

تخمین عمر مفید باقیمانده چرخ دنده ساده با استفاده از سیگنال صوتی و توزیع وایبل

مهدی زمانی^آ، محمد ابونجمی^{ب*}، سیدرضا حسن بیگی^پ، سید اشکان موسویان^ت

^آ ایران، تهران، پاکدشت، دانشگاه تهران، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشجوی دکتری

^ب ایران، تهران، پاکدشت، دانشگاه تهران، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، دانشیار.

^پ ایران، تهران، پاکدشت، دانشگاه تهران، گروه فنی کشاورزی، دانشکدگان ابوریحان، استاد.

^ت ایران، تهران، تهران، دانشگاه تهران، گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه ملی مهارت، استادیار.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: abonajmi@ut.ac.ir

چکیده

جعبه دنده یکی از مهمترین قطعات در بسیاری از ماشین‌آلات پیشرفته از جمله ادوات کشاورزی می‌باشد که عیب‌یابی و تخمین عمر مفید باقیمانده اجزاء آن اخیراً به عنوان یک موضوع مهم مورد توجه محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. روش‌های مختلفی برای تخمین عمر مفید باقیمانده سیستم‌های چرخ‌دنده‌ای وجود دارد که تحلیل سیگنال‌های صوتی یکی از این روش‌های می‌باشد. در پژوهش حاضر به منظور پیش‌بینی باقیمانده عمر مفید چرخ‌دنده به کمک تحلیل صدا با طراحی و ساخت سامانه‌ای به همین منظور اقدام گردید. در همین راستا سامانه به مدت ۶۰ ساعت در دو مرحله تحت فعالیت قرار گرفت. ابتدا و به منظور رفع عیوب احتمالی ناشی از ساخت و مونتاژ سامانه به مدت ۱۰ ساعت بدون بار و پس از آن به مدت ۵۰ ساعت تحت اعمال بار مقاوم بر روی چرخ‌دنده، سامانه تحت فعالیت قرار داشت. پروفیل چرخ‌دنده تحت آزمایش ابتدا و پس از اتمام زمان مد نظر به وسیله CMM اندازه‌گیری شد، و میزان سایش ایجاد شده در پروفیل به میزان ۰/۱۵ میلی‌متر مشاهده گردید. داده‌های صوتی مربوط به زمان شروع کار تا زمان ایجاد سایش به میزان ۰/۱۵ میلی‌متر اخذ گردید. با استفاده از میزان تغییر دامنه باندهای جانبی نسبت به تعریف شاخص سلامتی اقدام گردید. با استفاده از روابط مربوط به توزیع وایبل پارامتر شکل معادل ۱/۰۰۱ و پارامتر مقایس معادل ۲۷۳۴۵/۰۳ محاسبه و پس از آن با استفاده از تابع توزیع جمعی، میزان عمر مفید باقیمانده برای سامانه ساخته شده تا زمان رسیدن میزان سایش به ۰/۲ میلی‌متر، ۸۰ ساعت محاسبه شد.

کلمات کلیدی: سیگنال صوتی ؛ توزیع وایبل ؛ عمر مفید باقیمانده ؛ جعبه‌دنده.

۱- مقدمه

زندگی انسان امروزی تنیدگی به ظاهر ناگسستنی با صنایع و تجهیزات مختلف دارد. از ادوات تأمین انرژی‌های مختلف مانند تجهیزات استخراج و تبدیل سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر و تولیدات کشاورزی گرفته تا وسائل حمل و نقل هوایی، زمینی و دریایی و نیز سایر ابعاد زیست‌اخیر انسان مدیون استفاده گسترده از صنایع و ماشین‌آلات گوناگون می‌باشد. هرکدام از این تجهیزات نقش بسیار مهمی در حوزه کاری خود و به تبع آن تمامی زنجیره متصل در زمینه مربوطه را ایفا می‌کند. هرگونه خرابی خارج از انتظار می‌تواند موجب مختل شدن زنجیره فعالیت تجهیز و نیز سایر صنایع و حوزه‌های مرتبط گردد. هنگامی که از تجهیزات صحبت می‌شود، منظور تمامی اجزاء و ماشین‌آلات فعال یک صنعت می‌باشد. به همین منظور از سال‌ها قبل و از زمان گسترش استفاده از صنایع در جنگ جهانی دوم مفهومی با عنوان نگهداری و تعمیرات (نت)^۱ وارد ادبیات مدیران و مهندسين گردید. نگهداری و تعمیرات دارای ابعاد بسیار گوناگونی می‌باشد که حتی منجر به استفاده از جزء نگهداری قبل از تعمیرات در تعریف این اسم و اهمیت این کلمه در مفهوم کلی نگهداری و تعمیرات گردید. نگهداشت واکنشی، نگهداشت پیش‌کنشی یا پیشگیرانه و نگهداشت پیش‌گویانه از معروف‌ترین استراتژی‌های حوزه نگهداری و تعمیرات می‌باشند. امروزه با توجه به مزایا و معایب استراتژی‌های فوق‌الذکر نگهداشت پیش‌گویانه در معرض توجه محقق قرار گرفته و پژوهش‌های فراوانی در این حوزه انجام شده است. از ابزارهای مؤثر برای انجام این نوع نگهداشت می‌توان مدل پایش بر اساس وضعیت^۲ (BM) را نام برد. این مدل معمولاً یکی از مؤثرترین گزینه‌ها است، زیرا اولین نشانه‌های هشدار عیوب در حال پیشروی را تشخیص داده و از این نشانه‌ها در مورد شناسایی وضعیت کلی تجهیز بهره می‌برد. برخی از این نشانه‌ها یا علائم شروع عیب ممکن است بسیار نامحسوس باشند یا فرصت بسیار کوتاهی را برای واکنش به ایجاد عیب فراهم کند. پایش وضعیت عموماً برای قطعاتی مانند واحدهای دارای حرکت مکانیکی بیشترین بازدهی را دارد. پایش وضعیت همچنین عملکرد سیستم و تجهیزات را رصد می‌کند تا نشانه‌هایی از عیب را در صورت وجود تشخیص دهد. تحلیل ارتعاش (یا صدای ناشی از ارتعاش)، وضعیت سیستم‌های متحرک را رصد کرده و مد نظر دارد. میزان ارتعاش بر اساس کاتالوگ یا استانداردهای مربوطه در حد معینی باید باشد و هر انحرافی از این میزان (چه بیشتر شدن و چه کمتر شدن از حد معیار) می‌تواند هشدار در مورد وقوع خرابی در آینده نه‌چندان دور باشد. تحلیل ارتعاشی می‌تواند در مورد شناسایی محل عیب هم مورد استفاده قرار گیرد. عوامل مختلفی در مورد ایجاد ارتعاش نقش دارند و هر منبع علائم مختص خود را دارد. تعیین نوع عیب با استفاده از تحلیل دامنه ارتعاش، فرکانس ارتعاش و فاز ارتعاش امکان‌پذیر می‌باشد.

۱-۱ مروری بر تحقیقات

در صنایع امروزی ماشین‌های دوار به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، برخی از این ماشین‌ها بسیار پیچیده بوده و نقش حیاتی در حوزه کاری خود ایفا می‌کنند. خرابی ناگهانی این ماشین‌ها ممکن است منجر به توقیفی پر هزینه و کاهش بهره‌وری شود. بنابراین، وجود یک سیستم تشخیص برای پیش‌بینی وقوع خرابی و زمان پیش‌بینی شده به عنوان یک نیاز اساسی مطرح است. با توجه به این توضیحات، سیستم‌های پایش وضعیت کارآمد و مؤثر در صنعت، به شدت ضروری هستند تا از بروز مشکلات جدی جلوگیری کرده و به بهبود عملکرد کلی ماشین‌آلات کمک کنند [۱]. جعبه‌دنده‌ها به عنوان یکی از مهمترین و اصلی‌ترین اجزاء تجهیزات دوار شناخته شده می‌باشند. در یک جعبه‌دنده، دندانه‌ها و چرخ‌دنده‌ها برای تبدیل سرعت و گشتاور از یک منبع قدرت چرخشی به دستگاه دیگر استفاده می‌شوند [۲]. باتوجه به شرایط کاری متنوع، جعبه‌دنده‌ها تحت انواع عوامل داخلی و خارجی قرار دارند و همین موضوع موجب ایجاد خرابی‌هایی در اجزاء جعبه‌دنده می‌گردد. یکی از اجزائی که به صورت مستقیم تحت تأثیر این عوامل قرار دارد چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده می‌باشد. حالت‌های خرابی در چرخ‌دنده عمدتاً شامل ترک ریشه دندانه، کندگی سطح دندانه و پوسته پوسته شدن، سایش دندانه، لب‌پر شدن دندانه و خطاهای ساخت می‌باشد. در این میان سایش به عنوان یکی از عیوب متداول در چرخ‌دنده مورد توجه محققین قرار گرفته است. بر اساس هندبوک ASM، مجموعه‌های چرخ‌دنده به‌طور ذاتی مستعد انواع مختلفی از مکانیزم‌های سایش شامل سایش چسبنده، خراشیدگی و پولیش سطحی هستند. در این میان، سایش ناشی از خراشیدگی، در صورتی که محدود به لایه‌های

¹ Maintenance² Condition Base Monitoring

اکسیدی تشکیل شده بر سطح دندانها باشد، در دسته‌ی سایش ملایم^۳ طبقه‌بندی می‌گردد. با این حال، در مواردی که این لایه‌های محافظ اکسیدی دچار گسیختگی شوند و سطح فلزی زیرین بدون پوشش نمایان شود، معمولاً شرایط به سمت سایش چسبنده^۴، که شدت بالاتری دارد، تحول می‌یابد. سایش چسبنده، که گاه به آن سایش جوش خوردگی^۵ نیز اطلاق می‌شود، نوعی آسیب موضعی است که ناشی از پدیده‌ی جوش خوردگی حالت جامد بین سطوح تماس لغزنده می‌باشد. این نوع سایش به‌ویژه زمانی رخ می‌دهد که تماس‌های متقابل بین سطوح، همراه با تنش‌های بالا و لغزش نسبی، منجر به ایجاد پیوندهای موضعی فلزی گردد. از سوی دیگر، سایش خراشیدگی^۶ در دندانهای چرخ‌دنده عمدتاً به دلیل ورود ذرات سخت و تیز به سیستم روانکاری ایجاد می‌شود. این ذرات می‌توانند از منابع مختلفی نظیر آلودگی خارجی یا سایش سایر قطعات منشأ گرفته و با نفوذ به فیلم روانساز، سطوح درگیر را به‌صورت مکانیکی دچار خراش کنند. همچنین، در شرایطی که مواد افزودنی فشار شدید (EP additives) موجود در روانساز، واکنش‌پذیری شیمیایی بیش از اندازه‌ای از خود نشان دهند، ممکن است فرآیند پولیش سطحی^۷ به وقوع بپیوندد. در این فرآیند، سطوح دندانها تا حدی صیقلی می‌شوند که سطح نهایی دارای ظاهر آینه‌ای خواهد بود. هرچند این پدیده از نظر ظاهری ممکن است مطلوب به نظر برسد، اما از دیدگاه عملکردی، سایش نوع پولیش یک پدیده‌ی نامطلوب محسوب می‌شود؛ زیرا به‌واسطه‌ی تغییر در پروفیل دندانها، موجب کاهش دقت هندسی چرخ‌دنده و انحراف از فرم ایده‌آل طراحی می‌گردد [۳]. از این رو، پایش و پیش‌بینی فرآیند سایش یک امر حیاتی برای مدیریت سامانه انتقال قدرت می‌باشد. بصورت تئوری، فرآیند سایش و خصوصیات دینامیکی با توجه به خصوصیات ذاتی منحنی اینولوت چرخ‌دنده، بر یکدیگر تأثیرگذار هستند. دلیل این موضوع این است که تمام نقاط بر روی سطوح دندان چرخ‌دنده ساده بجز نقاط منحنی گام، حرکت لغزشی را تجربه می‌کنند و در نقطه منحنی گام، به دلیل اینکه سرعت لغزشی برابر صفر است، وضعیت غلشی مطلق اتفاق می‌افتد [۴]. عمل لغزش می‌تواند منجر به سایش سطح از نوع خراشیده شده گردد، که در ادامه هندسه پروفیل دندان چرخ‌دنده و به تبع آن توزیع بار دینامیکی را تغییر می‌دهد. نتیجه این موارد افزایش سطح ارتعاش و احتمال تسریع سایر مکانیزم‌های خرابی خواهد بود [۵]. در همین حال، به دلیل تغییر در سطح کاری ناشی از سایش، دیگر نسبت انتقال چرخ‌دنده ثابت نخواهد بود [۶]، و مخصوصاً در چرخ‌دنده‌های ساده خطای انتقال^۸ چرخ‌دنده به سادگی تحت تأثیر سایش سطح دندان قرار می‌گیرد [۵]. به علاوه، پاسخ دینامیکی جعبه‌دنده می‌تواند فرآیند سایش سطح دندان را تغییر دهد. این رابطه دو طرفه بین فرآیند سایش سطح دندان و ویژگی‌های دینامیکی چرخ‌دنده، ویژگی‌های دینامیکی چرخ‌دنده پیچیده‌تری را ایجاد می‌کند و در مقایسه با سایر خرابی‌ها، مشکلات بیشتری در پایش وضعیت سایش چرخ‌دنده به همراه خواهد داشت. گابریل و همکاران در پژوهشی به بررسی پیش‌بینی عمر یاتاقان با کمک پرهیز از خرابی ناخواسته که نتیجه آن افزایش زمان تولید، افزایش هزینه نگهداری و هدایت به سمت افزایش لیست قطعات یدکی می‌باشد، پرداختند. در این مطالعه دو کلاس، شامل مدل‌های شبکه عصبی یاتاقان منفرد و یاتاقان خوشه‌ای توسعه داده شد. تمام مدل‌ها قابلیت اطمینان استفاده برای یک بانک داده سیگنال‌های خرابی به منظور پیش‌بینی زمان خرابی یک یاتاقان نسبتاً خراب در هر زمانی در طول عمر کاری آن را دارد. مدل‌هایی که میانگین وزنی پارامترهای نمایی کوپل شده با الگوریتم به‌روز رسانی پارامتر به منظور محاسبه پیش‌بینی زمان خرابی یاتاقان را استفاده کردند بهترین نتیجه را ارائه دادند [۷].

افزایش سایش سطح تماس، موجب افزایش پاسخ‌های دینامیکی از جمله دامنه و مقدار مؤثر ارتعاشات (RMS) می‌شود. در واقع، با افزایش سایش، خطای انتقال دندان (DTE) و نیروی مش دندان بیشتر شده و این موضوع باعث تشدید ارتعاشات سیستم می‌گردد. از سوی دیگر، افزایش دامنه‌ی ارتعاشات نیز به تسریع نرخ سایش منجر می‌شود و یک چرخه‌ی بازخورد مثبت میان RMS ارتعاش و سایش سطحی شکل می‌گیرد. همچنین در مراحل اولیه سایش، هرچند ضریب اصطکاک به دلیل کاهش زبری سطح اندکی کاهش می‌یابد، اما به‌واسطه‌ی افزایش نیروی تماس، مقدار RMS ارتعاشی افزایش پیدا می‌کند [۸]. در دهه اخیر، استفاده از توزیع وایبل در مدل‌سازی قابلیت اطمینان ماشین‌آلات صنعتی رشد چشمگیری داشته است. مطالعات متعددی از این توزیع برای بهینه‌سازی زمان تعمیرات، تعیین بازه‌های نگهداری و پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده قطعات استفاده کرده‌اند.

³ Mild Wear

⁴ Adhesive Wear

⁵ Gallling or Scuffing

⁶ Abrasive Wear

⁷ Polishing Wear

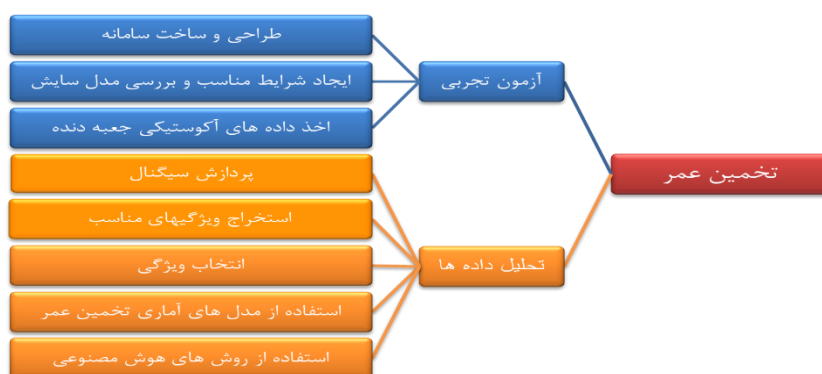
⁸ Transmission error

در مطالعه‌ای، مدل وایبل با توزیع‌های آماری دیگر مقایسه شده و دقت آن در مدل‌سازی فرآیندهای خرابی پیچیده با استفاده از تقریب‌های ریاضی پیشرفته به اثبات رسیده است. این تحقیق به‌ویژه در محیط‌هایی با داده‌های نویزی یا محدود اهمیت دارد [۹]. همچنین در بررسی برنامه‌ریزی شبکه‌های توزیع برق، از توزیع وایبل به‌عنوان ابزار اصلی در تحلیل قابلیت اطمینان و مکان‌یابی تجهیزات استفاده شد. در این پژوهش نشان داده شد که با کمک مدل‌سازی مبتنی بر وایبل، می‌توان تصمیمات بهینه‌تری در زمینه تخصیص منابع، تجهیزات پشتیبان و پیشگیری از خرابی‌های ناگهانی اتخاذ کرد [۱۰].

در پژوهشی دیگر، با استفاده از برازش تابع وایبل بر روی تابع مود ذاتی نسبت به تخمین عمر مفید باقیمانده بلبرینگ اقدام گردید. در این پژوهش سیگنال‌های ارتعاشی بلبرینگ ابتدا با استفاده از روشی به‌نام تجزیه به توابع مود ذاتی تحلیل می‌شوند. سپس واریانس آن تابع محاسبه شده و تابع وایبل بر روی آن برازش گردید. ارزیابی این الگوریتم با داده‌های تجربی نشان دهنده تخمین باقیمانده عمر مفید با دقت مناسب بود [۱۱].

۲- مواد و روش‌ها

روش کار در این تحقیق بر اساس شکل (شکل ۱) به دو بخش توسعه سامانه جهت اخذ داده‌های صوتی (آزمون تجربی) و تحلیل داده‌های اخذ شده تقسیم می‌شود.



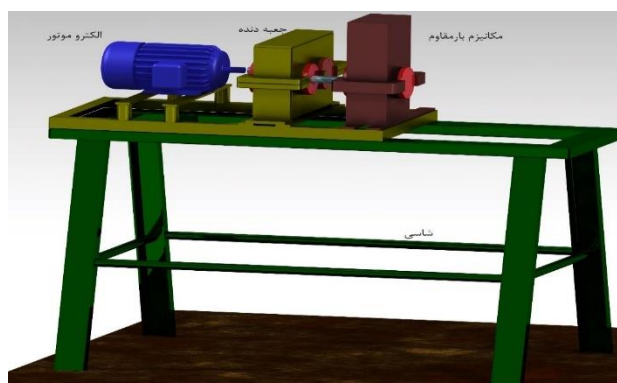
شکل ۱ مراحل تخمین عمر مفید باقیمانده در این پژوهش.

۱-۲ آزمون تجربی

۱-۱-۲ سامانه مکانیکی

در این پژوهش از یک جعبه دنده تک مرحله‌ای متشکل از دو چرخ‌دنده ساده محور موازی به منظور انجام آزمایش‌های مد نظر استفاده گردید. همچنین با توجه به هدف آزمایش، به منظور انجام آزمون شتاب‌دار^۹ از یک مکانیزم لنگ و فنر جهت اعمال بار مقاوم بر روی چرخ دنده استفاده شده است. با توجه به دقت مورد نیاز در این پژوهش، نخست سامانه مد نظر با استفاده از نرم افزار CATIA V5R23 طراحی و نسبت به رفع ایرادات اولیه اقدام شد (شکل ۲).

^۹ Accelerated test



شکل ۲: سمت راست، سامانه طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار CATIA. سمت چپ، سامانه ساخته شده مورد استفاده به منظور تخمین عمر مفید باقیمانده جعبه‌دنده.

پس از طراحی مدل سه بعدی، سامانه مد نظر به منظور بررسی استقلال پارامترهای ارتعاشی چرخ‌دنده از فعالیت مکانیزم لنگ و فنر بوسیله نرم‌افزار MSC ADAMS میزان ارتعاش جعبه‌دنده قبل و بعد از اتصال مکانیزم مورد اشاره بررسی گردید. نتایج تحلیل دینامیکی مکانیزم نشان دهنده عدم تأثیر این مکانیزم بر روی پارامترهای ارتعاشی چرخ‌دنده بود. پس از انجام مراحل مربوط به طراحی مدل سه‌بعدی و نیز انجام تحلیل‌های دینامیکی با استفاده از نرم‌افزارهای مربوطه، نسبت به ساخت سامانه اقدام گردید (شکل ۲).

۲-۱-۲ اخذ داده‌های صوتی

میکروفون سیگنال‌های صوتی را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند. صداسنج دستگاهی است که دارای میکروفون، آمپلی فایر داخلی، فیلتر صدا، مبدل A/D است و می‌تواند صداها را ذخیره نموده و به رایانه انتقال دهد. در این تحقیق از صداسنج مدل HT157 کلاس ۱ ساخت شرکت HT Instruments استفاده می‌شود. این صداسنج قابلیت اندازه‌گیری تراز فشار صوت از ۲۵ تا ۱۴۰ دسی بل را دارد. میکروفون آن از پیش قطبی شده و توانایی ایجاد سیگنال ۵۰ میلی ولت بر پاسکال را در بازه فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۲۰ کیلو هرتز دارد و دارای خروجی جهت اتصال به رایانه است. همچنین دارای مبدل ۲۴ بیت و فرکانس نمونه برداری تا ۱۹۲ کیلو هرتز می‌باشد. علاوه بر آن دارای حافظه داخلی به میزان ۶۴ کیلوبایت برای نگهداری اطلاعات است (شکل ۳).



شکل ۳ صداسنج HT 157.

قبل از انجام تست‌های اصلی، و به منظور یافتن بهترین موقعیت مکانی میکروفون، ابتدا چندین پیش تست انجام شد. به منظور ذخیره سازی داده‌های صوتی بر روی رایانه از نرم‌افزار Cool Edit pro2.0 و به منظور پردازش سیگنال از نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید.

۲-۲ تحلیل داده‌ها

مقادیر خروجی حسگر و مبدل‌ها، تشکیل یک سیگنال را می‌دهد. سیگنال‌ها معمولاً حاوی اطلاعات مربوط به متغیر فیزیکی مورد نظر می‌باشد. حجم بالای سیگنال و نیز وجود اطلاعات غیرمفید در سیگنال از شرایطی می‌باشد که موجب غیرقابل استفاده شدن سیگنال‌ها می‌شود. به منظور تبدیل سیگنال به شکل قابل استفاده و نیز استخراج اطلاعات مورد نیاز، از روش پردازش سیگنال استفاده می‌شود. پردازش سیگنال شامل کاهش حجم سیگنال، فشرده‌سازی، فیلتر کردن، نویززدایی، و مواردی از این دست می‌باشد [۱۲]. بنابراین پردازش سیگنال به روش‌های استفاده شده بر روی داده‌ها به منظور آشکارسازی اطلاعات موجود در اندازه‌گیری‌ها گفته می‌شود.

این روش‌ها بر تبدیلات مختلفی تکیه دارند که دارای پایه و اساس ریاضی هستند [۱۳]. به همین منظور بعد از اخذ سیگنال‌ها لازم است با استفاده از روش‌های حوزه زمان، حوزه فرکانس، و حوزه زمان-فرکانس پردازش شوند. استخراج ویژگی، مجموعه روش‌هایی می‌باشد که متغیرها را به ویژگی‌ها تبدیل می‌کند، در نتیجه مقدار داده‌هایی که باید پردازش شوند را به طور مؤثر کاهش می‌دهد، در حالی که هنوز به طور دقیق و کامل مجموعه داده‌های اصلی را توصیف می‌کنند.

۲-۲-۱ مدل آماری

مدل‌های زیادی به منظور توصیف و تحلیل داده‌ها ارائه شده که هر یک از آن‌ها برای نوع خاصی از داده‌ها مناسب است. مدل‌هایی مانند توزیع نرمال، پواسن، نمایی و وایبل از این دست می‌باشند. در این میان، توزیع وایبل یکی از مهم‌ترین توزیع‌های آماری است که در آمار نظری و کاربردی نقش کلیدی دارد. توزیع وایبل، در میان توزیع‌های آماری از اهمیت خاصی برخوردار است و یکی از مهم‌ترین توزیع‌ها در مبحث قابلیت اطمینان و تحلیل داده‌های طول عمر به شمار می‌رود که اولین بار توسط وایبل (۱۹۵۱) ارائه شد. تابع توزیع وایبل دو پارامتری عبارت است از:

$$f(x; \alpha, \beta) = 1 - e^{-(\beta x)^\alpha}, x > 0 \quad (1)$$

که در آن $\alpha > 0$ و $\beta > 0$ به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس هستند. همان‌گونه که مشخص است تابع توزیع ساختار بسته‌ای دارد و این یک ویژگی مطلوب محسوب می‌شود که برخی از مدل‌های طول عمر مانند گاما فاقد آن هستند. تابع چگالی متناظر با تابع توزیع معادله ۳ به صورت:

$$f(x; \alpha, \beta) = \alpha \beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-(\beta x)^\alpha}, x > 0 \quad (2)$$

از نماد $w(\alpha, \beta)$ برای نمایش توزیع وایبل با پارامترهای α و β استفاده می‌شود. تابع نرخ خطر توزیع وایبل به صورت زیر است:

$$h(x) = \frac{f(x)}{1 - F(x)} = \alpha \beta^\alpha x^{\alpha-1} \quad (3)$$

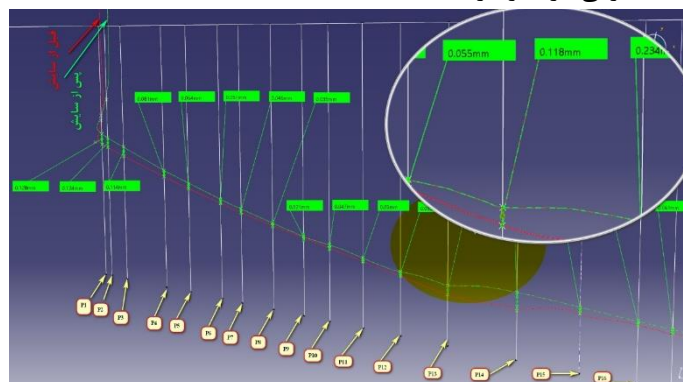
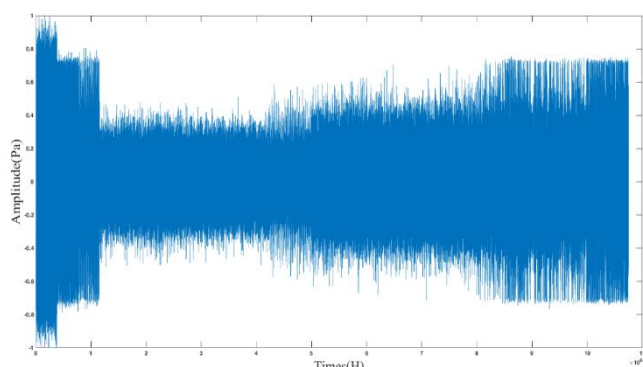
واضح است اگر $\alpha > 1$ ، تابع نرخ خطر صعودی و اگر $\alpha < 1$ ، این تابع نزولی خواهد بود. در صورتی که به ازای $\alpha = 1$ ، نرخ خطر رفتار ثابتی دارد. به عبارت دیگر تابع نرخ خطر توزیع وایبل انعطاف‌پذیرتر از توزیع نمایی می‌باشد. همچنین پارامتر شکل β در این توزیع دارای تفسیر فیزیکی مهمی است، β کوچکتر از ۱ نشان‌دهنده خرابی تصادفی اولیه، β تقریباً ۱ نشان‌دهنده خرابی مستقل از سن و β بزرگتر از ۱ نشان‌دهنده فرسودگی ناشی از کارکرد است. بنابر این اگر در برازش پارامتر β مقدار بالاتری باشد، می‌توان این وضعیت را نشانگر تسریع در فرایند سایش در قطعات در حال کارکرد دانست.

۳- نتایج

در این پژوهش چرخ‌دنده نمونه در دو مرحله: بدون اعمال بار مقاو و تحت تأثیر بار مقاوم بر روی دندانه‌ها مجموعاً به مدت ۶۰ ساعت کار کرد. ابتدا به منظور برطرف شدن عیوب ساخت و هموار شدن سطح دندانه‌ها، جعبه‌دنده به مدت ۳۰ ساعت بدون اتصال مکانیزم لنگ و فنر و در حالت بدون بار تحت شرایط کاری قرار گرفت. در این بازه، داده‌برداری از سامانه در فواصل زمانی معین انجام شد. بعد از این مرحله سامانه به مدت ۳۰ ساعت با اتصال به مکانیزم لنگ و فنر تحت شرایط کاری قرار گرفت و مجدداً داده‌های مربوطه از سامانه اخذ و ذخیره گردید. به منظور بررسی عیب سایش، پروفیل چرخ‌دنده قبل از راه‌اندازی سامانه و پس از مدت ۶۰ ساعت کار، توسط دستگاه CMM^{10} اندازه‌برداری و بررسی گردید. به منظور بررسی خطاهای حین ساخت، پروفیل ابتدایی چرخ‌دنده با پروفیل بدست آمده از یک مدل ایده‌آل و استاندارد چرخ‌دنده که در نرم افزار آدامز مدل شده بود مقایسه گردید. این مقایسه میزان خطاهای ساخت را مشخص کرده و به عنوان مبنای داده برداری و تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۴). مقایسه پروفیل چرخ‌دنده در ابتدای آزمایش و پس از ۶۰ ساعت، نشان‌دهنده میزان سایش در چرخ‌دنده می‌باشد. با مقایسه یک نقطه مشخص بر روی دندانه‌های

¹⁰ Coordinate Measurement Machine

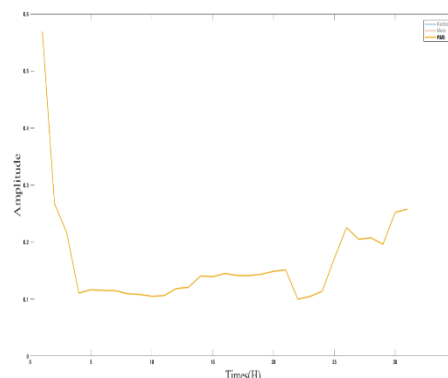
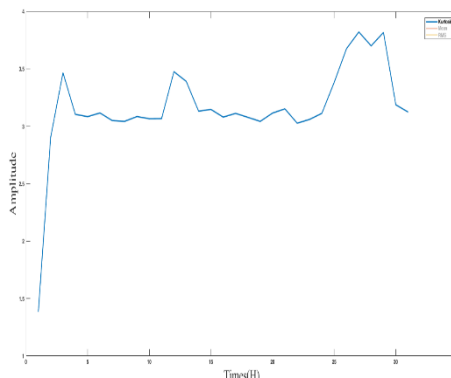
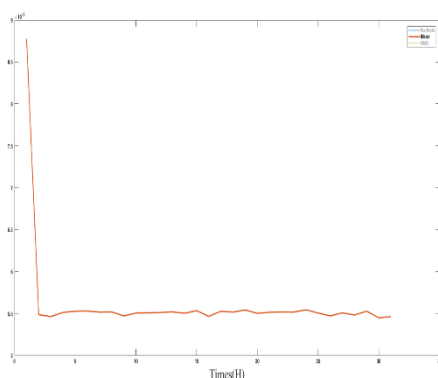
چرخ‌دنده که بیشترین میزان انحراف از پروفیل اولیه را دارد، میزان سایش ۰.۱۵ میلی‌متر بدست آمد که در این پژوهش به عنوان معیار خرابی در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: سمت راست تفاوت بین پروفیل چرخ‌دنده در ابتدای زمان داده برداری و بعد از مدت ۶۰ ساعت کارکرد، سمت چپ: نمایش حوزه زمان (تعداد ۳۱ زمان متفاوت داده‌برداری).

۳-۱ تحلیل در حوزه زمان

باتوجه به اینکه نرخ نمونه‌برداری در این پژوهش ۱۹۲۰۰۰ نمونه در ثانیه است، به منظور انجام تحلیل‌های مورد نظر، در هر مرحله، به میزان ۲ ثانیه از صدای جعبه‌دنده اخذ و برای بررسی‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین سیگنال بررسی شده در حوزه زمان دارای ۳۸۴۰۰۰ نقطه می‌باشد که نشان دهنده دقت بالای نمونه‌برداری در این تحقیق است. شکل ۴ سمت چپ، نمایش داده‌های حوزه زمان را نشان می‌دهد که از زمان شروع داده برداری تا زمان رسیدن به معیار سایش برای ۳۱ زمان مختلف ترسیم شده است. این اطلاعات می‌توانند به شبیه‌سازی رفتار سیستم در طول زمان و در شرایط مختلف کمک کنند و به فهم عمیق‌تری از روند تغییرات سیستم در پاسخ به بار و شرایط مختلف منتهی شوند. محور افقی زمان را بر حسب ساعت نشان می‌دهد که از شروع عملکرد چرخ‌دنده تا رسیدن به سطحی از سایش معادل ۰.۲۳ میلیمتر گسترش یافته است. محور عمودی نیز دامنه سیگنال را بر حسب پاسکال نمایش می‌دهد. با بررسی این سیگنال مشاهده می‌شود که در ابتدای روند، دامنه سیگنال دارای تغییرات شدیدتر و نسبتاً بزرگتری است که می‌تواند ناشی از تطابق ابتدایی اجزاء و فرآیند جفت شدن سطوح تماس دندانه‌ها باشد. در ادامه، دامنه سیگنال به صورت یکنواخت‌تری تغییر می‌کند، ولی با نزدیک شدن به انتهای نمودار و بروز سایش شدیدتر، نوسانات مجدداً افزایش یافته و رفتار دینامیکی سیستم ناپایدارتر می‌شود. برای تحلیل دقیق‌تر وضعیت چرخ‌دنده و استخراج ویژگی‌هایی مؤثر در مدل‌سازی خرابی از ویژگی‌های آماری مانند RMS، کورتسیس و میانگین (شکل ۵) استفاده شده است. این ویژگی‌ها نسبت به سایر ویژگی‌های حوزه زمان، شاخص‌هایی حساس‌تر به تغییرات در دینامیک سیگنال می‌باشند که توانایی بالایی در شناسایی روند تخریب تدریجی و تخمین زمان باقیمانده تا خرابی نهایی را دارند. تحلیل دقیق این نمودار و ویژگی‌های استخراج شده می‌تواند به توسعه مدل‌های پیش‌بینی قابل اعتماد برای نگهداری پیشگیرانه و افزایش ایمنی سیستم‌های مکانیکی کمک کند.



شکل ۵ نمایش مقادیر مربوط به: سمت راست RMS، وسط کورتسیس و سمت چپ میانگین در حوزه زمان (تعداد ۳۱ زمان متفاوت داده‌برداری)

شاخص RMS^{11} یکی از معیارهای آماری پایه در تحلیل سیگنال‌های صوتی و ارتعاشی محسوب می‌شود که توان کلی سیگنال را بازتاب می‌دهد. در سیستم‌های مکانیکی مانند جعبه‌دنده، افزایش در RMS معمولاً نشان دهنده بالا رفتن سطح انرژی ناشی از برخورد و اصطکاک اجزای درگیر است. به طور خاص، سایش باعث تولید نویز مکانیکی و صوتی بیشتر می‌شود که به صورت مستقیم در افزایش RMS نمود می‌یابد.

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ طی تحقیقی اثبات کردند که میزان سایش روی دندانه‌ها با میزان سایش رابطه مستقیمی دارد. در مراحل پیشرفته‌تر سایش، RMS به صورت یکنواخت افزایش می‌یابد یا دچار نوسانات شدید می‌شود. همچنین لی و همکاران در مقاله‌ای در سال ۲۰۲۰ به بررسی روش‌های تشخیص سایش با استفاده از سیگنال ارتعاشی پرداخت، RMS به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در مراحل اولیه سایش پیشنهاد شد.

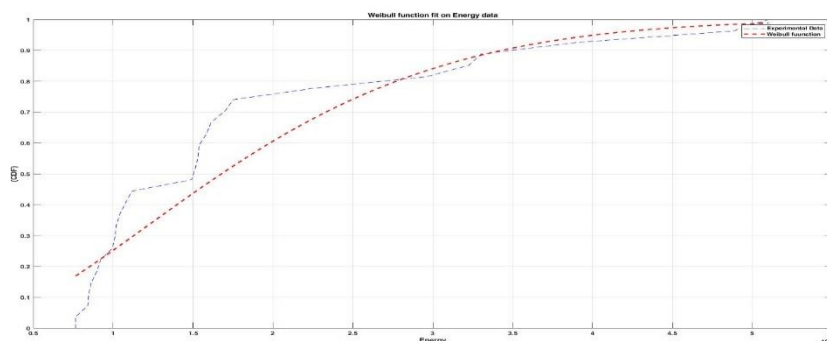
کورتسیس به عنوان یک شاخص آماری مرتبه چهارم، میزان قله‌دار بودن توزیع داده‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. در تحلیل صوت و ارتعاشات مکانیکی، به ویژه برای تشخیص عیوب در چرخ‌دنده‌ها، کورتسیس نقش مهمی ایفا می‌کند. افزایش ناگهانی مقدار کورتسیس در سیگنال‌های صوت و ارتعاش می‌تواند نشان دهنده وقوع پدیده‌های غیر عادی مانند ضربه‌ها، سائیدگی یا شکست در دندانه‌های چرخ‌دنده باشد. مطالعات متعددی به بررسی کاربرد کورتسیس در تشخیص عیوب چرخ‌دنده پرداخته‌اند. به عنوان مثال، Gelman و Persin (۲۰۲۲) از کورتسیس طیفی برای تشخیص عیوب موضعی در چرخ‌دنده‌ها و بلبرینگ‌ها استفاده کرده‌اند و نشان داده‌اند که این روش در شناسایی ضربه‌های ناشی از عیوب بسیار مؤثر است (شکل ۵). مطالعه ای توسط Afia و همکاران (۲۰۱) نشان داده است که استفاده از کورتسیس طیفی و تحلیل کورتوگرام به ویژه زمانی که سیگنال دارای نویز بالا است، می‌تواند به شناسایی مؤثر عیوب در چرخ‌دنده‌ها کمک کند.

۲-۳ تخمین عمر به کمک توزیع وایبل

مطالعات پیشین نشان می‌دهد که توزیع وایبل اغلب بهترین برازش را برای داده‌های طول عمر و فرسایش ارائه می‌کند. به منظور استفاده از توزیع وایبل نیاز به تعریف شاخص سلامتی^{۱۲} می‌باشد. به همین منظور نیاز به استفاده از پارامتری که وابسته به زمان کارکرد چرخ‌دنده، قابل اندازه‌گیری و دچار تغییر در اثر سایش می‌باشد. به همین منظور در این پژوهش میزان تغییر دامنه دومین راهمونیک که بیانگر میزان افزایش دامنه باندهای جانبی در فرکانس درگیری چرخ‌دنده می‌باشد، به عنوان شاخص سلامتی تعریف گردید. روند تغییرات دامنه دومین راهمونیک در طول زمان گویای چگونگی پیشرفت فرایند سایش است. مطابق با چارت ارائه شده با گذشت زمان اعمال بار متغیر (از وضعیت بدون بار به بارگذاری تصادفی با مکانیزم لنگ و فنر) مقدار دامنه ذکر شده تغییرات معناداری داشته است. افزایش تدریجی دامنه نشان‌دهنده تشدید ناهمواری و صدای ناشی از عیوب نوپدید در دندانه‌های چرخ دنده است. مطابق با یافته‌های این پژوهش، ویژگی استخراج شده از کپستروم سیگنال صوتی می‌تواند روند پیشرفت سایش را به خوبی منعکس کنند. بر همین اساس ابتدا با برازش توزیع وایبل بر داده‌های بدست آمده از شاخص سلامتی پارامتر شکل توزیع وایبل محاسبه گردید. این مقدار با توجه به داده‌های ورودی برابر عدد ۱/۰۰۱ بدست آمد. سپس با استفاده از مقدار سایش مجاز (در این پژوهش این مقدار به اندازه ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است)، مقدار پارامتر مقیاس عدد ۲۷۳۴۵/۰۳ بدست آمد.

¹¹ Root Mean Square

¹² Health Index



شکل ۶ نمایش توزیع وایبل برازش شده بر داده‌های شاخص سلامتی

سپس با استفاده از تابع توزیع جمع‌ی (CDF^{۱۳}) نسبت به محاسبه باقیمانده عمر چرخ‌دنده تا زمان رسیدن به سایش مجاز اقدام گردید که ۸۰ ساعت بدست آمد که با داده تجربی نیز همخوانی دارد.

تقدیر و تشکر

بدینوسیله از حمایت‌های شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو)، که نهایت همکاری در انجام این تحقیق را داشته‌اند کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

- [1] M. Vishwakarma, R. Purohit, V. Harshlata, and P. Rajput, "Vibration Analysis & Condition Monitoring for Rotating Machines: A Review," *Mater Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 2659–2664, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.02.140.
- [2] X. Liang, M. J. Zuo, and Z. Feng, "Dynamic modeling of gearbox faults: A review," *Mech Syst Signal Process.*, vol. 98, pp. 852–876, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ymssp.2017.05.024.
- [3] G. E. Totten *et al.*, "ASM Handbook W Volume 18 Friction, Lubrication, and Wear Technology Volume Editor Division Editors ASM International Staff Editorial Assistance," *ASM Handbook*, vol. 18, p. 21, 2017, Accessed: Jun. 14, 2024. [Online]. Available: www.asminternational.org
- [4] K. Feng *et al.*, "Vibration-based updating of wear prediction for spur gears," *Wear*, vol. 426–427, no. September 2018, pp. 1410–1415, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.01.017.
- [5] T. Osman and P. Velez, "Static and dynamic simulations of mild abrasive wear in wide-faced solid spur and helical gears," *Mech Mach Theory*, vol. 45, no. 6, pp. 911–924, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2010.01.003.
- [6] J. Wojnarowski and V. Onishchenko, "Tooth wear effects on spur gear dynamics," *Mech Mach Theory*, vol. 38, no. 2, pp. 161–178, Feb. 2003, doi: 10.1016/S0094-114X(02)00091-5.
- [7] N. Gebraeel, M. Lawley, R. Liu, and V. Parmeshwaran, "Residual Life Predictions From Vibration-Based Degradation Signals: A Neural Network Approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 3, pp. 694–700, Jun. 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.824875.
- [8] J. Ren and H. Yuan, "A Dynamic Wear Prediction Model for Studying the Interactions between Surface Wear and Dynamic Response of Spur Gears," *Coatings 2022, Vol. 12, Page 1250*, vol. 12, no. 9, p. 1250, Aug. 2022, doi: 10.3390/COATINGS12091250.
- [9] A. Johannssen, N. Chukhrova, A. El-Raheem, M. Abd El-Raheem, and M. Hosny, "On the Distribution of the Random Sum and Linear Combination of Independent Exponentiated Exponential Random Variables," *Symmetry 2025, Vol. 17, Page 200*, vol. 17, no. 2, p. 200, Jan. 2025, doi: 10.3390/SYM17020200.
- [10] Z. Shi *et al.*, "Zonal Planning for a Large-Scale Distribution Network Considering Reliability," *Processes*, vol. 13, no. 2, pp. 354–354, Jan. 2025, doi: 10.3390/PR13020354.
- [11] Z. Talebi, M. H. Sadeghi, and M. M. Ettefagh, "Estimating the Remaining Useful Life of Bearings Using Weibull Function Fitting on IMF," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, no. 1, pp. 105–122, 2025, doi: 10.22060/mej.2025.23526.7776.

¹³ Cumulative Distribution Function

- [12] G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer, A. Hess, and B. Wu, *Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006. doi: 10.1002/9780470117842.
- [13] K. Shin and J. Hammond, *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. Wiley, 2008. [Online]. Available: <https://books.google.com/books?id=Lukr9uCCQKYC>

Estimation of the remaining useful life of a simple gear using acoustic signals and Weibull distribution

Mehdi Zamani¹, Mohammad Aboonajmi^{2*}, Seyyed Reza Hassabeygi³, Seyyed Ashkan Moosavian⁴

^{1,2,3} Dept of Agrotechnology, College of Aburaihan, University of Tehran, , Iran.

⁴ Department of Agricultural Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran..

* Corresponding author e-mail: abonajmi@ut.ac.ir

The estimation of the remaining useful life (RUL) of gearbox components has become a critical topic in both industrial applications and academic research. Among the various approaches, acoustic signal analysis has emerged as a particularly effective technique for monitoring gear degradation. In the present study, a system was designed and developed for predicting the remaining useful life of gears based on sound analysis. Accordingly, the system was operated for a total of 60 hours in two stages. Initially, in order to eliminate possible defects resulting from manufacturing and assembly, the system was run for 10 hours under no-load conditions. Subsequently, it was operated for 50 hours under a resistive load applied to the gear. The gear profile was measured using a Coordinate Measuring Machine (CMM) both before the test and after the intended operational period. The results indicated a profile wear of 0.15 mm. Acoustic data were collected from the beginning of operation up to the point where the gear wear reached 0.15 mm. A health index was defined based on the variation in sideband amplitude levels. Using the Weibull distribution, the shape parameter was calculated as 1.001 and the scale parameter as 27345.03. Based on the cumulative distribution function, the remaining useful life of the developed system until reaching a wear level of 0.20 mm was estimated to be 80 hours.

Key words: Acoustic signals; Weibull distribution; Remaining useful life; Gearbox.