



## شناسایی عیب در شمع موتور با استفاده از تحلیل ارتعاش به کمک شبکه عصبی

سید اشکان موسویان<sup>۱</sup>، غلامحسین نجفی<sup>۲\*</sup>، برات قبادیان<sup>۳</sup>، سید محمد جعفری<sup>۴</sup>، بابک سخایی<sup>۵</sup>، مقداد خزایی<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [a.moosavian@modares.ac.ir](mailto:a.moosavian@modares.ac.ir)

<sup>۲</sup>دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [g.najafi@modares.ac.ir](mailto:g.najafi@modares.ac.ir)

<sup>۳</sup>دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [ghobadib@modares.ac.ir](mailto:ghobadib@modares.ac.ir)

<sup>۴</sup>دانشگاه صنعتی شریف و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، [sm\\_jafari@ip-co.com](mailto:sm_jafari@ip-co.com)

<sup>۵</sup>دانشگاه صنعتی شریف و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران، [b.sakhaei@ip-co.com](mailto:b.sakhaei@ip-co.com)

<sup>۶</sup>دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، [m.khazaei@modares.ac.ir](mailto:m.khazaei@modares.ac.ir)

\*نویسنده مسئول، شماره تلفن: ۰۲۱-۴۸۲۹۲۳۲۲

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۲ مهر ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۰ آبان ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

عیب‌یابی

شمع موتور

تحلیل ارتعاش

حذف نوفه

شبکه عصبی

یکی از قطعات تأثیرگذار بر روی کیفیت احتراق شمع‌ها، به طوری که اگر شمع‌ها سالم نباشند می‌توانند تأثیر سوئی بر آلاینده‌گی و بازده موتور داشته باشند. در این مقاله با هدف جلوگیری از اثرات سوء شمع‌های معیوب، روشی بر پایه تحلیل ارتعاش برای شناسایی عیب در شمع موتور ارائه می‌شود. داده‌های ارتعاش موتور به کمک حسگر شتاب‌سنجی در شرایط شمع سالم و معیوب، ذخیره شدند. به دلیل وجود نوفه‌های شدید، روش حذف نوفه به منظور بهبود پردازش علائم بکار گرفته شد. سپس برای به‌دست آوردن اطلاعات مفید تشخیصی از داده‌های پردازش شده، روش استخراج ویژگی به کمک متغیرهای آماری استفاده شد. در این تحقیق هفت ویژگی بیشینه، میانگین، انحراف معیار، واریانس، چولگی، کورتسیس و شاخص ضربه در مرحله استخراج ویژگی به کار گرفته شد. شبکه عصبی با هفت درلایه ورودی تحت آموزش قرار گرفت. پس از ایجاد ساختار بهینه، عملکرد شبکه طراحی شده آزمایش شد. نتایج نشان دادند که دقت کافی در تشخیص شمع معیوب به‌دست آمد. بنابراین می‌توان ذکر کرد که روش پیشنهاد شده می‌تواند به‌طور قابل اطمینانی برای شناسایی عیب در شمع موتور استفاده شود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

**(۱) مقدمه**

هدف از پایش وضعیت نظارت بر وضعیت عملکرد دستگاه و به دست آوردن آثار و نشانه وضعیت دستگاه است، زمانی که دستگاه در حال انجام عملیات می باشد، به طوری که دستگاه بتواند به صورت اقتصادی و ایمنی نگهداری شده یا فعال بماند. هر سامانه پویا، برقی، هیدرولیکی یا حرارتی دارای علائم مشخصه ای است که وضعیت عادی آن دستگاه را در حین کار نشان می دهد. تغییر این علائم، هر چند به اندازه کم، می تواند نشانه ای از بروز اشکال و خرابی در سامانه باشد. منظور از پایش وضعیت، تعیین وضعیت سامانه با اندازه گیری علائم مشخصه آن و بهره گیری از این اطلاعات برای پیش بینی خرابی سامانه است. پایش وضعیت با روش ها و روش های مختلفی اجرا می گردد [۱].

در تحلیل ارتعاش مقدار ارتعاشات دستگاه با استفاده از حسگرهای خاص اندازه گیری می شود زیرا دامنه ارتعاشات هر دستگاه معیاری از سلامت آن است. بدین منظور می توان یکی از متغیرهای جابجایی، سرعت یا شتاب را با حسگرهای مختلف در موقعیت های گوناگون و مکان های متفاوت در دستگاه اندازه گیری کرد. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل ارتعاشات می تواند به منظور عیب یابی در دستگاه ها استفاده شود، زیرا اکثر مشکلات دستگاه های دوار به صورت علائم ارتعاشی یا تغییر در مشخصه های ارتعاشی سامانه ظاهر می گردد. از طرف دیگر، هر عیب یا مشکل مکانیکی علائم ارتعاشی مخصوص به خود را ایجاد می کند. به این ترتیب می توان با تحلیل ارتعاشات دستگاه به مشکلات و عیوب آن پی برد [۲].

با توجه به افزایش تقاضا در عملکرد و بازده بهتر و نیز افزایش در قابلیت اطمینان خودروها، تشخیص عیب در مقوله پایش وضعیت دستگاه ها اهمیت زیادی پیدا کرده است. تشخیص اولیه عیوب موتورها در حالی که موتور در حال کار است، می تواند در جلوگیری از وقوع حوادث غیر قابل پیش بینی کمک کند. به طور مثال اگر عیبی در سامانه جرقه زنی موتور به وجود آید، کیفیت احتراق درون استوانه و به تبع آن عملکرد موتور تضعیف می شود و با تضعیف کیفیت احتراق، آلاینده های موتور افزایش می یابد و در بعضی شرایط ممکن است یک استوانه از کار بیفتد و موتور تنها با سه استوانه کار کند. واضح است که در این حالت مشکلات بسیاری برای موتور ایجاد می شود.

قطب های شمع (الکترودها) تمایل به خوردگی دارند بدین معنا که با گذشت زمان، فاصله میان قطب های شمع به مرور افزایش می یابد. با افزایش فاصله قطبها، جرقه ای قوی تر نیاز است که در این حالت ولتاژ بیشتری از سامانه جرقه زنی کشیده می شود و ممکن است به آن آسیب وارد کند [۳]. اثر مهم دیگری که شمع معیوب دارد، افت در بازده است که برای موتورها مطلوب نیست. بنابراین لازم است چنین عیب اجتناب ناپذیری که به مرور زمان در شمع ها اتفاق می افتد بموقع شناسایی شود.

تاکنون تلاش های بسیاری برای تشخیص عیب موتورها با استفاده از روش های هوش مصنوعی انجام گرفته است، اما تحقیق درباره عیب یابی ارتعاشی شمع موتور بسیار کم است. دیتون<sup>۱</sup> و همکاران [۴]، به بررسی ارتعاشی بدنه در حالت های سالم و معیوب پرداختند. آن ها دریافتند که بازه ارتعاشی موتور می تواند اطلاعات قابل اطمینانی را نسبت به شرایط کاری موتور نشان دهد و علائم ارتعاشی می تواند منبع خرابی را شناسایی کند. آری<sup>۲</sup> و همکاران [۵]، توانستند عیوب قطع یک شمع و لقی دسته موتور را با استفاده از تحلیل ارتعاش و روش تبدیل سریع فوریه<sup>۳</sup> انجام دهند. هوآنگ<sup>۴</sup> و همکاران [۶]، یک روش ارتعاشی تشخیص عیوب را برای موتور دیزل به کمک تبدیل موجک و شبکه عصبی ارائه کردند. در این تحقیق عیوبی نظیر نشتی دریچه هوا و دود بررسی و شناسایی شدند. وو<sup>۵</sup> و همکاران [۷]، به بررسی ارتعاشی عیوب موتور خودرو با استفاده از تبدیل موجک و شبکه عصبی پرداختند. همچنین آنها [۸] به تشخیص عیوب موتور به کمک فشار چندراهه ورودی و شبکه عصبی پرداختند. ابراهیمی و ملازاده [۹]، سامانه ای برای تشخیص عیوب موتور در موتوری دیزلی را به کمک تحلیل ارتعاش ارائه کردند. یاداو<sup>۶</sup> و کالرا<sup>۷</sup> [۱۰]، روشی برای عیب یابی موتور درونسوز بر پایه تحلیل صدا و استفاده از شبکه عصبی ارائه کردند. ونگ<sup>۸</sup> و همکاران [۱۱]، به کمک شبکه عصبی عیوب مختلف موتور را بررسی و شناسایی کردند. در این تحقیق عیوبی نظیر عدم احتراق در هر یک از استوانه ها، خرابی حسگر اکسیژن، ۸۰ درصد تنگ شدگی دهانه شمع و ۱۰۰ درصد گشاد شدن دهانه شمع در نظر گرفته شد. همچنین داده های دما و نیز محتوای گازهای خروجی برای تحلیل استفاده شدند. ونگ<sup>۹</sup> و ونگ<sup>۱۰</sup> [۱۲]، روشی برای عیب یابی در موتورهای بنزینی ارائه کردند. در این تحقیق از داده های الگوی اشتعال استفاده شد و عیوبی از قبیل مقاومت بالا در سیم شمع، کم شدن فاصله الکترودهای شمع، کوبش و نشتی چندراهه ورودی بررسی شدند. چن<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۳]، به عیب یابی موتور با استفاده از ارتعاشات پیچشی و شتاب زاویه ای بدنه موتور پرداختند. در این تحقیق از شبکه عصبی برای ایجاد سامانه تشخیصی استفاده شد. جوان و همکاران [۳]، به بررسی تأثیر خوردگی شمع بر ولتاژ لازم برای جرقه زنی پرداختند. در این مقاله ذکر شد که این عیب می تواند بر سامانه جرقه زنی فشار آورده و مشکلات دیگری را نیز به همراه داشته باشد.

1 deBotton

2 Ari

3 Fast Fourier Transform (FFT)

4 Huang

5 Wu

6 Yadav

7 Kalra

8 Wang

9 Vong

10 Wong

11 Chen

در این تحقیق شرایط موتور به نحوی انتخاب شدند که عیب در نظر گرفته شده علائم واضحی را نشان ندهد، یعنی شرایط برای عیب‌یابی سخت‌گیرانه‌تر شدند. زیرا با انتخاب کمترین دور و بار صفر، علائم عیوب می‌توانند پنهان‌تر از شرایط دیگر باشند.

در گام بعدی شمع‌های سالم و معیوب به‌طور جداگانه روی موتور نصب شدند. ناگفته نماند که در حالت معیوب، شمع خراب تنها روی استوانه ۱ نصب شد و تمامی شرایط دیگر مشابه حالت سالم بودند. پر واضح است که در این شرایط تغییر در رفتار ارتعاشی موتور تنها به‌دلیل خرابی شمع می‌باشد. جدول ۱ تفاوت میان شمع‌های سالم و معیوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود در حالت معیوب، دهانه شمع تقریباً ۴۷ درصد بیشتر شده است. به منظور تأیید مشکل‌زا بودن این عیب، می‌توان به مقاله جوان و همکاران [۳] اشاره کرد. در این مقاله ذکر شده است که با افزایش تنها ۲۰ درصد در دهانه شمع، ولتاژ لازم برای جرقه‌زنی در فشار ۱ بار بیش از ۱۱ درصد افزایش می‌یابد.

پس همان‌طور که پیشتر نیز ذکر شد، یکی از اثرات نامطلوب عیب گشاد شدن دهانه شمع، وارد آمدن فشار بر سامانه جرقه‌زنی و آسیب رساندن به آن است [۱۴]. همچنین با افزایش دهانه شمع، مدت زمان جرقه کاهش می‌یابد که این امر در انرژی برقی لازم برای اشتعال مخلوط سوخت و هوا نیز تأثیر سویی می‌گذارد. بعلاوه افزایش دهانه شمع هر چند کم می‌تواند در الگوی جرقه زنی تغییر ایجاد کند که همین امر می‌تواند موجب افزایش تغییرات چرخه‌ای فشار مؤثر متوسط داخلی شود [۳]. در مجموع می‌توان ذکر کرد که عیب در نظر گرفته شده عملکرد سامانه جرقه‌زنی و کارکرد مناسب موتور را تحت تأثیر قرار داده است. همچنین اگر در این شرایط عیب تشخیص داده نشود، پس از گذشت زمان عیب پیشرفت کرده و مشکلات بیشتری را برای موتور ایجاد می‌کند.



شکل ۱: موتور آزمون

مقاله حاضر به مطالعه عیب شمع و شناسایی آن به کمک داده‌های ارتعاش موتور می‌پردازد. تفاوت این تحقیق با تحقیق ونگ و همکاران [۱۱]، در استفاده از عیب بسیار ریزتر و نیز به‌کارگیری داده‌های ارتعاش موتور در شناسایی عیب شمع می‌باشد. بعلاوه دیده می‌شود که در تحقیقات دیگر، عیب گشاد شدگی دهانه شمع بررسی نشده که از این حیث مبین جدید بودن تحقیق حاضر می‌باشد. همچنین، روش‌های استفاده شده در این تحقیق برای شناسایی عیب شمع نیز به نوبه خود منحصر به فرد است.

## ۲) مواد و روش‌ها

روش متداول برای تشخیص خرابی‌ها شامل بررسی تغییرات قابل اندازه‌گیری سامانه با توجه به رواداشت مقادیر به‌دست آمده از پایش وضعیت دستگاه با حالت سلامت می‌باشد. این روش نیاز به شخصی خبیره به‌منظور اعمال نظر برای سلامت یا معیوب بودن دستگاه دارد. در این تحقیق قصد بر آن است که سامانه هوشمند تشخیص عیب ارائه گردد به‌طوری‌که این سامانه در دادن تصمیم سریع نسبت به سالم یا معیوب بودن موتور بدون نیاز به شخص خبیره کمک نماید. برای این منظور داده‌های ارتعاش برای تشخیص عیب استفاده گردیدند. سامانه ارائه شده شامل چهار مرحله می‌باشد که بترتیب عبارتند از:

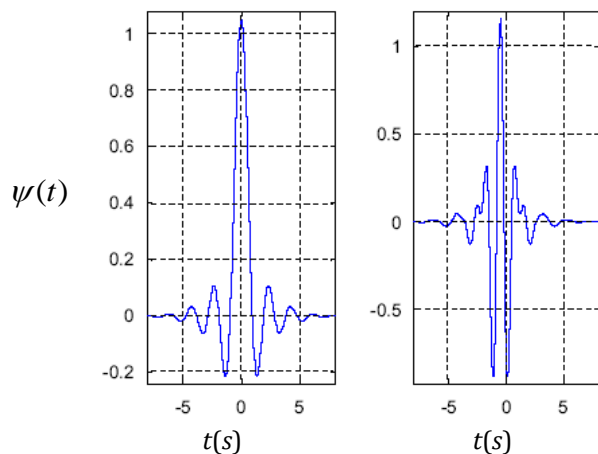
- تحصیل داده: در این مرحله داده‌های ارتعاش در حالات سالم و معیوب شمع موتور جمع‌آوری می‌شوند.
- پردازش داده: در این مرحله با استفاده از روش تبدیل موجک، نوفه داده‌ها گرفته می‌شود.
- استخراج ویژگی: در این مرحله به کمک توابع آماری مختلف، ویژگی‌های وابسته به داده‌های سالم و معیوب استخراج می‌شوند.
- تصمیم‌گیری: در این مرحله که به مرحله طبقه‌بندی نیز معروف است، به کمک شبکه عصبی<sup>۱</sup> وضعیت شمع تشخیص داده می‌شود [۹].

## ۲-۱) تحصیل داده

در این تحقیق آزمایش‌ها بر روی موتوری چهار استوانه بنزینی انجام شد (شکل ۱). این موتور به‌نام XU7 معروف بوده و برای خودروهایی نظیر پژو ۴۰۵ و سمند به‌کار می‌رود. آزمون‌ها در دور درجا و در شرایط بدون بار انجام شدند. دلیل انتخاب شرایط مذکور این است که اساساً عیوب در شرایط سخت‌تر (با دور تندتر و بار بیشتر) می‌توانند تأثیرگذارتر شوند یعنی می‌توانند به‌شکل واضح‌تری خود را نشان دهند. مسلماً در این شرایط فرآیند عیب‌یابی آسان‌تر شده و شناسایی عیب به مراتب سهل‌تر خواهد شد.

<sup>1</sup> Artificial neural network (ANN)

که  $N$  طول داده و  $\sigma$  انحراف معیار نوفه می‌باشد [۱۵]. شایان ذکر است که فرآیند حذف نوفه استفاده شده در این تحقیق به کمک نرم‌افزار MATLAB با برنامه رایانه‌ای این روش و مشابه روند طی شده در پژوهش عباسیون و همکاران [۱۵] انجام شده است.



شکل ۲: موجک میر: سمت چپ) موجک ترکیب برای تجزیه (جزئیات)، سمت راست) مقیاس ترکیب برای تجزیه (تقریبات)

### ۳-۲ استخراج ویژگی

چون جدول داده‌های پردازش شده می‌تواند بسیار بزرگ باشد (دارای تعداد داده‌های بسیار زیادی است)، باید روشی اجرا شود که خصوصیات مختلف داده را به‌دست آورد تا هم نماینده این داده باشند، و هم با این روش حجم مجموعه داده‌ها کاهش یافته و بار محاسباتی نیز کم شود. استخراج ویژگی فرآیندی است که در آن با انجام عملیاتی بر روی داده‌ها، ویژگی‌های بارز و تعیین‌کننده داده‌ها مشخص می‌شود. به بیان دیگر مهمترین ویژگی‌های معنی‌دار با استفاده از برخی توابع آماری محاسبه می‌شوند. هدف استخراج ویژگی این است که داده‌های اولیه به شکل قابل استفاده‌تری برای پردازش‌های بعدی درآیند. بنابراین در این تحقیق نیز از روش استخراج ویژگی به‌منظور به‌دست آوردن خصوصیات مختلف داده‌ها در حالات سالم و معیوب استفاده شد. توابع استفاده شده برای تحقق این امر عبارت بودند از: بیشینه<sup>۵</sup>، میانگین<sup>۶</sup>، انحراف معیار<sup>۷</sup>، واریانس<sup>۸</sup>، چولگی<sup>۹</sup>، کورتسیس<sup>۱۰</sup> و شاخص ضربه<sup>۱۱</sup> [۹]. جدول ۲ معادله توابع آماری مذکور را نشان می‌دهد.

<sup>5</sup> Maximum

<sup>6</sup> Mean

<sup>7</sup> Standard deviation

<sup>8</sup> Variance

<sup>9</sup> Skewness

<sup>10</sup> Kurtosis

<sup>11</sup> Impulse factor

جدول ۱: مشخصه شمع سالم و معیوب

وضعیت شمع	فاصله قطبها یا الکترودها (میلیمتر)
سالم	۰/۹۵
معیوب	۱/۴

برای دریافت داده‌های ارتعاش، یک حسگر شتاب‌سنج پیزوالکتریک PCB 357B11 روی بستر موتور و نزدیک به استوانه ۱ به‌طور افقی نصب شد. سامانه اکتساب داده شامل تقویت کننده B&K NEXUS با محدوده زیاد و خروجی ۱۰ (mV/ms<sup>2</sup>) برای تقویت داده‌ها و دستگاه جمع‌آوری اطلاعات ۱۷ ورودی با نرخ داده‌برداری ۱ (MHz) با عنوان تجاری Dyn-X بود. همچنین برای ثبت داده‌ها بر روی رایانه از نرم‌افزار Pulse نسخه ۱۴٫۱ استفاده شد. در نهایت، تحلیل داده‌ها به کمک نرم‌افزار MATLAB 7.6.0 انجام شد.

### ۲-۲ حذف نوفه

تبدیل موجک ابزاری است برای تقسیم کردن داده و یا تابعی است برای عمل کردن بر روی اجزاء مختلف بسامدی به‌منظور بررسی هر جزء با وضوح<sup>۱</sup> وابسته به مقیاس و اطلاعات بوجود آمده در هر دو حوزه زمان و بسامد. این تبدیل با معادله آتی بیان می‌شود:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \hat{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

یکی از کاربردهای تبدیل موجک حذف نوفه از داده است. از آنجا که تبدیل موجک مقدار مشابهت اجزای داده را با توابع موجک بیان می‌کند و چون نوفه و مولفه‌های نامعین مشابهت ناچیزی با توابع موجک دارند، در نتیجه آن‌ها به‌صورت اجزایی با دامنه‌های بسیار کمتر از سایر اجزا دیده می‌شوند و می‌توانند براحتی با تعریف حد آستانه از داده جدا شوند. در مقایسه با تصفیه (فیلتر کردن) معمولی، این روش می‌تواند کارایی بیشتری داشته باشد چون بین نوفه‌های بسامد بالا و اتفاقات گذرای ناشی از عیب که آن‌ها نیز بسامد بالایی دارند تفاوت قائل می‌شود، امری که در تصفیه (فیلتر کردن) معمولی اتفاق نمی‌افتد.

بنابراین به‌منظور کاهش اثر نوفه روی داده‌های گرفته شده، موجک نوفه‌گیر<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در این تحقیق، موجک گسسته<sup>۳</sup> میر به‌عنوان موجک مادر (تابع موجک) استفاده شد. جزئیات و تقریب‌های موجک تجزیه‌کننده میر در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. برای فرآیند الگونیامی سری داده خاص، قاعده آستانه عمومی<sup>۴</sup> استفاده شد که بدین شکل است:

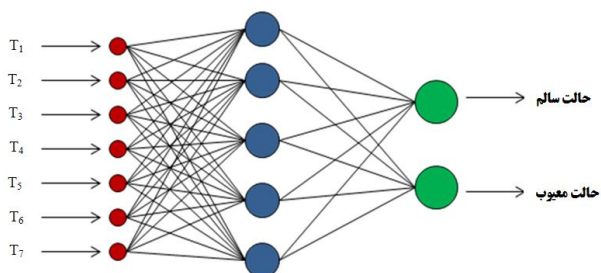
$$t = \sigma \sqrt{2 \log N} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Resolution

<sup>2</sup> Wavelet denoising

<sup>3</sup> Discrete Meyer wavelet

<sup>4</sup> Universal threshold rule



شکل ۳: ساختار بهینه شبکه عصبی برای تشخیص عیب در شمع

### ۳ نتایج و بحث

شکل ۴ داده‌های ارتعاش حالت معیوب شمع موتور را قبل و بعد از حذف نوفه نشان می‌دهد. شکل طیف داده بدون نوفه نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل ملاحظه می‌شود که بسامد غالب این داده در بسامد دو برابر دور موتور می‌باشد. بدین معنی که اولین بیشینه دامنه در موتور بنزینی چهار استوانه در هارمونیک دوم رخ می‌دهد. این امر به دلیل فرآیند احتراق است که در هر یک دور میل لنگ، دو احتراق در موتور رخ می‌دهد. بنابراین طیف نشان داده شده در داده بدون نوفه، دارای بسامدهای منظور می‌باشد، یعنی فرآیند حذف نوفه توانسته است بخوبی مشخصه‌های بسامدی داده را نشان دهد. از طرف دیگر بدون حذف نوفه این مشخصه‌ها پنهان می‌ماند و نتایج اشتباهی به دست خواهند آمد، زیرا داده‌های ارتعاش موتور بشدت نوفه دار و غیرگذرا و علائم عیب در آن‌ها غیر قابل شناسایی می‌شوند. شکل‌های ۶ و ۷ مقایسه‌ای میان داده‌های ارتعاش ناشی از شمع‌های سالم و معیوب را نشان می‌دهند. با مقایسه داده‌ها در حوزه زمان، دیده می‌شود که تمایز میان حالات سالم و معیوب به صورت بصری امکان پذیر نمی‌باشد. همین امر دلیلی بر ریز بودن عیب در نظر گرفته شده در این تحقیق است. بدین معنا که عیب موجود در شمع به قدری ریز بوده که علائم مشخصی را در داده‌های ارتعاش پدید نیاورده است، پس برای شناسایی این عیب نیاز به تحلیل‌های بیشتری می‌باشد. در شکل ۷، داده‌های حوزه بسامد برای حالات سالم و معیوب شمع آورده شده است. شایان ذکر است که این شکل طیف‌ها پس از عملیات حذف نوفه از داده‌های ارتعاش به دست آمدند. دیده می‌شود که در این حوزه، اجزاء بسامدی وابسته به ارتعاشات موتور به وضوح مشخص بوده و تفاوت دو حالت نمایان تر شده است که این نتایج مطلوب ناشی از به کارگیری روش حذف نوفه بوده است.

در مرحله استخراج ویژگی، توابع آماری ذکر شده در جدول ۲ بر روی دامنه ارتعاش داده‌های بدون نوفه اعمال شدند. به این طریق مجموعه کلی داده برای حالات سالم و معیوب تشکیل شد. ناگفته نماند که در تحقیق حاضر برای هر حالت موتور ۳۵ نمونه جمع‌آوری شد.

جدول ۲: معادله توابع آماری استفاده شده

نام تابع	معادله
بیشینه	$T_1 = \max[ x(n) ]$
میانگین	$T_2 = \frac{\sum_{n=1}^N x(n)}{N}$
انحراف معیار	$T_3 = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - T_2]^2}{N - 1}}$
وارianس	$T_4 = T_3^2$
چولگی	$T_5 = \frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - T_2]^3}{(N - 1)T_3^3}$
کورتسیس	$T_6 = \frac{\sum_{n=1}^N [x(n) - T_2]^4}{(N - 1)T_3^4}$
شاخص ضربه	$T_8 = \frac{T_1}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N  x(n) }$

که  $x(n)$  سری داده و  $N$  تعداد داده در هر سری داده است

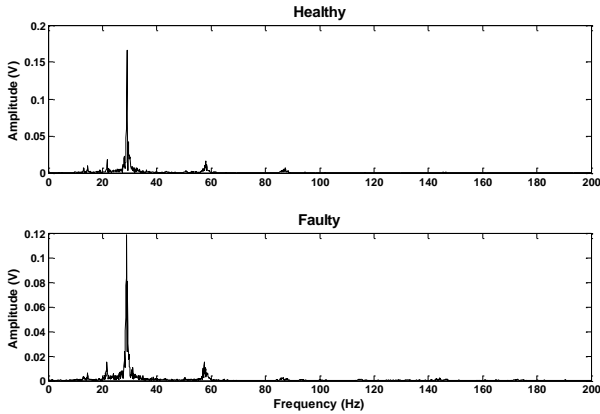
### ۲-۴) شبکه عصبی

شبکه‌های عصبی مصنوعی سامانه‌هایی برای پردازش اطلاعات هستند که سازوکار آن‌ها از سامانه عصبی زیستی الهام گرفته است. شبکه‌های عصبی مصنوعی که به اختصار شبکه‌های عصبی نامیده می‌شوند، از تعدادی واحدهای پردازش متصل به هم (neuron) تشکیل یافته‌اند. قابلیت مهم شبکه‌های عصبی یادگیری می‌باشد. یادگیری در شبکه‌های عصبی، مانند انسان، از روی مثال می‌باشد. در سال‌های اخیر گزارشات فراوانی مبنی بر استفاده از شبکه‌های عصبی در رشته‌های مختلف علوم به ثبت رسیده است.

با توجه به کاربرد گسترده شبکه‌های عصبی از نوع پیش‌خور پس انتشار در مسایل طبقه‌بندی، در تحقیق حاضر نیز از این نوع شبکه استفاده شد. همچنین شبکه عصبی طراحی شده دارای ساختار سه لایه می‌باشد که شامل لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی است. در لایه ورودی تعداد عصب‌ها برابر با تعداد ویژگی‌های استخراج شده می‌باشد. تعداد عصب‌های لایه خروجی باید برابر تعداد دسته‌های موجود باشد، پس در این تحقیق به موجب وجود دو حالت سالم و معیوب، دو عصب در لایه خروجی قرار دارد. همان‌طور که اشاره شد تعداد عصب‌های دولایه ورودی و خروجی با توجه به صورت مسئله تعیین می‌شوند و تنها لایه پنهان است که قابلیت تغییر به کمک کاربر را دارد. به همین دلیل شبکه با تعداد مختلفی از عصب‌های لایه پنهان تحت آموزش قرار گرفت تا ساختار بهینه ایجاد شود. در نهایت دیده شد که شبکه با ۵ عصب در لایه پنهان دارای بهترین عملکرد می‌باشد. شکل ۳ ساختار بهینه شبکه طراحی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۳: شرح مجموعه داده‌ها

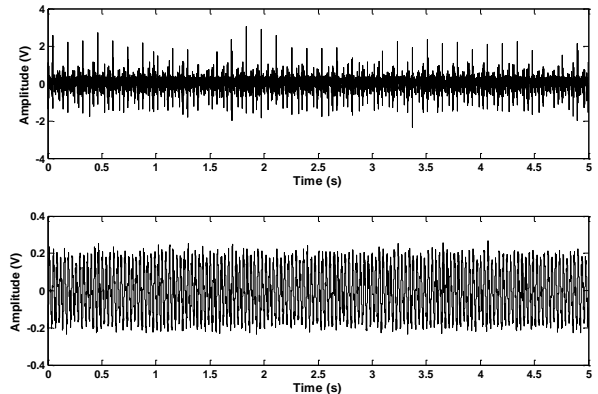
وضعیت موتور	تعداد داده‌های آموزش	تعداد داده‌های آزمایش
با شمع سالم	۲۰	۱۵
با شمع معیوب	۲۰	۱۵



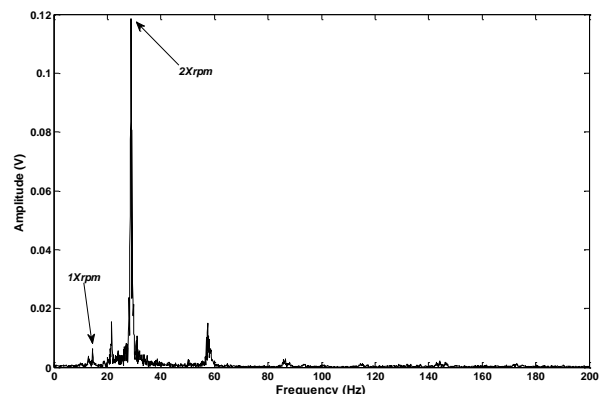
شکل ۷: شکل طیف داده‌های ارتعاش برای دو حالت شمع

همان طور که پیشتر ذکر شد، شبکه عصبی با هفت ورودی و دو خروجی آموزش داده شد که هر خروجی بیانگر وضعیت شمع موتور بود. به منظور بررسی صحت و عملکرد روش ارائه شده، شبکه عصبی به کمک داده‌های آزمایش که در فرآیند آموزش شبکه حضور نداشتند، ارزیابی شد. شایان ذکر است که این ارزیابی با ارزیابی‌های درونی خود شبکه عصبی که به منظور تشخیص زمان پایان آموزش و دقت آموزش است متفاوت می‌باشد. تفاوت شایان توجه این ارزیابی با ارزیابی درونی (ارزیابی آموزش) شبکه در این است که با اینکه ارزیابی درونی شبکه اطلاعات مناسبی درباره کیفیت شبکه آموزش دیده بدست می‌دهد اما هدف در این پژوهش تدوین ساختار و سامانه‌ای است که قابلیت تشخیص در شرایط مختلف و حتی آزمون‌های برخط را داشته باشد. به همین دلیل به جای انتخاب تصادفی داده‌های آزمون از میان کل داده‌ها (که روشی متداول است)، داده‌های آزمایش از تکرارهای داده‌برداری متفاوت بدست آمده‌اند. استفاده از روش تصادفی باعث می‌شود شبکه با شرایط تمامی تکرارها آشنا گردیده و با آن‌ها آموزش ببیند در صورتی که به دست آوردن داده‌های آزمایش از تکرارهای متفاوت، شبکه را در برابر مسئله‌ای تازه قرار می‌دهد و در واقع شرایط واقعی کاربرد را ایجاد می‌کند. در صورت استفاده از این روش ممکن است کمی دقت‌های بدست آمده کمتر از روش تصادفی باشد اما آنچه مهم است قابلیت و دقت واقعی سامانه در مسائل طبقه‌بندی با داده‌های جدید است که روش حاضر این امر را تا حدود زیادی تحقق می‌بخشد.

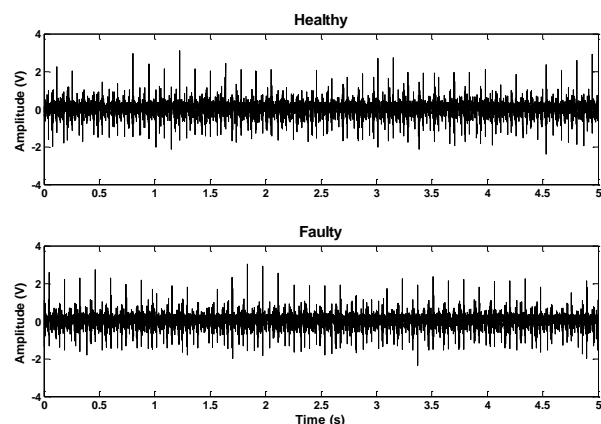
بنابراین می‌توان گفت که این مجموعه داده شامل یک جدول کلی می‌باشد که سطر و ستون آن بترتیب نمونه‌ها و ویژگی‌هایند، یعنی یک جدول  $7 \times 70$  ایجاد شد. سپس مجموعه کلی داده به دو قسمت داده‌های آموزش و داده‌های آزمایش برای فرآیندهای یادگیری و اعتبارسنجی شبکه عصبی تقسیم شدند. جدول ۳ تقسیم‌بندی داده‌ها را بتفکیک نشان می‌دهد.



شکل ۴: داده حالت معیوب قبل و بعد از حذف نوفه

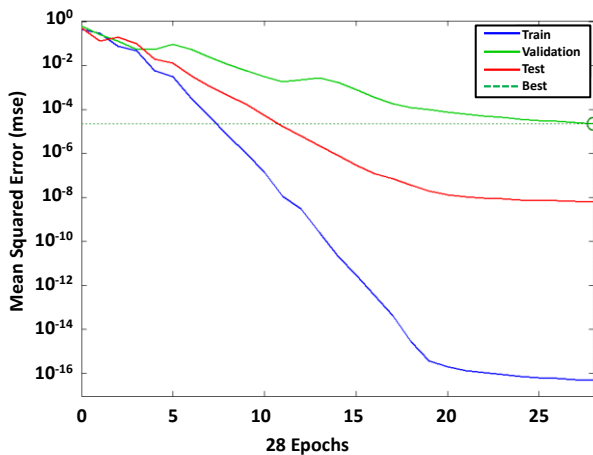


شکل ۵: طیف داده حالت معیوب شمع بعد از حذف نوفه



شکل ۶: شکل موج داده‌های ارتعاش برای دو حالت شمع





شکل ۸: نمودار عملکرد شبکه در شناسایی عیب در شمع موتور

### تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) به دلیل حمایت از این تحقیق و فراهم آوردن بستری برای پیشبرد این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را دارند.

### References

- [1] M. Behzad, K. Sepanlu, M. Asayesh, A. Rohani, Fundamentals of vibrations in the maintenance, repair and troubleshooting of rotating machinery, 2008
- [2] J.F. Rafiee, A. Arvani, M. Harifi, H. Sadeghi, Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network, Journal of Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp. 1746-1754, 2007
- [3] S. Javan, S.V. Hosseini, S.S. Alaviyoun, F. Ommi, Effect of electrode erosion on the required ignition voltage of spark plug in CNG spark ignition engine, The Journal of Engine Research, Vol. 26, pp. 31-39, 2012
- [4] G. deBotton, J. Ben-Ari, R. Itzhaki, E. Sher, Vibration Signature Analysis as a Fault Detection Method for SI Engines, SAE International, Paper No. 980115, 1998
- [5] J.B. Ari, G. deBotten, R. Itzhaki, E. Sher, Fault detection in internal combustion engines by the vibrations analysis method, SAE International, Paper No. 01-1223, 1999
- [6] Q. Huang, Y. Liu, H. Liu, L. Cao, A New vibration diagnosis method based on the neural network and wavelet analysis, SAE International, Paper No. 01-0363, 2003
- [7] J.D. Wu, J.M. Kuo, An automotive generator fault diagnosis system using discrete wavelet transform and artificial neural network, Expert Systems with Applications, Vol. 36, pp. 9776-9783, 2009

به طور خلاصه، داده‌های آموزش داده‌هایی اند که همراه با دسته-هایشان به شبکه اعمال می‌گردند در حالی که داده‌های آزمایش داده-هایی هستند که پس از آموزش، به شبکه اعمال می‌گردند تا دسته این داده‌ها را شناسایی کند. سپس دسته‌های شناسایی شده به کمک شبکه با دسته‌های واقعی داده‌ها مقایسه شده و مقدار دقت تشخیص به دست می‌آید. معیار دقت تشخیص بدین صورت تعریف می‌شود:

- دقت عبارتند از تعداد تصمیم‌های مثبت صحیح شبکه تقسیم بر تعداد کل تصمیم‌های مثبت واقعی.

نتایج تحلیل نشان داد که شبکه طراحی شده با ۵ عصب در لایه پنهان توانست تمامی دسته داده‌های آزمایش را بدرستی شناسایی کند، بدین معنا که دقت ۱۰۰ درصد در تشخیص عیب شمع به دست آمد. شکل ۸ نمودار عملکرد شبکه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بهترین عملکرد اعتبارسنجی  $2.2856 \times 10^{-5}$  در ۲۸ مرحله است. در مجموع می‌توان ذکر کرد که روش ارائه شده متشکل از روش‌های حذف نوفه، استخراج ویژگی و شبکه عصبی، می‌تواند حالت سالم و معیوب شمع موتور را با حاشیه اطمینان بسیار خوبی شناسایی کند.

### ۴ نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، روشی برای شناسایی عیب در شمع موتور بنزینی بر پایه داده‌های ارتعاش به کمک شبکه عصبی ارائه شد. نوفه داده‌های ارتعاش منتشره از موتور با استفاده از تبدیل موجک و به کارگیری موجک میر، حذف شدند. در مرحله استخراج ویژگی، خصوصیات مختلف داده‌ها در حالات سالم و معیوب اخذ شدند. این خصوصیات نمایان کردن عیب در داده‌ها تأثیر چشمگیری داشتند. شبکه عصبی با ساختار سه لایه به کمک داده‌های آموزش و آزمایش، تحت فرآیندهای یادگیری، اعتبارسنجی و آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان دادند که مقدار دقت ۱۰۰ درصد در تشخیص عیب شمع موتور به دست آمد. بنابراین روش ارائه شده قابلیت خوبی در شناسایی این نوع عیب شمع دارد. همچنین می‌توان ذکر کرد که روش ارائه شده برای شناسایی عیوب دیگر شمع نیز می‌تواند استفاده شود، زیرا در آن شرایط تنها نوع عیب عوض می‌شود. البته بسته به نوع عیب در نظر گرفته شده ممکن است نیاز به تقویت این روش باشد. در مجموع نتیجه به دست آمده در این تحقیق ناشی از به کارگیری روش‌های مناسب و ترکیب به جای آن‌ها می‌باشد. بعلاوه تأثیر روش تبدیل موجک و خانواده موجک میر در حذف نوفه از داده‌ها نیز تأیید می‌شود. همچنین، استفاده از روش‌های حذف نوفه، استخراج ویژگی‌های آماری و شبکه عصبی برای عیب‌یابی موتور پیشنهاد می‌شود. بعلاوه می‌توان ذکر کرد که رفتار ارتعاشی موتور متغیر مناسبی برای اهداف عیب‌یابی است.

- [13] J. Chen, R.B. Randall, B. Peeters, H. Van der Auweraer, W. Desmet, Automated misfire diagnosis in engines using torsional vibration and block rotation, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 364, 2012
- [14] J. Han, H. Yamashita, N. Hayashi, Numerical study on the spark ignition characteristics of hydrogen-air mixture using detailed chemical kinetics, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, pp. 9286-9297, 2011
- [15] S. Abbasion, A. Rafsanjani, A. Farshidianfar, N. Irani, Rolling element bearings multi-fault classification based wavelet denoising and support vector machine, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 2933-2945, 2007
- [8] J.D. Wu, C.K. Huang, Y.W. Chang, Y.J. Shiao, Fault diagnosis for internal combustion engines using intake manifold pressure and artificial neural network, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 949-958, 2010
- [9] E. Ebrahimi, K. Mollazadeh, Intelligent Fault Classification of a Tractor Starter Motor Using Vibration Monitoring and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, *Insight*, Vol. 52, pp. 561-566, 2010
- [10] S.K. Yadav, P.K. Kalra, Automatic Fault Diagnosis of Internal Combustion Engine Based on Spectrogram and Artificial Neural Network, in *Conference on Robotics, Control and Manufacturing Technology*, Hangzhou, China, pp. 101-107, 2010
- [11] M.H. Wang, K.H. Chao, W.T. Sung, G.J. Huang, Using ENN-1 for fault recognition of automotive engine, *Expert Systems with Applications*, Vol. 37, pp. 2943-2947, 2010
- [12] C.M. Vong, P.K. Wong, Engine ignition signal diagnosis with Wavelet Packet Transform and Multi-class Least Squares Support Vector Machines, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 8563-8570, 2011





# The Journal of Engine Research

Journal Homepage: [www.engineersearch.ir](http://www.engineersearch.ir)



## Fault diagnosis in engine spark plug by vibration analysis using neural network

S.A. Moosavian<sup>1</sup>, G. Najafi<sup>2\*</sup>, B. Ghobadian<sup>3</sup>, S.M. Jafari<sup>4</sup>, B. Sakhaei<sup>5</sup>, M. Khazaei<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, [a.moosavian@modares.ac.ir](mailto:a.moosavian@modares.ac.ir)

<sup>2</sup>Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, [g.najafi@modares.ac.ir](mailto:g.najafi@modares.ac.ir)

<sup>3</sup>Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, [ghobadib@modares.ac.ir](mailto:ghobadib@modares.ac.ir)

<sup>4</sup>Irankhodro Powertrain Company (IPCO) and Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [sm\\_jafari@ip-co.com](mailto:sm_jafari@ip-co.com)

<sup>5</sup>Irankhodro Powertrain Company (IPCO) and Sharif University of Technology, Tehran, Iran, [b\\_sakhaei@ip-co.com](mailto:b_sakhaei@ip-co.com)

<sup>6</sup>Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, [m.khazaei@modares.ac.ir](mailto:m.khazaei@modares.ac.ir)

\*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-48292322

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 04 October 2013

Accepted: 11 November 2013

#### Keywords:

Fault diagnosis

Engine spark plug

Vibration analysis

Denoising

Neural network

### ABSTRACT

The spark plug condition is an effective parameter on the combustion quality of a spark ignition (SI) engine. If the condition of the spark plug becomes abnormal, pollutions and the efficiency of the engine will be affected. In the present paper, a procedure is proposed based on the vibration analysis for the spark plug fault detection. Vibration signals of the SI engine were collected by an accelerometer under two spark plug conditions, namely, normal and abnormal conditions. In order to remove noises from signals, the wavelet denoising technique was used. Then, the feature extraction method by statistical parameters was applied to obtain fault-indicating information. In this work, seven feature parameters were employed in the feature extraction stage, namely, maximum, mean, standard deviations, the variance, the skewness, Kurtosis and impulse factors. The neural network (NN) was trained with seven neurons in the input layer. After constructing the optimum structure, the performance of the network was tested. Results showed that a high level of the efficiency was gained in the spark plug fault detection. Therefore, it can be mentioned that the proposed approach could reliably be used for the fault identification in the engine spark plug.