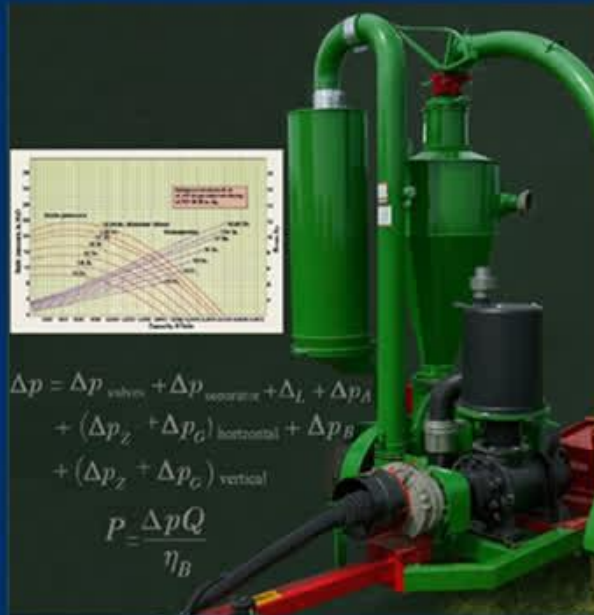


نشریه فنی:

اصول طراحی نقاله‌های نیوماتیکی در کشاورزی

عبداله ایمان مهر و محسن حیدری سلطان آبادی



بسم الله الرحمن الرحيم
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی
اصول طراحی مقاله‌های نیوماتیکی در کشاورزی

تهیه و تدوین:
عبداله ایمان‌مهر و محسن حیدری سلطان‌آبادی
اعضای هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع
طبیعی استان اصفهان

سال انتشار:

۱۴۰۵



وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی



نوع نوشتار: نشریه فنی

عنوان نوشتار: اصول طراحی نقاله‌های نیوماتیکی در کشاورزی

نگارندگان: عبدالله ایمان مهر و محسن حیدری سلطان‌آبادی

ویراستار ادبی: محمدرضا داهی

صفحه‌آرا: شبنم جباری

طراح جلد: سمیه وطن‌دوست

ناشر: مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

شمارگان: محدود

نوبت چاپ: اول

سال انتشار: ۱۴۰۵



مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ۶۹۶۴۳ در مرکز فناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ۱۴۰۵/۰۴/۲۸

مخاطبان نشریه فنی

- کارشناسان و متخصصان کشاورزی
- فعالان در برنامه‌ریزی فرآوری محصولات غذایی
- مدیران و مسئولان فنی مکانیزاسیون

هدف‌های آموزشی

- مطالعه جنبه‌های تئوری طراحی و ویژگی‌های عملیاتی نقاله‌های نیوماتیکی در انتقال مواد کشاورزی.
- تحلیل رفتار جریان و نیروهای مؤثر بر انتقال مواد با توجه به تنوع گسترده محصولات کشاورزی.
- بهینه‌سازی پارامترهای طراحی برای تضمین کیفیت محصول و افزایش بازده انتقال و مصرف بهینه انرژی.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه و دامنه کاربرد.....	۱
خواص فیزیکی و آئرودینامیکی مواد کشاورزی	۲
خواص مهم فیزیکی	۲
خواص مهم آئرودینامیکی.....	۴
آزمون‌های مواد کشاورزی	۵
اجزای سیستم انتقال نیوماتیکی	۷
تعیین پارامترهای طراحی نقاله‌های نیوماتیکی	۱۴
طراحی نقاله نیوماتیکی فاز رقیق	۱۵
سرعت هوای ورودی.....	۱۷
جریان گاز در لوله	۱۹
اُفت فشار انتقال	۲۰
اُفت فشار در انتقال افقی.....	۲۱
توان دمنده	۲۵
انتخاب قطر لوله انتقال	۲۵
طراحی و تحلیل موردی یک سیستم انتقال نیوماتیکی در فاز رقیق.....	۲۵
فهرست منابع.....	۳۰

مقدمه و دامنه کاربرد

نقاله‌های نیوماتیکی (انتقال‌دهنده‌های بادی) از مهم‌ترین فناوری‌های انتقال مواد توده‌ای در صنایع کشاورزی محسوب می‌شوند. این سیستم‌ها با استفاده از جریان هوا، مواد دانه‌ای یا پودری مانند گندم، برنج، ذرت، آرد و خوراک دام را در مسیرهای افقی، عمودی یا ترکیبی جابه‌جا می‌کنند. برخلاف نقاله‌های مکانیکی مانند بالابرهای زنجیری یا ماریچی، نقاله‌های نیوماتیکی به دلیل انعطاف بالا در مسیر، کاهش آلودگی، بسته بودن مسیر انتقال و کنترل آسان دبی ماده، مزیت‌های قابل توجهی دارند (کلینزینگ و همکاران، ۲۰۱۴). طراحی سیستم نیوماتیکی برای مواد مختلف کشاورزی باید بر اساس تحلیل مشخصات فیزیکی آن ماده صورت گیرد. علاوه بر این، از منظر صنعتی، استفاده از نقاله‌های نیوماتیکی در خطوط بسته صنایع غذایی و خوراک دام، علاوه بر انعطاف بالا، امکان بهداشتی‌تر بودن، کاهش آلودگی محیط و کارایی بهتر در مسیرهای دارای شیب یا ارتفاع را فراهم می‌آورد (سازمان غذا و داروی آمریکا، ۲۰۲۴). مثلاً در کاربردهایی که محصول حساس به شکست است مانند دانه‌های روغنی یا بذرهایی که باید قابلیت جوانه‌زنی‌شان حفظ شود استفاده از حالت انتقال فشرده (غلیظ)^۱ به جای حالت رقیق^۲ پیشنهاد می‌شود تا سرعت پایین‌تر ذره‌ها و تماس کمتر با دیواره‌ها باعث کاهش آسیب گردند (ایمان‌مهر و همکاران، ۱۳۸۶). در پروژه‌های اخیر، تمرکز بیشتری بر ادغام سیستم‌های نیوماتیکی با حسگرها، کنترل هوشمند، و فناوری‌های صنعت وجود دارد که برای بخش کشاورزی نیز می‌تواند مزایای مضاعف به همراه داشته باشد (اب و همکاران، ۲۰۲۳). با توجه به اهمیت نقاله‌ها در بخش کشاورزی، بررسی جنبه‌های طراحی آنها بااهمیت است. از دیدگاه طراحی، نقاله نیوماتیکی بر پایه دو جریان هم‌زمان هوا و ماده استوار است که تعامل پیچیده‌ای میان نیروهای کشش، اصطکاک و مقاومت ذرات درون جریان هوا ایجاد می‌شود. این تعامل باعث می‌شود طراحی سیستم به ترکیبی از دانش مکانیک سیالات، فیزیک ذرات و علم مواد کشاورزی نیاز داشته باشد. در

1. Dense Phase

2. Dilute Phase

کاربردهای کشاورزی، یکی از دغدغه‌های اصلی، به حداقل رساندن آسیب مکانیکی به موادی مانند دانه‌ها در حین انتقال است. آسیب‌های ناشی از برخورد در زانو‌ها و نواحی تغییر مسیر می‌تواند موجب کاهش قوه نامیه بذر، شکستگی دانه و افت کیفیت محصول شود (گونر، ۲۰۰۷). از طرف دیگر، کاهش مصرف انرژی و حفظ یکنواختی جریان ماده در طول خط از دیدگاه اقتصادی اهمیت دارد. بنابراین، طراحی بهینه مستلزم درک دقیق از پارامترهای تئوری مانند سرعت بحرانی، افت فشار، و نسبت هوا به جامد است (اب و همکاران، ۲۰۲۳).

خواص فیزیکی و آنرودینامیکی مواد کشاورزی

شناخت دقیق خواص فیزیکی و آنرودینامیکی مواد کشاورزی پیش‌نیاز طراحی بهینه سیستم‌های انتقال نیوماتیکی است. این خواص نحوه رفتار ذرات در جریان هوا، نوع سیستم انتقال (فاز رقیق یا فشرده)، انرژی مصرفی، سایش تجهیزات و میزان آسیب به محصول را تعیین می‌کنند.

خواص مهم فیزیکی

الف) چگالی توده^۱

چگالی توده بیانگر جرم ماده در واحد حجم توده‌ای (شامل فضاهاى خالی بین ذرات) است و معمولاً بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب بیان می‌شود و از روش پر کردن ظرف با حجم مشخص از ماده، بدون کوبش یا فشار و توزین آن تعیین می‌شود. این پارامتر مستقیماً در محاسبه دبی جرمی انتقال و انتخاب قطر لوله مؤثر است. مواد با چگالی توده بالا نیازمند فشار و انرژی بیشتر برای انتقال هستند.

1. Bulk Density

ب) اندازه و توزیع ذرات^۱

اندازه ذرات تأثیر زیادی بر مقاومت در برابر جریان هوا، جدایی ذرات و سرعت ته‌نشینی دارد و برای تعیین آن از الک‌های استاندارد^۲ یا روش‌های لیزری اندازه‌گیری ذرات استفاده می‌شود. در تعیین نوع فاز انتقال، ذرات بسیار ریز معمولاً در فاز رقیق و ذرات درشت‌تر در فاز فشرده منتقل می‌شوند.

ج) قطر معادل^۳

برای ذرات نامنظم، قطر معادل (d_{eq}) به‌عنوان قطر کره‌ای تعریف می‌شود که دارای حجمی برابر با ذره واقعی است و بر اساس روابط هندسی یا از طریق تصویربرداری و آنالیز دیجیتالی ذرات به‌دست می‌آید. این قطر رایج‌ترین نوع قطر معادل برای محاسبات دینامیک سیالات و انتقال مواد است و در محاسبه عدد رینولدز ذره (Re_p) استفاده می‌شود. Re_p تعیین‌کننده اصلی ضریب درگ (C_d)، سرعت حد (v_t) و دینامیک حرکت ذرات است، در حالی که عدد رینولدز خط جریان در لوله (Re_{pipe}) برای محاسبه افت فشار اصطکاکی خط لوله و انتخاب دمنده به کار می‌رود.

$$Re_p = \frac{\rho_f v d_{eq}}{\mu} \quad (۱)$$

که در آن:

ρ_f : چگالی سیال (kg/m^3)،

v : سرعت نسبی سیال نسبت به ذره (m/s)،

d_{eq} : قطر معادل (حجمی) ذره (m)، و

μ : گرانروی دینامیکی سیال (N.s/m^2) است.

د) رطوبت^۴

-
1. Particle Size & Distribution
 2. Sieve Analysis
 3. Equivalent Diameter
 4. Moisture Content

رطوبت تأثیر قابل توجهی بر چسبندگی، اصطکاک، تراکم‌پذیری و آسیب‌پذیری ماده دارد. افزایش رطوبت باعث افزایش چسبندگی و خطر گرفتگی لوله‌ها می‌شود. رطوبت با روش خشک کردن در آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد تا وزن ثابت تعیین می‌شود.

(ه) سفتی و شکنندگی^۱

این خواص تعیین‌کننده میزان آسیب‌دیدگی محصول (مانند خرد شدن یا ترک برداشتن دانه‌ها) در اثر برخورد با لوله یا ذرات دیگر است و با استفاده از دستگاه پرس با نیروی فشاری ثابت یا تست ضربه تعیین می‌شود. برای مواد حساس (مثل بذرها)، سیستم باید با حداقل شکستگی طراحی شود (انجمن مهندسان کشاورزی و زیستی آمریکا، ۲۰۰۶).

(و) ضریب اصطکاک^۲

ضریب اصطکاک سطحی بین ماده و جداره لوله نقشی مهم در تعیین اُفت فشار و انتخاب جنس لوله دارد و با روش آزمون لغزش روی سطح با زاویه شیب متغیر به‌دست می‌آید. کاهش اصطکاک سبب کاهش اُفت فشار و افزایش بازدهی انرژی می‌شود.

خواص مهم آئرودینامیکی

(الف) سرعت حد^۳

سرعت حد سرعتی است که در آن نیروی مقاومت هوا برابر با نیروی وزن ذره می‌شود و با روش رهاسازی ذرات در ستون هوای با جریان خطی کنترل‌شده و اندازه‌گیری سرعت تعادل با استفاده از حسگر یا کروномتر نوری به‌دست می‌آید. سرعت حد برای طراحی سرعت هوای مناسب در لوله‌های نیوماتیکی و جلوگیری از ته‌نشینی یا پرتاب بیش از حد ذرات به‌کار می‌رود. به طور معمول، در فاز رقیق سرعت هوای ورودی ۲ تا ۲/۵ برابر سرعت حد

1. Hardness & Brittleness

2. Coefficient of Friction

3. Terminal Velocity

اصول طراحی نقاله‌های نیوماتیکی در کشاورزی

ذرات تنظیم می‌شود. این بازه تجربی افزایش سرعت هوا به قطر لوله، نسبت بار مواد و زیری دیواره لوله وابسته است.

(ب) ضریب مقاومت (C_d)

این ضریب میزان مقاومت آئرودینامیکی ذره در برابر جریان هوا را نشان می‌دهد و تابعی از عدد رینولدز، شکل ذره و زبری سطح است. ضریب مقاومت از روابط تجربی یا از داده‌های آزمایش سرعت حد محاسبه می‌شود و در مدل‌سازی جریان چندفازی و شبیه‌سازی جریان مواد برای بهینه‌سازی مسیر انتقال به کار می‌رود.

آزمون‌های مواد کشاورزی

خواص فیزیکی و آئرودینامیکی مواد کشاورزی از طریق اجرای آزمون‌های استاندارد تعیین می‌گردد. برای ارزیابی عملکرد نقاله نیوماتیکی، انجام مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد توصیه می‌شود. در جدول ۱ نمونه‌ای از روش‌های استاندارد ارائه شده است. در جدول ۲ برخی از خواص فیزیکی محصولات کشاورزی ارائه شده است (کلینزینگ و همکاران، ۲۰۱۴؛ محسنین، ۱۹۸۶؛ گونر، ۲۰۰۷؛ دوتا و همکاران، ۱۹۸۸؛ نیمکار و چاتوپادهیا، ۲۰۰۱).

جدول ۱- روش‌های استاندارد آزمون مواد

نوع آزمون	هدف	روش استاندارد پیشنهادی
چگالی توده	تعیین جرم حجمی موثر	ASTM D7481
اندازه و توزیع ذرات	تعیین یکنواختی دانه‌بندی	ASTM E11
رطوبت	بررسی شرایط نگهداری و انتقال	ASAE S352
سرعت حد	تعیین شرایط جریان هوا	روش ستونی یا تونل باد کوچک
ضریب اصطکاک	تحلیل اُفت فشار	آزمون سطح شیبدار
شکنندگی	ارزیابی مقاومت دانه	آزمون ضربه یا فشار تدریجی

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و آنرویدینامیکی مواد کشاورزی

گروه محصول	نوع محصول	چگالی دانه (kg/m^3)	چگالی توده (kg/m^3)	قطر معادل (mm)	رطوبت (%W)	سرعت حد (m/s)	ضریب مقاومت
غلات	گندم	۱۳۲۰-۱۴۰۰	۷۸۰-۸۲۰	۳/۵-۴/۲	۱۰-۱۲	۹/۵-۱۰/۳	۰/۴۴-۰/۴۷
	برنج (پوست کنده)	۱۲۵۰-۱۳۵۰	۷۰۰-۷۶۰	۴-۴/۸	۱۲-۱۴	۸/۸-۹/۴	۰/۴۵
	ذرت	۱۱۸۰-۱۲۵۰	۷۲۰-۷۸۰	۶/۵-۷	۱۲-۱۵	۱۰-۱۱/۲	۰/۴۳
حبوبات	نخود	۱۳۰۰-۱۳۸۰	۸۲۰-۸۷۰	۷-۸	۱۱-۱۳	۱۱/۵-۱۲	۰/۴۱
	عدس	۱۲۲۰-۱۲۸۰	۷۶۰-۸۱۰	۴/۵-۵/۲	۱۰-۱۲	۹-۹/۷	۰/۴۶
خوراک دام	ذرت خرد شده	۱۰۰۰-۱۱۰۰	۵۵۰-۶۰۰	۱/۵-۲/۵	۸-۱۰	۷-۸/۵	۰/۵۵
	سبوس گندم	۶۵۰-۷۵۰	۳۰۰-۴۰۰	۰/۵-۱	۸-۱۰	۵/۵-۶/۸	۰/۶-۰/۶۵
	پلت خوراک دام	۱۰۵۰-۱۱۵۰	۶۰۰-۶۵۰	۴-۵	۱۰-۱۲	۸-۹/۲	۰/۴۸

نوع و خواص مواد بر پارامترهای طراحی تأثیرگذار است. در جدول ۳ خواص و اثرهای آنها بر انتخاب پارامترهای طراحی فهرست شده است.

جدول ۳- اثرهای خواص ماده بر انتخاب پارامترهای طراحی

خاصیت ماده	تأثیر بر طراحی	اقدام اصلاحی
چگالی زیاد	افزایش آفت فشار	افزایش فشار یا قطر لوله
رطوبت بالا	چسبندگی و گرفتگی	کاهش رطوبت یا استفاده از هوای گرم
شکندگی زیاد	آسیب برخورد	انتخاب فاز غلیظ، زانوهای ملایم
ذرات ریز	ته‌نشینی سریع	افزایش سرعت جریان یا کاهش قطر لوله

شناخت خواص فیزیکی و آنرویدینامیکی مواد مبنای انتخاب نوع سیستم انتقال، تجهیزات محرک، تغذیه‌کننده و هندسه خط لوله است. در اینجا اجزای اصلی سیستم انتقال نیوماتیکی (بادی) معرفی می‌شوند.

اجزای سیستم انتقال نیوماتیکی

اساساً اجزای اصلی سیستم‌های انتقال نیوماتیکی فاز غلیظ شامل محرک‌ها یا پیشران گاز^۱، تغذیه‌کننده‌های مواد جامد^۲، خطوط لوله، و جداکننده‌های مواد جامد^۳ هستند. مکان این اجزا در سیستم ممکن است از نوعی به نوع دیگر متفاوت باشد، اما عملکرد آنها یکسان است. محرک گاز، جریان مناسب گاز مورد نیاز را برای انتقال مواد در سرعت و فشار مناسب فراهم می‌سازد. تغذیه‌کننده مواد جامد، ذرات جامد را با سرعت کنترل‌شده‌ای وارد خط لوله می‌کند و در آنجا مواد با گاز انتقال‌دهنده مخلوط می‌شوند. خط لوله از بخش‌های مستقیم افقی و عمودی تشکیل شده که با زانویی‌ها به هم متصل می‌شوند. در انتهای مسیر، در انواع جداکننده جامد از گاز، شتاب مواد جامد کاهش می‌یابد و این مواد از جریان گاز جدا می‌شوند. مواد جداشده در سیلو ذخیره یا به واحد دیگری تغذیه می‌شوند. گاز، که معمولاً هوای معمولی است، در فضای آزاد جو رها می‌شود. اجزای ثانویه شامل کنترل‌ها، تجهیزات ایمنی و ابزار دقیق هستند.

الف) محرک هوا: رایج‌ترین وسیله برای به حرکت درآوردن گاز در سیستم انتقال نیوماتیکی، دمنده گوشواره‌ای دوار نوع روتس^۴ است که بر اساس اصل جابه‌جایی مثبت کار می‌کند. (شکل ۱). دمنده گوشواره‌ای دوار با توجه به برقراری جریان گاز در حالت فشار یا خلأ برای انواع سیستم‌های نیوماتیکی و نیز اقتصادی بودن فرایند، مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، این دمنده دو محدودیت عمده دارد، یکی اینکه راندمان ایزنتروپیک آن به طور مشخصی کمتر از اکثر فن‌ها و کمپرسورها است (معمولاً در محدوده ۵۰ تا ۷۵ درصد) که دلیل اصلی آن نبود مرحله تراکم داخلی و در نتیجه تبدیل بخش قابل توجهی از انرژی ورودی به گرما است، دیگر اینکه به دلیل ماهیت پالسی و ضربه‌ای جریان خروجی ناشی از درگیری متناوب لوب‌ها، این دمنده‌ها نویز آئرودینامیکی شدیدی در محدوده ۸۵ تا ۱۱۰

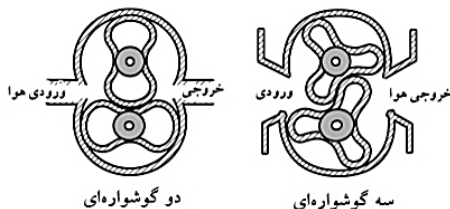
1. Gas movers

2. Solids feeders

3. Solids separators

4. Roots-type, rotary lobe blower

دسی بل تولید می کنند که استفاده از تجهیزات صداگیری (صداگیرهای ورودی و خروجی) را به الزامی فنی و اجتناب ناپذیر در کاربردهای صنعتی تبدیل می کند.



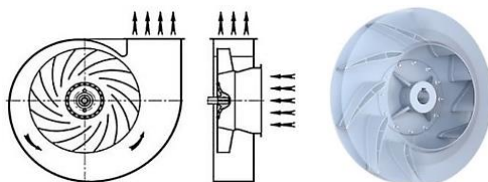
شکل ۱- دمنده گوشواره ای چرخشی نوع روتس

یکی از ویژگی های مهم این نوع دمنده این است که حجم تقریباً ثابتی از هوا را در محدوده فشار کاری خود تأمین می کند. این ویژگی از آن جهت مهم است که کنترل جریان گاز در سیستم انتقال نیوماتیکی برای عملکرد پایدار بسیار اهمیت دارد. دمنده های تک مرحله ای تا ۲۰۰ کیلو پاسکال و دمنده های دو مرحله ای تا حدود ۲۷۰ کیلو پاسکال فشار تولید می کنند. برای نقاله های کم فشار می توان از دمنده های گریز از مرکز یا فن های سانتریفیوژ^۱ به عنوان محرک گاز استفاده کرد (شکل ۲). فن های سانتریفیوژ تک مرحله ای- سرعت بالا^۲، هوا را با فشاری در حدود ۱۲۰ کیلو پاسکال ارسال می کنند و برای جلوگیری از ساییدگی بیش از حد پروانه های سبک، باید هوای تمیز تأمین شود. فن سانتریفیوژ چند مرحله ای با سرعت پایین^۳ می تواند فشاری تا ۱۴۰ کیلو پاسکال ایجاد کند و از آنجایی که با سرعت کمتر کار می کند، در برابر سایش ذرات نسبتاً مقاوم است. در دمنده های سانتریفیوژ نشت هوا بین پروانه و بدنه رخ می دهد و بازه آن معمولاً بین ۲ تا ۶ درصد دبی جریان اسمی است. حداکثر نشت خارجی گزارش شده برای نمونه های کوچک حدود ۲/۷ درصد و با بهینه سازی طراحی می توان توان ورودی را تا حدود ۵/۴ درصد کاهش داد که نشان دهنده تأثیر مستقیم کنترل نشتی بر راندمان است.

1. Centrifugal fans

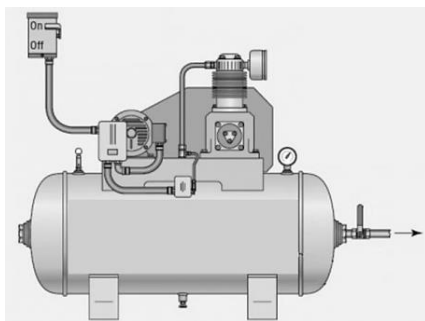
2. High-speed, single-stage centrifugal fans

3. Slower-running, multi-stage, heavy-duty centrifugal fan



شکل ۲- دمنده گریز از مرکز یا فن سانتریفیوژ

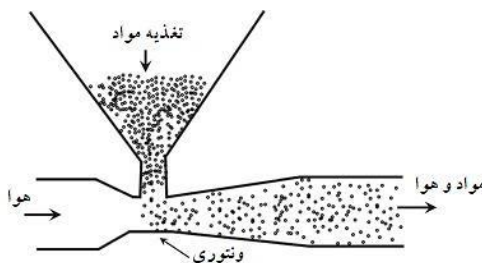
کمپرسورها^۱ جریان هوا را در فشارهای بالا تأمین می‌کنند، اما چون به روان کاری نیاز دارند امکان ورود آلاینده‌های بالقوه به مواد جامد در حال حرکت وجود دارد. کمپرسورها فشاری تا ۸۰۰ کیلو پاسکال تولید می‌کنند و می‌توان با اقدامات خاص، از آنها در انتقال فاز غلیظ و نیز در سیستم‌های فشار بالا استفاده کرد (شکل ۳).



شکل ۳: نمایی از یک کمپرسور هوا

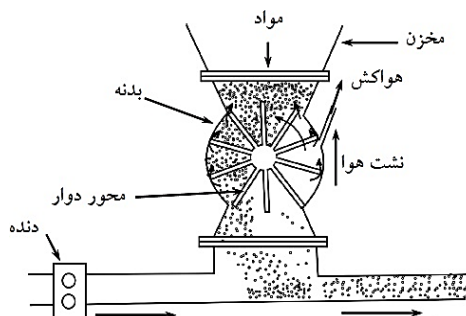
ب) **تغذیه‌کننده‌ها:**^۲ سیستم تغذیه و تخلیه وظیفه دارد جریان یکنواختی از ماده را وارد لوله نیوماتیکی کند. برای عملکرد صحیح سیستم انتقال نیوماتیکی فاز رقیق، مواد جامد ورودی به خط لوله باید به دقت کنترل شوند. دو نوع متداول تغذیه‌کننده‌های انتقال نیوماتیکی شامل تغذیه‌کننده ونتوری^۳ و شیر دوار^۴ یا تغذیه‌کننده ستاره‌ای^۵ است. تغذیه‌کننده ونتوری فقط برای سیستم‌های کم‌فشار مناسب است (شکل ۴).

1. Compressors
2. Feeders
3. Venturi feeder
4. Rotary valve
5. Star feeder



شکل ۴- تغذیه کننده ونتوری

تغذیه کننده شیر دوار یا ستاره‌ای، به طور گسترده برای تغذیه نقاله‌های فشار متوسط استفاده می‌شود. این تغذیه کننده کارآمد و ساده است، اما برای به حداقل رساندن نشت هوا نیاز به طراحی دقیق دارد (شکل ۵).



شکل ۵- تغذیه کننده دوار یا ستاره‌ای

تلفات بیش از حد هوا از تغذیه کننده‌ها باعث هدر رفتن انرژی، ایجاد گرد و غبار و ناپایداری سیستم می‌شود. تغذیه کننده‌های دوار برای پودرهای غیرسایشی جریان پذیر، به خوبی کار می‌کنند و انواع دیگری برای مواد با جریان پذیری دشوارتر موجود است که با نام تغذیه کننده پیچی^۱ و تغذیه کننده پیستونی^۲ در سیستم‌های فشرده شناخته می‌شوند و ویژگی مهم آنها این است که باید از نشت هوا به بیرون جلوگیری کنند و در عین حال دبی ثابت ماده را حفظ کنند.

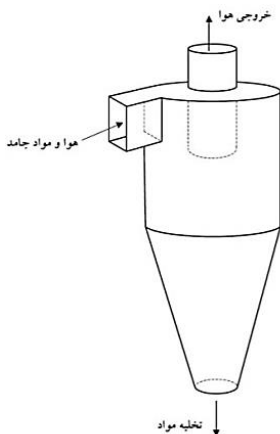
1. Screw Feeder
2. Piston Feeder

ج) **خط انتقال:** خط انتقال عبارت است از لوله‌ها و زانویی‌های فلزی یا پلاستیکی که مخلوط هوا و مواد جامد را از مبدأ تا مقصد انتقال می‌دهند. استفاده از زانویی‌ها و انتخاب نوع آنها بحرانی‌ترین مشکل طراحی خط انتقال است. مشکلاتی که ممکن است با استفاده از زانویی‌ها ایجاد شود شامل خوردگی در اثر سایش^۱، تخریب یا آسیب دیدگی محصول، تجمع محصول و افت فشار هستند. عملکرد زانوها مسئله بعدی در خط انتقال است. به‌طور کلی، استفاده از زانویی‌های صاف و شعاع بلند به‌جای زانویی‌های شعاع کوتاه و بن‌بست‌های T شکل^۲، اشکالات قسمت زانوها را به حداقل می‌رساند. چیدمان قسمت‌های مختلف نیز در عملکرد سیستم مؤثر است. اغلب، وجود زانویی‌های زیاد در فواصل کوتاه به‌جای زانویی‌های کم در فواصل طولانی، مشکل‌آفرین است. در حالت اول، سهم هر زانویی در انتقال مواد نسبت به حالت دوم قابل توجه‌تر خواهد بود. با این حال، برای سیستم‌هایی که مواد غیرسایشی و غیرقابل تجزیه را منتقل می‌کنند، تعداد و نوع زانویی^۳ خیلی مهم نیست و انتخاب یا طراحی احتمالاً باید بر اساس هزینه باشد.

د) **سیستم‌های تخلیه^۴ و جداکننده‌ها:** در انتهای مسیر برای جداسازی ماده از هوا از سیکلون یا فیلتر کیسه‌ای استفاده می‌شود. انتخاب مناسب بر اساس اندازه ذرات، چگالی و میزان گردوغبار است. سیکلون‌ها برای ذرات درشت‌تر (بیش از ۵۰ میکرون) مؤثرترند و برای مواد ریز، استفاده از فیلتر کیسه‌ای یا ترکیب دو سیستم توصیه می‌شود. جداسازی مواد جامد از جریان هوا هنگام انتقال می‌تواند به روش‌های مختلفی رخ دهد. در بیشتر موارد، روش واحد برای جداسازی کامل و رضایت‌بخش مواد منتقل شده کافی نیست. متداول‌ترین راهکار، استفاده از یک سیکلون^۵ و به دنبال آن فیلتر کیسه‌ای^۶ است. انتخاب سیستم جداسازی گاز از مواد جامد باید بر اساس مواردی شامل ویژگی‌های مواد، درجه جداسازی مورد نیاز، مقررات

1. Abrasive wear
2. Blind tees bends
3. Elbow
4. Receivers
5. Cyclone
6. Bag filter

زیست محیطی، غلظت مواد جامد و هزینه باشد. سیکلون‌ها تا حد زیادی رایج‌ترین نوع دستگاه جداسازی گاز-جامد هستند که در فرآیندهای صنعتی مختلف به کار می‌روند. این دستگاه‌ها فاقد قطعات متحرک هستند، در مقایسه با دیگر دستگاه‌های جداسازی ارزان‌اند، می‌توانند در دماهای بالا استفاده شوند، محصول خشک تولید کنند، مصرف انرژی پایینی دارند و بسیار قابل اعتمادند. نقطه ضعف اصلی آنها این است که راندمان جمع‌آوری نسبتاً پایینی برای ذرات زیر، حدود ۱۵ میکرومتر، دارند. هر سیکلون از یک استوانه عمودی با انتهای مخروطی شکل، یک ورودی مماس در قسمت بالایی، و خروجی‌هایی در بالا و پایین تشکیل شده است (شکل ۶).



شکل ۶- نمایی از یک سیکلون

لوله خروجی بالایی به طرف قسمت مخروطی سیکلون جلوآمدگی دارد. در این حالت گاز (معمولاً هوا) مملو از ذرات جامد یا غبار به طور مماس به بدنه سیکلون پمپ می‌شود و جریان گردابی ایجاد خواهد شد. این جریان گردابی نیروی گریز از مرکز ایجاد می‌کند و چون ذرات جامد بسیار چگال‌تر و سنگین‌تر از گاز هستند، به سمت بیرون و به دیوار سیکلون برخورد می‌کنند و در یک لایه نازک در مسیری مارپیچ به سمت پایین در امتداد دیوار جریان می‌یابند. مواد جامد در نهایت در پایین سیکلون جمع می‌شوند و به این صورت از گاز جدا خواهند شد.

جریان گاز ورودی در گردابی حلقوی به سمت پایین جریان می‌یابد، با کاهش فضای چرخش به دلیل شکل مخروطی، معکوس می‌شود و گردابی داخلی رو به بالا در مرکز سیکلون ایجاد می‌کند. هوا نهایتاً از بالای سیکلون خارج می‌شود. در هر عملیات ایده‌آل جداسازی مواد، در جریان رو به بالا داخل سیکلون تنها گاز یا هوا وجود دارد، در حالی که در جریان رو به پایین تمام ذرات ورودی به همراه جریان هستند. قطر سیکلون‌ها در اندازه‌های کمتر از ۰/۰۵ متر تا ۱۵ متر متغیر است. همچنین دبی مخلوط مواد جامد و هوای (غلظت‌های) تغذیه، مقادیر ۰/۱ تا حدود ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب را شامل می‌شود. سرعت هوای ورودی به سیکلون ممکن است در حدود ۱۵ تا ۳۵ متر بر ثانیه باشد. سیکلون‌ها به‌طور گسترده در صنایع غذایی و در آسیاب کردن خشک برای کاهش مقدار ذرات جامد به مقادیر مطلوب^۱ استفاده می‌شوند. در طبقه‌بندی مواد در عملیات آسیاب مدار بسته، و نیز برای جمع‌آوری ذرات ریز از فرآیندهای خشک‌کردن پاششی^۲ و بستر سیال^۳ و انتقال نیوماتیکی محصولات غذایی متنوعی مانند غلات و آرد استفاده می‌شود.

مهم‌ترین پارامتر عملکردی در طراحی سیکلون‌ها قطر برش^۴ یا D_{50} است که قطر ذره‌ای هم تعریف می‌شود و احتمال جدایی آن در جریان خروجی^۵ و جریان ته‌ریز^۶ برابر، یعنی دقیقاً ۵۰ درصد باشد. این پارامتر معیاری کمی و قابل محاسبه برای ارزیابی راندمان جداسازی فراهم می‌کند. در ادبیات فنی، مدل‌های متعددی برای پیش‌بینی قطر برش ارائه شده است که از معتبرترین آنها می‌توان به مدل لاپل^۷ اشاره کرد (لاپل، ۱۹۵۱). این مدل یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها برای تخمین قطر برش در سیکلون‌های با جریان گاز تمیز (ریزگرد) است و رابطه آن به صورت زیر است:

1. Dry milling
2. Spray drying
3. Fluidized bed drying
4. Cut Size
5. Overflow
6. Underflow
7. Lapple model

$$d_{pc} = \sqrt{\frac{9\mu b}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_f)}} \quad (2)$$

که در آن:

d_{pc} : قطر برش (m)،

b : عرض ورودی سیکلون (m)،

N_e : تعداد گردش‌های مؤثر ذره درون سیکلون (عدد بدون بعد)،

ρ_p : چگالی ذره (kg/m^3)،

ρ_f : چگالی سیال (kg/m^3)،

μ : گرانروی دینامیکی سیال (معمولاً هوا) (N.s/m^2)، و

V_i : سرعت گاز در ورودی سیکلون (m/s) است.

استفاده از قطر برش به عنوان معیار طراحی، مهندس را قادر می‌سازد تا با تغییر پارامترهایی مانند سرعت سیال ورودی یا قطر سیکلون، عملکرد دستگاه را بهینه کند و برای مواد حساس کشاورزی عواملی مانند میزان اُفت فشار و راندمان جداسازی را به طور دقیق پیش‌بینی کند.

تعیین پارامترهای طراحی نقاله‌های نیوماتیکی

انتخاب بهترین سیستم برای یک کاربرد خاص بستگی به نیازهای عملیات و ویژگی‌های ماده‌ای دارد که باید منتقل شود. بسیاری از معیارها که در طراحی سیستم‌های انتقال فاز رقیق به کار می‌روند بر اساس جنبه‌های نظری جریان دو فازی است. در طراحی سیستم، عواملی مانند تعیین اُفت فشار به عنوان تابعی از انرژی پتانسیل، انرژی جنبشی و تغییرات انرژی اصطکاکی در بخش‌های افقی و عمودی و همچنین در اتصالات و زانویی‌ها بررسی می‌شوند. تخمین میزان اُفت فشار کلی از مجموع تمام اُفت‌های قسمت‌های مختلف، بسته به طرح خاص سیستم انتقال نیوماتیکی حاصل می‌شود. سیستم‌های نیوماتیکی به طور کلی به دو دسته اصلی فاز رقیق و فاز غلیظ (فشرده) تقسیم می‌شوند (جدول ۴).

اصول طراحی نقاله‌های نیوماتیکی در کشاورزی

جدول ۴- مشخصات سیستم‌های نیوماتیکی

نوع سیستم	فاز رقیق	فاز غلیظ
سرعت و فشار	سرعت بالا (۲۰ تا ۳۰ متر بر ثانیه)، فشار پایین (کمتر از ۰/۸ بار)، جریان پیوسته مواد	سرعت پایین‌تر (۵ تا ۱۵ متر بر ثانیه)، فشار بالا (۱ تا ۶ بار)، جریان ناپیوسته یا نیمه‌پیوسته مواد
نسبت بار (جامد به گاز)	پایین (معمولاً > ۱۵)؛ ذرات کاملاً در حالت معلق در جریان هوا حرکت می‌کنند.	بالا (۱۵ تا ۳۰ و بیشتر)؛ ذرات به صورت توده‌ای یا پلاگ‌مانند در لوله حرکت می‌کنند.
مکانیزم جریان در لوله افقی	انتقال تعلیقی؛ ذرات بر اثر تلاطم هوا در مقطع لوله پخش می‌شوند و ته‌نشینی ندارند. برای جلوگیری از ته‌نشینی، سرعت باید بالاتر از سرعت ته‌نشینی ^۱ باشد.	جریان بستر فشرده/ پلاگی؛ جریان شامل توده‌های متراکم در پایین لوله است. از نظر علمی به دو دسته تقسیم می‌شود: (۱) جریان بستر لغزنده (برای مواد دانه‌ای) و (۲) جریان پلاگی (برای پودرهای چسبنده)
جریان در لوله قائم	ذرات با سرعت بالا و توزیع یکنواخت حرکت می‌کنند. آستانه پایداری آن سرعت خفگی ^۲ است؛ اگر سرعت به زیر این حد برسد، جریان ناپایدار و ضربه‌ای می‌شود.	سرعت پایین و تراکم بالا. در لوله قائم، اگر تراکم خیلی زیاد شود، جریان به حالت "ستونی" (Piston flow) در می‌آید که یکی از انواع فاز غلیظ است.
مزایا	سادگی طراحی و تجهیزات، قابلیت استفاده از دمنده‌های ارزان (سرعت بالا)، نبود حساسیت به چسبندگی مواد، مناسب بودن برای مسیرهای طولانی، انعطاف بالا در مسیر، هزینه ساخت کمتر	کاهش مصرف انرژی، کاهش قابل توجه شکستگی و سایش مواد (کمتر از ۱۰ متر بر ثانیه)، کاهش ساییدگی لوله‌ها، افت فشار کمتر در مسیرهای کوتاه
محدودیت و معایب	مصرف انرژی بالا، احتمال آسیب‌زدن به مواد شکننده به‌خصوص مواد کشاورزی (آسیب به بذر/گندم) و سایش لوله‌ها در زانو‌ها	افت فشار بالا در واحد طول، نیاز به کمپرسور قوی و گران‌قیمت، حساسیت به رطوبت (چسبندگی و گرفتگی)، نیاز به تجهیزات خاص تغذیه و کنترل دقیق فشار
کاربردها	انتقال بذره‌ای سبک، پودرها، و مواد خشک ریزدانه	انتقال غلات درشت، حبوبات، ذرت، کودهای دانه‌ای و مواد حساس به شکستگی

طراحی نقاله نیوماتیکی فاز رقیق

استفاده از سیستم‌های انتقال نیوماتیکی مناسب نیازمند تلفیق تکنولوژی به ثبت رسیده و عملکرد مهندسی، هر دو، در طراحی و اجرا و نیز نیازمند به‌کارگیری افرادی ماهر و کارآزموده و کنترل‌کننده به‌منظور سازمان بخشیدن و ساختن سیستم‌ها است. قابلیت آزمایش

1. Settling velocity
2. Choking velocity

مواد در وسایل صنعتی و نگهداری پایگاه اطلاعات تأسیسات قبلی به منظور حصول اطمینان از عملکرد مناسب نیز بسیار اهمیت دارد (چاب، ۱۹۹۹). طراحی سیستم انتقال فاز رقیق شامل این موارد است: انتخاب ترکیب اندازه لوله‌ها و سرعت گاز برای مطمئن شدن از جریان رقیق، محاسبه افت فشار خط لوله به دست آمده، و انتخاب تجهیزات مناسب برای حرکت دادن گاز و جداسازی مواد از گاز در انتهای سیستم. طراحی هر سیستم انتقال نیوماتیکی نیازمند یک سری اطلاعات پایه از جریان هوا در لوله‌ها و مجراهاست. هوای استاندارد هوایی است که در فشار ۱۰۱/۳۲۵ کیلو پاسکال و دمای صفر درجه سانتی‌گراد باشد. چگالی هوا در شرایط استاندارد برابر با $1/293 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ است. با تغییر دما و فشار اتمسفر، چگالی هوا تغییر می‌کند. برای یک گاز ایده‌آل رابطه زیر برقرار است:

$$PV = mRT \quad (3)$$

بنابراین چگالی هوا برابر است با:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (4)$$

که در آن:

ρ : چگالی هوا (kg/m^3),

P : فشار (pa),

R : ثابت گازها (kJ/kg.K),

T : دمای هوا بر حسب درجه کلین (K), و

ثابت گازها برای هوا: $R = 0.287 \text{ (kJ/kg.K)}$ است.

بدین ترتیب می‌توان با داشتن فشار هوا و دمای محل آزمایش، چگالی هوای آزمایش را به دست آورد. از آنجاکه معمولاً از هوا برای جابه‌جایی دانه‌ها استفاده می‌شود بنابراین در همه روابط هر جا از سیال یا گاز سخن به میان آید، منظور هواست. گرانشی در گازها با دما افزایش می‌یابد، بنابراین یک روش مناسب برای محاسبه گرانشی دینامیکی هوا استفاده از رابطه زیر است (مارکوس و همکاران، ۱۹۹۰):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T_0}{T} \right)^{0.75} \quad (5)$$

که در آن:

μ : گرانروی هوا در دمای آزمایش (Ns/m^2),

μ_0 : گرانروی هوا در دمای ۱۵ درجه سلسیوس و در سطح دریا ($\mu_0 = 1.783 \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$),

T : دمای محیط آزمایش بر حسب درجه کلونین (K), و

T_0 : دمای ۲۸۸/۱۶ درجه کلونین (K) است.

می‌توان از قانون ساترلند^۱ نیز برای محاسبه دقیق‌تر گرانروی دینامیکی هوا استفاده کرد. این قانون به دلیل پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات غیرخطی گرانروی با دما، به‌ویژه در گستره وسیع دمایی، مرجع معتبرتری محسوب می‌شود:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (6)$$

که در آن:

S : ثابت ساترلند برای هواست که مقداری بین ۱۱۰ تا ۱۲۰ کلونین است.

سرعت هوای ورودی

سرعت هوا باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که ذرات در طول مسیر نه ته‌نشین شوند و نه به دیواره‌ها برخورد شدید داشته باشند. در سیستم‌های انتقال نیوماتیکی مواد جامد، چهار سرعت کلیدی برای طراحی پایدار جریان اهمیت دارند: سرعت تعلیق^۲، سرعت حد، سرعت ته‌نشینی و سرعت خفگی. سرعت تعلیق، کمترین سرعت جریان گاز است که ذرات را در حالت معلق نگه می‌دارد و مانع ته‌نشینی آنها روی کف لوله می‌شود و اساس آن بر برابری نیروی وزن ذره و نیروی درگ جریان گاز است؛ این سرعت تقریباً با سرعت حد ذره در

1. Sutherland's Law

2. Suspension Velocity

جریان آرام و آزاد یکسان است، اما در جریان واقعی لوله، اثر دیواره‌ها و آشفته‌گی ممکن است آن را کمی تغییر دهد. سرعت ته‌نشینی، سرعتی است بالاتر از سرعت تعلیق که جریان پایدار و پیوسته ذرات روی کف لوله را تضمین می‌کند؛ در این حالت، ذرات بزرگ‌تر یا سنگین‌تر به‌صورت پرش‌مانند حرکت می‌کنند و از انسداد موضعی جلوگیری می‌شود. سرعت خفگی عموماً کمتر از سرعت ته‌نشینی است که در سیستم‌های فاز متراکم رخ می‌دهد و اگر جریان از آن پایین‌تر بیاید، تجمع ذرات باعث انسداد موضعی لوله می‌شود و جریان پایدار مختل می‌گردد. شناخت دقیق و اعمال این سرعت‌ها در طراحی نقاله‌های نیوماتیکی کشاورزی از جمله تعیین حداقل و حداکثر سرعت هوا برای جلوگیری از ته‌نشینی، انسداد و آسیب‌رسیدن به ذرات برای عملکرد پایدار و کارآمد سیستم ضروری است. در هر دو حالت انتقال فاز رقیق (افقی یا عمودی)، مطلوب است انتقال مواد در پایین‌ترین سرعت ممکن هوا رخ دهد تا افت فشار به حداقل برسد و سایدگی و هزینه‌های اجرایی کاهش یابد. سرعت ته‌نشینی برای هر اندازه قطر لوله و سرعت جریان مواد همیشه از سرعت خفگی بیشتر است. در عمل، تعیین دقیق سرعت ته‌نشینی، با اطمینان زیاد ممکن نیست و نیز در نزدیک به سرعت ته‌نشینی، سیستم ناپایدار است و کمی آشفته‌گی در سیستم باعث ته‌نشینی مواد می‌شود. بر این اساس محدوده پیشنهادی سرعت هوا برای برخی مواد کشاورزی (بر اساس نتایج تجربی) در جدول ۵ ارائه شده است. سرعت هوا در ورودی لوله باید حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد بیش از سرعت تعلیق ذرات باشد تا از تجمع مواد جلوگیری شود.

جدول ۵- سرعت هوا پیشنهادی برای مواد کشاورزی

نوع ماده کشاورزی	محدوده سرعت هوا (m/s)
غلات سبک (گندم، جو)	۱۸-۲۵
ذرات درشت یا سنگین (ذرت، نخود)	۱۲-۱۸
پودرها و مواد ریز (آرد، سیوس)	۲۰-۲۸

به‌دلیل نامعین بودن برخی روابط به‌منظور پیشگویی سرعت‌های خفگی و ته‌نشینی، باید سرعت گاز را در عمل با حدود اطمینان ۵۰ درصد و بیشتر پیشنهاد کرد. روابط زیادی برای

پیشگویی سرعت ته‌نشینی در منابع مختلف وجود دارد. رابطه‌ی ریک بر اساس یک روش نیمه تجربی به‌صورت زیر ارائه شده است که به‌طور قابل‌توجهی ساده‌تر است و خطایی مشابه با خطای دیگر روش‌ها دارد (رودز، ۲۰۰۱):

$$v_{salt} = \left[\frac{4M_s 10^\alpha g^{\frac{\beta}{2}} D^{\left(\frac{\beta}{2}-2\right)}}{\pi \rho} \right]^{\frac{1}{\beta+1}} \quad (7)$$

که در آن:

v_{salt} : سرعت ظاهری گاز در هنگام ته‌نشینی (m/s)،

$$\alpha = 1440d_p + 1.96$$

$$\beta = 1100d_p + 2.5$$

D : قطر لوله (m)،

dp : قطر ذره (m)، و

M_s : دبی جرمی (kg/m^3) است.

جریان گاز در لوله

دو وضعیت جریان اصلی در لوله‌ها وجود دارد: الف- جریان آرام و ب- جریان آشفته. حدود دقیق جریان آرام و آشفته با عدد رینولدز مشخص می‌شود.

$$Re = \frac{\rho_f v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (8)$$

که در آن:

ρ_f : چگالی سیال (kg/m^3)،

v : سرعت سیال (m/s)،

D : قطر لوله (m)،

μ : گرانیوی دینامیکی سیال (N.s/m^2)، و

ν : گرانیوی سینماتیکی سیال (m^2/s) است.

برای جریان آشفته $Re > 2300$ ؛ برای جریان آرام $Re < 2300$ در بیشتر حالات برای لوله‌های تحت فشار، جریان آشفته است.

اُفت فشار انتقال

اجزای اصلی اُفت فشار کلی در لولهٔ انتقال عبارت‌اند از: اُفت فشار ناشی از هوا و مواد. انتقال هوا به‌تنهایی در لوله ایجاد اصطکاک می‌کند و از آنجا که اُفت فشار هوا با مربع سرعت هوا متناسب است، باید سرعت در حداقل نگاه داشته شود. مواد انتقالی در دیوارهٔ لوله به‌طور ثابت دچار تأخیر می‌شوند و نیاز دارند دوباره شتاب بگیرند. این اصطکاک، باعث اُفت فشار شتاب می‌شود. این اُفت فشار تقریباً به‌صورت خطی با سرعت هوا افزایش می‌یابد. نیروهای انسدادی ناشی از ذرات، اُفت فشار اصطکاکی ایجاد می‌کنند. اگر جریان مواد ثابت باشد با تنزل سرعت هوا، غلظت مواد افزایش می‌یابد، نسبت اختلاط بیشتر می‌شود و در نتیجه اُفت فشار افزایش می‌یابد. با جمع کردن تمام تلفات، اُفت فشار نهایی سیستم یا منحنی ویژه سیستم به‌دست می‌آید. توان دمنده به اُفت فشار انتقال و سرعت هوا بستگی دارد (نیدیک، ۲۰۰۳). اُفت فشار کلی در طول لولهٔ مستقیم که مواد را در فاز رقیق انتقال می‌دهد، شامل موارد زیر است:

- اُفت فشار ناشی از شتاب گاز
- اُفت فشار ناشی از شتاب ذره
- اُفت فشار ناشی از اصطکاک گاز- دیواره
- اُفت فشار ناشی از اصطکاک مواد- دیواره
- اُفت فشار ناشی از ارتفاع استاتیکی مواد
- اُفت فشار ناشی از ارتفاع استاتیکی گاز

فشار کاری معمول در فاز رقیق تا حدود 0.8 بار (خلاً یا فشار مثبت) و در فاز فشرده بین 1 تا 6 بار، بسته به نوع ماده و طول مسیر است. بعضی از این عبارات با توجه به شرایط،

نادیده گرفته می‌شوند. اگر گاز و مواد قبلاً شتاب گرفته باشند، دو عبارت مربوط به شتاب (اول و دوم) حذف می‌گردند. اگر لوله افقی باشد دو عبارت مربوط به ارتفاع استاتیکی (پنجم و ششم) حذف می‌شوند (رودز، ۲۰۰۱).

در مجموع، اُفت فشار سیستم انتقال نیوماتیکی می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

$$\Delta p = \Delta p_{transport} + \Delta p_{separator} + \Delta p_{valves} \quad (9)$$

اُفت فشار انتقال ($\Delta p_{transport}$) شامل مجموع اُفت فشار مورد نیاز برای هوا به تنهایی (Δp_L)، اُفت فشار شتاب مواد (Δp_A)، اُفت فشار اصطکاک و برخورد مواد (Δp_z^*)، اُفت فشار ناشی از بلند کردن و تعلیق مواد (Δp_G) و اُفت فشار زانویی‌ها (Δp_B) می‌شود یعنی:

$$\Delta p_{transport} = \Delta p_L + \Delta p_A + (\Delta p_z^* + \Delta p_G)_{horizontal} + (\Delta p_z^* + \Delta p_G)_{vertical} + \Delta p_B \quad (10)$$

در جریان پایدار داریم: $\Delta p_A = 0$

اُفت فشار در انتقال افقی

با حذف اُفت فشار انتقال عمودی از رابطه فوق اُفت فشار افقی برابر است با:

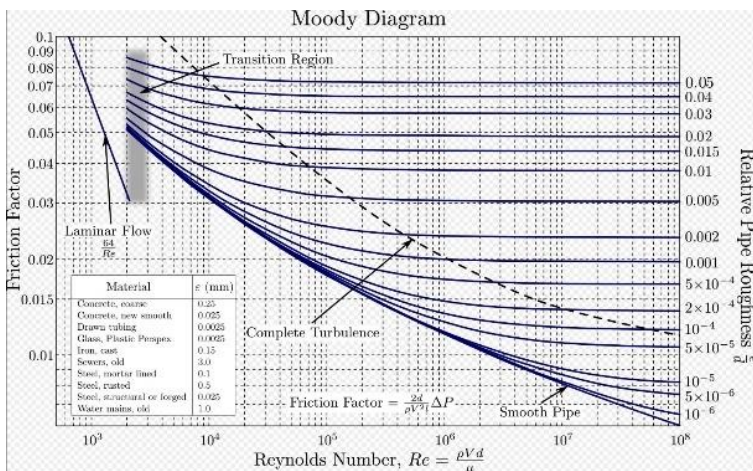
$$\begin{aligned} \Delta p_{transport} &= \Delta p_L + \Delta p_z^* + \Delta p_G + \Delta p_B \\ &= \Delta p_L + \Delta p_{z(horizontal)} + \Delta p_B \end{aligned} \quad (11)$$

الف- اُفت فشار هوا

برای محاسبه اُفت فشار گاز یا سیال در لوله‌ها معادله داری-ویسباخ ارائه گردیده است (انتظاری، ۱۳۷۸).

$$\Delta p_L = \lambda_L \frac{\rho}{2} v^2 \frac{\Delta L}{D} \quad (12)$$

در اینجا λ_L فاکتور اصطکاک (ضریب اصطکاک) نام دارد. برای جریان آشفته، فاکتور اصطکاک هوا از نمودار مودی (شکل ۷) می‌توان به‌دست آورد که این فاکتور را به عدد رینولدز ارتباط داده است.



شکل ۷- نمودار مودی: فاکتور اصطکاک و عدد رینولدز

برای حالات تجربی در محدوده وسیعی که $Re > 10000$ می‌توان فرض نمود: $\lambda_L \approx 0.02$

چند روش برای به دست آوردن فاکتور اصطکاکی گازها وجود دارد. برای سادگی کار، معادله بلازیوس^۱ یا کو به کار می‌رود. برای $Re < 10^5$ معادله بلازیوس^۱ چنین است (شلیختینگ، ۱۹۶۰):

$$\lambda_L = 0.316 / (Re)^{0.25} \quad (۱۳)$$

معادله^۲ کو^۲ برای ضریب اصطکاک سیال (کلینزینگ، ۱۹۸۱) برابر است با:

$$f_L = 0.0014 + 0.125 / Re^{0.32} \quad (۱۴)$$

f_L ضریب اصطکاکی فانینگ برابر است با:

$$\lambda_L = 4f_L \quad (۱۵)$$

1. Blasius

2. Koo

ب- اُفت فشار شتاب مواد

مواد جامد باید تا آنجا که ممکن است در سرعت انتقال حداقل، به‌طور سریع شتاب بگیرند. اُفت فشار باعث بخش بزرگی از اُفت فشار سیستم می‌شود که باید توسط دمنده تأمین شود. این اُفت تنها در یک نقطه ورودی مواد در سیستم مکشی یا فشاری اتفاق می‌افتد (نیدیک، ۲۰۰۳). با ورود مواد جامد به جریان هوا، سرعت مواد زیاد می‌شود تا به سرعت (v_s) می‌رسد. این اُفت فشار اضافی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta p_A = r v p v_s \quad (۱۶)$$

ج- اُفت فشار اصطکاکی مواد

این اُفت ناشی از برخورد ذرات جامد با یکدیگر و اصطکاک آنها با جداره لوله‌هاست. رابطه زیر را می‌توان برای تخمین این اُفت به‌کار برد:

$$\Delta p_z^* = \frac{\lambda_z^* \rho_p (1 - \varepsilon) v_s^2 \Delta L}{2D} \quad (۱۷)$$

به‌منظور تعیین ضریب اصطکاک جامدات در انتقال افقی از رابطه زیر استفاده می‌شود (کونو و سیتو، ۱۹۶۹):

$$\lambda_z^* = 0.114 (gD)^{0.5} / v_s \quad (۱۸)$$

مقدار تخلخل برابر است با:

$$\varepsilon = 1 - \frac{M_s}{A \rho_p v_s} \quad (۱۹)$$

چگالی حجمی ظاهری یا چگالی توده مواد در هنگام انتقال برابر است با:

$$\rho_s = (1 - \varepsilon) \rho_p \quad (۲۰)$$

د- اُفت فشار بلند کردن و تعلیق مواد

این اُفت شاخص تغییر انرژی پتانسیل جامد در بالا رفتن به ارتفاع مورد نظر است. اُفت فشار ناشی از بلند کردن مواد تا ارتفاع Δz در سیستم قائم برابر است با:

$$\Delta p = \rho_p (1 - \varepsilon) g \Delta z \quad (۲۱)$$

در سیستم افقی، اُفت فشار ناشی از معلق نگاه داشتن ذرات برابر است با:

$$\Delta p_G / \Delta L = \rho_s g \frac{v_t}{v} \quad (22)$$

اُفت فشار ثقلی هوا برابر است با:

$$\Delta p_{Ga} / \Delta L = \rho \varepsilon g \quad (23)$$

و- اُفت فشار در زانویی‌ها

زانویی‌ها طراحی سیستم‌های انتقال فاز رقیق را پیچیده می‌کنند و در طراحی سیستم انتقال بهترین کار این است که در حد امکان از زانو کمتر استفاده شود. زانویی‌ها اُفت فشار را در خط انتقال افزایش می‌دهند و نیز نقاطی هستند که بیشترین فرسایش و ساییدگی ذره در آنجا رخ می‌دهد. سرعت حرکت مواد در حال انتقال از زانویی در اثر نیروی گریز از مرکز کاهش می‌یابد و مواد در حال انتقال ته‌نشین می‌شوند. حرکت مجدد مواد با شتاب اولیه باعث اُفت فشار بیشتری می‌گردد (رودز، ۲۰۰۱). آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در نرخ‌های پایین انتقال مواد، اُفت فشار در زانویی از اُفت فشار ناشی از جریان هوا به‌تنهایی بیشتر است. اُفت فشار اضافی عمدتاً پس از تغییر جهت جریان و در نتیجه شتاب‌گیری مجدد ذرات پس از عبور از زانویی ایجاد می‌شود (نیدیک، ۲۰۰۳). با عبور مخلوط هوا و ذرات جامد از زانویی، بخشی از انرژی بر اثر اصطکاک هوا و ذرات با جداره زانویی تلف می‌شود. در نتیجه، سرعت ذرات کاهش می‌یابد و برای شتاب‌گیری مجدد آنها تا رسیدن به سرعت پیش از ورود به زانویی، انرژی بیشتری مورد نیاز است. اُفت فشار زانویی (Δp_B) از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{\Delta p_B}{(\Delta p_z)_{bend}} = 210 \left(\frac{2R_b}{D} \right)^{-1.15} \quad (24)$$

در اینجا R_b شعاع زانویی است و $(\Delta p_z)_{bend}$ اُفت فشار بخش جامد زانویی است که با به‌دست آوردن طول معادل زانویی و داشتن اُفت فشار مواد جامد تعیین می‌شود. زانویی‌های تند باعث افزایش اُفت فشار و آسیب‌رساندن به مواد می‌شوند. توصیه می‌شود شعاع خم لوله نباید کمتر از ۶ برابر قطر لوله باشد ($R_b \geq 6D$). در سیستم‌های فاز متراکم، از زانویی‌های دارای آستر مقاوم در برابر سایش استفاده می‌شود.

توان دمنده

توان ورودی دمنده بر اساس اُفت فشار کل سیستم و دبی جریان هوا از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P = \Delta p Q / \eta_B \quad (25)$$

که η_B راندمان دمنده $(0.7 < \eta_B < 0.5)$ است (مارکوس و همکاران، ۱۹۹۰).

انتخاب قطر لوله انتقال

قطر لوله یکی از پارامترهای تعیین‌کننده اُفت فشار و ظرفیت سیستم است. رابطه عمومی طراحی قطر لوله به‌صورت زیر است:

$$V \times \frac{\pi D^2}{4} = Q \quad (26)$$

که در آن: Q دبی حجمی هوا (m^3/s)، D قطر لوله (m) و V سرعت هوا (m/s) است. برای ظرفیت‌های انتقال کوچک و مواد سبک قطر لوله ۵۰ تا ۷۵ میلی‌متر و برای ظرفیت‌های متوسط ۷۵ تا ۱۰۰ میلی‌متر و برای انتقال غلات حجیم یا مسیرهای طولانی ۱۰۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود. افزایش قطر موجب کاهش اُفت فشار ولی افزایش حجم اولیه هوا و تجهیزات می‌شود.

طراحی و تحلیل موردی یک سیستم انتقال نیوماتیکی در فاز رقیق

۱- مقدمه و فرضیات طراحی

در طراحی سیستم‌های انتقال نیوماتیکی برای غلات، تحلیل اُفت فشار کل یکی از مهم‌ترین مراحل است، زیرا مقدار دقیق آن توان دمنده و انرژی مصرفی را تعیین می‌کند. در این مثال، هدف طراحی یک سیستم فاز رقیق برای انتقال گندم از مخزن تغذیه به مخزن ذخیره است. مشخصات این طراحی به شرح جدول ۶ است:

جدول ۶- اطلاعات و پیش فرض های طراحی مسئله

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
چگالی توده گندم	ρ_p	800	kg/m ³
چگالی هوا	ρ	1.2	kg/m ³
سرعت انتقال هوا	V	22	m/s
سرعت ذرات گندم	v_s	20	m/s
سرعت حد دانه گندم	v_t	10	m/s
نسبت بار مواد به هوا	R_s	2.5	kg solid/kg air
طول افقی لوله	L_h	80	m
ارتفاع قائم	H	5	m
قطر داخلی لوله	D	0.139	m
تعداد زانویی ها	N	6	-
شعاع زانویی	R_b	6D	-
راندمان دمنده	η_B	0.75	-
دبی حجمی هوا	Q	0.333	m ³ /s
دبی جرمی مواد	$\dot{m}_s$	1.0	kg/s

۲- محاسبه اُفت فشار کل سیستم

الف) اُفت فشار اصطکاکی هوا (Δp_L)

طبق معادله دارسی-وایسباخ (۱۲):

$$\Delta p_L = \lambda_L \frac{\rho}{2} V^2 \frac{\Delta L}{D}$$

برای جریان آشفته با عدد رینولدز $Re > 10^4$ از معادله بلازیوس (۱۳) داریم:

$$\lambda_L = 0.316/Re^{0.25}$$

که در آن:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s) :$$

با فرض

$$Re = \frac{1.2 \times 22 \times 0.139}{1.8 \times 10^{-5}} = 2.04 \times 10^5$$

در نتیجه:

$$\lambda_L = 0.316 / (2.04 \times 10^5)^{0.25} = 0.018$$

اکنون:

$$\Delta p_L = 0.018 \times \frac{1.2}{2} \times 22^2 \times \frac{80}{0.139} = 3.03 \times 10^3 \text{ Pa} = 3.03 \text{ kPa}$$

(ب) اُفت فشار شتاب مواد (Δp_A)

در شرایط جریان پایدار، این مؤلفه صفر است، زیرا شتاب اولیه فقط در نقطه ورود رخ می‌دهد:

$$\Delta p_A = 0$$

(ج) اُفت فشار اصطکاکی مواد (Δp_z^*)

طبق رابطه‌های (۱۷ تا ۲۰):

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

$$\lambda_z^* = 0.114 (9.81 \times 0.139)^{0.5} / 20 = 0.0094$$

تخلخل (ε):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\dot{m}_s}{A \rho_p v_s}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = 0.01515 \text{ m}^2$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1.0}{0.01515 \times 800 \times 20} = 1 - 0.00413 = 0.996$$

$$\rho_s = (1 - \varepsilon) \rho_p = 0.004 \times 800 = 3.2 \text{ kg/m}^3$$

اکنون:

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

$$\Delta p_z^* = \frac{0.0094 \times 800 \times 0.004 \times 20^2 \times 80}{2 \times 0.139} = 3.46 \times 10^3 \text{ Pa} = 3.46 \text{ kPa}$$

(د) اُفت فشار ناشی از تعلیق و ارتفاع مواد (Δp_G)

در بخش افقی (تعلیق) از رابطه (۲۲):

$$\frac{\Delta p_G}{\Delta L} = \frac{\rho_s g v_t}{v}$$

$$\Delta p_G = 3.2 \times 9.81 \times \frac{10}{22} \times 80 = 1.14 \times 10^3 Pa = 1.14 kPa$$

در بخش عمودی (بالا بردن) از رابطه (۲۱):

$$\Delta p_{G(vertical)} = \rho_p (1 - \varepsilon) g H = 800 \times 0.004 \times 9.81 \times 5 = 157 Pa$$

$$= 0.157 kPa$$

اُفت فشار ناشی از وزن ستون هوا:

$$\Delta p_{Ga} = \rho g H = 1.2 \times 9.81 \times 5 = 58.8 Pa = 0.059 kPa$$

ه) اُفت فشار زانوییها (Δp_B)

بر اساس رابطه (۲۴):

$$\Delta p_B / (\Delta p_z)_{bend} = 210 (2R_b / D)^{-1.15}$$

$$: R_b = 6D \text{ با}$$

$$(2R_b) / D = 12 \Rightarrow 210 (12^{-1.15}) = 13.8$$

با فرض اینکه طول معادل هر زانویی $1.5D$ باشد و

$$(\Delta p_z)_{bend} = (\Delta p_z^* / L) \times (1.5D)$$

بنابراین، اُفت فشار ناشی از بخش جریان جامد در زانوییها برابر است با:

$$(\Delta p_z)_{bend} = (3.46 \times 10^3 / 80) \times 1.5 \times 0.139 = 9.02 Pa$$

حال اُفت فشار کل در زانوییها (۶ عدد) محاسبه می‌شود:

$$\Delta p_B = 13.8 \times 9.02 \times 6 = 747 Pa = 0.75 kPa$$

حال اُفت فشار کل انتقال کل سیستم برابر است با:

$$\Delta p_{transport} = \Delta p_L + \Delta p_z^* + \Delta p_G + \Delta p_{G(vertical)} + \Delta p_B + \Delta p_{Ga}$$

$$\Delta p_{transport} = 3.03 + 3.46 + 1.14 + 0.157 + 0.75 + 0.059 = 8.60 kPa$$

با لحاظ اُفت فشار جداکننده و شیرها تقریباً (0.4 kPa) داریم:

$$\Delta p_{total} = 9.0$$

۳- محاسبه توان دمنده

طبق رابطه (۲۵):

$$P = \frac{\Delta p_{total} \times Q}{\eta_B}$$

$$P = \frac{9000 \times 0.333}{0.75} = 3994 W \cong 4 kW$$

نتایج نشان می‌دهد که برای انتقال ۱ کیلوگرم در ثانیه دانه گندم در فاز رقیق و سرعت ۲۲ متر بر ثانیه در لوله‌ای به قطر ۱۳۹ میلی‌متر، اُفت فشار کل حدود ۹ کیلو پاسکال است و فن با توان مؤثر ۴ کیلو وات می‌تواند سیستم را به‌خوبی تغذیه کند (جدول ۷).

جدول ۷- نتایج محاسبات اُفت فشار و توان دمنده مسئله موردی

مؤلفه اُفت فشار	نماد	مقدار (kPa)
اُفت اصطکاک هوا	Δp_L	3.03
اُفت اصطکاک مواد	Δp_z^*	3.46
اُفت تعلیق افقی	Δp_G	1.14
اُفت ارتفاع عمودی مواد	$\Delta p_{G(vertical)}$	0.157
اُفت ارتفاع هوا	Δp_{Ga}	0.059
اُفت زانوها	Δp_{bends}	0.75
اُفت فشار انتقال	$\Delta p_{transport}$	8.60
اُفت جداکننده و شیرها	Δp_{valves}	0.40
اُفت فشار کل سیستم	Δp_{total}	9.0 kPa
توان دمنده مورد نیاز	P	4.0 kW

بر اساس نتایج محاسبات، بیشترین سهم در اُفت فشار کل مربوط به اُفت اصطکاک مواد (۳/۴۶ کیو پاسکال) و اُفت اصطکاک هوا (۳/۰۳ کیلو پاسکال) است که مجموعاً حدود ۷۲ درصد از اُفت فشار کل را دارند. در مقابل، سهم اُفت ارتفاع عمودی مواد (۰/۱۵۷ کیلو پاسکال) و اُفت ارتفاع هوا (۰/۰۵۹ کیلو پاسکال) ناچیز است که به دلیل ارتفاع قائم کم (۵ متر) و همچنین سرعت حد نسبتاً پایین دانه گندم (۱۰ متر بر ثانیه) در مقایسه با سرعت انتقال (۲۲ متر بر ثانیه) قابل توجه است. وجود ۶ عدد زانویی با شعاع انحنای ۶ برابر قطر لوله، اُفت فشاری برابر ۰/۷۵ کیلو پاسکال ایجاد می‌کند که معادل حدود ۸/۳ درصد از اُفت فشار کل است. در مجموع، سیستم طراحی شده از نظر هیدرولیکی در محدوده قابل قبولی قرار دارد و توان ۴ کیلو وات برای دمنده با راندمان ۷۵ درصد (مانند یک دمنده روتس یا

سانتریفیوژ پره عقب) برای جابه‌جایی گندم در مسافت افقی ۸۰ متر و ارتفاع ۵ متر کاملاً مناسب به نظر می‌رسد. برای بهینه‌سازی بیشتر سیستم، کاهش اُفت اصطکاک مواد از طریق کاهش تعداد زانویی‌ها یا استفاده از زهای با شعاع بیشتر و کاهش تعداد اتصالات و همچنین بررسی امکان کاهش سرعت انتقال (برای مثال تا ۱۸ تا ۲۰ متر بر ثانیه) برای کاهش اُفت اصطکاک هوا و همچنین کاهش میزان شکستگی دانه‌ها توصیه می‌شود. افزایش قطر لوله اُفت فشار را به شدت کاهش می‌دهد، اما هزینه اولیه سیستم و انرژی فشرده‌سازی هوا را بالا می‌برد.

فهرست منابع

- انتظاری، ع. (۱۳۷۸). مکانیک سیالات. تألیف استریتر و وایلی، چاپ سوم، ناشر نوپردازان.
- ایمان‌مهر، ع، قبادیان، ب، مینائی، س. و خوش تقاضا، م. ه. (۱۳۸۶). طراحی، ساخت و ارزیابی نقاله نیوماتیکی دانه کلزا در فاز رقیق. تحقیقات، سامانه‌ها و مکانیزاسیون کشاورزی، ۸(۴)، ۳۳-۴۶.
- Abe, M. C., Gelladuga, G. A., Mendoza, C. J., Natavio, J. M., Zabala, J. S., & Lopez, E. C. R. (2023). Pneumatic conveying technology: Recent advances and future outlook. *Materials*, 56(1), 205.
- ASABE. (2006). D497.4: Agricultural machinery management data. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Chubb, C. (1999). Reliability of Operation-in Practice. IMechE Seminar Publication Successful Pneumatic Conveying. Published by Professional Engineering publishing Limited, London, UK.
- Dutta, S. K., Nema, V. K., & Bhattacharya, S. N. (1988). Physical properties of gram. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 39(4), 259-268.
- Güner, M. (2007). Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 904-913. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.08.010>
- Klinzing, G. E. (1981). Gas solid transport. McGraw-Hill, NY.
- Klinzing, G. E., Rizk, F., Marcus, R., & Leung, L. S. (2014). Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach (3rd ed.). Springer.
- Konno, H. and Saito, S. J. (1969). Pneumatic conveying of solids through straight pipes. *Chem. Eng. Japan* 2: 211-217.

- Lapple, C. E. (1951). Processes use many collector types. Chemical Engineering, 58, 144.
- Marcus, R. D., Leung, L. S., Klinzing, G. E., Rizk, F. (1990). Pneumatic Conveying of Solid. Chapman and Hall Pub. London. UK.
- Mohsenin, N. N. (1986). Physical properties of plant and animal materials: Structure, physical characteristics and mechanical properties. Gordon & Breach.
- Neidigh, S. (2003). Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. www. Neuero.com. USA.
- Nimkar, P. M., & Chattopadhyay, P. K. (2001). Some physical properties of green gram. Journal of Agricultural Engineering Research, 80(2), 183–189.
- Rhodes, M. (2001). Pneumatic transport of powders. Educ. Reso. for Part. Techn. 014Q-Rhodes. <http://www.erpt.org/014Q/rhoe-00.htm>
- Schlichting, H. 1960. Boundary Layer Theory. 4th edn., McGraw-Hill, NY.
- U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2024). "Current Good Manufacturing Practice, Hazard Analysis, and Risk-Based Preventive Controls for Human Food," Code of Federal Regulations, Title 21, Part 117.40(d). [Online]. Available: www.ecfr.gov.