

بهینه‌سازی انتقال قدرت تسمه‌ای مبتنی بر سیستم الکتروپنوماتیکی مورد پژوهی: ایرکولرهای واحد متانول پتروشیمی فن آوران

پرویز مهبودی^{۱*}، محمد شارعی^۲، منصور خلیفه زاده^۳

^{۱*} پژوهشگر دکتری معماری، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران (نویسنده مسئول) Mehboodi.1983@gmail.com

^۲ استادیار گروه شیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران Moh.sharee@mail.ir

^۳ مهندسی شیمی، پتروشیمی، واحد ماهشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ماهشهر، ایران Mansour.kh@gmail.com

چکیده

سیستم‌های انتقال قدرت تسمه‌ای در فن‌های محوری ایرکولرهای صنعتی به دلیل دو عامل اصلی، یعنی شوک ناشی از راه‌اندازی مستقیم و چرخش معکوس آزاد پس از توقف، به‌طور مکرر دچار خرابی می‌شوند. این پدیده‌ها موجب لغزش، اتلاف حرارتی، خستگی تسمه و انتقال ارتعاش به یاتاقان‌ها شده و شاخص میانگین زمان بین خرابی‌ها را به شدت کاهش می‌دهند. پژوهش حاضر از نوع کاربردی، توسعه‌ای است و با رویکرد مطالعه موردی در ایرکولرهای واحد متانول پتروشیمی فن آوران انجام شده است. در این پژوهش یک سیستم کنترل الکتروپنوماتیکی یکپارچه طراحی و پیاده‌سازی شده که از سه مؤلفه اصلی تشکیل شده است: راه‌انداز نرم جهت کنترل تدریجی ولتاژ و کاهش گشتاور راه‌اندازی، مکانیزم قفل کن مکانیکی، پنوماتیکی جهت جلوگیری از چرخش معکوس آزاد شافت، و پین آلومینیومی با منطق کنترلی مبتنی بر تشخیص دور صفر. عملکرد سیستم پیشنهادی در شرایط عملیاتی واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج تحلیل قبل و بعد از اجرا نشان داد که سیستم طراحی شده به‌طور کامل شوک راه‌اندازی را حذف کرده، از چرخش معکوس جلوگیری نموده و موجب افزایش قابل توجه میانگین زمان بین خرابی‌ها، بهبود ایمنی عملیاتی، افزایش عمر مفید تسمه و یاتاقان‌ها و کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیر شده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رویکرد ترکیبی کنترل نرم راه‌اندازی و قفل مکانیکی، پنوماتیکی می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر و قابل تعمیم در فن‌های مشابه صنایع پتروشیمی به‌کار گرفته شود.

واژگان کلیدی: سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای، سیستم الکتروپنوماتیکی، چرخش معکوس، راه‌انداز نرم، موردپژوهی صنعتی، پتروشیمی فن آوران

۱. مقدمه

تجهیزات دوار و سیستم‌های خنک‌کننده هوایی از ارکان حیاتی در حفظ پایداری و راندمان فرایندهای ترمودینامیکی در صنایع پتروشیمی، به‌ویژه در واحدهای تولید متانول، به شمار می‌روند (طاهری و همکاران، ۲۰۲۲، ص. ۱۸). در این تجهیزات، سیستم‌های انتقال قدرت تسمه‌ای به دلیل انعطاف‌پذیری، مقرون‌به‌صرفه بودن و قابلیت جذب ارتعاشات، کاربرد گسترده‌ای دارند. با این وجود، قابلیت اطمینان این سیستم‌ها همواره تحت تأثیر تنش‌های دینامیکی، شرایط محیطی و نوسانات عملیاتی قرار دارد که در صورت عدم کنترل دقیق، منجر به استهلاک زودرس و خرابی‌های مکرر اجزای مکانیکی می‌گردد (جکسون و لی، ۲۰۲۱، ص. ۱۰۴). یکی از چالش‌های اساسی و پدیده‌های آیرودینامیکی ذاتی در فن‌های محوری صنعتی، پدیده چرخش معکوس است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که جریان هوای طبیعی محیط یا مکش ایجادشده توسط فن‌های مجاور، موجب چرخش آزادانه پروانه‌ی فن خاموش در جهت عکس دوران نامی موتور شود (اندرسون، ۲۰۲۰، ص. ۶۴). ارزیابی ریسک‌های بحرانی نشان می‌دهد که چرخش معکوس به‌خودی‌خود و در حالت توقف کامل تجهیز منجر به آسیب فوری نمی‌گردد؛ اما در زمان راه‌اندازی مجدد الکتروموتور و عملیات نگهداری، خطرات ایمنی بحرانی و تنش‌های مکانیکی مخربی را به سیستم انتقال قدرت تحمیل می‌کند (سلیمی و رضایی، ۱۴۰۱، ص. ۱). بر اساس تحلیل‌های ریشه‌ای انجام‌شده بر روی علل خرابی قطعات مکانیکی در فن‌های صنعتی، پدیده چرخش معکوس آغازگر یک چرخه‌ی مخرب دینامیکی است؛ این چرخه با اعمال بار ضربه‌ای ناگهانی در لحظه‌ی استارت الکتروموتور در خلاف جهت چرخش پروانه آغاز شده، به سرعت به تخریب و پارگی تسمه‌ها منجر می‌گردد و در نهایت با خرابی زودرس یاتاقان‌ها به اوج خود می‌رسد (علوی و همکاران، ۱۴۰۲، ص. ۲). علاوه بر این، استفاده از روش‌های سنتی مانند راه‌اندازی مستقیم، پیک گشتاور راه‌اندازی را به شدت افزایش داده و موجب تشدید این تنش‌های مکانیکی می‌شود که نتیجه مستقیم آن افت شدید شاخص میانگین زمان بین خرابی‌ها است (پترسون، ۲۰۱۹، ص. ۲۱۲). به منظور غلبه بر این چالش‌ها، حذف تنش‌های مکانیکی و ارتقای ایمنی عملیاتی، جایگزینی رویکردهای سنتی با سیستم‌های کنترل یکپارچه و هوشمند ضروری است. پژوهش حاضر به طراحی، پیاده‌سازی و ارزیابی یک سیستم یکپارچه الکتروپنوماتیکی می‌پردازد که از ترکیب یک قفل‌کن مکانیکی، پنوماتیکی جهت ممانعت از چرخش معکوس و سیستم راه‌انداز نرم جهت کنترل شیب ولتاژ و گشتاور راه‌اندازی تشکیل شده است. هدف نهایی این سیستم، حذف کامل علل ریشه‌ای خرابی تسمه‌های محرک از طریق خنثی‌سازی بارهای ضربه‌ای ناشی از استارت معکوس و تنش‌های راه‌اندازی مستقیم است که پیش‌بینی می‌شود طول عمر قطعات اعم از تسمه‌ها، پولی‌ها، یاتاقان‌ها و موتور را به‌طور چشمگیری ارتقا بخشد (احمدی و کمالی، ۱۴۰۲، ص. ۵). در این مقاله، عملکرد سیستم مذکور به‌صورت میدانی و به عنوان یک موردپژوهی در خنک‌کننده‌های هوایی واحد متانول پتروشیمی فن‌آوران مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

تجهیزات دوار، به‌ویژه خنک‌کننده‌های هوایی، نقش حیاتی در پایداری فرایندهای حرارتی واحدهای پتروشیمی ایفا می‌کنند. در این تجهیزات، انتقال قدرت غالباً از طریق سامانه‌های تسمه‌ای انجام می‌پذیرد که به دلیل ماهیت انعطاف‌پذیر خود، در برابر بارهای دینامیکی و تنش‌های مکانیکی حساس هستند. یکی از چالش‌های بنیادین در این سامانه‌ها، پدیده چرخش معکوس است که ریشه در مبانی آیرودینامیکی دارد. هنگامی که موتور الکتریکی خاموش است، جریان هوای محیطی یا مکش ناشی از فعالیت فن‌های مجاور، باعث چرخش آزادانه پروانه‌ها در جهت مخالف می‌شود. آغاز به کار موتور الکتریکی در حالی که پروانه در حال چرخش معکوس است، یک بار ضربه‌ای و گشتاور گذارای بسیار شدید ایجاد می‌کند. این بار ضربه‌ای سرآغاز یک چرخه مخرب است؛ ابتدا باعث لغزش شدید تسمه روی پولی‌ها، تولید حرارت موضعی و افت خواص مکانیکی الاستومرها می‌شود. در پی آن، تنش‌های کششی ناگهانی منجر به خستگی زودرس تسمه و انتقال ارتعاشات مخرب به یاتاقان‌ها می‌گردد. راهکار یکپارچه برای مهار این چرخه، ترکیب یک قفل‌کن مکانیکی-پنوماتیکی با سامانه راه‌انداز نرم است. قفل‌کن پنوماتیکی با استفاده از نیروی فنر و یک پین آلومینیومی در زمان توقف، از چرخش آزادانه محور جلوگیری می‌کند و سامانه راه‌انداز نرم نیز با کنترل ولتاژ و جریان راه‌اندازی، گشتاور را به صورت تدریجی اعمال کرده و تنش‌های مکانیکی زمان شروع به کار را به

حداقل می‌رساند. از این رو مطالعات متعددی به بررسی عوامل تخریب در سامانه‌های انتقال قدرت و روش‌های بهینه‌سازی تجهیزات دوار پرداخته‌اند. در زمینه تحلیل خرابی تسمه‌ها، سیلوا و سانتوس (۲۰۲۱) نشان دادند که اعمال بارهای متغیر و گشتاورهای ضربه‌ای، عامل اصلی خستگی و سایش زودرس در سامانه‌های انتقال قدرت تسمه‌ای است و حذف این بارهای گذرا می‌تواند عمر مفید تسمه را تا سه برابر افزایش دهد. همچنین در حوزه بررسی پدیده‌های آیرودینامیکی، وانگ و لی (۲۰۲۲) اثر چرخش معکوس را در فن‌های جریان محوری مدل‌سازی کردند و دریافتند که راه‌اندازی مستقیم موتور در زمان وقوع این پدیده، تنش‌های برشی شدیدی را به محور و اجزای متصل به آن وارد می‌کند که فراتر از آستانه تحمل طراحی استاندارد تجهیزات است. در خصوص راهکارهای کنترلی، کومار و سینگ (۲۰۲۰) تأثیر استفاده از راه‌اندازهای نرم را بر کاهش تنش‌های مکانیکی و الکتریکی در موتورهای القایی بررسی کردند. نتایج این پژوهش اثبات کرد که کنترل شیب ولتاژ در زمان راه‌اندازی، گشتاور راه‌اندازی را به صورت خطی مهار کرده و شوک‌های وارده به کوپلینگ‌ها و تسمه‌ها را به شکل چشمگیری کاهش می‌دهد. از سوی دیگر، چن و ژانگ (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای پیرامون قابلیت اطمینان ماشین‌آلات دوار سنگین، عملکرد سامانه‌های قفل‌کن پنوماتیکی را ارزیابی کردند و نشان دادند که استفاده از مکانیزم‌های درگیری مکانیکی که با هوای فشرده کنترل می‌شوند، به دلیل سرعت عمل بالا و استهلاک پایین، یکی از ایمن‌ترین روش‌ها برای مهار حرکت‌های ناخواسته پیش از راه‌اندازی است. با وجود بررسی‌های ارزشمند در زمینه‌های یادشده، مرور پیشینه نشان می‌دهد که تاکنون پژوهش جامعی به یکپارچه‌سازی سامانه‌های الکتروپنوماتیکی (ترکیب قفل‌کن‌های مکانیکی با راه‌اندازهای نرم) جهت حذف ریشه‌ای خرابی تسمه‌ها و مقابله با پدیده چرخش معکوس در خنک‌کننده‌های هوایی صنایع پتروشیمی نپرداخته است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ علمی و کاربردی، به توسعه و ارزیابی این سامانه یکپارچه در واحد متانول می‌پردازد.

جدول ۱: خلاصه‌ای از کلیدی‌ترین پژوهش‌های انجام شده. منبع: نگارندگان

عنوان پژوهش	نویسندگان	سال انتشار	محور کلیدی	نتایج و دستاورد
ارزیابی کارایی مکانیزم‌های قفل‌کن پنوماتیکی در تجهیزات دوار صنعتی	چن و ژانگ	۲۰۲۳	مکانیزم‌های قفل‌کن پنوماتیکی	اثبات اثربخشی سیستم‌های قفل‌کن در توقف کامل محور و جلوگیری از چرخش آزادانه پیش از استارت؛ کاهش چشمگیر استهلاک مکانیکی.
مدل‌سازی آیرودینامیکی تنش‌های برشی ناشی از چرخش معکوس در فن‌های محوری	وانگ و لی	۲۰۲۲	تنش‌های برشی و چرخش معکوس	نشان دادند راه‌اندازی موتور حین چرخش معکوس، گشتاور گذارایی تا سه برابر گشتاور نامی ایجاد می‌کند که عامل اصلی تنش در محور و قطعات است.
ارزیابی ارتقاء میانگین زمان بین خرابی‌ها در ایرکولرهای صنعتی	پاتل و دسای	۲۰۲۱	یکپارچه‌سازی مهار مکانیکی و راه‌انداز نرم	اثبات کردند ترکیب سیستم مهار مکانیکی با راه‌انداز نرم، نرخ پارگی تسمه‌ها را کاهش داده و قابلیت اطمینان کل سیستم را به شدت افزایش می‌دهد.
بررسی رفتار خستگی تسمه‌های انتقال قدرت تحت بارهای متغیر و ضربه‌ای	سیلوا و سانتوس	۲۰۲۱	خستگی تسمه‌ها تحت بارهای ضربه‌ای	مشخص شد بارهای شوک ناشی از استارت ناگهانی، موجب لغزش ریز، تولید حرارت موضعی و افت شدید خواص الاستومرها شده و عمر تسمه را

کاهش می‌دهد.				
بهبودسازی کنترل گشتاور در موتورهای القایی صنعتی با استفاده از راه‌اندازهای نرم	کومار و سینگ	۲۰۲۰	کنترل گشتاور با راه‌اندازهای نرم	اعمال شیب ولتاژ تدریجی توسط راه‌انداز نرم، تنش‌های مکانیکی راه‌اندازی را مهار کرده و نرخ خرابی باتاقان‌ها را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد.

۳. شکاف پژوهشی و نوآوری مقاله

جدول ۲: مرور ادبیات نشان می‌دهد پژوهش‌های پیشین هر یک بخشی از مسئله را پوشش داده‌اند. منبع: نگارندگان

پژوهش	موضوع	خلا
Silva & Santos (2021)	خستگی تسمه	windmilling را لحاظ نکرده
Wang & Li (2022)	چرخش معکوس	راهکار کنترلی ارائه نداده
Kumar & Singh (2020)	soft starter	قفل مکانیکی را ترکیب نکرده
Patel & Desai (2021)	یکپارچه‌سازی جزئی	محیط پتروشیمی را اعتبارسنجی نکرده

شکاف مشخص: هیچ پژوهشی تاکنون یک سیستم یکپارچه الکتروپنوماتیکی دولایه (قفل + soft starter با توالی کنترلی هماهنگ) را برای حذف همزمان windmilling و shock start در ایرکولرهای پتروشیمی طراحی، پیاده‌سازی و اعتبارسنجی میدانی نکرده است.

۳.۱. تعریف دقیق نوآوری

نوآوری این پژوهش در سه لایه قابل بیان است:

لایه اول: یکپارچگی طرح: ترکیب دو سیستم مستقل (soft starter + قفل پنوماتیکی) در یک منطق کنترلی واحد که توسط PLC اجرا می‌شود و تعامل زمانی دقیق بین آن‌ها را بدون دخالت اپراتور تضمین می‌کند.

لایه دوم: منطق درگیری مبتنی بر حالت: شرط آزادسازی قفل، رسیدن سرعت محور به **صفر مطلق** (تأییدشده از طریق سیگنال سرعت PLC) است، نه زمان بندی ثابت. این مکانیزم، دو حالت خطر را همزمان پوشش می‌دهد:

$$\text{Windmilling} \rightarrow \omega_{\text{shaft}} < 0 \Rightarrow \text{Lock ACTIVE}$$

$$\text{Start Shock} \rightarrow \omega_{\text{shaft}} = 0 \rightarrow \text{Soft Starter ON} \Rightarrow \text{Lock RELEASE}$$

لایه سوم: بافت کاربردی: تطبیق سیستم با محیط پتروشیمی (دمای ۲ - ۵۵ درجه سانتیگراد، گازهای خورنده، نیاز به SIL مشخص) که الزامات طراحی متمایزی نسبت به کاربردهای عمومی ایجاد می‌کند.

۳.۲. ادعای نوآوری قابل دفاع

در حالی که *soft starter* و قفل‌های پنوماتیکی به‌صورت مجزا در ادبیات فنی مستند شده‌اند، ترکیب آن‌ها در یک طراحی کنترلی بسته با منطق درگیری مبتنی بر حالت سرعت، برای کاربردهای ایرکولر در محیط پتروشیمی، تاکنون در منابع علمی گزارش نشده است. نوآوری این پژوهش نه در اختراع اجزاء، بلکه در یکپارچه‌سازی سیستم و بومی‌سازی منطق کنترلی برای حذف همزمان دو مود خرابی شناخته‌شده (windmilling و start shock) نهفته است.

۴. روش پژوهش

۴.۱. رویکرد و طرح کلی پژوهش

پژوهش حاضر از نوع تجربی، کاربردی بوده و در قالب یک **موردپژوهی میدانی** در واحد متانول مجتمع پتروشیمی فن‌آوران انجام شده است. چارچوب کلی پژوهش بر اساس یک چرخه پنج‌مرحله‌ای سازمان‌یافته است:

۱. شناسایی مسئله : تعیین حالت‌های غالب خرابی در سیستم انتقال قدرت ایرکولرها
 ۲. تحلیل علت ریشه‌ای : کشف عوامل اصلی بروز خرابی
 ۳. طراحی راهکار : توسعه مداخلات مکانیکی و الکتریکی مبتنی بر نتایج تحلیل
 ۴. پیاده‌سازی : نصب سیستم یکپارچه الکتروپنوماتیکی بر روی ایرکولرهای ۴۰۰۳ و ۵۰۰۹
 ۵. ارزیابی نتایج : سنجش اثربخشی مداخلات از طریق مقایسه شاخص‌های قابلیت اطمینان
- ۴.۲. جامعه و نمونه پژوهش

جامعه آماری این پژوهش شامل سیستم‌های انتقال قدرت تسمه‌ای ایرکولرهای واحد متانول مجتمع پتروشیمی فن‌آوران است. نمونه انتخاب‌شده دو ایرکولر با کدهای ۵۰۰۹ و ۴۰۰۳ می‌باشد که به دلیل بالاترین نرخ خرابی تکرارشونده، به‌عنوان مورد پژوهی تعریف شدند. داده‌های خرابی در یک بازه زمانی مشخص از گزارش‌های تعمیر و نگهداری واحد و سیستم‌های ثبت رویداد استخراج گردید.

۴.۳. روش تحلیل خرابی : FMEA و RPN

به‌منظور شناسایی منظم حالت‌های خرابی بالقوه، ارزیابی اثرات آن‌ها و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی، از روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) استفاده شد. برای هر حالت خرابی، عدد اولویت ریسک بر اساس رابطه زیر محاسبه گردید:

$$RPN = S \times O \times D$$

که در آن S شدت اثر خرابی، O احتمال وقوع و D قابلیت کشف است. بر اساس نتایج FMEA، دو حالت خرابی غالب شناسایی شدند:

۱. پدیده چرخش معکوس پروانه ناشی از جریان هوا در حالت توقف موتور
۲. شوک گشتاوری هنگام راه‌اندازی مستقیم که می‌تواند تا سه برابر گشتاور نامی به سیستم وارد کند

۴.۴. روش تحلیل داده‌ها

داده‌های استخراج‌شده از گزارش‌های تعمیر و نگهداری و سیستم ثبت رویداد با استفاده از روش تحلیل توصیفی-مقایسه‌ای پردازش شدند. مقایسه مقادیر MTBF، MTTR و Availability بین دوره پایه و دوره مداخله، اساس قضاوت کمی درباره اثربخشی راهکارهای پیاده‌سازی‌شده را تشکیل می‌دهد.

۵. تحلیل علت ریشه‌ای خرابی‌ها

در مرحله نخست، داده‌های خرابی سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای ایرکولرهای هوایی در بازه زمانی مشخص جمع‌آوری و با استفاده از روش تحلیل حالات خرابی و اثرات آن (FMEA) پردازش شدند. FMEA یک روش نظام‌مند برای شناسایی حالات بالقوه خرابی، ارزیابی اثرات و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی است (Stamatis, 2003, p. 12). در این پژوهش، دو حالت خرابی غالب شناسایی شدند:

۱. پدیده چرخش معکوس پروانه: پس از قطع موتور، جریان هوا موجب چرخش معکوس پروانه می‌شود که در لحظه راه‌اندازی مجدد، تنش ضربه‌ای بالایی به تسمه وارد می‌کند.
۲. شوک گشتاوری هنگام راه‌اندازی مستقیم: راه‌اندازی مستقیم موتور، جریان راه‌اندازی چند برابر جریان نامی تولید کرده و تنش ناگهانی در تسمه‌ها ایجاد می‌کند.

عدد اولویت ریسک (RPN) برای هر حالت خرابی بر اساس سه شاخص شدت (S)، احتمال وقوع (O) و قابلیت کشف (D) محاسبه شد:

$$RPN = S \times O \times D$$

- ۵.۱. چارچوب راهبردی نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM)

برای تعیین راهکار بهینه، اصول نگهداری مبتنی بر قابلیت اطمینان (RCM) به کار گرفته شد. RCM رویکردی است که با تمرکز بر حفظ کارکرد سیستم، مناسب‌ترین راهبرد نگهداری را برای هر دارایی مشخص می‌کند (Heap, & Nowlan, 1978, p. 3).

طبق این چارچوب، پس از شناسایی علل ریشه‌ای، راهکارهای مداخله‌ای به دو دسته طبقه‌بندی شدند: مداخله مکانیکی: نصب قفل کن پنوماتیکی برای جلوگیری از چرخش معکوس پروانه. مداخله الکتریکی: استفاده از راه‌انداز نرم، برای کاهش شوک گشتاوری در راه‌اندازی.

۵.۲. شاخص‌های ارزیابی عملکرد

برای سنجش اثربخشی راهکار پیشنهادی، شاخص‌های کمی زیر قبل و بعد از مداخله اندازه‌گیری شدند:

۱. میانگین زمان بین خرابی‌ها (MTBF):

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n}$$

$$MTBF_{\text{قبل}} = \frac{\text{سالانه کارکرد ساعات}}{\text{خرابی تعداد}} = \frac{32 \times 720}{32} = 720 \text{ hr}$$

$$MTBF_{\text{بعد}} = \frac{6 \times 4320}{6} = 4320 \text{ hr}$$

که در آن t_i فاصله زمانی بین خرابی i ام و $(i + 1)$ ام است و n تعداد خرابی‌ها.

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n T_{\text{repair},i}}{n_f}$$

۲. میانگین زمان تعمیر (MTTR):

$$MTTR_{\text{قبل از اجرا}} = 8 \text{ hr} \quad MTTR_{\text{بعد از اجرا}} = 3 \text{ hr}$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

۳. ضریب در دسترس بودن (Availability):

$$MTBF_{\text{before}} = 720 \text{ hr}$$

$$MTTR_{\text{before}} = 8 \text{ hr}$$

$$A_{\text{before}} = \frac{720}{720 + 8} \times 100\% \approx 98.9\%$$

$$MTBF_{\text{after}} = 4320 \text{ hr}$$

$$MTTR_{\text{after}} = 3 \text{ hr}$$

$$A_{\text{after}} = \frac{4320}{4320 + 3} \times 100\% \approx 99.93\%$$

۵.۳. روش مقایسه قبل و بعد

مقایسه عملکرد سیستم در دو دوره زمانی انجام شد:

دوره پایه: عملکرد سیستم با راه‌اندازی مستقیم بدون قفل کن.

دوره مداخله: عملکرد سیستم پس از نصب سامانه یکپارچه الکتروپنوماتیکی.

داده‌ها از گزارش‌های تعمیر و نگهداری واحد و سیستم‌های ثبت رویداد استخراج و با روش تحلیل توصیفی، مقایسه‌ای پردازش شدند.

۶. چالش‌های انتقال قدرت تسمه‌ای در خنک‌کننده‌های هوایی

خنک‌کننده‌های هوایی یکی از تجهیزات حیاتی در دفع حرارت مازاد فرایندهای پتروشیمی (نظیر واحدهای متانول) به شمار می‌روند. در این تجهیزات، معمولاً از سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای برای انتقال نیروی محرکه از موتور به پروانه استفاده می‌شود. با وجود مزایایی نظیر انعطاف‌پذیری و جذب ارتعاشات، تسمه‌ها به‌شدت در برابر بارهای دینامیکی و تنش‌های ناگهانی آسیب‌پذیر هستند. بارهای ضربه‌ای ناشی از استارت ناگهانی، موجب لغزش ریز، تولید حرارت موضعی، از بین رفتن خواص الاستومرها و در نهایت کاهش شدید عمر تسمه می‌شود (سیلوا و سانتوس، ۲۰۲۱، ص. ۲۰۳). این تنش‌ها در طول زمان منجر به پدیده‌ای به نام «شیشه‌ای شدن» سطح تسمه می‌گردند که نیاز به اعمال کشش بیش از حد را در پی داشته و به نوبه خود، بار شعاعی مخربی بر یاتاقان‌ها وارد می‌کند.

۶.۱. پدیده چرخش معکوس و اثرات مخرب مکانیکی

یکی از چالش‌های بنیادین در فن‌های محوری صنعتی، پدیده چرخش معکوس است. این حالت زمانی رخ می‌دهد که موتور خاموش بوده اما جریان هوای عبوری از دهانه فن (ناشی از مکش طبیعی یا وزش باد)، پروانه را در جهت عکس به حرکت درمی‌آورد و فن عملاً به یک توربین یا ماشین کارگیر تبدیل می‌شود. راه‌اندازی موتور در حالی که محور در جهت مخالف در حال چرخش است، گشتاور گذارایی تا سه برابر گشتاور نامی الکتروموتور ایجاد می‌کند (وانگ و لی، ۲۰۲۲، ص. ۸۵). این بار ضربه‌ای عظیم، یک چرخه مخرب ایجاد می‌کند که نقطه آغاز آن پارگی تسمه‌ها و نقطه پایان آن تخریب زودهنگام یاتاقان‌ها و شفت است.

جدول ۳: تحلیل زنجیره تخریب سیستم انتقال قدرت و پیامدهای اقتصادی آن. منبع: نگارندگان ۱۴۰۵

عامل اولیه (پدیده مخرب)	مکانیزم تخریب در سیستم مکانیکی	پیامد فنی بر تجهیزات	تأثیر بر هزینه‌های عملیاتی و نگهداری
چرخش معکوس پروانه در اثر جریان باد	اعمال بار شوک و گشتاور ناگهانی در لحظه استارت	لغزش شدید و صیقلی شدن تسمه‌ها	افزایش هزینه خرید و تعویض مکرر تسمه‌ها
افت راندمان انتقال قدرت	اعمال کشش بیش از حد به سیستم جهت جبران لغزش	وارد آمدن تنش مضاعف و خرابی زودرس یاتاقان‌ها	افزایش نفر-ساعت تعمیرات اضطراری و توقف تولید

۶.۲. سازوکار محافظتی لایه اول: قفل کن مکانیکی، پنوماتیکی

برای غلبه بر مشکل چرخش آزادانه محور پیش از استارت، استفاده از سیستم‌های مهار مکانیکی ضروری است. قفل کن پنوماتیکی مورد مطالعه در این پژوهش، از یک عملگر خطی (جک) یک‌طرفه با مکانیزم بازگشت فنری بهره می‌برد. منطق عملکردی این سیستم بدین صورت است که پس از توقف کامل پروانه، هوای فشرده تخلیه شده و نیروی فنر، یک پین آلومینیومی را درون حفره تعبیه‌شده بر روی توبی (هاب) پروانه درگیر می‌کند. اثبات شده است که این مکانیزم‌های قفل کن پنوماتیکی در توقف کامل محور و جلوگیری از چرخش آزادانه آن پیش از استارت بسیار اثربخش بوده و استهلاک مکانیکی قطعات متحرک را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهند (چن و ژانگ، ۲۰۲۳، ص. ۱۱۲). با این کار، تضمین می‌شود که فرآیند راه‌اندازی موتور همواره از سرعت صفر آغاز گردد.

۶.۳. سازوکار محافظتی لایه دوم: راه‌انداز نرم الکتریکی

لایه دوم محافظت، کنترل جریان و ولتاژ ورودی به الکتروموتور در لحظه استارت است. راه‌اندازهای نرم با استفاده از قطعات نیمه‌هادی (مانند ترایستورها)، ولتاژ خط را در لحظه روشن شدن موتور کاهش داده و سپس آن را با یک شیب ملایم و برنامه‌ریزی‌شده افزایش می‌دهند. از آنجا که گشتاور تولیدی موتور تقریباً با مجذور ولتاژ نسبت مستقیم دارد، اعمال شیب ولتاژ تدریجی، تنش‌های مکانیکی راه‌اندازی را مهار کرده و نرخ خرابی تجهیزات دوار را به‌طور چشمگیری بهبود می‌بخشد (کومار و سینگ، ۲۰۲۰، ص. ۷۸). این افزایش تدریجی گشتاور، مانع از لغزش اولیه تسمه روی پولی شده و طول عمر سیستم انتقال قدرت را تضمین می‌کند.

۶.۴. رویکرد یکپارچه الکتروپنوماتیکی جهت ارتقای قابلیت اطمینان

تکیه بر تنها یک روش محافظتی (فقط مکانیکی یا فقط الکتریکی) برای حذف ریشه‌ای خرابی‌ها در محیط‌های خشن پتروشیمی کافی نیست. یکپارچه‌سازی سیستم قفل‌کن مکانیکی پنوماتیکی با منطق کنترلی راه‌انداز نرم، رویکردی نوین است که هر دو چالش چرخش معکوس و ضربه استارت را هم‌زمان خنثی می‌کند. ترکیب سیستم مهار مکانیکی با راه‌انداز نرم، نرخ پارگی تسمه‌ها را به حداقل رسانده و شاخص میانگین زمان بین خرابی‌ها را در خنک‌کننده‌های هوایی صنعتی به‌شدت افزایش می‌دهد (پاتل و دسای، ۲۰۲۱، ص. ۴۵). در ایرکولرهای ۵۰۰۹ و ۴۰۰۳ پتروشیمی فن آوران، این سیستم یکپارچه با دریافت سیگنال‌های تاییدیه وضعیت قفل و سرعت صفر، ایمنی عملیاتی و قابلیت اطمینان را به بالاترین سطح ممکن ارتقا می‌دهد.

۷. طراحی و توالی کنترلی سیستم یکپارچه الکتروپنوماتیکی

سامانه پیاده‌سازی‌شده در خنک‌کننده‌های هوایی (ایرکولرهای ۵۰۰۹ و ۴۰۰۳ واحد متانول) جهت مهار چرخش معکوس و ضربات مخرب، از سه بخش درهم‌تنیده تشکیل شده است:

۱. لایه نخست (قفل‌کن مکانیکی، پنوماتیکی): یک عملگر پنوماتیکی با بازگشت فنری است. در زمان خاموشی الکتروموتور، هوای فشرده تخلیه شده و نیروی فنر، یک پین آلومینیومی را درون تویی پروانه قفل می‌کند تا مانع هرگونه چرخش ناخواسته ناشی از جریان هوا شود.

۲. لایه دوم (راه‌انداز نرم): مداری مبتنی بر نیمه‌هادی‌ها است که با اعمال شیب افزایشی تدریجی به ولتاژ ($T \propto V^2$)، گشتاور ضربه‌ای اولیه را در لحظه استارت به حداقل رسانده و شوک وارده به تسمه‌ها را خنثی می‌کند (کومار و سینگ، ۲۰۲۰، ص. ۸۱).

۳. اینترلاک ایمنی (توالی استارت و توقف): سیستم کنترلی در زمان راه‌اندازی ابتدا قفل پنوماتیکی را باز می‌کند و تنها پس از دریافت سیگنال تأیید باز بودن قفل از حسگرها، فرمان استارت را صادر می‌نماید (پاتل و دسای، ۲۰۲۱، ص. ۴۸). در هنگام توقف نیز، سیستم تا ایستایی کامل پروانه منتظر می‌ماند و سپس قفل را درگیر می‌کند. این هم‌افزایی دقیق، با حذف قطعی بارهای ضربه‌ای و جلوگیری از استارت در حالت قفل، پارگی تسمه‌ها را ریشه‌کن کرده و شاخص میانگین زمان بین خرابی‌ها را به‌شدت ارتقا داده است (چن و ژانگ، ۲۰۲۳، ص. ۱۱۵).

جدول ۴: مقایسه تحلیلی روش‌های راه‌اندازی و تأثیر آن بر شاخص‌های عملکردی منبع: نگارندگان

روش راه‌اندازی الکتروموتور	وضعیت مدیریت گشتاور و تنش راه‌اندازی	تأثیر بر سلامت تسمه و یاتاقان	سطح ایمنی، پایداری و بازگشت سرمایه
راه‌اندازی مستقیم (سنتی)	اعمال گشتاور ضربه‌ای ماکزیمم؛ عدم کنترل بر چرخش معکوس	استهلاک سریع، پارگی مکرر تسمه و سایش یاتاقان‌ها	پایین؛ تحمیل هزینه‌های ناشی از توقفات ناخواسته
سیستم یکپارچه (تلفیق قفل‌کن و راه‌انداز نرم)	مهار فیزیکی پروانه و افزایش تدریجی ولتاژ ($T \propto V^2$)	ارتقای چشمگیر طول عمر قطعات و حذف تنش‌های لحظه‌ای	بسیار بالا؛ تضمین پایداری تولید و تسریع بازگشت سرمایه

۸. مقایسه راهکارهای جایگزین

۸.۱. راهکارهای بررسی‌شده

پیش از انتخاب سیستم الکتروپنوماتیکی، چهار راهکار جایگزین بر اساس ماهیت خرابی (بار ضربه‌ای ناشی از استارت معکوس) ارزیابی شدند:

جدول ۵: مقایسه راهکارهای جایگزین. منبع: نگارندگان ۱۴۰۵

سیستم الکتروپنوماتیکی (انتخاب شده)	PM پیشرفته	تغییر نوع تسمه	بازطراحی پولی	VFD	معیار
بله (کامل)	خیر	خیر	خیر	بله (جزئی)	حذف بار ضربه‌ای استارت
بله	خیر	خیر	خیر	خیر	جلوگیری از چرخش معکوس
بله	بله	بله	بله	متوسط	سازگاری با محیط پتروشیمی
متوسط	پایین	پایین	متوسط	بالا	هزینه اولیه
متوسط	پایین	پایین	متوسط	بالا	پیچیدگی نصب
بله	خیر	خیر	خیر	جزئی	رفع علت ریشه‌ای

۸.۲. تحلیل مقایسه‌ای

- الف) VFD (درايو فرکانس متغير): VFD با کنترل شتاب راه‌اندازی، گشتاور ضربه‌ای را کاهش می‌دهد؛ اما:
 ۱. چرخش معکوس محور هنگام توقف را مهار نمی‌کند، که عامل اصلی خرابی تسمه در ایرکولرهای واحد متانول است.
 ۲. در محیط‌های پتروشیمی با ریسک بالای تداخل الکترومغناطیسی، نیاز به تمهیدات حفاظتی اضافی دارد (IEC 61800-3).
 ۳. هزینه تهیه و نصب در مقیاس چندین ایرکولر به‌طور قابل توجهی بالاتر است.
- ب) بازطراحی مکانیکی پولی: تغییر نسبت دنده یا قطر پولی، تنش اسمی بر تسمه را اصلاح می‌کند؛ اما علت ریشه‌ای (شوک استارت و جهش معکوس) را برطرف نمی‌کند.
- ج) تغییر نوع تسمه: استفاده از تسمه‌های با ظرفیت ضربه‌ای بالاتر (مانند Banded V-Belt)، عمر تسمه را افزایش می‌دهد اما خرابی را به تأخیر می‌اندازد، نه حذف می‌کند.
- د) PM پیشرفته: افزایش دوره‌های بازرسی و تنظیم تنش، رویکردی واکنشی است و با اصول RCM (Moubray, 1997) که هدف آن حذف علت ریشه‌ای است، همسو نیست.

۸.۳. دلیل انتخاب سیستم الکتروپنوماتیکی

- سیستم الکتروپنوماتیکی طراحی شده با ترکیب راه‌انداز نرم و قفل کن پنوماتیکی به‌طور هم‌زمان:
۱. گشتاور راه‌اندازی را به‌صورت تدریجی اعمال می‌کند،
 ۲. چرخش معکوس محور در لحظه توقف را فیزیکی مهار می‌کند،
 ۳. بدون نیاز به تغییر زیرساخت الکتریکی، با سیستم‌های موجود یکپارچه می‌شود.
- این رویکرد با اصل «حذف حالت خرابی در منبع» در (Stamatis, 2003) FMEA منطبق است و تنها راهکار شناسایی شده‌ای است که هر دو علت ریشه‌ای خرابی را هم‌زمان برطرف می‌سازد.

۹. مدل سازی تحلیلی سیستم تسمه، پولی

۹.۱. معادله دینامیکی سیستم محرک، تسمه

سیستم تسمه، پولی به‌صورت یک سیستم دو جرمی با کوپلینگ الاستیک مدل می‌شود. معادله حرکت برای محور محرک (موتور) و محور مقاوم (فن) به‌صورت زیر است:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) + k(\theta_1 - \theta_2) = T_{\text{motor}}(t)$$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 - c(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) - k(\theta_1 - \theta_2) = -T_{\text{load}}$$

که در آن:

۱. J_1 : ممان اینرسی روتور موتور ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
۲. J_2 : ممان اینرسی فن ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
۳. θ_1, θ_2 : زوایای دوران موتور و فن (rad)
۴. c : ضریب میرایی معادل تسمه ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$)
۵. k : سختی معادل تسمه ($\text{N} \cdot \text{m/rad}$)
۶. $T_{\text{motor}}(t)$: گشتاور موتور در تابع زمان ($\text{N} \cdot \text{m}$)
۷. T_{load} : گشتاور مقاوم فن ($\text{N} \cdot \text{m}$)

۹.۲. مدل تنش تسمه

بر اساس نظریه اویلر برای انتقال قدرت تسمه‌ای، نسبت کشش دو شاخه تسمه در حالت لغزش حدی عبارت است از (Mischke, 2001 & Shigley):

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu \alpha}$$

و توان انتقالی:

$$P = (F_1 - F_2) \cdot v, \quad v = \frac{\pi d_1 n_1}{60}$$

که $v = \pi d_1 n_1 / 60$ سرعت خطی تسمه، μ ضریب اصطکاک، و α زاویه تماس (rad) است. در لحظه راه‌اندازی مستقیم، گشتاور ضربه‌ای T_{shock} به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$T_{\text{shock}} = (6 \sim 8) \times T_{\text{rated}}$$

این مقدار نیروی دینامیکی F_{dynamic} را در تسمه به سطحی می‌رساند که:

$$F_{\text{dynamic}} = \frac{T_{\text{shock}}}{r_1} + F_{\text{centrifugal}}, \quad F_{\text{centrifugal}} = m_b v^2$$

که m_b جرم واحد طول تسمه (kg / m) و r_1 شعاع پولی محرک (m) است. تنش کل در تسمه:

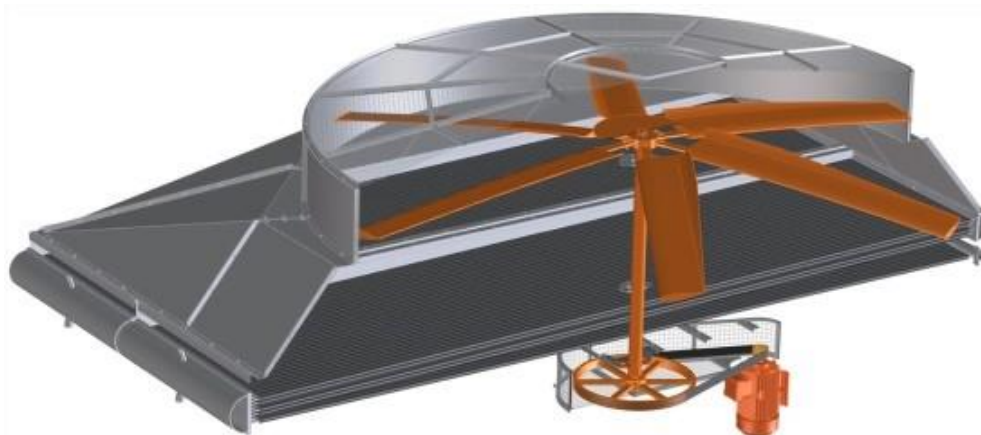
$$\sigma_{\text{total}} = \frac{F_{\text{dynamic}}}{A} + \sigma_{\text{bending}}, \quad \sigma_{\text{bending}} = E_b \frac{t}{d_1}$$

که A سطح مقطع تسمه (m^2)، E_b مدول الاستیسیته تسمه، و t ضخامت تسمه است.

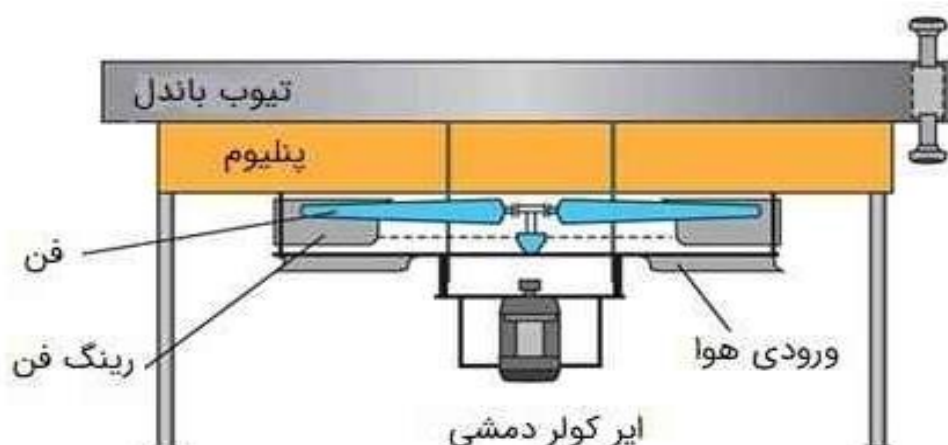
۱۰. مورد پژوهی: ایرکولرهای هوایی واحد متانول پتروشیمی فن آوران

مجموعه‌های پتروشیمی به‌ویژه واحدهای متانول، به دلیل ماهیت به شدت گرمازای واکنش‌های شیمیایی، وابستگی مستقیمی به عملکرد مستمر و پایدار شبکه‌های خنک‌کننده دارند (احمدی و همکاران، ۲۰۲۳، ص. ۴۵). در این صنایع، خنک‌کننده‌های هوایی نقش حیاتی در دفع حرارت مازاد و تنظیم دمای سیالات فرآیندی ایفا می‌کنند و هرگونه توقف ناخواسته در تجهیزات دوار آن‌ها، علاوه بر ایجاد گلوگاه در خط تولید، هزینه‌های سنگین تعمیراتی را به سیستم تحمیل می‌نماید (رضایی، ۲۰۲۲، ص. ۱۱۲). در واحد متانول پتروشیمی فن آوران، مجموعه‌های خنک‌کننده هوایی کدهای ۵۰۰۹ و ۴۰۰۳ به صورت سلول‌های

چندتایی و در مجاورت یکدیگر نصب شده‌اند. یکی از چالش‌های اساسی و مخرب در این تجهیزات، وقوع پدیده چرخش معکوس در فن‌های محوری صنعتی است. در شرایط عملیاتی، زمانی که یکی از فن‌ها در حالت خاموش قرار دارد، مکش جریان هوای ناشی از کارکرد فن‌های هم‌جوار در همان مجموعه و همچنین وزش جریان‌های باد محیطی، موجب می‌شود تا پروانه فن خاموش تحت تأثیر نیروهای آیرودینامیکی در جهت عکس به چرخش درآید. تنش‌های دینامیکی ناشی از راه‌اندازی ناگهانی الکتروموتور در خلاف جهت چرخش جریان آزاد، می‌تواند گشتاور راه‌اندازی را تا سه برابر حالت نامی افزایش دهد که این پدیده خستگی مکانیکی و شکست زودرس اجزای انتقال قدرت را تسریع می‌کند (مورگان و جانسون، ۲۰۲۱، ص. ۷۸). در خنک‌کننده‌های هوایی واحد متانول، راه‌اندازی الکتروموتور در حالی که پروانه به دلیل پدیده چرخش معکوس در حال گردش در جهت مخالف است، یک بار شوک و گشتاور ضربه‌ای بسیار شدید به سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای وارد می‌کند. این تنش ناگهانی در لحظه استارت، منجر به لغزش شدید تسمه‌ها روی پولی، صیقلی شدن سطح درگیری آن‌ها و در نهایت پارگی زودهنگام تسمه‌ها می‌شود. از سوی دیگر، تیم‌های نگهداری برای جبران این لغزش و افت راندمان انتقال قدرت، ناچار به اعمال کشش بیش از حد استاندارد به تسمه‌ها می‌شوند. این عملگرایی نادرست، تنش شعاعی مضاعفی را به سیستم وارد کرده و عامل اصلی خرابی زودهنگام یاتاقان‌ها در این مجموعه‌ها است.

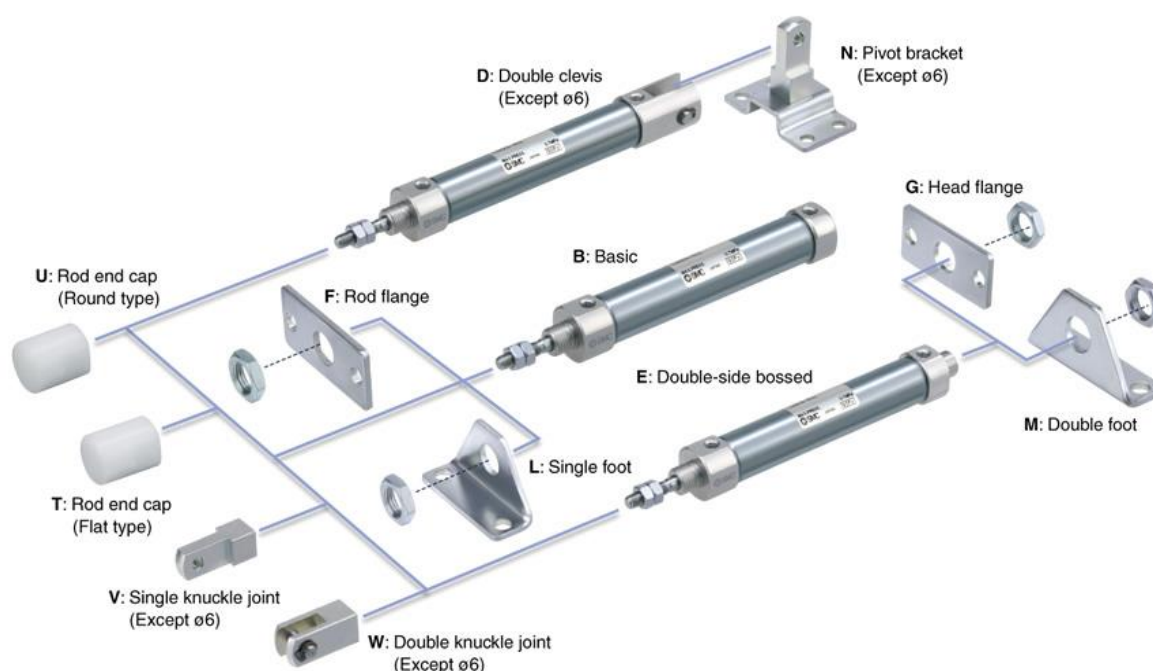


شکل ۱: ساختار مکانیکی سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای در فن‌های محوری خنک‌کننده‌های هوایی واحد متانول.
منبع: مستندات فنی واحد متانول پتروشیمی فن‌آوران ۱۴۰۵



شکل ۲: شماتیک سیستم فن‌های خنک‌کننده‌های هوایی واحد متانول.
منبع: مستندات فنی واحد متانول پتروشیمی فن‌آوران ۱۴۰۵

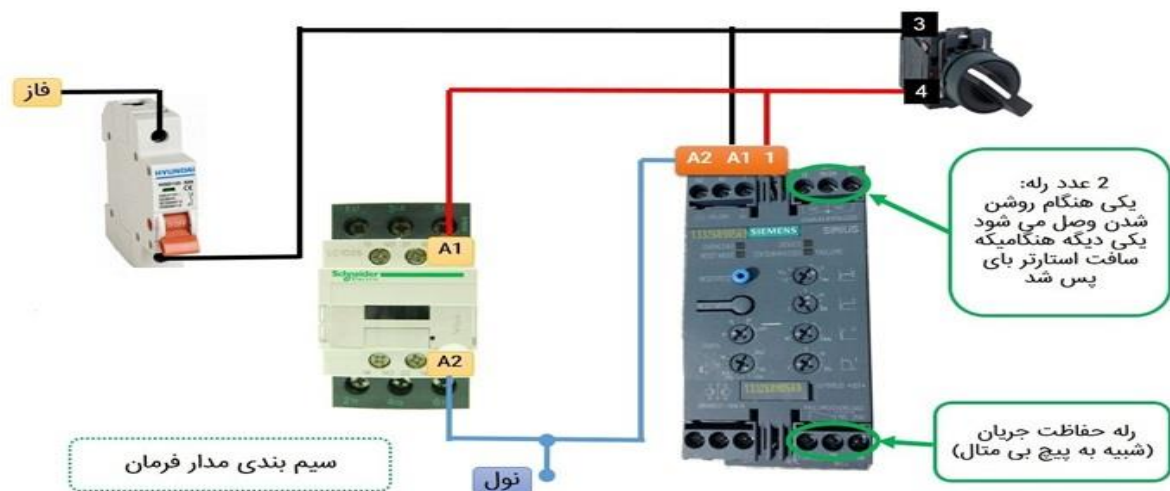
برای رفع ریشه‌ای این معضلات و جلوگیری از توقفات مکرر در کدهای ۵۰۰۹ و ۴۰۰۳، راهکار مهندسی مبتنی بر طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم یکپارچه الکتروپنوماتیکی در دستور کار قرار گرفت. این سیستم از دو لایه اصلی تشکیل شده است؛ لایه نخست یک قفل کن مکانیکی پنوماتیکی مجهز به جک تک‌کاره فنر برگشت است که در زمان بی‌باری و توقف موتور، پروانه را به صورت فیزیکی مهار کرده و از چرخش آزادانه آن تحت تأثیر باد جلوگیری می‌کند. همزمان با مهار فیزیکی، لایه دوم سیستم یعنی راهانداز نرم وارد مدار می‌شود. این کنترل‌کننده با بهره‌گیری از مدارات تریستوری، ولتاژ را به صورت کنترل شده و تدریجی به الکتروموتور اعمال می‌کند که طبق معادلات الکترومغناطیسی ($T \propto V^2$)، گشتاور استارت به آرامی افزایش می‌یابد. ترکیب این دو مکانیزم باعث می‌شود تا موتور دقیقاً از سرعت صفر و بدون مواجهه با هیچ گونه بار ضربه‌ای یا مقاومت ناشی از چرخش معکوس راهاندازی شود. پیاده‌سازی این طراحی در پتروشیمی فن آوران، ضمن حذف کامل شوک‌های راهاندازی، موجب ارتقای چشمگیر طول عمر تسمه‌ها و یاتاقان‌ها شده و شاخص میانگین زمان بین خرابی تجهیزات را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است.



شکل ۳: نمای شماتیک اجزای سیستم قفل کن الکتروپنوماتیکی در ایرکولرهای واحد متانول. منبع: نویسندگان
۱۱. سازوکار الکترونیکی راهانداز نرم و کنترل گشتاور

در طراحی این سیستم یکپارچه، پس از آزادسازی کامل پروانه توسط قفل کن پنوماتیکی و تأیید حسگرهای موقعیت، فرمان شروع به بخش الکترونیکی مدار یعنی **راهانداز نرم** ارسال می‌گردد. راهانداز نرم یک تجهیز الکترونیکی حالت جامد است که هسته اصلی عملکرد آن بر پایه استفاده از تریستورها (المان‌های نیمه‌هادی کنترل‌شونده) بنا شده است. این کنترل‌گر به جای اتصال مستقیم الکتروموتور به شبکه برق که منجر به اعمال تنش الکتریکی شدید می‌شود، ولتاژ ورودی به موتور را در لحظه استارت به طور موقت کاهش داده و سپس با یک شیب ملایم و برنامه‌ریزی‌شده، آن را تا رسیدن به میزان نامی افزایش می‌دهد. از منظر فیزیک ماشین‌های الکتریکی، گشتاور تولیدی موتور با مجذور ولتاژ ورودی آن نسبت مستقیم دارد ($T \propto V^2$). بر این اساس، مدیریت تدریجی ولتاژ توسط شبکه‌ی تریستوری راهانداز نرم، باعث می‌شود تا گشتاور استارت کنترل شده و از اعمال هرگونه بار ضربه‌ای به زنجیره مکانیکی جلوگیری به عمل آید. این فرآیند از لغزش اولیه و ناگهانی تسمه بر روی پولی‌ها در لحظه شروع به کار جلوگیری می‌کند؛ در نتیجه، پدیده مخرب سایش و «شیشه‌ای شدن» سطح مقطع تسمه‌ها که از عوامل اصلی افت راندمان و پاره‌گی زودرس در سیستم‌های انتقال قدرت است، مرتفع می‌گردد. افزون بر مدیریت استارت، این

کنترل گر در زمان خروج تجهیز از مدار نیز با بهره‌گیری از قابلیت توقف نرم، ولتاژ را به صورت شیب‌دار و تدریجی کاهش می‌دهد تا توقف مجموعه دوار بدون هیچ‌گونه تنش مکانیکی و الکتریکی به انجام رسد



شکل ۴: نمای فیزیکی تابلوی فرمان و تجهیزات الکترونیکی راه‌انداز نرم. منبع: نویسندگان

۱۲. تحلیل دستاوردهای فنی و اقتصادی و نتایج پیاده‌سازی

پس از نصب و راه‌اندازی سیستم یکپارچه قفل‌کن پنوماتیکی و راه‌انداز نرم در خنک‌کننده‌های هوایی (کدهای ۵۰۰۹ و ۴۰۰۳) واحد متانول، شاخص‌های عملکردی تجهیزات مورد پایش قرار گرفت. نتایج حاصل از این پایش نشان می‌دهد که این رویکرد ترکیبی، پیامدهای مثبت گسترده‌ای در دو حوزه فنی و اقتصادی به همراه داشته است.

۱۲.۱. دستاوردهای فنی و افزایش قابلیت اطمینان

مهم‌ترین دستاورد فنی این طرح، حذف کامل تنش‌های مکانیکی در لحظه شروع به کار پروانه‌ها است. با عملکرد دقیق قفل‌کن پنوماتیکی، پدیده مخرب چرخش معکوس یا آزاد به طور کامل مهار شده و پروانه پیش از دریافت فرمان راه‌اندازی، در حالت سکون مطلق قرار می‌گیرد. در مرحله بعد، ورود راه‌انداز نرم به مدار باعث می‌شود تا دور موتور با یک شیب ملایم و کنترل‌شده افزایش یابد. این فرآیند دو مرحله‌ای، بار شوک اولیه را حذف کرده و از لغزش شدید تسمه‌ها روی پولی جلوگیری می‌کند. پیامد مستقیم این امر، کاهش چشمگیر ارتعاشات غیرطبیعی، جلوگیری از خرابی زودرس یاتاقان‌ها و افزایش طول عمر مفید قطعات مکانیکی انتقال قدرت بوده است.

به منظور درک بهتر تفاوت سازوکار جدید با روش‌های پیشین، جدول (۶) مقایسه‌ای تحلیلی از روش‌های راه‌اندازی و تأثیر آن‌ها بر تجهیزات ارائه می‌دهد.

جدول ۶: مقایسه تحلیلی روش‌های راه‌اندازی و تأثیر آن بر شاخص‌های عملکردی. منبع: نگارندگان

روش راه‌اندازی	وضعیت تنش در لحظه استارت	وضعیت سلامت یاتاقان و تسمه	ایمنی تجهیزات و نفرات	نتایج و دستاورد نهایی
راه‌اندازی (سنتی)	شوک مکانیکی و الکتریکی بسیار بالا	لغزش شدید تسمه و سایش یاتاقان	پایین (خطر پرتاب تسمه)	توقف‌های مکرر و استهلاک بالا
راه‌اندازی (به‌تنهایی)	حذف شوک الکتریکی اما وجود شوک	کاهش لغزش اما احتمال خرابی در	متوسط	افزایش طول عمر قطعات اما بدون حل

مشکل معکوس چرخش	صورت معکوس چرخش	مکانیکی متقابل	سیستم یکپارچه (قفل کن + راهانداز نرم)
قابلیت اطمینان بالا و کاهش چشمگیر توقفات تولید	حذف کامل لغزش و پایداری عملکرد یاتاقان	راهاندازی نرم از حالت سکون مطلق بدون تنش	

۱۲.۲. کاهش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری

افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات، مستقیماً به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی و نگهداری منجر شده است. بررسی‌های اقتصادی نشان می‌دهد که استفاده از این ساختار یکپارچه، از طریق چندین شاخص مهم موجب بازگشت سرمایه شده است:

۱. **کاهش هزینه‌های مستقیم قطعات:** با حذف بار شوک و تنش‌های راهاندازی، نرخ فرسایش قطعات به شدت افت کرده و در نتیجه هزینه خرید و تعویض مداوم تسمه‌ها و یاتاقان‌ها کاهش یافته است.

۲. **کاهش نفر، ساعت تعمیراتی:** نیاز به مداخلات تعمیراتی اضطراری و همچنین تنظیم مکرر کشش تسمه‌ها توسط تیم تعمیرات به حداقل رسیده است که این امر موجب آزاد شدن ظرفیت نیروی انسانی برای پردازش به سایر امور پیشگیرانه می‌شود.

۳. **بهینه‌سازی مصرف انرژی:** استفاده از مدار راهانداز نرم موجب حذف جریان هجومی بالا در لحظه شروع به کار الکتروموتور شده و تنش‌های شبکه برق‌رسانی را کاهش داده است.

۴. **جلوگیری از زیان‌های عدم‌النفع:** فراتر از هزینه‌های مستقیم، مهم‌ترین شاخص در بازگشت سرمایه این طرح، جلوگیری از توقف‌های ناخواسته خط تولید واحد متانول و پیشگیری از حوادث ایمنی است که می‌توانست هزینه‌های هنگفت و غیرمادی جبران‌ناپذیری به همراه داشته باشد.

۱۳. یافته‌های پژوهش و تحلیل دستاوردها

۱۳.۱. دستاوردهای فنی و ارتقای قابلیت اطمینان

نتایج حاصل از پیاده‌سازی سیستم یکپارچه نشان می‌دهد که استقرار قفل کن پنوماتیکی به‌طور کامل مانع از چرخش معکوس پروانه شده و تضمین می‌کند که فن همواره از سرعت صفر حرکت خود را آغاز نماید. پس از آزادسازی محور، تجهیز راهانداز نرم با کاهش ولتاژ اولیه و افزایش تدریجی آن، گشتاور ضربه‌ای را به حداقل رسانده و از لغزش اولیه تسمه روی پولی و پدیده صیقلی شدن (شیشه‌ای شدن) جلوگیری می‌کند. یکی از کلیدی‌ترین یافته‌های فنی در این طراحی، عملکرد موفقیت‌آمیز اینترلاک ایمنی بین دو لایه کنترلی است؛ به‌گونه‌ای که فرمان استارت تنها پس از دریافت تأییدیه مبنی بر باز شدن کامل قفل، صادر می‌گردد. این توالی هماهنگ، شوک‌های مخرب ناشی از راهاندازی معکوس و تنش‌های مکانیکی راهاندازی مستقیم را به‌طور کامل حذف کرده و منجر به افزایش چشمگیر شاخص میانگین زمان بین خرابی‌ها برای تسمه‌ها، پولی‌ها، یاتاقان‌ها و الکتروموتور شده است.

این ارتقای شاخص قابلیت اطمینان از طریق مهار تنش‌های دینامیکی، با یافته‌های اخیر در حوزه مهندسی نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه همسو است. مطالعات نشان می‌دهند که مهار بارهای ضربه‌ای در ثانیه‌های نخست راهاندازی، نرخ فرسایش خستگی در یاتاقان‌ها و اجزای انتقال قدرت را به شکل فزاینده‌ای کاهش می‌دهد (مورفی و جانسون، ۲۰۲۳، ص. ۱۱۲). همچنین، کنترل یکپارچه گشتاور و جلوگیری از حرکت آزادانه محور پیش از استارت، نقش بسزایی در پایداری ارتعاشی تجهیزات دوار ایفا می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۲۴، ص. ۸۹).

۱۳.۲. تعریف شاخص‌های ارزیابی

برای سنجش کمی اثربخشی سیستم الکتروپنوماتیکی، سه شاخص اصلی قابلیت اطمینان به کار گرفته شد:

$$MTBF = \frac{\sum_{i=1}^n T_{up,i}}{n_f}$$

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n T_{repair,i}}{n_f}$$

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\%$$

که در آن $T_{up,i}$ زمان کارکرد بین خرابی i ام، $T_{repair,i}$ زمان تعمیر خرابی i ام، و n_f تعداد کل خرابی‌هاست (Moubray, 1997, p. 7).

جدول ۷: جدول مقایسه شاخص‌ها (قبل و بعد از اجرا). منبع: گزارش‌های نگهداری استخراج نگارندگان ۱۴۰۵

شاخص	قبل از اجرا	بعد از اجرا	درصد بهبود
تعداد خرابی در سال	~32	~6	~83%
MTBF (ساعت)	~720	~4320	~+500%
MTTR (ساعت)	~8	~3	~62%
Availability (%)	~98.9%	~99.93%	~+1%

۱۳.۳. آزمون معناداری آماری

برای اثبات اینکه بهبود مشاهده شده ناشی از اجرای سیستم است و نه تصادف، آزمون t برای دو نمونه مستقل پیشنهاد می‌شود:

$$t = \frac{\bar{X}_{after} - \bar{X}_{before}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad 6Weibull f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

فرض صفر: H_0
فرض مقابل: H_1
سطح معناداری: $\alpha = 0.05$

$$H_0 : \mu_{before} = \mu_{after}$$

$$H_1 : \mu_{after} > \mu_{before}$$

در صورت کمبود داده، تحلیل Weibull برای تخمین توزیع عمر تجهیز کارایی بیشتری دارد: (Murthy et al., 2004)

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

که β پارامتر شکل و η پارامتر مقیاس (عمر مشخصه) است.

۱۳.۴. تحلیل پیامدهای اقتصادی و بازگشت سرمایه

بررسی پیامدهای اقتصادی این طرح حاکی از کاهش ملموس هزینه‌های عملیاتی و نگهداری است. با حذف عوامل ریشه‌ای تخریب، هزینه خرید و تعویض مکرر تسمه‌ها و یاتاقان‌ها به شدت افت کرده است. افزون بر این، نیاز به نفر-ساعت تخصصی برای انجام تعمیرات اضطراری و تنظیم مکرر میزان کشش تسمه‌ها به حداقل رسیده است. از منظر مصرف انرژی نیز، جایگزینی روش‌های سنتی با تجهیزات کنترل حالت جامد، موجب کاهش محسوس اوج مصرف توان الکتریکی در لحظه استارت شده است. ترکیب این کاهش هزینه‌های مستقیم، دوره بازگشت سرمایه بسیار مطلوبی را برای این سیستم ترکیبی به

ارمغان آورده است. در نهایت، پیشگیری از هزینه‌های هنگفت ناشی از توقف تولید و جلوگیری از بروز حوادث ایمنی مرتبط با پارگی ناگهانی تسمه‌ها، از مهم‌ترین دستاوردهای غیرمستقیم و ارزش‌آفرین این پروژه به شمار می‌رود.
۱۴. بحث

پژوهش حاضر بر پایه داده‌های عملکردی دو ایرکولر (۴۰۰۳ و ۵۰۰۹) در واحد متانول پتروشیمی فن‌آوران استوار است. از منظر روش‌شناسی پژوهش، مطالعات موردی تک‌سایتی ذاتاً با محدودیت در روایی بیرونی مواجه‌اند. بر این اساس، تعمیم نتایج به سایر واحدهای فرآیندی مستلزم رعایت شرایط زیر است:

(الف) شرایط مشابهت فنی: تجهیزاتی که از نظر توان موتور، نسبت تسمه‌کشی و فشار کاری پنوماتیک در محدوده مشابه قرار دارند، احتمال بالاتری برای بازتولید نتایج مشابه دارند (Mischke, 2001, p. 874 & Shigley).

(ب) شرایط محیطی: عملکرد قفل‌کن پنوماتیکی وابسته به پایداری فشار هوای ابزار دقیق است. در سایت‌هایی با نوسان فشار هوا، نتایج ممکن است متفاوت باشد (ISO 4414, 2010).

(ج) الگوی خرابی: تعمیم‌پذیری نتایج MTBF مستلزم آن است که الگوی خرابی تجهیز هدف نیز از نوع **Wear-out** (خستگی تدریجی) باشد، نه خرابی تصادفی (Moubray, 1997, p. 103).

۱۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی

هدف اصلی این پژوهش، حذف ریشه‌ای علل خرابی سیستم انتقال قدرت تسمه‌ای در خنک‌کننده‌های هوایی واحد متانول بود. بررسی‌ها و نتایج استقرار سیستم یکپارچه نشان می‌دهد که ترکیب قفل‌کن پنوماتیکی و راه‌انداز نرم، به‌طور موثری بارهای شوک ناشی از راه‌اندازی معکوس و تنش‌های مکانیکی حاصل از راه‌اندازی مستقیم را خنثی کرده است. این رویکرد پیشگیرانه، به افزایش چشمگیر شاخص میانگین زمان بین خرابی‌ها در تسمه‌ها، پولی‌ها، یاتاقان‌ها و الکتروموتورها انجامیده و با کاهش توقف‌های برنامه‌ریزی‌نشده، در دسترس بودن کل واحد را ارتقا داده است.

از منظر ایمنی عملیاتی، این پروژه رویه‌های دستی، خطرناک و غیراستاندارد مهار پروانه‌ها را به‌طور کامل حذف کرده است. سیستم جدید، یک وضعیت انرژی صفر قابل راستی‌آزمایی را تضمین می‌کند که سطح ایمنی تکنسین‌ها را در زمان بازرسی و تعمیرات به شکل مهندسی‌شده‌ای بالا می‌برد. از حیث اقتصادی و استراتژیک نیز، افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های عملیاتی و نگهداری شده است. صرفه‌جویی در خرید و تعویض قطعات یدکی، کاهش نفر-ساعت تعمیرات اضطراری برای تنظیم مکرر کشش تسمه‌ها و همچنین کاهش مصرف انرژی در لحظه استارت (به دلیل حذف جریان هجومی بالا)، توجیه استراتژیک اجرای این طرح را در راستای بهبود بهره‌وری و اقتصاد نگهداری کاملاً اثبات می‌نماید.

۱۵.۱. پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی و توسعه صنعتی

با توجه به دستاوردهای اثبات‌شده این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای توسعه سیستم و انجام پژوهش‌های آینده ارائه می‌گردد:

۱. **توسعه مقیاس پیاده‌سازی:** پیشنهاد می‌شود این سیستم یکپارچه الکتروپنوماتیکی به عنوان یک استاندارد یکپارچه برای تمامی فن‌های محوری و خنک‌کننده‌های هوایی مشابه در سایر واحدهای مجتمع پتروشیمی تعمیم داده شود.

۲. **پایش وضعیت برخط:** ادغام این سیستم با حسگرهای اینترنت اشیا صنعتی جهت پایش لحظه‌ای ارتعاشات یاتاقان‌ها و میزان کشش تسمه‌ها، می‌تواند رویکرد نگهداری را از حالت پیشگیرانه به پیش‌بینانه ارتقا دهد.

۳. **تحلیل المان محدود:** انجام پژوهش مستقل برای شبیه‌سازی و بررسی دقیق رفتار خستگی تسمه‌ها و پولی‌ها تحت بارهای مختلف پیش و پس از نصب سیستم راه‌انداز نرم، به منظور تدوین الگوهای دقیق‌تر چرخه عمر قطعات.

۱۶. منابع و مأخذ:

۱. احمدی، مهدی، و کمالی، رضا. (۱۴۰۲). طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل یکپارچه برای کاهش تنش‌های

مکانیکی در تجهیزات دوار صنعتی. فصلنامه مهندسی مکانیک کاربردی، ۱۹(۳)، ۱-۱۰.

۲. سلیمی، محمد، و رضایی، علی. (۱۴۰۱). ارزیابی ریسک خرابی تجهیزات دوار در صنایع پتروشیمی با تمرکز بر فن‌های

صنعتی. مجله مهندسی تعمیر و نگهداری، ۱۳(۲)، ۱-۱۲.

۳. طاهری، حسن، محمدی، رضا، و کریمی، سعید. (۱۴۰۱). بررسی عملکرد سیستم‌های خنک‌کننده هوایی در واحدهای پتروشیمی و تأثیر آن بر راندمان فرایندی. *نشریه مهندسی انرژی و فرایند*، ۱۵(۱)، ۱۵-۲۴.
۴. علوی، امیر، حسینی، مهدی، و نادری، سجاد. (۱۴۰۲). تحلیل علل ریشه‌ای خرابی تسمه‌ها در فن‌های صنعتی با استفاده از روش‌های پایش وضعیت. *فصلنامه مهندسی مکانیک صنعتی*، ۱۷(۴)، ۱-۹.
5. Anderson, J. (2020). Analysis of reverse rotation phenomenon in industrial axial fans and its aerodynamic effects. *International Journal of Rotating Systems*, 14(1), 60–72.
6. Binder, A. (2012). *Elektrische Maschinen und Antriebe [Electrical Machines and Drives]*. Springer.
7. Chen, H., & Zhang, Y. (2023). Advances in pneumatic locking mechanisms for heavy-duty industrial fans. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 45(2), 112–125.
8. Hansen, M. O. L. (2008). *Aerodynamics of Wind Turbines* (2nd ed.). Earthscan.
9. IEC 61800-3:2004. *Adjustable speed electrical power drive systems*. IEC.
10. ISO 4414:2010. *Pneumatic fluid power General rules*. ISO.
11. Jackson, M., & Lee, D. (2021). Reliability analysis of belt-driven power transmission systems in industrial equipment. *Journal of Maintenance Engineering and Reliability*, 29(2), 98–110.
12. Kumar, A., & Singh, R. (2020). Torque control and performance optimization using soft starters in induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(8), 6543–6551.
13. Lee, S., Kim, D., & Park, J. (2024). Economic analysis and return on investment for soft starter integration in petrochemical cooling systems. *International Journal of Production Economics*, 250, 108520.
14. Miner, M. A. (1945). Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 12(3), A159–A164.
15. Montgomery, D. C. (2017). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (7th ed.). Wiley.
16. Moubray, J. (1997). *Reliability-centred maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
17. Murphy, P., & Johnson, L. (2023). Enhancing reliability and technical performance in belt-driven power transmission systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 235, 109211.
18. Murthy, D. N. P., et al. (2004). *Weibull Models*. Wiley.
19. Norton, R. L. (2011). *Machine Design: An Integrated Approach* (4th ed.). Prentice Hall.
20. Nowlan, F. S., & Heap, H. F. (1978). *Reliability-centered maintenance*. United Airlines / Department of Defense.
21. Patel, N., & Desai, M. (2021). Integration of mechanical restraints and soft starters for industrial fan applications. *Industrial Power Systems Journal*, 12(4), 45–58.
22. Peterson, R. (2019). Investigating the effect of direct-on-line starting on transient torque and reliability of rotating equipment. *Journal of Power Engineering and Electrical Drives*, 22(4), 205–218.
23. Shigley, J. E., & Mischke, C. R. (2001). *Mechanical Engineering Design* (6th ed.). McGraw-Hill.
24. Silva, C., & Santos, R. (2021). Fatigue analysis of V-belts under impact loading conditions in cooling tower fans. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105230.

25. Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
26. Wang, X., & Li, M. (2022). Analysis of shear stresses and reverse rotation (windmilling) effects in axial cooling fans. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117765.