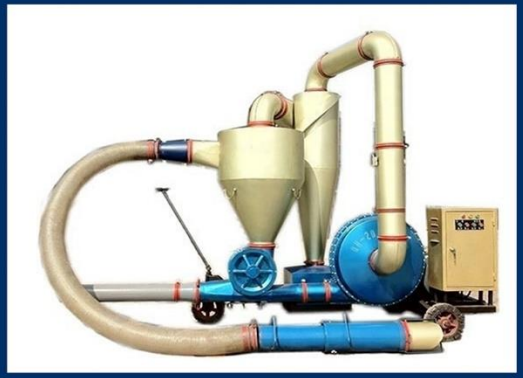
وزارت جهاد کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریه فنی:

شناخت و کاربرد نقاله‌های نیوماتیکی

عبداله ایمان‌مهر و محسن حیدری سلطان آبادی



سال انتشار: ۱۴۰۳

آدرس: کرج، بلوار شهید فهمیده، کدپستی: ۳۱۳۵۹۱۳۵۳۳، مؤسسه تحقیقات فنی ومهندسی کشاورزی
تلفن: ۳۲۷۰۵۳۲۰، ۳۲۷۰۵۲۴۲ و ۳۶۱۵۰۰۰۰(۰۲۶)
دورنگار: ۳۲۷۰۶۲۷۷ (۰۲۶)، آدرس دسترسی: www.aeri.ir(بخش انتشارات الکترونیکی)

بسم‌الله‌الرحمن‌الرحیم

موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نشریهٔ فنی

شناخت و کاربرد نقاله‌های نیوماتیکی

تهیه و تدوین:

عبداله ایمان‌مهر و محسن حیدری سلطان‌آبادی

اعضاء هیئت علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان

سال انتشار

۱۴۰۳

وزارت جهاد کشاورزی

سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

نوع نوشتار: نشریهٔ فنی

عنوان نوشتار: شناخت و کاربرد نقاله‌های نیوماتیکی

نگارندگان: عبداله ایمان‌مهر 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: ۱۴۰۳

مسئولیت صحت مطالب با نگارندگان است.

شماره ثبت ٦٧٠٧٠ در مرکزفناوری اطلاعات و اطلاع‌رسانی کشاورزی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی به تاریخ ١٤٠٣/١٢/٢٧

مخاطبان نشریه

- کارشناسان و متخصصان کشاورزی فعال در برنامهٔ فرآوری محصولات غذایی
- مدیران و مسئولان فنی مکانیزاسیون

هدف‌های آموزشی

- شناخت انواع سیستم‌های انتقال نیوماتیکی و مشخصات آنها
- آشنایی با کاربردهای نقاله‌های نیوماتیکی در عملیات کشاورزی
- ارائهٔ مشکلات و راه‌حل آنها در انتقال نیوماتیکی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
ویژگی‌های انتقال نیوماتیکی مواد	۲
مزایای انتقال نیوماتیکی	٤
معایب انتقال نیوماتیکی	٥
محدودیت‌های انتقال نیوماتیکی	٦
طبقه‌بندی سیستم‌های انتقال نیوماتیکی	٨
نقاله‌های فاز غلیظ	۱۲
نقاله‌های فاز مسدود	۱۲
سیستم‌های سیلانی	۱٤
مخازن دمشی	۱٥
سیستم‌های طولانی مسیر	۱٦
نقاله‌های فاز رقیق	۱۸
انواع نقاله‌های فاز رقیق	۱۸
نقاله‌های هوایی-مکانیکی	۲۰
مشکلات رایج و راه‌حل آنها در انتقال نیوماتیکی	۲٤
جمع‌بندی	۲۷
منابع	۲۷

مقدمه

یکی از مهم‌ترین روش‌های جابه‌جایی تودهٔ مواد جامد در صنایع مختلفی مانند صنایع شیمیایی، معدنی، غذایی، دارویی و کشاورزی حرکت مواد به‌صورت معلق در جریان هوا روی سطوح افقی، شیب‌دار یا عمودی است که در فاصله چند متر تا چند صد متر اتفاق می‌افتد. این نوع انتقال یکی از چند منظوره‌ترین روش‌های جابه‌جایی است که شامل جابه‌جایی پودرهای ریز تا ذراتی با قطر ۶/۳۵ میلی‌متر و نیز موادی با چگالی توده ۱۶ تا بیش از ۳۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است (کلینزینگ و همکاران، ۲۰۱۰). نقاله‌های نیوماتیکی یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های انتقال مواد در صنایع مختلف به‌شمار می‌آیند که به دلیل مزایای منحصر به فردشان مانند کاهش نیاز به اجزای مکانیکی، قابلیت انتقال مواد در مسیرهای پیچیده و کاهش خطر آلودگی محیط زیست، جایگاهی مهم در فرآیندهای صنعتی و کشاورزی پیدا کرده‌اند. به‌ویژه در صنایع شیمیایی، دارویی، غذایی و معدنی، استفاده از نقاله‌های نیوماتیکی به دلیل نیاز به انتقال مواد حساس و جلوگیری از آلودگی خارجی اهمیت پیدا کرده است (جاکوب و لیپک، ۲۰۱۵). در مقایسه با روش‌های دیگر، انتقال نیوماتیکی مواد توده‌ای قابلیت کنترل و انعطاف‌پذیری بالایی دارد و مواد در معرض تماس مستقیم با قطعات مکانیکی متحرک قرار نخواهند گرفت. اکثر پودرها و ذرات غذایی که در صنایع فرآوری مواد غذایی به‌کار می‌روند، هنگام انتقال به‌صورت روباز، دچار مشکلات بهداشتی و آلودگی[1] می‌شوند؛ به این ترتیب، انتقال نیوماتیکی انتخابی کارآمد برای زمانی است که در آن بهداشت و سلامت محصولات حمل‌شده اهمیت بالایی دارد. به‌طورکلی، سیستم انتقال نیوماتیکی فرآیندی است که طی آن مواد توده‌ای با استفاده از سیالی گازی به‌عنوان واسطه، از یک یا چند نقطه به یک یا چند نقطه دیگر منتقل می‌شوند. بیشتر از هوای معمولی به‌عنوان سیال گازی استفاده می‌شود ولی در مواردی ممکن است دیگر گازها و به‌خصوص گازهای بی‌اثر به کار رود. سیستم انتقال نیوماتیکی اگر به‌خوبی طراحی و به‌کارگیری شود،

1. Hygienic and Contamination

نسبت به سیستم‌های انتقال مکانیکی مانند نقاله‌های تسمه‌ای، پیچی، پره‌ای و غیره اغلب روشی علمی‌تر و باصرفه‌تر در انتقال مواد جامد جریان‌پذیر است.

ویژگی‌های انتقال نیوماتیکی مواد

یکی از اولین کاربردهای ثبت‌شده برای انتقال نیوماتیکی، تخلیهٔ گندم از لنج‌ها به آسیاب‌های آرد و از سیلوها به کشتی‌ها بوده است (شکل ۱). برخی دیگر از دانه‌ها و محموله‌های مختلف مانند آلومین[1]، سیمان و رزین‌های پلاستیکی هنوز با همان روش‌های اولیه تخلیه می‌شوند. دیگر کاربردهای رایج سیستم انتقال نیوماتیکی شامل تخلیهٔ کامیون‌ها، واگن‌های ریلی و لنج‌ها، انتقال مواد به مخازن[2] ذخیره‌سازی و تزریق مواد جامد به راکتورها و محفظه‌های احتراق و جمع‌آوری گرد و غبار فرّار توسط سیستم خلأ است. مزایایی شامل تمیز بودن و آلودگی کم مواد این واقعیت را منعکس می‌کند که اگر سیستم‌های نیوماتیکی به‌درستی ساخته و نگهداری شوند می‌توانند عملاً عاری از گرد و غبار باشند. در شکل ۲ به‌کارگیری مکانیزم جمع‌آوری گرد و غبار در یک سیستم انتقال نیوماتیکی را نشان می‌دهد. سیستم‌های خلأ در جابه‌جایی مواد این ویژگی را دارند که نشت و آسیب‌دیدگی در خطوط انتقال (لوله‌ها) منجر به از دست‌دادن محصول نمی‌شود. سیستم‌های آب‌بندی‌شده می‌توانند از ورود شکل‌های مختلف آلودگی جلوگیری کنند و تماس با اجزای مکانیکی متحرک را به حداقل برسانند. در سیستم‌های انتقال فشاری، از نشت مواد خارجی به داخل جلوگیری می‌شود. در این روش از گاز خشک و بی‌اثر برای انتقال استفاده می‌شود تا از تماس اکسیژن و رطوبت به مواد بیولوژیکی بسیار حساس جلوگیری شود.

1. Alumina
2. Vessels

شکل ۱- تخلیهٔ مکانیکی و نیوماتیکی محمولهٔ گندم از سیلو به کشتی

شکل ۲- به‌کارگیری مکانیزم جمع‌آوری گرد و غبار در یک سیستم انتقال نیوماتیکی

از لحاظ مسافت و ظرفیت، نقاله‌های نیوماتیکی عموماً در ظرفیت‌های حدود ۳۰۰ تن در ساعت و مسافت ۱۰۰۰ متر (البته نه به‌طور هم‌زمان) محدودیت استفاده دارند (شکل ۳). اندازه ذرات، سختی، خواص چسبندگی و مقاومت در برابر آسیب از عوامل کلیدی در انتخاب نوع مواد قابل‌حمل در روش نیوماتیکی هستند. برای مثال، انتقال مواد چسبنده یا چسبناک[1] با نقالهٔ نیوماتیکی اغلب دشوار است. موادی که رطوبت آنها باعث چسبیدن به دیواره‌های خط لوله می‌شود معمولاً نمی‌توانند با موفقیت به‌صورت نیوماتیکی منتقل شوند. مواد حاوی روغن یا چربی بالا نیز می‌توانند باعث انباشت و گیرکردن شدید در خطوط لوله شوند و انتقال هوایی عملی نباشد.

1. Cohesive or Sticky

شکل ۳- انتقال نیوماتیکی غلات به مخازن ذخیره‌سازی در فاصله‌های مشخص

مزایای انتقال نیوماتیکی

یکی از مزایای برجستهٔ نقاله‌های نیوماتیکی، قابلیت انتقال مواد در مسیرهای عمودی و افقی به طور همزمان و بدون نیاز به تغییر ساختار سیستم است. با این حال، بالا بودن هزینهٔ انرژی و حساسیت به مواد با چگالی بالا از جمله چالش‌های اصلی این سیستم‌هاست. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از تکنولوژی‌های جدید، مانند شیرهای هوشمند و بهینه‌سازی طراحی لوله‌ها می‌تواند این محدودیت‌ها را کاهش دهد (یانگ و همکاران، ۲۰۱۳). طراحی‌های اخیر در نقاله‌های نیوماتیکی بر کاهش مصرف انرژی و بهبود بهره‌وری متمرکز بوده است. استفاده از درایوهای فرکانس متغیر[1] برای کنترل دقیق جریان هوا و استفاده از حسگرها برای پایش لحظه‌ای عملکرد سیستم‌ها از جمله پیشرفت‌های مهم هستند. توسعهٔ مواد مقاوم‌تر برای لوله‌ها و اتصالات به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمک می‌کند. این فناوری‌ها نقش مهمی در کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش کارایی داشته‌اند (پری و گرین، ۲۰۰۸؛ اگری تک تومارو، ۲۰۲۳).

1. Variable Frequency Drive

دیگر مزایای کاربرد انتقال نیوماتیکی مواد شامل موارد زیر است:

- در نصب و راه‌اندازی باصرفه است.
- این سیستم‌ها می‌توانند مواد را در بستری محصور، بدون تماس با قطعات متحرک و محیط بیرونی انتقال دهند که این محصور بودن، سازگار با محیط زیست نیز هست.
- انواع محصولات را می‌توان بدون ایجاد گرد و غبار انتقال داد.
- سیستم‌های انتقال نیوماتیکی از نظر مسیرهای انتقال و تغییر مسیرها انعطاف‌پذیری مناسبی دارند. بدین معنا که می‌توان محصول را به‌صورت‌های مختلف افقی و عمودی و مایل انتقال داد.
- امکان انتقال و برداشت محصول به‌ترتیب به چند نقطه و از چند نقطهٔ مختلف وجود دارد.
- هزینهٔ تعمیر و نگهداری آنها پایین است.
- از یک خط لوله انتقال می‌توان برای انتقال انواع محصولات استفاده کرد.
- سهولت در کنترل و خودکار کردن خط انتقال از مشخصات این سیستم‌هاست.
- خطوط انتقال در این نوع سیستم‌ها ایمنی بالایی دارند به همین دلیل از این خط لوله‌ها می‌توان برای انتقال انواع محصولات بدون خطر آتش‌سوزی یا دیگر مخاطرات استفاده کرد.

معایب انتقال نیوماتیکی

برخی معایب زیر در استفاده از روش انتقال نیوماتیکی مشاهده می‌شود:

- توان مصرفی نسبت به دیگر روش‌های انتقال بالاتر است.
- استهلاک و سایش تجهیزات وجود دارد.
- طراحی نادرست سیستم انتقال باعث پایین آمدن کیفیت محصول می‌شود.

- با توجه به پیچیدگی طبیعت جریان هوا، نیاز به مهارت بالایی برای طراحی، استفاده و نگه‌داری سیستم وجود دارد.

محدودیت‌های انتقال نیوماتیکی

درحالی‌که انتقال نیوماتیکی کاربردهای زیادی برای ارائه در عملیات کشاورزی دارد، محدودیت‌هایی را نیز شامل می‌شود که باید پیش از استفاده از این روش در نظر گرفته شود:

الف) هزینه:

سیستم‌های انتقال نیوماتیکی، به‌خصوص برای سیستم‌های بزرگ یا پیچیده، می‌توانند پرهزینه باشند. هزینه‌های اولیه شامل هزینهٔ تجهیزات مانند کمپرسور، لوله‌کشی و نازل‌هاست. هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و نگهداری نیز وجود دارد.

ب) مصرف انرژی:

سیستم‌های انتقال نیوماتیکی می‌توانند مصرف انرژی بالایی داشته باشند، به‌خصوص زمانی‌که برای جابه‌جایی مواد در مسافت‌های طولانی استفاده می‌شوند. این امر می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های عملیاتی و تأثیرات زیست محیطی ناشی از مصرف انرژی شود. بنابراین، استفاده از این سیستم‌ها تنها در مواردی توجیه‌پذیر است که مزایای آن مانند دقت بالا در انتقال مواد حساس، کاهش ضایعات و افزایش بهره‌وری به حدی باشد که هزینه‌های انرژی را جبران کند.

ج) محدودیت مسافت:

انتقال نیوماتیکی می‌تواند برای جابه‌جایی مواد در مسافت‌های طولانی استفاده شود، اما کارایی آن با افزایش فاصله کاهش می‌یابد. برای مسافت‌های بسیار طولانی ممکن است روش‌های حمل و نقل جایگزین مانند نقاله‌های مکانیکی باصرفه‌تر باشد. مسافت انتقال، به‌دلیل بالا بودن توان مصرفی، ممکن است کاربرد نقاله‌های نیوماتیکی را محدود

کند، اما توسعه و پیشرفت در ساخت این نقاله‌ها باعث ایجاد سیستم‌های خلأ تا فاصلهٔ انتقال ۴۵۰ متر و سیستم‌های تحت فشار تا فاصله‌های ۱/۵ کیلومتر و اندکی بیشتر شده است (میلز، ۲۰۰۴).

د) محدودیت مواد:

عامل اصلی محدودکنندهٔ کاربرد نقاله‌های نیوماتیکی، معمولاً نوع موادی است که انتقال می‌یابند. این مواد باید در گروه مواد خشک و نسبتاً جریان‌پذیر قرار گیرند و از این‌رو باید خاصیت جریان‌پذیری مواد در شرایط انتقال هوایی به‌صورت دقیق اندازه‌گیری شود (شکل ۴)، زیرا برخی از مواد اگرچه در حالت عادی جریان‌پذیر نیستند اما تحت اثر نیروی باد می‌توانند نسبتاً جریان یابند. برای اندازه‌گیری خاصیت جریان‌پذیری مواد، از دستگاه‌های آزمون جریان‌پذیری تحت شرایط محیطی استاندارد، مانند دما و رطوبت، استفاده می‌شود. در این اندازه‌گیری، دیگر عوامل مؤثر بر جریان‌پذیری مانند اندازهٔ ذرات و ترکیب شیمیایی نیز مدنظر قرار می‌گیرد. به‌طورکلی، مواد شکننده نباید به‌طور نیوماتیکی انتقال داده شوند، مگر زمانی که خرد شدن مواد برای استفادهٔ نهایی ماده کم‌اهمیت باشد. انتقال نیوماتیکی برای جابه‌جایی مواد بسیار ساینده یا مرطوب مناسب نیست و نیز ممکن است برای جابه‌جایی مواد ظریف، که به‌راحتی آسیب‌پذیر هستند، مناسب نباشد.

شکل ٤- وضعیت جریان‌پذیری مواد در مسیر انتقال نیوماتیکی

و) نکات ایمنی:

سیستم‌های انتقال نیوماتیکی می‌توانند خطرهای ایمنی مانند انفجار یا آتش‌سوزی ایجاد کنند، از این‌رو ضروری است از تجهیزات مناسب استفاده و مسایل احتیاطی ایمنی در نظر گرفته شود. علاوه بر این محدودیت‌ها، انتقال نیوماتیکی می‌تواند سر و صدا ایجاد کند و برای محیط‌های کاری حساس به صدا مناسب نباشد. در مجموع، انتقال نیوماتیکی می‌تواند ابزار مفید برای کشاورزان و بهره‌برداران باشد، اما مهم است که پیش از به‌کارگیری این روش، مزایا و معایب آن به‌دقت بررسی شود.

طبقه‌بندی سیستم‌های انتقال نیوماتیکی

سیستم‌های انتقال نیوماتیکی را می‌توان با توجه به عملکرد و نوع و میزان فشار کاری آنها بر اساس فاز هوا یا ترکیب مواد، روش جابه‌جایی مواد و نوع فشار هوا دسته‌بندی کرد.

الف) طبقه‌بندی بر اساس فاز هوا:

سیستم‌های تک‌فاز: در این سیستم‌ها از یک منبع هوای فشرده واحد برای کل سیستم استفاده می‌شود و مواد به‌صورت معلق در هوا جابه‌جا می‌شوند. این سیستم‌ها معمولاً برای جابه‌جایی مواد با چگالی کم مانند پودرها و غلات و کاربردهای ساده‌تر و با ظرفیت پایین‌تر در مسافت‌های کوتاه مناسب هستند.

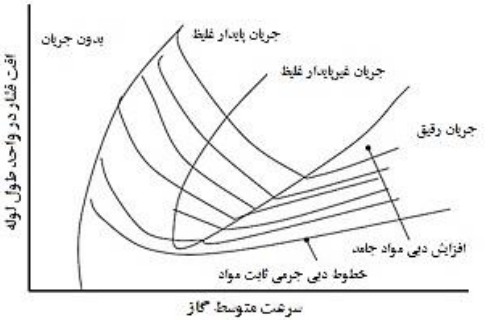
سیستم‌های دو فاز: در این سیستم‌ها از دو منبع هوا با فشارهای مختلف استفاده می‌شود. هوای پر فشار تولیدی در برخورد با مواد تزریق‌شده جریانی پر سرعتی ایجاد می‌کند که مواد به مسافت‌های دورتر منتقل می‌کند. سیستم‌های دو فاز معمولاً برای کاربردهای پیچیده‌تر و با ظرفیت بالاتر، مانند انتقال مواد سنگین یا چسبنده در مسافت‌های طولانی، استفاده می‌شوند. مواد می‌توانند به‌صورت معلق در هوا یا در تماس با جدارهٔ لوله جابه‌جا شوند. این سیستم‌ها برای جابه‌جایی مواد با چگالی‌های مختلف مناسب هستند.

ب) طبقه‌بندی بر اساس روش جابه‌جایی مواد:
سیستم‌های جریانی: در این سیستم‌ها، مواد به‌صورت پیوسته در یک جریان هوا حرکت می‌کنند. این سیستم‌ها برای جابه‌جایی مواد در مسافت‌های طولانی مناسب هستند.
سیستم‌های کپسولی: در این سیستم‌ها، مواد در داخل کپسول‌هایی قرار داده می‌شوند که با هوا جابه‌جا می‌شوند. این سیستم‌ها برای جابه‌جایی مواد حساس یا گران‌قیمت مناسب هستند.

ج) طبقه‌بندی بر اساس نوع فشار هوا:
سیستم‌های فشار مثبت: در این سیستم‌ها، هوا با فشار مثبت به داخل لوله یا مجرا تزریق می‌شود و مواد را به سمت جلو حرکت می‌دهد. این سیستم‌ها متداول‌ترین نوع سیستم‌های انتقال نیوماتیکی هستند (پری و گرین، ۲۰۰۸).
سیستم‌های فشار منفی (خلأ): در این سیستم‌ها، از فشار منفی (خلأ) برای ایجاد مکش و کشیدن مواد به داخل لوله یا مجرا استفاده می‌شود. این سیستم‌ها برای جابه‌جایی مواد خطرناک یا قابل اشتعال مناسب هستند.

میزان بارگذاری مواد جامد، معیار مناسبی برای طبقه‌بندی نقاله‌های نیوماتیکی است که می‌توانند طیف وسیعی از حالت‌ها را در برگیرند. بنابراین حالت انتقال می‌تواند شامل جریان گاز (مانند هوا) در خط انتقال (لوله) بدون وجود مواد جامد یا مملو از مواد جامد باشد. اکثر سیستم‌های انتقال نیوماتیکی در شرایطی بین این دو حالت عمل می‌کنند و به‌طورکلی بسته به میزان بارگذاری مواد جامد و سرعت جریان مواد، به‌عنوان سیستم‌های فاز غلیظ یا فاز رقیق دسته‌بندی می‌شوند. این دسته‌بندی به‌صورت مناسبی در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. در این نمودار، افت فشار در واحد طول لوله به‌عنوان تابعی از سرعت متوسط گاز و دبی جرمی مواد حاصل می‌شود. بر اساس اطلاعات این نمودار، هنگامی‌که سرعت ذرات به بالاتر از سرعت جهشی برسد، به‌خصوص زمانی که نسبت بارگذاری کم (معمولاً کمتر از ۱۵) باشد، مواد به‌صورت معلق درمی‌آیند و در این حالت انتقال فاز رقیق اتفاق می‌افتد. شکل

۶ نحوهٔ حرکت دانه‌های کلزا در فاز رقیق را نشان می‌دهد (ایمان‌مهر و همکاران، ۱۳۸۶). سرعت جهشی حداقل سرعت هوا در لوله‌های افقی است برای جلوگیری از ته‌نشین شدن ذرات در کف لوله، و نسبت بارگذاری نسبت جرم مواد ورودی به خط انتقال است به جرم هوا در واحد زمان.



شکل ۵- حالت کلی انتقال نیوماتیکی مواد جامد در یک لوله

شکل ٦- انتقال دانه کلزا در حالت فاز رقیق

اگر سرعت گاز به آرامی کاهش یابد، افت فشار لازم برای انتقال مقداری ثابت از مواد نیز کاهش می‌یابد. کاهش بیشتر سرعت گاز (نسبت به یک سرعت جهشی) منجر به افزایش افت فشار می‌شود زیرا ذرات شروع به خارج شدن از حالت تعلیق می‌کنند و برخورد بین ذرات

افزایش می‌یابد. این ناحیه، با نسبت بارگذاری معمولاً بالاتر از ۱۵ و سرعت متوسط گاز کمتر از سرعت جهشی، انتقال فاز غلیظ نامیده می‌شود. شکل ۷ نحوهٔ حرکت دانه‌های کلزا را در فاز غلیظ نشان می‌دهد (ایمان‌مهر و همکاران، ۱۳۸۶).

شکل ۷- انتقال دانه کلزا در حالت فاز غلیظ

در بسیاری از مواد، ایجاد مرز مشخص برای جداسازی مناطق فاز غلیظ و فاز رقیق دشوار است و انتقال می‌تواند در محدوده‌ای پیوسته از حالت کاملاً معلق تا بستری در حال حرکت آرام رخ دهد. در دیگر مواد، نواحی بسیار متمایزی مشاهده می‌شود و فرآیندهای انتقال به‌صورت بسیار پایدار یا ناپایدار پیش می‌رود. انتقال فاز غلیظ که انتقال غیر معلق[1] نیز نامیده می‌شود، معمولاً برای تخلیه ذرات جامد یا جابه‌جایی مواد در فاصله‌های کوتاه استفاده می‌شود. انواع مختلفی از تجهیزات انتقال نیوماتیکی مانند نقاله‌های فاز مسدود، سیستم‌های سیلانی، مخازن دمشی و سیستم‌های نوآورانه‌تر مسافت–طولانی وجود دارند. نقاله‌های فاز رقیق یا فاز پراکنده[2]، پرکاربردتر هستند و می‌توان آنها را سیستم‌های انتقال نیوماتیکی معمولی در نظر گرفت. قابل‌قبول‌ترین طبقه‌بندی نقاله‌های فاز رقیق شامل سیستم‌های فشاری، مکشی (خلأ) ، ترکیبی و مدار بسته[3] است.

1. Non-suspension
2. Disperesed-phase conveyors
3. Closed-loop

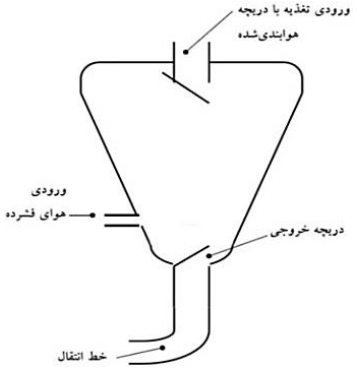
نقاله‌های فاز غلیظ

گسترش فناوری انتقال فاز غلیظ، پتانسیل استفاده از این سیستم‌ها را برای پوشش فاصله‌های متحرک طولانی‌تر به میزان قابل‌توجهی افزایش داده است. در مقایسه با انتقال فاز رقیق معمولی، این سیستم‌های نسبتاً پرفشار را می‌توان به‌طور ایمن طراحی کرد تا با سرعت‌های پایین انتقال کار کنند، که به‌نوبهٔ خود منجر به سایش کمتر خط لوله، کوچک‌تر شدن اندازه لوله‌های انتقال و کمتر شدن هزینه‌های عملیاتی می‌شود. اجزای اصلی سیستم‌های انتقال نیوماتیکی فاز غلیظ اصولاً شامل محرک گاز، تغذیه‌کننده‌های مواد جامد، خطوط لوله و جداکننده‌ها هستند. موقعیت اجزای درون سیستم ممکن است از نوعی به نوع دیگر متفاوت باشد ولی کاربرد آنها مشابه است. محرک گاز، سرعت جریان مناسبی از گاز را برای جابه‌جایی مواد در سرعت و فشار بالا فراهم می‌سازد. تغذیه‌کننده، ذرات جامد را با سرعت کنترل‌شده‌ای به خطوط لوله منتقل می‌کند. در آنجا مواد با گاز انتقالی مخلوط می‌شوند.

نقاله‌های فاز مسدود[1]

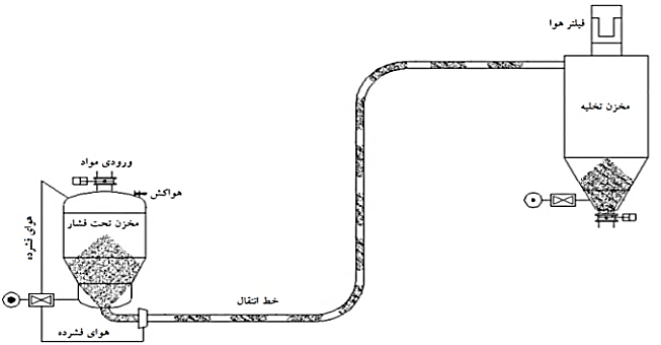
انتقال فاز مسدود (پلاگ) اساساً نوعی از سیستم‌های انتقال نیوماتیکی است که در آن مواد جامد به‌صورت توده‌های فشرده در داخل لوله حرکت می‌کنند. این سیستم‌ها بخشی از سیستم‌های انتقال فاز غلیظ شناخته می‌شوند و برای انتقال مواد حساس، ساینده، یا با چگالی بالا به‌کار می‌روند. ساختار معمولی تغذیه‌کنندهٔ فاز مسدود در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دستگاه با وارد کردن هوای فشرده در بالای سر ماده موجود در مخزن تحت فشار عمل می‌کند.

1. Plug-phase conveyors



شکل ۸- نمای یک تغذیه‌کنندهٔ فاز مسدود

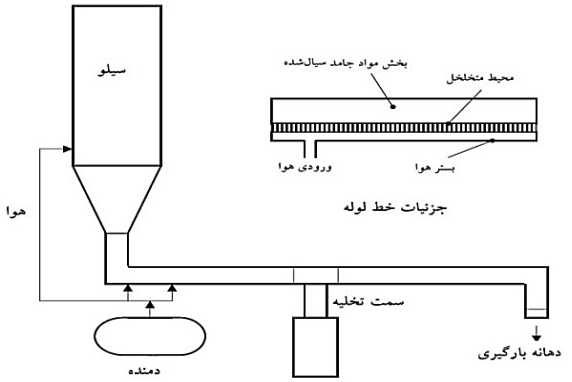
ماده اگر جریان‌پذیر باشد، از طریق یک دریچه جریان می‌یابد و به یک خط انتقال کوتاه راه می‌یابد (شکل ۹). هنگام استفاده از این سیستم باید مراقب بود که از موج‌های هوای ناشی از تخلیه مخزن یا عبور هوا از محصول جلوگیری شود. این نوع سیستم انتقال را می‌توان برای انتقال مواد دانه‌ای مانند غلات و دیگر ذرات غذایی در فاصله‌های نسبتاً کوتاه، مثلاً تا ۲۰۰ متر، استفاده کرد. روش تزریق هوا می‌تواند تأثیر بسزایی در عملکرد و کارایی کلی سیستم داشته باشد. در مقایسه با سیستم‌های انتقال مرسوم، هم فاز غلیظ و هم فاز رقیق، انتقال فاز مسدود مزایایی مانند استفاده از سرعت‌های انتقال کم و به حداقل رساندن فرسایش سیستم را شامل می‌شود.



شکل ۹- نمایی از عملکرد انتقال فاز مسدود

سیستم‌های سیلانی[1]

سیستم‌های سیلانی یا سیالینه به فرآیندی اطلاق می‌شود که در آن ذرات جامد (مانند پودرها، گرانول‌ها یا ذرات ریز) به‌واسطهٔ جریان گاز یا مایع به حالت شناور درمی‌آیند و رفتاری شبیه به مایع از خود نشان می‌دهند. این روش ممکن است برای تخلیهٔ ذرات جامد موجود در سیلوها یا وسایل حمل و نقل مواد توده‌ای به‌کار رود. کاربردهای دیگر سیستم‌های سیلانی، شامل انتقال مواد خیلی ریز غیرجریان‌پذیر در فاصله‌های کوتاه است که پیش‌تر به حالت سیال درآمده‌اند. نمای یک سیستم سیلانی در شکل ۱۰ ارائه شده است.

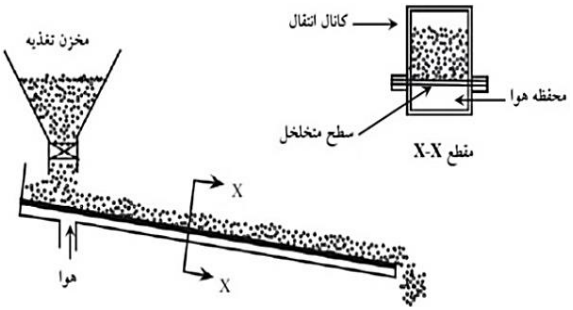


شکل ۱۰- سیستم انتقال سیلانی

برای سیالینه شدن ذرات از محفظه‌ای استفاده می‌شود که در آن هوا از یک بستر عبور می‌کند و موادی که قرار است منتقل شوند روی آن قرار می‌گیرند. بسترهای مورد استفاده از کاشی‌های سرامیکی متخلخل، فلز یا پلاستیک متخلخل، توری سیمی ریز و مواد مشابه تشکیل شده‌اند. با عبور هوا از بستر متخلخل، هر ذره با لایه‌ای از هوا احاطه می‌شود. در نقطهٔ سیالینه‌سازی[2] اولیه، ماده به‌صورت پودر یا ذرات جریان‌پذیر رفتار می‌کند. مواد جامد سیالینه‌شده، به‌واسطهٔ هوای تحت فشار در خطوط لوله عبور داده می‌شوند. این هوا از طریق

1. Fluidized systems
2. Fluidization

سوراخ‌های تعبیه‌شده روی یک لوله داخلی انعطاف‌پذیر در طول خط لولهٔ اصلی به بستر مواد هدایت می‌شود. در واقع، مواد سیالینه‌شده با ایجاد افت فشار در طول خط لوله منتقل می‌شوند. سیستم‌های سیلانی، قابل اطمینان‌ترین و باصرفه‌ترین روش برای انتقال برخی پودرها و مواد جامد توده‌ای در فاصله‌هایی از چند متر تا حدود یک کیلومتر هستند (ماینوارنینگ و رید، ۱۹۸۷). این سیستم‌ها از ویژگی‌های سیالات و ظرفیت حمل مادهٔ جامد توده‌ای با هوا بهره می‌برند. مناسب بودن مادهٔ خاص برای این حالت انتقال و بهترین نوع تغذیه‌کننده برای این سیستم‌ها را باید با داده‌های آزمایشی تعیین کرد. مواد معمولی که با استفاده از وسایل نقلیه جاده‌ای و ریلی تخلیه می‌شوند، شامل بارهای توده‌ای شکر، نمک و آرد هستند. سیستم انتقال سیلانی ممکن است در انتقال گرانشی مواد دانه‌ای به‌کار گرفته شوندکه نقالهٔ گرانشی هوایی[1] نامیده می‌شود (شکل ۱۱).



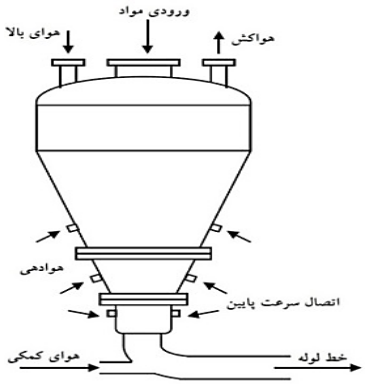
شکل ۱۱- نقاله گرانشی به کمک هوا

مخازن دمشی[2]

این نوع انتقال نیوماتیکی به‌صورت فاز غلیظ با حرکت آهسته اجازه می‌دهد تا محصولات شکننده با حداقل تخریب یا آسیب‌دیدگی منتقل شوند. در چنین شرایطی انتقال مواد جامد معمولاً در محدودهٔ سرعت ۰/۲۵ تا ۲ متر بر ثانیه اتفاق می‌افتد (دوداپکار و جکوپ،

1. Air-assisted gravity conveyor
2. Blow tanks

۲۰۰۷). این ویژگی برای طیف گسترده‌ای از محصولات غذایی، به‌ویژه برای آنهایی که مستعد فرسایش هستند، بسیار مهم است. مواد غذایی مانند شکر، گندم، جو، پودر شیر خشک، بادام زمینی، غلات آسیاب‌شده و قهوهٔ پودرشده و دانه‌ای با موفقیت توسط این سیستم منتقل می‌شوند. سیستم‌های انتقال نیوماتیکی سرعت پایین در فشارهای انتقال نسبتاً بالا (۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلو پاسکال) عمل می‌کنند و درنتیجه باید ساختار فیزیکی قابل اطمینانی داشته باشند (میلز، ۲۰۰۴). به‌دلیل وجود مقادیر بسیار بالای تراکم[1] مواد در حال انتقال، شرایط عملیات بعدی کاملاً به ماهیت و خواص فیزیکی مواد منتقل‌شده بستگی دارد. به همین دلایل، مهم است که پیش از انتخاب یا طراحی چنین تجهیزاتی، آزمایش‌هایی در مقیاس کامل[2] اجرا شود. نمایی شماتیک از مخزن دمشی در شکل ۱۲ ارائه شده است.

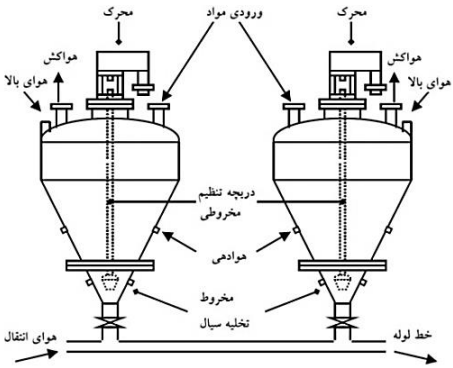


شکل ۱۲- مخزن دمشی کم سرعت

سیستم‌های طولانی‌مسیر[3]

1. Concentration
2. Full-scale
3. Long-distance systems

یکی از جالب‌توجه‌ترین و نوآورانه‌ترین کاربردهای انتقال نیوماتیکی فاز غلیظ، حمل و نقل مواد در مسافت طولانی است. در این حالت، انتقال مواد ریز و درشت در فاصله‌های ۳ یا ۴ کیلومتری با این سیستم امکان‌پذیر است (لوی، ۲۰۰۰). این روش را می‌توان، همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده، با آرایش پشت سر هم مخازن دمشی به‌دست آورد. سیستم‌های طولانی مسیر در فشارهای بالا کار می‌کنند و باید توجه ویژه‌ای به کنترل تغذیهٔ مواد جامد به خط لوله شود. این کار را می‌توان با سیستم تنظیم مخروطی[1] به‌انجام رساند. در چنین سیستمی، جریان مواد جامد با حرکت یک مخروط دوتایی کنترل می‌شود که در نزدیکی خروجی مخزن دمشی قرار دارد.



شکل ۱۳- مخازن دمشی پهلو به پهلو برای انتقال نیوماتیکی طولانی‌مسیر

مخروط به‌طور پیوسته در داخل مخزن به‌سمت بالا و پایین حرکت می‌کند، اما کورس حرکتی آن بر اساس سیگنال اندازه‌گیری فشار برگشتی خط انتقال و نقطهٔ تنظیم، توسط کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی[2] تنظیم می‌شود. هر چه فشار انتقال یا فشار کاری بالاتر باشد، نقطهٔ تنظیم مخروطی در داخل مخزن پایین‌تر است. جریان مواد جامد به خط لولهٔ انتقال از این طریق محدود می‌شود تا زمانی‌که فشار انتقال رضایت‌بخشی برقرار شود. علاوه بر این،

1. Cone-dosing system
2. Proportional-integral controller

سیستم تنظیم مخروطی ویژگی اضافی و مفید به‌هم‌زدن مکانیکی و کمک به جریان مواد به‌هم پیوسته (هم‌چسب[1]) را فراهم می‌سازد.

نقاله‌های فاز رقیق

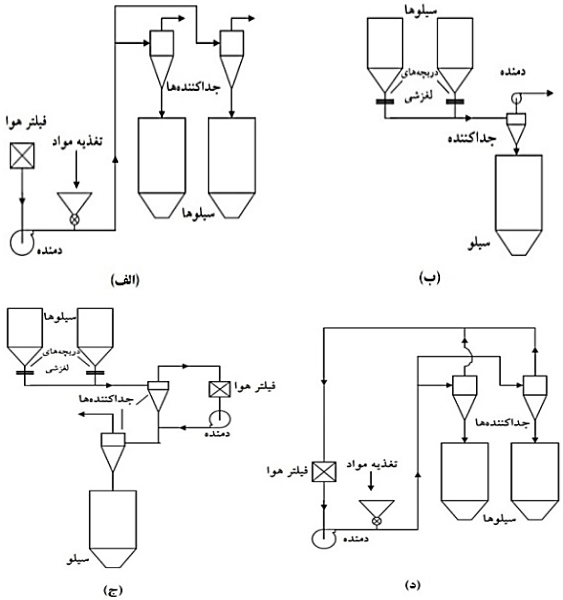
انتقال فاز رقیق روشی است که معمولاً برای انتقال طیف گسترده‌ای از ذرات مواد جامد با استفاده از جریان هوا به‌صورت محوری در امتداد خط لوله استفاده می‌شود. این روش عمدتاً با نسبت کم مواد جامد به هوا و با این واقعیت معرفی می‌شود که هوا و مواد جامد به‌عنوان یک سیستم دو فازی در داخل یک خط لوله جریان دارند.

انواع نقاله‌های فاز رقیق

شکل ۱۴ چهار نوع اصلی سیستم‌های انتقال فاز رقیق را نشان می‌دهد. سیستم فشاری، که به آن سیستم فشار مثبت یا سیستم رانشی[2] نیز می‌گویند، در فشار بالاتر از فشار اتمسفر عمل می‌کند و برای تحویل به چند خروجی از یک ورودی استفاده می‌شود (شکل ۱۴ الف). اگرچه بیشتر کاربردهای این سیستم‌ها در محدودهٔ انتقال فاز رقیق است، اما با تدبیرهایی خاص می‌توانند به‌عنوان نقاله‌های فاز غلیظ و فشار بالا نیز عمل کنند. به‌طورکلی، سیستم‌های فشاری می‌توانند در مقایسه با سیستم‌های فشار منفی، ظرفیت‌های بالاتر و فاصله‌های انتقال طولانی‌تری داشته باشند. سیستم خلأ[3]، فشار منفی یا کششی[4]، در فشار کمتر از فشار اتمسفر کار می‌کند و برای تحویل به یک خروجی از چند ورودی استفاده می‌شود (شکل ۱۴ب). سیستم‌های خلأ، نسبت به سیستم‌های فشار مثبت، معمولاً برای انتقال در فاصله‌های کوتاه‌تر و نیز بارگذاری مواد جامد در حالت رقیق‌تر در نظر گرفته می‌شوند. هنگامی‌که هر دو ویژگی سیستم‌های فشاری و خلأ در یک واحد ترکیب شوند، می‌توان از مزایای هر یک از آنها استفاده کرد (شکل ۱۴ج). این آرایش از دو بخش تشکیل

1. Cohesive materials
2. Push system
3. Vacuum system
4. Pull system

شده است: یک سیستم مکشی/فشاری که بخش اولیهٔ فشار منفی و به‌دنبال آن یک مدار فشار مثبت باعث جابه‌جایی مواد می‌شود. مزیت این سیستم آن است که از سهولت تغذیه در حالت خلأ استفاده می‌شود و از ظرفیت بالاتر و فاصله انتقال بیشتر در هنگام استفاده از فشار مثبت بهره می‌گیرد. در سیستم مدار بسته، گردش مجدد هوا (شکل ۱۴د) موجب جلوگیری از آبزدایی[1] و کاهش آلودگی محصول توسط هوا می‌شود. با این حال، کنترل چنین سیستم‌هایی اغلب دشوار است و ممکن است برای جلوگیری از گرمای بیش از حد هوا در اثر چرخش مجدد توسط پمپ، به یک خنک‌کننده داخلی[2] نیاز باشد.

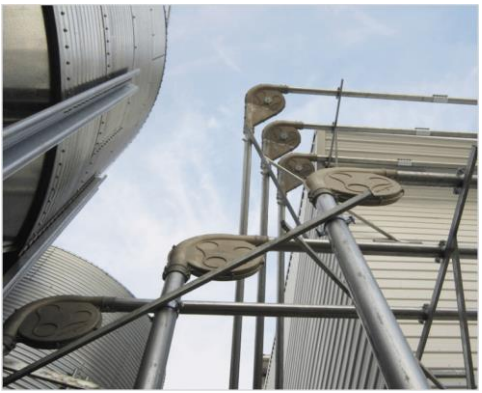


شکل ۱۴: سیستم‌های انتقال نیوماتیکی فاز رقیق:
(الف) سیستم فشاری، (ب) سیستم مکشی، (ج) سیستم ترکیبی، (د) سیستم مدار بسته

1. Dehydration
2. Intercooler

نقاله‌های هوایی-مکانیکی[1]

نقاله‌های هوایی-مکانیکی برای انتقال مواد با استفاده از اجزای انتقال‌دهنده انعطاف‌پذیر (کابل یا تسمه) عمل می‌کنند. ذرات جامد در جریان هوا به حالت معلق درمی‌آیند و در طول مسیر انتقال، همراه با جریان هوا حرکت می‌کنند. هنگامی‌که ذرات به حالت سیال در می‌آیند، سرعت آن‌ها هم‌راستا با جریان هوا می‌شود و قابلیت جریان‌پذیری‌شان افزایش می‌یابد و به این ترتیب به محل تخلیه منتقل می‌شوند. عبارت هوایی-مکانیکی به استفاده از ابزارهای مکانیکی برای ایجاد جریان هوا اشاره دارد. نقاله‌های هوایی-مکانیکی، سادگی و بازدهی انرژی روش‌های معمول انتقال مکانیکی را با ظرفیت و اثربخشی سیستم‌های انتقال نیوماتیکی (بادی) ترکیب می‌کنند (شکل ۱۵).

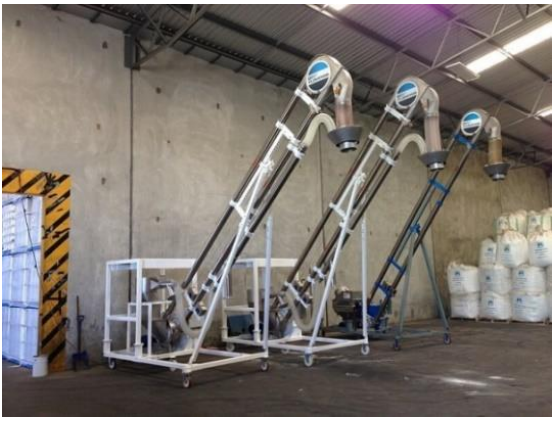


شکل ۱۵: یک سیستم انتقال هوایی-مکانیکی

از نظر قابلیت حمل بدون گرد و غبار و تمیز بودن، نقاله هوایی-مکانیکی یکی از مؤثرترین روش‌های انتقال محصولات است. نقاله هوایی-مکانیکی دارای طراحی لوله‌ای شکل است که مواد در آن با سرعت بالا حرکت می‌کنند. این سیستم از مجموعه‌ای از

1. Aero Mechanical Conveyors

سیم‌بکسل با دیسک‌های پلی‌اورتان با فاصله دقیق تشکیل شده است. سیم‌بکسل درون چرخ‌دنده‌های مخصوصی که در دو انتهای نقاله تعبیه شده‌اند، حرکت می‌کند. بسته به طول یا نیازمندی‌ها، می‌توان بخش محرک را در قسمت بالا یا پایین نقاله قرار داد. حرکت پرسرعت مجموعه سیم‌بکسل، جریان هوایی با سرعت مشابه ایجاد می‌کند. مواد با ورود به جریان هوا، سیال و به خروجی منتقل می‌شوند و در آنجا با نیروی گریز از مرکز خارج خواهند شد. بدین ترتیب، ظرفیت بالا با مصرف انرژی کم و بدون آسیب‌دیدگی یا جداسازی محصول حاصل می‌شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های سیستم انتقال هوایی–مکانیکی، امکان حمل مواد در هر زاویه‌ای از صفر تا ۹۰ درجه بدون کاهش ظرفیت است. با استفاده از اجزای استاندارد و محیط تولید می‌توان تعداد تقریباً نامحدودی از پیکربندی‌های عملیاتی را ایجاد کرد و انعطاف‌پذیری بالایی را در طراحی سیستم به دست آورد (شکل ۱۶).



شکل ١٦: ساختار متنوع در سیستم‌های انتقال هوایی–مکانیکی

نقاله‌های هوایی–مکانیکی ظرفیت حمل بالایی دارند و می‌توانند حجم زیادی از مواد را به سرعت جابه‌جا کنند. مهم‌ترین مزیت آن‌ها، مانند سیستم‌های انتقال نیوماتیکی، حمل ملایم محصول و جلوگیری از جدا شدن اجزای آن است. این نقاله‌ها با سیال‌سازی مواد توسط جریان پر سرعت هوا، بسیاری از چالش‌های مربوط به جابه‌جایی مواد سخت را برطرف

می‌کنند. در حین کار، مواد درون لولهٔ انتقال حرکت می‌کند و با دیوارهٔ لوله کمترین تماس را دارند و به‌طور کامل تخلیه می‌شوند (شکل ۱۷). مواد درون لوله‌ای بسته حمل می‌شوند و از این‌رو نقاله‌های هوایی–مکانیکی کاملاً ضدغبار هستند. برخلاف سیستم‌های نیوماتیکی که برای انتقال مواد هوای اضافی تزریق می‌کنند، در این سیستم نیازی به فیلتر کردن غبار خروجی نیست. هر مقدار ماده‌ای که در خروجی تخلیه نشود، به‌سادگی تا زمان خروج در سیستم بسته گردش می‌کند. مواد روی بالشتکی از هوا معلق می‌مانند که توسط دیسک‌های پر سرعت ایجاد می‌شود. این امر منجر به حرکتی نرم در انتقال می‌شود و از آسیب‌رساندن به محصولات نهایی ظریف در هنگام عبور از تجهیزات بسته‌بندی جلوگیری می‌کند. برای ایجاد نیروی گریز از مرکز، یک موتور کوچک و کارآمد مجموعه‌ای از طناب‌های داخلی را با سرعت بالا به گردش درمی‌آورد. این حرکت، مواد اولیه را درون محفظهٔ هوا معلق می‌کند و به سرعت و در عین حال با ملایمت به محل جمع‌آوری منتقل می‌سازد.

شکل ۱۷: سیال‌سازی مواد در سیستم‌های انتقال هوایی–مکانیکی توسط جریان پرسرعت هوا

فناوری سیال‌سازی، به همراه چندین ویژگی متمایز دیگر، آن را به راه حلی ایده‌آل برای انتقال مواد در صنایع مختلف تبدیل می‌کند. سرعت بالای دیسک‌ها باعث ایجاد ستونی از هوای فشرده می‌شود. پودر در حال انتقال با جریان هوا ترکیب و به خروجی منتقل می‌گردد،

جایی که با نیروی گریز از مرکز به مخزن گیرنده تخلیه می‌شود. مزیت سیستم نوع «هوایی–مکانیکی» این است که می‌تواند مواد را در هر زاویه‌ای از افقی تا عمودی بدون افت کارایی تحویل دهد. سرعت خطی بالای نقاله‌های هوایی–مکانیکی که به دیسک‌ها منتقل می‌شود، هوا را جابه‌جا می‌کند که قادر به سیال‌سازی مواد و در نتیجه حرکت آسان آن‌هاست. در نتیجه، مصرف انرژی پایین، عملکرد مثبت، بازدهی بالا و ظرفیت زیاد حاصل می‌شود. در نقاله‌های هوایی–مکانیکی از نیروی گریز از مرکز برای تخلیهٔ محصول و جداسازی آن از هوای ایجاد شده در طول حرکت استفاده می‌شود. خروج مواد توسط یک منحنی تخلیهٔ خاص متوقف می‌شود و هوا بلافاصله دوباره به مدار وارد خواهد شد (شکل ۱۸).

شکل ۱۸: . خروج مواد توسط یک منحنی تخلیه در سیستم‌های انتقال هوایی–مکانیکی

نکتهٔ مهم در عملکرد این سیستم این است که کاربر به خاطر داشته باشد که نقاله مواد را از ورودی به خروجی نمی‌کشد، بلکه باید با سرعت کافی کار کند تا مواد را با سرعت بالایی حرکت دهد و نیروی گریز از مرکز امکان تخلیه را فراهم سازد. به‌طورکلی، هر چه سیال‌سازی محصول برای روش‌های هوایی–مکانیکی آسان‌تر باشد، انتقال آن نیز ساده‌تر است. برای محصولاتی که جامد، دانه‌ای‌شکل و سخت سیال‌شونده هستند ممکن است نیاز

به تمهیدات ویژه‌ای باشد. این نقاله‌ها با ظرفیت بالا و قابلیت خود تمیز شوندگی، پس از هر چرخه انتقال، مقدار بسیار کمی مواد را در سیستم باقی می‌گذارند. این نقاله‌ها می‌توانند عملیات پیوسته، دوره‌ای یا دسته‌ای را مدیریت کنند و قادر به انتقال طیف گسترده‌ای از مواد از جمله پودرها، گرانول‌ها و ساچمه‌ها در این فرآیندها هستند.

مزایای کلی نقاله‌های هوایی–مکانیکی عبارت‌اند از:

- ظرفیت حمل بالا
- حمل ملایم مواد
- کاهش گرد و غبار
- مصرف کمتر انرژی نسبت به نقاله‌های تمام نیوماتیکی (هوایی)
- کارایی بالا
- قابلیت حمل مواد در زاویه‌های مختلف
- عمر طولانی
- سازگاری با محیط زیست

مشکلات رایج و راه‌حل آنها در انتقال نیوماتیکی

برخی از مواد در حین جابه‌جایی به‌تدریج روی شعاع خارجی انحناهای لوله جمع می‌شوند و بعد از مدتی لوله را مسدود می‌کنند. مواد دیگری در طول لولهٔ انتقال تفکیک می‌شوند و در فیلتر خروجی گرد و خاک باقی می‌مانند. برخی از مواد دیگر، رطوبت هوا را جذب می‌کنند و به دیوار لوله‌ها می‌چسبند. مخلوط پودری خشک که سهولت جریان پذیری مناسبی دارد، ممکن است در اثر افزایش دمای هوای خطوط انتقال که به دلیل فشار دمندهٔ تأمین‌کننده هوا ایجاد می‌شود، به یک مادهٔ چسبناک و مسدودکنندهٔ لوله تبدیل شود. مواد معطر ممکن است بوی خود را به‌هنگام انتقال از دست بدهند، درحالی‌که مواد دیگری ممکن است بوهای جریان هوای ورودی دمنده را جذب کنند. مادهٔ ساینده‌ای که پیش‌تر با سایش کم منتقل

می‌شده، ممکن است به‌دلیل تغییر منبع تهیهٔ ماده و تغییر روش پودر کردن آن ناگهان سایش زیادی به‌وجود آورد. این بدین معنی است که ماده‌ای با نام خاص، ممکن است در شرایط تولید، خواص انتقال متفاوت پیدا کند (ژو و همکاران، ۲۰۲۱).

در اینجا برخی از مشـــکلات رایج انتقال نیوماتیکی و راه‌های حل آنها در جدول ۱ آورده شده است.

با رفع این مشکلات و به‌کارگیری راه حل‌ها، از انتقال نیوماتیکی می‌توان به‌طور مؤثر و ایمن در عملیات انتقال استفاده کرد.

جدول ۱- مشکلات احتمالی و راه‌های حل آنها در استفاده از نقاله‌های نیوماتیکی

مشکل احتمالی	راه‌حل
گرفتگی لوله: انسداد لوله‌ها می‌تولند جریان مواد را مختل کند و منجر به خرابی سیستم شود.	• از فیلترهای مناسب برای حذف ذرات و آلودگی‌ها از هوای فشرده استفاده شود. • سیستم به‌طور مرتب بازرسی و تمیز شود. • از موادی برای لوله‌ها استفاده شود که در برابر سایش و خوردگی مقاوم باشند.
فرسایش: سایش ناشی از ذرات موجود در مواد می‌تواند منجر به نازک شدن لوله‌ها و اتصالات و در نهایت خرابی آنها شود.	• از مواد مقاوم در برابر سایش برای لوله‌ها و اتصالات استفاده شود. • سرعت مواد در سیستم کاهش یابد. • مواد قبل از انتقال به سیستم به‌طور مناسب اندازه‌بندی شوند.
تفکیک ذرات: در انتقال مواد پودری، ذرات ریزتر می‌توانند از ذرات بزرگ‌تر جدا شوند و در انتهای خط لوله تجمع پیدا کنند. این امر می‌تواند منجر به انسداد و منسجم نبودن مواد شود.	• از سیستم‌های انتقال با سرعت کم استفاده شود. • مواد قبل از انتقال مرطوب شوند. • از افزودنی‌های مناسب برای بهبود انسجام مواد استفاده شود.
نشت هوا: این مشکل می‌تواند راندمان سیستم را کاهش و هزینه‌های عملیاتی را افزایش دهد.	• اتصالات و لوله‌ها به‌طور مرتب بررسی و در صورت نیاز تعمیر یا جایگزین شوند. • از اتصالات و مهر و موم‌های با کیفیت استفاده شود. • فشار هوا در سیستم به‌طور منظم کنترل شود.
سر و صدا: سیستم‌های انتقال نیوماتیکی می‌توانند سر و صدا ایجاد کنند که می‌تواند آزاردهنده باشد و بر محیط کار تأثیر منفی بگذارد.	• از مخزن‌های صداگیر استفاده شود. • لوله‌ها در عایق صدا قرار گیرند. • سرعت مواد در سیستم کاهش یابد.
مشکلات مربوط به مواد: برخی از مواد، مانند مواد مرطوب یا چسبنده، می‌توانند برای انتقال با سیستم‌های نیوماتیکی چالش برانگیز باشند.	• برای مواد مرطوب، از سیستم‌های انتقال با فاز رقیق استفاده شود. • برای مواد چسبنده، از سیستم‌های انتقال با فاز غلیظ استفاده شود. • مواد قبل از انتقال به سیستم به‌طور مناسب آماده شوند.

جمع‌بندی

انتقال نیوماتیکی احتمالاً کاربردی‌ترین نوع فناوری برای کارهای مختلف انتقال در صنایع غذایی است. مزایای انتقال با انواع مختلف نقاله‌های نیوماتیکی، کاملاً مناسب مواد غذایی است. با توجه به ویژگی‌های اکثر پودرها و ذرات مواد غذایی که در هنگام انتقال در معرض آسیب هستند، انتقال نیوماتیکی را به یک جایگزین مناسب برای فرآوری مواد غذایی تبدیل کرده است. برای مثال، انتقال نیوماتیکی موادی مانند شکر، پودر شیر خشک‌شده به روش اسپری و قهوهٔ پودر شده و دانه‌ای، مناسب‌ترین روش جابه‌جایی با حداقل مقدار خسارت را داشته است. علاوه بر موارد اشاره‌شده، از مزایای سیستم‌های انتقال نیوماتیکی در جابه‌جایی مواد غذایی می‌توان به ظرفیت خود تمیز شوندگی ، عملیات بدون گرد و غبار و حفظ شرایط بهداشت عمومی اشاره کرد.

منابع

- 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.
- AgriTechTomorrow. (2023). Applications of Pneumatic Systems in Agriculture. Retrieved from AgriTechTomorrow.
- Dhodapkar, S. V., & Jacob, K. V. (2007). Pneumatic conveying of solids: A review. Powder Technology, 174(1-2), 10-23. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.10.016
- Jacob, J., & Lippke, F. (2015). Pneumatic Conveying Systems. Springer.
- Klinzing, G. E., Rizk, F., Marcus, R., & Leung, L. S. (2010). Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3609-4
- Levy, A. (2000). Two-phase flow in pneumatic conveying systems. Powder Technology, 112(1-2), 1-12. https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00308-4
- Mainwaring, N.J. and Reed, A.R. (1987). Permeability and air retention characteristics of bulk solid materials in relation to modes of dense-phase pneumatic conveyor performance. Bulk Solids Handl. 7: 415-425.

- Mills, D. (2004). Pneumatic conveying design guide (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th ed.). McGraw-Hill.
- Yang, W., Williams, K., & Wypych, P. (2013). Conveying of Bulk Solids. Elsevier.
- Zhou, T., Guo, Y., & Cheng, L. (2021). Advances in Pneumatic Conveying Technologies. Journal of Material Handling and Transport, 12(4), 456-470.