



تشخیص عیوب تسمه زمانبندی موتور احتراق داخلی بر اساس سیگنال‌های ارتعاش و با استفاده از هوش مصنوعی

مقداد خزایی^۱، احمد بناکار^{۲*}، برات قبادیان^۲، مصطفی میرسلیم^۳، سعید مینایی^۲، سید محمد جعفری^۳، پیمان شرقی^۳،

مهدی اکبرشاهی^۳

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۲- هیات علمی گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس

۳- شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)

ایمیل مکاتبه کننده: ah_banakar@modares.ac.ir

چکیده

در این پژوهش سامانه‌ای خودکار و هوشمند جهت تشخیص عیوب رایج تسمه زمانبندی بر اساس سیگنال‌های ارتعاشات آن معرفی شده است. بدین منظور ارتعاشات تسمه زمانبندی در عیوب مختلف و رایج آن تحصیل شد. به منظور داده‌کاوی از سیگنال‌های ارتعاشی ۶ تابع ویژگی انحراف از معیار، کورتوسیس، اسکویونس، فاکتور ضربه، فاکتور شکل و فاکتور کرسست که هریک از آنها بیانگر نوعی از رفتارهای یک سیگنال هستند؛ استخراج شدند. پس از استخراج مشخصه‌های هر عیب در مرحله داده‌کاوی، از طبقه‌بند شبکه عصبی مصنوعی (ANN) جهت تشخیص هوشمند تسمه‌های معیوب استفاده شد. شبکه عصبی توسط ۶۰ درصد از مشخصه‌های استخراج شده از سیگنال‌ها آموزش و سپس توسط مابقی آنها آزمون شد. نتایج نشان داد ارتعاشات تسمه در هنگام بروز عیب دچار آشفتگی گشته و رفتار ضربه‌ای شدیدتر از خود نشان می‌دهند. همچنین شبکه عصبی توانست با دقت ۶۳،۹۰ عیوب تسمه زمانبندی را تشخیص دهد و طبقه‌بندی کند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی جهت تشخیص عیوب ریز تسمه زمانبندی و پیشگیری از پارگی کامل آن موثر بوده است. همچنین نتایج نشان داد تلفیق روش‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی ترکیب توانمند و موفقی جهت عیب‌یابی تسمه زمانبندی است.

واژه‌های کلیدی: تسمه زمانبندی، عیب‌یابی و طبقه‌بندی عیوب، تحلیل ارتعاشات، داده‌کاوی، شبکه عصبی مصنوعی.



مقدمه

استفاده از تسمه‌ها در سامانه زمانبندی در پیچه‌ها و سامانه محرک متعلقات جانبی مزایای غیر قابل انکاری مانند هزینه‌ی پایین-تر، صدای کمتر، قابلیت عملکرد در سرعت‌های بالاتر، استهلاک کمتر، عدم نیاز به روانکاری و مانند آنها را در بر داشته است (Thomanek et al., 1999). اما سامانه‌های تسمه‌ای در مقایسه با سامانه چرخ زنجیری دارای مشکل بزرگی به نام قابلیت اطمینان کمتر هستند. بدین معنا که سامانه‌های چرخ زنجیری 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 (Campean et al., 2001). همچنین تسمه‌ها در طول زمان و بر اثر تأثیرات محیط دچار تغییر در پارامترهای حساسی مانند سختی یا میزان جرم می‌شوند که این عیوب در سامانه‌های چرخ زنجیری رایج نیستند (Dalgarno et al., 1998; Childs et al., 1998).

بلاندر^۱ و همکاران (۱۹۹۵) 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 (Blander et al., 1995). اختراع‌های مشابهی توسط ادوارد^۲ (۱۹۹۹) (Mack, 1999) و احمد^۳ (۲۰۰۳) (Ahmed, 2003) جهت تشخیص نقص در عملکرد تسمه‌ی زمانبندی به ثبت رسیده است. چایلدز^۴ و همکاران (۱۹۹۸) به معرفی عوامل موثر بر عمر تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش قوانینی برای طراحی بهتر تسمه زمانبندی به منظور جلوگیری از خرابی زودرس آن معرفی شد (Childs et al., 1998). در پژوهشی دالگرنو^۵ و همکاران (۱۹۹۸) نشان دادند که سختی تسمه زمانبندی در طول زمان و متناسب با میزان باری که تسمه انتقال می‌دهد، کاهش می‌یابد (Dalgarno et al., 1998). باسو^۶ (۲۰۰۶) 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 به سنجش سلامت تسمه از طریق اندازه‌گیری سختی آن پرداخته شد (Basso, 2006). سالزمن^۷ و همکاران (۲۰۰۱) به بررسی عمر یک تسمه زمانبندی طی یک آزمون دوام شتاب‌دار پرداختند. در این پژوهش پس از انجام چند آزمون دوام، یک مدل احتمالاتی برای پیش‌بینی احتمال خرابی تسمه در شرایط مختلف عملکرد آن معرفی شد (Salzman and Reaburn, 2001). کالگاری^۸ و همکاران (۲۰۰۳) به مدلسازی رفتار دینامیکی تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش از رهگذار مدلسازی دینامیکی تسمه به پایش رفتار آن در شرایط مختلف پرداخته شد (Callegari et al., 2003). استوجانوویچ^۹ و همکاران (۲۰۰۹) نیز به بررسی رفتار دینامیکی تسمه از دیدگاه تماس آن با پولی‌ها و نیروی اصطکاکی بین آن‌ها پرداختند. افزایش و کاهش نیروی اصطکاک بین تسمه و پولی‌ها از عوامل مهم در بروز خرابی

¹ Blander

² Edward

³ Ahmed

⁴ Childs

⁵ Dalgarno

⁶ basso

⁷ Salzman

⁸ Callegari

⁹ Stojanovic



در تسمه‌هاست (Stojanović et al., 2009). جعفری و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تجربی تغییرات پارامترهای عملکردی تسمه متعلقات موتور احتراق داخلی پرداختند. در این پژوهش شاخص‌هایی همچون ارتعاشات، سختی، جرم، طول کشش دینامیکی و استاتیکی تسمه متعلقات موتور طی یک آزمون دوام ۶۰۰ ساعت اندازه‌گیری و پایش شد (Jafari et al., 2012). یوکار^۱ و همکاران (۲۰۱۲) 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 (Ucar et al., 2012). خزایی و همکاران (۲۰۱۳) به تشخیص و طبقه‌بندی شرایط محیطی نامناسب موثر بر عملکرد تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش از سیگنال‌های ارتعاشی جهت پایش وضعیت تسمه‌ی زمانبندی استفاده شد و روش شبکه عصبی مصنوعی نیز برای تشخیص و طبقه‌بندی حالات کاری تسمه زمانبندی به کار گرفته شد (Khazaei et al., 2013).

در این پژوهش به ارائه راهکاری نوین و هوشمند جهت تشخیص بروز عیوب ریز در تسمه زمانبندی پرداخته شده است. بدین منظور ارتعاشات تسمه در ۴ حالت ثبت شد که عبارتند از حالات: سالم، ترک روی دندان‌های تسمه، ترک در پشت تسمه و جدایش دندان‌ها از ریشه‌ی تسمه. در مرحله داده‌کاوی ۶ تابع ویژگی آماری با نام‌های انحراف از معیار، کورتوسیس، اسکینوس، عامل ضربه، عامل شکل و عامل کرسست از علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی استخراج شد. هدف از استخراج این ویژگی‌ها کاهش ابعاد داده‌ها به منظور تجزیه و تحلیل آسان‌تر و همچنین پایش دقیق‌تر رفتار ارتعاشی تسمه‌ی زمانبندی در حالات مختلف بود. این ویژگی‌ها به عنوان ورودی طبقه‌بند به منظور تشخیص هوشمند عیوب به کار گرفته شدند. از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) جهت تشخیص و طبقه‌بندی عیوب تسمه زمانبندی استفاده شد. بدین معنا که شبکه عصبی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از علامت ارتعاشی‌های هر حالت، به تشخیص آن حالت مبادرت نمود.

مواد و روش‌ها

۱- بستر تجربی آزمایش‌ها

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در واحد آزمایشگاه شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) انجام شد. از یک موتور احتراق داخلی جهت انجام آزمایشات استفاده شد. موتور مورد استفاده دارای ۴ سیلندر، ۱۶ سوپاپ و حجم ۱٫۶ لیتر بود. این موتور در سرعت ۵۵۰۰ دور در دقیقه توانایی تولید ۱۱۰ کیلو وات توان را دارد. جهت شبیه‌سازی شرایط واقعی تسمه زمانبندی در خودرو از الکترو موتور جهت گرداندن موتور استفاده نشد، بلکه موتور دارای احتراق بود. بدین منظور از یک دینامومتر جریان گردابی جهت کنترل موتور استفاده شد. این دینامومتر توانایی کنترل دور موتور با دقت ۱۰ دور در دقیقه را دارد. پارامترهای مختلف موتور مانند دما و فشار آب، روغن و سوخت؛ گشتاور، دور و توان؛ بازده تنفسی و مواردی ازین دست کاملاً تحت پایش 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.

^۱ Ucar



شکل ۱- بستر آزمایش‌ها در پژوهش حاضر

از یک حسگر لیزری فاصله‌سنج (LDV) جهت ثبت ارتعاشات تسمه در حالات مختلف استفاده شد. بر اساس منابع استفاده از این نوع حسگر بهترین انتخاب برای اندازه‌گیری دقیق ارتعاشات تسمه‌هاست (Salzman and Reaburn, 2001; Ucar et al., 2012). جدول ۱ مشخصات حسگر استفاده شده جهت اندازه‌گیری ارتعاشات تسمه‌ی زمانبندی در این پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات حسگر مورد استفاده در این پژوهش

نام و مدل 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- عیوب رایج تسمه زمانبندی

در این پژوهش سه عیب مهم تسمه زمانبندی مورد بررسی قرار گرفت که عبارت بودند از: ترک روی دندانه‌ها، ترک در پشت و جدایش دندانه از ریشه تسمه. عیوب بررسی شده از رایج‌ترین عیوب در تسمه‌های زمانبندی هستند و در اغلب موارد گسیختگی و تخریب تسمه زمانبندی از این عیوب آغاز می‌شود. ترک بر روی دندانه‌ها از عیوب بسیار رایج تسمه زمانبندی است. شکل ۲ تسمه زمانبندی دارای این عیب که در این پژوهش بررسی شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۲- ترک روی دندان 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 ترک ترک شدن آن را در پی دارد (Omar A. Elmaraghi, 2013). شکل ۳ تصویری از این عیب را نشان می‌دهد.



شکل ۳- ترک در پشت تسمه زمانبندی

جدایش دندان از ریشه 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 (Perner and Osborne, 2012). شکل ۴ تصویری از این عیب که در این پژوهش بررسی شده است را نمایش می‌دهد.



شکل ۴- جدایش دندان تسمه زمانبندی از ریشه آن



۳- علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی و داده کاوی

در این پژوهش علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی تسمه‌زمانبندی در حوزه زمان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی در این پژوهش از نوع ارتعاشات فاصله‌ای^۱ بودند که توسط حسگر فاصله‌سنج لیزری اندازه‌گیری شدند. از هر حالت تسمه زمانبندی ۱۸۰ علامت ارتعاشی ۲ ثانیه‌ای ثبت شد.

علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی در حوزه زمان دارای ابعاد بزرگی بوده و امکان استفاده مستقیم از آنها در روش‌های طبقه‌بندی هوشمند مانند شبکه عصبی وجود ندارد. به فرآیند استخراج اطلاعات پنهان از محتوای یک علامت ارتعاشی خام، داده‌کاوی گفته می‌شود (Zhang and Niu, 2008). داده‌کاوی اغلب توسط استخراج یک سری توابع آماری به نام توابع ویژگی از علامت ارتعاشی‌ها انجام می‌پذیرد. در این پژوهش از ۶ تابع ویژگی جهت داده‌کاوی از علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی استفاده شد که در ادامه تشریح شده‌اند. در این فرمول‌ها M میانگین مقادیر یک سیگنال، N تعداد نقاط یک سیگنال و در نهایت $x(n)$ مقادیر یک سیگنال در نقاط داده‌ای هستند.

انحراف از معیار^۲ از ویژگی‌های مهم یک علامت ارتعاشی است که به نوعی پراکندگی مقادیر یک علامت ارتعاشی را نشان می‌دهد. انحراف از معیار یک علامت ارتعاشی توسط فرمول زیر تعریف می‌گردد.

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

کورتوسیس^۳ از شاخصه‌های مهم یک علامت ارتعاشی است که برای تشخیص عیوب ریز مانند ترک، و لپ‌پری مفید است (Barszcz and Randall, 2009). کورتوسیس یک علامت ارتعاشی از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Lei et al., 2008):

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

اسکیونس^۴ بیانگر میزان چولگی یک علامت ارتعاشی و از ویژگی‌های مهم آن به شمار می‌آید. اسکیونس یک علامت ارتعاشی از فرمول زیر به دست می‌آید (Lei et al., 2008):

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

عامل ضربه^۵ همانگونه که از نام این ویژگی پیداست، میزان ضربه‌ای بودن یک علامت ارتعاشی^۱ را نشان می‌دهد. عامل ضربه برای یک علامت ارتعاشی از رابطه زیر استخراج می‌گردد (Lei et al., 2008):

¹ Displacement vibration

² Standard deviation (STD)

³ Kurtosis (KU)

⁴ Skewness (SK)

⁵ Impulse factor (IF)



(۴)

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

عامل شکل^۲ توسط فرمول زیر تعریف می‌گردد (Lei et al., 2008):

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

عامل کرس^۳ نیز از فرمول زیر به دست می‌آید (Lei et al., 2008):

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

۴- شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی یکی از پرکاربردترین و رایج‌ترین روش‌های هوش مصنوعی است که امروزه کارآمدی و کاربردهای فراوان آن برکسی پوشیده نیست. یکی از حوزه‌های کاربردی مهم این طبقه‌بند تشخیص و طبقه‌بندی عیوب است. این روش بارها با موفقیت جهت پایش وضعیت و عیب‌یابی سامانه‌های مکانیکی به کار گرفته شده است (Zhang and Niu, 2008). در این پژوهش از شبکه عصبی مصنوعی جهت تشخیص و طبقه‌بندی عیوب تسمه استفاده شد.

در شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش از روش آموزش با نظارت^۴ استفاده شد. در این نوع شبکه، در حین آموزش ورودی‌های مورد نظر به شبکه عصبی اعمال می‌شود و خروجی شبکه با خروجی مطلوب^۵ مقایسه می‌شود. اختلاف بین خروجی واقعی و خروجی مطلوب منجر به تولید علامت ارتعاشی خطا می‌شود. هدف از آموزش شبکه به حداقل رساندن خطای تولید شده می‌باشد. به حداقل رساندن خطا براساس تنظیم وزن‌های شبکه انجام می‌شود و میزان محاسبات لازم برای حداقل نمودن خطا به الگوریتم (شیوه) آموزش شبکه بستگی دارد. در این پژوهش از شبکه عصبی پیش رونده با حلقه پس انتشار^۶ و الگوریتم آموزش لوبنبرگ-مارکوات^۷ استفاده شد. در این الگوریتم پس از محاسبه مقدار خطا در لایه خروجی مقادیر وزن‌ها در لایه پنهان در جهت کاهش خطا تنظیم می‌شوند.

² Shape factor (SF)

³ Crest factor (CF)

⁴ Supervised Learning

⁵ Targets

⁶ Back Propagation

⁷ Levenberg- Marquardt

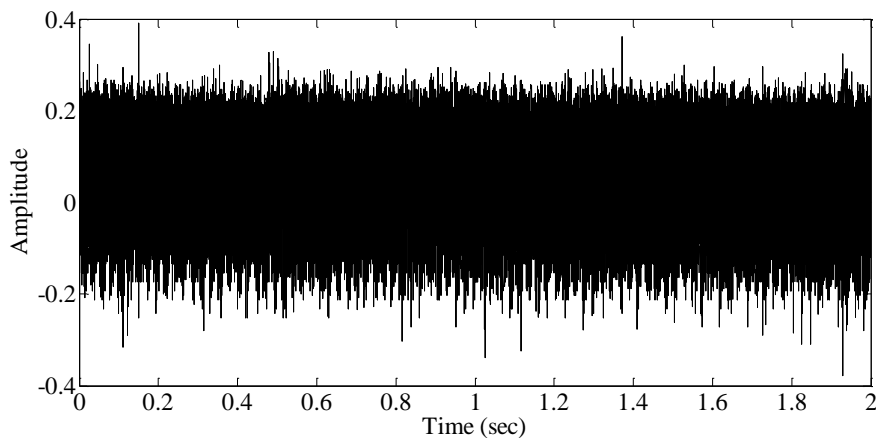


در این پژوهش از مجموع کل داده‌ها که ۱۸۰ سیگنال برای هر حالت تسمه بود، ۶۰ درصد (۱۰۸ سیگنال) برای آموزش، ۲۰ درصد برای ارزیابی (۳۶ سیگنال) و ۲۰ درصد (۳۶ سیگنال) باقیمانده نیز برای آزمون شبکه استفاده شد. داده‌های ارزیابی جهت جلوگیری از آموزش بیش از حد شبکه به کار می‌روند. در نهایت شبکه عصبی با بهترین ساختار انتخاب شده به تشخیص عیوب تسمه زمانبندی می‌پردازد.

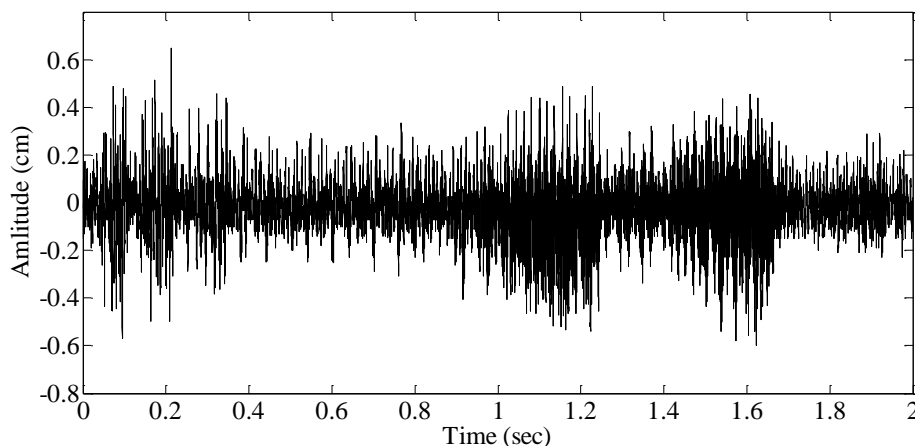
نتایج و بحث

۱- علامت ارتعاشی‌های ارتعاشی

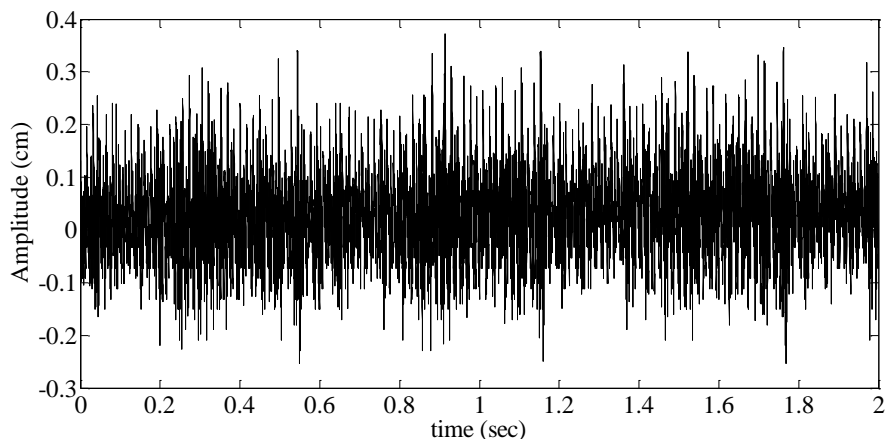
در این پژوهش سیگنال‌های ارتعاشی تسمه‌زمانبندی در حوزه‌ی زمان مورد پردازش قرار گرفتند. شکل ۵ سیگنال ارتعاشی تسمه زمانبندی در حالت سالم را نشان می‌دهد. شکل‌های ۶، ۷ و ۸ نیز به ترتیب یک نمونه از سیگنال‌های ارتعاشی تسمه زمانبندی در حالت‌های ترک بر روی دندان، ترک در پشت تسمه، و جدایش دندان از ریشه را نشان می‌دهند.



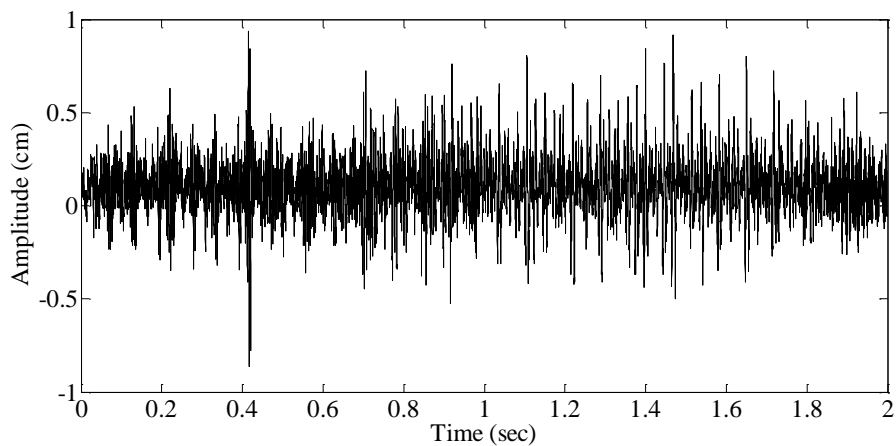
شکل ۵- ارتعاشات تسمه زمانبندی در حالت سالم (H)



شکل ۶- ارتعاشات تسمه در حالت ترک بر روی دندان (TC)



شکل ۷- ارتعاشات تسمه در حالت ترک در پشت تسمه (BC)



شکل ۸- ارتعاشات تسمه در حالت جدایش دندان از ریشه (SR)

۲- داده کاوی از علامت ارتعاشی‌ها

همانگونه که گفته شد از هر یک از ۱۸۰ سیگنال ارتعاشی مربوط به هر حالت از تسمه زمانبندی، ۶ ویژگی استخراج شد. در جدول ۲ مقادیر میانگین این ویژگی‌ها برای هر ۱۸۰ سیگنال هر کلاس آورده شده است.



جدول ۲: ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال‌های ارتعاشی

ویژگی و	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

با دقت در مقادیر ویژگی‌های مختلف سیگنال‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود که بیشترین اغتشاش در سیگنال مربوط به عیب جدایش دندانه است. همچنین تاثیر ترک روی دندانه بر ارتعاشات تسمه زمانبندی بیشتر از ترک در پشت تسمه است. زیاد بودن عامل ضربه نشان از شدت عیب بیشتر است. بر اساس جدول ۲ سیگنال‌های ارتعاشی در حالت جدایش دندانه تسمه بیشترین رفتار ضربه‌ای را نشان می‌دهند که این موضوع حاکی از شدت بیشتر و خطرناک‌تر بودن این عیب است.

۳- تشخیص و طبقه‌بندی عیوب

در این پژوهش از ویژگی‌های استخراج شده به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی جهت تشخیص و طبقه‌بندی هوشمند و خودکار عیوب استفاده شد. جدول ۳ ماتریس اغتشاش شبکه عصبی در تشخیص عیوب تسمه زمانبندی در داده‌های آموزش را نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز ماتریس اغتشاش شبکه عصبی مصنوعی برای داده‌های آزمون را نشان می‌دهد.

جدول ۳- دقت شبکه عصبی مصنوعی در داده‌های آموزش

دقت (درصد)	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 ۴- دقت شبکه عصبی مصنوعی در داده‌های آزمون

دقت (درصد)	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 جدول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که طبقه‌بند شبکه عصبی در این پژوهش توانسته است با دقت ۹۲,۵۹ درصد در داده‌های آموزش و ۹۰,۶۳ درصد در داده‌های آزمون عیوب رایج تسمه‌ی زمانبندی را تشخیص دهد. نتایج به دست آمده نشان از قدرت و دقت بالای سامانه طراحی شده در این پژوهش جهت 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. بر اساس جدول‌های ۳ و ۴ 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 ماهوی و بیشتر آن با دیگر حالت‌ها با دقت بیشتری تشخیص داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سامانه‌ای هوشمند جهت تشخیص و طبقه‌بندی عیوب رایج تسمه زمانبندی موتور احتراقی معرفی شد است. نتایج این پژوهش نشان داد می‌توان عیوب تسمه‌ی زمانبندی را با دقت بیش از ۹۰ درصد تشخیص داد که حاکی از توانمندی و موثر بودن روش معرفی شده در عیب‌یابی تسمه‌ی زمانبندی موتور احتراقی می‌باشد.

تشکر و قدردانی

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



1. Ahmed, A. 2003. Method and apparatus for detecting timing belt damage using link-coupled feedback. US Patent 6,523,400.
2. Barszcz, T. and Randall, R.B. 2009. 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.
3. Basso, R. 2006. 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.
4. Blander, R., Wenzel, K. and Piska, V. 1995. Method of detecting timing apparatus malfunction in an engine. US Patent 5,463,898.
5. Callegari, M., Cannella, F. and Ferri, G. 2003. 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.
6. Campean, I.F., Day, A.J. and Wright, S. 2001. Camshaft timing belt reliability modelling”, *Reliability and Maintainability Symposium*, 2001. *Proceedings. Annual, IEEE*, pp. 377–383.
7. Castellini, P., Cupido, E., Paone, N. and Tomasini, E. 2000. Tracking laser Doppler vibrometer for linear motion: application to a timing belt. *Fourth International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques: Advances and Applications*, p. doi:10.1117/12.386758.
8. Childs, T.H.C., Dalgarno, K.W., Day, A.J. and Moore, R.B. 1998. 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.
9. Dalgarno, K., Day, A., Childs, T.H.X. and Moore, R.B. 1998. Stiffness loss of synchronous belts. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 9 No. 3, pp. 217–222.
10. Fawcett, J.N. 1981. Chain and belt drives, a review. *Shock and Vibration Information Center the Shock and Vibration Digest*, Vol. 13 No. 5.
11. Jafari, S.M., Kazaemi, M., Roozban, M. and Moosavian, S.A. 2012. 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.
12. Khazaei, M., Banakar, A., Ghobadian, B., Mirsalim, M., Jafari, S.M. and Javan, S. 2013. 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.
13. Lei, Y., He, Z. and Zi, Y. 2008. A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery. *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, pp. 1593–1600.
14. Mack, J.E. 1999. Belt flaw detector, US Patent, Patent Number: 5,994,712. Google Patents.
15. Miao, Q. and Makis, V. 2007. 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.
16. Omar A. Elmaraghi. 2013. INTEGRATED MULTIBODY DYNAMICS AND FATIGUE MODELS FOR PREDICTING THE FATIGUE LIFE OF POLY-V RIBBED BELTS, Purdue University.
17. Perneder, R. and Osborne, I. 2012. *Handbook Timing Belts*, Springer.
18. Salzman, R.H. and Reaburn, S.M. 2001. 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.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



19. Stojanović, B., Miloradović, N. and Blagojević, M. 2009. Analysis of tribological processes at timing belt's tooth flank. Tribology in industry, Vol. 31 No. 3-4, pp. 53–58.
20. Thomanek, R., Steinberg, R., Krauser, B., Morawitz, U., Querengaesser, J., Weiss, J. and Graf, H. 1999. Ford Zetec-E, I4 Engine Timing Belt Drive. SAE Technical Paper 1999-01-0641, doi: doi: 10.4271/1999-01-0641.
21. Ucar, M., Ergun, R.E. and Cengiz, A. 2012. A Novel Failure Diagnosis System Design for Automotive Timing Belts. Experimental Techniques, pp. 1–6.
22. Yang, J., Yang, J., Zhang, D. and Lu, J. 2003. Feature fusion: parallel strategy vs. serial strategy. Pattern Recognition, Vol. 36 No. 6, pp. 1369–1381.
23. Zhang, X. and Niu, Z. 2008. Neural Network Integration Fusion Model and Application. IEEE, Vol. 1, pp. 213–215.



نهمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی

(مکانیک بیوسیستم) و مکانیزاسیون

پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران

۲ و ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴ - کرج



The study on effect of different defects on the timing belt vibrations using data mining and artificial intelligence methods

Abstract

In this research, an intelligent and automatic procedure is introduced for diagnosis of some common faults of timing belt based on its vibration signals. For this goal, vibration signals were gained in different faulty conditions of timing belt. In data mining step, six features namely, standard deviation, kurtosis, skewness, impulse factor, shape factor and crest factor were extracted from vibration signals aim to better monitoring of signals behavior. After extracting the fault characteristics, Artificial Neural Network (ANN) classifier was used for intelligent detection of faulty belts. ANN was trained with 60 percent of signals and was tested with other signals. Results show the faulty belts have a turbulence vibration and impulsive behavior. Also, ANN classifier detected and classified the timing belts faults with 90 percent accuracy. Results show that using of vibration signals for small faults detection of timing belt was effective aim to prevent its complete rupture. These results demonstrate the combination of data mining and artificial intelligence techniques is a powerful and successful procedure for precision troubleshooting of timing belt.

Keywords. Timing belt, Fault detection and classification, Vibration analysis, Data mining, Artificial Neural Network (ANN).