد استفاده مانند حسگرهای خازنی[۴] حسگرهای الکترواستاتیک[۵] و سیستم‌های پرتونگاری خازنی الکتریکی[۶] برای اندازه‌گیری تراکم مواد جامد و سرعت گاز در لوله‌های انتقال بررسی شد (Ahmed and Ismail, 2008). بررسی‌های ذکر شده در بالا بر اصول، ویژگی‌های انفرادی هر روش و وضعیت توسعه هر روش تمرکز دارند. اگرچه مطالعات مروری مختلفی در این زمینه انجام شده است اما در سال‌های اخیر تکنیک‌ها و روش‌های جدیدی به کار گرفته شده‌اند. در این مقاله، مروری جامع بر آخرین تکنیک‌ها و روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری تراکم حجمی مواد جامد در انتقال پنوماتیک مواد ارائه می‌شود. بر اساس اصول و پیکربندی هر روش، عملکرد و محدودیت‌های آن در کاربردهای صنعتی تحلیل می‌شود.

۲- روش‌های اندازه‌گیری تراکم حجمی مواد جامد

۲-۱- روش‌های الکتریکی

بسیاری از محققان از روش‌های الکتریکی به منظور اندازه‌گیری تراکم حجمی مواد جامد استفاده کرده‌اند. در این روش از خواص دی‌الکتریک[۷] یا الکترواستاتیک[۸] مواد جامد به منظور اندازه‌گیری تراکم آن‌ها در سیستم انتقال مواد استفاده می‌شود.

حسگرهای خازنی

تراکم حجمی مواد جامد را می توان با اندازه‌گیری ظرفیت حسگر خازنی، زمانی که مواد در طول لوله و در مقابل این حسگر جریان دارند، بدست آورد. در تحقیقی سیستم خازنی جدید برای اندازه‌گیری تراکم مواد جامد سوخت پودری نیروگاه‌ها در جریان دو فازی جامد - گاز پیشنهاد شد. از یک پیکربندی خاص شامل آرایه‌ای از حسگرهای خازنی با تکنیک همبستگی متقابل نمونه‌ها و یک (lock-in detector) برای ظرفیت‌های خازنی بالا و همگن در طول سطح مقطع لوله استفاده شد. به عنوان یک نتیجه، اندازه‌گیری تراکم مواد جامد کمتر تحت تاثیر رژیم جریان قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که استفاده از پیکربندی الکترود ذکر شده در بالا باعث شد که حساسیت خازنی همگن در سطح مقطع لوله ۵ ± درصد باشد (Hu et al., 2006). در تحقیقی دیگر از یک سیستم یکپارچه برای اندازه گیری سرعت، غلظت و جریان جرمی ذرات جامد بر اساس حسگرهای الکترواستاتیک و حسگرهای خازنی استفاده شد. در این تحقیق از حسگرهای الکترواستاتیک و روش همبستگی متقابل برای اندازه گیری سرعت متوسط ذرات استفاده شد، در حالی که از حسگر خازنی با الکترودهای با صفحات مارپیچ که توزیع حساسیت نسبتا همگن دارند، برای اندازه گیری غلظت ذرات استفاده گردید. نتایج تجربی نشان داد که این مکانیزم قادر به اندازه گیری جریان جرمی مواد جامد می باشد و خطای نسبی آن در نرخ جرمی ۰/۱۳ تا ۰/۹ کیلوگرم در ثانیه حدود ۳ تا ۸ درصد برای جریان جرمی مواد شیشه‌ای است (Li et al., 2015). شکل(۱) شماتیکی از مکانیزم ترکیبی ذکر شده را نشان می‌دهد. با

---

۱ capacitive technique
۲ ultrasonic technique
۳ microwave technique
۴ capacitance sensors
۵ electrostatic sensors
۶ electrical capacitance tomography (ECT) systems
۷ dielectric
۸ electrostatic

توجه به شکل، این سیستم از دو حسگر الکترواستاتیک حلقوی شکل برای اندازه گیری سرعت ذرات و یک حسگر خازنی با الکترودهای صفحه مارپیچ برای اندازه گیری غلظت ذرات، یک مدار اندازه گیری بر اساس پردازنده سیگنال دیجیتال (DSP) و یک کامپیوتر شخصی (PC) تشکیل شده است.

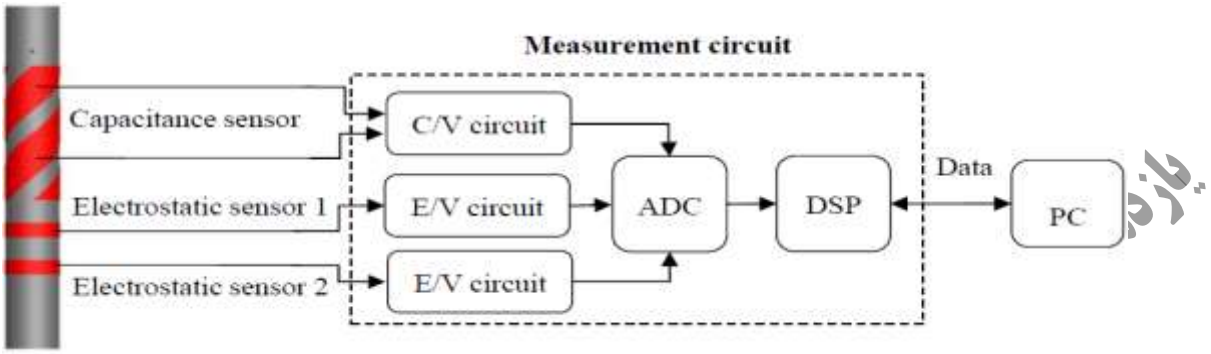


Figure 1. Integrated instrumentation system based on electrostatic and capacitance sensors. (Li et al., 2015).

شکل ۱- مکانیزم یکپارچه سنجش بر اساس سنسورهای الکترواستاتیک و خازنی.

حسگرهای الکترواستاتیک

حسگرهای الکترواستاتیک نمونه معمولی از حسگرهای الکتریکی هستند. شکل (۲) ساختار یک حسگر الکترواستاتیک چند کاناله را نشان می‌دهد. با توجه به شکل چهار حسگر منحنی شکل (A تا D) و مجموعه‌ای از حسگرهای حلقه‌ای شکل برای اندازه‌گیری پارامترهای جریان استفاده شده است. رویکرد جدیدی توسط محققین به منظور اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی ذرات ریز در انتقال دهنده‌های پنوماتیک با استفاده از حسگرهای الکترواستاتیک و تکنیک شبکه عصبی شامل تحلیل مولفه‌های اصلی[۱] ارائه شد (شکل۲). آن‌ها از یک حسگر الکترواستاتیک به شکل حلقه برای گرفتن یک سیگنال‌استفاده کردند. دو پارامتر سرعت و تراکم جرمی مواد جامد به منظور نظارت و کنترل سیستم تعیین شدند. خطا نسبی اندازه‌گیری شده برای سرعت و نرخ جریان جرمی مواد جامد غالبا در بازه ۱۵ ± بود. این خطا نسبتا زیاد است اما این روش دارای مزایایی مانند مقرون به صرفه بودن روش و اندازه‌گیری همزمان سرعت و تراکم جرمی مواد است (Yan, 1996). مطالعات تئوری و تجربی روی حساسیت مکانی[۲] یک حسگر الکترواستاتیک بر اساس حسگر الکترواستاتیک با الکترودهای حلقه‌ای که دارای حساسیت مکانی غیر یکنواختی بودند انجام شد. نتایج نشان داد که برای رژیم های جریان پیچیده مانند جریان طنابی، حساسیت مکانی غیر یکنواخت یک حسگر الکترواستاتیک تأثیر واضحی در خروجی حسگر خواهد داشت و همچنین مولفه‌های فرکانسی کمتر بر خروجی حسگر تسلط دارند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی و تجربی حساسیت مکانی حسگرهای الکترواستاتیک با الکترودهای حلقه‌ای شکل در حوزه زمان و فرکانس ارائه شد (Zhang and Coulthard, 2005). برای مطالعه پاسخ حسگرها در انتقال پنوماتیکی مواد جامد جهت ایجاد یک پیکربندی بهینه حسگر و شناسایی مناطق حساس حسگر از تکنیک مدل المان محدود استفاده شد. نتایج مدل سازی با نتایج تجربی برای اعتبار سنجی متقابل و تعیین حساسیت مکانی و پهنای باند حسگر با هم مقایسه مقایسه شد (Krabicka and Yan, 2009). در تحقیقی تجزیه و تحلیل نظری یک حسگر الکترواستاتیک با الکترودهای مربعی شکل برای نصب بر روی لوله انتقال پنوماتیک گزارش شده است. در مقایسه با شکل های حلقه ای، انالیز الکترودهای مربعی شکل به دلیل وجود گوشه های مربعی شکل الکترود دشوارتر است. توزیع حساسیت و پاسخ فرکانسی حسگر شناسایی شد. علاوه بر این، اثرات ابعاد هندسی و ویژگی‌های مواد جامد شارژ شده بر ویژگی های حسگر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی، آزمایشی تجربی روی مواد جامد انجام شد (Peng et al., 2008). به طور خلاصه، برخی از روش های اندازه گیری غیر مستقیم که بر اساس اصول خازنی یا الکترواستاتیک کار می‌کنند، در پیاده سازی ارزان و ساده هستند، اما تحقیقات نشان داده است که این حسگرها کاملا حساس به رطوبت، اندازه ذرات و ترکیب شیمیایی مواد جامد هستند (Coulthard et al., 1991). علاوه بر این، هر گونه غیر یکنواختی در زمینه سنجش می تواند در اندازه گیری تراکم و سرعت در هر روش پیچیده موثر باشد (Yan, 1996). آزمایش کاملی روی یک لوله افقی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر به منظور انتقال پنوماتیکی ترکیب پودر زغال سنگ و زیست توده انجام شد. برای اندازه‌گیری تراکم مواد در سطوح مختلف لوله از حسگرهای الکترواستاتیک استفاده شد. نتایج نشان داد هرچه درصد حجمی ذرات زیست توده بیشتر می‌شود سطح بار حسگرهای الکترواستاتیک کاهش یافته و در نتیجه پایداری جریان کاهش می‌یابد. شکل (۲) نمودار روندنما پردازش سیگنال مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد (Qian et al., 2015).

---

[۱] principal component analysis (PCA)
[۲] spatial sensitivity

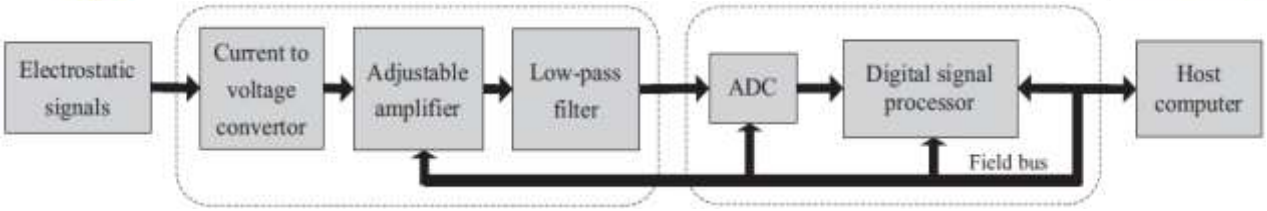
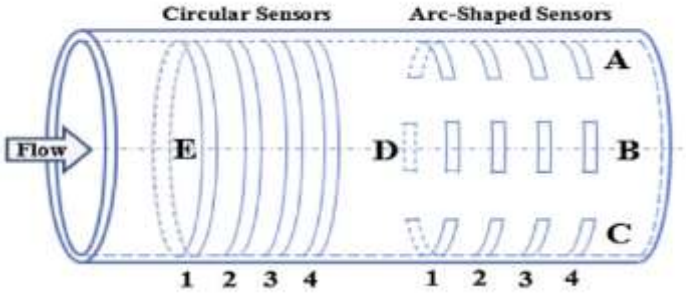
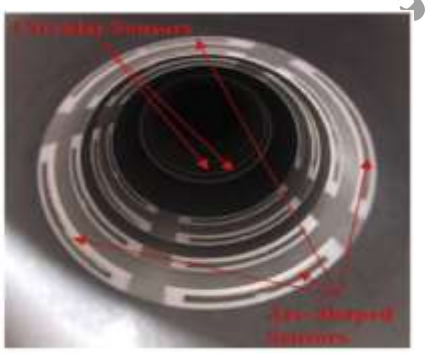


Figure 2. (a): Electrostatic signal conditioning and processing system (Qian et al., 2015).

شکل ۲- سیستم بهبود و پردازش سیگنال الکترواستاتیک.





(a) **(b)**

Figure 3. (a): Structure of the electrostatic sensing head. (b): Inner view of the electrostatic sensing head (Qian et al., 2012).

شکل۳- الف: ساختار حسگر الکترواستاتیک. ب: نمای داخلی از حسگر الکترواستاتیک.

۲-۲- روش‌های پرتونگاری

روش پرتونگاری یک ابزار قدرتمند برای تعیین غیر مخرب ویژگی‌های جریان درسطح مقطع یک لوله انتقال پنوماتیک مواد است. اما با این حال این روش مناسب برای جریان‌های دارای تراکم پایین نیست (Zhou et al., 2018). بسیاری از انواع سیستم های سنجش پرتونگاری برای اندازه گیری جریان چند فازی توسعه داده شده‌اند، به عنوان مثال، پرتونگاری خازن الکتریکی[۱](ECT)، پرتونگاری مقاومت الکتریکی[۲](ERT)، پرتونگاری مغناطیس الکتریکی[۳] (EMT) و پرتونگاری نوری الکتریکی[۴](EOT).

پرتونگاری خازن الکتریکی (ECT)

ECT یک تکنیک غیر مخرب است که براساس حساسیت به تفاوت‌های خواص دی الکتریک دو فاز ظاهر شده در محیط جریان (به عنوان مثال، گاز و جامد) عمل می‌کند. در جریان‌های دو فازی گاز - جامد مقدار تراکم فاز جامد با مقداری خطا در محدوده نصب حسگرها تعیین می‌شود (Saoud et al., 2017). یک حسگر ECT شامل تعدادی الکترود بوده که اطراف لوله قرار می‌گیرد (شکل۴). یکی از کاربردهای ECT به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های جریان دو فازی (گاز-جامد) متراکم در یک سیستم انتقال پنوماتیک توسط (Jaworski and Dyakowski, 2001) ارائه شده است. برای تعیین تراکم و سرعت ذرات، یک سیستم پرتونگاری و یک روش همبستگی متقابل استفاده شد. یک حسگر پرتونگاری ECT حاوی دو صفحه با هشت الکترود سنجش است. صفحه‌های حسگر ۱۳۰ میلیمتر از هم فاصله دارند (مرکز تا مرکز) و این فاصله در تجزیه و تحلیل همبستگی استفاده می‌شود. این آزمایش ها بر سرعت انتقال نسبتا کم (سرعت گاز بین ۱/۵ تا ۲ متر بر ثانیه برای یک لوله خالی) و دو نرخ جریان معادل ۷۰۰ و ۹۰۰ کیلوگرم بر ساعت متمرکز شده است. نتایج نشان داد، نرخ جریان جرمی مواد جامد به ترتیب به مقادیر ۵۰۰ - ۶۰۰ و ۷۰۰- ۷۵۰ کیلوگرم بر ساعت رسید. نتایج نشان داد که برای افزایش دقت تخمین سرعت در جریان نیاز است میزان نرخ جذب دستگاه پرتونگاری افزایش یابد و تأثیر فیلتر مکانی به علت طول محدود الکترود بر روی تحلیل همبستگی باید مورد توجه قرار گیرد (Jaworski and Dyakowski, 2001). در تحقیقی یک سیستم اندازه گیری نرخ جریان جرمی در خط لوله پنوماتیک، که شامل یک حسگر تراکم حجمی و یک حسگر سرعت است، ارائه شد. حسگر تراکم حجمی، یک واحد پرتونگاری خازن الکتریکی با هشت

---

[۱] capacitance tomography (ECT)
[۲] electrical resistance tomography (ERT)
[۳] electrical magnetic tomography (EMT)
[۴] electrical optical tomography (EOT)

الکترود و حسگر سرعت بر اساس دو سیگنال متقابل مشتق شده از از یک جفت حسگر خازنی عمل می‌کنند. از لودسل برای بررسی صحت و اعتبار نتایج آزمایش‌های سیستم ECT در این مطالعه استفاده شد. نتایج نشان داد که برای یک جریان جریان جرمی مشابه که از طریق روش لودسل اندازه گیری می‌شود، خطاها عمدتا کمتر از ۵ درصد بود (Sun et al., 2008). از مهم‌ترین مزیت‌های ECT می‌توان به غیر مخرب بودن، عدم تماس بین مواد عبوری و حسگر و همچنین عدم ایجاد تغییر در ویژگی های اشیاء مورد بررسی اشاره کرد (Mosorov, 2006).

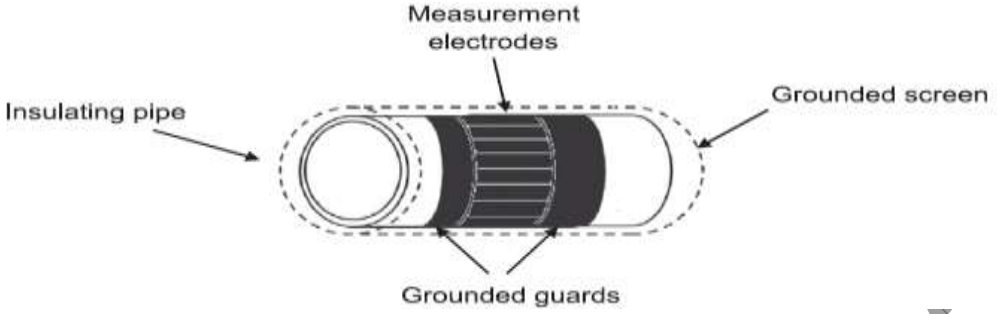


Figure 4. Structure of a typical ECT sensor (Saoud et al., 2017).

شکل۴- ساختار یک سنسور ECT معمولی.

پرتونگاری نوری الکتریکی (EOT)

پرتونگاری نوری روشی برای مشاهده تصویر مقطعی از مواد در حال جریان در یک خط لوله انتقال مواد است. بدون دخالت در جریان مواد، اطلاعات مهم جریان، مانند پروفیل تراکم مواد جامد، سرعت جریان و نرخ جریان جرمی مواد را می‌توان بدست آورد. استفاده از حسگرهای نوری ساده و نسبتا ارزان است (Pang et al., 2004). در تحقیقی طراحی، شبیه‌سازی عددی و ارزیابی تجربی یک سیستم اندازه گیری جدید بر مبنای اصل میرایی[۱] و تکنیک پرتونگاری نوری برای اندازه گیری جریان جرمی مواد جامد در یک خط لوله انتقال توسط بررسی شد. این سیستم از یک منبع لیزر چند لایه طراحی شده مخصوص و یک آرایه ردیاب چندگانه برای ایجاد یک میدان حسگر نوری و بازرسی کل سطح مقطع خط لوله مورد ازمایش و برای به دست آوردن داده‌های توزیع ذرات جامد در کل سطح مقطع لوله استفاده می‌کند. نتایج آزمون نشان داد که بین داده های جریان جرم واقعی و داده های برآورد شده همبستگی خوبی وجود دارد. بزرگترین خطای گزارش شده ۱/۳۲ درصد در نرخ جریان جرمی ۲۱/۸ گرم در ثانیه، بوده است، در حالی که خطاهای اندازه گیری کمتر از ۱ درصد نیز در اکثر داده‌های مربوط به نرخ جرمی ۱۹/۱ به ۳۴/۲ گرم بر ثانیه بدست می‌آید. به دلیل کمبود قدرت تفکیک پذیری و حساسیت کم و همچنین غیر یکنواختی در حوزه سنجش حسگر های ECT و EOT، هنوز فاصله‌ای بین توسعه تکنیک‌های پرتونگاری و نیاز واقعی صنعت برای اندازه گیری جریان جرم جامد وجود دارد. در تحقیقی از روش نوری برای اندازه گیری پراکندگی تراکم مواد جامد در یک سیستم حمل و نقل پنوماتیک استفاده گردید. مدل سازی جامع و تخمین های عددی نشان داد که روش پیشنهادی با آرایه تشخیص لیزری از لحاظ نظری دقیق و موثر است. ابزارهای نوری به طور طبیعی به خواص شیمیایی جامد مانند رطوبت و ترکیب شیمیایی حساس نیستند، بنابراین تغییرات این ویژگی‌ها اثری بر خروجی سیستم نخواهند گذاشت. همچنین این حسگرها به دلیل عدم تماس با جریان تاثیری بر جریان ندارند (Dhurandhar et al., 2018). در این تحقیق از دو گروه حسگر یکی در بالادست و دیگری در پایین دست جریان برای اندازه‌گیری تراکم مواد جامد استفاده شد. در هر گروه، چهار آرایه از حسگرهای موازی مرتب شده اند. دو آرایه از حسگرها به صورت عمود برهم قرارداده شده‌اند به طوری که پرتو نور منعکس شده از آنها نیز عمود بر هم است. در هر گروه ۱۶ حسگر وجود دارد (MU15- MU0، NU15 - NU0، MD15-MD0، ND15-ND0). چهار آرایه دیگر از ۲۳ حسگر (PU22-PU0، QU22-QU0، PD22-PD0، QD22-QD0) با زاویه ۴۵ درجه نسبت به گروه اول قرار دارند. پسوند U و D اضافه شده برای نشان دادن گروه بالادست و پایین دست است. در مجموع، ۱۵۶ حسگر در هر اسکن به کار می‌رود (شکل۵).

[۱] extinction

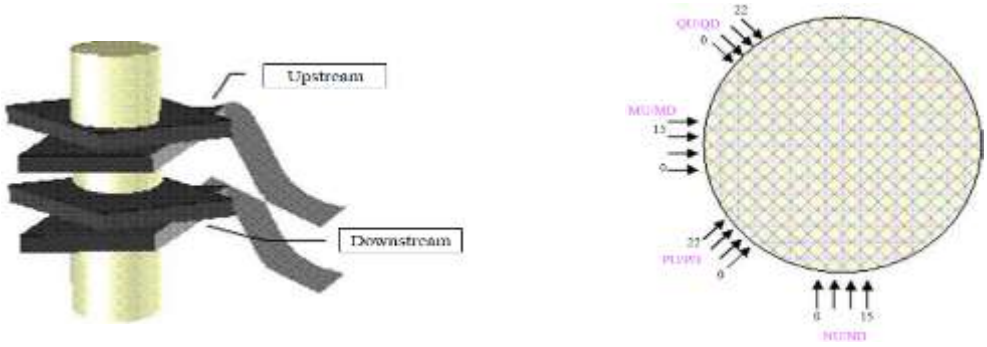


Figure 5. Sensor unit configuration (Dhurandhar et al., 2018).
شکل۵- پیکربندی واحد سنجش.

۲-۳- روش های میرایی و پراکندگی

بر اساس قانون لامبرت - بییر[۱] چندین روش سنجش مانند ردیاب نوری[۲] و ردیاب صوتی[۳] بوسیله اشعه γ توسعه داده شده‌اند. پرتوهای نور و امواج صوتی با شدت معین در یک خط لوله انتقال پنوماتیک با جریان‌های مواد جامد و گاز عبور داده می‌شوند. تراکم مواد جامد در لوله را می‌توان با اندازه‌گیری شدت میرایی امواج صوتی و پرتوهای نور که بر اثر فاز جامد ایجاد می‌شود بدست اورد (Yan et al., 2006).

حسگرهای نوری

برای تعیین میانگین تراکم مواد جامد در جریان دوفازی (گاز - جامد)، می توان از روش های میرایی نور استفاده کرد (Yan, 1996). این حسگرها مناسب رژیم‌هایی با فاز متراکم نیستند و معمولا در فاز رقیق استفاده می‌شوند (Li et al., 2015). در تئوری، یک مدل انسداد نور توسط ذرات جامد همراه با ویژگی‌های اندازه‌گیری شده توسط پروب[۴] می تواند برای ایجاد یک تابع پاسخ در تعیین متغیرهای کسر حجمی و قطر ذرات جامد استفاده شود. ویژگی های پروب عبارتند از نمایان ساختن مقدار نور منعکس شده هنگامی که یک ورقه بازتابنده در فاصله مشخصی از پروب قرار گرفته یا به عنوان نمایان ساختن مقدار نور منتقل شده مشخص، زمانی که یک پرتو درخشان به جریان در حال حرکت گاز- جامد تابانده می‌شود. سیستم اندازه‌گیری نوری بر اساس تشخیص نور منعکس شده توسط ذرات معلق به منظور اندازه‌گیری تراکم محلی ذرات جامد و سرعت محوری ذرات جامد در یک جریان دو فازی گاز جامد توسعه داده شد (Nieuwland et al., 1996). نمای کلی یک پروب نوری که شامل دو حسگر چند لایه فیبری با جداساز عمودی ۴/۲ میلی متر است، در شکل (۶) ارائه شده است. در این مطالعه، پروب نوری قابلیت حرکت در سراسر قطر ستون رایزر[۵] را دارد تا اندازه گیری ها در یازده موقعیت شعاعی انجام شود. در هر موقعیت " m " اندازه‌گیری انجام می‌شود ($30 < m < 40$)، که برای هر اندازه گیری ۱۵۳۶ نمونه با حداکثر فرکانس نمونه ۵۰ کیلو هرتز گرفته شد. تراکم محلی مواد جامد از سیگنال‌های حسگر انفرادی محاسبه شد. ذرات متحرک عمودی هر دو حسگر را رد می‌کنند و باعث می شوند که دو حسگر تولید یک سیگنال مشابه را با تاخیر زمانی ایجاد کنند که می تواند به وسیله ارتباط متقابل هر دو سیگنال به دست آید. سرعت ذرات در حال حرکت در مقابل نوک پروب را می توان با استفاده از تاخیر زمانی و فاصله‌ای ذرات بین دو حسگر نوری بدست آورد. میانگین نرخ جریان جرمی توده جامد با استفاده از مقدار تراکم و سرعت محلی مواد جامد محاسبه شده است (Nieuwland et al., 1996). در تحقیقی توسط یک حسگر نوری فیبری دوتایی، کسر حجمی ذرات جامد را به صورت تجربی در یک ردیف بستر سیالی گردشی بررسی شد. مقدار کسر حجمی ذرات جامد ثبت شده توسط پروب نوری با افت فشار اندازه گیری شده برای طیف وسیعی از شرایط عملیاتی مقایسه شد. نتایج نشان داد، نقاط درخشان روی ذرات جامد و طول پرتو از پروب تا ذرات جامد، منحنی عملکرد تابع کالیبراسیون را تا حد زیادی تعیین می کند (Magnusson et al., 2005).

---

[۱] Lambert–Beer law
[۲] optical detection
[۳] acoustic detection
[۴] probe
[۵] riser

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

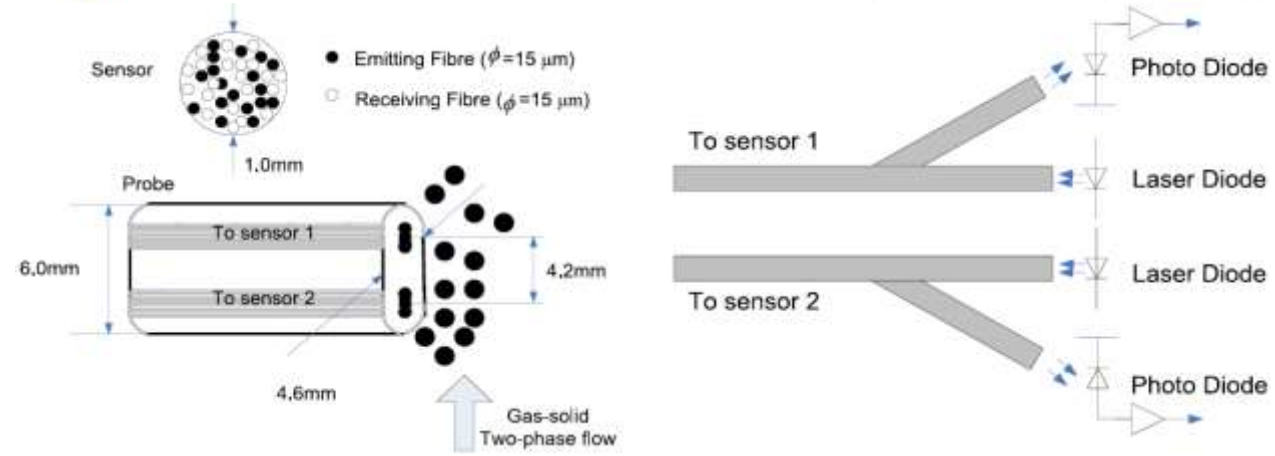


Figure 6. Schematic representation of the optical probe system containing two multi-fiber sensors (Zheng and Liu, 2011).

شکل۶- شماتیکی از سیستم پروب نوری که شامل دو سنسور فیبری چندگانه است.

حسگرهای صوتی

بر اساس قانون لامبرت-بییر، میرایی یک موج صوتی که در طول ذرات یک ماده انتقال می یابد، به شدت تابش، ضخامت موثر محیط عبوری موج صدا و ضریب خطی میرایی وابسته است. بر اساس این اصل، تکنیک استفاده از یک سیگنال صوتی فعال برای اندازه گیری تراکم مواد جامد در خطوط انتقال پنوماتیک فاز رقیق توسعه یافت (Tallon and Davis, 1997). امواج صوتی در فرکانس بین چند صد تا چند هزار هرتز در خط لوله استفاده شده است. روش انتشار صوت، پارامترهای کلیدی که از دریافت سیگنال‌های صوتی بدست می‌آورد را به پارامترهای عملکرد و ویژگی‌های جریان ارتباط می‌دهد (Zhou et al., 2018). در تحقیقی انتشار امواج در هر دو جهت بالا دست[۱] و پایین دست[۲] در طول محوری ۱ یا ۲ متر از لوله اندازه گیری شد. سرعت فاز گاز از تفاوت بین سرعت انتشار صوتی جریان بالا و پایین دست تعیین شده است. تراکم مواد جامد با استفاده از رابطه بین میرایی محوری امواج صوتی و تراکم اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که این رابطه برای تراکم معمولی و در انتقال پنوماتیک فاز رقیق شده در شرایط کاملا توسعه یافته خطی است. نرخ جریان جرمی مواد جامد از اندازه گیری سرعت هوا و تراکم جامدات با فرض یک مقدار برای لغزش بین فاز گاز و فاز جامد اندازه گیری شد. پس از تخمین سرعت مواد جامد و همراه با تراکم مواد جامد می توان میزان نرخ جریان جرمی مواد را تعیین کرد. با این حال، محاسبه مقدار دقیق لغزش بین سرعت گاز و مواد جامد اغلب دشوار است، زیرا هر دو، متغیر و وابسته به خواص ذرات جامد هستند (Tallon and Davis, 1997). در تحقیقی از روش انتشار صدا برای تشخیص ویژگی‌های جریان دو فازی گاز – جامد استفاده شد. آن‌ها گزارش کردند که مقادیر تراکم حجمی و سرعت اندازه گیری شده توسط سیگنال های صوتی به مقادیر تجربی نزدیک است. به عبارت دیگر، اندازه گیری با روش سیگنال‌های صوتی غیر مخرب برای شناسایی پیوسته پارامترهای رژیم انتقال جریان موثر است (Zhou et al., 2018). روش صوتی بسیار حساس، بی‌خطر، سازگار با محیط زیست، غیر مخرب و پیوسته است (Zhou et al., 2016). یکی از مشکلات اصلی برای حسگرهای صوتی این است که فرکانس بهینه با اندازه ذره ارتباط دارد. برای ذرات کوچک و سبک، فرکانس بهینه حدود ۳۰ کیلوهرتز است، اما برای ذرات بزرگ، به ۴۰۰ کیلوهرتز افزایش می یابد. علاوه بر این، چندین مبدل باید مورد استفاده قرار گیرد تا کل قسمت مقطع لوله را بررسی کنند (Yan, 1996).

۲-۴- حسگرهای تشدید[۳] برای اندازه گیری تراکم مواد جامد

در طی دو دهه گذشته، استفاده بالقوه از تکنیک‌های تشدید مغناطیسی هسته[۴](NMR) یا تشدید مغناطیسی الکترون[۵](EMR) به منظور رفع مشکلات واقعی صنعتی، مانند اندازه گیری تراکم و سرعت جریان گاز- جامد، مورد بررسی قرار گرفته است. در روش‌های NMR یا EMR زمانی که یک

---

۱ upstream
۲ downstream
۳ Resonance
۴ nuclear magnetic resonance (NMR)
۵ electron magnetic resonance (EMR)

میدان الکترومغناطیسی با یک فرکانس مناسب به مواد اعمال می‌شود، هسته اتمی درون مواد ممکن است از میدان در فرکانس های لامور[1] خود انرژی بگیرند. پاسخ NMR متناسب با تعداد هسته های مناسب در واحد حجم است در حالی که EMR الکترون‌های آزاد یا تکی موجود را تشخیص می دهد. از این رو روش‌های سنجش NMR یا EMR قادر به ارائه مبنایی برای تعیین تراکم، سرعت و نرخ جریان جرمی گاز - جامد است (Yan, 1996). در یک مطالعه تجربی از انتقال پنوماتیکی یکنواخت در سه بعد، با استفاده از تکنیک NMR برای بررسی پروفیل تراکم دانه و توزیع سرعت استفاده شد. سیستم شامل دانه‌های خردل بوده که به صورت عمودی با فرکانس ۵۰ هرتز ارتعاش داده می شود. پروفیل عمودی تراکم مواد و دمای دانه‌ها همراه با توزیع سرعت های عمودی و افقی دانه به طور مستقیم اندازه گیری شد. محدودیت های کاربرد NMR یا EMR در مورد اندازه‌گیری جریان جرمی مواد جامد توسط یان (Yan, 1996) مشخص شده است. اولا، میدان های مغناطیسی با شدت‌های پایین باید به منظور کاهش اندازه، وزن و قدرت مغناطیسی مورد نیاز استفاده شود. علاوه بر این، حداکثر جریان از طریق NMR توسط زمان استراحت هسته محدود شده است که بستگی به طراحی وسیله و جریان مورد اندازه‌گیری دارد. همچنین هزینه های بسیار زیادی برای توسعه و ایجاد این سیستم اندازه‌گیری نیاز است (Yan, 1996).

۳- خلاصه

در این مطالعه روش‌های الکتریکی، روش‌های پرتونگاری، روش‌های میرایی و پراکندگی و حسگرهای تشدید که در اندازه‌گیری تراکم حجمی مواد جامد استفاده می‌شوند، بررسی شد. بر اساس اصول و پیکربندی هر روش، عملکرد، محدودیت‌ها، اصول سنجش آن‌ها، ویژگی‌های انفرادی هر روش و وضعیت توسعه‌ی هر روش بررسی شد. در روش‌های الکتریکی به منظور اندازه‌گیری تراکم حجمی مواد جامد از خواص دی‌الکتریک یا الکترواستاتیک مواد جامد استفاده می‌شود. روش پرتونگاری برای اندازه گیری تراکم حجمی جریان چند فازی استفاده می‌شوند و دارای انواع مختلف مانن پرتونگاری خازن الکتریکی (ECT)، پرتونگاری مقاومت الکتریکی (ERT)، پرتونگاری مغناطیس الکتریکی (EMT) و پرتونگاری نوری الکتریکی (EOT) است. در روش‌های میرایی و پراکندگی، پرتوهای نور و امواج صوتی با شدت معین در یک خط لوله انتقال پنوماتیک با جریان‌های مواد جامد و گاز عبور داده می‌شوند و تراکم مواد جامد در لوله را می‌توان با اندازه‌گیری شدت میرایی امواج صوتی و پرتوهای نور که بر اثر فاز جامد ایجاد می‌شود بدست اورد. حسگرهای تشدید به دو دسته کلی تشدید مغناطیسی هسته (NMR) یا تشدید مغناطیسی الکترون (EMR) تقسیم می‌شوند. در روش‌های NMR یا EMR زمانی که یک میدان الکترومغناطیسی با یک فرکانس مناسب به مواد اعمال می‌شود، هسته اتمی درون مواد ممکن است از میدان در فرکانس های لامور خود انرژی بگیرند. پاسخ NMR متناسب با تعداد هسته های مناسب در واحد حجم است در حالی که EMR الکترون‌های آزاد یا تکی موجود را تشخیص می دهد.

۴- مراجع

1- 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.
2- Arakaki, C., Ghaderi, A., Datta, B. K., & 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*.
3- 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.
4- Carter RM, Yan Y. (2007). On-line non-intrusive particle size measurement of pulverised fuel through digital imaging. Chin J Sci Instrum; 28(11):1942–6.
5- Coulthard, J., Byrne, B., & Yan, Y. (1991). Non-restrictive measurement of solids mass flowrate in pneumatic conveying systems. *Measurement and Control*, *24*(4), 113-119.
6- Dhurandhar, R., Sarkar, J. P., & Das, B. (2018). The recent progress in momentum, heat and mass transfer studies on pneumatic conveying: a review. *Heat and Mass Transfer*, 1-18.
7- Hu, H. L., Xu, T. M., Hui, S. E., & 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.
8- Jaworski, A. J., & 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*(8), 1109.
9- Jing, J., Xiao, F., Yang, L., Wang, S., & Yu, B. (2018). Measurements of velocity field and diameter distribution of particles in multiphase flow based on trajectory imaging. *Flow Measurement and Instrumentation*, *59*, 103-113.
10- Karparvarfard, S. H. (1996). Pneumatic conveying properties of continuously and dense flow in horizontal pips with grooved internal surfaces. PhD thesis. college of agriculture. Tarbiat Modares university. Iran. (Persian).

[1] Lamor

11- Karparvarfard, S. H. (2005). Determine the optimum depth of the internal grooves in the of horizontal pipe in the pneumatic conveying of materials continuously and dense. Iranian Chemical Engineering Journal. Volume 9, Issue 9, p. 7 to .15. (Persian).
12- Krabicka, J., & Yan, Y. (2009). Finite-element modeling of electrostatic sensors for the flow measurement of particles in pneumatic pipelines. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *58*(8), 2730-2736.
13- Li, J., Kong, M., Xu, C., Wang, S., & Fan, Y. (2015). An Integrated instrumentation system for velocity, concentration and mass flow rate measurement of solid particles based on electrostatic and capacitance sensors. *Sensors*, *15*(12), 31023-31035.
14- Magnusson, A., Rundqvist, R., Almstedt, A. E., & Johnsson, F. (2005). Dual fibre optical probe measurements of solids volume fraction in a circulating fluidized bed. *Powder Technology*, *151*(1-3), 19-26.
15- Mosorov, V. (2006). A method of transit time measurement using twin-plane electrica tomography. *Measurement Science and Technology*, *17*(4), 753.
16- Nieuwland, J. J., Meijer, R., Kuipers, J. A. M., & van 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.
17- Pang, J. F., Rahim, R. A., & Chan, K. S. (2004). Real time image reconstruction system using two data processing unit in optical tomography. In *Proceeding 3 rd International Symposium on Process Tomography in Poland*(pp. 52-55).
18- Peng, L., Zhang, Y., & Yan, Y. (2008). Characterization of electrostatic sensors for flow measurement of particulate solids in square-shaped pneumatic conveying pipelines. *Sensors and Actuators A: Physical*, *141*(1), 59-67.
19- Qian X, Yan Y, Shao J, Wang L, Zhou H, Wang C. (2012). Quantitative characterization of pulverised coal and biomass–coal blends in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor arrays and data fusion techniques. Meas Sci Technol; 23(8):085307.
20- Qian, X., Yan, Y., Wang, L., & Shao, J. (2015). An integrated multi-channel electrostatic sensing and digital imaging system for the on-line measurement of biomass–coal particles in fuel injection pipelines. *Fuel*, *151*, 2-10.
21- Saoud, A., Mosorov, V., & Grudzien, K. (2017). Measurement of velocity of gas/solid swirl flow using Electrical Capacitance Tomography and cross correlation technique. *Flow Measurement and Instrumentation*, *53*, 133-140.
22- Sun, M., Liu, S., Lei, J., & Li, Z. (2008). Mass flow measurement of pneumatically conveyed solids using electrical capacitance tomography. *Measurement science and technology*, *19*(4), 045503.
23- Tallon, S., & Davis, C. E. (1997). Use of the attenuation of acoustic pulsed waves for concentration measurement in gas-solid pipe flow. In *AIChE Symposium Series* (Vol. 93, No. 317, pp. 136-140). New York, NY: American Institute of Chemical Engineers, 1971-c2002..
24- Yan, Y. (1996). Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Measurement Science and Technology*, *7*(12), 1687.
25- Yan, Y., Xu, L., & Lee, P. (2006). Mass flow measurement of fine particles in a pneumatic suspension using electrostatic sensing and neural network techniques. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, *55*(6), 2330-2334.
26- 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.
27- Zheng, Y., & Liu, Q. (2011). Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement*, *44*(4), 589-604.
28- Zhou, Y., Shi, Q., Huang, Z., Liao, Z., Wang, J., & Yang, Y. (2016). Realization and control of multiple temperature zones in liquid-containing gas–solid fluidized bed reactor. *AIChE Journal*, *62*(5), 1454-1466.
29- Zhou, Y., Yang, L., Lu, Y., Hu, X., Luo, X., & Chen, H. (2018). Flow regime identification in gas-solid two-phase fluidization via acoustic emission technique. *Chemical Engineering Journal*, *334*, 1484-1492.