

صرفه جویی در انرژی الکتریکی در صورت جایگزینی جک هیدرولیک به جای جک پنوماتیک

E

Electrical Energy Savings by Replacing Pneumatic Jacks with Hydraulic Jacks in Tire Manufacturing

چکیده

بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع انرژی‌بر، از جمله صنعت تولید تایر، نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و هزینه‌های بهره‌برداری دارد. در این پژوهش، عملکرد انرژی سامانه‌های پنوماتیک و هیدرولیک در دو تجهیز صنعتی بخش بنبوری یک کارخانه تولید تایر شامل جک پوشر رولردای و رام بنبوری به صورت مقایسه‌ای بررسی شده است. ارزیابی‌ها بر پایه محاسبات ترمودینامیکی و مکانیکی، تعیین حجم و دبی هوای فشرده مصرفی، محاسبه توان مورد نیاز سیستم هیدرولیک و اندازه‌گیری‌های میدانی توان الکتریکی با استفاده از پاور آنالایزر در شرایط واقعی خط تولید انجام شده است. نتایج نشان داد که در جک پوشر رولردای، مصرف سالانه انرژی الکتریکی سیستم پنوماتیک حدود ۱۱۳/۱ مگاوات ساعت است، در حالی که مقدار متناظر برای سیستم هیدرولیک حدود ۵۲/۷ مگاوات ساعت برآورد شد؛ بنابراین، جایگزینی سیستم پنوماتیک با هیدرولیک در این تجهیز می‌تواند حدود ۶۰/۴ مگاوات ساعت در سال، معادل تقریباً ۵۳/۴ درصد، صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی ایجاد کند. در مقابل، برای رام بنبوری، مصرف سالانه انرژی سیستم پنوماتیک حدود ۳۹۵/۵ مگاوات ساعت و مصرف معادل سیستم هیدرولیک حدود ۴۴۶/۸ مگاوات ساعت محاسبه شد که بیانگر افزایش تقریباً ۱۳ درصدی مصرف انرژی در صورت جایگزینی با سیستم هیدرولیک است. نتایج نشان می‌دهد که مزیت انرژی سیستم هیدرولیک یا پنوماتیک وابسته به مشخصات فیزیکی عملگر، فشار کاری، نیروی مورد نیاز، تعداد سیکل‌های عملکرد، زمان کارکرد و تلفات سیستم است و نمی‌توان یک راهکار جایگزینی یکسان را برای همه کاربردهای صنعتی توصیه کرد. همچنین، نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی با روند پیش‌بینی شده توسط تحلیل‌های نظری سازگاری مناسبی نشان داد.

کلمات کلیدی: پوشر رولردای، رام بنبوری، صرفه جویی انرژی الکتریکی، جایگزینی جک پنوماتیک، صنعت لاستیک.

نوع مقاله: پژوهشی

محمد حسینی^۱، مهدی شفیعی^۲، حسین میرزائی^۳، پیمان نجاری^۴

۱- دانشجو کارشناسی مهندسی برق، دانشگاه بیرجند

۲- کارشناسی ارشد مهندسی برق، رئیس برق فشار قوی، کویرتایر

۳- دانشجو دکتری مهندسی مکانیک، کارشناس واحد کنترل انرژی، کویرتایر

۴- دانشجو دکتری مهندسی برق، سرپرست واحد کنترل انرژی، کویرتایر

peyman.bb.1997@gmail.com

ایمیل نویسندگان و عهده‌دار مکاتبات:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

مدیریت: بررسی تأثیر فرهنگ یادگیری سازمانی... ۱۳۵

۱. مقدمه

استفاده از جک‌ها در فرایندهای صنعتی نقش بسزایی در توسعه اتوماسیون، کاهش خطای انسانی، افزایش سرعت و دقت، و همچنین امکان فعالیت ایمن در شرایط سخت محیطی ایفا می‌کند (سعیدور^۱ و همکاران، ۲۰۱۰؛ یووانوویچ^۲ و همکاران، ۲۰۱۴؛ دودیتش^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). در ماشین‌آلات خطوط تولید، این عملگرها عمدتاً به دودسته کلی پنوماتیک (که گاهی نیوماتیک نیز گفته می‌شوند) و هیدرولیک تقسیم می‌شوند. این دو سیستم از منظر سیال عامل، محدوده‌های فشار کاری، سرعت پاسخ‌گویی، حساسیت به آلاینده‌های محیطی و همچنین هزینه‌های چرخه عمر (شامل ساخت، نصب، تعمیر و نگهداری) تفاوت‌های بنیادینی با یکدیگر دارند (کایا^۴ و همکاران، ۲۰۰۲؛ ویاس^۵ و همکاران، ۲۰۲۱؛ مولر^۶ و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین، انتخاب نوع محرک مناسب در طراحی یا بهینه‌سازی ماشین‌آلات صنعتی، تصمیمی راهبردی است که مستقیماً بر قابلیت اطمینان، کیفیت تولید و هزینه‌های عملیاتی تأسیسات تأثیر می‌گذارد (استاوینسکی^۷ و همکاران، ۲۰۲۱؛ پوستاور^۸ و همکاران، ۲۰۲۳).

در دهه‌های اخیر و باتوجه به اهمیت روزافزون مدیریت انرژی در صنایع پرمصرف نظیر صنعت تیر و لاستیک، بررسی میزان مصرف انرژی الکتریکی در سامانه‌های توان سیال در کانون توجه مهندسان و پژوهشگران قرار گرفته است (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ اراس^۹ و همکاران، ۲۰۲۰؛ پوستاور و همکاران، ۲۰۲۳). سامانه‌های پنوماتیک به دلیل سهولت استفاده، ایمنی بالا و دسترسی آسان به هوای فشرده بسیار رایج هستند؛ اما به دلیل ماهیت ترمودینامیکی فرایند فشرده‌سازی هوا و افت‌های اجتناب‌ناپذیر ناشی از نشتی در خطوط انتقال، ذاتاً راندمان پایینی دارند (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ ثابت^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰؛ گریبوش و لشیچینسکی^{۱۱}،

۲۰۲۴). مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تنها بخش کوچکی از انرژی الکتریکی ورودی به کمپرسورها (در حدود ۹ تا ۱۵ درصد) به کار مکانیکی مفید در جک‌های پنوماتیکی تبدیل می‌شود (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ گریبوش و لشیچینسکی، ۲۰۲۴). از این رو، جایگزینی سامانه‌های پنوماتیک با عملگرهای هیدرولیک به عنوان یک راهبرد بالقوه برای کاهش اتلاف انرژی مطرح شده است (هرناندز - هررا^{۱۲} و همکاران، ۲۰۲۰؛ اراس و همکاران، ۲۰۲۰).

با این وجود، سامانه‌های هیدرولیک نیز در زمینه مصرف انرژی چالش‌های خاص خود را به همراه دارند. اگرچه هیدرولیک توانایی تولید نیروی بسیار بالا و حرکتی یکنواخت‌تر را داراست، اما کارکرد مداوم الکتروموتور در یونیت‌های هیدرولیک، حتی در زمان‌های توقف و بی‌باری عملگر، می‌تواند به اتلاف شدید انرژی الکتریکی منجر شود (کایا و همکاران، ۲۰۰۲؛ آندرنکو و روگووی^{۱۳}، ۲۰۲۰؛ پوستاور و همکاران، ۲۰۲۳). در واقع، کارایی سیستم جایگزین به شدت به ماهیت فرایند، پروفیل بار و مدت‌زمان سیکل کاری تجهیز وابسته است (مولر و همکاران، ۲۰۲۲؛ ویاس و همکاران، ۲۰۲۱). علی‌رغم وجود مطالعات نظری متعدد در خصوص مقایسه توان سیالات، جای خالی پژوهش‌هایی که این مقایسه را به صورت عملیاتی و میدانی در شرایط واقعی و خشن صنعتی ارزیابی کنند، احساس می‌شود (دونر و چیدی^{۱۴}، ۲۰۲۲؛ ثابت و همکاران، ۲۰۲۰؛ پوستاور و همکاران، ۲۰۲۳).

در این مقاله، ابتدا مبانی عملکردی و تفاوت‌های ساختاری جک‌های پنوماتیک و هیدرولیک به طور جامع مرور می‌شود. سپس در بخش اصلی پژوهش، میزان صرفه‌جویی و تغییرات مصرف انرژی الکتریکی در صورت جایگزینی جک‌های پنوماتیک با سیستم هیدرولیک در دو تجهیز مختلف صنعتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با استفاده از اندازه‌گیری‌های دقیق میدانی (استفاده از دستگاه پاور آنالایزر) و تحلیل‌های

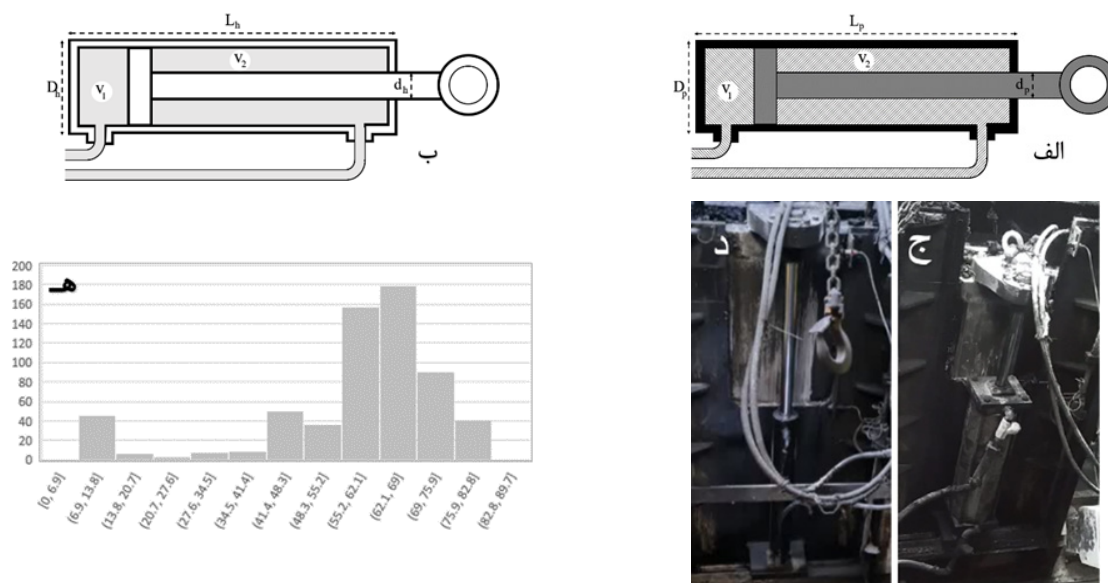
1. Saidur 2. Jovanovic 3. Dudić 4. Kaya 5. Vyas 6. Müller 7. Stawiński 8. Pustavrh
9. Eras10. Thabet 11. Gryboś & Leszczyński 12. Hernández-Herrera 13 Andrenko & Rogovyi 14. Doner & Ciddi

شمار می‌روند (کایا و همکاران، ۲۰۰۲؛ مولر و همکاران، ۲۰۲۲) جک‌های بادی از جمله پرکاربردترین تجهیزات در خطوط تولید، به‌ویژه در ماشین‌آلات حساس صنعت تائیرسازی محسوب می‌شوند (دونر و چیدی، ۲۰۲۲؛ هرناندز - هررا و همکاران، ۲۰۲۰). مکانیزم عملکرد این جک‌ها بر پایه تبدیل انرژی فشاری سیال تراکم‌پذیر به کار مکانیکی استوار است. در طراحی و انتخاب بهینه جک‌های پنوماتیک برای یک فرایند خاص، عامل‌های هندسی نظیر قطر پیستون (که تعیین‌کننده نیروی خروجی است) و طول کورس (دامنه جابه‌جایی) نقش کلیدی ایفا می‌کند (یووانوویچ و همکاران، ۲۰۱۴؛ زوکانوویچ^۱، ۲۰۲۲). علاوه بر این، دسته‌بندی عملکردی جک‌ها (مانند یک‌طرفه یا دوطرفه بودن) و مکانیزم نصب و مهاربندی آن‌ها، عواملی هستند که مستقیماً بر دینامیک حرکت، راندمان مصرف هوا و در نهایت هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و بهره‌برداری تأثیرگذارند (ثابت و همکاران، ۲۰۲۰؛ استاوینسکی و همکاران، ۲۰۲۱؛ ویاس و همکاران، ۲۰۲۱).

ترمودینامیکی، نتایج نظری و عملی این تحقیق در بخش‌های انتهایی ارائه شده است تا مشخص گردد آیا ارتقا و جایگزینی سامانه‌های پنوماتیک با هیدرولیک در هر شرایط کاری توجیه فنی و اقتصادی دارد یا خیر؟

۱-۱ جک پنوماتیک و سیستم هوای فشرده

هوای فشرده به‌عنوان یک سیال عامل در اتوماسیون صنعتی، مزایای متعددی نظیر در دسترس بودن، ایمنی بالا در برابر خطرات اشتعال و حرارت، سهولت انتقال و ذخیره‌سازی، سرعت عملکرد بالا، آلاینده‌گی محیطی ناچیز و هزینه‌های تعمیر و نگهداری نسبتاً پایین را ارائه می‌دهد (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ پوستاور و همکاران، ۲۰۲۳). با این حال، محدودیت‌هایی از قبیل تراکم‌پذیری بالای هوا، محدودیت در حداکثر فشار کاری عملیاتی، دشواری در کنترل دقیق موقعیت و سرعت، و همچنین آلودگی صوتی از معایب ذاتی سامانه‌های پنوماتیک به



شکل (الف) ۱: شماتیک جک پنوماتیک دوطرفه، (ب): شماتیک جک هیدرولیک دوطرفه، (ج): جک پنوماتیک پوشر رولردای، (د): جک هیدرولیک پوشر رولردای، (ه): منحنی هیستوگرام مصرف انرژی الکتریکی رام بنبری

۲۰۱۴؛ ویاس و همکاران، ۲۰۲۱؛ دودیچ و همکاران، ۲۰۲۱؛ پوستاور و همکاران، ۲۰۲۳).

۲. بخش تجربی (بررسی تعویض جک پنوماتیک پوشر رولردای با جک هیدرولیک)

۲-۱ جک پنوماتیک پوشر رولردای و مصرف هوای فشرده آن
سامانه‌های پنوماتیک دارای سرعت بالا هستند و نیاز به تعمیر و نگهداری کمی دارند (هرناندز - هررا و همکاران، ۲۰۲۰؛ دودیچ و همکاران، ۲۰۲۱). در کنار این مزایا دارای معایبی هستند که از دیدگاه انرژی بزرگ‌ترین عیب آن‌ها نشتی‌های آن‌ها است (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ کایا و همکاران، ۲۰۰۲؛ استاوینسکی و همکاران، ۲۰۲۱). در تأسیسات انتقال هوای فشرده گاهی اوقات بین ۲۰ و حتی گاهی تا ۵۰ درصد هوای فشرده تولید شده کمپرسور، نشت می‌کند (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ کایا و همکاران، ۲۰۰۲). نشت هوای فشرده علاوه بر تلفات انرژی، منجر به تلفات عملیاتی می‌شود؛ زیرا نشت هوای فشرده باعث افت فشار هوای فشرده، کاهش کارایی جک‌های پنوماتیک و در نتیجه کاهش تولید می‌شود (پوستاور و همکاران، ۲۰۲۳؛ ویاس و همکاران، ۲۰۲۱؛ دونر و چیدی، ۲۰۲۲). بنابراین می‌توان با تعویض تجهیزات پنوماتیک با تجهیزات الکتریکی مانند موتورها که بازده بالای ۹۰ درصد دارند از اتلاف انرژی جلوگیری نمود (مولر و همکاران، ۲۰۲۲؛ پول و لیمپر، ۲۰۱۸؛ تیبونی، ۲۰۲۳). یکی از پروژه‌های انجام شده در این راستا، پروژه تعویض جک پنوماتیک پوشر رولردای بنبوری با یونیت هیدرولیک است که در شکل (۱-ج) و شکل (۱-د) نشان داده شده است. مشخصات جک پنوماتیک در جدول (۱-الف) نمایش داده شده است. حجم هوای اتمسفری که می‌تواند در این جک جای گیرد از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (یووانوویچ و همکاران، ۲۰۱۴؛ زوکانویچ، ۲۰۲۲):

شکل ۱ (ب)، ساختار یک جک پنوماتیک خطی دوطرفه را نشان می‌دهد. در این شکل، قطر سیلندر با D_p ، کورس پیستون با L_p و قطر شفت پیستون با d_p نشان داده شده است. فاصله بین نقطه حرکت اولیه تا آخرین نقطه‌ای که میله پیستون یا شفت سیلندر طی می‌نماید، کورس نام دارد.

۲-۱ جک هیدرولیک

سامانه‌های هیدرولیک صنعتی بر پایه انتقال توان از طریق سیالات تراکم‌ناپذیر (عمدتاً روغن‌های هیدرولیک) عمل می‌کنند. در سیلندره‌های هیدرولیک، انرژی فشاری سیال به نیروی مکانیکی خطی تبدیل می‌شود. در مقایسه با سامانه‌های انتقال قدرت مکانیکی یا الکتریکی، سامانه‌های هیدرولیک به دلیل تراکم‌ناپذیری سیال، مزایای برجسته‌ای نظیر تولید نیروی بسیار بالا در ابعاد فشرده و چگالی توان بالا، صلبیت در نگهداری بار، اعمال فشار یکنواخت و قابلیت کنترل دقیق پیوسته در سرعت و جهت حرکت را ارائه می‌دهند (سعیدور و همکاران، ۲۰۱۰؛ پول^۱ و لیمپر، ۲۰۱۸؛ هرناندز - هررا و همکاران، ۲۰۲۰).

با این وجود، راه‌اندازی و بهره‌برداری از جک‌های هیدرولیک مستلزم استفاده از یک واحد تأمین توان شامل مخزن سیال، پمپ هیدرولیک، الکتروموتور و بلوک شیرآلات کنترلی است (اراس و همکاران، ۲۰۲۰؛ تیبونی^۲، ۲۰۲۳). از منظر مصرف انرژی، وابستگی این سامانه به کارکرد الکتروموتور و پمپ می‌تواند چالش‌برانگیز باشد؛ زیرا در بسیاری از مدارهای هیدرولیک صنعتی متداول، الکتروموتور به طور پیوسته در مدار باقی می‌ماند. این کارکرد مداوم، حتی در زمان‌های بی‌باری یا توقف عملگر، منجر به ایجاد بار پایه و افت راندمان کلی سیستم در صورت عدم استفاده از پمپ‌های جابه‌جایی متغیر یا درایوهای کنترل دور می‌گردد (یووانوویچ و همکاران،

1. Pohl

2. Tiboni

می‌بایست توانایی تحمل نیروی وارد شده را داشته باشد. پس از محاسبه نیروی مکانیکی وارد شده به شفت جک پنوماتیک، ابعاد جک هیدرولیک مناسب برای جایگزین شدن به صورت جدول (۱-ب) به دست آمده است.

عامل مصرف انرژی در این جک، موتور یونیت هیدرولیک است؛ بنابراین این موتور باید بتواند نیروی مورد نیاز جک را تأمین کند. نیروی وارد شده به جک پنوماتیک (جک قدیم) برابر است با:

$$F_p = 1.1 P_p A_p = 0.24921 N \quad (3)$$

در رابطه (۳) F_p نیروی وارد شده به جک، P_p فشار هوای فشرده و A_p سطح مقطع پیستون این جک است. لازم به ذکر است به علت اصطکاک و سایر تلفات، نیروی محاسبه شده ۱۰ درصد بیشتر در نظر گرفته شده است. از آنجا که جک هیدرولیک باید توانایی تحمل این نیرو را داشته باشد، فشار کاری آن از رابطه (۴) محاسبه می‌گردد:

$$\left. \begin{aligned} F_p &= F_h \\ F_h &= P_h A_h \end{aligned} \right\} \Rightarrow P_h = 49.57 \text{ bar} \quad (4)$$

که در این رابطه F_h نیروی جک هیدرولیک، A_h سطح مقطع پیستون جک هیدرولیک و P_h فشار مورد نیاز برای این جک است. به منظور محاسبه توان موتور مورد استفاده در یونیت هیدرولیک، ابتدا باید دبی روغن در گردش محاسبه گردد؛ با توجه به مشخصات ارائه شده در جدول (۱-ب)، حجم این جک برابر است با:

$$\left. \begin{aligned} v_{1h} &= \pi(D_h^2)L_h/4 = 0.00331 m^3 \\ v_{2h} &= \pi(D_p^2 - d_p^2)L_p/4 = 0.00226 m^3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{th} = v_{1h} + v_{2h} = 0.00558 m^3 \quad (5)$$

این جک در محل استفاده هر ۶ ثانیه یک حرکت رفت و برگشتی انجام می‌دهد. در نتیجه دبی روغن در گردش برابر است با:

$$(6)$$

$$Q = v_{th} (\text{per } 6 \text{ sec}) = 0.00558 m^3 / 6 \text{ sec} \Rightarrow Q = 0.05585 m^3 / \text{min} \Rightarrow Q = 55.85358 \text{ liter} / \text{min}$$

با استفاده از رابطه (۷) توان الکتریکی موتور استفاده شده برای

$$\left. \begin{aligned} v_{1p} &= \pi(D_p^2)L_p/4 = 0.02136 m^3 \\ v_{2p} &= \pi(D_p^2 - d_p^2)L_p/4 = 0.02072 m^3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{tp} = v_{1p} + v_{2p} = 0.04208 m^3 \quad (1)$$

حجم هوا v_{tp} مربوط به یک بار باز یا بسته شدن جک پنوماتیک پوشر رولردای است. به طور میانگین این جک هر ساعت ۳۶۰ حرکت رفت و برگشتی دارد؛ این جک با فشار بین ۶.۵ الی ۷.۵ کار می‌کند؛ لذا میزان مصرف هوای فشرده سالانه این جک معادل است با [۶، ۷]:

$$(2)$$

$$v_{tp} (\text{per } 1 \text{ year}) = 1,017,999 m^3$$

جدول ۱: مشخصات فیزیکی و عملکردی و (ب): مشخصات فیزیکی و

عملکردی جک هیدرولیک پوشر رولردای

(الف): مشخصه	علامت اختصاری	مقدار
طول کورس جک پنوماتیک	L_p	۶۶۰ mm
قطر پیستون جک پنوماتیک	D_p	۲۰۳ mm
قطر شفت جک پنوماتیک	d_p	۳۵ mm
فشار کاری محل استفاده	P_p	۷ bar
زمان هر حرکت رفت و برگشتی	t	۶ sec
ظرفیت کمپرسور با هوای فشرده	C	۹۰ m ³ /min

(ب): مشخصه	علامت اختصاری	مقدار
طول کورس جک هیدرولیک	L_h	۶۶۰ mm
قطر پیستون جک هیدرولیک	D_h	۸۰ mm
قطر شفت جک هیدرولیک	d_h	۴۵ mm

۲-۲ جک هیدرولیک مورد استفاده به جای جک پنوماتیک پوشر رولردای

تعویض جک پنوماتیک و هیدرولیک ممکن است دلایل مختلفی از جمله کیفیت تولید، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، میزان مصرف انرژی و... داشته باشد. به هر حال جک جدید

$$P_{eh} (\text{per 1 year}) = 5.42 \times 24 \times 365 = 52,754 KWh \quad (9)$$

از مقایسه روابط (۸) و (۹) میتوان نتیجه گرفت باتوجه به عامل‌های از جمله ابعاد جک، فشار هوای فشرده، ظرفیت و توان کمپرسورها، تعداد حرکت رفت و برگشتی جک در دقیقه و... در بعضی موارد امکان صرفه‌جویی و کاهش مصرف انرژی وجود دارد. سیستم مورد بررسی این مقاله در حال حاضر در محل بنبوری کارخانه تاپرسازی نصب و در حال بهره‌برداری است.

۲-۴ بررسی تعویض جک پنوماتیک رام بنبوری با جک هیدرولیک جک پنوماتیک رام بنبوری و مصرف هوای فشرده آن

رام بنبوری یک جک پنوماتیک دوطرفه است که با فشار ۷ بار به حرکت در می‌آید. مشخصات این جک در جدول (۲) نمایش داده شده است. حجم هوای اتمسفری که میتواند در این جک جای گیرد از رابطه زیر محاسبه میگردد:

$$\left. \begin{aligned} v_{1R} &= \pi(D_R^2)L_R / 4 = 0.34898 m^3 \\ v_{2R} &= \pi(D_R^2 - d_R^2)L_R / 4 = 0.33009 m^3 \end{aligned} \right\} \Rightarrow v_{TR} = v_{1R} + v_{2R} = 0.679082 m^3 \quad (10)$$

حجم هوا v_{TR} مربوط به یکبار باز یا بسته شدن رام است. به طور میانگین این جک هر ساعت ۶۰ حرکت رفت و برگشتی دارد؛ با این جک با فشار بین ۶.۵ الی ۷.۵ کار می‌کند؛ لذا میزان مصرف هوای فشرده سالانه این جک معادل است با:

$$v_{Tp} (\text{per 1 year}) = 2,738,061 m^3 \quad (11)$$

فیزیکی و عملکردی رام بنبوری

مقدار	علامت	مشخصه
bar ۷	P_R	فشار کاری محل استفاده
sec ۶۰	t	متوسط زمان هر حرکت رفت و برگشتی
min/m ^۳ ۹۰	C	ظرفیت کمپرسور با هوای فشرده

این جک محاسبه میگردد [۸]، در این رابطه Q دبی روغن، P_h فشار کاری یونیت هیدرولیک محاسبه شده در رابطه (۵)، η_m راندمان موتور مورد استفاده در این یونیت ($\eta_m = 85\%$)، و η_h راندمان سیستم هیدرولیک ($\eta_h = 90\%$) است.

$$P_{unite} = \frac{Q P_h}{600 \eta_m \eta_h} \Rightarrow P_{unite} = 6.02 KW \quad (12)$$

۲-۳ مقایسه میزان صرفه‌جویی در صورت تعویض جک پوشر رولردای

کمپرسور مورد استفاده با ظرفیت تولید نامی ۹۰ مترمکعب هوای فشرده در دقیقه و توان نامی ۶۰۰ کیلووات فعال است. در نتیجه این کمپرسور به‌ازای تولید هر مترمکعب هوای فشرده ۰.۱۱ کیلووات انرژی الکتریکی مصرف مینماید. باتوجه به مقدار مصرف هوای فشرده جک پنوماتیک پوشر رولردای که در رابطه (۲) محاسبه شده است، مصرف انرژی الکتریکی سالانه جک پنوماتیک پوشر رولردای برابر است با:

$$P_{ep} (\text{per 1 year}) = v_T (\text{per 1 year}) \times 0.11 = 113,111 KWh \quad (13)$$

در صورت تعویض جک پنوماتیک با سیستم هیدرولیک، توان الکتریکی موتور مورد استفاده در این سیستم در رابطه (۷) محاسبه شده است؛ بنابراین حتی با فرض دائم کار کردن این موتور، توان مصرف شده در یک سال برای این موتور از رابطه (۹) محاسبه میگردد.

مقدار	علامت	مشخصه
mm ۱۴۲۳	L_R	طول کورس جک پنوماتیک
mm ۵۵۸,۸	D_R	قطر پیستون جک پنوماتیک
mm ۱۳۰	d_R	قطر شفت جک پنوماتیک

۲-۵ جک هیدرولیک مورد استفاده به‌جای جک پنوماتیک رام بنبوری

در این کارخانه علاوه بر وجود رام بنبوری پنوماتیک، از رام

هیدرولیک نیز استفاده میشود؛ بنابراین محاسبات جایگزینی رام پنوماتیک و هیدرولیک را میتوان با استفاده از نتایج و اندازه‌گیریهای میدانی بررسی نمود. لازم به ذکر است که رام

۳. بحث و نتیجه‌گیری

در این بخش، داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری‌های میدانی توسط دستگاه پاور آنالایزر و محاسبات حاصل از روابط ریاضی ارائه‌شده در بخش تجربی، مورد ارزیابی و تحلیل مهندسی قرار گرفته است. هدف کلی، بررسی تأثیر بهینه‌سازی و تغییر سیستم جک‌های پوشر رولردای و رام بنبوری بر بازدهی و الگوی مصرف انرژی در فرایند تولید لاستیک است. ارزیابی و تحلیل مصرف انرژی جک پوشر رولردای همراه با پایش دستگاه پاور آنالایزر و هیستوگرام‌های ثبت‌شده از توان مصرفی نشان می‌دهد که جک پوشر رولردای در حالت فعلی، به دلیل تلفات ناشی از نشتی هوای فشرده، افت فشار در خطوط انتقال و عدم بهینه‌سازی چرخه کاری، سهم قابل‌توجهی در اتلاف انرژی شبکه پنوماتیک کارخانه دارد. با اعمال فرمول‌های محاسبه حجم و دبی هوای مصرفی بر اساس روابط (۸) و (۹)، میزان مصرف انرژی سالانه سیستم فعلی در مقایسه با طرح پیشنهادی محاسبه شد. نتایج حاصل از محاسبات این روابط نشان می‌دهد که جایگزینی جک پوشر رولردای با نمونه بهینه‌شده، موجب کاهش حجم هوای فشرده درخواستی و در نتیجه کاهش بار عملکردی کمپرسورهای مرکزی کارخانه می‌شود. این اصلاح ساختاری، کاهش چشمگیری در مصرف سالانه انرژی بر حسب کیلووات‌ساعت (kWh) به همراه داشته و هزینه برق مصرفی تجهیزات جانبی خط رولردای را به طور معناداری کاهش می‌دهد.

در ارزیابی فنی و مصرف انرژی رام بنبوری (پنوماتیک در مقابل هیدرولیک) مخلوط‌کن بنبوری به‌عنوان قلب فرایند اختلاط مواد لاستیکی محسوب می‌شود که نیازمند اعمال نیروی یکنواخت و مستمر توسط رام برای ترکیب کامل کائوچو، دوده و مواد افزودنی است. در این پژوهش، عملکرد سیستم پنوماتیک فعلی در برابر طرح پیشنهادی (تبدیل به سیستم هیدرولیک) مورد ارزیابی مقایسه‌ای قرار گرفت. بر اساس محاسبات صورت‌گرفته

بنبوری هیدرولیک فعلی دارای ظرفیت ۱۵ درصد بیشتر از رام بنبوری پنوماتیک است، لذا جهت مقایسه این دو جک، این موضوع در نظر گرفته می‌شود. سیستم هیدرولیک این جک دارای چندین موتور الکتریکی است که به طور مداوم روشن نیستند، لذا به‌منظور محاسبه متوسط میزان مصرف انرژی الکتریکی این سیستم، از دستگاه پاور آنالایزر PROVA ۶۸۳۰ استفاده شده است و نمودار مصرف انرژی الکتریکی این سیستم در شکل (۱-ه) نمایش داده‌شده است و به این معنی است که در صورت استفاده از یونیت هیدرولیک به طور میانگین ۶۰ کیلووات انرژی الکتریکی به طور دائم مصرف می‌گردد.

۲-۶ مقایسه میزان صرفه‌جویی در صورت تعویض رام بنبوری پنوماتیک با رام هیدرولیک

باتوجه به مقدار مصرف هوای فشرده جک پنوماتیک رام بنبوری که در رابطه (۱۱) محاسبه شده است، مصرف انرژی الکتریکی سالانه این جک پنوماتیک برابر است با:

$$P_{ek} (per 1 year) = v_{tp} \times 0.11 \times 1.3 = 395,497 KWh \quad (12)$$

در این رابطه، به علت وجود نشتی در سیستم پنوماتیک، ۳۰ درصد توان الکتریکی بیشتر در نظر گرفته شده است. در صورت تعویض جک پنوماتیک با سیستم هیدرولیک، توان الکتریکی موتور مورد استفاده در این سیستم در شکل (۱-ه) محاسبه شده است؛ بنابراین توان مصرف شده در یک سال برای این موتور از رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد.

$$P_{eh} (per 1 year) = 60 \times 24 \times 365 \times 0.85 = 446,760 KWh \quad (13)$$

در این رابطه، از آنجاکه سیستم رام هیدرولیک موجود ظرفیت ۱۵ درصد بیشتر از ظرفیت رام پنوماتیک دارد، توان الکتریکی آن ۱۵ درصد کمتر در نظر گرفته شده است. از مقایسه روابط (۱۲) و (۱۳) میتوان نتیجه گرفت در صورت تعویض جک پنوماتیک رام موجود با جک هیدرولیک، نه تنها صرفه‌جویی رخ نمیدهد، بلکه مصرف انرژی افزایش خواهد یافت.

۳-۱ تحلیل مقایسه‌ای و اولویت‌بندی اجرایی

جمع‌بندی داده‌های حاصل از دو بخش فوق نشان می‌دهد که اولویت‌بندی طرح‌های بهینه‌سازی انرژی در واحدهای صنعتی باید بر پایه ارزیابی کامل چرخه مصرف صورت گیرد. خلاصه مقایسه عملکرد و شاخص‌های مصرف انرژی دو جک بررسی شده در جدول ۳ آورده شده است. تحلیل نهایی نتایج تأکید می‌کند که اجرای پروژه تعویض جک پوشر رولردای به دلیل کاهش بار کمپرسورها و بازگشت سرمایه مناسب کاملاً توجیه‌پذیر است. در مقابل، درباره رام بنبوری، حفظ سیستم پنوماتیک و اصلاح مدار کنترلی یا آب‌بندی آن، در مقایسه با تغییر کامل به سیستم هیدرولیک، گزینه‌ای به‌صرفه‌تر از نظر مصرف انرژی خواهد بود.

طبق روابط (۱۲) و (۱۳)، اگرچه سیستم هیدرولیک به دلیل صلبیت سیال، کنترل دقیق‌تر و فشار یکنواخت‌تری بر توده مواد وارد می‌کند، اما از منظر مصرف انرژی رفتاری متفاوت نشان می‌دهد. داده‌های استخراج‌شده از پاور آنالایزر مشخص می‌سازد که یونیت هیدرولیک به دلیل کارکرد مداوم الکتروموتور و پمپ (حتی در زمان‌های درجا کار و بارگیری بنبوری)، دارای یک توان پایه ثابت و مداوم است. در نتیجه، محاسبات برآیند انرژی طبق روابط (۱۲) و (۱۳) اثبات می‌کند که تبدیل سیستم رام بنبوری از پنوماتیک به هیدرولیک نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی سالانه نمی‌شود، بلکه به دلیل توان مصرفی در جای یونیت هیدرولیک، مصرف برق مجموع مجموعه را افزایش می‌دهد.

جدول ۳- مقایسه شاخص‌های مصرف انرژی سالانه و ارزیابی فنی طرح‌های بهینه‌سازی

ارزیابی فنی و اولویت اجرا	تغییرات مصارف انرژی سالانه	نوع تغییر پیشنهادی	تجهیز مورد بررسی
اولویت بالا	کاهش محسوس مصرف انرژی	تعویض با جک پنوماتیک بهینه	جک پوشر رولردای
اولویت پایین از دیدگاه انرژی (نیازمند اصلاح مدار پنوماتیک فعلی)	افزایش مصرف انرژی کل سیستم	جایگزینی پنوماتیک با هیدرولیک	رام بنبوری

۳-۲ جمع‌بندی پایانی

از جک هیدرولیک، انرژی الکتریکی کمتری مصرف می‌گردد. در قسمت سوم مشخصات رام بنبوری و میزان مصرف انرژی الکتریکی برای دو حالت هیدرولیک و پنوماتیک مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید در صورت تعویض جک پنوماتیک با جک هیدرولیک، نه تنها صرفه‌جویی انرژی رخ نمیدهد، بلکه مصرف انرژی الکتریکی افزایش می‌یابد. همچنین باید در نظر داشت که هزینه‌های خرید، نصب، تعمیر و نگهداری تجهیزات هیدرولیک بسیار بیشتر از تجهیزات پنوماتیک است؛ بنابراین استفاده از رام هیدرولیک به لحاظ انرژی توصیه نمی‌گردد. به طور خلاصه میتوان گفت باتوجه به ابعاد، فشار کاری، شرایط کاری، نیروی موردنیاز، زمان کارکرد و

در این مقاله، در بخش اول سامانه‌های پنوماتیک و هیدرولیک به‌طور کلی معرفی شده‌اند و تفاوتها، کاربردها، مزایا و معایب هر کدام شرح داده شده است. هدف این مقاله بررسی میزان صرفه‌جویی انرژی در صورت استفاده از جکهای هیدرولیک یا پنوماتیک بوده است که در این راستا، دو جک عظیم رام بنبوری و پوشر رولردای مورد بررسی قرار گرفت. در بخش دوم مشخصات جک پوشر رولردای و میزان مصرف انرژی الکتریکی آن برای دو حالت هیدرولیک و پنوماتیک مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که در صورت استفاده

تعداد حرکت رفت و برگشت جکها، در بعضی موارد استفاده از جکهای هیدرولیک و در بعضی موارد استفاده از جکهای هیدرولیک توصیه میشود. لازم به ذکر است هدف از تعویض جک پنوماتیک با جک هیدرولیک تنها مصرف انرژی نیست و عواملی مانند کیفیت، سرعت، آلودگی، تعمیر و نگهداری و... نیز میتواند مؤثر باشد.

منابع

- Andrenko, P., & Rogovyi, A. (2020). Energy efficiency and algorithm for selecting drives for technological machines.
- Doner, N., & Ciddi, K. (2022). Regression analysis of the operational parameters and energy-saving potential of industrial compressed air systems. *Energy*, 252, 124030.
- Dudić, S., Reljić, V., Šešlija, D., Dakić, N., & Blagojević, V. (2021). Improving energy efficiency of flexible pneumatic systems. *Energies*, 14(7), 1819.
- Eras, J. J. C., Gutiérrez, A. S., Santos, V. S., & Ulloa, M. J. C. (2020). Energy management of compressed air systems. Assessing the production and use of compressed air in industry. *Energy*, 213, 118662.
- Gryboś, D., & Leszczyński, J. S. (2024). A review of energy overconsumption reduction methods in the utilization stage in compressed air systems. *Energies*, 17(6), 1495.
- Hernandez-Herrera, H., Silva-Ortega, J. I., Martínez Diaz, V. L., García Sanchez, Z., González García, G., Escorcía, S. M., & Zarate, H. E. (2020). Energy savings measures in compressed air systems. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 10(3), 414-422.
- Jovanovic, V., Stevanov, B., Šešlija, D., Dudić, S., & Tešić, Z. (2014). Energy efficiency optimization of air supply system in a water bottle manufacturing system. *Journal of Cleaner Production*, 85, 306-317.
- Kaya, S., & Ucdogruk, Y. (2002). The dynamics of entry and exit in Turkish manufacturing industry. *Middle East Technical University, Ankara, ERC working papers in Economics*, 2(02).
- Müller, D., Haag, J., Wickert, J., Raisch, A., Hoffmann, K., Schmidt, K., & Sawodny, O. (2022). Energy efficient pneumatics: aspects of control and systems theory. *International Journal of Fluid Power*, 23(3), 299-342.
- Pohl, J. W., & Limper, A. (2018). *Mixing machinery for the rubber industry*. Rubber Products Manufacturing Technology; Routledge: Abingdon, UK, 123-177.
- Pustavrh, J., Hočevár, M., Podržaj, P., Trajkovski, A., & Majdič, F. (2023). Comparison of hydraulic, pneumatic and electric linear actuation systems. *Scientific reports*, 13(1), 20938.
- Saidur, R., Rahim, N. A., & Hasanuzzaman, M. (2010). A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(4), 1135-1153.
- Saidur, R., & Mekhilef, S. (2010). Energy use, energy savings and emission analysis in the Malaysian rubber producing industries. *Applied Energy*, 87(8), 2746-2758.
- Stawinski, L., Skowronska, J., & Kosucki, A. (2021). Energy efficiency and limitations of the methods of con-

- trolling the hydraulic cylinder piston rod under various load conditions. *Energies*, 14(23), 7973.
- Thabet, M., Sanders, D., Becerra, V., Tewkesbury, G., Haddad, M., & Barker, T. (2020, August). Intelligent energy management of compressed air systems. In 2020 IEEE 10th International Conference on Intelligent Systems (IS) (pp. 153-158). IEEE.
- Tiboni, M. (2023). Power Drive Architectures for Industrial Hydraulic Axes: Energy-Efficiency-Based Comparative Analysis. *Applied Sciences*, 13(18), 10066.
- Vyas, V., Jeon, H. W., & Wang, C. (2021). An integrated energy simulation model of a compressed air system for sustainable manufacturing: a time-discretized approach. *Sustainability*, 13(18), 10340.
- Zukanović, M. (2022). Development and analysis of productivity, quality, and cost-effectiveness of an automated tire regrooving machine.

IRM



Electrical Energy Savings by Replacing Pneumatic Jacks with Hydraulic Jacks in Tire Manufacturing

Mohammad Hosseini¹, Mehdi Shafiei², Hossein Mirzaei³, Peyman Najjari^{4*}

1: Undergraduate Student, Electrical Engineering, University of Birjand

2: M.Sc. in Electrical Engineering; Head of High-Voltage Electrical Systems, Kavir Tire

3: Ph.D. Student, Mechanical Engineering; Energy Control Unit Specialist, Kavir Tire

4: Ph.D. Student, Electrical Engineering; Supervisor, Energy Control Unit, Kavir Tire

*Corresponding author Email: peyman.bb.1997@gmail.com

Abstract

Improving energy efficiency in energy-intensive industries, including tire manufacturing, plays an important role in reducing energy consumption and operating costs. This study presents a comparative energy assessment of pneumatic and hydraulic actuation systems for two industrial units in the Banbury section of a tire manufacturing plant, namely the Pusher Roller Die jack and the Banbury Ram. The assessment was conducted using thermodynamic and mechanical calculations, determination of compressed-air consumption and flow rate, estimation of the required hydraulic power, and field measurements of electrical power using a power analyzer under actual production-line operating conditions. The results showed that, for the Pusher Roller Die, the annual electrical energy consumption of the pneumatic system was approximately 113.1 MWh, whereas the corresponding consumption of the hydraulic system was about 52.7 MWh. Therefore, replacing the pneumatic system with a hydraulic unit could provide an annual energy saving of approximately 60.4 MWh, corresponding to about 53.4%. In contrast, for the Banbury Ram, the annual energy consumption of the pneumatic system was estimated at approximately 395.5 MWh, while the equivalent hydraulic system consumed about 446.8 MWh, indicating an increase of approximately 13% in electrical energy consumption. These findings demonstrate that the energy advantage of pneumatic or hydraulic actuation is strongly dependent on the actuator dimensions, operating pressure, required force, duty cycle, operating duration, number of reciprocating cycles, and system losses. Therefore, replacing pneumatic actuators with hydraulic systems cannot be considered a universally energy-efficient solution and should instead be evaluated on a case-by-case basis according to the actual operating conditions. Furthermore, the field measurements showed good agreement with the trends predicted by the theoretical analysis.

Keywords: Pusher Roller Die, Banbury Ram, Electrical Energy Savings, Pneumatic Jack Replacement, Rubber Industry