

## مطالعه تجربی و شبیه‌سازی لوله انتقال با مقطع واگرا در نقاله نیوماتیکی دانه‌های جو

حسن غفوری ورزنده<sup>۱\*</sup>

### چکیده

سیستم‌های انتقال مواد بطور گسترده در بخش‌های مختلف صنعت و کشاورزی کاربرد دارند. نقاله‌های نیوماتیکی یکی از روش‌های انتقال مواد دانه‌ای و پودری هستند که از جریان هوا برای انتقال مواد از نقطه‌ای به نقطه دیگر استفاده می‌کنند. از پارامترهای مؤثر بر کارکرد این نوع نقاله‌ها، الگوی حرکت ذرات و مصرف انرژی این‌گونه نقاله‌ها است. در این تحقیق به منظور بررسی الگوی حرکت مواد و بهینه‌سازی مصرف انرژی، مکانیزمی به نام مقطع واگرا در لوله انتقال، طراحی و ساخته شد و اثر آن بر روی انتقال دانه‌های جو در سیستم انتقال مواد نیوماتیکی به صورت تجربی و شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفت. به منظور حل معادلات حاکم بر جریان دو فازی همچون پیوستگی و ممنوعیت از نرم‌افزار Fluent و برای ارزیابی تجربی از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار و برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون دانکن استفاده شد. نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی لوله با مقطع واگرا حاکی از آن بود که میانگین سرعت هوای ورودی، میانگین افت فشار و میانگین توان مصرفی دستگاه در فاز غلیظ در حالت ورود هوای کمکی به ترتیب ۸/۶٪، ۶/۶۷٪ و ۱/۲۳٪ نسبت به حالت بدون هوای کمکی و در فاز رقیق در حالت ورود هوای کمکی به ترتیب ۳/۵۶٪، ۴/۶۶٪ و ۵/۲۱٪ نسبت به حالت بدون هوای کمکی کاهش یافت. همچنین در فاز رقیق، ورود هوای کمکی با سرعت بیشتر از سرعت هوای ورودی محیط، باعث افزایش دبی جرمی ذرات عبوری به میزان ۱۷/۳٪ گردید. در مقطع واگرا، تغییرات سرعت ذرات کاهش یافت و سرعت ذرات در طول مسیر انتقال یکنواخت‌تر گردید.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی مصرف انرژی، دانه‌های جو، مقطع واگرا، نقاله نیوماتیکی.

ارجاع: غفوری ورزنده ح. ۱۴۰۱. مطالعه تجربی و شبیه‌سازی لوله انتقال با مقطع واگرا در نقاله نیوماتیکی دانه‌های جو. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۲: ۴۴-۴۴.

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، واحد شهر مجلسی، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران.

\* نویسنده مسئول: [hasangh28@gmail.com](mailto:hasangh28@gmail.com)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۲۰

## مقدمه

یک بالشتک هوایی بین توده مواد در حال انتقال و سطح داخلی لوله، منجر به کاهش افت فشار، توان مصرفی و درصد صدمات مکانیکی وارده به دانه‌های ذرت و جو شده است (Ghafari et al., 2011). مدل‌سازی سه بعدی نشان می‌دهد که با ایجاد تغییر ناگهانی سطح مقطع لوله انتقال (مقطع واگرا) تا حدی از درصد شکستگی دانه‌ها و همچنین توان مصرفی کاسته می‌شود (Cowell & McGlinchey, 2005).

همچنین بررسی منابع نشان می‌دهد که استفاده از بالشتک هوا بین جداره لوله و مواد انتقالی، موجب بهبود عملکرد این نقاله‌ها شده است. تغییر ناگهانی در سطح مقطع لوله انتقال، خواص انتقالی این نقاله‌ها را نیز بهبود بخشیده است. لذا در پژوهش حاضر، بررسی استفاده همزمان از دمیدن هوای اضافی توسط یک منبع ایجاد هوا در محل لوله با مقطع واگرا بر شاخص‌های انتقالی مواد، مد نظر است که برای این منظور یک سیستم نیوماتیکی به همراه لوله‌ای با مقطع واگرا به صورت آزمایشگاهی، طراحی و ساخته شد و اثر دمیدن هوای اضافی در مقطع واگرا بر انتقال دانه‌های جو به صورت تجربی و شبیه‌سازی شده مورد مطالعه قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

یکی از روش‌های بیان معادلات حاکم بر جریان‌های دو فازی، استفاده از دیدگاه اویلری-لاگرانژی است. در این روش با استفاده از روش کوپل دو راهه در هر فاصله زمانی، ابتدا معادلات سیال فاز پیوسته همچون پیوستگی و ممنوم حل می‌شوند و سپس معادلات حاکم برای ذرات جامد با استفاده از قانون نیوتن و اثر فاز حامل حل می‌شوند و تکرار این فرآیند تا زمانی که معادلات سیال همگرا شوند ادامه می‌یابد. در این پژوهش از این روش استفاده گردید.

### معادلات حاکم بر جریان‌های آشفته

معادلات پیوستگی و ممنوم برای سیال تراکم ناپذیر به ترتیب زیر هستند (Versteeg & Malalasekera, 2007).

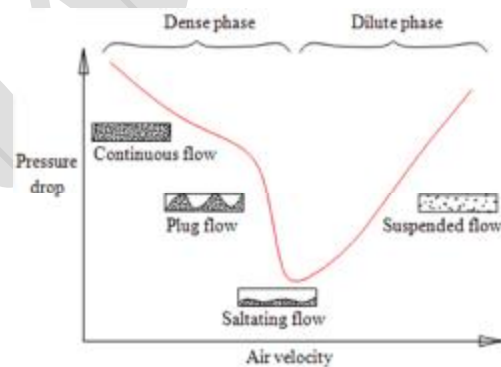
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) \quad (2)$$

$u_i$  سرعت لحظه‌ای سیال در راستای  $i$ ، m/s

$u_j$  سرعت لحظه‌ای سیال در راستای  $j$ ، m/s

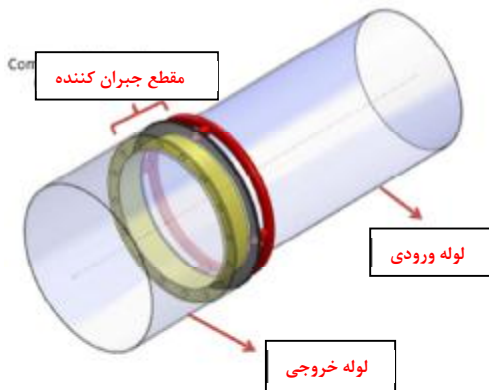
یکی از فرآیندهای مهم در صنایع پتروشیمی، کشاورزی، دارویی، فولاد، سیمان و غیره، سیستم انتقال مواد به صورت نیوماتیکی است. انتقال نیوماتیکی مواد به مجموعه‌ای از عملیات گفته می‌شود که در آن از جریان هوا برای انتقال مواد استفاده می‌شود. یک سری پیچیدگی در نوع انتقال مواد در لوله انتقال و تشخیص فاز انتقال وجود دارد. مطابق شکل ۱، اگر مواد در طول خط انتقال به صورت جریان معلق<sup>۱</sup> در هوا حرکت کنند، فاز، رقیق است و اگر مواد در سرعت پایین و به صورت غیر معلق در طول تمام یا قسمتی از خط انتقال حرکت کنند، فاز، غلیظ است. در انتقال به صورت فاز غلیظ ممکن است مواد به شکل بستر روان در کف لوله<sup>۲</sup> به صورت توده‌های مجزا از هم<sup>۳</sup> و یا به صورت پیوسته<sup>۴</sup> در لوله انتقال جریان یابند (Mills, 2004).



شکل ۱- فازهای مختلف جریان مواد متناسب با سرعت جریان هوا و افت فشار در لوله (Mills, 2004)

روش انتقال نیوماتیکی دارای مشکلاتی از جمله توان مصرفی بالا، صدمات مکانیکی به دانه‌ها، عدم توزیع یکنواخت افت فشار و سرعت سیال حامل در طول مسیر و عدم کنترل سرعت ذرات است. در این زمینه مطالعات گسترده‌ای انجام شده است. تحقیقات نشان می‌دهند که اصطکاک ذرات با دیواره لوله مقدار ثابتی نیست و به قطر لوله، سرعت انتقال، نسبت جرمی انتقال مواد، نوع ذره و سختی دیواره لوله بستگی دارد (Sommerfeld & Kussin, 2004). به کارگیری لوله دو جداره مشبک از طریق ایجاد

- 1- Suspended flow
- 2- Settlement flow
- 3- Plug flow
- 4- Continuous flow



شکل ۲- مکانیزم لوله با مقطع واگرا

ذرات مورد آزمایش، دانه‌های جو با دانسیته ۱۲۹۴ کیلوگرم بر مترمکعب بودند که در این تحقیق از آن به نام دانه یاد می‌شود. ویژگی‌های فیزیکی دانه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور ارزیابی اثر نوع لوله در دو سطح (لوله با مقطع ثابت و لوله با مقطع واگرا) و سرعت هوای کمکی در لوله با مقطع واگرا در ۶ سطح (۰، ۷، ۱۳، ۱۴، ۱۵ متر بر ثانیه) بر سرعت هوای ورودی، افت فشار هوا، توان مصرفی و دبی جرمی دانه‌ها در لوله انتقال، از آزمایش فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار و برای مقایسه میانگین تیمارها از آزمون دانکن استفاده شد. از نرم‌افزارهای Excel 14 و SAS 9.1 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده گردید.

جدول ۱- میانگین ویژگی‌های فیزیکی دانه‌ها

میانگین	ویژگی‌های فیزیکی دانه‌ها
۵/۹	رطوبت (درصد)
۹/۸	طول (میلی‌متر)
۳/۴	عرض (میلی‌متر)
۲/۸	ضخامت (میلی‌متر)
۴/۵	قطر متوسط هندسی (میلی‌متر)
۵/۳	قطر متوسط حسابی (میلی‌متر)
۴۶/۳	کروییت (درصد)
۲۹/۲	حجم (میلی‌مترمکعب)
۱۶/۱	سطح مقطع (میلی‌مترمربع)
۳۵/۱	ضریب حالت (درصد)
۳۰/۳	وزن هزار دانه (گرم)
۶۴/۸۱	چگالی ظاهری (کیلوگرم بر مترمکعب)
۱۲۹۷/۲	چگالی حقیقی (کیلوگرم بر مترمکعب)
۵۰	تخلخل (درصد)
۷/۸	سرعت حد (متر بر ثانیه)
۰/۴	ضریب مقاومت

$\rho$  چگالی سیال،  $\text{kg/m}^3$

$P$  فشار میانگین سیال،  $\text{N/m}^2$

$v$  لزجت سینماتیکی سیال،  $\text{m}^2/\text{s}$

مطابق با پیشنهاد رینولدز، مقادیر واقعی پارامترها در جریان آشفته، مجموع دو مؤلفه میانگین و نوسانی است که با جایگذاری آن در معادلات (۱) و (۲) و در نظر گرفتن اثر متقابل ذرات بر فاز حامل، معادلات میانگین حاکم بر جریان به صورت زیر بدست می‌آیند (Nasr & Ahmadi, 2007; Lain et al., 1999).

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (U_j U_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j) + S_{Ui}^p \quad (4)$$

که در معادله فوق،  $\bar{U}_i \bar{U}_j$  تانسور تنش رینولدز و  $S_{Ui}^p$  جمله چشمه ظاهر شده در معادله اندازه حرکت به دلیل حضور ذرات است.

#### معادلات حاکم بر حرکت فاز پراکنده

هنگامی که جهت شبیه‌سازی حرکت فاز ذرات از دیدگاه لاگرانژی استفاده می‌شود، معادله حاکم بر حرکت ذره، مطابق قانون دوم نیوتن است. بنابراین با اطلاع از نیروهای وارد بر هر ذره می‌توان حرکت آن را به صورت لاگرانژی بررسی نمود. معادلات لاگرانژی حاکم بر حرکت ذرات جامد به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\frac{d}{dt} (x_{pi}) = u_{pi} \quad (5)$$

$x_{pi}$  مکان ذره جامد در راستای  $i$ ،  $m$

$u_{pi}$  سرعت ذره جامد در راستای  $i$ ،  $m/s$

$$m \frac{d}{dt} (u_{pi}) = F_i \quad (6)$$

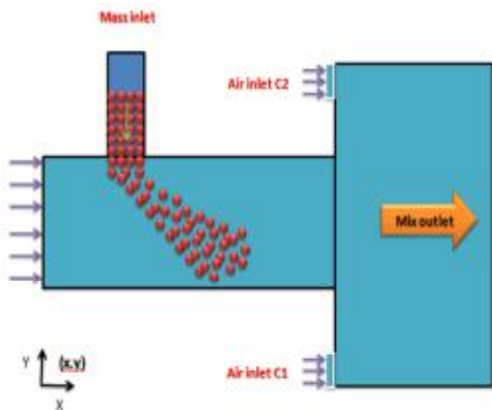
$m$  جرم ذره جامد،  $kg$

$F_i$  برآیند نیروهای وارد بر ذره جامد در راستای  $i$ ،  $N$

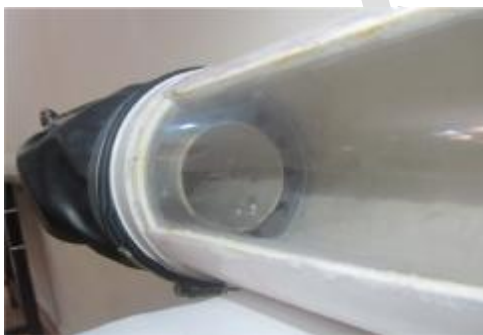
#### روش تجربی

به منظور بررسی اثر مقطع واگرا بر جریان دو فازی داخل لوله، ابتدا مقطع واگرا و لوله‌های انتقال در ابعاد آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده و پس از نصب بر روی دستگاه انتقال نیوماتیکی مواد، اطلاعات مورد نیاز توسط ابزار اندازه‌گیری استخراج گردید. مکانیزم مقطع واگرا شامل دو لوله با قطرهای مختلف است که توسط یک اتصال بهم وصل شده‌اند. در محل تغییر سطح مقطع، امکان تزریق هوای کمکی به داخل لوله وجود دارد (شکل ۲).

برای اندازه‌گیری دقیق افت فشار به وجود آمده در سیستم انتقال مواد، از دو وسیله گیج فشارسنج و پیزومتر U شکل به صورت موازی استفاده گردید. توان مصرفی در هر مرحله از آزمایش، توسط اندازه‌گیری آمپر (I) و ولتاژ (V) موتور الکتریکی به کمک یک مولتی‌متر مدل DT-9205M انجام شد.



شکل ۴- شماتیک نحوه عملکرد مقطع واگرا



شکل ۵- تصویر مقطع واگرای ساخته شده

### شبیه‌سازی و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی ابتدا هندسه مسئله در نرم‌افزار Gambit 2.4.6 ترسیم و سپس مش‌بندی شد. هندسه مسئله شامل دو لوله افقی با قطرهای ۵۷ و ۱۰۴ میلی‌متر و با طول ۳ متر که به صورت هم مرکز به هم متصل بودند در نظر گرفته شد. شرایط مرزی هندسه مدل شده، مطابق شکل ۶ است.

مش‌بندی به صورت نامنظم و از سلول‌های شش وجهی<sup>۲</sup> از نوع کوپر<sup>۳</sup> با اضلاع ۴ میلی‌متر در فضای محاسباتی انتخاب گردید. جهت حل عددی مسئله از روش دینامیک

قسمت‌های تشکیل دهنده سیستم انتقال نیوماتیکی مواد شامل لوله‌های انتقال مواد و لوله با مقطع واگرا، منبع تغذیه دانه‌ها، فن مکنده و سیکلون جداکننده، هستند که در شکل ۳، خط لوله انتقالی نشان داده شده است. برای مشاهده نحوه انتقال مواد در داخل لوله، بعضی از قسمت‌های لوله از مواد شفاف ساخته شد.



شکل ۳- سیستم انتقال نیوماتیکی مواد مورد استفاده

در ارزیابی اثر سرعت هوای کمکی روی سرعت هوای ورودی، افت فشار و توان مصرفی برای ایجاد شرایط یکسان و مقایسه نتایج، میزان دبی جرمی مواد تغذیه شده (دانه‌های جو) به داخل لوله انتقال از طریق دریچه نصب شده در زیر مخزن تغذیه مواد، در یک مقدار ثابت (۰/۳۰ kg/s) تنظیم و کنترل گردید.

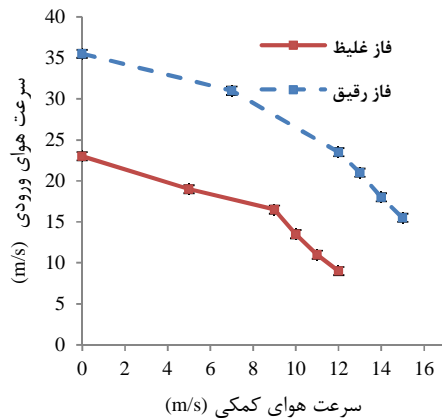
مقطع واگرا دارای فضایی برای ورود هوای کمکی در مکان تغییر مقطع سیستم انتقال مواد است. منظور از هوای کمکی، هوای اضافی بوده که توسط یک مولد جریان به طور جداگانه تولید شده و توسط مقطع واگرا مطابق شکل‌های ۴ و ۵ به داخل سیستم انتقال مواد نیوماتیکی هدایت می‌شود و منظور از سرعت هوای کمکی، سرعت جریان هوای تزریق شده است. مکانیزم ساخته شده دارای امکان ورود هوای کمکی با سرعت‌های ۰، ۷، ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ متر بر ثانیه توسط فن دمنده در بخش تغییر مقطع و موازی حرکت جریان است. سرعت هوای مکیده شده (دبی هوای ورودی به مکنده) توسط مکنده ثابت است که بخشی از آن توسط هوای کمکی و بخشی دیگر توسط ورودی هوای اصلی تأمین می‌شود و این دو سرعت متأثر از همدیگر هستند.

به منظور اندازه‌گیری سرعت هوای ورودی و سرعت هوای کمکی در لوله‌های انتقال مواد از دستگاه سرعت سنج پره‌ای<sup>۱</sup> مدل Lutron AM-4200 استفاده شد.

2- Hex mesh  
3- Cooper

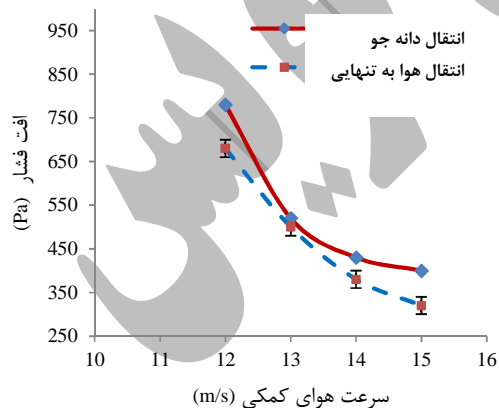
1- Vane velocity meter

کمکی دمیده شده بیشتر باشد، هوای کمتری از ورودی لوله اصلی مکیده می‌شود و این کار منجر به کاهش سرعت هوای ورودی می‌گردد.



شکل ۷- مقایسه اثر تغییرات سرعت هوای کمکی بر سرعت هوای ورودی برای انتقال ذرات در فاز غلیظ و رقیق

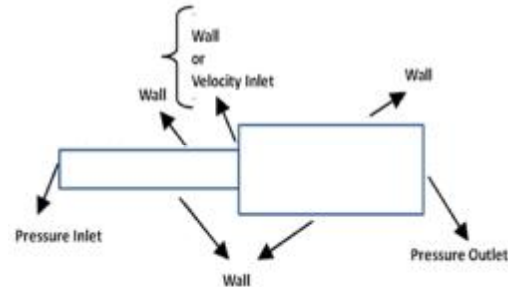
مقایسه تغییر افت فشار با سرعت هوای کمکی در فاز رقیق در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، با افزایش سرعت هوای کمکی، میزان افت فشار کاهش می‌یابد و میانگین افت فشار مربوط به انتقال هوا به تنهایی در فاز رقیق به طور معنی‌دار و به میزان ۱۶/۴٪ کمتر از میانگین افت فشار مربوط به انتقال مواد است.



شکل ۸- مقایسه افت فشار با سرعت هوای کمکی برای انتقال هوا به تنهایی و دانه های جو

وجود ذرات در جریان هوا، مشابه وجود مانع در سر راه مکنده بوده و افت فشار ناشی از شتاب مواد و افت فشار به واسطه برخورد و اصطکاک مواد با جداره لوله افزایش

سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شد. مدل‌سازی لوله‌ها و مقطع واگرا، مطابق شرایط مرزی جریان پوازی<sup>۱</sup> و مدل‌سازی جریان آشفته با استفاده از مدل  $K-\epsilon$  استاندارد در نرم‌افزار Fluent 17.0 انجام شد. همچنین جهت شبیه‌سازی ذرات جامد از مدل فاز گسسته ذرات<sup>۲</sup> استفاده شد.



شکل ۶- شرایط مرزی هندسه مدل شده

## نتایج و بحث

خلاصه تجزیه واریانس مربوط به اثر نوع لوله و سرعت جریان هوای کمکی بر شاخص‌های سرعت هوای ورودی، افت فشار هوا، توان مصرفی و دبی جرمی دانه‌ها در جدول ۲ نشان شده است.

از جدول ۲ چنین استنباط می‌گردد که اثر نوع لوله، سرعت جریان هوای کمکی و اثر متقابل نوع لوله و سرعت جریان هوای کمکی بر کلیه شاخص‌های مورد ارزیابی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است که در ادامه بررسی می‌شوند.

نتایج مقایسه اثر تغییر سرعت هوای کمکی بر سرعت هوای ورودی برای انتقال دانه در فازهای رقیق و غلیظ در شکل ۷ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌گردد، در هر سرعت هوای کمکی، سرعت هوای ورودی در فاز غلیظ کمتر از فاز رقیق است. میانگین سرعت هوای ورودی در فاز غلیظ، ۲۵ درصد کمتر از فاز رقیق است. همچنین با افزایش سرعت هوای کمکی، سرعت هوای ورودی در هر دو فاز کاهش می‌یابد. دلیل این امر به این صورت قابل توجیه است که با دمیدن هوای کمکی در مقطع واگرا، بخشی از هوای مورد نیاز برای انتقال مواد از این مکان تأمین می‌شود و مابقی از ورودی لوله اصلی مکیده می‌شود. هرچه سرعت هوای

1- Poiseuille  
2- DPM

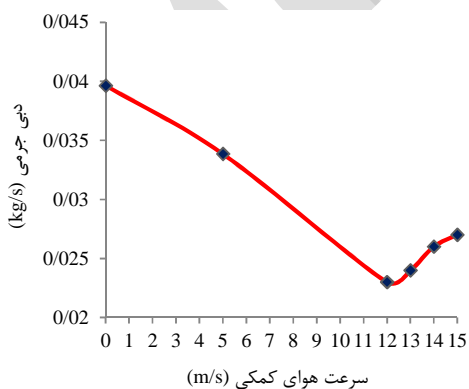
مطابق انتظار، وجود دانه‌ها در مسیر انتقال، به دلیل افت فشاری که ایجاد می‌کنند، باعث افزایش توان مصرفی نقاله می‌شوند.

در پژوهش‌های مشابه، نتایج تحقیقات محققین نشان داد که توان مصرفی نقاله نیوماتیکی مکشی برای انتقال هوای محض در یک لوله با قطر مشخص تحت تأثیر سرعت هوای ورودی قرار دارد (Guner, 2007) و با افزایش سرعت هوا افزایش می‌یابد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Guner et al., 2003).

بررسی اثر وجود مواد بر توان مصرفی توسط سایر محققین نشان داد که وجود مواد انتقالی، مقدار توان مصرفی را افزایش می‌دهد که با نتیجه حاصل از شکل ۱۰ مطابقت دارد (Zhang et al., 2010).

تغییرات دبی جرمی دانه در اثر تغییرات سرعت هوای کمکی در فاز رقیق در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بررسی اثر سطوح مختلف سرعت هوای کمکی بر دبی جرمی مواد نشان می‌دهد که کمترین دبی جرمی مربوط به سرعت هوای کمکی ۱۲ متر بر ثانیه است.

دبی جرمی ذرات تا سرعت هوای کمکی ۱۲ متر بر ثانیه در فاز رقیق، کاهش می‌یابد. با ورود هوای کمکی با سرعت بیشتر از ۱۲ متر بر ثانیه، یک بالشتک هوایی ایجاد شده و ضمن کاهش اصطکاک ذرات با لوله، منجر به افزایش سرعت ذرات شده و در نتیجه دبی جرمی ذرات افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۱- تغییرات دبی جرمی دانه‌های جو با سرعت هوای کمکی مختلف

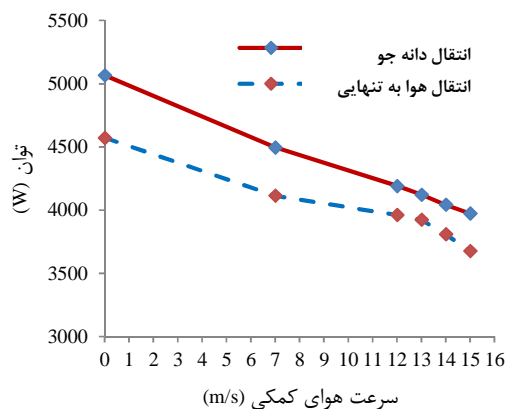
می‌یابد. با افزایش سرعت هوای کمکی از ۱۲ به ۱۵ متر بر ثانیه، در لوله به قطر داخلی ۱۰۴ میلی‌متر، دانه‌های لایه‌های بالایی در آستانه سقوط قرار گرفته و تمایل دانه‌ها به معلق شدن در هوا کاهش می‌یابد و مطابق شکل ۹، ترکیبی از مواد ته نشین شده و مواد معلق ایجاد می‌گردد. این محدوده سرعت هوا باعث بوجود آمدن حالتی می‌شود که اصطلاحاً به آن ناحیه انتقال فاز از رقیق به غلیظ گفته می‌شود.



شکل ۹- ناحیه انتقال فاز از رقیق به غلیظ

نتایج تجربی حاصل از تحقیق محققین (Guner et al., 2003, Guner, 2007) روی نقاله نیوماتیکی مکشی با قطرهای مختلف لوله انتقال نشان داد که در صورت ثابت بودن قطر لوله، میزان افت فشار در فاز رقیق متناسب با سرعت هوای ورودی افزایش می‌یابد که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد.

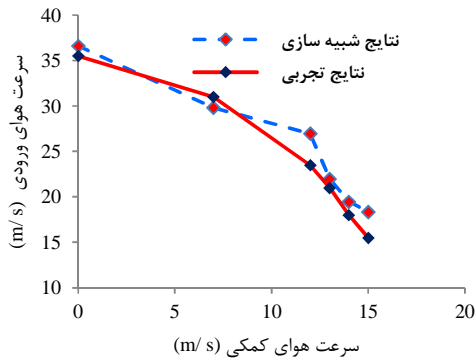
مقایسه تغییرات توان مصرفی در فاز رقیق برای انتقال هوا به تنهایی و انتقال دانه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. میانگین توان مصرفی انتقال هوا ۷ درصد کمتر از میانگین توان مصرفی مربوط به انتقال دانه‌ها است.



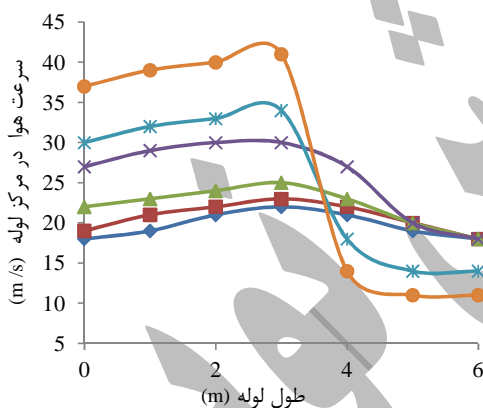
شکل ۱۰- توان مصرفی دستگاه برای انتقال هوا به تنهایی و دانه‌های جو در فاز رقیق

جدول ۲- خلاصه جدول تجزیه واریانس سرعت هوای ورودی، افت فشار هوا، توان مصرفی و دبی جرمی دانه‌ها

منابع تغییرات	سرعت هوای ورودی (m/s)	افت فشار (Pa)	توان مصرفی (W)	دبی جرمی دانه‌ها (kg/s)
بلوک	۲۴/۲۵ <sup>ns</sup>	۶۳۲/۲۰**	۳۲۵۴/۷۶**	۰/۰۲۸ <sup>ns</sup>
نوع لوله	۳۸/۶۱**	۷۸۲/۹۱**	۴۶۲۱/۱۲	۰/۰۳۰**
سرعت هوای کمکی	۲۰/۲۲**	۶۵۰/۳۷**	۴۱۰۹/۶۲**	۰/۰۳۲**
اثر متقابل	۲۸/۶۸**	۶۴۲/۷۲**	۴۳۲۰/۳۸**	۰/۰۳۱**
خطا	۷/۲۶	۸۲/۰۵	۵۲۳/۳۲	۰/۰۰۳



شکل ۱۲- نتایج تجربی و شبیه‌سازی تغییرات سرعت هوای ورودی در اثر ورود هوای کمکی در طول لوله انتقال

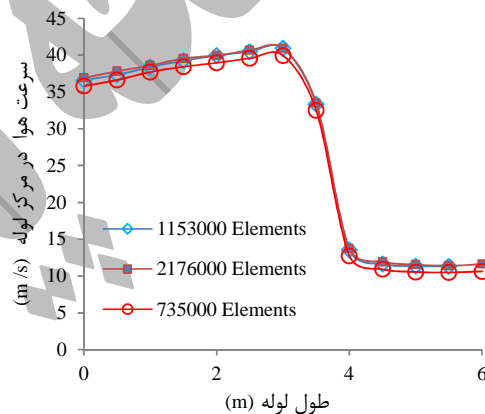


شکل ۱۴- تغییرات سرعت هوا در خط مرکزی لوله‌های انتقال

همانطور که مشخص است از فاصله ۳ متری یک افت سرعت در لوله اتفاق افتاده که مربوط به تغییر مقطع لوله از کم به زیاد (مقطع واگرا) است. با افزایش سرعت هوای کمکی، سرعت هوای ورودی به طور محسوسی کاهش پیدا کرده و نمودار سرعت در هر مرحله نسبت به حالت قبلی یکنواخت‌تر شده تا اینکه در افت فشار ۴۱۱ پاسکال با هوای ورودی ۱۵ متر بر ثانیه، نمودار به شکل مناسبی

### نتایج شبیه‌سازی و اعتبارسنجی

در این قسمت ابتدا اطمینان از عدم وابستگی نتایج شبیه‌سازی به شبکه انتخاب شده بررسی و سپس نتایج ارائه می‌گردد. برای انجام این مهم، تغییرات سرعت هوا در قسمت مرکزی لوله بر حسب طول لوله برای شبکه‌بندی‌های مختلف بررسی گردید که نمودارهای مربوطه در شکل ۱۲ ارائه شده است.



شکل ۱۲- استقلال نتایج از شبکه برای تعداد مش‌های مختلف

همان‌گونه که مشخص است، شبکه‌های انتخابی برای این شبیه‌سازی نتایج یکسانی را نشان می‌دهند و انطباق نمودارها نشان دهنده این واقعیت است که نتایج حاصل، مستقل از شبکه‌بندی است. به همین دلیل، در این تحقیق از شبکه‌ای با تعداد ۱۱۵۳۰۰۰ المان استفاده گردید.

در مرحله بعد به منظور راستی‌آزمایی مدل پیشنهادی، نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی با هم مقایسه گردید. همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است به لحاظ شکل ظاهری، این دو نمودار اختلاف اندکی دارند، ولی میانگین اختلاف نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در بیشترین حالت برابر ۴/۸ درصد است.

نمودار مقایسه تغییرات سرعت هوا در قسمت مرکزی لوله برای همه حالت‌های ذکر شده در شکل ۱۴ نشان داده شده است.





در پی کاهش سرعت هوای ورودی، ارتفاع حرکت ذرات کاهش یافته و ذرات در نزدیک به کف لوله انتقال یافته و با افزایش برخورد ذرات با همدیگر و با جداره لوله تمایل به تهنشینی در کف لوله افزایش یافته است. از دیگر نتایج قابل مشاهده کاهش تغییرات سرعت ذرات است و سرعت ذرات در طول مسیر دارای یکنواختی بیشتری است.

#### نتیجه‌گیری

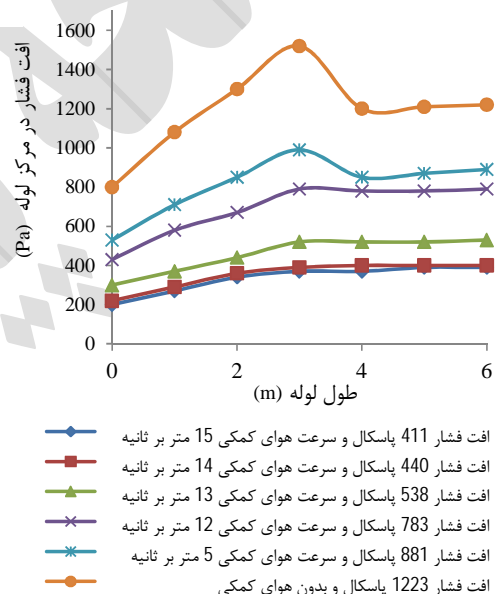
نتایج آزمایش‌های تجربی حاکی از آن است که میانگین سرعت هوای ورودی، افت فشار و توان مصرفی مقطع واگرا در فاز رقیق در حالت ورود هوای کمکی با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه نسبت به حالتی که در آن هوای کمکی تزریق نمی‌شود، به ترتیب  $۳/۵۶\%$ ،  $۴/۶۶\%$  و  $۵/۲۱\%$  کاهش یافته است.

با افزایش سرعت هوای کمکی به ۱۵ متر بر ثانیه (سرعت بیشتر از حالت ورود هوای محیط) دبی جرمی ذرات  $۱۷/۳\%$  افزایش یافت.

به منظور کاهش توان مصرفی و همچنین افزایش دبی جرمی، سرعت هوای ورودی، در فاز رقیق باید تا جایی که ظرفیت دستگاه را تحت تأثیر قرار ندهد، کاهش یابد.

شبیه‌سازی مسیر حرکت ذرات در طول مسیر انتقال در حالت توده‌ای نشان داد که با افزایش سرعت جریان هوای کمکی و در پی آن کاهش افت فشار، در لوله ۱۰۴ میلی‌متری، تبدیل فاز از رقیق به غلیظ صورت گرفته است.

یکنواخت شده است. این عامل باعث کاهش نرخ تغییرات سرعت و در واقع شتاب اعمال شده به دانه‌ها می‌شود. نمودار مقایسه تغییرات افت فشار در طول مرکز لوله‌های انتقال مواد در حالت‌های مختلف هوای کمکی در فاز رقیق در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان می‌دهد که در فاز رقیق، میانگین تغییرات افت فشار در حالت ورود هوای کمکی با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه،  $۷/۵۹\%$  درصد کمتر از حالت بدون هوای کمکی کاهش داشته است. با افزایش سرعت هوای کمکی ضمن کاهش مقدار افت فشار، نمودار نیز در هر مرحله نسبت به حالت قبلی یکنواخت‌تر می‌شود. توزیع یکنواخت افت فشار در مسیر حرکت ذرات باعث می‌شود تا ذرات تحت تنش‌های کمتری قرار گیرند.



شکل ۱۵- تغییرات افت فشار در مرکز لوله‌های انتقال برای سرعت‌های مختلف هوای کمکی در فاز رقیق

تغییر مسیر توده دانه‌ها در افت فشارهای مختلف در فاز رقیق در شکل ۱۶ نشان داده شده است. شبیه‌سازی مسیر مواد در طول لوله‌های انتقال نشان داد که در سرعت‌های هوای ورودی بالا، حرکت توده مواد به صورت ذرات کاملاً معلق و یکنواخت در تمام سطح مقطع لوله است و جریان مواد در فاز رقیق صورت می‌گیرد.



در مقطع واگرا، تغییرات سرعت ذرات کاهش می‌یابد و ذرات در طول مسیر تا انتها دارای یکنواختی سرعت بهتری می‌شوند.  
با توجه به اثر مقطع واگرا در دستگاه انتقال نیوماتیکی مواد و کاهش توان مصرفی دستگاه، هزینه انرژی مصرفی کاهش می‌یابد.

#### منابع

- Cowell, A., & McGlinchey, D. (2005). Solids deposition in low-velocity slug flow pneumatic conveying. *Chemical Engineering and Processing*, 44: 167-173.
- Ghafori, H., Hemmat, A., Borghae, A. M., & Minaei, S. (2011). Physical properties and conveying characteristics of corn and barley seeds using a suction-type pneumatic conveying system. *African Journal of Agricultural Research*, 6(27): 5972-5977.
- Guner, M. (2007). Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. *Journal of Food Engineering*, 80: 904-913.
- Guner, M., Dursun, E., & Dursun, L. (2003). Mechanical behavior of hazelnut under compression loading. *Biosystems Engineering*, 85(4): 485-491.
- Lain, S., Broder, D., & Sommerfeld, M. (1999). Experimental and Numerical Studies of the Hydrodynamics in a bubble Column. *Chemical Engineering Science*, 54: 4913-4920.
- Mills, D. (2004). *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*. Scitech Book News. UK.
- Nasr, H., & Ahmadi, G. (2007). The Effect of Two-Way Coupling and Inter particle Collisions on Turbulence Modulation in a vertical channel flow. *Journal of Heat and Fluid Flow*, 28: 1507-1517.
- Sommerfeld, M., & Kussin, J. (2004). Wall roughness effects on pneumatic conveying of spherical particles in a narrow horizontal channel. *Powder Technology*, 142: 180-192.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2<sup>nd</sup> edition). Prentice Hall: 520 p.
- Zhang, Ch., McGlinchey, Y., Wei, L., & Guan, Sh. (2010). Experimental and numerical study on power consumption in a double-tube-socket pneumatic conveying system. *Powder Technology*, 204: 268-272.

## Research paper

# Experimental and simulation study of pipeline with a divergent cross-section in the pneumatic conveyor of barley seeds

H. Ghafari<sup>1\*</sup>

## Abstract

Material handling systems are widely used in different sections of industry and agriculture. Pneumatic conveyors are methods of conveying granular and powdered materials that use airflow to transfer materials from one point to another. Particle conveying pattern and energy consumption of such conveyors are the parameters affecting the operation of this type of conveyor. In this study, to investigate the material conveying pattern and optimization of energy consumption, a divergent cross-section mechanism was designed and developed in the conveying pipeline. Its effect on barley grain conveying in a pneumatic conveying system was investigated experimentally numerically. Fluent software was used to solve the two-phase flow equations such as continuity and momentum, and for experimental evaluation, a factorial experiment in the form of a randomized complete block design with three replications was used. Duncan's test was conducted to compare the means of the treatments. The results of experiments and simulations of pipelines with divergent cross-sections indicate that the average inlet air velocity, the average pressure drop, and the average power consumption of the device in the dense phase in the auxiliary air mode were 8.6%, 6.67%, and 1.23% less than those obtained in no auxiliary air mode, and in the dilute phase in the auxiliary air mode were 3.56%, 4.66% and 5.21% less than the corresponding values in no auxiliary air mode, respectively. Also, the inlet of auxiliary air at a velocity higher than the inlet air of the environment increased the mass flow rate of the conveying particles by 17.3%. The particle velocity variation decreased in the divergent section, and the particle velocity became more uniform along the conveying path.

**Keywords:** Barley seeds, Divergent cross section, Optimization of energy consumption, Pneumatic conveyor.

**Citation:** Ghafari H. 2022. Experimental and simulation study of pipeline with a divergent cross-section in the pneumatic conveyor of barley seeds. Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery. 22: ??-??.

---

1- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Majlesi Branch, Islamic Azad University, Isfahan. Iran.

\* Corresponding Author: [hasangh28@gmail.com](mailto:hasangh28@gmail.com)

Received: 2020/08/10

Accepted: 2021/10/28