



چکیده

صنعت تایرسازی یکی از صنایع کلیدی و راهبردی در زنجیره تأمین، حمل‌ونقل و صنعت خودروسازی محسوب می‌شود که نقش به‌سزایی در رشد اقتصادی و صنعتی کشورها ایفا می‌کند. فرآیند اختلاط (Mixing) در صنعت لاستیک سازی به عنوان یکی از مراحل پرمصرف انرژی شناخته می‌شود. توان مصرفی آن‌ها معمولاً بین ۸۰۰ کیلووات تا ۲۰۰۰ کیلووات (بسته به ظرفیت) است که چیزی حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد انرژی الکتریکی کارخانه تایرسازی را شامل می‌شود. افزایش هزینه های انرژی و فشارهای زیست محیطی، شرکت‌های تولید تایر را وادار به جستجوی راهکارهای نوآورانه در مدیریت منابع کرده است. در این مقاله فرآیند اختلاط آمیزه مورد بررسی قرار گرفته، در مورد انواع روتورهای میکسر و خصوصیات آنها در برش آمیزه و میزان مصرف انرژی هر یک صحبت شده است. به همین منظور در راستای بهبود بهره‌وری انرژی و ارتقای عملکرد میکسرهای بنبوری در اداره اختلاط کارخانه بارز، در یکی از خطوط اختلاط آمیزه اقدام به جایگزینی روتورهای کلاسیک 4W با روتورهای نسل جدید HDM شده است که منجر به کاهش شاخص SEC گردید.

واژه‌های کلیدی : فرآیند اختلاط، روتور میکسر، شاخص SEC، باله های HDM، مصرف انرژی

محور مقاله: پایداری و اقتصاد چرخشی

مقدمه

تولید تایر شامل فرایندهای پیچیده‌ای است که انجام هر مرحله از آن نیازمند مصرف بالای منابع انرژی می‌باشد. با توجه به بحران کمبود برق در ایران، ضرورت دارد تا الگوهای مصرف برق در این صنعت مورد بازنگری قرارگیرد. در فرآیند اختلاط آمیزه، میکسرهای اصلی‌ترین تجهیزات برای اختلاط آمیزه‌های لاستیکی هستند. نحوه کار آن‌ها به این شکل است که مواد اولیه (کائوچو، دوده، روغن‌ها و مواد شیمیایی) وارد محفظه بسته می‌شوند و توسط دو روتور با سرعت بالا تحت فشار و حرارت مکانیکی مخلوط می‌گردند. این فرآیند باعث تولید گرما و افزایش ویسکوزیته می‌شود که کیفیت آمیزه را تعیین می‌کند. از نظر مصرف انرژی، این میکسرهای جزو پرمصرف‌ترین دستگاه‌ها در ساخت تایر به شمار می‌روند. روتورها اصلی‌ترین جزء میکسر هستند؛ دو شافت چرخان با باله‌هایی مخصوص که مواد را برش داده، فشرده و مخلوط می‌کنند. از این رو مطالعه صورت گرفته راهکارهای کاهش مصرف انرژی با تعویض روتور مورد بررسی قرار گرفته است.

انواع روتورهای میکسر

روتورهای درهم فروزنده: در این طراحی(شکل ۱) در واقع مسیر تشریح شده با نوک روتورها همپوشانی دارد. بنابراین ارتباط شعاعی بین روتورها بایستی به صورت دائمی ثابت بوده و هر دو روتور باید سرعت یکسانی داشته باشند. در مقایسه با سیستم مماسی که مساحت سطحی برابر همان اندازه را نشان می‌دهد و یک قطر قابل مقایسه روتور، این طراحی حجم اتاقل اختلاط کاهش یافته ولی نسبت مساحت سطح به حجم بیشتر شده و خنک‌سازی بهبود می‌یابد. بنابراین کنترل دمای آمیزه به صورت قابل‌ملاحظه‌ای مؤثرتر بوده و برای رسیدن به یک دمای تخلیه یکسان، انرژی بیشتری را میتوان به آمیزه داد. به علاوه فاصله به وضوح کمتر بین روتورها در ناحیه درهم‌روندگی منجر به عمل اختلاط نیرومندتری میشود. در همین زمان فاکتور پرکنندگی در سیستم‌های درهم‌رونده حدوداً ۵٪ کمتر از سیستم‌های مماسی است. این میکسرهای با حجم آزاد بین ۰.۳ تا ۵۵۰ لیتر ساخته شده و قدرت موتور مورد نیاز برای آنها حدود ۱۰ تا ۲۰٪ بیشتر از مخلوط‌کن‌های مماسی هم‌اندازه آنهاست.[۱]

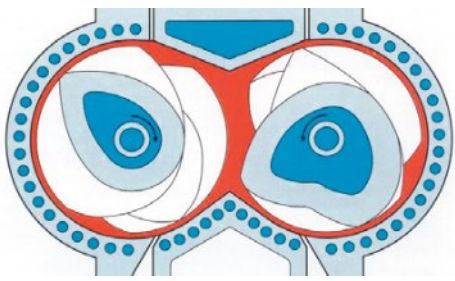
روتورهای مماسی: مشخصه متمایز کننده این نوع ماشین‌ها (شکل ۲) این است که طرح حرکت نوک باله‌های روتورها یکدیگر را لمس نمی‌کند. به این معنی که هنگامی که روتورها در حال چرخش‌اند، یک فضای خالی بین نوک باله‌های دو روتور وجود دارد. بنابراین سرعت هر روتور به صورت مستقل قابل کنترل بوده و می‌توانند سرعت‌های مختلفی داشته باشند. در عمل، به طور معمول سرعت یک روتور حدود ۱۰٪ بیشتر از دیگری است. انواع روتور و پروفایل مختلف برای کاربردهای مختلف اختلاط موجود است. تعداد باله‌های روتور، شکل باله‌ها، موقعیت قرارگیری آنها، طول آنها و زاویه باله نسبت به محور مرکزی روتور در طراحی روتورها تفاوت‌هایی را ایجاد میکنند. به طور متناظر با آن، طراحی روتور بر روی بازده اختلاط و نیز انرژی که به آمیزه میدهد اثرگذار است. تأثیر اختلاط را میتوان با اختلاط پراکنشی و اختلاط توزیعی تعریف کرد. فاصله بین دو روتور فضای بزرگی را برای تغذیه اجزاء به داخل اتاقک اختلاط ایجاد میکند و از این رو روتورهای مماسی رفتار تغذیه‌ای خیلی خوبی دارند. مخلوط‌کن های مماسی قدرت موتوری برابر حدود ۷ کیلو وات به ازای هر لیتر حجم مفید نیاز دارند. این قدرت موتور بسته به نوع روتورهای مورد استفاده و یا نوع آمیزه مورد اختلاط میتواند بالا یا پایین رود. به هر حال، مخلوط‌کن را نمیتوان کاملاً پر کرد، چرا که برای دستیابی به سطوح خوب اختلاط، آمیزه به فضای خالی در اتاقک اختلاط نیاز دارد تا روتورها بتوانند آن را در یک حالت بهینه حرکت دهند. به این معنی که حجم واقعی مفید حدود ۷۰ تا ۸۵٪ حجم آزاد ماشین خواهد بود.

نسبت حجم مفید به حجم آزاد با عنوان فاکتور پرکنندگی شناخته میشود. (به طور مثال ۷۰٪ به معنی فاکتور پرکنندگی برابر با ۰.۷ میباشد). فاکتور پر کنندگی بهینه برای یک آمیزه خاص به خود آمیزه (ساختار، نوع اجزاء، سختی و ...) بستگی دارد. مخلوط‌کن های مماسی با حجم آزاد در محدوده ۱ تا ۶۵۰ لیتر ساخته میشوند.

بهینه سازی مصرف انرژی در فرآیند اختلاط آمیزه با جایگزینی روتور HDM

مر تضي زمانی افشار، محمدرضا اسماعیلی

مسئول بخش تولید سالن اختلاط آمیزه، مسئول بخش برنامه ریزی نت سالن اختلاط آمیزه گروه صنعتی بارز



شکل (۲): روتورهای مماسی (Tangential) [۱]

وجه تمایز روتورهای مماسی در تعداد باله ها، موقعیت باله ها، طول باله ها، زاویهٔ باله ها، عرض نوک باله‌ها و طراحی کلی باله هاست. روتورهای مماسی نسل قدیم، ۴باله کلاسیک(۴-Wing)، در مقایسه با روتورهای HDM(Hydro Dynamic Mixing Rotor) که نسل جدید روتورهای میکسر بنبوری هستند؛ شکل هندسی و زاویه باله‌های متفاوتی دارند نه تعداد باله‌های متفاوت. در جدول زیر برخی تفاوت‌های این دو مدل روتور بررسی شده است.[۲]

دیدگاه	4W	HDM
نیروی برشی	اختلاط شدید پراکنشی	اختلاط آرام توزیعی
پراکنش فیبر	عالی برای پراکنش بالا(مثلا برای اختلاط دوده)	مناسب برای تنش برشی های کم، ایده‌آل برای ایجاد یکنواختی در اختلاط
مصرف انرژی	زیادتر به علت برش بالا	کم‌تر، برش پایین تر و حرارت زایی کمتر
یکنواختی اختلاط	اختلاط پراکنشی خوب، نیاز به مراحل اختلاط بیشتر جهت حصول یکنواختی	یکنواختی عالی به ویژه در مواقع استفاده از افزودنی های مایع و فیبرهای ریز
ایجاد گرما	بیشتر به علت تنش برشی بالاتر	کمتر به علت تنش برشی پایین تر
کاربری	کامپاندهای لاستیکی یا ویسکوزیته بالا، نیاز به پراکنش شدید فیبر	کامپاندهای نیاز به توزیع یکنواخت، مواد حساس به حرارت
وزن بچ	کمتر از HDM	حدود ۸ الی ۱۰ درصد از 4W بیشتر (به علت حجم کمتر روتورها)

دلایل مصرف انرژی پایین تر روتورهای HDM نسبت به 4W

کاهش مصرف انرژی در روتورهای HDM (Hydro Dynamic Mixing Rotor) به این دلیل است که باله‌های HDM طوری طراحی شده‌اند که جریان مواد داخل محفظه روان تر و پیوسته‌تر حرکت کند، در نتیجه:

۱-کاهش اصطکاک و مقاومت مکانیکی : در روتورهای قدیمی مثل (4W) ، مواد بیشتر بین باله و دیواره محفظه گیر می‌کنند و برای حرکت نیاز به گشتاور بالاتری دارند؛ اما در روتورهای HDM، باله‌ها منحنی و هیدرودینامیک هستند؛ در نتیجه مواد راحت‌تر لغزش می‌کنند، اصطکاک کمتر بوده و انرژی کمتری مصرف می‌شود.

۲-جریان یکنواخت‌تر مواد (Flow Pattern): در طراحی HDM، زاویه باله‌ها باعث ایجاد گردش مارپیچی و پیوسته در حجم مواد می‌شود؛ این الگو باعث می‌شود مواد سریع‌تر و یکنواخت‌تر مخلوط شوند، در نتیجه زمان سیکل کاهش پیدا می‌کند و انرژی کل مصرفی کمتر می‌شود.

۳-کاهش پیک‌های گشتاور (Torque Peaks) : در 4W، هنگام بارگذاری یا اضافه شدن دوده/پرکننده، موتور میکسر باید پیک‌های ناگهانی گشتاور را تحمل کند؛ اما در HDM به دلیل طراحی ملایم‌تر، این پیک‌ها را کاهش می‌دهد و بار موتور یکنواخت‌تر می‌شود و در نتیجه راندمان موتور بالا می‌رود.[۴]

مطالعه موردی: کاهش شاخص SEC با تعویض روتورهای 4W به HDM در واحد اختلاط

شاخص SEC (Specific Energy Consumption): مصرف ویژه انرژی برای تولید واحد جرم محصول (یا انجام یک فرآیند) است. یعنی این شاخص نشون میده برای تولید ۱ کیلوگرم از محصول (یا انجام یک سیکل مشخص)، چقدر انرژی مصرف شده است. در خطوط اختلاط لاستیک شاخص SEC معمولاً برای پایش عملکرد میکسر بنبوری استفاده می‌شود به این دلیل که میکسرهای انرژی زیادی برای برش، فشرده‌سازی و گرم کردن آمیزه مصرف می‌کنند.

فرمول عمومی SEC:

$$SEC = \frac{E}{M} = P * \frac{T}{M}$$

که در آن:

SEC: مصرف ویژه انرژی (MJ/kg یا kWh/kg) / E: کل انرژی مصرف‌شده در فرآیند (MJ یا kWh)

P: توان متوسط مصرفی موتور (KW) / T: زمان اختلاط(h یا min) / M: جرم کل مواد در هر بچ (kg)

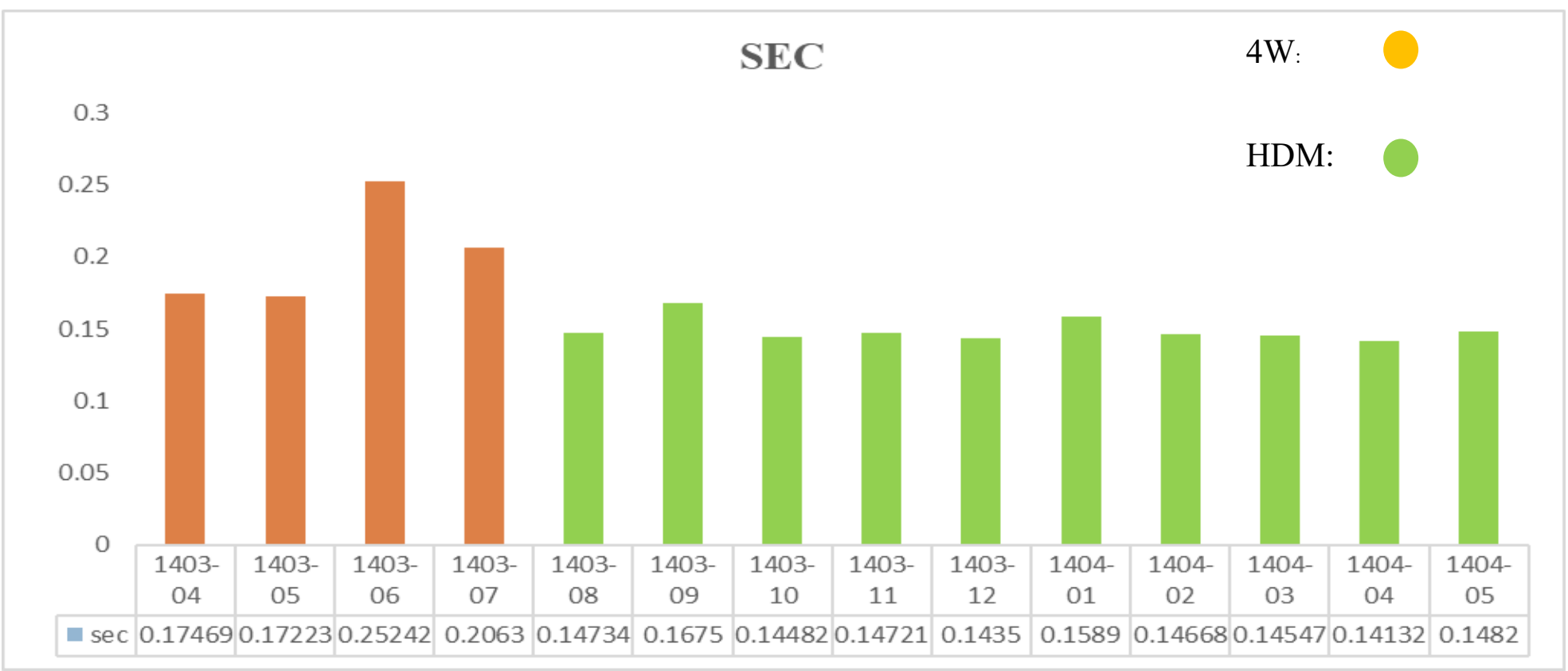
به همین منظور در راستای بهبود بهره‌وری انرژی و ارتقای عملکرد میکسرهای بنبوری در اداره اختلاط کارخانه، در یکی از خطوط اختلاط آمیزه اقدام به جایگزینی روتورهای کلاسیک 4W با روتورهای نسل جدید HDM شد که منجر به کاهش شاخص SEC گردید. برای ارزیابی تأثیر نوع روتور بر شاخص SEC، داده‌های مربوط به توان مصرفی، زمان اختلاط و وزن هر بچ در دو حالت (قبل و بعد از تعویض روتور) اندازه‌گیری شد. مقادیر توان مصرفی از طریق سیستم مانیتورینگ PLC و داده‌های وزن از سیستم بارگذاری اتوماتیک استخراج گردید.[۵]

روش محاسبه با مثال عددی:

توان میانگین موتور در طول سیکل کاری: ۹۰۰ کیلووات، زمان اختلاط: ۳ دقیقه و جرم مواد در هر بچ: ۲۰۰ کیلوگرم

$$SEC = 0.05 * \frac{900}{200} = 0.225$$

یعنی برای تولید هر کیلوگرم آمیزه ۰.۲۲۵ کیلووات ساعت انرژی مصرف می‌شود. در جدول زیر مقدار عددی شاخص SEC قبل و بعد از تغییر روتوراز 4W به HDM نمایش داده شده است که به طور میانگین ۲۵ درصد کاهش مصرف برق به ازای تولید هر کیلوگرم آمیزه را نشان می‌دهد.



نمودار (۱) : مقایسه مصرف انرژی با روتور های 4W و HDM

نتیجه گیری

بررسی انجام‌شده در این مطالعه نشان داد که تغییر در طراحی تجهیزات فرآیندی (در اینجا روتورهای میکسر بنبوری) می‌تواند تأثیر مستقیم و قابل‌توجهی بر شاخص‌های انرژی و کارایی تولید داشته باشد، به طور مشخص، با جایگزینی روتورهای کلاسیک 4W با روتورهای نسل جدید HDM از آبان ماه ۱۴۰۳، میانگین شاخص SEC از ۰.۲۰۱ به ۰.۱۴۹ کیلووات ساعت تبدیل گردید که کاهش ۲۵ درصدی را به دنبال داشت. این کاهش مصرف انرژی عمدتاً به واسطه طراحی هیدرودینامیکی باله‌های روتور HDM حاصل شده است که موجب بهبود جریان مواد، کاهش اصطکاک، و یکنواختی بیشتر در فرآیند اختلاط گردیده است. این ویژگی‌ها نه‌تنها باعث کاهش پیک‌های گشتاور و در نتیجه افزایش عمر مفید قطعات مکانیکی می‌شوند، بلکه در بلندمدت منجر به کاهش توقفات ناگهانی و بهبود ضربه بهره‌برداری از ماشین‌آلات خواهند شد. از منظر اقتصاد چرخشی، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که نوآوری در طراحی تجهیزات می‌تواند گامی مؤثر در جهت بهینه‌سازی چرخه مصرف انرژی و مواد باشد. کاهش مصرف انرژی در فرآیند اختلاط به معنای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و آثار زیست‌محیطی در مقیاس کارخانه است، که یکی از محوره‌ای اصلی پایداری صنعتی محسوب می‌شود. اندازه‌گیری و تحلیل شاخص SEC به‌عنوان یک شاخص کلیدی عملکرد (KPI) برای مدیریت انرژی در فرآیندهای پیوسته، اهمیت بسزایی دارد. این شاخص می‌تواند در کنار سایر شاخص‌های بهره‌وری مانند OEE(بهره‌وری کلی تجهیزات) و نرخ بازدهی انرژی، به‌عنوان ابزار پایش و تصمیم‌گیری مدیریتی مورد استفاده قرار گیرد. در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که نوآوری‌های فنی کوچک اما هدفمند، مانند اصلاح طراحی روتور میکسر، می‌تواند اثرات اقتصادی و زیست‌محیطی بزرگی برای صنعت تایرسازی به همراه داشته باشد.

مراجع

[1]Li, B., Zhao, X., and Sun, J., “Optimization of Banbury Mixer Rotor Design for Energy Efficiency in Rubber Compounding,” Applied Mechanics and Materials, vol. 877, pp. 144–150, 2020.

[۲] [Nakajima, K., and Ito, T., “Hydrodynamic Rotor Design for Reduced Power Consumption in Rubber Mixing,” Tire Science and Technology, vol. 48, no. 3, pp. 177–189, 2021.

[۳] [Kim, S. H., and Park, J. H., “Comparative Study on 4W and HDM Rotor Efficiency in Rubber Mixing,” Rubber Chemistry and Technology, vol. 97, no. 4, pp. 654–668, 2024.

[4]European Rubber Journal, “New Rotor Designs Cut Energy Use by 10–15% in Banbury Mixers,” ERJ Technical News, 2023.

[5] موسوی، محمد و حیدری، ناصر، «بهینه‌سازی مصرف برق در خطوط تولید تایر با تکیه بر اصول بهره‌وری انرژی».

کنفرانس ملی انرژی و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت، ۱۴۰۰.