

## طراحی، ساخت، و ارزیابی نقاله نیوماتیکی دانه کلزا در فاز رقیق

عبداله ایمان مهر، برات قبادیان، سعید مینایی و محمدهادی خوش تقاضا\*

\* به ترتیب دانشجوی سابق دکتری دانشگاه تربیت مدرس؛ و دانشیاران دانشگاه تربیت مدرس، نشانی: تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ص. پ. ۴۸۳۸-۴۱۵۵، تلفن: ۴-۴۴۱۹۴۹۱۱ (۰۲۱)، پیام‌نگار: ghabadib@modares.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۴/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۶/۳۱

### چکیده

نقاله‌ای نیوماتیکی افقی دانه کلزا با دبی جرمی ۹۰ کیلوگرم در ساعت در لوله‌ای به قطر داخلی ۵۸ میلی‌متر طراحی و ساخته شد. برای این منظور ابتدا برخی خواص فیزیکی و آیرودینامیکی دانه کلزا، مورد نیاز در طراحی دستگاه، اندازه‌گیری شد. مهم‌ترین بخش در طراحی نقاله نیوماتیک، محاسبه افت فشار سیستم است که دو بخش را شامل می‌شود: افت فشار هوا و افت فشار مواد. پس از محاسبه حداکثر افت فشار سیستم، ساخت نقاله با انتخاب یک دمنده سانتریفیوژ مناسب، ساخت تغذیه‌کننده دورانی و مکانیزم انتقال قدرت آن، ایجاد ایستگاه اندازه‌گیری افت فشار، ترکیب اجزا و ساخت شاسی، تکمیل شد. سرعت ته‌نشینی دانه‌ها در عمل ۱۱/۴۷ متر بر ثانیه به دست آمد که بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده در رابطه تئوری بود. در آزمایش‌ها با تغییر سرعت ورودی هوای دمنده در ۵ سطح (۱۳/۰۳، ۱۴/۱۱، ۱۴/۸۳، ۱۵/۱۸، ۱۵/۲۹ متر بر ثانیه)، میزان جریان جرمی دانه‌ها در ۳ سطح (۵۰، ۷۰ و ۹۰ کیلوگرم بر ساعت)، و طول لوله انتقال در دو سطح (۲ و ۴ متر)، افت فشار افقی سیستم با کمک لوله پیتو و مانومتر مورب اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب تأثیر پارامترهای فوق بررسی و مدل رگرسیونی از افت فشار افقی سیستم بر حسب پارامترهای متغیر ارائه شد.

### واژه‌های کلیدی

افت فشار، دانه کلزا، طراحی و ساخت، نقاله نیوماتیکی

### مقدمه

هنگام تحقیقات آزمایشی به دست می‌آید (Sommerfeld & Kussin, 2004). تعداد زیادی از محصولات را می‌توان به صورت نیوماتیکی انتقال داد؛ انتخاب سیستم‌های انتقال به مهارت کاربر و میزان تجربه او بستگی دارد. از میان فازهای انتقال، فاز رقیق مکشی جهت انتقال مواد چندان مؤثر نیست ولی فاز رقیق فشاری برای کاربردهای معمولی در سرعت بالا قابلیت خوبی دارد (Huggett, 1999). انتقال نیوماتیکی به صورت رقیق در انتقال مواد دانه‌ای نقشی مهم دارد، به خصوص اگر استفاده از روش انتقال متراکم ایده‌آل نباشد مانند هنگامی که خطوط انتقال نسبتاً کوتاه یا ماده چسبنده است (Eskin, 2005). در تعیین افت فشار در جریان دو فازی

انتقال نیوماتیکی به طور گسترده در زمینه‌های صنعتی جهت جابه‌جایی پودر در فرایند تولید و در رژیم‌های انتقالی مختلف، بسته به کاربردها به صورت فاز رقیق و غلیظ معمول است. رژیم جریان، با سرعت ظاهری گاز و نسبت جرمی مواد تعیین می‌شود. در انتقال نیوماتیکی فاز رقیق، پارامترهای زیادی بر ویژگی‌های انتقال تأثیرگذار هستند، مانند سرعت ظاهری گاز، قطر لوله، ابعاد کانال، اندازه ذره، توزیع اندازه، شکل ذره، نسبت جرمی ماده، و سختی دیواره. متعاقب این پیچیدگی‌ها، سیستم‌های انتقال نیوماتیک اصولاً بر اساس روابط تجربی (مانند رژیم انتقالی و افت فشار) طراحی می‌شوند که به



انتقال نیوماتیکی دانه کلزا (که محصولی استراتژیک است) می‌تواند نقش مؤثری در خودکفائی کشور در زمینه تولید دانه‌های روغنی داشته باشد و همین موضوع مبنای این تحقیق بوده است که در زیر درباره آن بحث می‌شود.

### مواد و روش‌ها

#### اطلاعات پایه

طراحی سیستم انتقال نیوماتیکی نیازمند یک سری اطلاعات پایه از جریان هوا در لوله‌ها و مجراهاست. چگالی هوا در شرایط استاندارد برابر با ۱/۲۹۳ کیلوگرم بر متر مکعب است. با تغییر دما و فشار اتمسفر، چگالی هوا تغییر می‌کند. طبق نوشته مارکوس و همکاران (Marcus *et al.*, 1990) چگالی هوا برابر است با:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (1)$$

که در آن،  $\rho$  = چگالی هوا (بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب)؛  $P$  = فشار (بر حسب پاسکال)؛  $R$  = ثابت گازها (بر حسب کیلوژول بر کیلوگرم درجه کلونین)؛ و  $T$  = دمای هوا (بر حسب کلونین) است.

بدین ترتیب، با داشتن فشار هوا و دمای محل آزمایش می‌توان چگالی هوای آزمایش را به دست آورد. ویسکوزیته در گازها با دما افزایش می‌یابد، بنابراین روش مناسب برای محاسبه ویسکوزیته دینامیکی هوا استفاده از رابطه زیر است (Marcus *et al.*, 1990):

$$\frac{\mu_1}{\mu_0} = \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^{0.75} \quad (2)$$

که در آن،  $\mu_1$  = ویسکوزیته هوا در دمای آزمایش (بر حسب نیوتن ثانیه بر متر مربع)؛  $\mu_0$  = ویسکوزیته هوا در

انتقال نیوماتیکی، اطلاعات آزمایشی زیادی برای پوشش گسترده هر یک از پارامترهای مربوطه جهت رسیدن به نتیجه‌ای عمومی لازم است. رفتار اصطکاکی جریان و افت فشار جریان دو فازی عموماً بر پایه برخی روش‌های پیشگویی آنالیز می‌شود و بعداً صحت و سقم آن با نتایج آزمایشی بررسی می‌شود (Carpinioglu *et al.*, 2002).

نقاله نیوماتیکی دستگاهی چندمنظوره است. این وسیله می‌تواند برای پرکردن و تخلیه مخازن کامیون‌ها یا در ماشین‌های تمیزکننده دانه، کارنده‌ها، و جاهایی که تمیزکردن آنها به طور معمول مشکل است به کار برده شود، با این حال این نقاله به توان بالایی نیاز دارد و نسبت به سایر نقاله‌ها صدای بیشتری ایجاد می‌کند (Misra, 1997). آزمایش‌های انتقال نیوماتیکی افقی دانه‌های برنج، برنج آسیاب‌شده، و سویا نشان می‌دهد که گرادیان افت فشار نهایی تابعی از سرعت هوا، نسبت جرم مواد به جرم هوای جابه‌جاشده در واحد زمان، قطر ذره، و قطر لوله است. گرادیان‌های افت فشار کلی با جمع کردن سهم هر یک از بخش‌های ویژه افت فشار مربوط به هوا و مواد جداگانه به دست آمد (Rraheman & Jindal, 2001). طراحی سیستم انتقال فاز رقیق شامل انتخاب مناسب اندازه قطر و طول لوله‌ها و تعیین سرعت گاز جهت اطمینان از جریان مواد در فاز رقیق، محاسبه افت فشار خط لوله، و انتخاب تجهیزات مناسب برای جریان دادن گاز و جداسازی مواد از گاز در انتهای سیستم است. به رغم اینکه دانه‌های گیاهی در ماشین‌هایی نظیر کارنده‌های نیوماتیک، کمباین‌ها، و ماشین‌های تمیزکننده به طریق نیوماتیک منتقل می‌شوند در زمینه انتقال نیوماتیکی دانه‌های روغنی (به ویژه کلزا) در فاز رقیق تاکنون گزارشی ارائه نشده است. ارائه اصول و روش طراحی، ساخت دستگاه، و ارزیابی

تر) اندازه‌گیری شد زیرا بر اساس ارتباط بین میزان رطوبت و شکنندگی دانه‌ها پیشنهاد می‌شود که جهت انتقال مطمئن دانه‌های کلزا سطح رطوبت ۸-۶ درصد انتخاب شود (Salunkhe et al., 1992). مهم‌ترین ویژگی آیرودینامیکی لازم در طراحی هر سیستم نیوماتیکی، سرعت حد و ضریب کشش مواد است (Mohsenin, 1970)؛ این دو، به خواص سیال (سرعت، ویسکوزیته، و چگالی) و خصوصیات فیزیکی دانه‌ها (جرم، ابعاد، شکل، و چگالی) بستگی دارند. برای طراحی خواص آیرودینامیکی دانه‌های کلزا، وارپته لیکورد اندازه‌گیری شد که نتایج اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد و در سطح دریا (بر حسب نیوتن ثانیه بر متر مربع)؛  $T_1 =$  دمای محیط آزمایش (بر حسب کلوین)؛ و  $T_0 =$  دمای ۲۸۸/۱۶ درجه کلوین است.

### خواص فیزیکی و آیرودینامیکی دانه کلزا

دانستن خصوصیات فیزیکی دانه‌های کلزا برای طراحی ادواتی لازم است که در انتقال، جابه‌جایی، فراوری، و ذخیره این محصول به کار می‌روند. در این مطالعه برخی خواص فیزیکی دانه کلزا شامل، ابعاد محوری، قطر متوسط هندسی، سطح، سطح مقطع، حجم، کرویت، و شاخص شکل دانه‌ها در سطح رطوبتی ۴/۶ درصد (بر پایه

جدول ۱- خواص فیزیکی دانه‌های کلزا (وارپته لیکورد)

واحد	اندازه	خواص فیزیکی
کیلوگرم	۰/۰۰۴۳	جرم هزار دانه
کیلوگرم بر متر مکعب	۵۸۳	چگالی حجمی (آزاد)
کیلوگرم بر متر مکعب	۱۱۲۱	چگالی دانه
میلی‌متر	۱/۹۹۷	قطر هندسی دانه
میلی‌متر	۱/۹۳	قطر معادل دانه
میلی‌متر مربع	۳/۱۳۲	سطح مقطع دانه
میلی‌متر مربع	۱۲/۵۲	سطح دانه
میلی‌متر مکعب	۳/۷۸۷	حجم دانه
درصد	۹۳	ضریب کرویت
درصد	۹۱	شاخص شکل

$$v_t = 1.74 \left( \frac{d_p (\rho_p - \rho) g}{\rho} \right)^{0.5} \quad (3)$$

که در آن،  $v_t =$  سرعت حد (بر حسب متر بر ثانیه)؛  $d_p =$  قطر متوسط دانه (بر حسب متر)؛  $\rho_p =$  چگالی دانه (بر

سرعت حد یک دانه تنها را می‌توان با برابر گرفتن نیروهای کششی و شناوری با نیروی ثقلی تخمین زد. بنابراین سرعت حد در جریان کاملاً آشفته از رابطه ۳ به‌دست می‌آید (Marcus et al., 1990):

که در آن،  $v_{salt}$  = سرعت ته‌نشینی (بر حسب متر بر ثانیه)؛  $M_s$  = مقدار جرم ماده در حین انتقال (بر حسب کیلوگرم بر ثانیه)؛ و  $D$  = قطر داخلی لوله (بر حسب متر)؛  $\alpha = 1.96 + 1440d_p$  و  $\beta = 2.5 + 1100d_p$  است.

### افت فشار انتقال افقی

افت فشار انتقال شامل مجموع افت فشار مورد نیاز برای هوا به تنهایی ( $\Delta p_L$ )، افت فشار شتاب مواد ( $\Delta p_A$ )، افت فشار اصطکاک و برخورد مواد ( $\Delta p_z^*$ )، افت فشار ناشی از بلندکردن و تعلیق مواد ( $\Delta p_G$ )، و افت فشار زانویی‌ها ( $\Delta p_B$ ) می‌شود (Marcus et al., 1990):

$$\Delta p_{transport} = \Delta p_L + \Delta p_A + \Delta p_z^* + \Delta p_G + \Delta p_B \quad (۶)$$

$$= \Delta p_L + \Delta p_A + \Delta p_{z(horizontal)} + \Delta p_B$$

### افت فشار هوا

افت فشار در لوله یا افت فشار خط فقط ناشی از جریان هوا در لوله‌های انتقال است. افت فشار هوا از رابطه ۷ به دست می‌آید (Marcus et al., 1990):

$$\Delta p_L = \lambda_L \frac{\rho}{2} v_a^2 \frac{L}{D} \quad (۷)$$

که در آن،  $\Delta p_A$  = افت فشار هوا (بر حسب پاسکال)؛  $\lambda_L$  = ضریب مقاومت هوا؛  $v_a$  = سرعت هوا (بر حسب متر بر ثانیه)؛  $L$  = طول انتقال (بر حسب متر) است.

ضریب مقاومت هوا ( $\lambda_L$ ) بستگی به جریان گاز دارد و تابعی از عدد رینولدز است و می‌توان آن را به کمک معادلهٔ بلازیوس به دست آورد (Marcus et al., 1990):

حساب کیلوگرم بر متر مکعب)؛  $g$  = شتاب ثقل (بر حسب متر بر مجذور ثانیه) است.

در انتقال نیوماتیکی با جریان کاملاً آشفته روبه‌رو هستیم ( $2 \times 10^5 < Re_p < 500$ ) بنابراین ضریب کشش دانه‌ها برابر با ۰/۴۴ است (Marcus et al., 1990)؛ در این عبارت،  $Re_p$  عدد رینولدز دانه است.

معمولاً نیروی کشش ( $F_D$ ) ذره کروی را با فرض اینکه سرعت نسبی ذره برابر با سرعت حد ذره باشد می‌توان بر حسب قطر آن چنین نوشت (Marcus et al., 1990):

$$F_D = C_D \frac{\rho}{2} v_r^2 \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (۴)$$

که در آن،  $F_D$  = نیروی کشش (بر حسب نیوتن)؛  $C_D$  = ضریب کشش؛ و  $v_r$  = سرعت نسبی دانه برابر با سرعت حد دانه (بر حسب متر بر ثانیه) است.

### تعیین سرعت هوای ورودی

در انتقال نیوماتیکی فاز رقیق افقی یا عمودی (با نسبت تراکم مواد به هوا کمتر از ۱۵)، مطلوب آن است که عملیات انتقال در پایین‌ترین سرعت ممکن انجام گیرد تا افت فشار به حداقل برسد و سایدگی و هزینه‌های اجرایی کاهش یابد. در نظر داشته باشید به دلیل نامعین بودن روابط جهت پیشگویی سرعت ته‌نشینی، باید سرعت گاز را در عمل ۵۰ درصد بیشتر پیشنهاد کرد. روابط زیادی برای پیشگویی سرعت ته‌نشینی در منابع مختلف وجود دارد. رابطهٔ ریک بر اساس یک روش نیمه تجربی بصورت زیر ارائه شده است (Rhodes, 2001):

$$v_{salt} = \left[ \frac{4M_s 10^\alpha g^{\frac{\beta}{2}} D^{\left(\frac{\beta-2}{2}\right)}}{\pi \rho} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (۵)$$

طراحی، ساخت، و ارزیابی نقاله نیوماتیکی دانه کلزا ...

که در آن،  $\Delta p_z^* = \Delta p_z^*$  افت فشار اصطکاکی مواد (بر حسب پاسکال)،  $\lambda_z^* = \lambda_z^*$  ضریب اصطکاکی مواد؛  $\varepsilon = \varepsilon$  تخلخل مواد در حال انتقال است.

به منظور تعیین ضریب اصطکاک جامدات در انتقال افقی، از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود (Marcus et al., 1990):

$$\lambda_z^* = 0.114(gD)^{0.5} / v_s \quad (12)$$

مقدار تخلخل برابر است با:

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{A\rho_p v_s} \quad (13)$$

که  $\rho_s = \rho_s$  چگالی ظاهری مواد در حین انتقال است و از رابطه ۱۴ حاصل می‌شود (Marcus et al., 1990):

$$\rho_s = (1 - \varepsilon)\rho_p \quad (14)$$

#### افت فشار بلندکردن و تعلیق مواد

در سیستم انتقال افقی، افت فشار ناشی از معلق نگاه داشتن ذرات برابر است با رابطه ۱۵ (Marcus et al., 1990):

$$\Delta p_G / \Delta L = \rho_s g \frac{v_t}{v_a} \quad (15)$$

و افت فشار ثقلی هوا برابر است با:

$$\Delta p_{Ga} / \Delta L = \rho_a \varepsilon g \quad (16)$$

$$\lambda_z = 0.316 / (\text{Re})^{0.25} \quad (8)$$

که در این معادله،  $\text{Re} = \text{Re}$  عدد رینولدز است.

#### افت فشار شتاب مواد

مواد جامد باید تا آنجا که ممکن است در سرعت انتقال حداقل، سریعاً شتاب بگیرند. این افت تنها در یک نقطه ورودی مواد در یک سیستم مکشی یا فشاری اتفاق می‌افتد. این افت فشار از رابطه ۹ به دست می‌آید (Neidigh, 2003):

$$\Delta p_A = r v_a \rho v_s \quad (9)$$

که در آن،  $r = r$  نسبت جرمی دانه‌ها به هوا و  $v_s = v_s$  سرعت متوسط ذره (بر حسب متر بر ثانیه) است. نسبت جرمی مواد به هوا برابر است با:

$$r = \frac{M_s}{M_a} = \frac{M_s}{\rho A v_a} \quad (10)$$

که در آن،  $A = A$  سطح مقطع لوله (بر حسب متر مربع)؛  $M_s = M_s$  مقدار جرم ماده در حین انتقال (بر حسب کیلوگرم بر ثانیه)؛ و  $M_a = M_a$  مقدار جرم هوا در حین انتقال (بر حسب کیلوگرم بر ثانیه) است.

#### افت فشار اصطکاکی مواد

این افت ناشی از برخورد ذرات جامد با یکدیگر و اصطکاک آنها با جدار لوله‌هاست. رابطه ۱۱ را برای تخمین این افت می‌توان به کار برد (Marcus et al., 1990):

$$\Delta p_z^* = \frac{\lambda_z^* \rho_p (1 - \varepsilon) v_s^2 L}{2D} \quad (11)$$

## افت فشار زانویی

(بر حسب متر مکعب بر ثانیه)؛  $\gamma =$  وزن واحد حجم هوا (بر حسب نیوتن بر متر مکعب)؛ و  $H =$  ارتفاع معادل فشار دمنده (بر حسب متر) است. معادله انرژی را بین ورودی و خروجی پروانه دمنده می‌توان از رابطه ۱۹ نوشت:

$$H + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} \quad (19)$$

$H$ ، معرف انرژی است که دمنده به واحد وزن هوا می‌دهد یا به تعبیری ارتفاع معادل فشار دمنده است.

## تغذیه مواد به جریان هوا

شاید پرکاربردترین وسایل تغذیه در انتقال نیوماتیک، تغذیه‌گرهای دورانی (شیرهای دورانی هوا بند) باشد و از اسم آن پیداست که هر دو کار، یعنی آب‌بندی فشار و تغذیه مواد را با هم انجام می‌دهد. ساختار این وسیله بر پایه یک محور دوار و محفظه ساکن بنا شده است. محور، شامل بخش‌های مساوی و مجزائی است که از طریق یک مجرای باز محفظه، مواد را از بالا دریافت می‌کند و به جریان هوا در مجرای پایین محفظه انتقال می‌دهد. محفظه به گونه‌ای ساخته شده است که بتواند فرم خروجی مخزن مواد و همچنین فرم ورودی قطعه انتقالی مرتبط با شیر دورانی را جهت اتصال به خود بگیرد. برای تغذیه‌کننده دورانی، طرحی مطابق شکل ۱ ارائه و پیشنهاد شد که یک قسمت پیش تغذیه شفاف بین مخزن و تغذیه‌کننده در نظر گرفته شود تا کنترل دقیق ریزش دانه از مخزن به واحد تغذیه‌کننده و مشاهده نحوه حرکت دانه‌ها ممکن شود.

زانویی‌ها افت فشار را در خط انتقال افزایش می‌دهند و نیز نقاطی هستند که در آنها بیشترین فرسایش و ساییدگی دانه رخ می‌دهد. افت فشار زانویی از رابطه ۱۷ به دست می‌آید (Marcus et al., 1990):

$$\frac{\Delta p_B}{(\Delta p_z)_{bend}} = 210 \left( \frac{2R_B}{D} \right)^{-1.15} \quad (17)$$

که در آن،  $R_B =$  شعاع زانویی است؛ و  $(\Delta p_z)_{bend} =$  افت فشار بخش مواد زانویی است که با به دست آوردن طول معادل زانویی و داشتن افت فشار مواد جامد تعیین می‌شود.

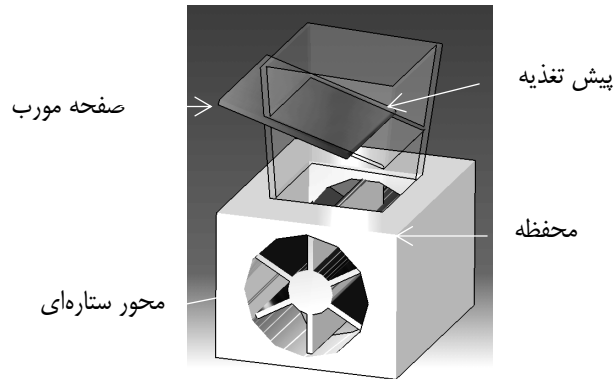
## ساخت نقاله

## انتخاب دمنده

قلب نقاله نیوماتیکی، وسیله‌ای است که وظیفه تولید جریان هوا و غلبه بر افت‌های فشاری را بر عهده دارد. توان مکانیکی دمنده از حاصل ضرب گشتاور و سرعت زاویه‌ای پروانه به دست می‌آید. در این دمنده، توانی که سیال از ماشین می‌گیرد به صورت  $\gamma QH$  بیان می‌شود.  $H$  معرف انرژی واحد وزن سیال و  $\gamma Q$  معرف وزن سیال عبوری در واحد زمان و حاصل ضرب آنها معرف انرژی سیال در واحد زمان (توان) است. با صرف نظر کردن از تلفات، توان مکانیکی مصرفی پمپ با توان تولیدی آن برابر است و از این رو می‌توان نوشت (Entezari, 1999):

$$P = T' \omega = Q \gamma H \quad (18)$$

که در آن،  $P =$  توان (بر حسب نیوتن متر بر ثانیه)؛  $T' =$  گشتاور (بر حسب نیوتن متر)؛  $\omega =$  سرعت زاویه پروانه دمنده (بر حسب دور بر دقیقه)؛  $Q =$  دبی حجمی دمنده



شکل ۱- طرح تغذیه‌کننده دورانی و قسمت پیش تغذیه آن

## مخزن دانه

و با تسمه لاستیکی آزمایش شد. برای کنترل کشش تسمه از پولی هرزگرد استفاده شد. برای جمع‌آوری دانه-ها، در انتهای مسیر انتقال یک ظرف استوانه‌ای با دربی قرار گرفت که با تورهای مشبک پوشیده است، بود.

در آزمایش‌ها، دانه‌های جابه‌جاشده دستی به مخزن انتقال داده می‌شد و از این رو نیاز به ساخت مخزن بزرگ نبود اما در اینجا با ورق استیل، مخزنی مخروطی به ظرفیت تقریبی ۸ کیلوگرم ساخته شد و برای جلوگیری از تجمع دانه‌ها که نتیجه آن عدم جریان‌پذیری در حین انتقال است، شیب دیواره‌های مخزن دو برابر زاویه استقرار دانه‌ها در نظر گرفته شد که در عمل ۲۷ درجه به دست آمد.

## لوله پیتو همراه با مانومتر مورب

برای اندازه‌گیری سرعت هوای در حال جریان و اندازه‌گیری افت فشار از ترکیب لوله پیتو استاندارد و مانومتر مورب استفاده شد. لوله پیتو، رو به جریان سیال قرار داده شد. این لوله دو جداره است، لوله مرکزی فشار کلی سیال و لوله جداره فشار استاتیکی سیال را به مانومتر منتقل می‌کند. با متصل کردن دو شاخه انتهایی پیتو به دو سر مانومتر حساس، اختلاف فشارها اندازه‌گیری شد. اختلاف دو فشار فوق، صرف نظر از اینکه فشار استاتیک داخل کانال بالاتر یا پایین‌تر از فشار اتمسفر باشد، برابر با فشار سرعت است که مستقیماً با سرعت سیال در ارتباط است. دو عدد لوله پیتو استاندارد به قطر خارجی ۶ میلی‌متر ساخته شد. رابطه پیشنهادی برای

## موتور و مکانیزم انتقال قدرت

برای دوران محور ستاره‌ای تغذیه‌کننده، از موتور گیربکس ۹۰ وات استفاده شد که با جریان متناوب برق با فرکانس ۵۰ هرتز، ۱۳۶۰ دور بر دقیقه سرعت دارد. دور موتور با یک گیربکس به ۱۹۸ بر دقیقه کاهش یافت. توان موتور از طریق تسمه و پولی به محور چرخ ستاره‌ای منتقل شد برای تغییر دور محور تغذیه‌کننده، پولی‌هایی با قطرهای ۴۰ و ۸۰ میلی‌متر از پلی‌اتیلن و آلومینیم ساخته

محاسبه سرعت متوسط با استفاده از فشارهای سرعت  $(p_v)$  این گونه است (Yosefi, 1996):

$$v_a = 1.291 \sqrt{(1000/B \times T/289) \times \frac{100000}{(100000 + p_s)} \times p_v} \quad (20)$$

که در آن،  $B$  = فشار بارومتريک (بر حسب میلی بار)؛  $p_s$  = فشار استاتیکی (بر حسب پاسکال)؛ و  $p_v$  = فشار سرعت (بر حسب پاسکال) است.

## نتایج و بحث

با انتخاب لوله های PVC استاندارد با قطر خارجی ۶۳

میلی متر و قطر داخلی ۵۸ میلی متر و در نظر گرفتن حداکثر دبی جرمی برابر با ۹۰ کیلوگرم در ساعت (به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی و اقتصادی)، سرعت ته نشینی برای دانه های کلزا تعیین شد. در جدول ۲ مشاهده می شود که سرعت ته نشینی نزدیک به سرعت حد است. با حدود اطمینان قابل قبولی سرعت هوای ورودی دو برابر سرعت ته نشینی دانه ها، یعنی برابر با ۱۵/۵ متر بر ثانیه، در نظر گرفته شد تا ضمن حصول اطمینان از جریان در فاز رقیق، حداکثر افت فشار ممکن محاسبه شود و با کاهش سرعت هوای ورودی در عمل، سرعت ته نشینی واقعی به دست آید.

جدول ۲- نتایج محاسبات روابط ریاضی مربوط به طراحی نقاله نیوماتیکی

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار	واحد	شماره رابطه
۱	چگالی هوا	$\rho$	۱/۰۴۶	کیلوگرم بر متر مکعب	(۱)
۲	ویسکوزیته هوا	$\mu_1$	$1/76 \times 10^{-5}$	نیوتن ثانیه بر متر مکعب	(۲)
۳	سرعت حد	$v_t$	۷/۷۷	متر بر ثانیه	(۳)
۴	نیروی کشش	$F_D$	$3/939 \times 10^{-5}$	نیوتن	(۴)
۵	سرعت ته نشینی	$v_{salt}$	۷/۸۲	متر بر ثانیه	(۵)
۶	افت فشار اصطکاکی هوا	$\Delta p_L$	۲۵۹/۹۲	پاسکال	(۷)
۷	نسبت جرمی	$r$	۰/۵۸	---	(۱۰)
۸	افت فشار شتاب مواد	$\Delta p_A$	۹۷/۷	پاسکال	(۹)
۹	ضریب اصطکاک مواد	$\lambda_z^*$	۰/۰۰۸۲۷	----	(۱۲)
۱۰	تخلخل	$\varepsilon$	۰/۹۹۹	----	(۱۳)
۱۱	چگالی ظاهری مواد	$\rho_s$	۱/۱۲۱	کیلوگرم بر متر مکعب	(۱۴)
۱۲	افت فشار اصطکاکی مواد	$\Delta p_z^*$	۵۱/۷۲	پاسکال	(۱۱)
۱۳	افت فشار تعلیق مواد	$\Delta p_G$	۳۳/۰۶	پاسکال	(۱۵)
۱۴	افت فشار ثقلی هوا	$\Delta p_{Ga}$	۶۱/۵	پاسکال	(۱۶)
۱۵	افت فشار زانویی ۹۰ درجه	$\Delta p_B$	۹۵/۵	پاسکال	(۱۷)
۱۶	توان مصرفی دمنده	$P$	۱۱۸/۸۵	وات	(۱۸)
۱۷	اختلاف فشار دمنده	$\Delta p$	۷۱۸/۹	پاسکال	(۱۹)



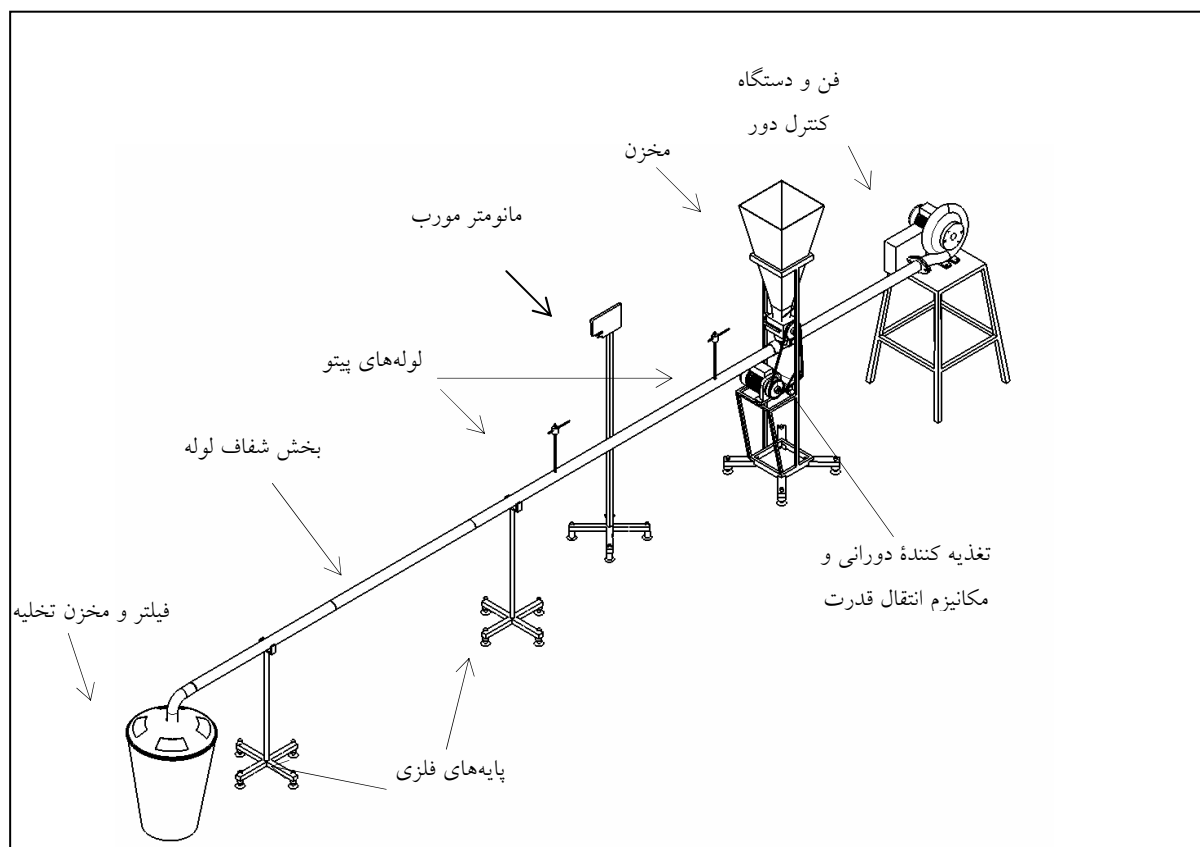
طراحی، ساخت، و ارزیابی نقاله نیوماتیکی دانه کلزا ...

دست آمد. با مقایسه افت فشار به دست آمده برای سیستم (۶۰۰ پاسکال) و افت فشار دمنده (۷۱۸/۹ پاسکال) مطابق جدول ۲، نتیجه گیری می شود که دمنده انتخابی قابلیت استفاده برای رفع نیاز سیستم را داراست. برای تغییر سرعت هوای ورودی دمنده و بررسی تأثیر آن بر انتقال دانه ها در لوله افقی، از اینورتر استفاده شد. با این وسیله، ضمن تبدیل جریان برق تک فاز به ۳ فاز مورد نیاز موتور دمنده، با کاهش یا افزایش فرکانس برق می توان دور دمنده را تغییر داد. برای اندازه گیری فشار از مانومتر مورب با محدوده کار صفر تا ۵۰۰ پاسکال استفاده شد. پس از ترکیب اجزاء، در نهایت سیستمی مطابق شکل ۲ به دست آمد. نمودار افت فشار کل در شکل ۳ نشان داده شده است.

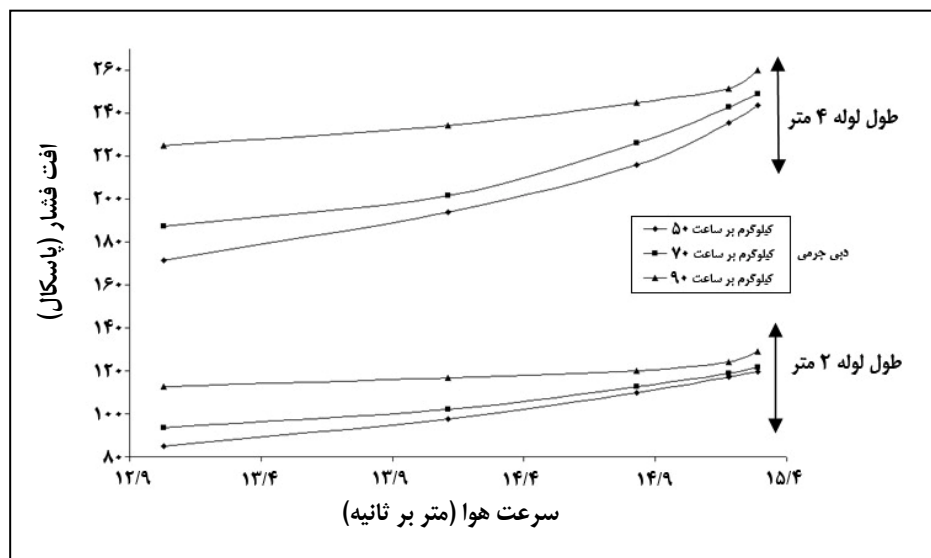
کل افت فشار سیستمی به طول ۶ متر با استفاده از یافته های جدول ۲ برابر است با:

$$\Delta p_{transport} = \Delta p_L + \Delta p_A + (\Delta p_z^* + \Delta p_G)_{horizontal} + \Delta p_B = 599.4 \approx 600 \text{ pa}$$

با توجه به مزایای دمنده های سانتریفیوژ، یک دمنده سانتریفیوژ با تیغه های خمیده به سمت عقب انتخاب شد توان این دمنده با یک گیربکس از طریق یک موتور الکتریکی تامین شد. دور موتور در فرکانس ۵۰ هرتز برابر با ۲۷۱۰ بر دقیقه است که با استفاده از یک گیربکس به ۲/۶۴ برابر افزایش و به چرخ پره دمنده انتقال داده شد. افت فشار دمنده با در نظر گرفتن راندمان ۶۸ درصد به



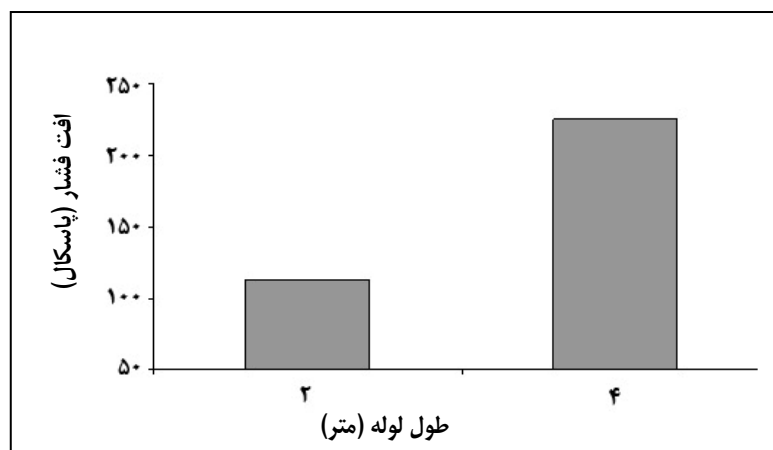
شکل ۲- نمای شماتیک نقاله نیوماتیکی افقی دانه کلزا



شکل ۳- نمودار افت فشار کل در سطوح مختلف سرعت هوا، دبی جرمی، و طول لوله

جریان جرمی دانه‌ها در ۳ سطح (۵۰، ۷۰، و ۹۰ کیلوگرم بر ثانیه) و طول لوله انتقال در دو سطح (۲ و ۴ متر)، میزان افت فشار سیستم با لوله پیتو و مانومتر مورب اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده، افت فشار با دو برابر شدن طول لوله، ۲ برابر شده است (شکل ۴) که دلیل آن افزایش سطح تماس هوای در حال جریان و دانه‌ها با سطح بیشتری از جدار لوله و در نتیجه افزایش افت فشار اصطکاکی است.

با تغییر سرعت هوای ورودی دمنده در دبی جرمی ۹۰ کیلوگرم در ساعت، سرعت هوا به حدی کاهش داده شد تا دانه‌ها در آستانه ته‌نشینی قرار گیرند و بدین ترتیب سرعت ته‌نشینی دانه‌ها در عمل ۱۱/۴۷ متر بر ثانیه به دست آمد که در مقایسه با مقدار تئوری به دست آمده (۷/۸۲ متر بر ثانیه)، ۴۶ درصد بیشتر است. در ادامه آزمایش‌ها، با تغییر سرعت ورودی هوای دمنده در ۵ سطح (۱۳/۰۳، ۱۴/۱۱، ۱۴/۸۳، و ۱۵/۲۹ متر بر ثانیه) میزان



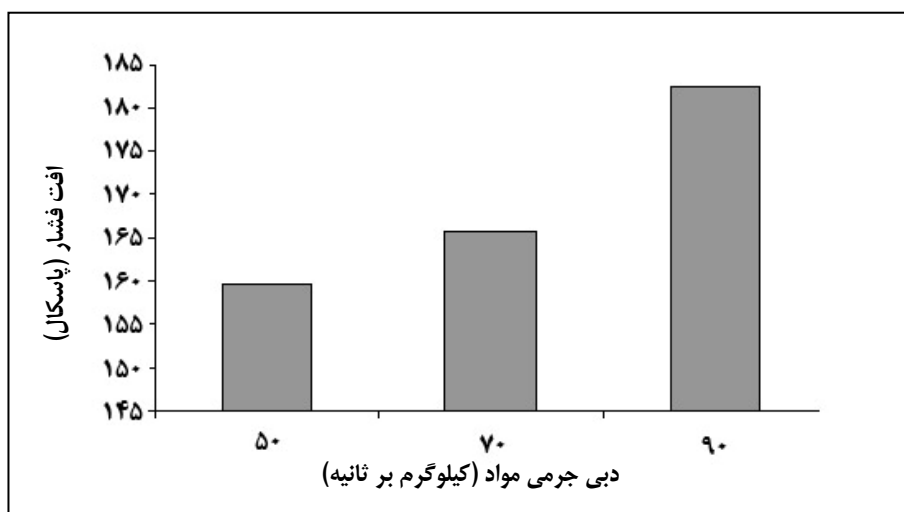
شکل ۴- نمودار تغییرات افت فشار در دو سطح طول لوله انتقال

طراحی، ساخت، و ارزیابی نقاله نیوماتیکی دانه کلزا ...

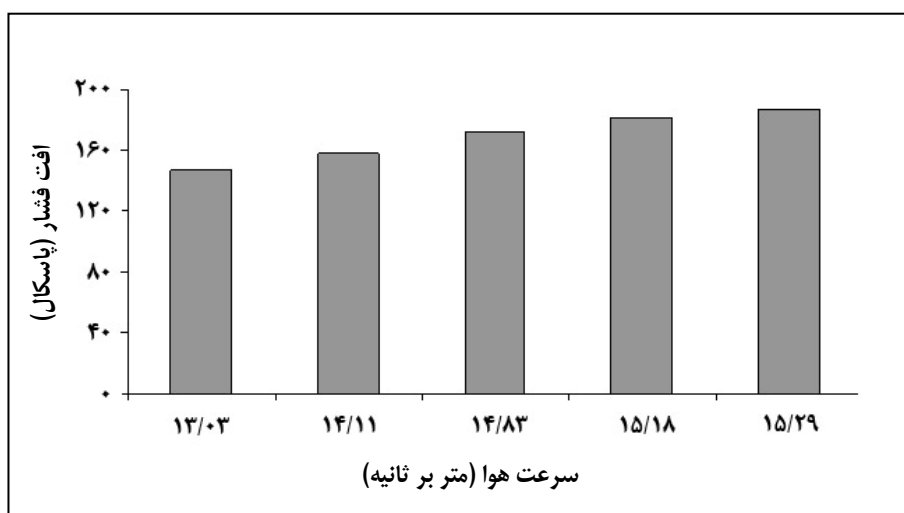
با افزایش دبی جرمی دانه‌ها، به دلیل افزایش برخورد دانه‌ها با یکدیگر و با دیواره لوله و نیز افزایش فشار استاتیکی مورد نیاز برای حمل دانه‌ها، افت فشار کل افزایش یافته است. مطابق شکل ۵، با افزایش دبی جرمی از ۵۰ به ۷۰ و از ۷۰ به ۹۰ کیلوگرم در ساعت، افت فشار

به ترتیب حدود ۴ و ۱۴ درصد افزایش یافته است.

با افزایش سرعت هوای ورودی، افت فشار به دلیل افزایش مقاومت اصطکاکی دانه‌ها، افزایش یافته است (شکل ۶).



شکل ۵- نمودار تغییرات افت فشار در سه سطح دبی جرمی دانه‌ها



شکل ۶- نمودار تغییرات افت فشار در پنج سطح سرعت هوای ورودی

سیستم انتقال افقی فاز رقیق را در خصوص دانه‌های کلزا پیشگویی و بر اساس آن توان و فشار دمنده را با حدود اطمینان قابل قبولی تعیین کرد.

### نتیجه‌گیری

طراحی سیستم انتقال فاز رقیق شامل انتخاب مناسب اندازه لوله‌ها و تعیین سرعت گاز ورودی برای اطمینان از ایجاد جریان رقیق، محاسبه افت فشار خط انتقال و انتخاب دمنده مناسب برای حرکت دادن گاز و جداسازی مواد از گاز در انتهای سیستم است. در همه مراحل آزمایش، انتقال مواد در فاز رقیق صورت گرفت و توزیع مواد در مقطع لوله یکنواخت بود. آنالیز واریانس داده‌های به دست آمده نشان داد که تأثیر طول انتقال، دبی جرمی دانه‌ها و سرعت ورودی هوا و اثر متقابل آنها بر افت فشار کل سیستم در سطح اطمینان ۱ درصد معنی‌دار است.

با انجام دادن رگرسیون خطی چندگانه از داده‌های آزمایش، رابطه ۲۱ برای برآورد افت فشار کل، بر حسب فاکتورهای متغیر با اطمینان قابل قبولی در محدوده عدد رینولدز (  $44915 \leq Re \leq 52705$  ) پیشنهاد نمود به دست آمد:

$$\Delta p_{total} = -297 + 57.2(L) + 0.567(M_s) + 17.6(v_a) \quad (21)$$

$$R^2 = 97.4\%$$

همچنین رابطه ۲۲ برای برآورد افت فشار ناشی از هوای تنه‌ها در محدوده عدد رینولدز  $44915 \leq Re \leq 52705$  به دست آمد:

$$\Delta p_{air} = -256 + 29.2(L) + 20.6(v_s) \quad (22)$$

$$R^2 = 98.8\%$$

بدین ترتیب با استفاده از روابط فوق می‌توان افت فشار

### مراجع

- Carpinlioglu, M. O., Ozbelge, T. A. and Oruc, V. 2002. Flow frictional resistance in pneumatic conveying of solid particles through inclined lines. *Powder Technol.* 125, 292-297.
- Entezari, A. 1999. *Fluid Mechanics*. 3<sup>rd</sup> Edition. Norpardazan Pub. Tehran. Iran. (in Farsi)
- Eskin, D. 2005. Modeling dilute gas-particle flows in horizontal channels with different wall roughness. *Chemical Eng. Sci.* 60,655-663.
- Huggett, R. 1999. *Design for throughput*. International Mechanical Eng. Seminar Publication Successful Pneumatic Conveying. Published by Professional Eng. Publishing Limited. London. UK.
- Mohsenin, N. N. 1970. *Properties of Plant and Animal Materials*. Gordon and Breach. USA.
- Marcus, R. D., Leung, L. S., Klinzing, G. E. and Rizk, F. 1990. *Pneumatic Conveying of Solid*. Chapman and Hall Pub. London. UK.

طراحی، ساخت، و ارزیابی نقاله نیوماتیکی دانه کلزا ...

- Misra, M. K. 1997. **Conveyors for bulk handling of seed. Cooperative Extension Service. Iowa State University of Service and Technology. Ames. Iowa.**
- Neidigh, S. 2003. **Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. Available on the: <http://www.Neuero.com>. USA.**
- Rhodes, M. 2001. **Pneumatic transport of powders. Education Resource. for Part. Technol. 014Q-Rhodes. Available on the: <http://www.erpt.org>.**
- Raheman, H. and Jindal, V. K. 2001. **Pressure drop gradient and solid friction factor in horizontal pneumatic conveying of agricultural grains. Applied Eng. Agr. 17(5): 649-656.**
- Salunkhe, D. K., Chavan, J. K., Adsule, R. N. and Kadam, S. S. 1992. **World Oilseeds (Chemistry, Technology and Utilization). Nostrand Reinhold. Pub. N. Y.**
- Sommerfeld, M. and Kussin, J. 2004. **Wall roughness effects on pneumatic conveying of spherical particles in a narrow horizontal channel. Powder Technol. 142,180-192.**
- Yosefi, B. 1996. **Measuring flow velocity of gases in closed channels. B.Sc. Thesis. Mechanical Engineering. Azad University. (in Farsi)**

## **Design, Construction and Evaluation of a Canola Seed Pneumatic Conveyor in the Dilute Phase**

**A. Imanmehr, B. Ghobadian\*, S. Minaei and M. H. Khoshtaghaza**

\* Corresponding Author: Associate Professor, Farm Machinery Department, Tarbiat Modares University, P. O. Box: 14155-4835, Tehran, Iran, E-mail: ghobadib@modares.ac.ir

A canola seed pneumatic conveyor was designed and constructed to convey canola seed at a 90 g/hr mass flow rate through a 58 mm diameter pipe. Physical and aerodynamic properties of the canola seed that are critical to the design process were measured. System pressure drop, comprising air pressure drop and solid pressure drop and which is the most important aspect of pneumatic conveyor design, was calculated. After pressure drop calculation and selection of a suitable centrifugal blower, rotary feeder, power transport mechanism, pressure drop measurement station and frame were constructed. These sections were combined and the conveyor was completed. The ventilation velocity of the seeds was 11.47 m/s practically, which was greater than the value predicted by theoretical equations. The changing internal air velocity of the blower (13.03, 14.11, 14.83, 15.18, 15.29 m/s), the mass flow rate (50, 70, 90 kg/hr) and the length of the transport pipe (2, 4 m) were measured and the horizontal pressure drop of the system was measured using a pitot tube and oblique monometer. The effects of these parameters were evaluated and a regression model of variable parameters for horizontal pressure drop is presented.

**Key Words:** Canola Seed, Construction, Design, Pneumatic Conveyor, Pressure Drop