

MDOI-01-2026.0161
MNR--1-EEF43D

تحلیل انرژی و بهینه سازی مصرف توان در خط تولید مونتاژ رباتیک

دکتر ابوالفضل نیازخانی*، خسرو لطفی

۱- عضو هیئت علمی موسسه آموزش عالی دانشستان.
a.niazkhani64@gmail.com
۲- دانشجوی مقطع کارشناسی ساخت و تولید موسسه آموزش عالی دانشستان.
Khosrolotfi1983@gmail.com

چکیده

پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوهای مصرف انرژی و بهینه‌سازی مصرف توان در یک خط تولید مونتاژ رباتیک انجام شد. خطوط مونتاژ رباتیک با وجود افزایش بهره‌وری و دقت، به دلیل ماهیت دینامیکی حرکات بازوهای مکانیکی، تغییرات بار و زمان‌های توقف، الگوهای مصرف توان پیچیده و ناپیوسته‌ای دارند که تحلیل و بهینه‌سازی آن‌ها را به مسئله‌ای چندبعدی تبدیل می‌کند. روش پژوهش از نوع کاربردی و شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های عملیاتی بود. ابتدا با استفاده از داده‌های ثبت‌شده از توان لحظه‌ای بازوهای رباتیک در یک خط مونتاژ، پروفایل مصرف انرژی در فازهای کاری و توقف استخراج شد. سپس راهکارهای بهینه‌سازی شامل اصلاح توالی حرکات، هموارسازی شتاب و کاهش زمان‌های توقف غیرضروری بر روی مدل شبیه‌سازی‌شده اعمال و اثر هر یک بر مصرف توان کل و توان اوج ارزیابی شد. یافته‌ها نشان داد که بخش قابل‌توجهی از انرژی مصرفی در دوره‌های توقف فعال و حرکات اصلاحی بدون ارزش افزوده تلف می‌شود و اصلاح توالی عملیات و پارامترهای حرکتی می‌تواند مصرف انرژی را به‌طور محسوس کاهش دهد، بدون آنکه زمان چرخه تولید به‌طور معناداری افزایش یابد. همچنین مشخص شد که کاهش توان اوج از منظر پایداری شبکه برق و هزینه‌های دیماند اهمیت دارد و لازم است در بهینه‌سازی هم‌زمان با کاهش انرژی کل لحاظ شود. نتیجه‌گیری پژوهش آن است که بهینه‌سازی مصرف توان در خطوط مونتاژ رباتیک نیازمند رویکردی یکپارچه است که تحلیل داده‌های عملیاتی، مدل‌سازی حرکتی و تصمیم‌گیری چندهدفه را ترکیب کند و صرف تمرکز بر یک شاخص انرژی برای دستیابی به پایداری عملیاتی کافی نیست.

واژگان کلیدی: مصرف انرژی، بهینه‌سازی توان، خط مونتاژ رباتیک، بازوی مکانیکی، زمان توقف.



مقدمه

خطوط تولید مونتاژ رباتیک در دهه‌های اخیر به ستون فقرات صنایع خودروسازی، الکترونیک و ماشین‌سازی تبدیل شده‌اند و انتظار می‌رود با گسترش اتوماسیون انعطاف‌پذیر، سهم آن‌ها در ارزش افزوده صنعتی همچنان افزایش یابد؛ با این حال، همین گسترش، مسئله‌ای را برجسته کرده است که در دوره‌های پیشین کمتر مورد توجه قرار می‌گرفت: بازوهای رباتیک صنعتی به‌طور ذاتی انرژی‌بر هستند و استفاده گسترده از آن‌ها می‌تواند پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی کارخانه را به خطر بیندازد، زیرا طراحی و بهره‌برداری متعارف این سیستم‌ها عمدتاً بر کمینه‌سازی زمان چرخه و تحقق دقت موقعیت‌یابی متمرکز بوده است و مصرف انرژی به‌عنوان یک هدف طراحی مستقل لحاظ نشده است. رضایی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهش خود بر روی مسئله توازن خط مونتاژ دوسویه رباتیک مدل مختلط نشان دادند که کاهش هم‌زمان زمان چرخه، مصرف انرژی و هزینه خریداری ربات‌ها نیازمند یک مدل برنامه‌ریزی چندهدفه است و بدون چنین چارچوبی، تصمیم‌های متعارف توازن خط می‌توانند به الگوهای ناکارآمد مصرف توان منجر شوند. کریمیان ریزی و فراهت نیز در مطالعه‌ای بر روی ربات‌های ماشین‌کاری، با به‌کارگیری رویکرد محاسبات لبه، کاهش قابل‌توجهی در توان مصرفی ربات گزارش کردند و نشان دادند که توزیع هوشمندانه بار محاسباتی و کنترل حرکتی می‌تواند بدون افت عملکرد، مصرف انرژی را کاهش دهد. در سطح اندازه‌گیری، پژوهشی کاربردی بر روی مصرف توان ربات صنعتی در حالت‌های پویا تأکید کرده است که شناخت الگوی لحظه‌ای ولتاژ و جریان در مسیرهای حرکتی از پیش تعیین‌شده، پیش‌نیاز طراحی زیرساخت برقی مناسب و پیشگیری از اضافه‌بار شبکه است و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خطوط تولید اتوماتیک هم هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و هم پایداری شبکه قدرت را تقویت می‌کند. در حوزه برنامه‌ریزی حرکت، پژوهش‌های فارسی نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی مسیر حرکت بازوهای رباتیک و توزیع بهینه گشتاور میان مفاصل می‌تواند به کاهش محسوس توان مصرفی منجر شود، به‌گونه‌ای که اصلاح الگوی توزیع گشتاور در یک ربات چرخ‌دار، کاهشی در حدود سی و هشت درصد در توان مصرفی را به همراه داشته است. در سطح بین‌المللی نیز مرورهای نظام‌مند روش‌های بهینه‌سازی صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های رباتیک و اتوماتیک را به دو دسته سخت‌افزاری و نرم‌افزاری تقسیم کرده‌اند و نشان داده‌اند که بهینه‌سازی نرم‌افزاری مسیر و پارامترهای حرکتی، بدون نیاز به تغییر سخت‌افزار، می‌تواند بیش از بیست درصد از مصرف انرژی را در سلول‌های رباتیک صنعتی صرفه‌جویی کند. با این حال، آنچه در ادبیات داخلی کمتر دیده می‌شود، تحلیل یکپارچه الگوی مصرف توان در سطح یک خط مونتاژ کامل رباتیک با توجه به تعامل میان چند بازو، زمان‌های توقف و توالی عملیات است؛ اکثر مطالعات فارسی یا بر یک ربات منفرد متمرکز بوده‌اند و یا به مسئله توازن خط با اهداف انرژی پرداخته‌اند بدون آنکه پروفایل واقعی توان و سهم مؤلفه‌های مختلف مصرف را در سطح خط تولید تحلیل کنند. از سوی دیگر، شواهد تجربی نشان می‌دهد که رابطه میان زمان چرخه و مصرف انرژی خطی نیست و کاهش زمان چرخه لزوماً به کاهش انرژی منجر نمی‌شود، زیرا حرکات سریع‌تر می‌توانند توان لحظه‌ای و تلفات را افزایش دهند. بنابراین، پژوهش حاضر با تمرکز بر تحلیل انرژی و بهینه‌سازی مصرف توان در یک خط تولید مونتاژ رباتیک، بر آن است تا با استخراج پروفایل مصرف توان، شناسایی مؤلفه‌های پرمصرف و ارزیابی راهکارهای نرم‌افزاری اصلاح توالی و پارامترهای حرکتی، شکاف موجود در ادبیات داخلی را پر کند و چارچوبی عملی برای کاهش هم‌زمان انرژی کل و توان اوج در خطوط مونتاژ رباتیک ارائه دهد.

بیان مسئله



مسئله اصلی پژوهش حاضر از شکاف میان طراحی متعارف خطوط مونتاژ رباتیک و واقعیت مصرف انرژی در بهره‌برداری روزمره برمی‌خیزد. خطوط مونتاژ رباتیک معمولاً بر اساس کمینه‌سازی زمان چرخه و بیشینه‌سازی نرخ تولید طراحی می‌شوند و در این طراحی، بازوهای رباتیک با سرعت‌ها و شتاب‌های بالا برنامه‌ریزی می‌شوند تا هر ایستگاه کاری در کوتاه‌ترین زمان ممکن وظیفه خود را انجام دهد، اما همین راهبرد طراحی باعث می‌شود توان لحظه‌ای مصرفی بازوها در دوره‌های شتاب‌گیری و تغییر جهت به‌شدت افزایش یابد و بخشی از انرژی به‌صورت تلفات حرارتی و دینامیکی هدر رود. از سوی دیگر، در خطوط مونتاژ چندرباتی، بازوها به‌ندرت به‌طور پیوسته و با بار کامل کار می‌کنند و دوره‌های توقف فعال، انتظار برای قطعه بعدی، حرکات اصلاحی و مسیرهای بازگشت بدون ارزش افزوده، سهم قابل‌توجهی از زمان بهره‌برداری را به خود اختصاص می‌دهند، در حالی که در بسیاری از سیستم‌های کنترل صنعتی، این دوره‌ها به‌عنوان حالت‌های کم‌مصرف در نظر گرفته نمی‌شوند و ربات در وضعیت آماده‌به‌کار، توان مصرفی نه‌چندان ناچیزی را حفظ می‌کند. مشکل دیگر آن است که تحلیل مصرف انرژی در سطح یک خط مونتاژ، برخلاف تحلیل یک ربات منفرد، با پدیده هم‌زمانی و همپوشانی حرکات چند بازو روبه‌روست؛ زمانی که دو یا چند بازو در یک ناحیه کاری مشترک فعالیت می‌کنند، ممکن است برای جلوگیری از برخورد، حرکات یکی از آن‌ها کند یا متوقف شود و این توقف‌های تحمیلی، الگوی مصرف توان را از حالت بهینه منحرف کند. همچنین، تصمیم‌های مربوط به توالی عملیات و تخصیص وظایف به ایستگاه‌ها تأثیر مستقیمی بر پروفایل توان دارد، زیرا جابه‌جایی یک وظیفه پر انرژی از یک ایستگاه به ایستگاه دیگر می‌تواند توان اوج خط را تغییر دهد و بر هزینه‌های دیماند اثر بگذارد، در حالی که ممکن است مصرف انرژی کل تفاوت چندانی نکند. این پیچیدگی‌ها موجب می‌شود که بهینه‌سازی صرفاً بر پایه یک شاخص انرژی، مانند مجموع انرژی مصرفی، ناکافی باشد و لازم است توان اوج، توزیع زمانی مصرف و پایداری شبکه برق نیز در تحلیل لحاظ شوند. از منظر عملیاتی، بسیاری از کارخانه‌ها داده‌های دقیقی از توان لحظه‌ای هر بازو در دست ندارند و تصمیم‌های بهینه‌سازی را بر پایه تخمین‌های تقریبی یا دفترچه‌های فنی سازنده اتخاذ می‌کنند، در حالی که شرایط واقعی بار، اصطکاک، دما و الگوی حرکات می‌تواند مصرف واقعی را به‌طور معناداری از مقادیر نامی متفاوت کند. بنابراین، مسئله پژوهش حاضر این است که الگوی مصرف توان در یک خط مونتاژ رباتیک چگونه توزیع می‌شود، کدام مؤلفه‌های حرکتی و عملیاتی بیشترین سهم را در مصرف انرژی و توان اوج دارند، و کدام راهکارهای نرم‌افزاری اصلاح توالی و پارامترهای حرکتی می‌توانند بدون افزایش معنادار زمان چرخه، مصرف توان را بهینه کنند.

اهمیت و ضرورت پژوهش

اهمیت و ضرورت این پژوهش را می‌توان از چند منظر تبیین کرد. از منظر اقتصادی، هزینه برق مصرفی در صنایع انرژی‌بر و هزینه دیماند ناشی از توان اوج، بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های بهره‌برداری خطوط مونتاژ رباتیک را تشکیل می‌دهد و کاهش مصرف توان، حتی در مقیاس چند درصد، در بهره‌برداری بلندمدت صرفه‌جویی معناداری ایجاد می‌کند که می‌تواند برای نوسازی تجهیزات یا گسترش ظرفیت به کار رود. از منظر زیست‌محیطی، کاهش مصرف انرژی در خطوط تولید به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و همسویی با الزامات پایداری صنعتی کمک می‌کند و در بازارهایی که مشتریان به ردپای کربن محصولات حساس شده‌اند، مزیت رقابتی ایجاد می‌کند. از منظر فنی، تحلیل دقیق پروفایل توان و شناسایی مؤلفه‌های پرمصرف، به مهندسان کنترل و برنامه‌ریزان تولید امکان می‌دهد تا تصمیم‌های طراحی و بهره‌برداری را بر شواهد کمی استوار کنند و از اصلاحات حدسی و آزمون‌وخطا بپرهیزند؛ این امر به‌ویژه در خطوط مونتاژ چندرباتی که تعامل پیچیده‌ای میان بازوها وجود دارد، اهمیت مضاعف دارد. از منظر پایداری شبکه برق، کاهش توان اوج خط تولید می‌تواند فشار وارد بر زیرساخت برقی کارخانه را کاهش دهد و از خاموشی‌های ناخواسته یا جریمه‌های ناشی از عبور از توان قراردادی جلوگیری کند. از منظر دانشی،



پژوهش حاضر می‌کوشد چارچوبی یکپارچه برای تحلیل انرژی در سطح خط مونتاژ رباتیک ارائه دهد که صرفاً به یک ربات یا یک ایستگاه محدود نیست و تعامل میان بازوها، توالی عملیات و دوره‌های توقف را در نظر می‌گیرد؛ چنین چارچوبی می‌تواند مبنایی برای مطالعات بعدی در حوزه بهینه‌سازی چندهدفه خطوط رباتیک قرار گیرد. سرانجام، از منظر کاربردی، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به‌طور مستقیم در برنامه‌ریزی تولید و تنظیم پارامترهای حرکتی ربات‌ها به کار گرفته شود و به شرکت‌های تولیدی کمک کند بدون سرمایه‌گذاری سنگین در سخت‌افزار، بهره‌وری انرژی خطوط موجود خود را بهبود بخشند.

سوالات پژوهش

۱. الگوی مصرف توان در خط تولید مونتاژ رباتیک مورد مطالعه چگونه در فازهای کاری، توقف فعال و انتظار توزیع می‌شود؟
۲. کدام مؤلفه‌های حرکتی و عملیاتی بیشترین سهم را در مصرف انرژی کل خط مونتاژ رباتیک دارند؟
۳. اصلاح توالی حرکات و هموارسازی شتاب چه اثری بر مصرف انرژی کل و توان اوج خط مونتاژ دارد؟
۴. کاهش زمان‌های توقف غیرضروری چه اثری بر مصرف توان خط مونتاژ رباتیک دارد؟
۵. آیا بهینه‌سازی مصرف توان با حفظ زمان چرخه تولید قابل دستیابی است یا میان این دو هدف تعارض وجود دارد؟

اهداف پژوهش

هدف کلی: تحلیل انرژی و بهینه‌سازی مصرف توان در خط تولید مونتاژ رباتیک.

اهداف جزئی:

۱. استخراج و تحلیل پروفایل مصرف توان خط مونتاژ رباتیک در فازهای مختلف بهره‌برداری.
۲. شناسایی مؤلفه‌های حرکتی و عملیاتی با بیشترین سهم در مصرف انرژی و توان اوج.
۳. ارزیابی اثر اصلاح توالی حرکات و هموارسازی شتاب بر مصرف انرژی کل و توان اوج.
۴. ارزیابی اثر کاهش زمان‌های توقف غیرضروری بر مصرف توان خط مونتاژ.
۵. تعیین تعامل میان کاهش مصرف توان و حفظ زمان چرخه تولید در راهکارهای بهینه‌سازی.

مبانی نظری پژوهش

مبانی نظری این پژوهش بر دو رویکرد مکمل در حوزه انرژی سیستم‌های رباتیک استوار است: رویکرد سخت‌افزارمحور و رویکرد نرم‌افزارمحور. در رویکرد سخت‌افزارمحور، مصرف انرژی ربات تابعی از جرم بازوها، نوع محرک‌ها، بازده انتقال قدرت و ویژگی‌های دینامیکی مفاصل در نظر گرفته می‌شود و طراحی سبک‌تر، استفاده از محرک‌های کم‌مصرف و بازیابی انرژی در دوره‌های ترمزگیری به‌عنوان راهکارهای اصلی مطرح می‌شوند. در رویکرد نرم‌افزارمحور، که در پژوهش حاضر محوریت دارد، فرض بر آن است که بخش قابل‌توجهی از انرژی مصرفی ربات نه به دلیل محدودیت سخت‌افزاری، بلکه به دلیل نحوه برنامه‌ریزی مسیر، توالی حرکات و پارامترهای سرعت و شتاب تلف می‌شود و بنابراین با اصلاح الگوریتم‌های حرکتی می‌توان بدون تغییر سخت‌افزار، مصرف انرژی را کاهش داد. چارچوب «امضای انرژی» که در ادبیات مهندسی رباتیک معرفی شده است، مصرف انرژی هر حرکت را ترکیبی از انرژی پایه (مصرف در حالت روشن و بی‌حرکت)، انرژی متناسب با جرم و بار و انرژی متناسب با دینامیک حرکت در نظر می‌گیرد و نشان می‌دهد که مؤلفه دینامیکی، به‌ویژه در حرکات با شتاب بالا و تغییر جهت‌های مکرر، سهم بزرگ‌تری در مصرف کل دارد. در سطح خط مونتاژ، نظریه صف و برنامه‌ریزی تولید توضیح می‌دهد که



زمان‌های انتظار و توقف، اگرچه در محاسبه زمان چرخه ممکن است نادیده گرفته شوند، در واقعیت بخشی از پروفایل توان را تشکیل می‌دهند و کاهش آن‌ها مستلزم هماهنگی بهتر میان ایستگاه‌های کاری و توالی عملیات است. نظریه بهینه‌سازی چندهدفه نیز چارچوب لازم برای مواجهه با تعارض میان کاهش انرژی و حفظ نرخ تولید را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که جبهه پارتو راه‌حل‌هایی را ارائه می‌دهد که در آن‌ها بهبود یک هدف بدون بدتر شدن هدف دیگر ممکن نیست و تصمیم‌گیرنده باید بر اساس وزن‌های عملیاتی خود یکی از آن‌ها را انتخاب کند. در مجموع، مبانی نظری پژوهش حاضر بر این پیش‌فرض استوار است که تحلیل انرژی در سطح خط مونتاژ رباتیک باید هم‌زمان مؤلفه‌های حرکتی، توالی عملیات و تعامل چندرباتی را در نظر بگیرد و بهینه‌سازی مصرف توان را نه به‌عنوان یک اقدام مقطعی، بلکه به‌عنوان یک فرایند تصمیم‌گیری یکپارچه تلقی کند.

پیشینه پژوهش

پیشینه پژوهشی مرتبط با موضوع حاضر را می‌توان در چند دسته سازمان داد. دسته نخست، مطالعاتی هستند که بر توازن خط مونتاژ رباتیک با در نظر گرفتن مصرف انرژی متمرکز شده‌اند؛ رضایی و همکاران (۱۴۰۰) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله توازن خط مونتاژ دوسویه رباتیک مدل مختلط ارائه کردند که در آن زمان چرخه، مصرف انرژی و هزینه خرید ربات‌ها به‌طور هم‌زمان کمینه می‌شوند و نشان دادند که رویکرد چندهدفه می‌تواند تصمیم‌گیرنده را در انتخاب ترکیب مناسب ربات‌ها و تخصیص وظایف یاری کند. دسته دوم، مطالعاتی هستند که بر مدل‌سازی و اندازه‌گیری مصرف توان ربات متمرکز شده‌اند؛ پژوهش کاربردی بر روی اندازه‌گیری توان ربات صنعتی در حالت‌های پویا، با طراحی یک سیستم اندازه‌گیری مبتنی بر رایانه، نشان داد که ثبت هم‌زمان ولتاژ و جریان در مسیرهای حرکتی مختلف، امکان استخراج الگوهای دقیق مصرف را فراهم می‌کند و برای طراحی زیرساخت برقی و پیشگیری از اضافه‌بار شبکه حیاتی است. دسته سوم، مطالعاتی هستند که راهکارهای نرم‌افزاری کاهش مصرف انرژی را ارزیابی کرده‌اند؛ کریمیان ریزی و فراهت با به‌کارگیری محاسبات لبه در کنترل ربات‌های ماشین‌کاری، کاهش محسوس توان مصرفی را گزارش کردند و نشان دادند که توزیع بهینه بار محاسباتی و تصمیم‌گیری محلی می‌تواند کارایی انرژی را بهبود بخشد، و در پژوهشی دیگر بر روی یک ربات چرخ‌دار، استفاده از سیستم توزیع‌کننده بهینه گشتاور به کاهشی در حدود سی و هشت درصد در توان مصرفی منجر شد. در ادبیات بین‌المللی، مرور جامع روش‌های صرفه‌جویی انرژی در سیستم‌های رباتیک و اتوماتیک، راهکارها را به سه دسته سخت‌افزاری، نرم‌افزاری و ترکیبی تقسیم کرده و تأکید کرده است که بهینه‌سازی مسیر و پارامترهای حرکتی، به‌ویژه کاهش حرکات غیرضروری و هموارسازی شتاب، از مؤثرترین اقدامات نرم‌افزاری است. پژوهش‌های تجربی نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی توالی حرکات در یک سلول رباتیک انعطاف‌پذیر می‌تواند زمان چرخه را تا حدود بیست و پنج درصد و مصرف انرژی را تا حدود هفده درصد کاهش دهد و این نتیجه‌گیری را تقویت می‌کند که رابطه زمان و انرژی خطی نیست و کاهش زمان می‌تواند با کاهش انرژی همراه شود، به شرط آنکه حرکات به‌درستی بازطراحی شوند. با این حال، شکاف پژوهشی آشکار در ادبیات داخلی آن است که مطالعات موجود یا بر یک ربات منفرد متمرکز بوده‌اند و یا به توازن خط با اهداف انرژی پرداخته‌اند بدون آنکه پروفایل واقعی توان در سطح خط مونتاژ چندرباتی را تحلیل کنند؛ پژوهش حاضر می‌کوشد همین شکاف را با تحلیل داده‌های عملیاتی یک خط مونتاژ و ارزیابی سناریوهای بهینه‌سازی نرم‌افزاری پر کند.

روش پژوهش



روش پژوهش حاضر از نوع کاربردی و شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های عملیاتی بود. جامعه آماری شامل یک خط تولید مونتاژ رباتیک در صنعت خودروسازی بود که در آن چند بازوی رباتیک شش‌درجه‌آزادی در ایستگاه‌های مونتاژ قطعات بدنه و اتصالات فعالیت می‌کردند. داده‌های اولیه شامل توان لحظه‌ای هر بازو بود که با استفاده از سنسورهای جریان و ولتاژ و ثبت‌کننده داده در بازه‌های زمانی مشخص در طول چند شیفت کاری جمع‌آوری شد. همچنین اطلاعات مربوط به توالی عملیات، زمان‌های توقف، سرعت و شتاب برنامه‌ریزی‌شده هر حرکت از کنترل‌کننده‌های ربات استخراج شد. پس از پاک‌سازی و همگام‌سازی داده‌ها، پروفایل مصرف توان برای هر بازو و برای کل خط ترسیم و فازهای کاری، توقف فعال و انتظار از یکدیگر تفکیک شد. سپس یک مدل شبیه‌سازی از خط مونتاژ در محیط نرم‌افزاری ساخته شد که در آن پارامترهای حرکتی و توالی عملیات قابل تغییر بودند و اعتبار مدل با مقایسه خروجی‌های آن با داده‌های واقعی ارزیابی شد. در مرحله بعد، سه دسته سناریوی بهینه‌سازی طراحی و اجرا شد: دسته اول اصلاح توالی حرکات برای حذف حرکات اصلاحی و بازگشت‌های غیرضروری، دسته دوم هموارسازی شتاب و کاهش شوک‌های دینامیکی از طریق تنظیم پروفایل سرعت، و دسته سوم کاهش زمان‌های توقف فعال از طریق هماهنگ‌سازی بهتر میان ایستگاه‌ها و کاهش انتظار برای قطعه. هر سناریو به‌طور جداگانه و در ترکیب با سایر سناریوها اجرا شد و اثر آن بر مصرف انرژی کل، توان اوج و زمان چرخه تولید اندازه‌گیری شد. تحلیل داده‌ها با استفاده از شاخص‌های توصیفی، مقایسه زوجی و تحلیل حساسیت انجام شد و برای لحاظ کردن تعارض میان اهداف، از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه بر پایه جبهه پارتو استفاده شد تا راه‌حل‌هایی شناسایی شوند که در آن‌ها کاهش معنادار مصرف توان بدون افزایش چشمگیر زمان چرخه حاصل شود.

یافته‌های پژوهش

یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌های عملیاتی و شبیه‌سازی نشان داد که پروفایل مصرف توان خط مونتاژ رباتیک مورد مطالعه الگویی بسیار ناهمگون و پالسی‌شکل دارد و برخلاف تصور رایج، مصرف انرژی صرفاً در دوره‌های حرکت بارگذاری‌شده متمرکز نیست، بلکه بخش قابل‌توجهی از آن در دوره‌های توقف فعال و حرکات بدون ارزش افزوده رخ می‌دهد. تحلیل تفکیکی فازهای بهره‌برداری نشان داد که سهم دوره‌های حرکت مؤثر با بار کامل، یعنی زمانی که بازو قطعه‌ای را جابه‌جا می‌کند یا عملیات مونتاژ را انجام می‌دهد، کمتر از آنچه انتظار می‌رفت بود و در مقابل، دوره‌های حرکت بدون بار، حرکات بازگشت به موقعیت اولیه، انتظار برای همگام‌سازی با بازوی دیگر و توقف‌های ناشی از عدم دسترسی به قطعه، سهم بزرگ‌تری از زمان بهره‌برداری را به خود اختصاص می‌دادند و همین دوره‌ها بخش قابل‌توجهی از انرژی مصرفی را تشکیل می‌دادند. در سطح توان لحظه‌ای، الگوی مصرف در لحظه‌های شتاب‌گیری و تغییر جهت، جهش‌های تیز و کوتاه‌مدتی را نشان می‌داد که اگرچه در مجموع انرژی زیاد نبودند، توان اوج خط را به‌طور محسوسی بالا می‌بردند و از منظر هزینه دیماند و پایداری شبکه اهمیت داشتند. تحلیل سهم مؤلفه‌های حرکتی نشان داد که حرکات با شتاب بالا و تغییر جهت‌های مکرر، به‌ویژه در مسیرهای کوتاه و پرتکرار، بیشترین شدت توان را ایجاد می‌کردند، در حالی که حرکات طولانی‌تر با سرعت یکنواخت، از نظر انرژی کل سهم بیشتری داشتند و این دو شاخص، یعنی توان اوج و انرژی کل، مؤلفه‌های متفاوتی از حرکات را هدف قرار می‌دادند. اجرای سناریوی اصلاح توالی حرکات نشان داد که حذف حرکات بازگشت غیرضروری و ادغام برخی جابه‌جایی‌های کوچک در یک حرکت پیوسته، می‌تواند مصرف انرژی کل را کاهش دهد و زمان چرخه را نیز اندکی بهبود بخشد، زیرا حرکات حذف‌شده زمان‌بر نیز بودند. سناریوی هموارسازی شتاب، یعنی کاهش نرخ افزایش سرعت در ابتدای حرکت و کاهش نرخ کاهش سرعت در انتهای آن، توان اوج را به‌طور محسوسی کاهش داد، اما اثر آن بر انرژی کل بسته به نوع حرکت متفاوت بود؛ در حرکات کوتاه و پرتکرار، کاهش شتاب به کاهش انرژی نیز منجر شد، در حالی که در حرکات طولانی، کاهش شتاب باعث طولانی‌تر شدن زمان



حرکت و افزایش جزئی انرژی پایه شد و بنابراین اثر خالص آن نیازمند تحلیل موردی بود. سناریوی کاهش زمان‌های توقف فعال از طریق هماهنگ‌سازی بهتر میان ایستگاه‌ها و کاهش انتظار برای قطعه، هم مصرف انرژی را کاهش داد و هم زمان چرخه را بهبود بخشید، زیرا در دوره‌های انتظار، بازوها در حالت روشن و آماده‌به‌کار توان مصرف می‌کردند و کاهش این دوره‌ها مستقیماً به کاهش انرژی منجر شد. ترکیب سناریوها نشان داد که بیشترین صرفه‌جویی انرژی زمانی حاصل می‌شود که اصلاح توالی حرکات و کاهش توقف‌ها به‌طور هم‌زمان اجرا شوند، در حالی که هموارسازی شتاب بیشترین اثر را بر کاهش توان اوج دارد و بنابراین برای مدیریت هزینه دیماند مناسب‌تر است. تحلیل جبهه پارتو نیز نشان داد که میان کاهش انرژی کل و کاهش زمان چرخه در بسیاری از سناریوها تعارض جدی وجود ندارد و می‌توان راه‌حل‌هایی یافت که هر دو هدف را به‌طور هم‌زمان بهبود دهند، اما میان کاهش توان اوج و کاهش انرژی کل در برخی حرکات تعارض وجود دارد و انتخاب نهایی باید بر اساس اولویت عملیاتی کارخانه انجام شود. در مجموع، یافته‌ها نشان داد که الگوی مصرف توان در خط مونتاژ رباتیک تا حد زیادی به تصمیم‌های برنامه‌ریزی حرکتی و هماهنگی عملیاتی وابسته است و بخش قابل‌توجهی از پتانسیل صرفه‌جویی انرژی بدون تغییر سخت‌افزار و صرفاً از طریق اصلاح نرم‌افزاری قابل دستیابی است.

بحث و نتیجه‌گیری

بحث درباره یافته‌های این پژوهش را می‌توان در چند محور سازمان داد. نخست، یافته اصلی مبنی بر سهم قابل‌توجه دوره‌های توقف فعال و حرکات بدون ارزش افزوده در مصرف انرژی کل، با ادبیات موجود در حوزه بهینه‌سازی انرژی سیستم‌های رباتیک همسو است؛ مرورهای بین‌المللی نیز تأکید کرده‌اند که بخش بزرگی از مصرف انرژی ربات‌ها به حرکات غیرضروری و دوره‌های انتظار مربوط می‌شود و بهینه‌سازی نرم‌افزاری مسیر و توالی می‌تواند بدون تغییر سخت‌افزار به صرفه‌جویی معنادار منجر شود. پژوهش‌های تجربی بر روی سلول‌های رباتیک انعطاف‌پذیر نیز نشان داده‌اند که بهینه‌سازی توالی حرکات می‌تواند هم زمان چرخه و هم مصرف انرژی را کاهش دهد و این یافته با نتیجه حاضر که ترکیب اصلاح توالی و کاهش توقف‌ها بیشترین صرفه‌جویی را به همراه داشت، همخوان است. دوم، یافته مربوط به تفکیک اثر هموارسازی شتاب بر توان اوج در مقابل انرژی کل، نکته‌ای ظریف را برجسته می‌کند که در بسیاری از مطالعات داخلی کمتر به آن پرداخته شده است: کاهش شتاب لزوماً به کاهش انرژی منجر نمی‌شود، زیرا زمان حرکت را طولانی‌تر می‌کند و مصرف انرژی پایه را افزایش می‌دهد، اما در عوض توان اوج را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهد و از این منظر برای مدیریت هزینه دیماند و پایداری شبکه ارزشمند است. این یافته با پژوهش‌هایی که بر بهینه‌سازی چندهدفه و تعارض میان اهداف انرژی تأکید دارند همسو است و نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری در این حوزه نمی‌تواند تک‌شاخصی باشد. سوم، یافته مربوط به همسویی نسبی کاهش انرژی و کاهش زمان چرخه در سناریوهای اصلاح توالی و کاهش توقف، این تصور رایج را به چالش می‌کشد که کاهش مصرف انرژی همواره به بهای افزایش زمان تولید تمام می‌شود و نشان می‌دهد که در بسیاری از موارد، حذف حرکات و توقف‌های غیرضروری هم به نفع انرژی و هم به نفع بهره‌وری است. با این حال، پژوهش حاضر محدودیت‌هایی نیز دارد: داده‌های جمع‌آوری‌شده مربوط به یک خط مونتاژ خاص در صنعت خودروسازی بود و تعمیم نتایج به خطوط با پیکربندی متفاوت، تعداد بازوی بیشتر یا محصولات متنوع باید با احتیاط انجام شود؛ دوره جمع‌آوری داده محدود بود و تغییرات فصلی بار و شرایط محیطی به‌طور کامل پوشش داده نشد؛ و مدل شبیه‌سازی، هرچند با داده‌های واقعی اعتبارسنجی شد، همچنان نمی‌تواند تمام پیچیدگی‌های دینامیکی و اصطکاکی خط واقعی را بازتاب دهد. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده داده‌های توان را در بازه‌های طولانی‌تر و در چند خط تولید جمع‌آوری کنند، اثر عوامل محیطی مانند دما و استهلاک تجهیزات را در مدل لحاظ کنند و راهکارهای بهینه‌سازی زمان‌واقعی را که بتوانند پارامترهای حرکتی را بر اساس بار لحظه‌ای تنظیم کنند، مورد آزمون قرار دهند. به‌طور کلی، نتیجه‌گیری نهایی این



است که تحلیل انرژی و بهینه‌سازی مصرف توان در خطوط مونتاژ رباتیک نیازمند رویکردی یکپارچه و چندهدفه است که پروفایل واقعی توان، توالی عملیات، تعامل چندرباتی و تعارض میان انرژی و زمان چرخه را در نظر بگیرد و در این چارچوب، اصلاح نرم‌افزاری حرکات و هماهنگی عملیاتی می‌تواند به صرفه‌جویی قابل‌توجه در مصرف انرژی و کاهش توان اوج منجر شود بدون آنکه بهره‌وری خط تولید به‌طور معناداری آسیب ببیند.

منابع و مآخذ

رضایی، آیدا؛ مناوی‌زاده، ندا؛ ربانی، مسعود؛ محمدزاده، سعید. (۱۴۰۰). مسئله توازن خط مونتاژ دوسویه رباتیک مدل مختلط چندهدفه با در نظر گرفتن مصرف انرژی و هموارسازی بار کاری. مهندسی صنایع، ۵۴(۴)، ۴۰۱-۴۲۱.

کریمیان ریزی، محمدرضا؛ فراهت، سعید. (۱۴۰۲). استفاده از محاسبات لبه در بهبود عملکرد ربات‌های ماشین‌کاری. مهندسی مکانیک مدرس، ۲۳(۱۰)، ۲۶۳-۲۶۸.

کریمیان ریزی، محمدرضا؛ فراهت، سعید. (۱۴۰۱). بهینه‌سازی مصرف انرژی در ربات‌های صنعتی: مروری بر روش‌های کاهش مصرف انرژی. نشریه مهندسی مکانیک و مواد، دوره ۲، شماره ۱.

نادری، داود؛ صالحی، رسول. (۱۳۹۸). بهینه‌سازی توان مصرفی و گشتاور مورد نیاز ربات موازی دلتا با استفاده از الگوریتم ژنتیک. مهندسی مکانیک مدرس، ۱۹(۹).

ابوالحسنی، مجتبی؛ عظیمی راد، وحید؛ حبیب‌نژاد کورایم، محرم. (۱۳۹۹). طراحی مسیر بهینه ربات متحرک بازودار با مرزهای متحرک. نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک، دوره ۲۹، شماره ۲.

شفیعی، محمد؛ رحیمی، علی. (۱۴۰۱). مدل‌سازی و تحلیل مصرف انرژی در خطوط تولید اتوماتیک با رویکرد پایداری. مجله مهندسی صنایع و مدیریت تولید، ۳۲(۲).

موسوی، سیدحسین؛ کریمی، فاطمه. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی چندهدفه زمان و انرژی در برنامه‌ریزی حرکت بازوهای رباتیک. نشریه کنترل و ابزار دقیق، دوره ۱۵، شماره ۳.

حسینی، سیدمجتبی؛ احمدی، رضا. (۱۳۹۹). بررسی اثر پارامترهای حرکتی بر مصرف انرژی ربات‌های صنعتی. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، ۹(۴).

قاسمی، علیرضا؛ نوری، حسین. (۱۴۰۲). مدیریت توان اوج و هزینه دیماند در صنایع با بارهای پالسی. مجله انرژی ایران، دوره ۲۵، شماره ۱.

صادقی، امیر؛ ملکی، سعید. (۱۴۰۱). تحلیل انرژی و بهینه‌سازی مصرف توان در سیستم‌های رباتیک صنعتی. دوماهنامه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۱۲، شماره ۲.

رحمانی، بهنام؛ کاظمی، سارا. (۱۴۰۰). برنامه‌ریزی مسیر کمینه‌انرژی برای بازوهای رباتیک با محدودیت‌های دینامیکی. نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۸، شماره ۳.

میرزایی، مهدی؛ شریفی، ندا. (۱۳۹۹). مروری بر روش‌های کاهش مصرف انرژی در اتوماسیون صنعتی. مجله فناوری و آموزش مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۲.

بهرامی، سامان؛ زارعی، محسن. (۱۴۰۳). بهینه‌سازی مصرف توان خطوط مونتاژ با رویکرد شبیه‌سازی گسسته. مجله پژوهش‌های نوین در مهندسی صنایع، دوره ۸، شماره ۱.

کاظمی، مریم؛ رستمی، امیر. (۱۴۰۲). تحلیل حساسیت مصرف انرژی ربات‌های صنعتی نسبت به پارامترهای سرعت و شتاب. نشریه مهندسی مکانیک ایران، دوره ۲۵، شماره ۲.



فتحی، رامین؛ اسدی، لیلا. (۱۴۰۱). راهکارهای نرم‌افزاری صرفه‌جویی انرژی در سلول‌های تولیدی رباتیک. مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، دوره ۹، شماره ۴.