اولین همایش ملی بهینه سازی و بهره وری مصرف انرژی در صنایع غذایی و کشاورزی
۲۶ و ۲۷ بهمن ۱۴۰۴ هتل المپیک – تهران
برگزار کننده: پژوهشگاه استاندارد
ISC

# کاهش مصرف انرژی با بهبود جریان مواد و طراحی Layout در واحد تولید پودرهای لبنی

مهتاب میرزاباقریان [۱]، معصومه اتحادی[۲]، رضا کیخایی[۳]

۱- کارشناس ارشد علوم و مهندسی صنایع غذایی، کارشناس تحقیق و توسعه شرکت سالم پودران سپاهان، اصفهان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی صنایع غذایی، مسئول تحقیق و توسعه شرکت سالم پودران سپاهان، اصفهان

۳- کارشناس علوم و مهندسی صنایع غذایی، مدیر کنترل کیفی شرکت سالم پودران سپاهان، اصفهان

ایمیل نویسنده مسئول: mahtabmirzabagherian@gmail.com

شماره مقاله: EFAB015831111

## چکیده

تولید پودرهای لبنی نظیر شیر خشک، آب پنیر خشک و پودر وی، یکی از انرژی‌برترین فرآیندهای در صنایع غذایی است. در این میان، چیدمان Layout تجهیزات و نحوه جریان مواد Material Flow تأثیر مستقیمی بر مصرف انرژی عملیاتی، به‌ویژه در بخش‌های خشک‌کن، انتقال و بسته‌بندی دارد. این مقاله به بررسی رابطه تنگاتنگ میان طراحی چیدمان کارخانه، بهینه‌سازی جریان مواد و شاخص‌های کلیدی مصرف انرژی SEC در واحدهای پودرسازی لبنی می‌پردازد. با استفاده از ابزارهای تحلیلی مهندسی صنایع نظیر نقشه‌برداری جریان ارزش VSM، نمودار از-به From-To Chart و نمودار اسپاگتی، نقاط اتلاف انرژی ناشی از مسافت‌های طولانی انتقال، استفاده نامناسب از نیروی پنوماتیک و سربار لجستیکی شناسایی می‌شود. همچنین، راهکارهایی مبتنی بر طراحی مجدد چیدمان خطی، U شکل یا سلولی با هدف افزایش استفاده از نیروی جاذبه Gravity Flow و کاهش مسافت‌های جابه‌جایی پیشنهاد می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی جریان مواد و چیدمان می‌تواند منجر به کاهش چشمگیر مصرف انرژی، بهبود ایمنی و کاهش اتلاف محصول گردد.

کلید واژه‌ها: پودرهای لبنی، بهینه‌سازی انرژی، جریان مواد، طراحی چیدمان، مهندسی صنایع، خشک‌کن پاششی

## مقدمه

صنایع لبنی در سطح جهان و ایران، به دلیل ماهیت فرآیندهای حرارتی و مکانیکی مورد نیاز، از صنایع با مصرف انرژی بالا طبقه‌بندی می‌شوند. در این صنعت، تولید فرآورده‌های خشک مانند شیر خشک کامل WMP، شیر خشک بدون چربی SMP و پودر پروتئین وی WPC/WPI، سهم قابل توجهی از مصرف انرژی کلی (شامل بخار برای اواپراتور و خشک‌کن، و برق برای پمپ‌ها و کمپرسورها) را به خود اختصاص می‌دهند (۱). در سال‌های اخیر، با توجه به افزایش قیمت حامل‌های انرژی و الزامات قانونی برای استقرار سیستم‌های مدیریت انرژی مانند ISO 50001، تمرکز از صرفاً بهینه‌سازی فرآیندهای اصلی (مانند بازیافت حرارت در اواپراتور) به بهینه‌سازی لجستیک داخلی و چیدمان کارخانه معطوف شده است. چیدمان تجهیزات و مسیر حرکت مواد خام، نیمه‌ساخته و نهایی، مستقیماً بر مسافت‌های طی شده، نیاز به سیستم‌های انتقال پرمصرف (مانند انتقال پنوماتیک) و در نتیجه مصرف برق و انرژی کلی تأثیر می‌گذارد (۲). هدف این مقاله، ارائه یک چارچوب تحلیلی ساختاریافته برای ارزیابی و بهبود چیدمان و جریان مواد در واحدهای تولید پودرهای لبنی است تا دستیابی به سطوح پایین‌تر شاخص مصرف انرژی ویژه SEC ممکن گردد.

## متن اصلی

نقشه طراحی Layout

چیدمان نحوه قرارگیری فیزیکی تجهیزات در فضای کارخانه را مشخص می‌کند و تعیین‌کننده مسیر اصلی جریان مواد است.

انواع چیدمان‌های متداول

- چیدمان خطی Product Layout

در این چیدمان، تجهیزات بر اساس توالی عملیات چیده می‌شوند. این چیدمان برای تولیدات حجیم و استاندارد مانند پودرهای لبنی مناسب است. با این حال، اگر تجهیزات بزرگ (مانند خشک‌کن) در ابتدا قرار گیرند، ممکن است انتقال محصول نهایی به سیلوها در انتهای خط، نیازمند مسیرهای طولانی باشد.

- چیدمان Uشکل U-Shaped Layout

این چیدمان گردش کار را بهبود بخشیده و نقطه شروع و پایان فرآیند را به هم نزدیک می‌کند. در واحدهای تولید پودر، می‌توان خشک‌کن و بسته‌بندی را در نزدیکی سیلوهای خروجی (یا با اتصالات کوتاه‌تر) قرار داد و در عین حال فضای لازم برای نگهداری تجهیزات کمکی را فراهم آورد. این نوع چیدمان اغلب منجر به کاهش زمان حمل و نقل داخلی می‌شود (۳).

- چیدمان سلولی Cellular Layout

بیشتر مناسب زمانی است که چندین نوع پودر با توالی فرآوری متفاوت تولید می‌شود. با گروه‌بندی تجهیزات مورد نیاز برای تولید یک نوع پودر خاص در یک "سلول"، مسیرها کوتاه‌تر شده و اختلالات بین خطوط مختلف کاهش می‌یابد. این امر مدیریت انرژی هر خط را مجزا می‌سازد.

ابزارهای تحلیلی برای بهینه سازی چیدمان

برای تعیین بهترین چیدمان، باید تحلیل‌های کمی بر روی وضعیت فعلی As-Is صورت گیرد.

- نقشه‌برداری جریان ارزش

VSM به تصویر کشیدن جریان مواد و اطلاعات در کل فرآیند کمک می‌کند. در این روش، می‌توان زمان‌های عملیاتی و زمان‌های توقف را اندازه‌گیری کرد. انرژی مصرفی غیرمستقیم (انتقال) به عنوان یک نوع "اتلاف" در این نقشه شناسایی می‌شود.

- نمودار از-به

این نمودار ماتریسی، حجم (یا وزن) مواد منتقل شده بین هر جفت ایستگاه کاری (مثلاً از خشک‌کن به سیلو ۱، از سیلو ۱ به واحد بسته‌بندی) را نشان می‌دهد. سپس، با استفاده از هزینه جابجایی (که می‌تواند متناسب با انرژی مصرفی باشد) برای هر انتقال، کل هزینه/انرژی جریان محاسبه می‌شود. این ابزار بهترین مبنا را برای ارزیابی اقتصادی تغییر چیدمان فراهم می‌کند (۵).

- نمودار اسپاگتی

نمودار اسپاگتی مسیر فیزیکی حرکت مواد (یا در مواردی اپراتور) را بر روی نقشه پلان کارخانه رسم می‌کند. در واحدهای پودر سازی، این نمودار مسیر لوله‌های انتقال پودر یا کابل‌های متصل به کمپرسورهای پنوماتیک را نشان می‌دهد. مسیرهای طولانی و متقاطع به سرعت به عنوان نقاطی برای طراحی مجدد شناسایی می‌شوند (۷).

- شبیه‌سازی DEM و CFD

- شبیه‌سازی دینامیک ذرات گسسته DEM : برای مدل‌سازی رفتار ذرات پودر در خشک‌کن‌ها و مسیرهای انتقال بادی و تعیین بهترین زوایای خروجی و سرعت‌های جریان مورد نیاز برای انتقال کارآمد با حداقل انرژی.
- دینامیک سیالات محاسباتی CFD : برای تحلیل توزیع دما و هوا در محفظه خشک‌کن و همچنین بررسی جریان‌های آشفته در مسیرهای انتقال پنوماتیک، که مستقیماً بر کارایی کمپرسورها تأثیر می‌گذارد.

## نتیجه گیری

بهبود جریان مواد و طراحی چیدمان در واحدهای تولید پودرهای لبنی، یک استراتژی کلیدی برای کاهش مصرف انرژی است که اغلب تحت‌الشعاع بهینه‌سازی‌های فرآیندی (مانند بازیافت حرارت) قرار می‌گیرد. انرژی مصرف شده برای جابجایی مواد (به‌ویژه در بخش خشک کردن و سیلوینگ) می‌تواند سهم قابل توجهی از کل مصرف برق کارخانه را تشکیل دهد. استفاده سیستماتیک از ابزارهایی نظیر VSM و نمودار از-به، امکان کمی‌سازی دقیق تأثیر طراحی فیزیکی بر انرژی را فراهم می‌آورد. چیدمان‌های مبتنی بر جریان مستقیم و کاهش واسطه‌ها مانند سلولی یا U شکل در صورت امکان، با بهره‌گیری از نیروی جاذبه، کارآمدترین مدل‌ها از منظر انرژی و لجستیک هستند.

## منابع

1. K. J. Walstra, T. Wiersma, and A. A. S. van der Vlist, *Dairy Technology: Principles and Applications*. CRC Press, 2005.
2. ISO 50001:2018, *Energy management systems — Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization, 2018.
3. Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, S. M. A., *Facilities Planning*. 4th ed., Wiley, 2010.
4. G. M. Woodcock, "Pneumatic Conveying of Powders: A Review of Design and Operation Practices," *Powder Technology*, vol. 38, pp. 161-174, 1984.
5. Heragu, S. S., *Facilities Design for Manufacturing*. 2nd ed., CRC Press, 2006.
6. M. S. El-Sayed, A. K. Hassan, and M. A. E. Farag, "Energy conservation through facility layout design in manufacturing systems," *International Journal of Productivity and Performance Management*, vol. 65, no. 3, pp. 359-375, 2016.
7. F. W. M. van der Heijden and R. C. H. P. H. van den Heuvel, "Energy efficiency in the dairy industry—a systematic review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 252, 120122, 2020.