

طراحی هوشمند طوقه با دیجیتال نوین و حسگر TPMS برای افزایش دوام و بهینه‌سازی عملکرد در شرایط واقعی

بهار علی پور* و فرهاد پلاشی

مجتمع صنایع لاستیک بارز سیرجان alipour2006@gmail.com

چکیده: این پژوهش با هدف توسعه طراحی هوشمند طوقه تایر بر پایه فناوری‌های صنعت ۰۴ انجام شده است. با توجه به اهمیت طوقه در انتقال بار، پایداری و ایمنی تایر، به کارگیری راهکارهای دیجیتال برای افزایش دوام و کاهش هزینه‌های نگهداری ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه چارچوب دیجیتال نوین برای ایجاد نمونه مجازی طوقه و حسگرهای TPMS برای جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای فشار و دما به کار گرفته شدند. داده‌های میدانی از نمونه‌های طوقه در شرایط بارگذاری و دمای متفاوت ثبت و برای تحلیل به مدل دیجیتال نوین منتقل شد. شبیه‌سازی‌های المان محدود با استفاده از نرم‌افزارهای Abaqus و Ansys برای ارزیابی تنش، کرنش و تغییر شکل‌های محتمل انجام گرفت. براساس تحلیل‌ها، طراحی جدید طوقه مبتنی بر لایه‌های مرکب با سختی متغیر و تقویت موضعی در نواحی بحرانی، موجب توزیع بهتر تنش‌ها و کاهش تمرکز کرنش شد. این پژوهش نشان می‌دهد که ادغام دیجیتال نوین و حسگرهای هوشمند در طراحی طوقه، نه تنها مزایای فنی بلکه اثرات اقتصادی قابل توجهی برای صنعت تایرسازی به همراه خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: طوقه، تایر، دیجیتال نوین، TPMS، صنعت ۰۴، دوام، نگهداری پیش‌بینانه، مواد مرکب، شبیه‌سازی.

مقدمه

و شاخص‌های مکانیکی مانند حداکثر کرنش و توزیع تنش بودند. در نهایت تحلیل اقتصادی ساده‌ای برای برآورد کاهش هزینه نگهداری و بازگشت سرمایه اولیه طراحی انجام شد که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه هزینه‌های عملیاتی در دوره بهره‌برداری بود. این روش پژوهش بر پایه ترکیب داده‌های حقیقی و مدل‌سازی پیشرفته استوار است تا راهکارهایی عملی و قابل اجرا برای صنعت پیشنهاد دهد.

طوقه به عنوان رابط میان تایر و رینگ، نقش حیاتی در انتقال بار و ایمنی کلی سیستم تایر-چرخ دارد. عملکرد نامطلوب طوقه می‌تواند منجر به خطرات جدی در ایمنی جاده‌ای و افزایش هزینه‌های نگهداری شود. با پیشرفت فناوری‌های مواد و دیجیتال، فرصت‌های نوینی برای بهبود طراحی و پایش طوقه فراهم آمده است. به‌ویژه چارچوب دیجیتال نوین که امکان ایجاد نسخه‌های مجازی از محصول و سنجش رفتار آن در شرایط متغیر را می‌دهد، به همراه حسگرهای TPMS که داده‌های فشار و دما را به‌طور پیوسته فراهم می‌کنند، توانایی ارزیابی عملکرد و پیش‌بینی خرابی را تقویت می‌کنند. مطالعات اخیر (۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵) نشان‌دهنده اثربخشی ادغام این فناوری‌ها در بهبود دوام و بهینه‌سازی عملکرد تایرهاست. در این مقاله ما یک رویکرد ترکیبی از آزمایش میدانی، جمع‌آوری داده‌های حقیقی و شبیه‌سازی‌های المان محدود را ارائه می‌کنیم تا نشان دهیم چگونه طراحی و مواد جدید طوقه به همراه پایش داده‌محور می‌تواند به بهبود عملکرد در محیط‌های عملیاتی منجر شود. هدف اصلی مطالعه، ارزیابی قابلیت‌های طراحی هوشمند طوقه و ارائه یک مدل قابل پیاده‌سازی برای خطوط تولید صنعتی است.

روش پژوهش و مدل پیشنهادی

نتایج نشان داد طراحی طوقه با لایه‌های مرکب و تقویت موضعی همراه با پایش TPMS، باعث افزایش طول عمر عملیاتی و بهبود پایداری عملکرد شد. نمونه‌های آزمایشی افزایش تقریباً ۲۰ درصدی عمر طوقه و کاهش ۱۵ درصدی هزینه نگهداری را نشان دادند. افزون‌بر این، تحلیل تنش-کرنش تأیید کرد که توزیع تنش در طراحی پیشنهادی یکنواخت‌تر است و نقاط تمرکز تنش کاهش یافته‌اند. تحلیل اقتصادی ابتدایی نیز حاکی از بازگشت سرمایه ظرف چند دوره بهره‌برداری بود.

این مطالعه از چارچوب چندمرحله‌ای شامل نمونه‌برداری میدانی، اندازه‌گیری‌های حسگری و شبیه‌سازی عددی تشکیل شده است. ابتدا چند نمونه طوقه از خطوط تولید موجود انتخاب و تحت آزمایش‌های کنترل‌شده فشار و دما قرار گرفتند. برای ثبت دقیق رفتار عملیاتی، از حسگرهای TPMS استفاده شد که پارامترهای فشار داخلی، دمای سطح و نرخ تغییرات آن‌ها را در فواصل زمانی کوتاه ضبط کردند. داده‌های به‌دست آمده پیش‌پردازش و برای حذف نویز و ناهنجاری‌ها از روش‌های فیلترینگ زمانی استفاده شدند. سپس داده‌های پاک‌سازی‌شده به مدل دیجیتال نوین انتقال یافتند تا بازسازی رفتار واقعی طوقه در سناریوهای مختلف محیطی و بارگذاری ممکن شود. برای تحلیل تنش و کرنش در سازه طوقه، شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزارهایی مانند Abaqus و Ansys انجام شد؛ مدل مواد مرکب با خواص غیرخطی تعریف و شرایط مرزی واقعی شبیه‌سازی شدند. در مرحله طراحی، راهبردهای بهینه‌سازی شامل تغییر هندسه ناحیه طوقه، توزیع لایه‌های مرکب با سختی متغیر و تقویت موضعی در نواحی دارای تمرکز تنش مورد آزمون قرار گرفتند. پس از اتمام شبیه‌سازی‌ها، نتایج عددی با داده‌های میدانی مقایسه شد تا دقت مدل تعیین شود؛ معیارهای تطبیق شامل هم‌پوشانی منحنی‌های فشار-زمان، الگوهای دما

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مدل ارائه‌شده چارچوبی عملی برای تولید طوقه‌های مقاوم و هوشمند فراهم می‌آورد. استفاده از دیجیتال نوین و حسگرهای TPMS امکان پایش پی‌درپی و تصمیم‌سازی داده‌محور را فراهم می‌سازد که به کاهش ریسک خرابی و کاهش هزینه‌ها می‌انجامد. پیشنهاد می‌شود مطالعات میدانی گسترده‌تر و به کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق‌تر خرابی‌ها در پژوهش‌های بعدی انجام شود.

مراجع

- [1] Zhang, Y., et al. (2021). Smart tire design using AI and IoT.
- [2] Mohammadi, A., et al. (2022). Implementation of TPMS in tire maintenance.
- [3] Xu, L., et al. (2025). Digital twin applications in tire industry.
- [4] Li, J., et al. (2024). Materials optimization in tire bead design.
- [5] Barz Industrial Group Internal Report (2025).