مروری بر روش‌های اندازه‌گیری سرعت مواد جامد در لوله‌های انتقال پنوماتیک مواد

هادی عظیمی نژادیان[۱]، سید حسین کارپرورفرد[۲]*، محمد امین نعمت‌الهی[۳]

[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).

[۱]استادیار، بخش مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز (manema@shirazu.ac.ir)

چکیده

سرعت ذرات جامد در جریان دو فازی گاز – جامد یکی از مهم‌ترین فاکتورهای توصیف جریان در لوله‌های انتقال پنوماتیک مواد است. اندازه‌گیری دقیق، قابل اعتماد، برخط، پیوسته و غیر مخرب سرعت انتقال مواد جامد در لوله‌های انتقال پنوماتیکی مواد همواره مورد توجه محققین بوده است. تحقیقات زیادی به منظور توسعه‌ی روش‌های اندازه‌گیری سرعت مواد جامد در انتقال پنوماتیک مواد انجام شده است. در این مطالعه، تکنیک‌های اخیر اندازه‌گیری سرعت مواد جامد در سیستم های انتقال پنوماتیک مواد بررسی شده است. عملکرد و محدودیت‌های هر یک از روش‌ها، در کاربردهای صنعتی، از دیدگاه‌های مختلف، مقایسه و بررسی می شوند.

کلمات کلیدی: انتقال پنوماتیک، سرعت مواد جامد، نرخ جریان جرمی.

Review of methods for solids' velocity measurement in pneumatic conveying pipelines.

Hadi Azimi Nejadian[1], Seyed Hossein Karparvarfard[* 2], Mohammad Amin Nematollahi[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]Assistant Professor of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. (manema@shirazu.ac.ir).

ABSTRACT

Particle velocity is one of the most important parameters for describing a solid - gas flow in pneumatic conveying pipelines. An accurate, reliable, online, continuous and non-destructive measurement of a solid's velocity has always been considered by researchers. Many researches have been conducted to develop solids' velocity measurement methods in pneumatic conveying. In this paper, a review is presented on the recent measurement techniques of solids' velocity measurement in pneumatic conveying systems. Performances and limitations of each technique, in industrial applications are analyzed and compared from different views.

Keywords: Pneumatic conveying, Solid's velocity, Mass flow rate.

۱- مقدمه

مواد از لحاظ ماهیت فیزیکی ممکن است مایع، گرانوله (دانه‌ای)، پودری و فیبری (علوفه‌ای) باشند. بنابراین متناسب با ماهیت فیزیکی مواد، بایستی از روش و وسایل مناسب برای انتقال مواد استفاده کرد. انتقال مواد جامد به همراه سیال در لوله، به نوع سیال بستگی دارد. این نوع حمل و نقل‌ها به عنوان حمل و نقل هیدرولیکی و پنوماتیکی شناخته شده‌اند. در انتقال هیدرولیکی از مایعات و در نوع پنوماتیکی، از گاز به عنوان سیال حامل مواد جامد استفاده می‌شود. رژیم جریان انتقال پنوماتیکی می‌تواند رقیق یا متراکم باشد. فاز رقیق شامل حجم زیادی از سیال با سرعت بالا است. جریان سیال، مواد را به صورت ذرات مجزا از یکدیگر حمل می‌کند. در این رژیم حرکتی، نسبت جریان جرمی مواد به جریان جرمی سیال کمتر از ۱۵ درصد است و در فاز متراکم این نسبت بیشتر از ۱۵ است (Karparvarfard, 1996). تحقیقات زیادی به منظور بررسی روابط بین پارامترهای یک جریان دو فازی گاز – جامد انجام شده است در همین راستا تحقیقی به منظور تعیین همبستگی بین فاکتور اصطکاک، با نرخ جریان مواد جامد، نرخ جریان سیال و عدد فرود ارائه شد در نهایت معادله‌ای که این پارامترها را به هم ربط می‌دهد بدست آمد (Karparvarfard and Vakili, 2010). سرعت ذرات یکی از پارامترهای مهم توصیف یک سیستم جریان جامد گاز است. اندازه گیری پیوسته و بر خط سرعت ذرات برای درک بهتر جریان ذرات و بهینه سازی فرآیند انتقال ضروری است (Yan, 1996). روش‌های بسیاری برای اندازه‌گیری سرعت ذرات جامد، مانند داپلر، همبستگی متقابل، فیلترینگ مکانی طراحی شده است (Zhou et al., 2018). 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. با این حال هر یک از روش‌ها در شرایط مختلف دارای مزیت‌ها و معایب مربوط به خود است. لازم است تحقیقات بیشتری به منظور ارتقا دقت، حساسیت و قابلیت اطمینان هر روش انجام گیرد. در تحقیقی برخی از روش‌های پیشنهادی به منظور اندازه‌گیری سرعت ذرات جامد با توجه به اصول سنجش آن‌ها، ویژگی‌های انفرادی هر روش و وضعیت توسعه‌ی هر روش بررسی شد (Yan, 1996). در تحقیقی دیگر گستره وسیعی از تکنیک‌های مورد استفاده مانند سرعت سنج لیزر داپلر[۱] و حسگرهای الکترواستاتیک[۲] برای اندازه‌گیری سرعت 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. در این مقاله، مروری جامع بر آخرین تکنیک‌ها و روش‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری سرعت مواد جامد در انتقال پنوماتیک مواد ارائه می‌شود. بر اساس اصول و ساختار هر روش، عملکرد و محدودیت‌های آن در کاربردهای صنعتی تحلیل می‌شود.

۲- روش‌های اندازه‌گیری سرعت مواد جامد

۲-۱- حسگرهای برقی همراه با روش های پردازش سیگنال جدید

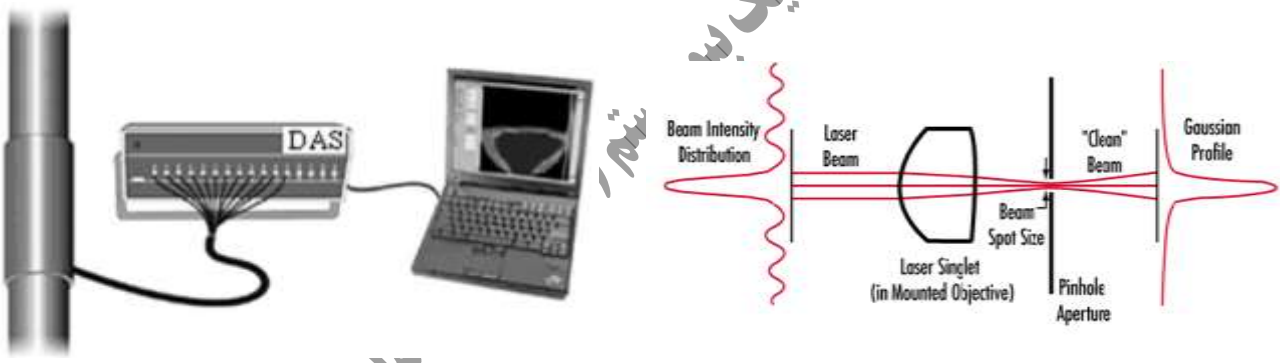
روش‌های فیلتر مکانی

فیلترهای مکانی، مکمل روش‌های اندازه‌گیری سرعت مانند سرعت سنج داپلر و حسگرهای الکترواستاتیک هستند. فیلترهای مکانی برای استفاده در لیزر به منظور صاف کردن[۳] پرتو طراحی شده‌اند. اغلب یک سیستم لیزر، پرتویی با شدت یکنواخت تولید نمی کند. برای تولید یک پرتو گوسی، یک فیلتر مکانی برای حذف پیک های کوچک ناخواسته استفاده می شود و تنها بیشینه مرکزی الگوی پراکندگی را منتقل می کند (شکل۱). در تحقیقی برای اندازه‌گیری هم‌زمان اندازه و سرعت ذرات جامد از روش فیلترسازی مکانی استفاده شد. این سیستم شامل یک منبع لیزر، پروب فیبر نوری و یک واحد تحلیل سیگنال بود. فیبر نوری تکی برای اسکن نقطه‌ای و یک فیلتر مکانی نوری در پروب قرار داده شدند. اندازه و سرعت ذرات جامد به طور هم‌زمان در یک جت بدون هوا و مملو از ذرات اندازه گیری شد. نتایج اندازه‌گیری از یک پروب فیبر نوری بر اساس تکنیک فیلتر مکانی اصلاح شده با نتایج آزمایشات سرعت سنج لیزر داپلر مقایسه شد. مقادیر نشان داد که سرعت متوسط ذرات در روش نوری حدود ۶ درصد کمتر و انحراف معیار میانگین بیشتر است. با توجه به برخوردهای مواد جامد با پروب، سرعت متوسط تعیین شده توسط پروب کوچکتر از سرعت متوسط لیزر داپلر است (Petrak, 2002). در تحقیقی دیگر روشی برای اندازه گیری سرعت متوسط ذرات جامد بر اساس اثر فیلتر مکانی و حسگر الکترواستاتیک ارائه شد. یک فرمول کلی با تجزیه و تحلیل کمی ویژگی‌های فیلتر مکانی حسگر الکترواستاتیک با در نظر گرفتن برخی از فرض‌های پذیرفته شده برای تعیین رابطه بین ویژگی‌های فرکانس مکانی حسگر و سرعت ذرات جامد استخراج شد. نتایج نشان داد که تکرارپذیری این سیستم در محدوده ۵ ± درصد، در رنج سرعتی ۲ تا ۶ متر بر ثانیه برای غلظت مواد جامد ۰/۵ تا ۶ درصد است. علاوه بر این، اثرات پارامترهای هندسی

---

[۱] Laser Doppler velocimetry (LDV)
[۲] electrostatic sensors
[۳] smoothing

حسگر، توزیع سرعت مواد جامد، توزیع تراکم مواد جامد در سطح مقطع لوله، اندازه ذرات مواد جامد و نوع مواد جامد در دقت اندازه گیری سرعت مواد جامد نیز جزئیات این پژوهش بودند (Xu et al., 2008). اثر طول حسگر، ضخامت لوله دی الکتریک و طول آن بر ویژگی های فیلتر مکانی حسگر نیز با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار گرفت. آزمایشات بر روی یک سیستم انتقال دهنده پنوماتیک فاز متراکم انجام شد تا عملکرد سیستم اندازه گیری سرعت را آزمایش کند. نتایج تجربی نشان داد، تکرارپذیری سیستم در حدود ۴± درصد در سرعت‌های گاز بین ۸/۶۳ و ۱۸/۶۲ متر بر ثانیه برای غلظت مواد جامد بین ۰/۰۶۷ تا ۰/۱۳ است (Xu et al., 2009). بر خلاف اندازه گیری تراکم، اندازه گیری غیر تهاجمی سرعت مواد جامد نسبتا آسان است. حسگرهای الکترواستاتیک و خازنی در مقایسه با حسگرهای صوتی، نوری و رادیومتری دارای هزینه تعمیر و نگهداری بیشتر هستند. روش فیلتر مکانی روشی ساده برای ساده‌سازی پردازش داده ها است (Xu et al., 2009). با این حال، نسبت سیگنال به نویز کم، کاربرد آن‌ها را در فاز رقیق دشوار می کند (Yan, 1996). روش فیلتر نوری مکانی در مقایسه با فیلتر مکانی مبتنی بر القای الکترواستاتیک دارای مزیت‌هایی مانند ساختار ساده، هزینه کم سخت افزاری و مناسب بودن برای محیط های سخت صنعتی است (Zheng and Liu, 2011). یک سرعت سنج فیلتر مکانی جدید برای اندازه گیری سرعت ذرات جامد در سیستم جریان گاز - جامد بر اساس یک آرایه حسگر الکترواستاتیک خطی (LESA) ارائه شد. سرعت ذرات جامد، با تعیین فرکانس مرکزی سیگنال تناوبی خروجی فیلتر اندازه‌گیری شد. سرعت سنج فیلتر مکانی شامل یک هد اندازه گیری، تقویت کننده‌های دیفرانسیل هفت کاناله و یک سیستم پردازش و جمع‌آوری داده‌های کامپیوتری است(شکل ۱). نتایج تجربی نشان داد، تکرارپذیری سیستم در محدوده سرعت‌های ۱/۷ تا ۳/۹۱ متر بر ثانیه و تراکم ۰/۰۱ تا ۰/۱۶ در محدوده ۵/۴ ± درصد است (Xu et al., 2012). با این حال، زمانی که روش فیلتر مکانی براساس حسگر الکترواستاتیک حلقه‌ای برای اندازه‌گیری سرعت ذرات استفاده می‌شود، مدار رابط که به حسگر متصل است باید به عنوان تقویت کننده طراحی شود بدین‌ترتیب نویز جریان الکترواستاتیک به طور موقت تعدیل می شود (Xu et al., 2009).



(b) (ب) (a) (الف)

Figure 1. (a): illustration the smoothing of the beam by Spatial Filters. (b): Spatial filtering velocimeter. (Xu et al., 2012).

شکل ۱- (الف): نمایش صاف کردن پرتو توسط فیلتر مکانی. (ب): سرعت سنج فیلتر مکانی.

۲-۲- روش‌های تحلیل ارتباط متقابل

اندازه گیری نرخ جریان جرمی مواد جامد به صورت برخط و غیر مخرب نیاز به اندازه گیری هم‌زمان غلظت و سرعت مواد جامد دارد. تکنیک‌های بسیاری برای اندازه گیری سرعت مواد جامد در یک خط لوله حمل و نقل پنوماتیک ارائه شده است. حسگرهای مختلف، مانند حسگرهای نوری و حسگرهای الکترواستاتیک همراه با تحلیل همبستگی متقابل، برای دستیابی به سرعت مواد جامد به کارگرفته شده‌اند. به طور کلی، روش همبستگی متقابل، مستقل از تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات و مستقل از تغییرات رطوبت و دما است. همبستگی متقابل یک روش معتبر است که به طور گسترده برای تعیین سرعت سیال با محاسبه زمان انتقال جریان بین حسگرهای بالادست و پایین دست استفاده می شود. ضریب همبستگی متقابل سیگنال خروجی از الکترودهای بالادست و پایین دست نشان دهنده قابلیت اطمینان سرعت اندازه گیری شده توسط روش همبستگی متقابل و پایداری جریان ذرات است (Qian and Yan, 2012).

حسگر نوری و همبستگی متقابل

دو حسگر نوری یکسان در بالادست و پایین دست جریان در طول خط لوله حمل و نقل با فاصله مشخص محوری از یکدیگر برای اندازه‌گیری سرعت فاز مواد جامد استفاده می شود. مدت زمان انتقال فاز جامد در حال حرکت از پروب بالا به سمت پروب پایین با استفاده از رابطه متقابل بین دو سیگنال تعیین می‌شود. در نتیجه، سرعت فاز جامد در خط لوله را می توان با استفاده از فاصله محوری مشخص شده تقسیم بر زمان حمل و نقل محاسبه کرد (Zheng et al., 1996). پیکربندی حسگر نوری و تحلیل همبستگی متقابل در شکل(۲) نشان داده شده است. نکته کلیدی در کاربرد این روش تعیین و کالیبره کردن فاصله بین دو پروب بوده که بر ضریب همبستگی و دقت اندازه‌گیری زمان حمل و نقل تأثیر می‌گذارد. زمان پاسخ ناچیز، طول موج کوچک، ایمن نسبت به نویز الکتریکی و وجود گسترده وسیعی از فرستنده‌ها و آشکارسازهای قابل دسترس از مزایای حسگرهای نوری است (Rahim et al., 2005). حسگرهای نوری نیاز به یک پنجره شفاف در لوله داشته که حساس به آلودگی ناشی از مواد پودری است. با این وجود، این نقص را می توان با استفاده از یک سیستم تصفیه هوا برای کاهش آلودگی تا حدودی برطرف کرد (Coombes and Yan, 2015).

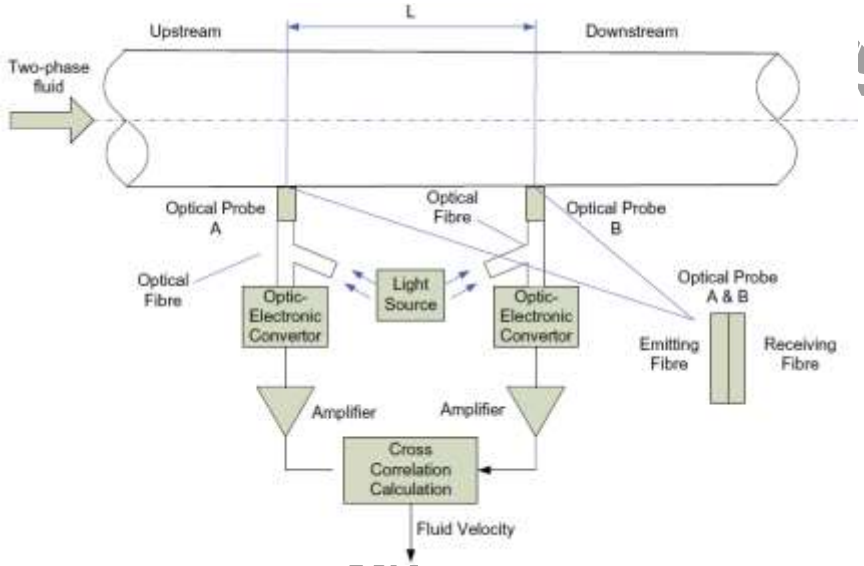


Figure 2. Configuration of optical sensor and cross correlation analysis (Zheng et al., 1996).

شکل ۲- پیکربندی حسگرهای نوری و تحلیل ارتباط متقابل بین حسگرها.

حسگر الکترواستاتیک و همبستگی متقابل

به علت اصطکاک و برخورد بین ذرات و دیواره لوله، که یکی از ویژگی‌های ذاتی جریان‌های دو فازی گاز - جامد است، ذرات جامد باردار (شارژ) می‌شوند. بر اساس شارژ ذرات، حسگرهای مختلف الکترواستاتیک برای اندازه‌گیری پارامتر جریان ذرات طراحی شده‌اند (Li et al., 2014). دو حسگر الکترواستاتیک یکسان به همراه یک الگوریتم پردازش سیگنال متقابل برای اندازه‌گیری سرعت استفاده می‌شود. حسگرها معمولا با فاصله محوری مشخص در لوله قرار می گیرند. دو سیگنال مربوط به حسگرهای الکترواستاتیک توسط مدارهای الکترونیکی مناسب دریافت می‌شوند. هنگامی که جریان ذرات در امتداد محور لوله از حسگر بالادست به حسگر پایین دست حرکت می‌کند، سیگنال های خروجی از دو حسگر با یکدیگر مشابه بوده اما دارای تاخیر زمانی (زمان انتقال) هستند. بنابراین با داشتن فاصله مکانی و زمانی حرکت ذرات، سرعت آن‌ها محاسبه می‌گردد (Li et al., 2015). حسگرهای الکترواستاتیک غیر فعال بوده بنابراین بدون هیچگونه تزریق انرژی می‌توان از آن‌ها برای اندازه گیری پارامترهای جریان استفاده کرد. اساس کار این حسگرها اندازه‌گیری نوسانات میدان مغناطیسی به علت شارژ مواد جامد است (Qian et al., 2014). حسگرهای الکترواستاتیک همراه با الگوریتم پردازش سیگنال متقابل نسبت به سایر حسگرهای شناخته شده برای اندازه گیری سرعت ذرات در انتقال پنوماتیک مواد در جریان پایدار برتر هستند (Yan et al., 1995). با این حال، توزیع ناهمگن ذرات و پروفیل نامنظم سرعت در انتقال پنوماتیکی مواد با غلظت حجمی ذرات ۰/۱ درصد یا کمتر، منجر به نوسان‌های قابل توجه در پارامترهای جریان اندازه گیری شده می‌شود (Fokeer et al., 2004). برای به حداقل رساندن این مشکل، یک آرایه از الکترودها برای اندازه گیری های چندگانه و هم‌زمان مورد استفاده قرار گرفت، به طوری که با ترکیب تمام اندازه گیری‌ها می‌توان پارامترهای جریان قابل اعتمادتری را بدست آورد (شکل۳). در تحقیقی از حسگرهای الکترواستاتیک همراه با همبستگی متقابل برای اندازه‌گیری سرعت انتقال پنوماتیک مواد استفاده شد. نتایج نشان داد تکرارپذیری این روش حدود ۲ درصد و زمان پاسخ کمتر از ۲/۵ ثانیه در محدوده سرعت ۶ - ۴۵ متر بر ثانیه است (Ma and Yan, 2000). محققین از حسگرهای الکترواستاتیکی نفوذی برای اندازه‌گیری پیوسته سرعت مواد جامد در

خطوط انتقال پنوماتیک استفاده کردند. اثر ابعاد الکترود و عمق نفوذ بر سیگنال‌های خروجی حسگر و اندازه گیری سرعت مبتنی بر همبستگی متقابل، بررسی شد. آزمایش‌ها برخط بوده و در یک خط لوله انتقال پنوماتیک در مقیاس صنعتی تزریق پودر ذرات زغال سنگ و زیست توده انجام شد. نتایج نشان داد که حسگرهای الکترواستاتیک قادر به اندازه گیری قابل اعتماد سرعت مواد جامد انتقال یافته با پنوماتیک با تکرارپذیری خوب و پاسخ دینامیکی سریع در محیط صنعتی می باشند (Shao et al., 2010).

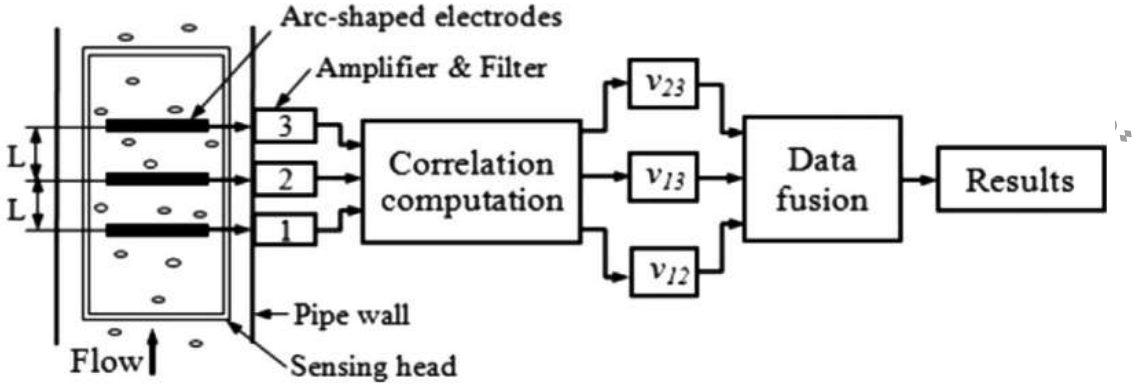


Figure 3. Block diagram of the three-electrode correlation velocimetry system (Qian et al., 2014).

شکل ۳- طرح سنجش سرعت با استفاده از ارتباط متقابل سه الکترود.

۲-۴- سرعت سنج لیزر داپلر[۱](LDV)

LDV روشی غیر مخرب و دارای دقت بالا بوده و در اندازه‌گیری سرعت ذرات جامد در انتقال پنوماتیکی جریان دو فازی (گاز - جامد) استفاده می‌شود. این روش معمولا برای فاز رقیق و در جریان‌هایی با سرعت باد بالا استفاده می‌شود (Yan et al., 2017). پروفیل سرعت ذرات در جریان دو فازی گاز - جامد با استفاده از یک سیستم سنجش لیزر داپلر اندازه‌گیری شد. سرعت ذرات جامد برای طیف وسیعی از سرعت‌های هوا بین ۲۵ تا ۴۵ متر بر ثانیه و برای طیف وسیعی از تراکم ذرات معلق از ۰/۰۰۱ کیلوگرم تا ۰/۱ کیلوگرم در هر متر مکعب هوا اندازه‌گیری شد (Woodhead et al., 1995). یک سیستم LDV براساس یک حلقه بسته فاز آنالوگ و یک سیستم انتگرال‌گیر آنالوگ برای پردازش داده‌های سرعت سنج لیزر داپلر برای تعیین سرعت مواد جامد ارائه شد. نتایج نشان داد که دقت اندازه‌گیری حدود ۱/۴ درصد برای اندازه‌گیری سرعت در محدوده ۰/۰۱ تا ۰/۰۸ متر بر ثانیه و نسبت نویز سیگنال کمتر از ۱۲ dB است (شکل۴) (Le Duff et al., 2002). تحقیقی به منظور بررسی پروفیل سرعت ذرات در لوله عمودی پس از یک خم ۹۰ درجه با استفاده از تکنیک لیزر داپلر انجام شد. آزمایش‌ها روی یک جریان دو فازی رقیق با سه اندازه مختلف دانه‌های شیشه‌ای انجام شد (Lu et al., 2017). همچنین محققین به منظور بررسی رفتار جریان فاز رقیق گاز - جامد در یک خم ۹۰ درجه از روش LDV استفاده کردند (Kuan et al., 2007). سرعت سنج داپلر می‌تواند اندازه ذرات، میدان جریان و سرعت ذرات را اندازه‌گیری کند اما هزینه استفاده از این روش بالا است (Zhou et al., 2018).

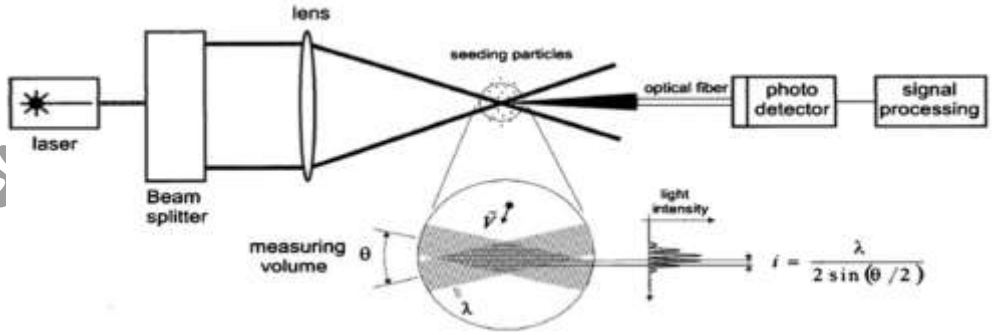


Figure 4. Description of the LDV system (Zheng and Liu, 2011).

شکل ۴- شرح سیستم LDV.

[۱] Laser Doppler velocimetry (LDV)

۲-۵- تصویربرداری دیجیتال

شکل(۵) نمایی از لوله انتقال پنوماتیکی مواد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل به منظور اندازه‌گیری سرعت مواد جامد از یک لیزر با موج مداوم یا یک دیود نوری (LED) به عنوان منبع نور استفاده شده و یک دوربین CCD در موقعیت مناسب ثابت شده است. فاز گسسته، مانند قطرات، ذرات یا شن و ماسه، در جلوی دوربین CCD حرکت می‌کنند. مسیر ذرات در یک زمان مشخص عکس‌برداری می‌شود. بنابراین قطر و سرعت ذرات را می توان با پردازش تصویر تعیین کرد. در تحقیقی یک سیستم سنجش با استفاده از ترکیبی از حسگرهای الکترواستاتیک و تصویربرداری دیجیتال برای اندازه گیری سرعت و تراکم مواد جامد ارائه شد (شکل۵). تراکم حجمی ذرات جامد با استفاده از یک حسگر جدید تصویربرداری دیجیتالی بدست آمد همچنین داده‌های توزیع اندازه ذرات نیز فراهم شد در حالیکه سرعت ذرات توسط ارتباط متقابل دو سیگنال مشتق شده از یک جفت حسگر الکترواستاتیکی تعیین شد. نتایج تجربی عملکرد خوبی برای سیستم در اندازه‌گیری نرخ جریان جرمی مواد جامد (دقت حدود ۴ درصد) و اندازه ذرات جامد (قابل اعتماد به حدود ۰/۰۵ درصد) نشان داد (Carter and Yan, 2005). در پژوهشی دیگر یک روش تصویربرداری دیجیتال که قادر به اندازه گیری تراکم حجمی، سرعت و نرخ جریان جرمی مواد جامد در جریان دو فازی گاز جامد است، ارائه شد. این سیستم اندازه‌گیری شامل یک لیزر روشنایی و یک دوربین ارزان قیمت CCD برای گرفتن تصویر ذرات جامد است. با کنترل زمان نمایش دوربین، یک تصویر واضح و یک تصویر تار (نشان دهنده حرکت ذرات) به دست می‌آید. تصویر روشن با استفاده از روش OTSU برای شناسایی مواد جامد از پس زمینه تیره پردازش شد. بنابراین تراکم حجمی با محاسبه نسبت بین سطح مواد جامد و کل مساحت تعیین می‌شود. سرعت مواد جامد از طول قسمت تیره مواد در حال حرکت حاصل می‌شود در تصاویر متحرک سرعت با استفاده از روش معادله موج حرکت تخمین زده می‌شود. در نهایت نرخ جریان جرمی مواد جامد با ترکیب سرعت و تراکم حجمی مواد جامد محاسبه شد. این تکنیک ممکن است برای جریان های فاز متراکم مناسب نباشد (Song et al., 2009).

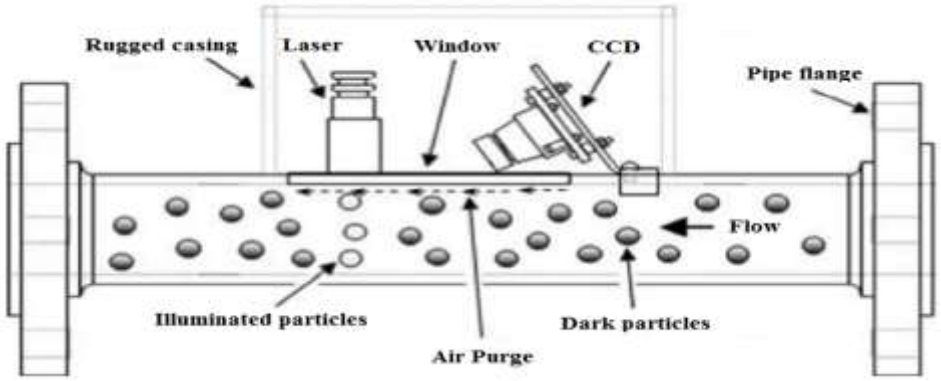


Figure 4. Schematic diagram of the digital imaging sensor for particle sizing (Carter et al., 2007).

شکل ۴- نمایی از سنسور تصویربرداری دیجیتال برای اندازه گیری سرعت ذرات.

۳- خلاصه

در این مطالعه، تکنیک‌های اخیر مورد استفاده در اندازه‌گیری سرعت مواد جامد در سیستم‌های انتقال پنوماتیک مواد بررسی شد. بر اساس اصل و پیکربندی، عملکرد و محدودیت‌های هر یک از روش‌های حسگرهای برقی (روش‌های فیلتر مکانی)، روش‌های تحلیل ارتباط متقابل (حسگر نوری و همبستگی متقابل، حسگر الکترواستاتیک و همبستگی متقابل)، سرعت سنج لیزر داپلر (LDV) و تصویربرداری دیجیتال در کاربردهای صنعتی، از دیدگاه‌های مختلف، مقایسه و بررسی شد. روش‌های همبستگی متقابل، مستقل از تغییرات خواص فیزیکی و شیمیایی ذرات و مستقل از تغییرات رطوبت و دما است. همبستگی متقابل یک روش معتبر است که به طور گسترده برای تعیین سرعت سیال با محاسبه زمان انتقال جریان بین حسگرهای بالادست و پایین دست استفاده می شود. ضریب همبستگی متقابل سیگنال خروجی از الکترودهای بالادست و پایین دست نشان دهنده قابلیت اطمینان سرعت اندازه گیری شده توسط روش همبستگی متقابل و پایداری جریان ذرات است. سرعت سنج داپلر می‌تواند اندازه ذرات، میدان جریان و سرعت ذرات را اندازه‌گیری کند اما هزینه استفاده از این روش بالا است. در روش تصویر برداری دیجیتال مسیر ذرات در یک زمان مشخص عکس‌برداری می‌شود. بنابراین قطر و سرعت ذرات را می توان با پردازش تصویر تعیین کرد. فیلترهای مکانی، مکمل روش‌های اندازه‌گیری سرعت مانند سرعت سنج داپلر و حسگرهای الکترواستاتیک هستند. فیلترهای مکانی برای استفاده در لیزر به منظور صاف کردن پرتو طراحی شده‌اند. اغلب یک سیستم لیزر، پرتویی با شدت یکنواخت تولید نمی کند. برای تولید یک پرتو گوسی، یک فیلتر مکانی برای حذف پیک‌های کوچک ناخواسته

استفاده می شود و تنها بیشینه مرکزی الگوی پراکندگی را منتقل می کند.

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- Carter, R. M., & 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.
3- Coombes, J. R., & Yan, Y. (2015, May). Development of an electrostatic array sensor for measuring the velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International* (pp. 138-143). IEEE.
4- Fokeer, S., Kingman, S., Lowndes, I., & Reynolds, A. (2004). Characterisation of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying—a review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *43*(6), 677-691.
5- 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).
6- Karparvarfard, S. H., & VAKILI, F. A. (2010). An Experimental Correlation for Friction Factor in Horizontal Pipe with Trapezoidal Section Inner Longitudinal Slots for Conveying of Solids. 83-91. (Persian).
7- Kuan, B., Yang, W., & Schwarz, M. P. (2007). Dilute gas–solid two-phase flows in a curved 90◦ duct bend: CFD simulation with experimental validation. *Chemical Engineering Science*, *62*(7), 2068-2088.
8- Le Duff, A., Plantier, G., Valiere, J. C., & Bosch, T. (2002). Velocity measurement in a fluid using LDV: low-cost sensor and signal processing design. In *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE* (Vol. 2, pp. 1347-1350). IEEE.
9- 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.
10- Li, J., Xu, C., & Wang, S. (2014). Spatial filtering characteristics of electrostatic sensor matrix for local velocity measurement of pneumatically conveyed particles. *Measurement*, *53*, 194-205.
11- Lu, Y., Tong, Z., Glass, D. H., Easson, W. J., & Ye, M. (2017). Experimental and numerical study of particle velocity distribution in the vertical pipe after a 90° elbow. *Powder Technology*, *314*, 500-509.
12- Ma, J., & 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.
13- Petrak, D. (2002). Simultaneous measurement of particle size and particle velocity by the spatial filtering technique. *Particle & Particle Systems Characterization*, *19*(6), 391-400.
14- Qian, X., & Yan, Y. (2012). Flow measurement of biomass and blended biomass fuels in pneumatic conveying pipelines using electrostatic sensor-arrays. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *61*(5), 1343-1352.
15- Qian, X., Huang, X., Yonghui, H., & Yan, Y. (2014). Pulverized coal flow metering on a full-scale power plant using electrostatic sensor arrays. *Flow Measurement and Instrumentation*, *40*, 185-191.
16- Rahim, R. A., Pang, J. F., & San Chan, K. (2005). Optical tomography sensor configuration using two orthogonal and two rectilinear projection arrays. *Flow Measurement and Instrumentation*, *16*(5), 327-340.
17- Shao, J., Krabicka, J., & Yan, Y. (2010). Velocity measurement of pneumatically conveyed particles using intrusive electrostatic sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *59*(5), 1477-1484.
18- Song, D., Peng, L., Lu, G., Yang, S., & Yan, Y. (2009). Digital image processing based mass flow rate measurement of gas/solid two-phase flow. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 147, No. 1, p. 012048). IOP Publishing.
19- Woodhead, S. R., Pittman, A. N., & Ashenden, S. J. (1995, April). Laser Doppler velocimetry measurements of particle velocity profiles in gas-solid two-phase flows. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1995. IMTC/95. Proceedings. Integrating Intelligent Instrumentation and Control., IEEE* (p. 770). IEEE.
20- Xu, C., Li, J., & Wang, S. (2012). A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array. *Flow Measurement and Instrumentation*, *26*, 68-78.
21- Xu, C., Tang, G., Zhou, B., & Wang, S. (2009). The spatial filtering method for solid particle velocity measurement based on an electrostatic sensor. *Measurement Science and Technology*, *20*(4), 045404.
22- 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), 024005.

23- Yan, F., Rinoshika, A., Tang, W., & Zhu, R. (2017). Experimental analysis on particle fluctuation velocity in a horizontal air–solid two-phase pipe flow having a dune model. *Particulate Science and Technology*, 1-8.
24- Yan, Y. (1996). Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. *Measurement Science and Technology*, *7*(12), 1687.
25- Yan, Y., Byrne, B., Woodhead, S., & Coulthard, J. (1995). Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors. *Measurement Science and Technology*, *6*(5), 515.
26- Zheng, Y., & Liu, Q. (2011). Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. *Measurement*, *44*(4), 589-604.
27- Zheng, Y., Liu, Q., & Li, C. (1996). Calibration and error analysis of the measurement system for the dry fiber mass in paper pulp. *Measurement Technique*, *9*, 19-23.
28- 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.
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.

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