

ارزیابی برخی پارامترهای موثر در طراحی نقاله نئوماتیکی افقی فاز رقیق شکر

پویا کهنسال مکوندی^۱، مجید رهنما^{۲*}، رسول معمار دستجردی^۲ و علیرضا شافعی نیا^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
- ۲- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
- ۳- استادیار گروه اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۱۱

پذیرش نهایی: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵

کلمات کلیدی:

انتقال نئوماتیک،

خواص کیفی،

افت فشار،

فاز رقیق،

شکر

چکیده

هدف از این مطالعه، ارزیابی برخی پارامترهای موثر بر طراحی دستگاه انتقال نئوماتیک فاز رقیق افقی برای شکر می باشد. بدین منظور، ابتدا برخی از خواص فیزیکی ذرات شکر که مورد نیاز در طراحی دستگاه هستند، محاسبه و تعیین شد. افت فشار کل با جمع نمودن سهم دو بخش هوا و مواد با استفاده از معادلات تجربی به دست آمد. افت فشار با تغییر سرعت هوای ورودی دمنده در ۵ سطح، نرخ جریان جرمی ذرات شکر در ۳ سطح و طول لوله انتقال در ۳ سطح، اندازه گیری گردید. آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر فاکتورهای مورد نظر و اثر متقابل آن‌ها بر افت فشار کل در سطح اطمینان ۱ درصد معنی دار است. رابطه‌ی بین افت فشار کل با سرعت هوای ورودی و دبی جرمی شکر به صورت معادله‌ی درجه دوم و با طول لوله به صورت خطی بود. جهت سنجش تغییرات در خواص کیفی فیزیکی شکر، پس از انتقال توسط دستگاه، اثرات فاکتورهای طول، دبی جرمی شکر و سرعت انتقال در سطوح ذکر شده بر دو خاصیت قطر میانگین ذرات و ضریب پراکندگی آن‌ها بررسی گردید. آنالیز واریانس این داده‌ها نشان داد تاثیر فاکتورهای مورد نظر و اثر متقابل آن‌ها بر ایجاد تغییر در خواص کیفی فیزیکی شکر در سطح اطمینان ۱ درصد معنی دار است. با افزایش طول، دبی جرمی و سرعت، قطر میانگین ذرات کاهش و میزان پراکندگی در اندازه‌ی آن‌ها افزایش یافت. مقایسه‌ی میانگین داده‌ها نشان داد که سرعت و طول به ترتیب بیشترین و کمترین تاثیر را بر ایجاد تغییر در خواص کیفی شکر دارند. افزایش طول لوله بدون تغییر سایر عوامل تاثیر زیادی بر شکستگی ذرات نخواهد داشت.

* عهده دار مکاتبات

Email: rahnamam2002@ramin.ac.ir

مقدمه

انتقال مواد در صنایع مختلف به روش‌های گوناگونی صورت می‌گیرد. انتقال دهنده‌های نئوماتیکی از جمله سیستم‌هایی هستند که در اکثر صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرند. مزایای خاص این انتقال دهنده‌ها باعث شده

که در طول مدت کوتاهی جای خود را در صنایع مختلف و کشاورزی باز کرده و بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گیرند. از مزایای انتقال نئوماتیکی مواد کشاورزی می‌توان به انعطاف پذیری بالا در طراحی، کم بودن هزینه‌های تعمیر و نگهداری (به علت کم بودن

می باشد. این نوع سیستم سنتی انتقال، تنها قابلیت انتقال مواد در مسیرهای مستقیم با کمترین میزان تغییر در جهت را دارند و هر تغییر مسیر انتقال، نیازمند موتور و محرک-های جداگانه است. همچنین به علت باز بودن سیستم، محصولات کشاورزی بیشتر در معرض آلودگی قرار دارند و ایجاد گرد و غبار می کنند. با تغییر سیستم انتقال شکر از مکانیکی به نئوماتیک لازم است تاثیر پارامترهای انتقال بر میزان افت فشار سیستم و همچنین تاثیر این نوع از انتقال و پارامترهای آن بر خواص کیفی شکر بررسی شود.

مواد و روش‌ها

شناخت خواص فیزیکی شکر تاثیر بسزایی در طراحی صحیح و کارآمد نقاله‌ی نئوماتیک این فرآورده دارد. خواص مورد نیاز در طراحی نقاله شامل قطر میانگین، چگالی ظاهری و حقیقی، درصد تخلخل، زاویه استقرار^۱ می باشد. نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول (۱) نشان داده شده است. قطر میانگین ذرات شکر و درصد پراکندگی آن‌ها توسط آزمون توزیع اندازه بلورهای شکر تعیین شد. آزمون توزیع اندازه بلورهای شکر بر اساس درصد تجمعی مقادیر شکر باقی مانده بر روی الک‌ها انجام می شود. نتایج به صورت نموداری که محور افقی آن اندازه الک‌ها و محور عمودی آن درصد تجمعی شکر باقی مانده روی هر الک است، رسم می شود. مقادیر قطر میانگین (MA)^۲ و درصد پراکندگی (CV)^۳ از روی نمودار به دست می آیند. در این تحقیق ابتدا وزن ظرف زیرین و هر یک از الک‌ها اندازه‌گیری و یادداشت شد. الک‌ها به ترتیب صحیح بر اساس اندازه (از اندازه بزرگ به کوچک) بر روی لرزاننده^۴ مدل Retsch ساخت آلمان قرار داده شد (شکل ۱ الف). نمونه

قطعات متحرک)، ایمنی و نظافت محصولات و محیط و همچنین انجام عمل بوجاری در ضمن انتقال مواد اشاره کرد (۱۱). با توجه به این که توان مصرفی کلی انتقال نئوماتیکی در مقایسه با روش‌های مکانیکی بیشتر است این هزینه بیشتر با وجود نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر، امنیت محصول و توانایی انتقال در فواصل بیشتر قابل توجه است (۲۵). عملکرد یک نقاله‌ی نئوماتیک به عواملی چون مواد منتقل شونده، شرایط کاری و نوع سیستم آن بستگی دارد.

انتقال به دو صورت کم فشار (فاز رقیق) و پرفشار (فاز غلیظ) انجام می گیرد. در بسیاری از صنایع همچون نفت، پتروشیمی و کشاورزی برای انتقال مواد پودری، گرانوله، فله، مانند آهک، زغال سنگ، آرد، شکر و از این نوع نقاله‌ها استفاده می شود. 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 میلی بار بر متر) را انتقال در فاز رقیق می گویند. انتقال نئوماتیک فاز رقیق به مسیر کوتاه، جابه‌جایی مداوم مواد در نرخ‌های کمتر از ۱۰ تن بر ساعت محدود می شود 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 می کنند و نیروهای ذره - گاز بر جریان حاکم است (۲۳). در فاز غلیظ مواد با سرعت کم و فشار بالا انتقال می یابد.

شکر یکی از نیازهای غذایی اصلی انسان است که در بافت بسیاری از گیاهان یافت می شود اما در گیاه نیشکر و چغندر قند در غلظت‌های کافی برای استخراج درون بافت آن‌ها موجود است. حدود ۷۰ درصد از کل شکر تولید شده، از نیشکر و ۳۰ درصد آن از چغندر قند است (۲۲). کشور برزیل دارای مقام اول تولید شکر در جهان است. مقدار تولید فرآورده در ایران در سال ۹۴ به میزان ۱۳۰۰۰۰۰ تن بوده که استان خوزستان بیشترین میزان تولید را داشته است (۱). در کارخانه‌های تولید شکر، روش غالب برای حمل و نقل شکر، نوع مکانیکی

1- Angle of repose

2- Mean aperture

3- Coefficient of variation

4- Shaker



شکل (۱) الف: الک ها و لرزاننده، ب: ترازو Sartorius مدل GE4101

Figure (1) a: Sieves and shaker, b: scientific balance

تعیین چگالی ظاهری و چگالی حقیقی

برای اندازه گیری چگالی حجمی^۱ (ρ_{bu})، شکر از ارتفاع ۱۵ سانتی متری (با ریزش یکنواخت) در ظرفی به حجم ۵۰۰ میلی لیتر ریخته شد و با تقسیم وزن شکر داخل ظرف بر حجم آن چگالی حجمی محاسبه گردید (۲۰). برای تعیین چگالی حقیقی^۲ (ρ_{pa}) شکر، از روش جابجایی مایع استفاده شد. در این روش ابتدا در استوانه مدرج ۱۰۰ میلی لیتری، مقداری محلول پارافین (کروسین)^۳ ریخته و حجم آن یادداشت گردید (۲). محلول پارافین توانایی حل کردن شکر در خود را ندارد زیرا شکر یک ماده قطبی و پارافین غیر قطبی می باشد (۷). سپس مقدار مشخصی شکر وزن و در استوانه مدرج مورد نظر ریخته شد. با تکان دادن استوانه مدرج حباب های هوای موجود در اطراف دانه ها خارج شده و خیلی سریع مقدار مایع جابه جا شده توسط شکر ثبت گردید. با تقسیم وزن شکر به حجم مایع جابه جا شده مقدار چگالی حقیقی شکر به دست آمد.

تعیین درصد تخلخل شکر

با به دست آوردن چگالی حجمی و چگالی حقیقی شکر توسط رابطه (۳) درصد تخلخل (ε) شکر محاسبه شد (۱۲).

$$\varepsilon_0 = \left[1 - \frac{\rho_{bu}}{\rho_{pa}} \right] \times 100 \quad (3)$$

برداری بر اساس استاندارد ملی شماره ۲۸۳۶ موسسه استاندارد تحقیقات صنعتی ایران، و از کارخانه دعبیل خراعی تهیه و کل شکرها در یک سینی ریخته شد و هر بار بعد از پهن کردن آن در سینی و تقسیم آن به چهار قسمت یک نمونه ۱۰۰ گرمی برداشت و دوباره شکرها به هم زده و در سینی پهن می شد (بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۶۹). سپس نمونه های صد گرمی (شکل ۱ ب) به آرامی بر روی بالاترین الک ریخته شد و دستگاه برای ۵ دقیقه روشن گردید (بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۴۶۳۲). الک ها پس از جدا شدن از لرزاننده، وزن شدند. درصد شکر باقی مانده روی هر الک محاسبه گردید. پس از رسم نمودار اندازه الک ها در مقابل درصد تجمعی شکر باقی مانده روی هر الک، مقادیر $D_{50\%}$ و $D_{16\%}$ محاسبه شد. بوسیله رابطه ی (۱ و ۲) مقادیر MA بر حسب μm و CV بر حسب درصد محاسبه شد (۲).

$$MA = D_{50\%} \quad (1)$$

$$CV = \frac{D_{16\%} - MA}{MA} \times 100 \quad (2)$$

در رابطه های بالا، $D_{50\%}$ اندازه روزنه ی الکی که نیمی از نمونه از آن عبور کرده و نیم دیگر باقی مانده است، $D_{16\%}$ اندازه روزنه ی الکی که ۱۶ درصد نمونه از آن عبور کرده است. در انتقال نئوماتیک شکر، تنها خاصیتی از ذرات آن که در هنگام انتقال دستخوش تغییرات می شود اندازه و میزان پراکندگی آن ها می باشد. هر سه پارامتر انتقال نئوماتیک (طول، سرعت و دبی) تاثیر متفاوتی بر این خواص کیفی شکر دارند که در ادامه تاثیرات این پارامترها بر این خواص بررسی خواهد شد.

- 1- Bulk density
- 2- Particle density
- 3- Paraffin (kerosene)

زاویه‌ی استقرار

به منظور تعیین زاویه استقرار دینامیکی یا زاویه‌ی تخلیه مواد، یک جعبه مقوایی با ابعاد $450 \times 300 \times 400$ میلی‌متر ساخته و با ذرات شکر پر گردید و با فاصله‌ی ۱۵ سانتی‌متر بالای یک سطح صاف آهن گالوانیزه قرار داده شد. با باز نمودن سطح زیرین جعبه با ابعاد 150×225 میلی‌متر، ذرات شکر به طور منظم تخلیه شده و یک توده تشکیل شد (۲). زاویه‌ی استقرار (Θ) برابر زاویه‌ی سطح شیبدار ایجاد شده توسط ذرات با سطح افق است (۲۰).

تعیین حداقل سرعت هوای ورودی

در انتقال نیوماتیک فاز رقیق افقی یا عمودی، سعی می‌شود عملیات انتقال در پایین‌ترین سرعت ممکن انجام گیرد تا افت فشار به حداقل برسد و سائیدگی و هزینه‌های اجرایی کاهش یابد. به دلیل نامعین بودن روابط جهت پیشگویی سرعت ته‌نشینی (حداقل سرعتی که ذره به حالت معلق باقی می‌ماند و مرز بین فاز رقیق و فاز غلیظ می‌باشد)، کمینه‌ی سرعت گاز در عمل با ضریب اطمینان ۱/۵ و بیشتر انتخاب می‌شود (۱۰). روابط زیادی برای پیشگویی سرعت ته‌نشینی در منابع مختلف وجود دارد که رابطه‌های ۴ و ۵ بر اساس یک روش نیمه تجربی ارائه شده است (۲۳):

$$V_{salt} = \left[\frac{4M_s 10^\alpha g^{\frac{\beta}{2}} D^{\left(\frac{\beta}{2}-2\right)}}{\pi \rho_a} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (۴)$$

$$\alpha = 1440d_p + 1.96 \quad \beta = 1100d_p + 2.5 \quad (۵)$$

در روابط فوق V_{salt} سرعت ظاهری گاز در هنگام ته‌نشینی (متر بر ثانیه)، d_p قطر میانگین ذرات شکر (متر)، M_s دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)، D قطر لوله (متر)، ρ_a چگالی هوا (کیلوگرم بر متر مکعب) است.

تعیین نسبت جرمی و قطر لوله انتقال

برای یک قسمت از لوله انتقال که ذرات جامد و گاز در آن با نرخ‌های جریان جرمی به ترتیب M_f و M_s وارد

می‌شود نسبت جرمی مواد (r) از رابطه‌ی (۶) به‌دست می‌آید (۲۶):

$$r = \frac{M_s}{M_a} = \frac{\rho_p(1-\varepsilon)V_s}{\rho V_a} \quad (۶)$$

با توجه به این که برای انتقال مواد به صورت فاز رقیق باید نسبت جرمی بین ۱۵-۰ باشد، در این تحقیق مقدار ۰/۶ برای آن انتخاب گردید (۱۰). حداکثر دبی جرمی برای شکر به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم بر ساعت در نظر گرفته شد. لوله‌های PVC استاندارد با قطر داخلی ۷۶/۲ و قطر خارجی ۸۰ میلی‌متر (رابطه‌ی ۶) تهیه گردید.

افت فشار انتقال افقی

افت فشار انتقال 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 زائوئی‌ها (ΔP_B) بر حسب پاسکال می‌شود (۱۲):

$$\Delta P_T = \Delta P_L + \Delta P_A + (\Delta P_z + \Delta P_G)_H + \Delta P_B \quad (۷)$$

افت فشار جریان هوا (ΔP_L)

این افت فشار ناشی از جریان هوا به تنهایی در طول لوله‌ی انتقال می‌باشد. معادله افت فشار هوا بر حسب پاسکال برابر است با (۱۶):

$$\Delta P_L = \lambda_L \frac{\rho_a V_a^2}{2} \frac{\Delta L}{D} \quad (۸)$$

که در آن، λ_L ضریب مقاومت هوا، V_a سرعت هوا (متر بر ثانیه)، L طول لوله‌ی انتقال (متر) است.

ضریب مقاومت هوا (λ_L) بستگی به جریان گاز دارد و تابعی از عدد رینولدز (Re) است و می‌توان آن را به کمک معادله‌ی بلازیوس به‌دست آورد (۲۴):

$$\lambda_L = \frac{0.316}{(Re)^{0.25}} \quad (۹)$$

افت فشار شتاب مواد (ΔP_A)

مواد بطور سریع در سرعت انتقال حداقل، شتاب می‌گیرند. این افت تنها در نقطه ورودی مواد در یک سیستم مکشی یا فشاری اتفاق می‌افتد. این افت فشار از رابطه (۱۰) به‌دست می‌آید (۱۴):

که در آن C_p ضریب افت فشار در زانویی بر حسب پاسکال در مجذور ثانیه بر متر مربع)، V_a سرعت هوا (متر بر ثانیه) می‌باشد.

پارامترهای طراحی مقاله نیوماتیک شکر

نتایج محاسبات پارامترهای طراحی سیستم افقی انتقال نیوماتیک فاز رقیق برای شکر در جدول (۱) آورده شده است. در نهایت افت فشار کل سیستم با جمع تک تک افت‌های ذکر شده به دست می‌آید (رابطه ۷).

ساخت نقاله

کل افت فشار سیستمی به طول ۶ متر با استفاده از یافته‌های جدول (۱) برابر است با ۱۰۵۰/۵۷ پاسکال (رابطه ۷). جهت تولید جریان هوا و غلبه بر افت‌های فشار محاسبه شده یک دمنده سانتریفیوژ با تیغه‌های خمیده به سمت عقب انتخاب گردید. بنابراین توان مورد نیاز برای دمنده بر اساس افت فشار کل سیستم (ΔP) و دبی حجمی هوا (Q) از رابطه (۱۸) به دست می‌آید (۲۱):

$$P = \frac{\Delta P Q}{\eta_B} \quad (18)$$

که η_B راندمان دمنده ($0.5 < \eta_B < 0.7$) می‌باشد.

پس از مشخص شدن توان مورد نیاز (۲۳۹/۴۲ وات) برای راه اندازی سیستم، با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۳، یک دمنده با توان اسمی ۷۰۰ وات انتخاب گردید. مقدار فشار تولیدی توسط فن سانتریفیوژ انتخاب شده، بوسیله لوله پیتوت که در دهانه‌ی خروجی دمنده تعبیه شده بود اندازه‌گیری شد. با مقایسه افت فشار محاسبه شده در طراحی سیستم و فشار تولیدی توسط دمنده (۲۴۱۲/۳۱ پاسکال) نتیجه‌گیری می‌شود که دمنده‌ی انتخابی قابلیت استفاده برای رفع نیاز سیستم را داراست. تغییر سرعت هوای خروجی از دمنده توسط دریچه‌ی هوای ورودی تعبیه شده بر روی آن انجام شد و سرعت هوای خروجی توسط فشارسنج ساخته شده طبق اصول لوله‌ی پیتوت اندازه‌گیری گردید. پس از ترکیب اجزا در نهایت سیستمی مطابق شکل (۲) به دست آمد.

$$\Delta P_A = r V_a \rho_a V_p \quad (10)$$

که در آن، V_p سرعت ذرات (متر بر ثانیه)، r نسبت جرمی مواد به هوا است. نسبت جرمی مواد به هوا بر حسب سرعت هوا برابر است با (۱۵):

$$r = \frac{M_s}{\rho A V_a} \quad (11)$$

که در آن، A سطح مقطع لوله (متر مربع)، M_s دبی جرمی ذرات در حین انتقال (کیلوگرم بر ساعت)، M_a دبی جرمی هوا در حین انتقال (کیلوگرم بر ساعت) است.

افت فشار اصطکاکی مواد

این افت ناشی از برخورد ذرات جامد با یکدیگر و اصطکاک آن‌ها با جداره لوله‌ها است. معادله (۱۲) برای تخمین این افت بکار برده شد (۱۲):

$$\Delta P_z = \frac{\lambda_z (1 - \varepsilon) \rho_p V_p^2 \Delta L}{2D} \quad (12)$$

به منظور تعیین ضریب اصطکاک جامدات (λ_z) در انتقال افقی از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود (۲۱):

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

مقدار تخلخل در هنگام انتقال برابر است با (۱۳):

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

افت فشار بلند کردن و تعلیق مواد و هوا (ΔP_G و ΔP_{Ga})

در سیستم افقی افت فشار ناشی از معلق نگاه داشتن ذرات برابر است با (۲۶):

$$\Delta P_G = \rho_p (1 - \varepsilon) g \Delta L \quad (15)$$

افت فشار (تعلیق) ثقلی هوا برابر است با (۲۶):

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

افت فشار زانویی (ΔP_B)

در طراحی سیستم انتقال پیشنهاد می‌شود از زانویی‌ها به دلیل افزایش انرژی مورد نیاز در اثر اصطکاک و همچنین سایش و شکستگی مواد در حد امکان کمتر استفاده شود (۱۱؛ ۶). افت فشار هوا در هنگام عبور از زانویی از رابطه (۱۷) به دست می‌آید (۳):

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

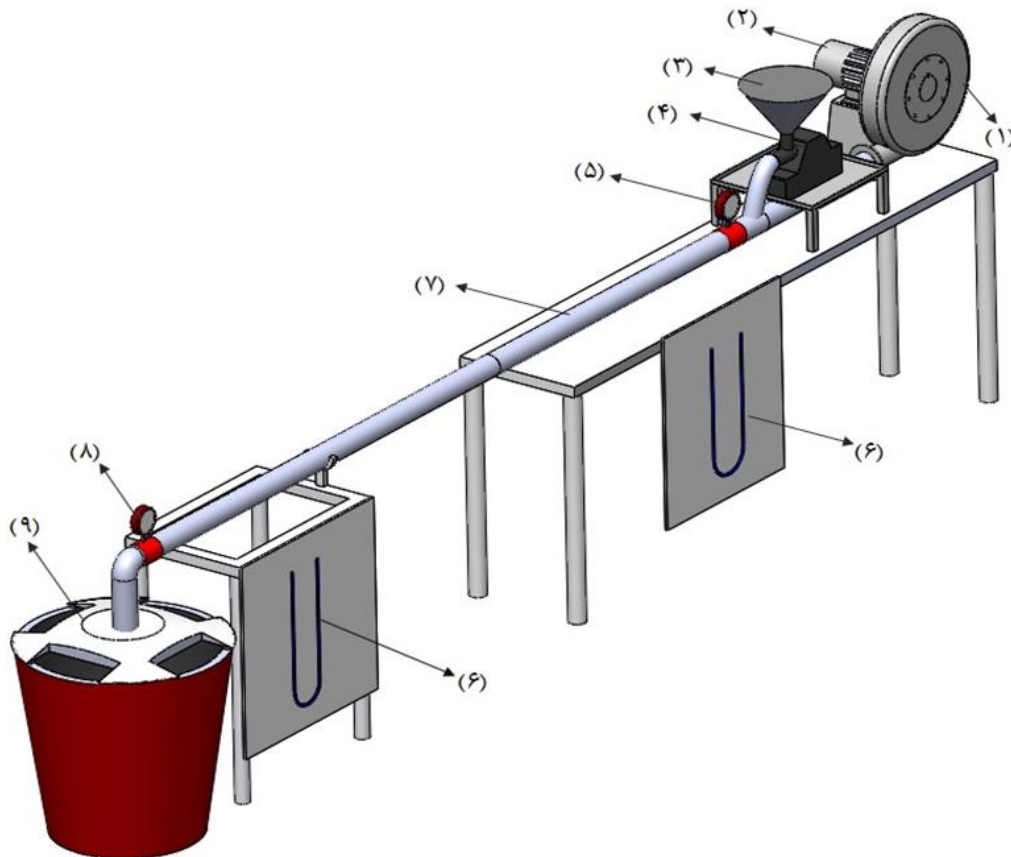
کهنسال مکونندی و همکاران: ارزیابی برخی پارامترهای موثر در...

جدول (۱) نتایج محاسبات طراحی سیستم انتقال نیوماتیک شکر
Table (1) Calculation results of sugar pneumatic conveying system

ردیف	پارامتر	نماد	مقدار	واحد
series	Parameters	Symbol	magnitude	unit
1	بیشترین قطر ذرات	d_p	1700	میکرومتر
2	قطر میانگین	MA	809.76	میکرومتر
3	قطر لوله	D	7.62	سانتی متر
4	زاویه‌ی استقرار	Θ	$35 < \Theta < 39$	درجه
5	چگالی هوا	ρ	1.107	کیلوگرم بر متر مکعب
6	سرعت ته‌نشینی	V_{salt}	9.18	متر بر ثانیه
7	نسبت جرمی	r	0.6	ندارد
8	عدد رینولدز جریان	Re	5.66×10^4	ندارد
9	گرانروی هوا	μ_1	3.72×10^{-5}	نیوتون ثانیه بر متر مربع
10	ضریب اصطکاک هوا	λ_L	0.0204	ندارد
11	ضریب اصطکاک ذرات	λ_z	0.0049	ندارد
12	تخلخل در هنگام انتقال	ϵ	0.999	ندارد
13	چگالی حقیقی شکر	ρ_p	1586.2	کیلوگرم بر متر مکعب
14	هنگام چگالی ظاهری شکر انتقال	ρ_b	0.6	کیلوگرم بر متر مکعب
15	ضریب افت فشار در زانویی	C_p	0.33	پاسکال مجذور ثانیه بر متر مربع
16	افت فشار ناشی از جریان هوا	ΔP_L	555.67	پاسکال
17	افت فشار شتاب ذرات شکر	ΔP_A	243.64	پاسکال
18	افت فشار اصطکاک ذرات شکر	ΔP_z^*	47.24	پاسکال
19	افت فشار تعلیق ذرات شکر	ΔP_G	35.81	پاسکال
20	افت فشار ثقلی هوا	ΔP_{Ga}	65.06	پاسکال
21	افت فشار زانویی	ΔP_{bend}	103.12	پاسکال
22	افت فشار کل محاسبه شده	ΔP_{total}	1050.57	پاسکال
23	توان دمنده مورد نیاز	P	239.42	وات

ساعت) بود و تحلیل آماری به صورت فاکتوریل و در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی انجام گردید. سپس آنالیز واریانس و مقایسه میانگین‌ها به روش دانکن در هر مورد در سطح ۵ درصد صورت گرفت و اثرات تیمارها بر افت فشار، قطر میانگین و درصد پراکندگی در اندازه‌ی ذرات بررسی شد.

تیمارهای مورد آزمایش و سطوح آن شامل طول لوله در سه سطح (۲، ۴ و ۶ متر)، سرعت هوای ورودی که بر اساس محاسبه سرعت ته‌نشینی شکر (مقدار ۹/۱۸ متر بر ثانیه از رابطه ۴ به دست آمد که در جدول ۱ ذکر شده است) با ضریب ۱/۵ برابر آن در پنج سطح (۱۳، ۱۶، ۱۹، ۲۲ و ۲۵ متر بر ثانیه) و دبی جرمی شکر (متوسط نسبت جرمی ۰/۶) در سه سطح (۱۶۰، ۱۸۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر



شکل (۲) طرحواره‌ی دستگاه انتقال نیوماتیک فاز رقیق افقی شکر، (۱) دمنده، (۲) الکتروموتور، (۳) مخزن تغذیه، (۴) بار ریز، (۵) فشارسنج شماره ۱، (۶) مانومترها، (۷) لوله‌ی انتقال، (۸) فشارسنج شماره ۲، (۹) مخزن تخلیه

Figure (2) The Schematic of sugar horizontal dilute phase pneumatic conveyor, (1) Blower, (2) Motor, (3) Hopper, (4) Feeder Distributor, (5) Pressure gauge, (6) Manometer, (7) Pipeline, (8) Pressure gauge (9) Discharge tank

حرکت ذرات شکر در هر دبی جرمی، افت فشار اصطکاکی ناشی از برخورد ذرات به دیواره و هوا با دیواره‌ی لوله در هر سطح طول و دبی جرمی شکر، افزایش یافته است. همچنین با افزایش دبی جرمی در هر سرعت، افت فشار کل افزایش یافته است که این افزایش افت فشار کل متناسب با توان دوم تغییرات سرعت و دبی می‌باشد. آنالیز رگرسیون داده‌ها با نرم‌افزار SPSS نشان می‌دهد که رابطه بین افت فشار با تغییرات سرعت هوا (V_a) و M_s و L از رابطه (۱۹) با $R^2 = 0.986$ تبعیت می‌کند.

$$\Delta P = 660.643 - 107.847L - 6.118M_s - 11.527V_a + 4.538LV_a + 0.652LM_s - 0.029V_aM_s - 0.003LV_aM_s + 0.436V_a^2 + 0.018M_s^2 \quad (19)$$

نتایج و بحث

نتایج افت فشار هوا و شکر

آنالیز واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که تاثیر طول انتقال، دبی جرمی ذرات شکر و سرعت هوای ورودی و اثر متقابل آن‌ها و اثر متقابل سه گانه فاکتورها، بر افت فشار هوا و شکر در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۲).

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

اثر متقابل طول، سرعت هوای ورودی و دبی جرمی شکر بر میانگین‌های افت فشار هوا و شکر در شکل (۳) نشان داده شده است. در تمامی طول‌های انتقال، با افزایش سرعت هوای ورودی و به تبع آن افزایش سرعت

کهنسال مکوندی و همکاران: ارزیابی برخی پارمترهای موثر در...

می کند لذا در کمترین طول انتقال، تاثیر تغییر دبی جرمی بر افت فشار کل کم است و با افزایش طول، تاثیر سایر افت ها افزایش پیدا می کند. در سایر حالت ها اختلاف بین میانگین های افت فشار ناشی از اثر دبی جرمی، در سطح ۵ درصد معنی دار است. بر اساس شکل (۳) با افزایش طول در هر دبی جرمی و سرعت افت فشار به طور معنی داری افزایش پیدا می کند. بررسی نمودار و آنالیز رگرسیونی داده ها با نرم افزار SPSS نشان می دهد که رابطه بین افت فشار با طول انتقال (L) به صورت تابع خطی (رابطه ۱۹) است. ایمان مهر در سال ۱۳۸۷ و فتحی در سال ۱۳۸۹ پس از ساخت دستگاه انتقال نیوماتیک، به ترتیب برای کلزا و محصولات کشاورزی دانه ای نشان دادند که اثر متقابل طول لوله، دبی جرمی و سرعت هوا بر افت فشار معنی دار است (۱۰ و ۹).

مطابق شکل (۳) بین میانگین های افت فشار در دبی جرمی ۱۶۰ و ۱۸۰ کیلوگرم بر ساعت در طول ۲ متر از لحاظ آماری اختلاف معنی داری وجود ندارد که علت آن این است که برخی از افت فشارها مانند افت فشار ناشی از شتاب مواد یا افت فشار زانویی مستقل از طول است. همچنین از نظر تئوری بیشترین افت فشار (جدول ۱) مربوط به افت فشار ناشی از شتاب مواد است (رابطه ۱۰) که در طول ۲ متر لوله (۱۶۶/۷۴ پاسکال) ۱۲/۳۶ برابر افت فشار تعلیق مواد (۱۴/۹۳ پاسکال)، ۷/۶۸ برابر افت فشار تعلیق هوا (۲۱/۷۱ پاسکال)، ۱۱/۷۵ برابر اصطکاکی مواد (۱۴/۱۹ پاسکال) و ۱/۵ برابر افت فشار ناشی از جریان هوا (۱۱۸/۸ پاسکال) محاسبه شد (با مقایسه عداد به دست آمده از روابط ۱۰، ۱۵، ۱۶، ۸ و ۱۲). با افزایش طول به ۶ متر این نسبت به ترتیب برای افت فشارهای ناشی از تعلیق مواد، هوا، اصطکاکی مواد و جریان هوا به مقادیر ۴/۱۲، ۲/۵۶، ۳/۹۲ و ۴/۱۲ برابر کاهش پیدا

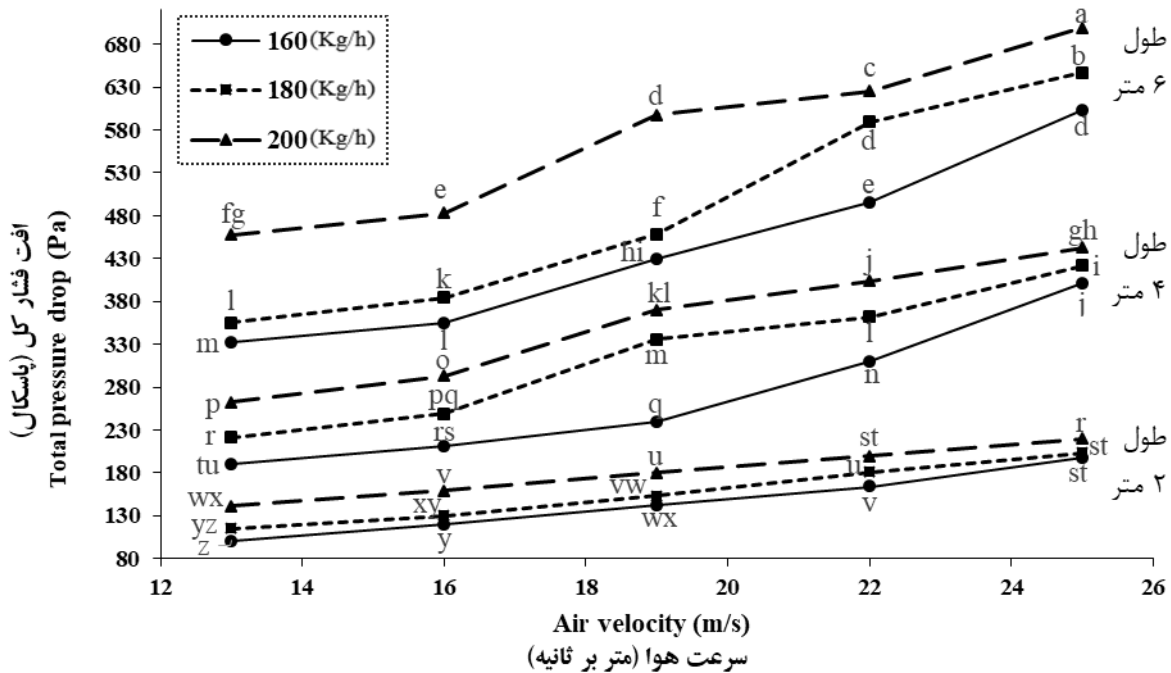
جدول (۲) نتایج تجزیه واریانس میانگین مربعات افت فشار هوا و شکر اندازه گیری شده

Table (2) The analysis of variance of air and sugar pressure drop

میانگین مربعات Mean square	درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variation
افت فشار (Pa) Pressure drop		
1305554.6**	2	طول لوله Pipe length
77794.48**	2	دبی جرمی شکر Sugar mass flow rate
154186.75**	4	سرعت هوا Air velocity
9286.32**	4	طول لوله × دبی جرمی شکر Pipe length × Sugar mass flowrate
13465.1**	8	طول لوله × سرعت هوا Pipe length × Air velocity
1383.88**	8	دبی جرمی شکر × سرعت هوا Sugar mass flowrate × Air velocity
653.26**	16	طول لوله × دبی جرمی شکر × سرعت هوا Pipe length × Sugar mass flowrate × Air velocity
83.85	90	خطا Error

***، * و ns به ترتیب معنی داری در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی داری می باشد.

** Significant at the 1% error level, * Significant at the 5% error level and ns No Significant differences



شکل (۳) نمودار اثر متقابل سرعت هوا، دبی جرمی شکر و طول لوله بر میزان افت فشار کل

Figure (3) The interaction between the air velocity, sugar mass flow rate and pipe length on total pressure drop

پراکندگی می‌شود. لذا با توجه به معنی‌دار شدن اثرات فاکتورهای اصلی و متقابل دو گانه بین سرعت هوا و دبی جرمی، به بررسی و مقایسه‌ی اثر متقابل دو گانه سرعت هوا و دبی جرمی بر خصوصیات کیفی نمونه پرداخته شد.

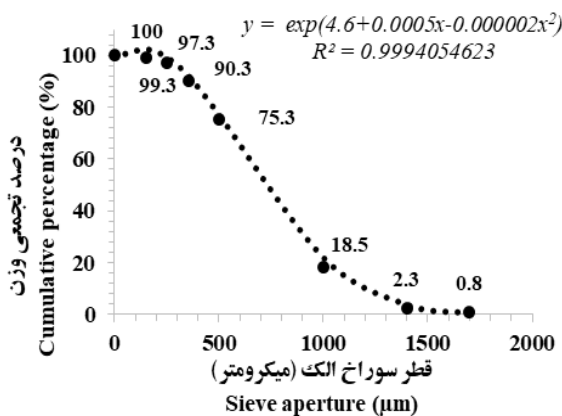
نتایج اندازه‌گیری خواص کیفی شکر اولیه

نمودار درصد وزنی اندازه‌گیری شده نسبت به قطر سوراخ الک‌ها برای ۱۰۰ گرم شکر از نمونه اولیه (قبل از انتقال توسط نقاله) در شکل (۴) رسم شده است. همچنین مقادیر پارامترهای کیفی نمونه اولیه شکر در جدول (۳) نشان داده شده است. برای بقیه تیمارهای آزمایش به همین ترتیب مقادیر MA و CV به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد.

مقایسه‌ی تغییرات قطر میانگین (MA) و ضریب

پراکندگی (CV)

آنالیز واریانس داده‌ها نشان می‌دهد که تاثیر طول انتقال، دبی جرمی ذرات شکر، سرعت هوای ورودی و اثر متقابل دبی جرمی و سرعت هوا، بر خواص کیفی شکر در سطح ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۴). با توجه به جدول اثرات دو گانه و سه گانه طول بر خصوصیات کیفی معنی‌دار نشد و فقط اصلی طول معنی‌دار شده است. واضح است که با افزایش طول سایش ذرات بیشتر شده و باعث کاهش قطر میانگین و افزایش ضریب



شکل (۴) نمودار درصد تجمعی میزان شکر باقی مانده روی هر الک

Figure (4) The diagram of The cumulative percentage of remaining sugar on each sieve

کهنسال مکوندی و همکاران: ارزیابی برخی پارامترهای موثر در...

جدول (۳) مقادیر پارامترهای کیفی نمونه اولیه شکر
Table (3) Quality parameters of sugar Initial sample

$D_{50\%} = MA$ (μm)	$D_{16\%}$ (μm)	CV (%)
809.76	1295.96	60.54

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس خواص کیفی اندازه‌گیری شده
Table (4) The analysis of variance of the qualitative properties

میانگین مربعات Mean squares		درجه آزادی df	منابع تغییرات Source of variations
ضریب یکنواختی (CV)	قطر میانگین (MA)		
116.54**	21911.29**	2	طول لوله Pipe length
255.76**	59838.62**	2	دبی جرمی شکر Sugar mass flow rate
231.14**	63006.44**	4	سرعت هوا Air velocity
1.186 ^{n.s}	188.89 ^{n.s}	4	طول × دبی جرمی شکر Pipe length × Sugar mass flow rate
0.383 ^{n.s}	74.5 ^{n.s}	8	طول × سرعت هوا Pipe length × Air velocity
12.62**	1384.4**	8	دبی جرمی شکر × سرعت هوا Sugar mass flow rate × Air velocity
0.127 ^{n.s}	31.88 ^{n.s}	16	طول × دبی جرمی × سرعت هوا Pipe length × Mass flow rate × Air velocity
2.376	52.85	90	خطا Error

**، * و ns به ترتیب معنی‌داری در سطح ۱ درصد، ۵ درصد و عدم معنی‌داری می‌باشد.

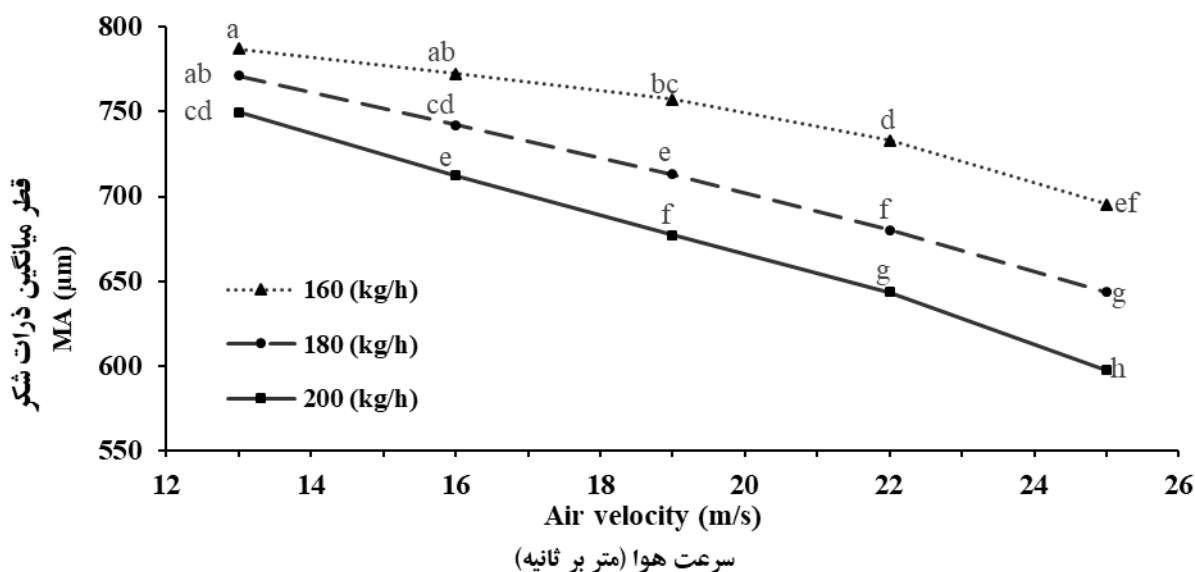
** Significant at the 1% error level, * Significant at the 5% error level and ns No Significant differences

میانگین‌های قطر میانگین اختلاف معنی‌داری در سطح ۵ درصد برقرار است.

در هر سرعت نیز با افزایش دبی جرمی قطر میانگین کاهش و ضریب پراکندگی افزایش یافت. با افزایش دبی جرمی تاثیر سرعت هوا بر کاهش قطر میانگین و افزایش ضریب تغییرات بیشتر می‌شود و در سرعت‌های بالا تاثیر دبی جرمی نمایان تر می‌شود (شکل ۶ و ۵).

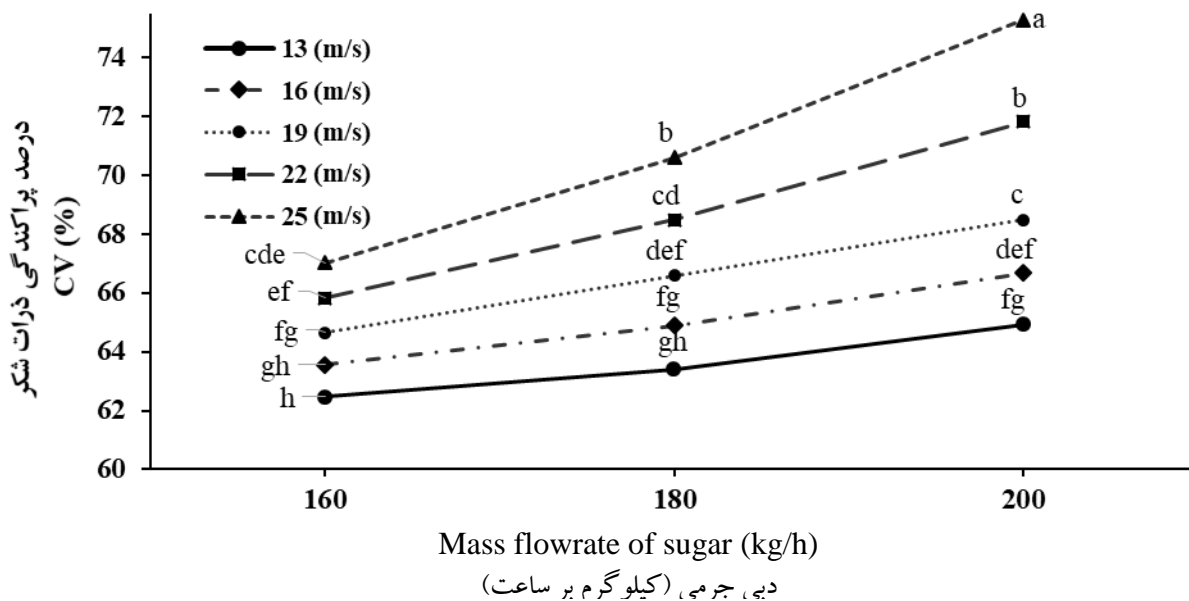
اثر متقابل دبی جرمی شکر و سرعت هوای ورودی بر قطر میانگین و ضریب پراکندگی

با افزایش سرعت در هر دبی جرمی، مقدار قطر میانگین و ضریب پراکندگی به صورت معنی‌داری به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. مطابق شکل (۵) در هر دو سرعت متوالی، بین میانگین‌های قطر میانگین در دبی جرمی ۱۶۰ کیلوگرم بر ساعت از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری وجود ندارد که دلیل آن کم بودن دبی جرمی (رقیق‌ترین حالت آزمایش) می‌باشد. در سایر حالات بین



شکل (۵) نمودار اثر متقابل سرعت هوا و دبی جرمی شکر بر تغییرات قطر میانگین

Figure (5) The diagram of interaction between the air velocity and sugar mass flow rate on MA



شکل (۶) نمودار اثر متقابل سرعت هوا و دبی جرمی شکر بر تغییرات ضریب پراکندگی در اندازه ذرات شکر

Figure (6) The diagram of the interaction between the air velocity and sugar mass flow rate on CV

سبب افزایش مقدار بارهای برشی و سایشی بین ذرات می شود. شاپل و همکاران^۱ (۴) با ارائه مدلی برای پیشبینی میزان تنزل رتبه^۲ مواد در انتقال نئوماتیک فاز رقیق، نشان دادند که نیروی اصطکاکی بین لایه ذرات

مهمترین علت آن این است که با افزایش دبی جرمی، مقداری از ذرات ته نشین شده و لایه ای از ذرات در کف لوله تشکیل می شود که با سرعتی کمتر از سرعت جریان هوا و دیگر ذرات معلق حرکت می کنند. با افزایش هر چه بیشتر دبی جرمی، مقدار این لایه و اختلاف سرعت آن با سرعت جریان بیشتر می شود که

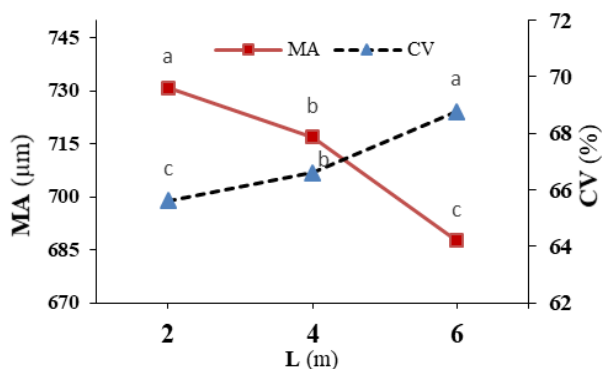
1- Chapelle *et al.*
2- Degradation

از رابطه (۱۹) نسبت به L ، M_s و V_a مشتق گرفته شد تا ضریب حساسیت افت فشار بر هر کدام از تیمارها مشخص شود. میانگین مقدار مشتق به دست آمده برای هر کدام از تیمارها در سطوح و تکرارهای آزمایش، در جدول (۵) به عنوان ضریب حساسیت به فشار آن تیمار آورده است. در حقیقت این ضرایب شدت تاثیر هر کدام از تیمارها بر ΔP ، CV و MA را نشان می‌دهد. چون اثر متقابل L بر CV و MA معنی‌دار نبود از تحلیل همبستگی و برازش خطی استفاده شد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشترین تاثیر را تیمار سرعت بر تغییرات فشار و دو خصوصیت کیفی شکر یعنی اندازه ذرات و ضریب پراکندگی به ترتیب با مقدار ۱۶/۵۷، ۰/۷۶- و ۰/۶۷۸ و کمترین تاثیر را طول داشت.

تشکیل شده در کف لوله و ذرات معلق، با مربع اختلاف سرعت حرکت آن دو رابطه دارد. اثر طول لوله بر قطر میانگین و ضریب پراکندگی اثر طول لوله بر قطر میانگین و ضریب پراکندگی در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس این شکل بین میانگین‌های قطر میانگین و ضریب پراکندگی در تمام حالات از لحاظ آماری در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود دارد. با سه برابر شدن طول لوله، قطر میانگین ۵/۹ درصد کاهش و ضریب پراکندگی ۴/۸ درصد افزایش پیدا کرده است. زیرا ذرات شکر در اثر سایش و برخورد با دیواره لوله دچار شکستگی و خردگی می‌شوند. افزایش طول لوله و مدت زمان حرکت ذرات درون آن، فرصت بیشتری به شکر برای سایش و برخورد با دیواره و سایش با یکدیگر می‌دهد (۱۶).

جهت بررسی تعیین تاثیر تغییر هر کدام از تیمارهای طول (L)، دبی (M_s) و سرعت هوا (V_a) بر مقادیر ΔP



شکل (۷) نمودار تغییرات قطر میانگین (MA) و ضریب پراکندگی ذرات (CV) شکر در سطوح مختلف طول لوله
Figure (7) The diagram of MA and CV variation of sugar at different levels of pipe length

جدول (۵) ضریب حساسیت ΔP ، CV و MA به طول لوله (L)، سرعت هوا (V_a) و دبی جرمی شکر (M_s).

Table (5) Sensitivity coefficients of ΔP ، CV and MA to the pipe length (L)، air velocity (V_a) and sugar mass flow (M_s).

Sensitivity	L	M_s	V_a	R^2
ΔP	9.09	9.59	16.57	0.985
MA	-0.312	-0.525	-0.76	0.949
CV	0.335	0.505	0.678	0.823

نتیجه گیری

ضریب حساسیت، مشخص شد که سرعت نسبت به دیگر پارامترهای انتقال (طول و دبی جرمی) بیشترین تاثیر را بر تغییر خواص کیفی شکر دارد. از میان ۵ سرعت هوای ورودی سرعت ۱۳ متر بر ثانیه با ایجاد ۵/۱۹ درصد کاهش در قطر میانگین و ۶/۶۹ درصد افزایش در مقدار ضریب پراکندگی نسبت به نمونه ی اولیه شکر، کمترین تاثیر را بر اندازه و میزان پراکندگی ذرات دارد که در طراحی سیستم انتقال نئوماتیک شکر با این طول و دبی جرمی مشخص به عنوان بهترین سرعت در این محدوده معرفی می شود.

۵- با افزایش دبی جرمی ذرات از ۱۶۰ به ۲۰۰ کیلوگرم بر ساعت، مقادیر MA و CV به دلیل افزایش تراکم ذرات در اثر افزایش دبی جرمی و برخورد بیشتر بین ذره‌ای و دیواره و همچنین برخورد شدیدتر ذرات باد یکدیگر و دیواره به دلیل سرعت ذرات، به ترتیب ۱۶/۴۹ درصد کاهش و ۱۴/۷۵ درصد افزایش یافت.

نتایج حاصل از این مطالعه به ترتیب کار عبارتند از:

- ۱- آنالیز واریانس داده‌های افت فشار هوا نشان می‌دهد که تاثیر طول انتقال، دبی جرمی مواد و سرعت هوای ورودی بر افت فشار هوا و افت فشارکل در سطح اطمینان یک درصد معنی‌دار است و با افزایش این مقدار این تیمارها افت فشار افزایش می‌یابد و با مقایسه ضریب حساسیت آنها بر تغییرات فشار مشخص شد، سرعت بیشترین تاثیر مثبت را دارد.
- ۲- آنالیز واریانس داده‌ها نشان داد که تاثیر طول انتقال، دبی جرمی ذرات شکر، سرعت هوای ورودی و اثر متقابل دبی جرمی و سرعت هوا، بر خواص کیفی شکر در سطح ۱ درصد معنی‌دار است.
- ۳- طول لوله با کاهش ۵/۹ درصدی در قطر میانگین و افزایش ۴/۸ درصدی ضریب پراکندگی نسبت به نمونه‌ی شکر اولیه کمترین تاثیر را بر این دو خواص کیفی شکر داشت.
- ۴- با افزایش سرعت هوای ورودی از ۱۳ به ۲۵ متر بر ثانیه، مقادیر MA و CV به ترتیب ۲۰/۲۷ کاهش و ۱۷/۲۲ افزایش یافت و با توجه به نتایج مربوط به

منابع

1. Anonymous. 1393 Association of sugar factories of Iran. Total sugar production from beet and cane 2014. (In Persian).
2. Asadi, M. 2006. Beet-sugar handbook. John Wiley and Sons. 966 PP.
3. 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 PP.
4. Chapelle, P., Abou-Chakra, H., Christakis, N., Patel, M., Abu-Nahar, A., Tüzün, U., and Cross, M. 2004. Computational model for prediction of particle degradation during dilute-phase pneumatic conveying: the use of a laboratory-scale degradation tester for the determination of degradation propensity. *Advanced Powder Technology*, 15(1): 13-29.
5. Crane, J.W. and Carleton, W.M. 1957. Predicting pressure drop in pneumatic conveying of grains. *Agricultural Engineering*, 37(3): 168-171.

6. Crowe, C.T. 1982. Review—numerical models for dilute gas-particle flows. *Journal of Fluids Engineering*, 104(3): 297-303.
7. Dukhin, A.S., and Goetz, P.J. 2006. How non-ionic “electrically neutral” surfactants enhance electrical conductivity and ion stability in non-polar liquids. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 588(1): 44-50.
8. Eskin, D. 2005. Modeling dilute gas-particle flows in horizontal channels with different wall roughness. *Chemical Engineering Science*, 60(3): 655-663.
9. Fathi, S. 1389. Designing and manufacturing of non-metallic conveyor for specialty products. M.Sc. Thesis. Faculty of Agriculture, Tabriz University. Pages 68 and 94. (In Persian).
10. Imam Mahr, A, and Ghobadian, B. 2008, Designing, Construction, and Evaluation of Neuromatic Conveyor of Rape Seeds in the Release Phase, 5th National Congress of Agricultural Machinery and Mechanization, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian).
11. Iraqi, M. 1373. Investigation and design of suction picking system of seeds of rangeland plants, M.Sc. thesis. School of Agriculture. Tarbiat Modares University. P. 21. (In Persian).
12. Klinzing, G.E., Rizk, F., Marcus, R., and Leung, L.S. 2011. *Pneumatic conveying of solids: a theoretical and practical approach (Vol. 8)*. Springer Science and Business Media. 216 PP.
13. Kqnnno, H., and Saito, S. 1969. Pneumatic conveying of solids through straight pipes. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 2(2): 211-217.
14. Tripathi, N.M., Levy, A., and Kalman, H. 2018. Acceleration pressure drop analysis in horizontal dilute phase pneumatic conveying system. *Powder Technology*, 327: 43-56.
15. Marcus, R.D. 2012. *Pneumatic conveying of solids*. Springer Science and Business Media.
16. Mills, D. 2004. *Pneumatic conveying design guide*. Second Edition Butterworth-Heinemann. 650 PP.
17. Mills, D., Jones, M.G., and Agarwal, V.K. 2004. *Handbook of pneumatic conveying engineering*. CRC Press. New York 12701, U.S.A. 720 PP.
18. Misra, M.K. 1986. *Conveyors for bulk handling of seed*. Agriculture and Environment Extension Publications. 162 PP.
19. Mohsenin, N.N. 1970. *Structure, physical characteristics and mechanical properties*, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 891 PP.
20. Raheman, H.I., and Jindal, V.K. 2001(a). Pressure drop gradient and solid friction factor in horizontal pneumatic conveying of agricultural grains. *Applied Engineering in Agriculture*, 17(5): 649–656.

21. Ranganna, S. 1977. Manual of analysis of fruit and vegetable products. Tata McGraw-Hill, 634 PP.
22. Rhodes, M.J. 2008. Introduction to particle technology. John Wiley and Sons. Second Edition. 320 PP.
23. 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.
24. Thorn, J. O. 2011. Pneumatic conveying in sugar production. American Society of Sugar Beet Technologists, Proceedings from the 36th Biennial Meeting, March 2-5, Albuquerque, New Mexico, USA.
25. Wen-Ching, Y. 2003. Handbook of fluidization and fluid-particle systems. China Particuology. CRC press, 878 PP.
26. warbosa, R., and Pinho, C. 2018. Dilute phase vertical pneumatic conveying of cork stoppers. Revista de Engenharia Térmica, 5(2): 36-41.