



فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineerresearch.ir



تشخیص شرایط محیطی نامناسب مؤثر بر عملکرد تسمه زمانبندی موتور بر اساس تحلیل ارتعاشات

مقداد خزایی^۱، احمد بناکار^{۲*}، برات قبادیان^۳، سید مصطفی میرسلیم^۴، سید محمد جعفری^۵، سعید جوان^۶

^۱گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، m.khazae@modares.ac.ir

^۲گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ah_banakar@modares.ac.ir

^۳گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، ghobadian@modares.ac.ir

^۴دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، mirsalim@csr.ir

^۵دانشگاه صنعتی شریف و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، sm_jafari@ip-co.com

^۶شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، s_javan@ip-co.com

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۹۱۹۹۹۱۸۲۴۱

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۱۱ دی ۱۳۹۲
پذیرش: ۲۵ فروردین ۱۳۹۳
کلیدواژه‌ها:
پایش وضعیت
تسمه زمانبندی موتور
تحلیل ارتعاشات
شبکه عصبی مصنوعی
داده کاوی

تسمه زمانبندی یکی از قطعات بسیار حساس خودروهای امروزی است. دمای گرم و بیش‌باری دو حالت کاری رایج در موتور هستند که باعث خستگی، فرسایش و خرابی ناگهانی تسمه زمانبندی و در نتیجه آسیب رسیدن به موتور می‌گردد. در این مقاله روشی هوشمند برای تشخیص دو حالت بیش‌باری و دمای گرم در محیط کاری تسمه زمانبندی با استفاده از علامت‌های ارتعاشی آن معرفی شده است. روش ارائه شده در این پژوهش بر اساس تلفیقی از تحلیل‌های تجربی، داده‌کاوی از علامت‌های حوزه زمان و شبکه عصبی مصنوعی طراحی شده است. بدین منظور ابتدا علامت‌های ارتعاشی تسمه در سه حالت شرایط عادی، بیش‌باری موتور و محیط گرم؛ با ارتعاش سنج نوری اندازه‌گیری شد. سپس در مرحله داده‌کاوی پنج ویژگی آماری میانگین، انحراف از معیار، ریشه میانگین مربعات، گشتاور چهارم و شاخص ضربه از علامت‌های ارتعاشی استخراج شدند. از ویژگی‌های استخراج شده به عنوان ورودی شبکه عصبی به منظور تشخیص و طبقه‌بندی حالات مذکور استفاده شد. در نهایت شبکه عصبی با دقت میانگین ۷۶٪ توانست عیوب مذکور تسمه زمانبندی موتور را تشخیص بدهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از روش‌های هوشمند می‌توان به عیب‌یابی تسمه‌ها پرداخت و از این‌گونه گذر موتور را از آسیب‌های جدی ناشی از خرابی آنها حفظ نمود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱) مقدمه

تسمه‌ها از مهم‌ترین ابزارهای انتقال توان هستند که به صورت گسترده در موتورها، ماشین‌آلات، تجهیزات ثابت و متحرک، صنایع غذایی و مانند آنها به کار می‌روند. وظیفه تسمه‌ها انتقال توان از محور محرک به محور متحرک است [۱]. قیمت ارزانتر، وزن سبکتر، صدای آرامتر، قابلیت کار در سرعت‌های تندتر، عدم نیاز به روانکاری، تمیز کردن، هزینه نگهداری ارزانتر و مواردی مانند آنها را می‌توان از جمله مزایای تسمه‌های زمانبندی نسبت به دیگر سامانه‌های انتقال توان برشمرد [۲]. به علت مزایای غیر قابل انکار تسمه‌ها نسبت به سامانه‌های چرخ زنجیری، استفاده از تسمه‌های زمانبندی به منظور تامین نیروی محرکه میل بادامک در خودروها مدت‌هاست که رایج شده است و امروزه تسمه زمانبندی از جمله قطعات حساس و مهم خودروها به شمار می‌رود [۳]. با این حال استفاده از تسمه زمانبندی با مشکلاتی همراه بوده است که از جمله آنها می‌توان به قابلیت اطمینان کمتر اشاره نمود. عملکرد تسمه‌ها به شدت تحت تاثیر شرایط محیطی قرار دارد. از این رو شرایط محیطی نامناسب تسمه‌ها را فرسوده و خسته می‌کند و باعث کاهش شدید عمر آنها می‌شود [۴]. از آنجا که بروز کوچکترین خرابی ناگهانی در تسمه زمانبندی موتور را با آسیب جدی مواجه می‌کند و با توجه به نقش مهم تسمه زمانبندی و حساسیت شدید موتور نسبت به عملکرد آن، لازم است تا سامانه‌ای طراحی شود تا در صورت رخداد عیب آن را تشخیص دهد و موتور را از آسیب‌های شدید بعدی حفظ کند [۴-۶]. در همین راستا پژوهش‌های فراوانی اجرا شده است و نتایج ارزشمندی نیز به دست آمده است. مک^۱ سامانه‌ای برای تشخیص ترک و پارگی‌های ریز تسمه‌ها بر اساس گسیل امواج نوری به ثبت رسانده است [۷]. کمپانی گیتز^۲ نیز به ارائه روشی برای تشخیص خرابی تسمه‌ها با استفاده از صدای آنها پرداخته است. در این روش بر اساس علامت‌های^۳ صدای تحصیل شده از تسمه، نوع خرابی تسمه تشخیص و روند پیشرفت آن ترسیم می‌شود [۸]. چاپلند^۴ و همکاران سامانه‌ای برای پایش وضعیت تسمه زمانبندی خودرو با استفاده از کرنش‌سنج‌ها معرفی نموده است. در واقع در این پژوهش تغییرات سختی تسمه از طریق تحلیل تغییرات کرنش چرخ تسمه‌ها پایش شده است [۹]. اخیراً روش‌های مبتنی بر ارتعاشات به منظور عیب‌یابی، پیش‌بینی عیب و تخمین عمر تسمه‌ها به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. باسو^۵ و همکاران با استفاده از تحلیل ارتعاشی به بررسی تغییرات سختی تسمه زمانبندی پرداختند. در این پژوهش تغییرات سختی تسمه با استفاده از تحلیل

ارتعاشات چرخ تسمه‌ها شبیه سازی شده است [۱۰]. یوکار^۶ و همکاران با استفاده از حسگرهای ارتعاش‌سنج نوری، عیوب مختلف تسمه زمانبندی موتور را تشخیص دادند. در این پژوهش سه عیب جدایی دندانه از ریشه، ترک در ریشه دندانه و آسیب دیدن روی دندانه که از عیوب رایج تسمه‌های زمانبندی هستند طبقه‌بندی شدند [۴].

جعفری و همکاران در پژوهشی به بررسی عملکرد تسمه متعلقات موتور احتراق داخلی در شرایط بحرانی پرداختند. در این پژوهش متغیرهای فیزیکی نظیر نوسان تسمه، طول، جرم و سختی و متغیرهای عملکردی مانند فشار تنجار^۷ خنک کن^۸ و جریان مولد برق به منظور پایش سلامت تسمه و بررسی عملکرد تسمه متعلقات اندازه‌گیری شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که طول، نوسان و سختی تسمه به صورت مستقیم بر یکدیگر تاثیر می‌گذارد و افزایش یکی باعث افزایش دیگری می‌شود [۱۱].

در پژوهش‌های قبل عیوبی مانند ترک و خرابی دندانه‌ها تشخیص داده شده است. اما این عیوب در واقع حاصل شرایط کاری نامناسب تسمه‌ها مانند بیش‌باری، هوای گرم، تنش شدید، عدم هم‌محوری و متغیرهایی از این دست اند.

محیط گرم و بیش‌باری موتور دو حالت کاری بسیار نامطلوب ولی رایج در موتورهای احتراق داخلی هستند که باعث بروز عیب‌هایی مانند ترک، خستگی، فرسایش و کاهش شدید عمر و در نهایت پارگی یا خرابی ناگهانی تسمه‌های زمانبندی می‌شوند [۱۲، ۱۳]. تشخیص شرایطی که باعث خرابی تسمه‌ها می‌شوند، به جای تشخیص نتایج حاصل از آنها، مزیت اصلی این پژوهش است. از این رو با استفاده از نتایج این پژوهش می‌تواند با تشخیص به هنگام شرایط نامساعدی که باعث بروز خرابی در تسمه‌های زمانبندی می‌شوند، تسمه و موتور را از آسیب‌های بعدی محافظت نمود و پیش از رخ دادن عیوب شدید، از بروز آنها پیشگیری کرد.

در این پژوهش به تشخیص و طبقه‌بندی دو حالت کاری نامطلوب تسمه‌ها یعنی محیط گرم و بار زیاد، با استفاده از تحلیل ارتعاشات آنها پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا علامت‌های ارتعاش تسمه زمانبندی استخراج و از آنها ویژگی‌های آماری استخراج شد. سپس شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های هر حالت، حالات کاری نامناسب را تشخیص داد.

۲) روش اجرای آزمون

به منظور اجرای آزمایش‌ها این پژوهش از میز آزمون موتور شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو استفاده شد. میز آزمون در این پژوهش شامل موتوری درونسوز با دو میل بادامک و ۱۶ دریچه

¹ Mack

² Gates Crop

³ Signals

⁴ Childs

⁵ Basso

⁶ Ucar

⁷ Compressor

⁸ Cooler

پس از آماده‌سازی مقدمات و پایش شرایط محیطی، موتور روشن شد و داده‌برداری از تسمه در حالات مختلف آغاز شد. نخست تسمه در حالت بی‌بار و در شرایط عادی دمایی قرار گرفت و نوسانات آن با حسگر ثبت شد. سپس دمای محیط اطراف تسمه به وسیله دمنده گرم کن، به بیش از ۸۰ درجه سانتیگراد گرم شد و داده‌های ارتعاش در این حالت نیز تحصیل شد. در پایان علامت‌های ارتعاشی تسمه در حالت بیش‌باری موتور اندازه‌گیری شد. از مقادیر این علامت‌ها که در واقع ماهیت جابجایی ارتعاشی^۱ داشتند و در حوزه زمان بودند، برای داده‌کاوی و استخراج اطلاعات مفید به منظور اجرای تحلیل‌های بعدی استفاده شد.

شرایط داده‌برداری برای سه حالت مختلف یاد شده در جدول ۱ آورده شده است.

۳) تحلیل داده‌ها

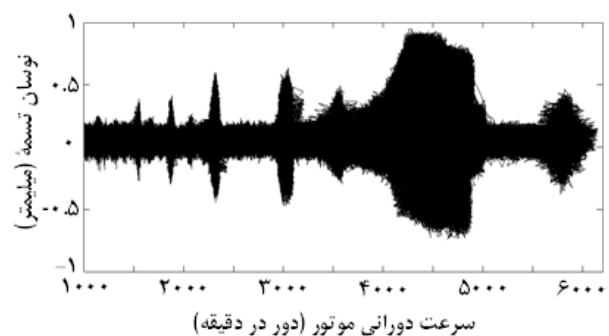
مقادیر خام علامت‌های ارتعاشی دارای نوفه زیاد هستند و تعبیر فیزیکی خاصی ندارند. از این رو نمی‌توان مستقیماً از آنها اطلاعات دقیقی به دست آورد و آنها را به عنوان ورودی استفاده نمود. لذا لازم است تا در مرحله داده‌کاوی، با استخراج ویژگی‌های آماری از علامت‌ها به اطلاعات دقیق‌تری از رفتار آنها دست یافت. در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار علامت‌ها و استخراج اطلاعات مفیدتر، پنج ویژگی آماری با نام‌های میانگین^۲، انحراف از معیار^۳، ریشه میانگین مربعات^۴، گشتاور چهارم^۵ و شاخص ضربه^۶ از آنها استخراج شدند. پس از اعمال توابع ویژگی بر علامت‌ها، از آنها به عنوان ورودی شبکه عصبی مصنوعی استفاده شد. نام و معادله ریاضی این ویژگی‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۵]. در این جدول $x(n)$ مقادیر سری زمانی و N تعداد نقاط داده‌ای^۷ هستند.

بود. یک لگام ترمز برای پایش بار و سرعت موتور به کار گرفته شد. کلیه متعلقات موتور شامل تنجار خنک کن، مولد برق، تلمبه روغنی و تلمبه آب روی موتور سوار شدند تا شرایط واقعی شبیه‌سازی شود. شکل ۱ بستر آزمایش را نشان می‌دهد.

در این تحقیق از ارتعاش‌سنج نوری ساخت شرکت Wenglore نوع yp06mgvl80 به منظور ثبت ارتعاشات تسمه استفاده شد. نرخ داده برداری این حسگر ۵ کیلوهرتز بود و در وسط بیشترین طول آزاد بین دو چرخ تسمه نصب شد. این حسگر نوری فاصله‌سنج بود که پیشتر توانایی آن در بررسی رفتار ارتعاشی تسمه‌ها اثبات شده است [۱۴]. فرآیند داده‌برداری در طول آزمون در سرعت‌های بحرانی تسمه اجرا شد [۱۱]. بدین منظور نوسانات تسمه بین سرعت‌های ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه (د.د.د.) اندازه‌گیری شد. بدین ترتیب سرعت بحرانی که تسمه زمانبندی بیشترین نوسان را در آن دارا بود، ۴۳۰۰ دور بر دقیقه به دست آمد. شکل ۲، نمایی از روند تغییر نوسانات تسمه در دوره‌های مختلف را نشان می‌دهد.

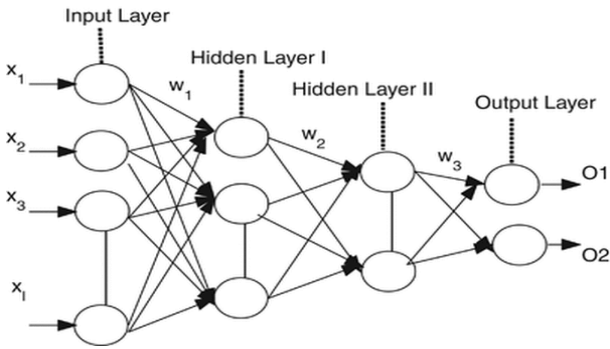


شکل ۱: بستر آزمایش در پژوهش حاضر



شکل ۲: نوسانات تسمه در دوره‌های مختلف موتور

- 1 Displacement vibration
- 2 Mean
- 3 Standard deviation
- 4 Root mean square (RMS)
- 5 Kurtosis
- 6 Impulse factor
- 7 Data point



شکل ۳: شبکه عصبی پیشرو با حلقه پس خور

ساختار شبکه عصبی با سه لایه ورودی، دو لایه پنهان و لایه خروجی تعریف شد. به منظور تشکیل ساختار شبکه عصبی ابتدا به ازای هر ویژگی یک عصب در لایه ورودی شبکه تعریف شد. بدین ترتیب چون ۵ ویژگی از هر علامت ارتعاشی استخراج شده است، ورودی شبکه دارای ۵ عصب بود. همچنین به ازای هر یک از سه حالت ممکن در خروجی نیز یک عصب تعریف شد و خروجی شبکه نیز با سه عصب تعریف گشت. عصب‌های لایه پنهان در عملکرد شبکه تاثیر بسزایی دارند. دقت بیشینه طبقه‌بندی شبکه عصبی در این پژوهش با ۶ عصب در لایه پنهان به دست آمد و پس از آن دقت شبکه با افزایش عصب‌ها تغییری نکرد. جدول ۳ نتایج عملکرد شبکه با ساختارهای مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول تعداد عصب‌های لایه ورودی و خروجی ثابت و به ترتیب برابر ۵ و ۳ عصب در نظر گرفته شده و تنها تعداد عصب‌های لایه پنهان بصورت متغیر است. همانگونه که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، عملکرد شبکه با افزایش عصب‌های لایه پنهان برای مقادیر بزرگتر از ۶ عدد، تغییر محسوسی نمی‌کند. لذا بهترین ساختار برای شبکه عصبی در این پژوهش ۳*۶*۵ تعیین شد.

جدول ۳: عملکرد شبکه عصبی در ساختارهای مختلف

عملکرد شبکه عصبی (دقت بر حسب درصد)		تعداد عصب‌های لایه پنهان
داده‌های آموزش (%)	داده‌های آزمون (%)	
۴۵,۴۵	۵۰,۶۷	۲
۵۱,۵۲	۵۷,۳۳	۳
۶۸,۱۸	۷۰,۶۷	۴
۷۱,۲۱	۷۳,۳	۵
۷۵,۷۶	۷۸	۶
۷۴,۳۴	۷۸,۶۷	۷
۷۵,۷۶	۷۶,۶۷	۸

جدول ۱: شرایط محیطی در حالات مختلف داده‌برداری

نام حالت	مقدار بار	دما	سرعت دورانی
عادی	٪۳۵	۴۰°C	۴۵۰۰ rpm
دمای گرم	٪۳۵	۸۰°C	۴۵۰۰ rpm
بیش باری	٪۱۰۰	۴۰°C	۴۵۰۰ rpm

جدول ۲: ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های ارتعاشی [۱۵]

ویژگی	معادله
-------	--------

میانگین $T_1 = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)}{N}$

انحراف از معیار $T_2 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - T_1]^2}{N - 1}}$

شاخص ضربه $T_3 = \frac{\max[|x(n)|]}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x(n)|}$

گشتاور چهارم $T_4 = \frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - T_1]^4}{(N - 1)T_1^4}$

ریشه میانگین مربعات $T_5 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [x(n)]^2}{N}}$

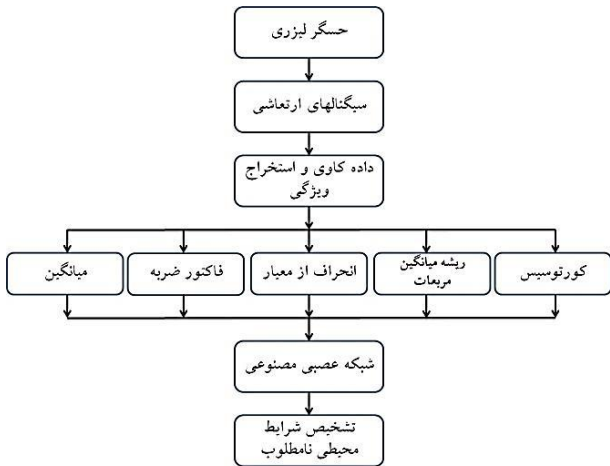
۴) شبکه عصبی مصنوعی

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 برای پایش وضعیت و عیب‌یابی سامانه‌های مکانیکی به کار گرفته شده است [۱۶-۱۷]. در این پژوهش شبکه عصبی مصنوعی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های هر حالت، تشخیص و طبقه‌بندی حالات یادشده در تسمه‌ها انجام شد. بدین ترتیب شرایط عادی و غیرعادی محیطی که تسمه‌ها در آن فعالیت می‌کنند از یکدیگر تشخیص داده شد تا از این گذر بتوان با بهبود شرایط کاری، تسمه و موتور را از آسیب‌های جدی مصون نگه داشت.

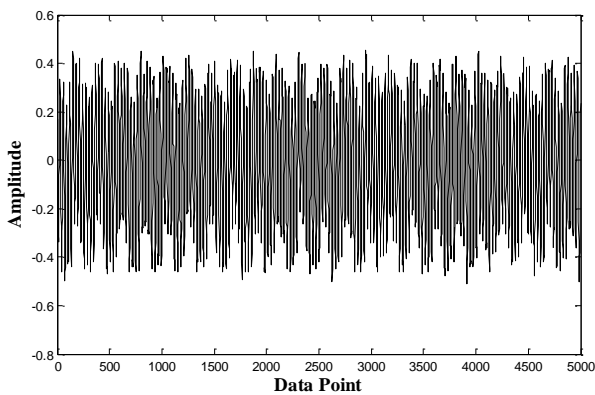
در این پژوهش از شبکه عصبی چندلایه پرسپترون پیشرو^۱ استفاده شد. همچنین از روش لوبنرگ-مارکوات^۲ به منظور آموزش و بهینه‌سازی وزن‌های شبکه عصبی استفاده شد. شکل ۳ نمایی کلی از ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

¹ Feed forward multi-layer perceptron neural network

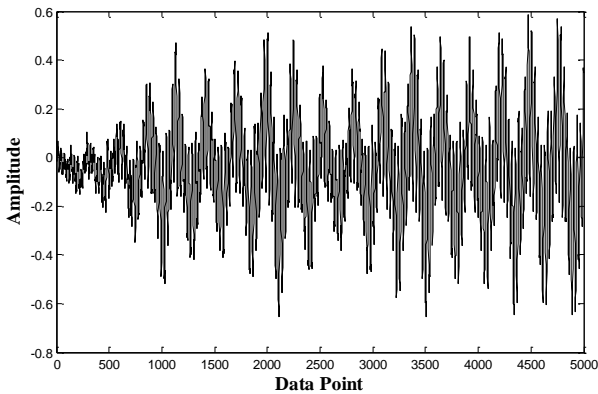
² Levenberg-marquardt



شکل ۴: فرآیند هوشمند معرفی شده در این پژوهش



شکل ۵: علامت‌های ارتعاشی تسمه در شرایط عادی



شکل ۶: علامت‌های ارتعاشی تسمه در حالت بیش‌باری موتور

۵) فرآیند هوشمند عیب‌یابی

همانگونه که گفته شد، هدف از این پژوهش ارائه الگویی هوشمند به منظور تشخیص شرایط نامناسب کاری تسمه زمانبندی است. لذا لازم است تا ساختار این فرآیند هوشمند و جایگاه هریک از مراحل داده‌برداری، پردازش علامت، داده‌کاوی و در نهایت شبکه عصبی مصنوعی طبقه‌بندی این فرآیند را مشخص می‌کند. در این پژوهش ابتدا مقادیر نوسانات تسمه در سه حالتی که پیشتر گفته شد، با حسگر نوری اندازه‌گیری و سپس با تجهیز داده‌برداری^۱ ثبت شد.

با استفاده از مقادیر ثبت شده برای نوسانات تسمه، علامت‌های ارتعاش تسمه در حوزه زمان تشکیل داده شد. در مرحله بعد، توابع ویژگی از مقادیر علامت‌های حوزه زمان در هر سه حالتی که مد نظر این پژوهش است، استخراج شدند. ویژگی‌های اقتباس شده به شبکه عصبی مصنوعی وارد شدند. در نهایت با استفاده از جعبه ابزار شبکه عصبی مصنوعی و بر پایه ویژگی‌های اقتباس شده از هر علامت‌ها، به تشخیص و طبقه‌بندی حالات مختلف کاری تسمه زمانبندی مبادرت شد. شکل ۴ نمایی از فرآیند هوشمند تشخیص حالات کاری تسمه زمانبندی که در این پژوهش معرفی و به کار گرفته شده است را نشان می‌دهد. تمامی مراحل یاد شده شکل ۴، با استفاده از نرم‌افزار متلب^۲ و جعبه ابزارهای مختلف آن انجام شده است.

۶) نتایج و بحث

۶-۱) علامت‌های تحویل شده

در این مرحله به نمایش نتایج علامت‌های جمع‌آوری شده در حالات مختلف عملکرد تسمه پرداخته می‌شود. شکل ۵ نمونه‌ای از علامت‌های ارتعاشی تسمه در حالت عملکرد عادی را نشان می‌دهد. همچنین هر یک از شکل‌های ۶ و ۷ به ترتیب یک نمونه علامت‌های ارتعاشی تحویل شده از تسمه در حالات بیش‌باری و حالت عملکرد تحت دمای گرم را نشان می‌دهند.

همانگونه که از شکل‌های ۶ و ۷ پیداست، رفتار ارتعاشی تسمه تحت دمای گرم و بیش‌باری دچار آشفتگی می‌شود و از ارتعاشات منظم تسمه تحت شرایط عادی (شکل ۵) کاملاً متمایز است. یعنی بیش‌باری موتور و افزایش دمای محیط باعث به وجود آمدن ارتعاشات اتفاقی و غیر عادی در تسمه شده‌اند. ارتعاشات ناخواسته و اتفاقی معمولاً منظم نیستند و نمی‌توان راه دقیقی برای پایش آنها پیش‌بینی نمود. لذا اگر منشاء این ارتعاشات اتفاقی شناسایی و حذف نگردد، این موضوع به نوبه‌ی خود باعث خرابی زودرس تسمه می‌شود.

¹ Data acquisition

² MATLAB

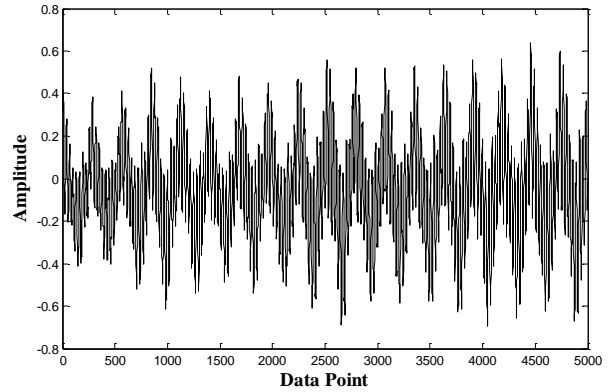
در مجموع با توجه به جدول ۴ می‌توان گفت که بروز شرایط محیطی نامناسب رفتار ارتعاشی منظم تسمه در شرایط عملکرد عادی را کاملاً تحت تاثیر خود قرار می‌دهند و باعث افزایش متغیرهایی می‌شوند که نشان از افزایش ارتعاشات و به تبع بروز عیب در آینده هستند. نتایج داده کاوی نشان می‌دهد که شرایط بیش‌باری موتور نسبت به محیط گرم تاثیر بیشتری بر ارتعاشات تسمه زمانبندی دارد.

۶-۳) نتایج تشخیص و طبقه‌بندی عیوب

در این پژوهش هریک از حالات سه گانه بررسی شده، دارای ۷۲ نمونه علامت ارتعاشی بودند. از هریک از این نمونه‌ها ۵ تابع ویژگی (که نام و معادله آنها در بخش داده کاوی آورده شده است) استخراج شد. به عبارت بهتر جدول ورودی کلی شبکه عصبی برای هر طبقه، ۷۲*۵ بود. روش‌های طبقه‌بندی هوشمند به منظور عملکرد صحیح نیاز دارند تا با بخشی از داده‌ها آموزش داده شوند. بدین منظور ۷۲ علامت ارتعاشی هر طبقه به دو بخش تقسیم شدند: ۵۰ نمونه برای آموزش و ۲۲ نمونه برای آزمون طبقه‌بندی. جدول ۵، نوع و مقدار تقسیم تیمارها و تکرارهای تعریف شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. در نهایت، شبکه عصبی مصنوعی بر اساس ویژگی‌های استخراج شده از علامت‌های هر طبقه، توانست با دقت میانگین ۷۸٪ برای داده‌های آموزش و دقت میانگین ۷۶٪ در داده‌های آزمون سه حالت عادی، دمای گرم و بیش‌باری در تسمه زمانبندی را تشخیص دهد و طبقه‌بندی کند. جدول ۶، اغتشاش نتایج شبکه عصبی برای داده‌های آموزش را نشان می‌دهد. همچنین جدول ۷ جدول اغتشاش نتایج شبکه عصبی در طبقه‌بندی داده‌های آزمون را نشان می‌دهد. نتایج طبقه‌بندی شبکه عصبی نشان می‌دهد که با تلفیق روش‌های تحلیل ارتعاشات، داده کاوی و هوش مصنوعی می‌توان به تشخیص شرایط کاری نامناسب مؤثر بر عملکرد تسمه زمانبندی موتور پرداخت. با استفاده از نتایج این پژوهش می‌توان پیش از بروز خرابی‌های شدید در تسمه، از طریق علائم ارتعاشی منتشره از تسمه به شرایط نامناسب کاری آن پی برده، با اصلاح شرایط محیطی و کاری از خرابی آن جلوگیری نموده و از این گذر موتور را از آسیب‌های جدی مصون نگه داشت.

جدول ۵: نحوه تقسیم‌بندی داده‌های ورودی به شبکه عصبی

نام حالت	داده‌های آموزش	داده‌های آزمون	مجموع
عادی	۵۰	۲۲	۷۲
بار زیاد	۵۰	۲۲	۷۲
دمای گرم	۵۰	۲۲	۷۲
مجموع	۱۵۰	۶۶	۲۱۶



شکل ۷: علامت‌های ارتعاشی تسمه تحت دمای گرم

۶-۲) نتایج داده کاوی

جدول ۴ مقادیر به دست آمده برای ویژگی‌های استخراج شده از یک نمونه علامت ارتعاشی در سه حالت شرایط عادی، بیش‌باری و محیط گرم را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۴ می‌توان مشاهده نمود که مقادیر میانگین دامنه ارتعاشات در حالات نامناسب محیطی نسبت به حالت عادی از خود افزایش نشان می‌دهند. ویژگی ریشه میانگین مربعات نیز که نشان از شدت ارتعاشات دارد در شرایط عملکرد سختگیرانه موتور، افزایش می‌یابد. مقادیر ویژگی انحراف از معیار نیز با بروز شرایط غیر عادی افزایش می‌یابند که نشان‌دهنده ناهمسانی علامت‌های ارتعاشات و رفتار نامنظم تسمه تحت بار و دمای گرم است. همچنین شاخص ضربه با بروز عیب در تسمه نیز به شدت افزایش می‌یابد که حاکی از بروز ارتعاشات اتفاقی در تسمه به علت شرایط نامناسب کاری است. ارتعاشات اتفاقی و پایش نشده دلیل بسیاری از خرابی‌های ناگهانی در تسمه‌هاست.

جدول ۴: ویژگی‌های استخراج شده از یک نمونه علامت ارتعاشی

نام ویژگی	شرایط مختلف کاری تسمه زمانبندی		
	عادی	بیش‌باری	دمای گرم
میانگین	۰,۰۴۳۲	۰,۱۷۲۱	۰,۱۲۳۵
انحراف از معیار	۰,۲۴۰۱	۰,۴۴۱۲	۰,۳۱۸۶
گشتاور چهارم	۱,۸۵۰۹	۳,۳۵۶۴	۲,۷۷۲
ریشه میانگین مربعات	۰,۲۴۰۶	۰,۳۷۶۵	۰,۲۹۳۳
شاخص ضربه	۲,۴۸۹۳	۵,۳۸۴۶	۳,۸۱۳۲

تسمه را از دو حالت بیش‌باری موتور و محیط گرم تسمه زمانبندی تشخیص دهد و طبقه‌بندی کند. دقت شبکه عصبی مصنوعی در طبقه‌بندی داده‌های آموزش و آزمون به ترتیب ۷۸ و ۷۶٪ بود. نتایج این پژوهش حاکی از توانمندی روش ارائه شده مبتنی بر تحلیل ارتعاشات، داده کاوی و طبقه‌بند شبکه عصبی مصنوعی در پایش وضعیت تسمه زمانبندی موتور است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی صمیمانه خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، به خصوص واحد آزمایشگاه این شرکت ابراز می‌دارند. نویسندگان به ویژه از همفکری نزدیک و کمک‌های ریاست واحد آزمایشگاه، جناب آقای مهندس پیمان شرقی و آقای مهندس سید اشکان موسویان نهایت سپاس را دارند.

References

- [1] L. Manin, G. Michon, D. Remond, R. Dufour, From transmission error measurement to pulley-belt slip determination in serpentine belt drives: Influence of tensioner and belt characteristics, Mechanism and Machine Theory, Vol. 44, pp. 813-821, 2009
- [2] R. Thomanek, R. Steinberg, B. Krauser, U. Morawitz, Ford zetec-E, I4 engine timing belt drive, SAE International, Paper No. 1999-01-0641, 1999
- [3] B. Stojanovic, S. Tanasijevic, N. Miloradovic, Tribomechanical systems in timing belt drives, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 15, pp. 465-473, 2009
- [4] M. Ucar, R. Ergun, A. Cengiz, A novel failure diagnosis system design for automotive timing Belts, Experimental Techniques, pp. 1-6, DOI: 10.1111/j.1747-1567.2012.00842.x, 2012
- [5] K.W. Dalgarno, A.J. Day, T.H.C. Childs, R.B. Moore, Stiffness loss of synchronous belts, Composites Part B: Engineering, Vol. 9, pp. 217-222, 1998
- [6] O. Schilling, M. Westerwald, J. Wiedenroth, T. Gmbh, ABAQUS FE analysis of a pipe conveyor using solids with embedded truss elements and shells with rebar layers, in: NAFEMS Seminar, Simulating Composite Materials and Structures, Bad Kissingen, Germany, pp. 1-10, 2007
- [7] J.E. Mack, Belt flaw detector, Patent No. 5994712, 1999
- [8] Industrial synchronous belts design manual, Gates Corporation, No. E2/20099, 2007
- [9] T. Childs, K. Dalgarno, A. Day, R. 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, pp. 409-419, 1998

جدول ۶: نتایج شبکه عصبی در طبقه‌بندی داده‌های آموزش

خروجی شبکه عصبی مصنوعی				
	عادی	بیش‌باری	دمای گرم	دقت (%)
طبقه واقعی علامت تحصیل شده	عادی	۳	۵	۸۴٪
	بیش‌باری	۳۸	۸	۷۶٪
	دمای گرم	۹	۳۷	۷۴٪
دقت میانگین				۷۸٪

جدول ۷: نتایج شبکه عصبی مصنوعی در طبقه‌بندی داده‌های آزمون

خروجی شبکه عصبی مصنوعی				
	عادی	بیش‌باری	دمای گرم	دقت (%)
طبقه واقعی علامت تحصیل شده	عادی	۲	۲	۸۱٫۸٪
	بیش‌باری	۱۶	۴	۷۲٫۷٪
	دمای گرم	۵	۱۶	۷۲٫۷٪
دقت میانگین				۷۵٫۷٪

با نگاهی به جدول‌های ۶ و ۷ می‌توان مشاهده نمود که روش ارائه شده در این پژوهش در تشخیص شرائط عادی با موفقیت بیشتری همراه بوده است. دقت این روش در تفکیک میان دو حالت بیش‌باری و محیط گرم افت دارد. فرآیند عیب‌یابی طراحی شده در تشخیص شرائط مناسب و نامناسب دقیق (دقت فراتر از ۸۰٪) عمل کرده است، اما در تشخیص اینکه شرائط نامناسب چه هستند، دقت کمتری داشته است. در واقع روش ارائه شده، در برآورده نمودن هدف اصلی این پژوهش که همانا تشخیص شرائط کاری و محیطی نامناسب مؤثر بر عملکرد تسمه بوده است، موفق عمل کرده است.

(۷) نتیجه‌گیری

در این پژوهش سامانه‌ای هوشمند برای پایش وضعیت تسمه زمانبندی موتورهای احتراق داخلی معرفی و به کار گرفته شده است. این سامانه بر اساس رفتار ارتعاشی تسمه به تشخیص شرائط نامطلوب کاری آن از جمله بیش‌باری و دمای گرم می‌پردازد. روش معرفی شده در این پژوهش توانست بر اساس ویژگی‌های مستخرج از علامت‌های ارتعاشی و طبقه‌بند شبکه عصبی مصنوعی شرائط عادی عملکرد

- [14] P. Castellini, E. Cupido, N. Papne, E.P. Tomasini, Tracking laser doppler vibrometer for linear motion: Application to a timing belt, Università degli Studi di Ancona, Italy, 2000
- [15] Y. Lei, Z. He, Y. Zi, A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery, Expert Systems with Applications, Vol. 35, pp. 1593-1600, 2008
- [16] M. Khazaei, H. Ahmadi, M. Omid, A. Banakar, 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, pp. 323-330, 2013
- [17] G.S. Hong, M. Rahman, Q. Zhou, Using neural network for tool condition monitoring based on wavelet decomposition, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, pp. 551-566, 1996
- [10] 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, pp. 947-957, 2006
- [11] S.M. Jafari, M. Kazaemi, M. Roozban, 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
- [12] T.H.C. Childs, A. Coutsoucos, K.W. Dalgarno, A.J. Day, I.K. Parker, Life prediction of automotive timing belts, In Proceedings of the International Conference on Motion and Power Transmission, pp. 376-381, Japan, 1991
- [13] K.W. Dalgarno, A.J. Day, T.H.C. Childs, Synchronous belt materials and belt life correlation, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D, Journal of Automobile Engineering, Vol. 208, pp. 37-48, 1994



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Diagnosis and classification of effective abnormal environmental conditions on timing belt performance based on vibration signals

M. Khazaei¹, A. Banakar^{2*}, B. Ghobadian³, S.M. Mirsalim⁴, S.M. Jafari⁵, S. Javan⁶

¹Biosystem Mechanical Engineering Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, m.khazaei@modares.ac.ir

²Biosystem Mechanical Engineering Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ah_banakar@modares.ac.ir

³Biosystem Mechanical Engineering Group, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, ghobadian@modares.ac.ir

⁴Amirkabir University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir

⁵Sharif University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, sm_jafari@ip-co.com

⁶Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, s.javan@ip-co.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-915-317-6294

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 01 January 2014

Accepted: 14 April 2014

Keywords:

Condition monitoring

Engine timing belt

Vibration analysis

Artificial neural network

Data mining

ABSTRACT

The Timing belt is one of important parts of modern cars. "Heat extreme" and "overloading" are two common faults of these belts, which cause fatigue, erosion, sudden failures, and consequently damages to the engine. The present article introduces an intelligent method to diagnose these two major faults of belts, using vibration signals. The method presented in this research was designed based on a combination of experimental analyses, data mining of time domain signals and the artificial neural network (ANN) classifier. To do so, firstly, vibration signals of the belt were measured by a laser sensor in three conditions: (1) normal condition, (2) belt overloading and (3) heat extreme. In the data mining stage, five statistical features including mean, standard deviation, root mean square (RMS), kurtosis and impulse factors were extracted from vibration signals. Extracted features were used as ANN inputs to the fault diagnosis and the classification of different defects of the belt. Finally, the ANN, with the average accuracy of 76%, could diagnose and classify relevant faults in the timing belt of an engine. Results showed that intelligent methods could be used to diagnose faults of belts and therefore, to protect engines from serious damages, caused by their failures.