



## تحلیل علامت‌های ارتعاشی حوزه زمان تسمه زمانبندی تحت عیوب مختلف به کمک داده کاوی

مقداد خزایی<sup>۱</sup>، برات قبادیان<sup>۲\*</sup>، احمد بناکار<sup>۳</sup>، مصطفی میرسلیم<sup>۴</sup>، سعید مینایی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی مکانیک زیست سامانه، دانشگاه تربیت مدرس، [m.khazae@modares.ac.ir](mailto:m.khazae@modares.ac.ir)

<sup>۲</sup> گروه مهندسی مکانیک زیست سامانه، دانشگاه تربیت مدرس، [gghobadib@modares.ac.ir](mailto:gghobadib@modares.ac.ir)

<sup>۳</sup> گروه مهندسی مکانیک زیست سامانه، دانشگاه تربیت مدرس، [ah\\_banakar@modares.ac.ir](mailto:ah_banakar@modares.ac.ir)

<sup>۴</sup> گروه مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیر کبیر، [mirsalim@csr.ir](mailto:mirsalim@csr.ir)

<sup>۵</sup> گروه مهندسی مکانیک زیست سامانه، دانشگاه تربیت مدرس، [minaee@modares.ac.ir](mailto:minaee@modares.ac.ir)

\* نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۹۹۹۱۸۳۴۱

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۳ اسفند ۱۳۹۳

پذیرش: ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۴

کلیدواژه‌ها:

تسمه زمانبندی

عیب‌یابی و طبقه‌بندی عیوب

تحلیل ارتعاشات

داده کاوی

شبکه عصبی مصنوعی

### چکیده

در این پژوهش سامانه‌ای خودکار و هوشمند برای تشخیص عیوب رایج تسمه زمانبندی بر اساس علامت‌های ارتعاشات آن معرفی شده است. نوع عیوب بررسی شده، داده‌پردازی در شرایط واقعی موتور با احتراق و استفاده از روش‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش است. بدین منظور ارتعاشات تسمه زمانبندی در ۴ حالت سالم، ترک بر روی دندانه، ترک در پشت تسمه و جدایش دندانه از ریشه تسمه زمانبندی تحصیل شد. به منظور داده‌کاوی از علامت‌های ارتعاشی ۶ تابع ویژگی انحراف از معیار، کورتوسیس، اسکویونس، شاخص ضربه، شاخص شکل و شاخص کرسر که هریک از آنها بیانگر نوعی از رفتارهای یک علامت هستند؛ استخراج شدند. پس از استخراج مشخصه‌های هر عیب در مرحله داده‌کاوی، از طبقه‌بند شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص هوشمند تسمه‌های معیوب استفاده شد. شبکه عصبی توسط ۶۰ درصد از مشخصه‌های استخراج شده از علامت‌ها، آموزش و سپس توسط مابقی آنها آزمون شد. نتایج نشان داد ارتعاشات تسمه در هنگام بروز عیب آشفتگی می‌شوند و رفتار ضربه‌ای شدیدتر از خود نشان می‌دهند. همچنین شبکه عصبی توانست با دقت ۹۰٪ عیوب تسمه زمانبندی را تشخیص دهد و طبقه‌بندی کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از علامت‌های ارتعاشی برای تشخیص عیوب ریز تسمه زمانبندی و پیشگیری از پارگی کامل آن مؤثر بوده است. همچنین نتایج نشان داد تلفیق روش‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی ترکیب توانمند و موفقی برای عیب‌یابی تسمه زمانبندی است.



تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

## ۱- مقدمه

در سال ۱۹۵۴ میلادی تسمه زمانبندی برای نخستین بار در یک خودروی مسابقه به جای سامانه چرخ زنجیری برای رانش سامانه درپچه‌ها استفاده شد. از زمانی که این خودرو در سال ۱۹۵۶ قهرمان مسابقات رالی ملی آمریکا شد و کارشناسان یکی از دلایل برتری آن را استفاده از تسمه به جای زنجیر دانستند، استفاده از تسمه زمانبندی در خودروها آغاز شد و به سرعت گسترش یافت [۱].

اکنون بیش از ۵۰ سال از آغاز فرآیند جایگزینی تسمه‌های دنداندار با سامانه‌های چرخ زنجیری در موتور خودروها می‌گذرد و امروزه تقریباً تمام خودروهای رایج شهری از تسمه زمانبندی برای گرداندن سامانه محرک درپچه‌ها استفاده می‌کنند. محرک‌های تسمه‌ای میل بادامک خودروها از یک تسمه، یک تسمه سفت کن و تعدادی هرزگرد استفاده می‌گردد. تسمه سفت کن در واقع یک بازوی خارج از مرکز است که به وسیله نیروی فنر خود با وارد آوردن فشار کافی به تسمه، کشش آن را در محدوده مجاز تنظیم و از لغزش و پرش آن از روی پولی‌ها جلوگیری می‌کند. از هرزگردها نیز برای افزایش زاویه پوشش<sup>۱</sup> تسمه روی پولی‌ها استفاده می‌شود [۲].

تسمه زمانبندی از دو جزء اصلی لاستیک<sup>۲</sup> و عضوهای کششی<sup>۳</sup> و دو عضو فرعی پوشش رویی<sup>۴</sup> و پوشش پشتی<sup>۵</sup> تشکیل شده است. وظیفه لاستیک شکل دادن به دنده‌ها و انتقال دقیق توان است. همچنین مستهلک نمودن ارتعاشات و انعطاف‌پذیری در مقابل تغییر شکل‌های ناگهانی از وظایف دیگر لاستیک است. عضوهای کششی نیز به نوبه خود وظیفه تحمل بارهای کششی وارد بر تسمه زمانبندی را بر عهده دارد. پوشش‌های رویی و پشتی نیز وظیفه حفاظت از اجزای اصلی در مقابل ضربه‌ها، اجسام خارجی، سایش سریع و تنش‌های حرارتی شدید را بر عهده دارند [۳].

وظیفه تسمه زمانبندی، انتقال توان از میل‌لنگ به میل بادامک یا میل بادامک‌هاست تا آنها نیز به نوبه خود باز و بسته شدن درپچه‌های ورود هوا و خروج دود را کنترل کنند. این انتقال قدرت می‌بایست به صورت دقیق انجام پذیرد. بدین معنا که مقدار توان لازم برای باز و بسته کردن درپچه‌ها از طریق میل بادامک مورد نیاز است، بی‌کم و کاست و در هر لحظه تأمین گردد. همچنین با توجه به حساسیت شدید موتور به لحظه باز و بسته شدن و مقدار باز و بسته بودن درپچه‌ها، هرگونه انتقال با تأخیر توان ناشی از لغزش، باعث به هم خوردن تنظیم زمانبندی موتور گشته و صدمات جدی به آن وارد خواهد ساخت [۴]. استفاده از تسمه‌ها در سامانه زمانبندی درپچه‌ها و سامانه محرک متعلقات جانبی مزایای غیر قابل انکاری دارد: از این

مزایا می‌توان ارزانتر بودن نسبت به زنجیر، صدای کمتر، قابلیت عملکرد در سرعت‌های تندتر، استهلاک کمتر، عدم نیاز به روانکاری و مانند آنها را نام برد [۵]. اما سامانه‌های تسمه‌ای در مقایسه با سامانه چرخ تسمه‌ای دارای مشکل بزرگی به نام قابلیت اطمینان کمتر هستند. بدین معنا که سامانه‌های چرخ تسمه‌ای به ندرت خارج از پیش‌بینی‌های برنامه‌ریزی شده دچار خرابی و شکست می‌شوند. این در حالی است که تسمه‌ها در برخی موارد در حالی که نصف عمر برنامه‌ریزی شده را نیز طی نکرده‌اند، دچار پارگی یا لغزش فراوان ناشی از افزایش طول شده و زیان‌های بزرگی را به بار می‌آورند [۶]. همچنین تسمه‌ها در طول زمان و در نتیجه تأثیرات محیط دچار تغییر در متغیرهای حساسی مانند سختی یا مقدار جرم می‌شوند که این عیوب در سامانه‌های چرخ تسمه‌ای رایج نیستند [۷ و ۸]. بنابراین کاملاً ضروری به نظر می‌رسد که راه حلی جست و جو شود تا علاوه بر حفظ مزایای تسمه زمانبندی، بتوان بر این مشکلات غلبه نمود و یا دست کم تأثیر آنها را کاهش دهد. بلاندر<sup>۶</sup> و همکاران روشی به ثبت رساندند که بر اساس اندازه‌گیری مکان زاویه‌ای پولی میل‌لنگ و میل بادامک و پایش تغییرات اختلاف فاز بین این دو زاویه، صحت عملکرد سامانه‌های زمانبندی اعم از تسمه و یا زنجیر را بسنجد [۹]. اختراع-های مشابه توسط ادوارد<sup>۷</sup> [۱۰] و احمد<sup>۸</sup> [۱۱] برای تشخیص نقص در عملکرد تسمه زمانبندی به ثبت رسیده است.

چایلدز<sup>۹</sup> و همکاران به معرفی عوامل مؤثر بر عمر تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش قوانینی برای طراحی بهتر تسمه زمانبندی به منظور جلوگیری از خرابی زودرس آن معرفی شد [۱۲]. در پژوهشی دالگارنو<sup>۱۰</sup> و همکاران نشان دادند که سختی تسمه زمانبندی در طول زمان و متناسب با مقدار باری که تسمه انتقال می‌دهد، کاهش می‌یابد [۸].

باسو<sup>۱۱</sup> در پژوهشی به تشخیص کاهش سختی تسمه زمانبندی به کمک پایش ارتعاشات پولی‌های آن پرداخت. در این پژوهش ارتباطی بین سختی و ارتعاشات پولی تسمه استنتاج گردید و بر اساس آن سلامت تسمه از طریق اندازه‌گیری سختی آن سنجیده شد [۱۳]. سالزمن<sup>۱۲</sup> و همکاران عمر تسمه زمانبندی را طی آزمون دوام شتاب‌داری بررسی کردند. در این پژوهش پس از اجرای چند آزمون دوام، الگویی احتمالاتی برای پیش‌بینی احتمال خرابی تسمه در شرایط مختلف عملکرد آن معرفی شد [۱۴]. کالگاری<sup>۱۳</sup> و همکاران رفتار دینامیکی تسمه زمانبندی را شبیه‌سازی کردند. در این پژوهش

6 Blander

7 Edward

8 Ahmed

9 Childs

10 Dalgarno

11 basso

12 Salzman

13 Callegari

1 Wrap angel

2 Rubber

3 Cords

4 Facing fabric

5 Back fabric

اساس علامت‌های ارتعاش، داده‌کاوی و در نهایت شبکه عصبی مصنوعی به منظور تشخیص عیوب ریز تسمه زمانبندی و در برای جلوگیری از پارگی و تخریب ناگهانی آن طراحی و به کار گرفته شد.

## ۲- میز آزمون

### ۲-۱- بستر آزمایشات

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در واحد آزمایشگاه شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) اجرا شد. از موتوری احتراق داخلی برای اجرای آزمایشات استفاده شد. موتور مورد استفاده دارای ۴ استوانه، ۱۶ دریچه و حجم ۱٫۶ لیتر بود. این موتور در سرعت ۵۵۰۰ دور در دقیقه توانایی تولید ۱۱۰ کیلو وات را دارد. تسمه در حالات مختلف روی موتور نصب و ارتعاشات آن ثبت شد. در تلاش برای شبیه‌سازی شرایط واقعی تسمه زمانبندی در خودرو از موتور برقی برای گرداندن موتور استفاده نشد، بلکه موتور دارای احتراق بود و با نیروی حاصل از آن به گردش در آمد. در این شرایط لازم است تا سرعت و گشتاور موتور پایش شود. بدین منظور از لگام ترمز جریان گردابی برای پایش موتور استفاده شد. این لگام ترمز توانایی پایش دور موتور با دقت ۱۰ دور در دقیقه را دارد. متغیرهای مختلف موتور مانند دما و فشار آب، روغن و سوخت؛ گشتاور، دور و توان؛ بازده تنفسی و مواردی از این دست کاملاً تحت نظر و مشابه شرایط واقعی عملکردی موتور روی خودرو بود تا بدین ترتیب شرایط عملکردی تسمه زمانبندی به دقت شبیه‌سازی شود. شکل ۱ نمایی از میز آزمون این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۱: بستر آزمایش‌ها در پژوهش حاضر

از یک حسگر لیزری فاصله‌سنج (LDV) برای ثبت ارتعاشات تسمه در حالات مختلف استفاده شد. بر اساس منابع، استفاده از این نوع حسگر بهترین انتخاب برای اندازه‌گیری دقیق ارتعاشات تسمه‌هاست [۱۸] و [۲۲]. جدول ۱ مشخصات حسگر استفاده شده برای اندازه‌گیری ارتعاشات تسمه زمانبندی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

از طریق شبیه‌سازی دینامیکی تسمه به پایش رفتار آن در شرایط مختلف پرداخته شد [۱۵].

استوچانویچ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۹) نیز رفتار دینامیکی تسمه از دیدگاه تماس آن با پولی‌ها و نیروی اصطکاکی بین آن‌ها را بررسی نمودند. افزایش و کاهش نیروی اصطکاک بین تسمه و پولی‌ها از عوامل مهم در بروز خرابی در تسمه‌هاست [۱۶]. جعفری و همکاران تغییرات متغیرهای عملکردی تسمه متعلقات موتور احتراق داخلی را با آزمونهای تجربی بررسی نمودند. در این پژوهش شاخص‌هایی همچون ارتعاشات، سختی، جرم، طول کشش دینامیکی و استاتیکی تسمه متعلقات موتور طی آزمون دوام ۶۰۰ ساعت اندازه‌گیری و پایش شد [۱۷].

یوکار<sup>۲</sup> و همکاران با استفاده از حسگرهای لیزری به عیب‌یابی تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش تغییرات فیزیکی و ساختاری تسمه زمانبندی توسط حسگرهای لیزری تشخیص داده شد [۱۸].

خرابی و همکاران به تشخیص و طبقه‌بندی شرایط محیطی نامناسب مؤثر بر عملکرد تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش از علامت‌های ارتعاشی برای پایش وضعیت تسمه زمانبندی استفاده شد و روش شبکه عصبی مصنوعی نیز برای تشخیص و طبقه‌بندی حالات کاری تسمه زمانبندی به کار گرفته شد [۱۹]. در این پژوهش به ارائه راهکاری نوین و هوشمند برای تشخیص بروز عیوب ریز در تسمه زمانبندی پرداخته شده است.

به منظور گسترش دایره عیوب و دقت بیشتر در تشخیص آنها، از علامت‌های ارتعاشی استفاده شد. ابتدا پس از پایش شرایط محیطی (مانند دما، رطوبت و غیره) موتور روشن و داده‌برداری آغاز شد. ارتعاشات تسمه در ۴ حالت ثبت شد که عبارتند از حالات: سالم، ترک روی دندانه‌های تسمه، ترک در پشت تسمه و جدایش دندانه‌ها از ریشه تسمه. در مرحله داده‌کاوی ۶ تابع ویژگی آماری با نام‌های انحراف از معیار، کورتوسیس، اسکینوس، شاخص ضربه، شاخص شکل و شاخص کرسست از علامت‌های ارتعاشی استخراج شد. هدف از استخراج این ویژگی‌ها کاهش ابعاد داده‌ها به منظور تجزیه و تحلیل آسان‌تر و همچنین پایش دقیق‌تر رفتار ارتعاشی تسمه زمانبندی در حالات مختلف بود [۲۰ و ۲۱]. بدین ترتیب مشخصه‌های بروز عیب در تسمه زمانبندی از علامت‌های ارتعاشی استخراج شد. این ویژگی‌ها به عنوان ورودی طبقه‌بند به منظور تشخیص هوشمند عیوب به کار گرفته شدند.

از روش شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص و طبقه‌بندی عیوب تسمه زمانبندی استفاده شد. بدین معنا که شبکه عصبی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های هر حالت، به تشخیص آن حالت پرداخت. بدین ترتیب در این پژوهش سامانه‌ای هوشمند بر

<sup>1</sup> Stojanovic

<sup>2</sup> Ucar

عیب لازم است شرایط دمایی و حرارتی عملکرد موتور و تسمه بررسی و بهبود یابد. شکل ۳ تصویری از این عیب را نشان می‌دهد.



شکل ۲: ترک روی دندان تسمه زمانبندی



شکل ۳: ترک در پشت تسمه زمانبندی

۲-۲-۳- جدایش دندان از ریشه تسمه زمانبندی این عیب شدیدترین و خطرناک‌ترین عیب پیش از گسیختگی کامل تسمه زمانبندی به شمار می‌رود. در صورت مشاهده این عیب باید فوراً نسبت به تعویض تسمه زمانبندی اقدام نمود. عامل اصلی جدایش دندان از ریشه نقص موادی و ساختاری تسمه زمانبندی است. یعنی از مواد خوب در ساخت تسمه زمانبندی استفاده نشده است و یا فرآیند باز پخت و استحکام بخشی به ارتباط بین اجزای تسمه به خوبی انجام نپذیرفته است [۳]. شکل ۴ تصویری از این عیب که در این پژوهش بررسی شده است را نمایش می‌دهد.

### ۳- ارتعاشات تسمه زمانبندی

ارتعاشات عمودی به حرکت تناوبی و نوسانی تسمه زمانبندی در جهت عمود بر راستای حرکت گفته می‌شود. ارتعاشات عمودی در تمامی سرعت‌ها وجود دارد، اما وقتی سرعت زاویه‌ای پولی‌ها بر بسامد طبیعی ساختار سامانه تسمه منطبق می‌شود، این نوع ارتعاشات بشدت افزایش می‌یابند. لذا به خصوص برای تجهیزاتی با سرعت ثابت لازم است تا سرعت‌های بحرانی تسمه شناسایی شوند و سرعت کاری آن‌ها با فاصله مناسبی از بسامدهای تشدید تسمه تنظیم شود. در خودروها به علت متغیر بودن سرعت این معضل چندان نمود پیدا

جدول ۱: مشخصات حسگر مورد استفاده در این پژوهش

نام و نوع دستگاه	wenglor: YP06MGVL80
گستره اندازه‌گیری	۲۰ میلی‌متر
دقت اندازه‌گیری	۵ میکرومتر
طول موج لیزر	۶۶۰ نانومتر
قطر شعاع نور	۰٫۵ میلی‌متر
نرخ داده‌برداری	۵۰۰۰ هرتز

## ۲-۲- عیوب رایج تسمه زمانبندی

در این پژوهش سه عیب مهم تسمه زمانبندی که عبارتند از: ترک روی دندان‌ها، ترک در پشت و جدایش دندان از ریشه تسمه بررسی شد. عیوب بررسی شده از رایج‌ترین عیوب در تسمه‌های زمانبندی هستند و در اغلب موارد گسیختگی و تخریب تسمه زمانبندی از این عیوب آغاز می‌شود. بدین معنا که وقتی به دلایل مختلف امکان پارگی و تخریب تسمه زمانبندی وجود دارد، فرآیند این تخریب با بروز یکی از عیوب یاد شده آغاز می‌شود.

بدین ترتیب با تشخیص زود هنگام این عیوب می‌توان پیش از پارگی کامل و ناگهانی تسمه زمانبندی که آسیب‌های شدیدی به موتور وارد خواهد آورد، صحت و سلامت آن را بررسی نمود و در صورتی که امکان تخریب آن وجود دارد هشدارهای لازم به کاربر داده شود. همچنین هر یک از عیوب یاد شده دارای ریشه‌های شناخته شده‌ای هستند. بنابراین با تشخیص نوع این عیوب، می‌توان به ریشه این عیوب نیز پی برد و اقدامات اصلاحی لازم برای جلوگیری از تکرار آنها را انجام داد. در ادامه به تشریح هر یک از عیوب بررسی شده در این پژوهش پرداخته شده است.

### ۲-۲-۱- ترک در دندان تسمه زمانبندی

ترک روی دندان‌ها از عیوب بسیار رایج تسمه زمانبندی است. بروز این عیب در وهله نخست به معنای آسیب دیدن پوشش رویی تسمه زمانبندی است. وجود سایش غیر عادی بین تسمه و پولی‌ها، استفاده از مواد نامناسب در ساخت پوشش تسمه، نیروی دینامیکی زیاد و کاهش سختی تسمه در طول زمان باعث بروز این مشکل می‌شود [۳ و ۸]. پس از بروز ترک روی دندان‌ها، رشد آن ادامه می‌یابد تا زمانی که منجر به گسیختگی کامل تسمه زمانبندی شود. شکل ۲ تسمه زمانبندی دارای این عیب که در این پژوهش بررسی شده است را نشان می‌دهد.

### ۲-۲-۲- ترک در پشت تسمه زمانبندی

بروز ترک در پشت تسمه زمانبندی بیش از هر عامل دیگر نتیجه تنش حرارتی غیر عادی اعم از گرما و سرمای شدید است. عملکرد تسمه زمانبندی تحت دماهای زیاد یا خیلی کم باعث افزایش سختی و مقاومت آن در برابر خمش روی پولی‌ها شده و در نتیجه گسیختگی جزئی و ترک شدن آن را در پی دارد [۲۳]. بروز ترک در پشت تسمه زمانبندی از عیوب خطرناک است و ممکن است به زودی گسترش یافته و تخریب آن را در پی داشته باشد. در صورت بروز این



است و از دیدگاه کمی اطلاعات چندان مفیدی را به دست نمی‌دهد، بلکه تنها از دیدگاه بصری و به صورت کیفی می‌توان اطلاعات کلی از آنها دریافت نمود.

بنابراین ضروری است که به نحوی اطلاعات مورد نیاز از علامت‌های خام استخراج شود. به فرآیند استخراج اطلاعات پنهان از محتوای یک علامت خام، داده‌کاوی گفته می‌شود [۲۴ و ۲۵]. داده‌کاوی معمولاً توسط استخراج یک نمونه توابع آماری به نام توابع ویژگی از علامت‌ها انجام می‌پذیرد. در این پژوهش از ۶ تابع ویژگی برای داده‌کاوی از علامت‌های ارتعاشی استفاده شد که در ادامه تشریح شده‌اند. در این معادلات  $M$  میانگین مقادیر یک علامت،  $N$  تعداد نقاط یک علامت و در نهایت  $x(n)$  مقادیر یک علامت در نقاط داده‌ای هستند.

انحراف از معیار<sup>۳</sup> از ویژگی‌های مهم یک علامت است که به نوعی پراکنندگی مقادیر یک علامت را نشان می‌دهد. انحراف از معیار علامت بدین شرح تعریف می‌گردد:

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - M)^2}{N}} \quad (1)$$

کورتوسیس<sup>۴</sup> نیز از دیگر شاخصه‌های مهمی است که رفتار خاصی از یک علامت را تشریح می‌کند. ویژگی کورتوسیس برای تشخیص عیوب ریز مانند ترک، سایش و لب‌پری مفید است [۲۶]. مقدار ویژگی کورتوسیس یک علامت بدین شرح تعریف می‌گردد [۲۷]:

$$KU = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - M)^4}{(N-1) * (STD)^4} \quad (2)$$

اسکیونس<sup>۵</sup> بیانگر مقدار چولگی یک علامت و از ویژگی‌های مهم آن به شمار می‌آید. اسکیونس یک علامت بدین شرح تعریف می‌گردد:

$$STD = \frac{\sum_{n=1}^N (x(n) - M)^3}{(N-1) * (STD)^3} \quad (3)$$

شاخص ضربه<sup>۶</sup> (IF)، شاخص شکل<sup>۷</sup> (SF) و شاخص کرس<sup>۸</sup> (CF) نیز برای یک علامت بدین شرح تعریف می‌گردند:

$$IF = \frac{\text{Max}(x(n))}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|} \quad (4)$$

$$SF = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n))^2}{N}}}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|} \quad (5)$$

$$CF = \frac{\text{Max}(x(n))}{\sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x(n))^2}{N}}} \quad (6)$$

نمی‌کند، اما به هر حال بهتر است از تسمه‌هایی در خودرو استفاده گردد که سرعت‌های بحرانی آن بر دور موتورهای پر استفاده (مانند توان بیشینه و یا دور هرزگرد) منطبق نباشد. ارتعاشات تسمه زمانبندی معمولاً به علت تحریک‌های ارتعاشی ناشی از تغییرات بار و عدم همسانگردی بین پولی‌ها اتفاق می‌افتند. همانگونه که گفته شد ارتعاشات عمودی تسمه در بسامدهای تشدید آن رخ می‌دهد.



محل جدایش دندانه از ریشه

شکل ۴: جدایش دندانه تسمه زمانبندی از ریشه آن

اثر چند گوشه‌ای<sup>۱</sup> یکی از اصلی‌ترین عوامل تولید صدا و ارتعاشات شدید در تسمه زمانبندی (و چرخ تسمه) می‌باشد. هنگامی که تعداد نقاط درگیری تسمه و چرخ تسمه کم باشد، باعث اختلاف سرعت خطی لحظه‌ای تسمه مابین نقاط درگیر شده و نقاط در حال درگیر شدن می‌شود. این اختلاف سرعت باعث نوسان شدید تسمه در هنگام درگیری آن با دندانه‌های پولی خود می‌شود. این نوسانات در مرکز فاصله بین دو پولی به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت بهتر یکی از عوامل اصلی ارتعاشات عمودی تسمه زمانبندی، اثر چندگوشه‌ای است.

در این پژوهش علامت‌های ارتعاشی تسمه زمانبندی در حوزه زمان تحلیل شدند. علامت‌های ارتعاشی در این پژوهش از نوع ارتعاشات فاصله‌ای<sup>۲</sup> بودند که توسط حسگر فاصله‌سنج لیزری اندازه‌گیری شدند. از هر حالت تسمه زمانبندی ۱۸۰ علامت ۲ ثانیه‌ای ثبت شد.

## ۴- داده کاوی

علامت‌های ارتعاشی در حوزه زمان دارای ابعاد بزرگی است و امکان استفاده مستقیم از آنها در روش‌های طبقه‌بندی هوشمند مانند شبکه عصبی وجود ندارد. همچنین تجزیه و تحلیل مقادیر این علامت‌ها دشوار

<sup>1</sup> Polygonal effect

<sup>2</sup> Displacement vibration

<sup>3</sup> Standard deviation (STD)

<sup>4</sup> Kurtosis (KU)

<sup>5</sup> Skewness (SK)

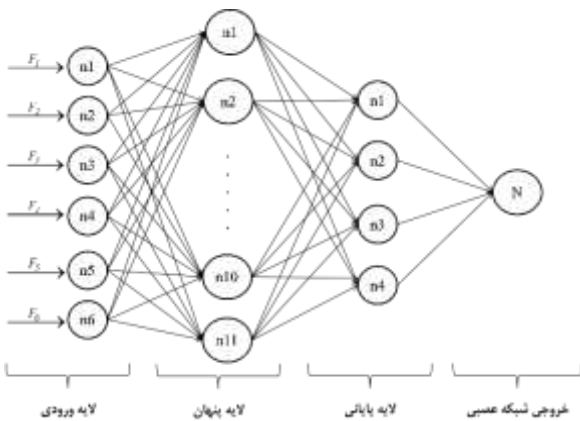
<sup>6</sup> Impulse factor (IF)

<sup>7</sup> Shape factor (SF)

<sup>8</sup> Crest factor (CF)

## ۵- شبکه عصبی مصنوعی<sup>۱</sup>

برای طراحی بهترین ساختار شبکه معمولاً از روش سعی و خطا استفاده می شود. بدین منظور هر شبکه با تعداد مختلف عصب در لایه میانی آموزش دیده و نتایج حاصله ثبت می گردد. در نهایت هر کدام از ساختارها که شبکه عصبی بهترین عملکرد در تشخیص عیوب تسمه زمانبندی را داشت، برنامه نویسی شد و در سامانه هوشمند عیب یابی از آن ساختار استفاده گردید. در این پژوهش تعداد عصب های لایه پنهان از ۳ به بعد بررسی شدند. بیشترین دقت طبقه بندی شبکه عصبی مصنوعی در تعداد ۱۱ عصب در لایه پنهان به دست آمد و پس از آن با افزایش عصب ها دقت عیب یابی افزایش نیافت. شکل ۵ نمای از ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد.



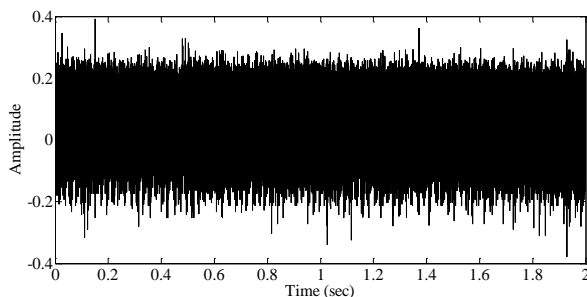
شکل ۵: ساختار شبکه عصبی استفاده شده

در این پژوهش از مجموع کل داده ها که ۱۸۰ علامت برای هر حالت تسمه بود، ۶۰ درصد (۱۰۸ علامت) برای آموزش، ۲۰ درصد برای ارزیابی (۳۶ علامت) و ۲۰ درصد (۳۶ علامت) باقیمانده نیز برای آزمون شبکه استفاده شد. داده های ارزیابی جهت جلوگیری از آموزش بیش از حد شبکه به کار می روند. در نهایت شبکه عصبی با بهترین ساختار انتخاب شده به تشخیص عیوب تسمه زمانبندی می پردازد.

## ۶- نتایج و بحث

### ۶-۱- علامت های ارتعاشی

شکل ۵ علامت ارتعاشی تسمه زمانبندی در حالت سالم را نشان می دهد. شکل های ۶، ۷ و ۸ نیز به ترتیب یک نمونه از علامت های ارتعاشی تسمه زمانبندی در حالت های ترک بر روی دندانه، ترک در پشت تسمه، و جدایش دندانه از ریشه را نشان می دهند.



شکل ۶: ارتعاشات تسمه زمانبندی در حالت سالم (H)

شبکه عصبی مصنوعی یکی از پرکاربردترین و رایج ترین روش های هوش مصنوعی است که امروزه کارآمدی و کاربردهای فراوان آن برکسی پوشیده نیست. یکی از حوزه های کاربردی مهم این طبقه بندی، تشخیص و طبقه بندی عیوب است. این روش بارها با موفقیت برای پایش وضعیت و عیب یابی سامانه های مکانیکی به کار گرفته شده است [۲۸ و ۲۹]. در این پژوهش از شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص و طبقه بندی عیوب تسمه استفاده شد.

امروزه از شبکه های عصبی به طور گسترده در مسائل مربوط به طبقه بندی استفاده می شود. در این گونه مسائل شبکه عصبی با داشتن ورودی ها و خروجی های مشخص باید تشخیص دهد که هر ورودی با کدام طبقه از خروجی های تعریف شده بیشترین تطابق را دارد.

در حال حاضر شبکه پرسپترون چند لایه در بسیاری از تحقیقات مربوط به مسائل طبقه بندی استفاده می شود. در شبکه های عصبی مورد استفاده در این پژوهش از روش آموزش با نظارت<sup>۲</sup> استفاده شد. در این نوع شبکه، در حین آموزش ورودی های مورد نظر به شبکه عصبی اعمال می شود و خروجی شبکه با خروجی مطلوب<sup>۳</sup> مقایسه می شود. اختلاف بین خروجی واقعی و خروجی مطلوب منجر به تولید علامت خطا می شود. هدف از آموزش شبکه به حداقل رساندن خطای تولید شده است. به حداقل رساندن خطا براساس تنظیم وزن های شبکه انجام می شود و مقدار محاسبات لازم برای حداقل نمودن خطا به شیوه آموزش شبکه بستگی دارد. در این پژوهش از شبکه عصبی پیش رونده با حلقه پس انتشار<sup>۴</sup> و شیوه آموزش لوببرگ-مارکوات<sup>۵</sup> استفاده شد. در این شیوه پس از محاسبه مقدار خطا در لایه خروجی مقادیر وزن ها در لایه پنهان برای کاهش خطا تنظیم می شوند.

ساختار شبکه انتخاب شده در این تحقیق شامل شبکه سه لایه ای بود. پس از پردازش علامت های ارتعاشی تسمه های سالم و معیوب در حوزه زمان، بردارهای ویژگی های استخراج شده به عنوان ورودی های شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور تشکیل ساختار شبکه ابتدا به ازای هر ویژگی یک عصب در لایه ورودی شبکه تعریف شد. بنابر این همانطور که پیشتر گفته شد ۶ بردار ویژگی از هر علامت ارتعاشی تسمه استخراج شد. همچنین به ازای هر یک از ۴ حالت ممکن در خروجی یعنی تسمه سالم، ترک روی دندانه، ترک در پشت تسمه و جدایش دندانه از ریشه، نیز یک عصب تعریف شد.

بنابر این ساختار شبکه عصبی  $4 * n * 6$  است.  $n$  نشان دهنده تعداد عصب های لایه میانی (لایه پنهان) است که در عملکرد شبکه تأثیر بسزایی دارند. برای به دست آوردن تعداد عصب مناسب در لایه میانی

<sup>1</sup> Artificial Neural Network

<sup>2</sup> Supervised Learning

<sup>3</sup> Targets

<sup>4</sup> Back Propagation

<sup>5</sup> Levenberg- Marquardt

هر چقدر انحراف معیار یک علامت بزرگتر باشد به معنای پراکندگی و اغتشاش بیشتر مقادیر یک علامت است. با دقت در جدول ۲ مشاهده می‌شود که بیشترین اغتشاش در علامت مربوط به عیب جدایش دندانان است. همچنین تأثیر ترک روی دندانان بر ارتعاشات تسمه زمانبندی بیشتر از ترک در پشت تسمه است. یعنی تأثیر ترک دندانان بر انحراف از معیار ارتعاشات تسمه زمانبندی بیشتر از تأثیر ترک در پشت دندانان است، چرا که مقدار ویژگی انحراف از معیار ارتعاشات تسمه زمانبندی در حالت ترک بر روی دندانان ۰,۱۲۸۷ است در حالی که مقدار مشابه آن در حالت ترک در پشت تسمه ۰,۱۰۶۷ است. همچنین تسمه در حالت سالم کمترین اغتشاش و انحراف را از خود نشان می‌دهد.

کورتوسیس تلفیقی از رفتار ضربه‌ای و دامنه‌ای یک علامت نشان می‌دهند. یعنی هر چقدر میانگین و مقدار مؤثر یک علامت کوچک و بیشینه دامنه آن بزرگ باشد، مقدار کورتوسیس افزایش می‌یابد. افزایش کورتوسیس به معنای بروز عیب شدیدتر در نمونه است.

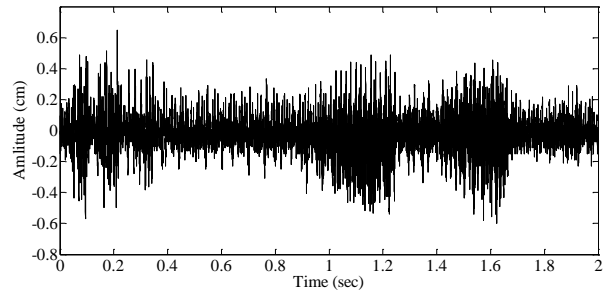
بر این اساس می‌توان گفت عیبی که بیشترین تأثیر منفی را بر عملکرد تسمه زمانبندی می‌گذارد جدایش دندانان از ریشه است. همچنین ترک خارجی و داخلی اثر مشابه دارند، اما تأثیر ترک خارجی بیشتر است. یعنی ترک خارجی و داخلی باعث افزایش کورتوسیس ارتعاشات تسمه زمانبندی می‌شوند اما ترک خارجی افزایش بیشتری را نشان می‌دهد.

زیاد بودن شاخص ضربه یک علامت، نشان دهنده رفتار ضربه‌ای شدیدتر و احتمالاً شدت عیب بیشتر آن است. برخی عیوب مانند ترک و شکستگی باعث افزایش شاخص ضربه علامت‌های حاصل از آن عیب می‌شوند. بر اساس جدول ۲ علامت‌های ارتعاشی در حالت جدایش دندانان تسمه بیشترین رفتار ضربه‌ای را نشان می‌دهند که این موضوع حاکی از شدت بیشتر و خطرناک‌تر بودن این عیب است. همچنین ترک روی دندانان نسبت به ترک در پشت باعث رفتار دینامیکی ضربه‌ای بیشتر تسمه زمانبندی می‌گردد.

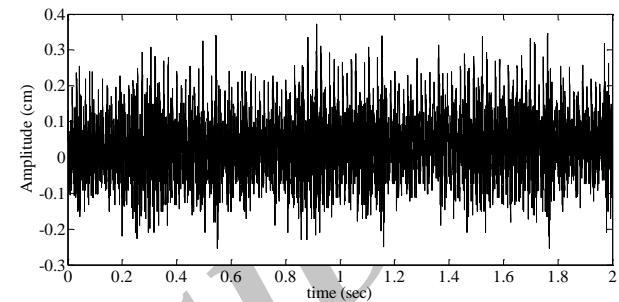
جدول ۳ مقدار بیشینه و کمینه هر ویژگی در هر یک از حالات بررسی شده را نشان می‌دهد. با دقت در جدول ۳ مشاهده می‌شود که مقادیر ویژگی‌های استخراج شده در حالات مختلف دارای پراکندگی کمی هستند و با یکدیگر تداخل ندارند. عدم تداخل محدوده ویژگی‌ها نشان از تفاوت علامت‌های ارتعاشی در حالات مختلف تسمه زمانبندی دارد.

### ۶-۳- تشخیص و طبقه‌بندی عیوب

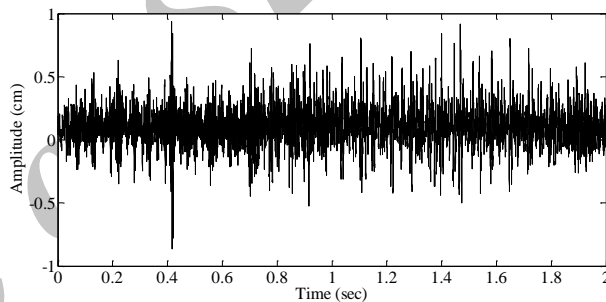
هر علامت ارتعاشی در واقع نشانه‌ای از بروز عیب در تسمه زمانبندی است. به همین ترتیب ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌ها نیز معرف رفتار آن علامت و مشخصه عیوب به شمار می‌روند. لذا از طریق ویژگی‌های استخراج شده در مرحله داده کاوی می‌توان به تشخیص علامت‌های هر حالت و در نهایت تشخیص عیوب تسمه زمانبندی پرداخت.



شکل ۷: ارتعاشات تسمه در حالت ترک بر روی دندانان (TC)



شکل ۸: ارتعاشات تسمه در حالت ترک در پشت تسمه (BC)



شکل ۹: ارتعاشات تسمه در حالت جدایش دندانان از ریشه (SR)

### ۶-۲- داده کاوی از علامت‌ها

جدول ۲ ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های ارتعاشی تسمه زمانبندی در حالات مختلف را نشان می‌دهد. همانگونه که گفته شد از هر یک از ۱۸۰ علامت ارتعاشی مربوط به هر حالت از تسمه زمانبندی، ۶ ویژگی استخراج شد. در جدول ۲ مقادیر میانگین این ویژگی‌ها برای هر ۱۸۰ علامت هر کلاس آورده شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های ارتعاشی

ویژگی	حالت تسمه زمانبندی			
	H	TC	BC	SR
STD	۰,۰۷۰۸	۰,۱۲۸۷	۰,۱۰۶۷	۰,۱۴۳۷
KU	۳,۲۰۷۳	۳,۹۶۰۲	۴,۵۶۸۷	۶,۷۳۶۴
SK	۰,۵۲۲۲	۰,۳۵۰۶	۰,۲۲۹۸	۰,۲۵۲۶
IF	۱۸,۵۷۱۶	۳۹,۰۴۷۶	۲۳,۲۰۱۷	۴۷,۶۱۹
SF	۰,۱۹۳۸	۰,۴۳۴۷	۰,۳۶۴۴	۱,۰۱۲۷
CF	۴,۲۴۹۴	۵,۲۳۴۲	۵,۸۲۳۷	۶,۹۵۷۹

و ۹۰٫۶۳ درصد در داده‌های آزمون عیوب رایج تسمه زمانبندی را تشخیص دهد.

نتایج به دست آمده نشان از قدرت و دقت بالای سامانه طراحی شده در این پژوهش برای تشخیص عیوب تسمه زمانبندی دارد. نتایج نشان می‌دهد که شبکه عصبی ضمن اینکه بیشترین دقت را در تشخیص تسمه‌های سالم دارد، کمترین اشتباه را در اطلاق حالت سالم به تسمه‌های معیوب دارد. یعنی اگرچه سامانه طبقه‌بندی بین عیوب به خصوص ترک‌های داخلی و خارجی با دقت کمتری عمل نموده است، اما خطای آن در تشخیص بین این دو حالت بوده است و نه اینکه تسمه معیوب را سالم تشخیص دهد. این یکی از مزایای مهم این سامانه به شمار می‌رود، چرا که تشخیص اشتباه یک تسمه معیوب به عنوان تسمه سالم ممکن است باعث وارد آمدن زیان اساسی به موتور گردد.

بر اساس جدول‌های ۴ و ۵ بیشترین خطای شبکه عصبی نیز در تشخیص بین دو حالت ترک داخلی و ترک خارجی بوده است که این موضوع به علت شباهت رفتار ارتعاشی تسمه در این دو حالت است. با توجه به جدول ۲ نیز این نتایج تایید می‌گردد چرا که مشاهده می‌شود که مقادیر ویژگی‌های استخراج شده از این دو حالت به یکدیگر نزدیک‌تر از حالات دیگر هستند. عیب جدایش دندانه نیز با توجه به تفاوت ذاتی و بیشتر آن با دیگر حالت‌ها با دقت بیشتری تشخیص داده شده است. نتایج جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که رفتار ارتعاشی تسمه در حالت جدایش دندانه به ترک داخلی روی دندانه تسمه زمانبندی شبیه‌تر از ترک خارجی می‌باشد.

در جدول‌های ۴ و ۵ هنگامی که حالت واقعی تسمه یکی از ترک‌های داخلی و خارجی بوده است، بیشترین خطای شبکه مربوط به تشخیص دیگر نوع ترک بوده است. یعنی رفتار ارتعاشی دو ترک به یکدیگر بسیار شبیه بوده است، چرا که شبکه عصبی در تشخیص آنها بیشترین خطا را دارد. همچنین هنگامی که حالت واقعی تسمه زمانبندی جدایش دندانه از ریشه بوده است، بیشترین خطای شبکه مربوط به تشخیص حالت ترک در پشت تسمه است. یعنی رفتار ارتعاشی تسمه در حالت جدایش دندانه از ریشه به ترک خارجی شبیه‌تر از ترک داخلی است.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سامانه‌ای هوشمند برای تشخیص و طبقه‌بندی عیوب رایج تسمه زمانبندی موتور احتراقی معرفی شد است. سامانه عیب‌یابی معرفی شده در این پژوهش بر اساس علامت‌های ارتعاشی تسمه- زمانبندی، روش‌های داده‌کاوی و استخراج ویژگی و در نهایت استفاده از طبقه‌بند شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد می‌توان عیوب تسمه زمانبندی را با دقت بیش از ۹۰ درصد تشخیص داد که حاکی از توانمندی و مؤثر بودن روش معرفی شده در عیب‌یابی تسمه زمانبندی موتور احتراقی می‌باشد.

بنابراین در این پژوهش از ویژگی‌های استخراج شده به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی برای تشخیص و طبقه‌بندی هوشمند و خودکار عیوب استفاده شد. جدول ۴ نحوه اغتشاش شبکه عصبی در تشخیص عیوب تسمه زمانبندی در داده‌های آموزش را نشان می‌دهد. جدول ۵ نیز نحوه اغتشاش شبکه عصبی مصنوعی برای داده‌های آزمون را نشان می‌دهد.

جدول ۳: محدوده و پراکندگی ویژگی‌های استخراج شده

ویژگی	حالت تسمه زمانبندی				
	H	TC	BC	SR	
STD	بیشینه	۰٫۰۷۳۴	۰٫۱۳۱۶	۰٫۱۱۲۹	۰٫۱۴۵۲
	کمینه	۰٫۰۶۸۷	۰٫۱۲۵۳	۰٫۰۹۶۴۴	۰٫۱۴۱۰
KU	بیشینه	۳٫۴۷۴۷	۴٫۲۲۳۴	۴٫۷۹۱۳	۶٫۹۵۱۷
	کمینه	۲٫۸۵۸۹	۳٫۷۸۱۵	۴٫۳۱۹۸	۶٫۵۶۳۸
SK	بیشینه	۰٫۵۸۷۱	۰٫۳۹۲۷	۰٫۲۶۸۱	۰٫۲۸۱۹
	کمینه	۰٫۴۸۳۷	۰٫۳۱۷۹	۰٫۱۹۳۵	۰٫۲۳۵۲
IF	بیشینه	۲۰٫۲۳۸۱	۴۱٫۸۱۳۶	۲۸٫۲۶۵۵	۵۵٫۸۴۳۲
	کمینه	۱۵٫۲۶۴۳	۳۷٫۸۱۳۶	۱۸٫۸۹۱۱	۴۳٫۲۸۱۷
SF	بیشینه	۰٫۲۲۵۴	۰٫۵۶۱۳	۰٫۳۹۶۷	۱٫۳۶۱۷
	کمینه	۰٫۱۶۷۹	۰٫۳۸۷۱	۰٫۳۵۴۹	۰٫۸۶۹۱
CF	بیشینه	۴٫۵۳۹۱	۵٫۵۵۳۹	۶٫۱۹۳۴	۷٫۲۳۸۴
	کمینه	۳٫۹۳۸۲	۴٫۹۶۷۵	۵٫۵۲۸۴	۶٫۷۱۹۳

جدول ۴: دقت شبکه عصبی مصنوعی در داده‌های آموزش

دقت	خروجی شبکه عصبی				حالت واقعی تسمه
	SR	BC	TC	H	
%۹۷٫۲۲	۰	۲	۱	۱۰۵	H
%۸۷٫۹۶	۳	۹	۹۵	۱	TC
%۹۰٫۷۴	۲	۹۸	۸	۰	BC
%۹۴٫۴۴	۱۰۲	۴	۲	۰	SR
دقت میانگین ۹۲٫۵۹ درصد					

جدول ۵: دقت شبکه عصبی مصنوعی در داده‌های آزمون

دقت	خروجی شبکه عصبی				حالت واقعی تسمه
	SR	BC	TC	H	
%۹۵٫۸۳	۰	۲	۱	۶۹	H
%۸۸٫۸۹	۲	۵	۶۴	۱	TC
%۸۶٫۱۱	۳	۶۲	۶	۱	BC
%۹۱٫۶۷	۶۶	۴	۲	۰	SR
دقت میانگین ۹۰٫۶۳ درصد					

با دقت در جدول‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود که طبقه‌بند شبکه عصبی در این پژوهش توانسته است با دقت ۹۲٫۵۹ درصد در داده‌های آموزش



[15] M. Callegari, F. Cannella, and G. Ferri, Multi-body modelling of timing belt dynamics, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, vol. 217, no. 1, pp. 63-75, 2003

[16] B. Stojanović, N. Miloradović, and M. Blagojević, Analysis of tribological processes at timing belt's tooth flank, Tribology in industry, vol. 31, no. 3, pp. 53-58, 2009

[17] S. M. Jafari, M. Kazaemi, M. Roozban, and S. A. Moosavian, Health monitoring and performance investigation of accessory belt in an internal combustion engine during critical speeds, The Journal of Engine Research, vol. 25, pp. 3-14, 2012

[18] M. Ucar, R. E. Ergun, and A. Cengiz, A Novel Failure Diagnosis System Design for Automotive Timing Belts, Experimental Techniques, pp. 1-6, 2012

[19] M. Khazaei, A. Banakar, B. Ghobadian, M. Mirsalim, S. M. Jafari, and S. Javan, Diagnosis and classification of effective abnormal environmental conditions on timing belt performance based on vibration signals, The Journal of Engine Research, vol. 31, pp. 33-41, 2013

[20] K. R. Al-Balushi and B. Samanta, Gear fault diagnosis using energy-based features of acoustic emission signals, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 216, no. 3, pp. 249-263, 2002

[21] M. Khazaei, H. Ahmadi, M. Omid, A. Banakar, and A. Moosavian, Feature-level fusion based on wavelet transform and artificial neural network for fault diagnosis of planetary gearbox using acoustic and vibration signals, Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, vol. 55, no. 6, pp. 323-330, 2013

[22] P. Castellini, E. Cupido, N. Paone, and E. Tomasini, Tracking laser Doppler vibrometer for linear motion: application to a timing belt, in Fourth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications, 2000

[23] Omar A. Elmaraghi, Integrated multibody dynamics and fatigue models for predicting the fatigue life of poly-v ribbed belts, Purdue University, 2013

[24] J. Yang, J. Yang, D. Zhang, and J. Lu, Feature fusion: parallel strategy vs. serial strategy, Pattern Recognition, vol. 36, no. 6, pp. 1369-1381, 2003

[25] Q. Miao and V. Makis, Condition monitoring and classification of rotating machinery using wavelets and hidden Markov models, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, no. 2, pp. 840-855, 2007

[26] T. Barszcz and R. B. Randall, Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 23, no. 4, pp. 1352-1365, 2009

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از کارمندان شرکت محترم تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به خصوص واحد آزمایشگاه آن برای حمایت همه جانبه از این پژوهش نهایت سپاس را دارند.

## مراجع و منابع

[1] O. Ritch, "SMALL BORE, BIG PULL! Sports Cars Illustrated, 1957

[2] R. Van Basshuysen and F. Schäfer, Internal combustion engine handbook. SAE Technical Paper, 2004

[3] R. Perneder and I. Osborne, Handbook Timing Belts. Springer, 2012

[4] T. Koyama and K. Marshek, Toothed belt drives—past, present and future, Mechanism and machine theory, vol. 23, no. 3, pp. 227-241, 1988

[5] R. Thomanek, R. Steinberg, B. Krauser, U. Morawitz, J. Querengaesser, J. Weiss, and H. Graf, Ford Zetec-E, 14 Engine Timing Belt Drive, SAE Technical Paper 1999-01-0641, 1999

[6] I. F. Campean, A. J. Day, and S. Wright, Camshaft timing belt reliability modelling, in Reliability and Maintainability Symposium, 2001. Proceedings. Annual, pp. 377-383, 2001

[7] J. N. Fawcett, Chain and belt drives, a review, Shock and Vibration Information Center The Shock and Vibration Digest, vol. 13, no. 5, 1981

[8] K. Dalgarno, A. Day, T. H. X. Childs, and R. B. Moore, Stiffness loss of synchronous belts, Composites Part B: Engineering, vol. 9, no. 3, pp. 217-222, 1998

[9] R. Blander, K. Wenzel, and V. Piska, Method of detecting timing apparatus malfunction in an engine, US Patent 5,463,898, 1995

[10] J. E. Mack, Belt flaw detector, US Patent, Patent Number: 5,994,712, 1999

[11] A. Ahmed, Method and apparatus for detecting timing belt damage using link-coupled feedback, US Patent 6,523,400, 2003

[12] T. H. C. Childs, K. W. Dalgarno, A. J. Day, and R. B. Moore, Automotive timing belt life laws and a user design guide, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 212, no. 5, pp. 409-419, 1998

[13] R. Basso, Detection of reduced tooth stiffness in synchronous belts by means of pulley vibration monitoring, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, vol. 220, no. 7, pp. 947-957, 2006

[14] R. H. Salzman and S. M. Reaburn, Probabilistic modelling for timing belt fatigue life predictions using accelerated testing, International Journal of Materials and Product Technology, vol. 16, no. 4, pp. 446-461, 2001

artificial neural network, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 1746-1754, 2007

[29] A. Moosavian, H. Ahmadi, A. Tabatabaeefar, and M. Khazaei, Comparison of two classifiers; K-nearest neighbor and artificial neural network, for fault diagnosis on a main engine journal-bearing, *Shock and Vibration*, vol. 20, no. 2, pp. 263-272, 2013

[27] Y. Lei, Z. He, and Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery, *Expert Systems with Applications*, vol. 35, pp. 1593-1600, 2008

[28] J. Rafiee, F. Arvani, A. Harifi, and M. H. Sadeghi, Intelligent condition monitoring of a gearbox using

Archive of SID