

بررسی عوامل مؤثر بر افت فشار در انتقال نیوماتیک فاز رقیق عمودی محصول دانه‌ای ذرت

سحر سهرابی^۱، رسول معمار دستجردی^{۲*}، مجید رهنما^۳ و امین لطفی جلال آبادی^۴

چکیده

یکی از مراحل تولید به ویژه در کشاورزی سنتی و نیمه‌مکانیزه، بارگیری و تخلیه‌ی محصول تولیدی از مزرعه تا سیلو است. سیستم انتقال نیوماتیکی یکی از بهترین روش‌ها برای انتقال محصولات کشاورزی محسوب می‌شود. این سیستم با حجم کم مواد دانه‌ای را بدون ایجاد گردوغبار می‌تواند انتقال دهد. در این پژوهش پس از طراحی و ساخت یک نقاله‌ی نیوماتیکی عمودی فاز رقیق برای انتقال بذر ذرت، به منظور بررسی تأثیر طول لوله (۱، ۲ و ۳ متر)، سرعت هوای ورودی (۱۳، ۱۷ و ۲۰ متر بر ثانیه) و دبی جرمی (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در ساعت) بر میزان افت فشار، آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. توان مورد نیاز دستگاه با استفاده از روابط تجربی و پس از محاسبه‌ی افت فشار انتقال محاسبه شد. افت فشار شامل مجموع افت فشار مورد نیاز برای هوا به تنهایی (ΔP_L)، افت فشار شتاب مواد (ΔP_A)، افت فشار اصطکاک و برخورد مواد (ΔP_z^*)، افت فشار ناشی از بلند نمودن و تعلیق مواد (ΔP_G) و افت فشار زانویی‌ها (ΔP_B) می‌شود. در نهایت افت فشار انتقال ۱۲۵۶/۶۰ پاسکال و توان مورد نیاز برای دستگاه ۱۳۳/۶۸ وات به دست آمد. همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با سه برابر کردن طول لوله‌ی عمودی، افت فشار به‌طور معنی‌داری در سطح یک درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت هوا و دبی جرمی دانه‌ها افت فشار به‌طور معنی‌داری در سطح یک درصد افزایش پیدا می‌کند.

واژه‌های کلیدی: انتقال نیوماتیک، افت فشار، ذرت، فاز رقیق.

ارجاع: سهرابی س. معمار دستجردی ر. رهنما م. و لطفی جلال‌آبادی ا. ۱۳۹۹. بررسی عوامل مؤثر بر افت فشار در انتقال نیوماتیک فاز رقیق عمودی محصول دانه‌ای ذرت. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۲۱(۱): ۳۰-۲۱.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
۲- استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
۳- استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.
۴- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان.

* نویسنده مسئول: rasoul.memar@asnrukh.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۰۴

مقدمه

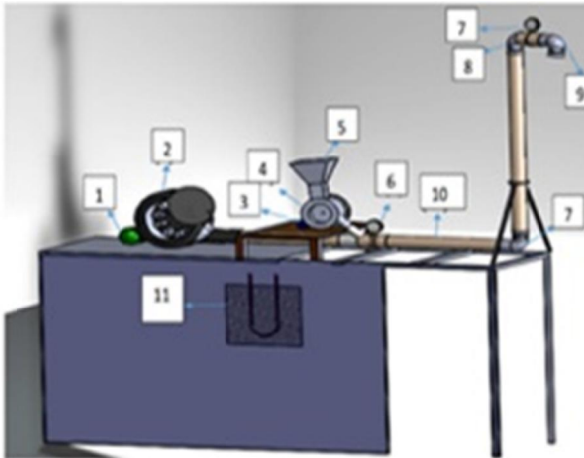
یکی از مسائلی که بشر از دیرباز به آن توجه داشته است انتقال مواد در حالات مختلف از جایی به جای دیگر بوده است. از این رو اقدام به طراحی روش‌ها و مکانیزم‌هایی به منظور رفع این مسئله نموده است. سامانه‌های انتقال مواد امروزه به صورت مکانیکی یا نیوماتیکی هستند. سیستم‌های انتقال نیوماتیک بسیار گران‌قیمت بوده و برای محدوده‌ی وسیعی از مواد دانه‌ای و پودرها قابل کاربرد است. در کشاورزی محصولات زیادی نظیر غلات، برنج، پلت‌های دام و طیور، کودهای شیمیایی، آرد، چای و قهوه را می‌توان با این روش انتقال داد (Mills, 2004). در روش انتقال مکانیکی اجزاء تشکیل‌دهنده‌ی سیستم عبارت‌اند از موتور و گیربکس یا زنجیر که به نوار نقاله یا باکس‌هایی که مواد در آن‌ها قرار می‌گیرند متصل شده است. نقاله‌های مارپیچی نمونه‌ای از سیستم‌های انتقال مکانیکی هستند که برای جابجایی مؤثر مواد توده‌ای جامد به کار گرفته می‌شوند (Zareei et al., 2015). مشکلات خاص سیستم‌های مکانیکی مانند عدم انعطاف‌پذیری این سیستم‌ها، مشکلات مربوط به آلودگی در حین انتقال مواد، مشکلات صوتی، فرسایش قسمت‌های مختلف آنها و همچنین آسیب مکانیکی به مواد در سال‌های ۱۸۴۷ تا ۱۸۶۶ با شروع استفاده از بادبزن‌ها، باعث شد حمل‌ونقل مواد جامد از طریق لوله و به کمک جریان هوا انجام شود. از مزایای انتقال نیوماتیکی مواد کشاورزی می‌توان به انعطاف‌پذیری بالا در طراحی، کم بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری به علت کم بودن قطعات متحرک، ایمنی و نظافت محصولات و محیط و همچنین انجام عمل بوجاری ضمن انتقال مواد اشاره کرد (Araghi, 1994; Marcus et al., 1990). با توجه به اینکه انتقال نیوماتیکی در مقایسه با روش‌های مکانیکی توان مصرفی کلی بیشتر دارد، این هزینه‌ی بیشتر با نیاز کمتر این نوع سیستم انتقال به تعمیر و نگهداری، امنیت محصول و توانایی انتقال در فواصل بیشتر قابل صرف‌نظر است (Thorn, 2011). بخش عمده‌ی انتقال و جابجایی محصولات کشاورزی توسط نیروی انسانی انجام می‌شود، که از پیامدهای آن بالا بودن هزینه و خستگی مفرط کارگران است. از طرفی در برخی از محیط‌های فرآوری همچون آسیاب‌ها به دلیل ایجاد گردوغبار ناشی از انتقال دستی توسط کارگر و یا نقاله‌های مکانیکی وجود سیستمی که بتواند بدون ایجاد گردوغبار موادی مانند

گندم و ذرت را به آسانی انتقال دهد، الزامی است. سیستم انتقال نیوماتیکی بهترین روش برای انتقال با شرایط مدنظر است. این سیستم با حجم کم مواد دانه‌ای را بدون ایجاد گردوغبار می‌تواند انتقال دهد. انتقال نیوماتیک به دو صورت کم‌فشار (فاز رقیق) و پرفشار (فاز غلیظ) انجام می‌شود. در بسیاری از صنایع همچون نفت، پتروشیمی و کشاورزی برای انتقال مواد پودری، دانه‌ای و فله، مانند آهک، زغال‌سنگ، آرد، شکر و غیره از این نوع نقاله‌ها استفاده می‌شود. انتقال با سرعت‌های بالای گاز (بزرگ‌تر از ۲۰ متر بر ثانیه)، غلظت‌های پایین مواد (کمتر از ۱ درصد حجم) و افت فشار پایین در واحد طول (معمولاً کمتر از ۵ میلی‌بار بر متر) را انتقال در فاز رقیق می‌گویند. انتقال نیوماتیک فاز رقیق به مسیر کوتاه و جابه‌جایی مداوم مواد در نرخ‌های کمتر از ۱۰ تن بر ساعت محدود می‌شود و تنها سیستمی است که قابلیت اجرا در فشار منفی را دارد. ذرات جامد در این فاز به صورت مجزا و کاملاً معلق در گاز رفتار می‌کنند و نیروهای ذره - گاز بر جریان حاکم است (Wei et al., 2011). در فاز غلیظ مواد با سرعت کم و فشار بالا انتقال می‌یابد. در طراحی سیستم‌های انتقال نیوماتیک مخصوص محصولات کشاورزی ویژگی‌هایی نظیر طول، عرض، ضخامت، قطر میانگین حسابی و هندسی، کرویت، حجم، وزن هزار دانه، چگالی توده و حقیقی، تخلخل، سطح تصویرشده، توان مورد نیاز و آسیب‌های مکانیکی بذر در طی فرایند انتقال بسیار دارای اهمیت هستند. اولین و اساسی‌ترین گام در طراحی سیستم‌های انتقال نیوماتیک تخمین صحیح افت فشار در طول لوله‌هاست. افت فشار و توان مصرفی با افزایش سرعت انتقال، افزایش می‌یابد. (Guner (2007) در پژوهشی که غفوری و همکاران روی انتقال نیوماتیک مکشی دو محصول ذرت و جو انجام دادند، مشخص شد که در هر دو محصول افت فشار با افزایش سرعت هوا به ترتیب به صورت غیرخطی و خطی افزایش می‌یابد ولی توان مصرفی با افزایش سرعت هوا در هر دو محصول به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد (Ghafori et al., 2011). لذا هدف کلی از این پژوهش بررسی عوامل مؤثر بر افت فشار در نقاله‌ی نیوماتیکی فاز رقیق عمودی برای بذر ذرت در طول مسیر انتقال است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش دستگاه انتقال نیوماتیک به‌منظور انتقال بذر ذرت طراحی و ساخته شد (شکل ۱). در مرحله اول برخی خواص فیزیکی، مکانیکی و آئروپنماتیکی ذرت به

دست آمد و در مرحله بعد با انجام محاسبات مربوط به طول لوله، افت فشار، و توان موردنیاز، طراحی و ساخت دستگاه انتقال نیوماتیک انجام شد.



شکل ۱- سیستم انتقال نیوماتیک عمودی ذرت، (۱) الکتروموتور، (۲) دمنده، (۳) موتور موزع، (۴) موزع، (۵) مخزن موزع، (۶) فشارسنج، (۷) زانویی اول، (۸) زانویی دوم، (۹) زانویی سوم، (۱۰) لوله‌های انتقال، (۱۱) مانومتر

انتقال مطابق معادله (۱) شامل مجموع افت فشار موردنیاز برای هوا به تنهایی (ΔP_L)، افت فشار شتاب مواد (ΔP_A)، افت فشار اصطکاک و برخورد مواد (ΔP_Z)، افت فشار ناشی از بلند نمودن و تعلیق مواد (ΔP_G) و افت فشار زانویی‌ها (ΔP_B) است (Klinzing et al., 1997).

$$P_{transport} = \Delta P_L + \Delta P_A + (\Delta P_Z + \Delta P_G)_{Horizontal} + (\Delta P_Z^* + \Delta P_G)_{Vertical} + \Delta P_B \quad (1)$$

است. گرانروی در گازها با افزایش دما کاهش می‌یابد، بنابراین عموماً برای محاسبه‌ی گرانروی دینامیکی هوا از معادله (۴) استفاده می‌شود (Klinzing et al., 2011):

$$\frac{\mu_1}{\mu_0} = \left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{0.77} \quad (4)$$

که، μ_1 گرانروی هوا در دمای آزمایش (Nsm^{-2})، $\mu_0 = 3.0921 \times 10^{-5}$ (Nsm^{-2}) دریا، T_1 دمای محیط آزمایش برحسب کلوین، T_0 دمای $288/16$ درجه کلوین است. برای جریان آرام $Re < 2300$ و برای جریان آشفته $Re > 2300$ است (Klinzing et al., 2011). چند روش برای به دست آوردن فاکتور اصطکاک (λ_L) گازها وجود دارد؛ برای سادگی کار، می‌توان معادله بلازیوس^۱ یا

طراحی سیستم انتقال فاز رقیق شامل انتخاب اندازه‌ی لوله‌ها و سرعت هوا جهت مطمئن شدن از جریان رقیق، محاسبه‌ی افت فشار خط لوله و انتخاب تجهیزات مناسب (پمپ، موزع، لوله انتقال و غیره) برای حرکت دادن گاز و جداسازی مواد از گاز در انتهای سیستم می‌شود. افت فشار

الف- افت فشار هوا (ΔP_L)

برای محاسبه افت فشار گاز یا سیال در لوله‌ها از معادله (۲) که توسط دارسی و بسباخ ارائه شده است، استفاده می‌شود (Streeter, 1998).

$$\Delta P_L = \lambda_L \frac{\rho_a}{2} V_a^2 \frac{\Delta L}{D} \quad (2)$$

که در آن، λ_L فاکتور اصطکاک (ضریب اصطکاک) نام دارد و ΔL طول مسیر (m) در دستگاه است. حدود دقیق جریان آرام و آشفته با عدد رینولدز مشخص می‌شود، معادله (۳) (Klinzing et al., 2011):

$$Re = \frac{\rho_a V_a D}{\mu} = \frac{V_a D}{\nu} \quad (3)$$

که در آن، ρ_a چگالی هوا (kgm^{-3})، V_a سرعت هوا (ms^{-1})، D قطر لوله (m)، μ گرانروی دینامیکی هوا (Nsm^{-2})، ν گرانروی سینماتیک هوا (m^2s^{-1}) و Re عدد رینولدز جریان

1- Blasius

ج- افت فشار اصطکاکی مواد (ΔP_z)

افت فشار اصطکاکی ناشی از برخورد ذرات جامد با یکدیگر و اصطکاک آن‌ها با جداره‌ی لوله‌ها است. معادله‌ی (۱۲) برای تخمین این افت بکار برده شده‌است (Klinzing *et al.*, 2011):

$$\Delta P_z = \frac{\lambda_z \rho_b V_p^2 \Delta L}{2D} \quad (12)$$

به‌منظور تعیین ضریب اصطکاک جامدات (λ_z) از معادله (۱۳) استفاده می‌شود (Kanno & Saito, 1969):

$$\lambda_z = \frac{0.114(gD)^{0.5}}{V_p} \quad (13)$$

مقدار تخلخل (ε) در هنگام انتقال برابر است با:

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{A \rho_p V_p} \quad (14)$$

و چگالی ظاهری مواد (ρ_b) از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon) \rho_p \quad (15)$$

د- افت فشار بلند کردن و تعلیق هوا و مواد (ΔP_G)

در سیستم انتقال نیوماتیک عمودی، افت فشار ناشی از معلق نگاه‌داشتن ذرات برابر است با (Klinzing *et al.*, 2011):

$$\Delta P_G = \frac{r \rho_a}{V_p/V_a} g \Delta Z \quad (16)$$

که در آن ΔZ طول بخش عمودی انتقال (m)، V_a سرعت هوا (ms^{-1})، V_p سرعت ذرت (ms^{-1})، ρ چگالی هوا (kgm^{-3}) و r نسبت مواد به هوا است.

و- افت فشار زانویی (ΔP_B)

در طراحی سیستم انتقال نیوماتیکی پیشنهاد می‌شود که در حد امکان از زانویی کمتری استفاده شود، زیرا با گذر مخلوط هوا و جامد از یک زانویی، مقداری انرژی به‌دلیل اصطکاک هوا و مواد با جداره زانویی تلف می‌شود. به سبب این اصطکاک، سرعت مواد کاهش می‌یابد، لذا مقداری انرژی اضافی لازم است تا آن‌ها را به سرعت اولیه برساند که این عمل افت فشار را در خط انتقال افزایش می‌دهد. در این تحقیق مطابق شکل ۱ دو زانویی در بین مسیر و یک زانویی در انتهای مسیر قرار گرفته‌است. ذرات ذرت پس از عبور از زانویی شماره ۳ از مسیر لوله خارج می‌شوند؛ بنابراین افت فشاری جهت شتاب‌گیری دوباره مواد وجود نخواهد داشت و تنها افت فشار هوا باید در نظر

معادله‌ی کو^۱ را بکار برد. برای $Re < 105$ معادله بلازیوس با معادله (۵) بیان می‌شود (Schlichting *et al.*, 2003):

$$\lambda_L = \frac{0.316}{(Re)^{0.25}} \quad (5)$$

در معادله کو برای به دست آوردن فاکتور اصطکاکی (λ_L) از ضریب اصطکاک سیال استفاده می‌شود که برابر است با (Klinzing *et al.*, 2011):

$$f_L = 0.0014 + \frac{0.125}{(Re)^{0.32}} \quad (6)$$

$$\lambda_L = 4f_L \quad (7)$$

ب- افت فشار شتاب مواد (ΔP_A)

برای یک قسمت از لوله انتقال که ذرات جامد و گاز در آن با نرخ‌های جریان جرمی به ترتیب M_s و M_a وارد می‌شود، معادله‌ی پیوستگی برای ذرات در هر مقطعی از لوله برابر است با (Klinzing *et al.*, 2011):

$$M_s = A \rho_p (1 - \varepsilon) V_p \quad (8)$$

که، A سطح مقطع لوله (m^2)، V_p سرعت ذرات (ms^{-1})، ε تخلخل و ρ_p چگالی حقیقی ذرات (kgm^{-3}) است. معادله‌ی پیوستگی برای گاز در هر مقطعی از لوله برابر است با (Klinzing *et al.*, 2011):

$$M_a = A V_a \rho_a \quad (9)$$

که، A سطح مقطع لوله (m^2)، V_a سرعت هوا (ms^{-1})، ρ_a چگالی هوا (kgm^{-3}) است. از ترکیب معادلات (۸) و (۹) نسبت جرمی مواد (r) به دست می‌آید:

$$r = \frac{M_s}{M_a} = \frac{\rho_p (1 - \varepsilon) V_p}{\rho_a V_a} \quad (10)$$

مواد در حداقل سرعت انتقال به‌طور سریع، شتاب می‌گیرند. این شتاب‌گیری باعث ایجاد بخش بزرگی از افت فشار سیستم می‌شود که باید توسط دمنده تأمین شود. این افت تنها در نقطه‌ی ورودی مواد در یک سیستم مکشی یا فشاری اتفاق می‌افتد (Klinzing *et al.*, 2011). با ورود مواد جامد به جریان هوا، سرعت مواد زیاد می‌شود تا به سرعت (V_p) برسد. این افت فشار اضافی از معادله (۱۱) به دست می‌آید (Klinzing *et al.*, 2011):

$$\Delta P_A = r V_a \rho_a V_p \quad (11)$$

در معادله فوق V_p سرعت انتقال مواد جامد است.

که به‌طور قابل توجهی ساده‌تر از سایر روش‌هاست (Rhodes, 2008).

$$V_{salt} = \left[\frac{4M_s 10^\alpha g^{\frac{\beta}{2}} D^{\left(\frac{\beta}{2}-2\right)}}{\pi \rho_a} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (23)$$

$$\alpha = 1440d_p + 1.96 \quad (24)$$

$$\beta = 1100d_p + 2.5$$

در معادلات فوق V_{salt} سرعت ظاهری گاز در هنگام ته‌نشینی (ms^{-1})، d_p میانگین قطر ذرات (m)، M_s دبی جرمی ($kg s^{-1}$)، D قطر لوله (m) و ρ_a چگالی هوا ($kg m^{-3}$) است.

با توجه به اینکه برای انتقال مواد به‌صورت فاز رقیق باید نسبت جرمی بین ۱۵-۰ باشد، در این تحقیق مقدار ۱۰ برای آن انتخاب گردید. حداکثر دبی جرمی برای بذر ذرت به مقدار ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته‌شد. لوله‌های PVC استاندارد با قطر داخلی ۵۸ و قطر خارجی ۶۳ میلی‌متر تهیه شد و برای اندازه‌گیری فشار کل از یک فشارسنج مدل EN 837-3 با محدوده نمایش فشار ۰-۲۵ میلی‌بار و قابلیت تشخیص ۰/۵ میلی‌بار استفاده شده است که ورودی آن توسط یک لوله‌ی برنجی یک‌چهارم اینچی در راستای جریان هوا قرارگرفت و فشار کل را نمایش می‌داد. همچنین جهت انتقال مواد از خطوط لوله استفاده می‌شود؛ این لوله‌ها براساس نوع ماده با موادی که باید از طریق آن منتقل گردد از جنس‌های مختلفی تهیه می‌شوند. نکته مورد توجه در مورد لوله‌های انتقال آن است که این لوله‌ها باید در کل مسیر تنها به‌صورت کاملاً عمودی یا کاملاً افقی قرارگیرند. برای اتصال لوله‌های افقی به عمودی و بالعکس از زانوهای با مقطع دایره‌ای دقیق استفاده شد. برای جلوگیری از حالت بلوکه‌شدن مواد در لوله باید قطر لوله بیش از ۳ برابر بزرگ‌ترین قطر ماده مورد انتقال باشد (Srivastava et al., 2005). تغذیه‌گرهای دورانی (شیرهای دورانی هوابند) پرکاربردترین وسیله تغذیه در انتقال نیوماتیک، هستند. همان‌طور که از نام آن پیداست باید، آب‌بندی فشار و تغذیه مواد را با هم انجام دهند. ساختار این وسیله مبتنی بر یک محور دوار و محفظه ساکن است، که محور شامل بخش‌های مساوی و مجزایی است که از طریق یک مجرای باز، مواد را از بالا دریافت می‌کند و به جریان هوا در مجرای پایین محفظه انتقال خواهد داد (شکل ۲). نتایج محاسبات طراحی سیستم انتقال نیوماتیک عمودی ذرت در جدول ۱ آمده

گرفته شود که از معادله (۱۷) به دست می‌آید (Brooker, 1992):

$$\Delta P_{bend} = C_p \frac{V_a^2}{2} \quad (17)$$

که در آن، C_p ضریب افت فشار در زانویی برحسب $(Pa \cdot s^2 m^{-2})$ و V_a سرعت هوا (ms^{-1}) است.

افت فشار در زانویی‌های شماره‌ی یک و دو (ΔP_{bend}) نیز از معادله‌ی (۱۸) به دست می‌آید (Klinzing et al., 2011).

$$\Delta P_B = \Delta P_{Z(bend)} \times 210 \left(\frac{2R_b}{D} \right)^{-1.15} \quad (18)$$

که در آن R_b شعاع زانویی (m)، D قطر لوله (m)، $\Delta P_{Z(bend)}$ افت فشار مواد در زانویی (Pa) است.

افت فشار مواد در زانویی از معادله (۱۹) محاسبه می‌شود (Klinzing et al., 2011):

$$\Delta P_{Z(bend)} = \frac{\Delta P_z}{\Delta L} \times \Delta L_{eq} \quad (19)$$

که در آن ΔL طول کل مسیر (m)، ΔL_{eq} طول معادل زانویی (m) است. مقدار طول مستقیم معادل زانویی از معادله‌ی (۲۰) به دست می‌آید.

$$\Delta L_{eq} = \frac{2\pi R_b}{4} \quad (20)$$

در زانویی پی‌وی‌سی استاندارد ۹۰ درجه مقدار شعاع خم زانویی مقدار ۲/۵ برابر قطر لوله فرض می‌شود:

$$R_b = 2.5D \quad (21)$$

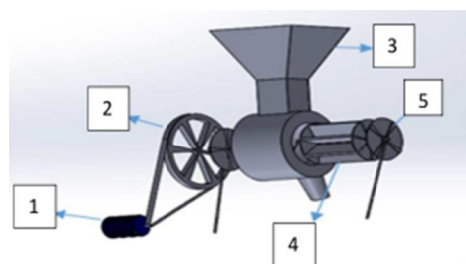
توان موردنیاز دمنده به‌شدت جریان حجمی هوا و افت فشار کل دستگاه نقاله بستگی دارد. برای هوای استاندارد (فشار جوی و درجه حرارت ۲۷ درجه سلسیوس) توان موردنیاز را می‌توان از معادله‌ی (۲۲) محاسبه نمود. برای ارتفاعات، درجه حرارت و رطوبت متفاوت، باید ضرایب تصحیح مربوطه به کاربرده شوند (Klinzing et al., 2011):

$$P = \frac{\Delta p Q}{\eta_b} \quad (22)$$

P توان دمنده (W)، Δp افت فشار کل دستگاه (Pa)، Q شدت جریان حجمی هوا ($m^3 s^{-1}$) و η_b بازده دمنده (۰/۵ تا ۰/۷) است. به‌دلیل نامعین بودن روابط جهت پیش‌بینی سرعت‌های خفگی و ته‌نشینی، کمینه‌ی سرعت گاز در عمل با ضریب اطمینان ۱/۵ و بیشتر انتخاب می‌شود (Imanmehr et al., 2008). روابط زیادی برای پیشگویی سرعت ته‌نشینی در منابع مختلف وجود دارد. معادله‌ی ریک (۲۳) براساس یک روش نیمه تجربی ارائه شده‌است

دهانه‌ی خروجی دمنده تعبیه شده‌بود اندازه‌گیری شد. بعد از انجام محاسبات و انتخاب اجزای سیستم، ساخت و مونتاژ دستگاه انتقال نیوماتیک عمودی آغاز شد.

است. مطابق محاسبات توان مورد نیاز برای راه‌اندازی سیستم ۱۳۳/۶۸ وات است. مقدار فشار تولیدی توسط فن سانتریفیوژ انتخاب‌شده، به‌وسیله‌ی لوله‌ی پیتوت که در



شکل ۲- طرحواره مخزن موزع، (۱) الکترو موتور موزع، (۲) پولی متحرک، (۳) مخزن، (۴) روتور موزع، (۵) درپوش هوا بند

جدول ۱- نتایج محاسبات طراحی سیستم انتقال نیوماتیک عمودی ذرت

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
قطر لوله	D	۵۸	mm
چگالی هوا	ρ_a	۱/۱۰۷	kgm^{-3}
نسبت جرمی	r	۱۰	-
عدد رینولدز جریان	Re	$۳/۴۴ \times ۱۰^۴$	-
گرانروی هوا	μ_1	$۳/۷۲ \times ۱۰^{-۵}$	Nsm^{-2}
ضریب اصطکاک هوا	λ_L	۰/۰۲۳	-
ضریب اصطکاک انتقال ذرت	λ_z	۰/۰۵۳	-
تخلخل	ε	۰/۹۹	-
چگالی حقیقی ذرت	ρ_p	۱۱۴۸/۱	kgm^{-3}
چگالی ظاهری ذرت	ρ_b	۱/۱۴۸	kgm^{-3}
ضریب افت فشار در زانویی	C_p	۰/۳۳	$(\text{Pa.s}^2\text{m}^{-2})$
افت فشار اصطکاکی هوا	ΔP_L	۳۹۸/۳۶	Pa
افت فشار شتاب ذرت	ΔP_A	۲۹۳/۸۸	Pa
افت فشار اصطکاکی ذرت	ΔP_z^*	۹۵/۶۹	Pa
افت فشار تعلیق ذرت	ΔP_G	۴۰۶/۸۲	Pa
مجموع افت فشار زانویی‌ها	ΔP_B	۲۵۶/۱۳	Pa
افت فشار کل	ΔP_{total}	۱۲۵۶/۶۰	Pa
توان دمنده مورد نیاز	P	۱۳۳/۶۸	W

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس افت فشار هوای اندازه‌گیری شده در جدول ۲ آمده است. تحلیل واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر طول انتقال، دبی جرمی بذر ذرت و سرعت هوای ورودی و اثر متقابل طول در سرعت هوا و طول در دبی جرمی، بر افت فشار هوا و ذرت در سطح ۱ درصد معنی‌دار است. همچنین اثر متقابل سه‌گانه‌ی طول، سرعت و دبی جرمی در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد.

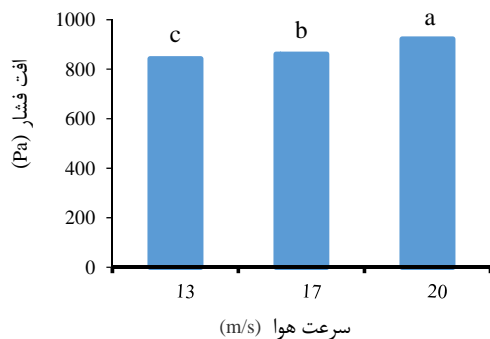
با تکمیل و ساخت دستگاه، جهت بررسی تأثیر طول لوله (۱، ۲ و ۳ متر)، سرعت هوای ورودی (۱۳، ۱۷ و ۲۰ متر بر ثانیه) و دبی جرمی (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در ساعت) بر میزان افت فشار، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. سپس تحلیل واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در هر مورد در سطح ۵ درصد صورت گرفت. تحلیل داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS انجام و نمودارها توسط نرم‌افزار EXCEL2013 ترسیم شده‌است.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات افت فشار هوا اندازه‌گیری شده

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات (MS)
		افت فشار هوا (Pa)
طول	۲	۵۴۵۸۴۵/۰۹ ^{**}
سرعت هوا	۲	۴۱۳۴۲/۰۵ ^{**}
دبی جرمی	۲	۴۸۸۹۱/۷۰ ^{**}
طول × سرعت هوا	۴	۳۰۹۳/۵۰ ^{**}
طول × دبی جرمی	۴	۶۵۰۲/۲۰ ^{**}
دبی جرمی × سرعت هوا	۴	۷۴۹/۷۹ ^{NS}
طول × دبی جرمی × سرعت هوا	۸	۴۸۰/۵۲ [*]
ضریب تغییرات (CV)		۰/۹۷

^{**}، ^{*} و NS به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

نتیجه مقاومت اصطکاکی افزایش و افت فشار نیز افزایش یافت. از آنجایی که افت فشار با مربع سرعت هوا متناسب است، با افزایش سرعت هوای ورودی افت فشار اصطکاکی هوا بیشتر می‌شود (Neidigh, 2003).



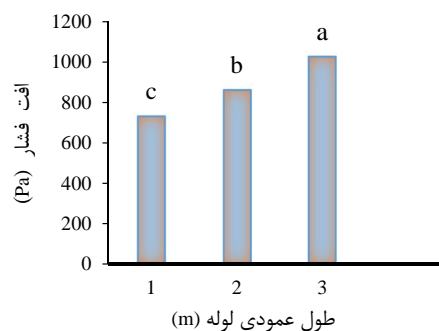
شکل ۴- نتایج مقایسه میانگین اثر سرعت هوا بر افت فشار هوا

اثر دبی جرمی بر افت فشار دستگاه

شکل ۵ اثر مقایسه میانگین تأثیر تغییرات دبی جرمی در سه سطح (۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت) بر افت فشار را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش ۵۰ درصدی دبی جرمی، افت فشار افزایش معنی‌داری در سطح یک درصد داشته است و بیشترین میزان افت فشار در دبی جرمی ۳۰۰ کیلوگرم در ساعت رخ داد. در حقیقت با افزایش دبی جرمی دانه‌ها، به دلیل افزایش برخورد دانه‌ها با یکدیگر و افزایش فشار استاتیکی مورد نیاز برای حمل دانه‌ها افت فشار کل افزایش یافته است (Imanmehr *et al.*, 2008).

اثر طول لوله عمودی بر افت فشار دستگاه

با توجه به شکل ۳ با سه برابر کردن طول لوله عمودی، افت فشار از ۷۳۴/۱۹ پاسکال به ۱۰۲۸/۱۵ پاسکال افزایش یافت. در حقیقت با افزایش طول لوله، سطح تماس مخلوط هوا و دانه‌ها با سطح لوله بیشتر شده و در نتیجه افت فشار اصطکاکی افزایش یافته است. همچنین از آنجاکه دانه باید در طول بیشتری جابه‌جا شود، افت فشار استاتیکی نیز بیشتر می‌شود (Imanmehr *et al.*, 2008; Mills, 2004; Rhodes, 2008).



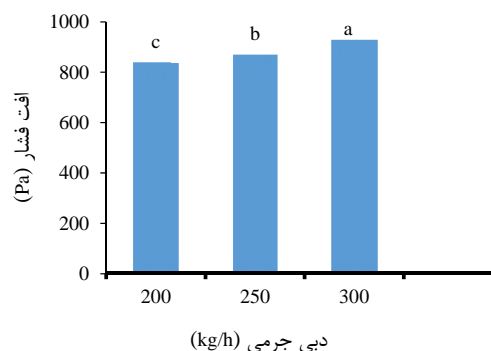
شکل ۳- نتایج مقایسه میانگین اثر طول عمودی لوله بر افت فشار هوا

اثر سرعت ورودی بر افت فشار دستگاه

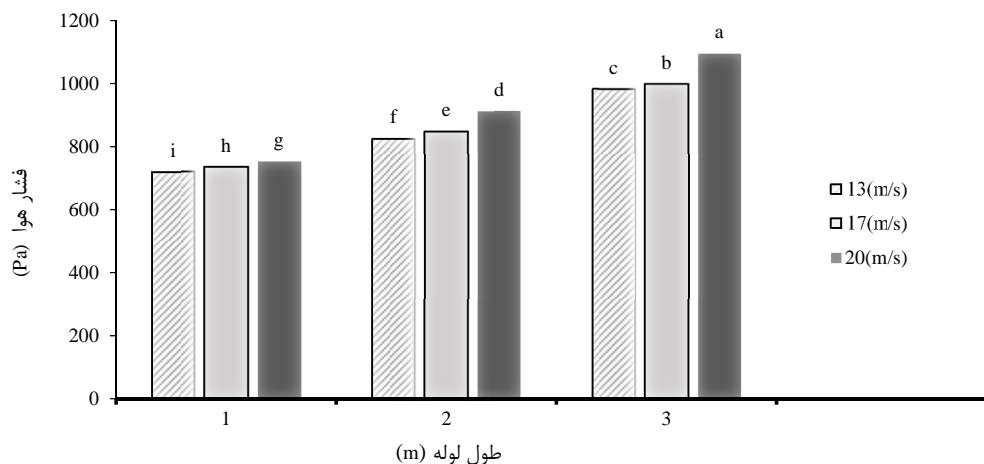
اثر سرعت ورودی هوا بر میزان افت فشار در شکل ۴ نشان داده شده است. مطابق شکل با افزایش سرعت هوای ورودی از ۱۳ متر بر ثانیه به ۲۰ متر بر ثانیه افت فشار هوا از ۸۴۱/۸۹ پاسکال به ۹۲۱/۴۳ پاسکال افزایش یافت. در حقیقت با افزایش سرعت هوا میزان برخورد دانه‌ها با یکدیگر و برخورد دانه‌ها با جداره‌ی لوله بیشتر شده و در

اثر متقابل طول لوله و سرعت هوا بر افت فشار هوا

در شکل ۶ مقایسه اثر سرعت بر میانگین‌های افت فشار هوا در سطوح مختلف طول لوله نشان داده شده‌است. بر این اساس با افزایش سرعت هوا در هر طول انتقال، افت فشار هوا نیز افزایش می‌یابد. بین تمام میانگین‌های افت فشار هوا اختلاف معنی‌داری در سطح ۵٪ وجود دارد. بیشترین افت فشار هوا در طول ۳ متر و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه، برابر ۱۰۹۳/۷۰ پاسکال است. همچنین با توجه به نمودار مقایسه میانگین اثر متقابل طول در سرعت، افزایش افت فشار با افزایش طول لوله رابطه‌ی مستقیم داشته و فاکتور طول نسبت به فاکتور سرعت تأثیر بیشتری در افت فشار هوا دارد.



شکل ۵- نتایج مقایسه میانگین اثر دبی جرمی بر افت فشار هوا

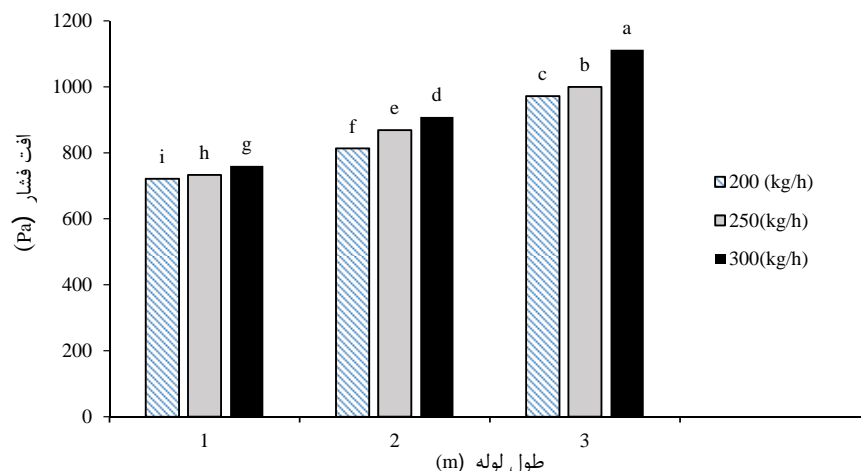


شکل ۶- تأثیر سرعت هوای ورودی بر افت فشار هوا در سطوح مختلف طول لوله

نتیجه آن افزایش افت فشار اصطکاکی و در نهایت افزایش افت فشار کل سیستم است (Rhodes, 2008). با دقت در شکل ۷ و توجه به اینکه بیشترین میزان افت فشار در طول ۳ متر بوده، بدون در نظر گرفتن تغییرات دبی جرمی این‌طور به نظر می‌آید که تأثیر فاکتور طول نسبت به فاکتور دبی جرمی بر میزان افت فشار کل بیشتر بوده است.

اثر متقابل طول لوله و دبی جرمی بر افت فشار هوا

در نمودار شکل ۷ اثر دبی جرمی بر افت فشار کل در سطوح مختلف طول لوله نشان داده شده‌است. براساس این نمودار، افت فشار کل سیستم با افزایش دبی جرمی در سطوح مختلف طول لوله افزایش یافته‌است. با افزایش ۵۰٪ دبی جرمی در طول لوله ۳ متر، بیشترین افت فشار در سیستم رخ می‌دهد. با افزایش طول لوله و دبی جرمی، سطح تماس هوا و بذر با جداره‌ی لوله بیشتر شده که

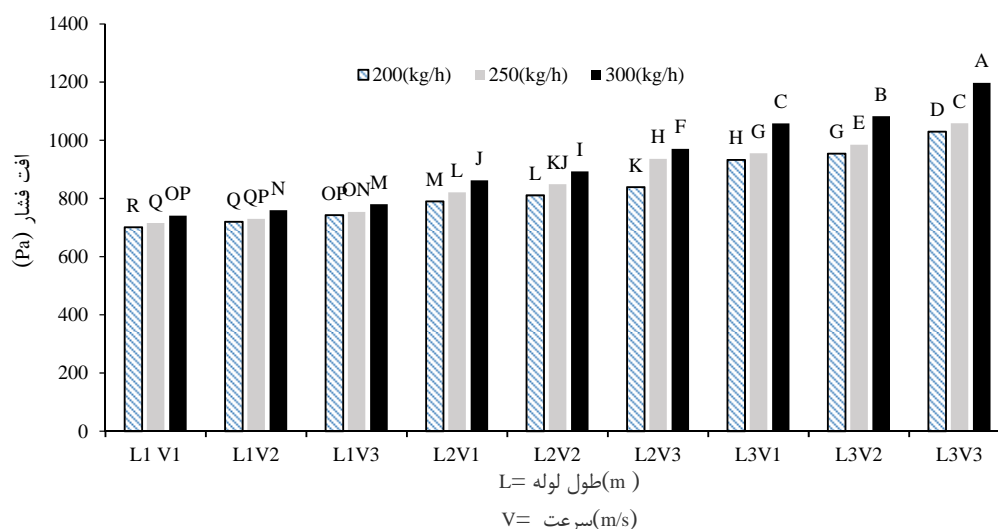


شکل ۷- تأثیر دبی جرمی بر افت فشار هوا در سطوح مختلف طول لوله

بوده‌است. با توجه به نمودار با افزایش طول، فاکتورهای سرعت و دبی جرمی تأثیر خود را بیشتر نشان می‌دهند و تغییرات هرکدام با افزایش طول معنی‌دار می‌شود. در طول دو متر، تأثیر فاکتور سرعت و دبی جرمی تقریباً یکسان است اما در طول یک متر فاکتور سرعت تأثیری بیشتر نسبت به فاکتور دبی جرمی دارد. با توجه به مشاهدات فوق می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که با افزایش طول، فاکتور دبی جرمی نسبت به فاکتور سرعت تأثیرگذارتر خواهد بود. همچنین با افزایش دبی جرمی در هر سطح طول لوله، افت فشار افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار افزایش دبی جرمی بر افت فشار است.

اثر متقابل سه‌گانه طول لوله، دبی جرمی و سرعت هوا بر افت فشار هوا

مطابق جدول اثر متقابل طول لوله، دبی جرمی و سرعت هوا در سطح ۵٪ معنی‌دار شد. مقایسه میانگین اثر متقابل سه‌گانه طول لوله، دبی جرمی و سرعت هوا بر افت فشار هوا در نمودار شکل ۸ آمده است. بیشترین افت فشار دستگاه در طول ۳ متر، دبی جرمی ۳۰۰ کیلوگرم بر ساعت و سرعت ۲۰ متر بر ثانیه به دست آمده و برابر است با ۱۱۹۷/۳۳۳ پاسکال و کمترین میزان افت فشار در طول یک متر سرعت ۱۳ متر بر ثانیه و دبی جرمی ۲۰۰ کیلوگرم بر ساعت حاصل شده که برابر با ۷۰۱ پاسکال



شکل ۸- افت فشار کل در سطوح مختلف سرعت هوا، دبی جرمی و طول لوله

- pneumatic conveyor in the dilute phase. *Journal of agricultural engineering research*, 8(4): 33-4
9. Marcus, R. D. Leung, L. S. klinzing, G. E. and Rizk, F. 1990. *Pneumatic Conveying of Solid*. Chapman and Hall Pub. London. UK. 575 p.
 10. Mills, D. 2004. *Pneumatic conveying design guide*. Second edition. Elsevier Butterworth-Heinemann. 806 p.
 11. Neidigh, S. 2003. *Introduction to the Theoretical and Practical Principles of Pneumatic Conveying*, Neuero Corporation, West Chicago, IL, USA. 5 p.
 12. Rhodes, M. J. 2008. *Introduction to particle technology*. Second edition. John Wiley and Sons. 472 p.
 13. Schlichting, H. and Gersten, K. 2003. *Boundary-layer theory*. Springer Science and Business Media. 795p.
 14. Srivastava A. K. Goering, C. E. and Rohrbach, R. P. 2005. *Engineering Principles of Agricultural Machines*. Second Edition. American Society of Agricultural Engineers. 588 p.
 15. Streeter, V. L. Wylie, E. B. and Bedford K. W. 1998. *Fluid Mechanics*. McGraw Hill. 740 p
 16. Thorn, J. O. 2011. *Pneumatic conveying in sugar production*. American Society of Sugar Beet Technologists, Proceedings from the 36th Biennial Meeting, Albuquerque, New Mexico, USA. 794-799
 17. Wei, W. Qingliang, G. Yuxin, W. Hairui, Y. Jiansheng, Z. and Junfu, L. 2011. *Experimental study on the solid velocity in horizontal dilute phase pneumatic conveying of fine powders*. *Powder technology*, 212(3): 403-409.
 18. Zareei, A. Farrokhi Teimourlou R. Naderloo, L. and Komarizade Asl, S. 2015. *Study and modeling of changes in volumetric efficiency of helix conveyors at different rotational speeds and inclination angels by ANFIS and statistical methods*. *Journal of Agricultural Machinery*, 7(1): 234-246.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان داد که با سه برابر کردن طول لوله عمودی، افت فشار به‌طور معنی‌داری در سطح یک درصد افزایش یافت که دلیل آن افزایش سطح تماس مخلوط هوا و دانه‌ها با سطح لوله است. همچنین با افزایش سرعت هوا و دبی جرمی دانه‌ها میزان برخورد دانه‌ها با یکدیگر و برخورد دانه‌ها با جداره‌ی لوله بیشتر شده و در نتیجه مقاومت اصطکاکی افزایش و افت فشار نیز به‌طور معنی‌داری در سطح یک درصد افزایش خواهد داشت. نتایج نشان داد که افزایش افت فشار با افزایش طول لوله رابطه‌ی مستقیم دارد و فاکتور طول نسبت به فاکتور سرعت تأثیر بیشتری در افت فشار هوا دارد. به‌طور کلی هر عاملی که منجر به افزایش برخورد ذرات در هنگام انتقال با یکدیگر و با جداره لوله شود، منجر به افزایش افت فشار استاتیکی و در نهایت افت فشار کل دستگاه می‌شود.

منابع

1. Araghi, M. K. 1994. *Design and investigation of vacume harvesting machine for rangeland seeds*. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture. Tarbit Modares University. 92 p. (In Farsi)
2. Brooker, D. B. Bakker-Arkema, F. W. and Hall, C. W. 1992. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Springer Science and Business Media. 450 p
3. Ghafari, H. Hemmat, A. Borghae, A. M. and 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.
4. Guner, M. 2007. *Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds*. *Journal of food engineering*, 80: 904-913.
5. Klinzing, G. E. Rizk, F. Marcus, R. and Leung, L. S. 1997. *Pneumatic Conveying of Solids*. Second edition. Springer Science and Business Media. 624 p.
6. Klinzing, G. E. Rizk, F. Marcus, R. and Leung, L. S. 2011. *Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach*. Springer Science and Business Media. 568 p.
7. Kqno, H. and Saito, S. 1969. *Pneumatic conveying of solids through straight pipes*. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2(2): 211-217.
8. Imanmehr, A. Ghobadian, B. Minaie, S. and Khoshtaghaza, M. H. 2008. *Design, construction and evaluation of canola seed*