



Vibration analysis of turbocharger in different clogging conditions of Diesel Particle Filter (DPF)

Adib Souzani¹, Barat Ghobadian¹, Mohammad Kazemi², Alireza Mahdavian^{1*}

¹ Department of Biosystems Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Iran Khodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Turbocharging
Vibrational Behavior
Diesel Particle Filter

ABSTRACT

In diesel engines, for reasons such as increasing power and efficiency, reducing volume, reducing weight and increasing combustion quality, it is very common to employ a turbocharger. One of the most common problems in diesel engines is the absorption of soot particles in the turbocharger outlet, which clogged after a while. The blocked filter prevent to exhaust the gases with required flow rate, as a result, the back pressure and temperature of exhaust gases increase. This factor causes the turbocharger to be located near the unstable operating range and these factors expected to change the vibration behavior of this set. In this study, by creating several levels of soot particle clogging at 2500 and 3200 RPM, the turbocharger vibration signal was stored. Using this non-destructive method, more accurate data obtained to perform active Regeneration than the conventional method. Employing fast Fourier transform on stored time signal and filtering expected range of the signal, the turbocharger operating frequencies were determined and by extracting the frequency domain characteristics and comparing them, it observed that the power spectrum density and spectral flux had a resolution of approx. It has 4 times more than other features in indexing this event. In addition, as the engine speed increases, the soot filter clogging has a greater effect on the vibration behavior of the turbocharger.



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: a.mahdavian@modares.ac.ir (A. Mahdavian)

Received 8 May 2022; Accepted 7 November 2022

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: A. Souzani, B. Ghobadian, M. Kazemi, A. Mahdavian, Vibration analysis of turbocharger in different clogging conditions of Diesel Particle Filter (DPF), The Journal of Engine Research, 70/1 (2023) 66-90, <https://doi.org/10.22034/er.2023.1975287.0>.

بررسی رفتار ارتعاشی پرخوران در اثر گرفتگی صافی ذرات دوده

ادیب سوزنی^۱، برات قبادیان^۱، محمد کاظمی^۲، علیرضا مهدویان^{۳*}

^۱ گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ مرکز تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران

چکیده

در موتورهای دیزل، به دلایلی چون افزایش توان و بازده، کاهش حجم، کاهش وزن و افزایش کیفیت احتراق، استفاده از پرخوران بسیار پرکاربرد است. یکی از مشکلات رایج در موتورهای دیزل، صافی جذب ذرات دوده موجود در مسیر خروجی پرخوران است که پس از مدتی دچار گرفتگی می‌شود. صافی مسدود شده مانع عبور گازهای خروجی با شار لازم شده و در نتیجه فشار برگشتی و دمای گازهای خروجی افزایش می‌یابد. این عامل سبب قرار گرفتن پرخوران در نزدیکی بازه عملیاتی ناپایدار شده و انتظار می‌رود این عوامل سبب تغییر رفتار ارتعاشی این مجموعه گردد. در این تحقیق با ایجاد چند سطح گرفتگی صافی ذرات دوده در دوره‌های ۲۵۰۰ و ۳۲۰۰ د.د.د، اقدام به ذخیره داده‌های ارتعاشی پرخوران گردید. با این روش غیرمخرب می‌توان داده‌های دقیق‌تری برای انجام عمل رفع گرفتگی فعال صافی دوده نسبت به روش رایج به دست آورد. با استفاده از تبدیل فوریه سریع بر روی داده زمانی ذخیره شده و صافی کردن بازه مورد انتظار از داده، بسامدهای کاری پرخوران مشخص شده و با استخراج ویژگی‌های حوزه بسامد و مقایسه آن‌ها مشاهده شد که چگالی طیف توان و شار طیفی وضوح حدود ۴ برابری نسبت به سایر ویژگی‌ها در نمایان‌سازی این رویداد را دارد. همچنین با تند شدن دور موتور، گرفتگی صافی دوده تأثیر بیشتری در رفتار ارتعاشی پرخوران گذاشته و می‌توان با تغییرات ایجاد شده به گرفتگی آن پی برد.

اطلاعات مقاله

کلیدواژه‌ها:

پرخوران
رفتار ارتعاشی
صافی ذرات دوده دیزل



© 2023 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: a.mahdavian@modares.ac.ir (علیرضا مهدویان)

دریافت ۱۸ اردیبهشت ۱۴۰۱؛ پذیرش ۱۶ آبان ۱۴۰۱

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: A. Souzani, B. Ghobadian, M. Kazemi, A. Mahdavian, Vibration analysis of turbocharger in different clogging conditions of Diesel Particle Filter (DPF), The Journal of Engine Research, 70/1 (2023) 66-90, <https://doi.org/10.22034/er.2023.1975287.0>.

۱- مقدمه

امروزه تلاش مستمری برای بهبود بهره‌وری، کاهش مصرف سوخت و کاهش انتشار آلاینده‌گی موتورهای احتراق داخلی در حال انجام است. معرفی پرخوران^۱ روش مهمی است که برای کوچک‌سازی و افزایش نسبت قدرت به حجم موتور استفاده می‌شود.

پرخوران نوعی سامانه دمنده است که هوا را با فشار زیاد به درون استوانه می‌دمد و به‌سادگی می‌تواند نسبت قدرت به وزن موتور را بهبود ببخشد [۱].

پس از اولین بحران نفتی در سال ۱۹۷۳، استفاده از سامانه پرخوران در موتورهای دیزل بیشتر از پیش مورد توجه قرار گرفت و در این برهه از زمان توجه اقتصادی استفاده از این سامانه در مقابل هزینه‌های سوخت مصرفی، نمود پیدا کرد. همچنین سخت‌گیرانه‌تر شدن قوانین آلاینده‌گی در اواخر دهه هشتاد سبب افزایش انواع موتورهای پرخوران با کاربردهای گوناگون شد [۲].

ارتعاشات در پرخوران توسط عوامل مختلفی ایجاد می‌شود. ارتعاشات را می‌توان در ارتعاشات همزمان، ناهمزمان و غیرمتقارن طبقه‌بندی کرد. از جمله ارتعاشات همزمان، ارتعاشات اجباری ناشی از عدم تعادل محور که عمدتاً توسط گریز از مرکز بودن محور و کمان حرارتی ایجاد شده در محور دانست. عوامل دیگری را مانند ریخته‌گری پره تنجار و فواصل بسیار کوتاه بین گردها، تنجار و محفظه یافت [۳].

بعد از پرخوران مسیر خروجی و قطعات آن وجود دارد که همه این سامانه‌ها جریان گازهای خروجی را محدود می‌کنند و در نتیجه فشار گازها در خروجی پرخوران افزایش می‌یابد. این فشار به‌عنوان فشار برگشتی نامیده می‌شود [۴]. با افزایش فشار برگشتی، اُفت فشار بین ورودی و خروجی پرخوران کاهش می‌یابد. این کاهش فشار بر چرخش گردها تأثیر می‌گذارد و سبب پایین آمدن بازده آن می‌شود [۵].

اصلی‌ترین مؤلفه‌های که به‌غیر از پرخوران و مسیر خروجی باعث ایجاد فشار در موتور می‌شود، صافی ذرات دوده است^۲. با سخت‌گیری‌های بیشتر در وضع قوانین انتشار آلاینده‌گی موتورها و آلودگی هوا، نیاز شرکت‌های خودروسازی برای اجرای روش‌های جدید برای کاهش آن‌ها وجود دارد. یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌هایی که توسط وسایل نقلیه در اتمسفر آزاد می‌شود مقدار و تعداد ذرات معلق است. مقدار ذرات معلق^۳ و تعداد ذرات معلق^۴ به دلیل احتراق ناقص هیدروکربن‌های موجود در سوخت دیزل تشکیل می‌شوند.

این ذرات به‌طور عمده از ذرات کربن ناخالص، برخی از اکسیدهای معدنی و هیدروکربن‌های سمی تشکیل شده است. ذرات معلق به دو گروه اندازه تقسیم می‌شود. ذراتی که اندازه آن‌ها کمتر از ۱۰ میکرومتر است در گروه PM₁₀ و ذراتی که اندازه آن‌ها کمتر از ۲٫۵ میکرومتر است در گروه PM_{2.5} طبقه‌بندی می‌شوند. چنین ذرات ریزی هنگام تنفس انسان می‌تواند باعث مشکلات شدید سلامتی از جمله بیماری‌های دستگاه تنفسی شود.

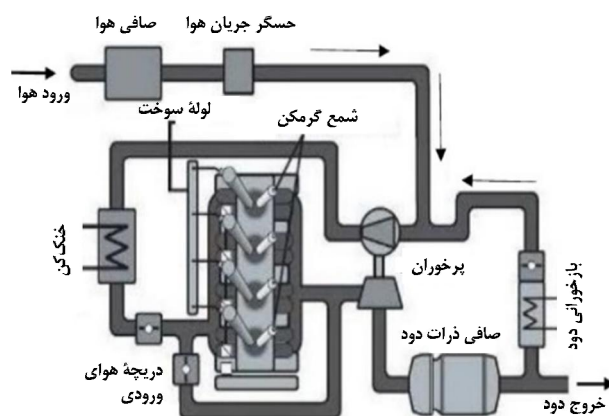
برای این منظور، علاوه بر واکنشگر شیمیایی در سامانه گازهای خروجی موتور از یک صافی ذرات دوده استفاده می‌شود که وظیفه آن صافی کردن ذرات معلق را از گازهای خروجی، قبل از انتشار در جو را انجام می‌دهد (شکل ۱).

¹ Turbocharger

² Diesel Particulate Filter (DPF)

³ Particulate Matter

⁴ Particulate Number

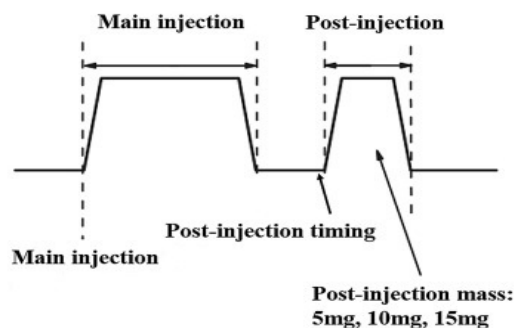


شکل ۱ اجزای مجموعه پرخوران و محل قرارگیری صافی ذرات دوده

DPF معمولاً از برخی مواد سفالی متخلخل (سیلیکون کاربید^۱ یا کوردیریت^۲) تشکیل شده است که ۹۰٪ ذرات را از گازهای خروجی جذب می‌کند. این ذرات رسوب کرده و باقی‌مانده در داخل صافی را دوده می‌نامند. این دوده باید بعد از مدت‌زمان مشخصی از صافی پاک شود تا از گرفتگی آن جلوگیری شود. در صورت مسدود شدن صافی، کارایی سامانه در جذب ذرات کاهش یافته و همچنین فشار برگشتی بر روی موتور ایجاد می‌کند [۶].

امروزه جدای از شستشو و تمیز کردن صافی پس از باز شدن آن، تمیز کردن با روش فعال بسیار رایج شده است. در مرحله احتراق موتور، قبل از نقطه مکث بالا^۳ افشانه‌های موتور شروع به پاشش سوخت به داخل محفظه احتراق کرده و تا چند درجه بعد از نقطه مکث بالا نیز ادامه خواهد داشت. پس از آن در مرحله تخلیه گازهای حاصل از احتراق در حالت عادی هیچ‌گونه پاشش انجام نخواهد شد اما در حین فرآیند احیای فعال مقداری سوخت در این مرحله نیز پاشیده شده که به نوبه خود سبب احتراق در چندراهه دود و بالا بردن بیش از دمای گازهای خروجی به حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود.

این عمل به مدت ۳۰ دقیقه انجام می‌شود تا ذرات دوده حاصل از احتراق که در صافی ذرات دوده به دام افتاده‌اند به CO₂ و مقدار بسیار کمی خاکستر تبدیل شوند. در این مدت صدا و ارتعاش تولید می‌شود که می‌تواند ناخوشایند باشد. در شکل ۲ می‌توان یک نمونه از نمودار پاشش سوخت در موتور دیزل برای یک افشانه را مشاهده کرد. در این نمودار می‌بینیم که پس از پاشش اصلی افشانه، پاشش ثانویه نیز انجام شده است که مقدار آن را رایانه موتور بر اساس اطلاعاتی که از حسگر دمای صافی و شرایط کاری موتور می‌گیرد، تنظیم می‌کند تا هرچه سریع‌تر دما به بیش از ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد [۷].



شکل ۲ نمودار پاشش سوخت موتور دیزل، در حالت احیای فعال صافی ذرات دوده

¹ Silicon Carbide

² Cordierite

³ TDC

احیای صافی دوده به روش فعال معمولاً هر ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر انجام می‌شود. در آن مرحله تقریباً ۱۰ تا ۲۰ گرم دوده در DPF انباشته شده است. از آنجاکه سوخت اضافی هنگام بازسازی فعال تزریق می‌شود، مصرف سوخت به‌طور موقت کمی بیشتر می‌شود و به‌طور متوسط، در هر چرخه بازسازی فعال تقریباً ۰٫۳ تا ۰٫۵ لیتر سوخت مورد نیاز است [۵]. در حال حاضر، تخمین بار دوده با استفاده از اندازه‌گیری اختلاف فشار و دمای دو طرف محفظه صافی دوده انجام می‌شود با خطا همراه است. در نتیجه مقدار سوخت برای عمل بازسازی فعال ممکن است بهینه نباشد. همچنین اندازه‌گیری مقدار دوده موجود در صافی با حسگر فشارسنج اختلافی، به شدت تحت تأثیر تغییرات جریان خروجی است و مرتبط ساختن فشار اختلافی صافی با مقدار گرفتگی آن از نظر مقدار دوده (گرم) باید تحت شرایط مختلف کاری موتور از حیث بار و دورهای متفاوت مورد بررسی قرار بگیرد تا اطلاعات حسگر برای مرکز پردازش برقی موتور تنظیم شده و قابل استفاده باشد. لذا تعریف شرایط مختلف کاری ملزم به انجام آزمون‌های بسیاری است که علاوه بر خطاهای آزمایشی پدید آمده و صرف وقت بسیار، گاهاً موجب افزایش دمای قطعات و کاهش عمر آن‌ها می‌شود و لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا با استفاده از تحلیل رفتار ارتعاشی پرخوران به گرفتگی صافی دوده پی برده شود.

۱-۱- پایش وضعیت

روش‌های تحلیل ارتعاشی و بررسی وضعیت کارکرد دستگاه، به خاطر دقت و حساسیت مناسب، سادگی اجزاء، امکان پیاده‌سازی هنگام کارکرد دستگاه و غیرمخرب بودن در بین سایر روش‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. طبیعت دینامیکی معایب مختلف و آثار متفاوت آن‌ها باعث تمایز طیف ارتعاشی آن‌ها می‌گردد [۸].

ارتعاشات هر دستگاه دوار (چه از نظر دامنه و چه از نظر سایر مشخصات ارتعاشات) ارتباط مستقیم با وضعیت آن دارد و هرگونه تغییر هرچند جزئی در وضعیت دستگاه (از هر نظر) با تغییر در وضعیت ارتعاشات آن همراه خواهد بود و همچنین اندازه‌گیری ارتعاشات پایداری زیاد و تأثیرپذیری بسیار کمی از عوامل محیطی دارد، لذا اندازه‌گیری و تحلیل ارتعاشات یکی از روش‌های اصلی برای پایش وضعیت تجهیزات و دستگاه‌های دوار از جمله پرخوران به شمار می‌رود.

مراحل تحلیل ارتعاشی، به زبان ساده به قرار زیر است:

- داده‌برداری یا نمونه‌برداری از ماشین یا فرآیند مورد پایش

- تحلیل و مقایسه آن‌ها با داده‌ها یا نمونه‌های مبنا

- نتیجه‌گیری درباره وضعیت ماشین

روش‌های پردازش داده بسیاری در زمینه پایش وضعیت دستگاه‌ها معرفی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی این روش‌ها در سه حوزه زمان، بسامد و زمان- بسامد تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲- پیشینه پژوهش

با توجه به اهمیت و فراگیر شدن تحلیل وضعیت دستگاه‌ها به کمک پایش رفتار ارتعاشی آن‌ها در معرفی عمده‌ترین پژوهش‌های انجام گرفته در این زمینه می‌توان به پردازش داده‌های ارتعاشی برای تشخیص خطاها و ایرادهای ایجاد شده در انواع جعبه‌دنده [۹]، موتور برقی [۱۰]، مولد برق [۱۱]، گردآبادی و گازی [۱۲] و همچنین در زمینه‌های رفتار ارتعاشی در موتورهای درون‌سوز اشاره کرد [۱۳].

در رابطه با موتورهای درون‌سوز، کارکرد تنجارهای پرخوران به دلیل وقوع پدیده‌های ناپایدار محدود شده است. این پدیده‌ها شامل شکسته شدن اجزای داخلی از جمله پره و یاتاقان، قفل شدن محور اصلی و افزایش فشار و موج هوای داخلی است [۱۴]. پژوهشگران در رابطه با تأثیر متقابل پرخوران و صافی ذرات، با اندازه‌گیری سرعت دورانی پرخوران در حالت‌های

مختلفی از وضعیت دریچه گاز، دریچه بازخورانی دود^۱ و مقادیر مختلفی از گرفتگی صافی ذرات، به این نتیجه رسیدند که گرفتگی سبب افت فشار در ورودی تنجار شده و سرعت دورانی را کاهش می‌دهد. در این مقاله، روش جدیدی برای اندازه‌گیری بار دوده DPF ارائه شده است که برای عملکرد آن نیازی به هیچ حسگر فیزیکی نیست و از داده‌های تغییرات سرعت گردا برای تخمین بار دوده DPF استفاده می‌کند. این روش می‌تواند با از بین بردن استفاده از برآورد بار دوده بر حسب فشار اختلافی با اطمینان کمتر، در بهبود بهره‌وری فرآیند احیای فعال تأثیر قابل توجه داشته باشد. پژوهشگران با کمک اندازه‌گیری سرعت دورانی می‌توان گرفتگی صافی را تشخیص و بهینه‌ترین زمان را برای بازسازی و احیای DPF مشخص نمودند [۱۵].

در ارتباط با رفتار ارتعاشی پرخوران می‌توان به پژوهشی تجربی توسط آرتاکیس و همکاران اشاره کرد [۱۶]. در این پژوهش با اندازه‌گیری ارتعاش دستگاه، جریان هوا و ضبط صدای پرخوران وضعیت آن از نظر پایداری مورد بررسی قرار گرفت. به کمک نتایج این پژوهش می‌توان پیش از رخداد آسیب در پرخوران، به کمک داده‌های ضبط شده از شرایط کاری مجموعه اطلاع یافت و اقدامات پیشگیرانه انجام داد. در تحلیل داده‌های این پژوهش بیشترین تمرکز روی تحلیل ویژگی‌های صوتی و ریشه میانگین مربعات داده قرار گرفته شد. مشاهدات حاکی از آن بود که با قرار گرفتن پرخوران در خارج از بازه عملیاتی تعریف شده خود، صدا و ارتعاش ایجاد شده به شدت افزایش می‌یابد. این پژوهش در شرایط آزمایشگاه و غیرعملیاتی بر روی پرخوران مجزا از سایر اجزای موتور انجام گرفته است.

سروصدایی که در یک موتور دیزلی دارای دریچه گاز با پرخوران طی باز و بسته شدن دریچه گاز ایجاد می‌شود، به‌طور عمده به علت کارکرد پرخوران در بازه خارج از ناحیه عملیاتی و استاندارد تعریف شده برای آن است. منظور از این ناحیه، شار جریان خارج شده از تنجار، بسته به سرعت دورانی آن است. این امر علاوه بر ایجاد صدا و لرزش در مجموعه، سبب کاهش عمر دستگاه نیز می‌شود. به همین منظور در پژوهشی اقدام به اندازه‌گیری نوفه تولیدی از این پدیده شد تا ارتباط بین سرعت و مقدار باز بودن دریچه، با فشار وارد شده به پرخوران و در نتیجه نوفه تولید شده بررسی و راه‌کارهایی پیشنهاد گردید. در این پژوهش مشخص شد که هرچه دریچه گاز بسته باشد و این عمل ناگهانی صورت گیرد، فشار وارده بیشتر و در نتیجه صدا و ارتعاش ایجاد شده بیشتر است. راهکار پیشنهادی، استفاده از یک قطعه مخروطی شکل در ورودی پرخوران بود [۱۷].

در پژوهشی سالوو و همکاران در سال ۲۰۰۶ با اندازه‌گیری مقدار ارتعاش تولیدی پرخوران در منطقه عملیاتی خود، بهینه‌ترین اندازه تعادل محور آن را پیدا کردند که این امر موجب کاهش هزینه و زمان لازم در ساخت و اطمینان کارکرد محصول شد [۱۸].

سرعت دورانی پرخوران در بازه ۰ تا ۲۰۰,۰۰۰ (د.د.) است و لذا با توجه به این سرعت دورانی زیاد و متعاقباً رفتار ارتعاشی متناسب با آن، بررسی داده مربوطه می‌تواند داده‌های مفیدی از نحوه کارکرد این مجموعه در اختیار قرار دهد. در پژوهشی با مشاهده سرعت دورانی محور به کمک یک حسگر تعبیه شده در محفظه پرخوران و ضبط طیف ارتعاشی تولید شده از سامانه، ارتباط بین آن دو بررسی و تخمین میانگین سرعت دورانی در حالتی که حسگر دورسنگ وجود نداشت، انجام گرفت و نتایج قابل قبولی در حد خطای کمتر از ۱۰٪ به دست آمد [۱۹].

همین محققان در پژوهشی دیگر اثبات کردند که می‌توان با مهار غیرنفوذی، از وضعیت عملیاتی موتور از لحاظ بار، سرعت و تنظیمات احتراق آگاهی پیدا کرد و با تغییر این عوامل، سبب تغییر فرآیند احتراق و در نتیجه مقدار دما و فشار گاز خروجی گردید. با استفاده از خروجی ارتعاش‌سنج نصب شده بر روی محفظه پرخوران به‌عنوان یک بازخورد استفاده و به ارتباط بین این عوامل با مقدار سرعت گرفتن پرخوران پی‌برده و شرایط کاری موتور مشخص گردید [۲۰].

در پژوهشی دیگر پونتی و همکاران با نصب حسگر ارتعاش‌سنج بر روی محفظه تنجار و میکروفون در مسیر خروجی آن

¹ Exhaust Gas Recirculation (EGR)

به منظور یافتن سرعت دورانی پرخوران اقدام کردند. دانستن شرایط عملکرد موتور یک نیاز ضروری است که در موتورهای مجهز به پرخوران، یکی از عوامل مهم در این امر کار کردن پرخوران در نقشه کاری است که از طرف شرکت سازنده برای آن طراحی شده است. برای بهینه سازی و آزمون عملکردی پرخوران باید برآوردی از سرعت متوسط دورانی پرخوران به دست آورد. در این پژوهش با بهره گیری از سه حسگر ارتعاش سنج، میکروفون و دورسنج جریان گردابی اقدام به تخمین سرعت پرخوران شد و نتایج خطایی کمتر از ۵٪ را برای تخمین سرعت دورانی به کمک داده های ارتعاشی نشان داد [۲۱].

ویچی و همکاران انجام فعالیت تجربی با هدف شناسایی تغییرات در ویژگی های تزریق سوخت، در رابطه با شرایط عملیاتی موتور، از طریق نظارت سرعت لحظه ای پرخوران انجام دادند. در این آزمایش، روش های مبتنی بر حسگر ارتعاش سنجی برای استخراج داده های در مورد شرایط عملیاتی پرخوران از اندازه گیری های غیرنفوذی توسعه داده شد. با تغییر در زمان پاشش بسته به زاویه میل لنگ، سرعت دورانی لحظه ای پرخوران اندازه گیری و الگویی از رفتار آن به دست آمد. از این الگو می توان بر کیفیت پاشش سوخت به داخل استوانه نظارت داشت [۲۲].

بهینه سازی مهار سامانه پرخوران امری مشکل است. شرایط جریان ناپایدار همراه با نقشه های تنجار نه چندان دقیق، سرعت چرخش پرخوران را به یکی از مهم ترین مقادیر مورد نیاز در فرآیند بهینه سازی تبدیل کرده است. در پژوهشی برای به دست آوردن سرعت چرخش پرخوران از طریق تحلیل ارتعاش با حسگرهای شتاب سنج به منظور دستیابی به یک راه حل قوی و دقیق و درعین حال کم هزینه تحقیقات صورت گرفته است. نتایج نشان می دهد که روش توسعه داده شده برآورد سرعت چرخش پرخوران به کمک حسگر شتاب سنج و میکروفون را با خطا و دقت قابل قبول برای کاربرد پیشنهادی ارائه می دهد [۳].

با توجه به مطالب گفته شده و مروری بر پژوهش های این حوزه درمی یابیم که گرفتگی صافی دوده بر روی عملکرد پرخوران و متعاقباً بازده موتور تأثیر زیادی داشته و لذا احیای به موقع آن امری مهم است. از سوی دیگر با توجه به اینکه معیار مشخصی برای گرفتگی و مقدار آن تا اکنون گزارش نشده است و ابزارهای اندازه گیری مرسوم از دقت مناسبی برخوردار نیستند، لذا پژوهش حاضر به دنبال یافتن ارتباط میان داده های ارتعاشی پرخوران با مقدار گرفته بودن صافی دوده بوده است.

۳- مواد و روش ها

در پژوهش حاضر، از موتور دیزل سواری با حجم ۱٫۵ لیتر استفاده شد. این موتور اشتهال-تراکمی چهارزمانه دارای چهار استوانه با آرایش خطی است. این موتور علاوه بر دارا بودن پرخوران هندسه متغیر، برای کسب استانداردهای اروپا ۵ به صافی ذرات دوده نیز مجهز شده است. مشخصات فنی این موتور در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱ مشخصات موتور دیزل سواری

تعداد استوانه	۴
تعداد دریچه	۱۶
قطر دریچه (میلی متر)	۷۶
طول جابجایی (میلی متر)	۸۲٫۵
حجم جابجایی (لیتر)	۱٫۴۹۷
توان بیشینه (کیلووات/سرعت دورانی د.د.د)	۴۰۰۰ / ۹۰
گشتاور بیشینه (نیوتن متر/سرعت دورانی د.د.د)	۲۵۰۰-۱۷۵۰ / ۲۵۶
نسبت تراکم	۱۶٫۵
سطح آلایندگی	اروپا ۵
سامانه تنفسی	پرخوران هندسه متغیر
مصرف سوخت ترکیبی (لیتر / ۱۰۰ کیلومتر)	۵٫۴

تمامی آزمایش‌های این پژوهش در شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) و بروی خودرو سواری مجهز به این موتور دیزل انجام گرفت. مزیت این نوع آزمایش نسبت به موتور نصب شده بر روی بستر موجود در اتاق آزمایش را می‌توان کم شدن نوفه‌های ارتعاشی به دلیل وجود ضربه‌گیرهای دسته موتور خودرویی، سامانه تعلیق و حتی چرخ‌های خودرو دانست.

۳-۱- تجهیزات و حسگرهای نصب شده

به‌منظور انجام آزمایش‌های مورد نظر در این پژوهش، تجهیزات لازم داده‌برداری بر روی موتور نصب شد. از حسگرهای موجود بر روی خود موتور به‌صورت پیش‌فرض هم اطلاعات لازم ذخیره و مورد استفاده قرار گرفت. اسامی حسگرهای نصب شده به‌صورت زیر است:

- فشارسنج

- دورسنج

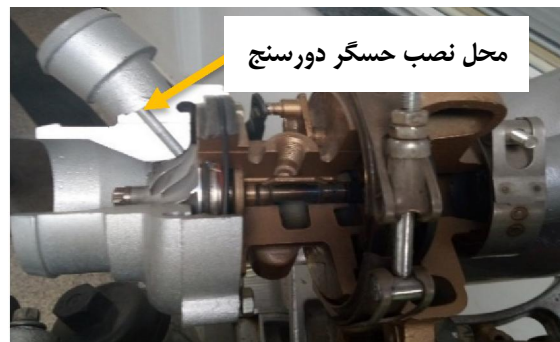
- شتاب‌سنج

حسگر فشارسنج برای اندازه‌گیری فشار ورودی صافی ذرات دوده یا به‌عبارتی دیگر فشار خروجی پرخوران به کمک لوله‌های رابط نصب شد. این حسگر ساخت شرکت Endress-Hauser و دارای بازه ۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال است (شکل ۳).



شکل ۳ حسگر فشارسنج بر روی موتور

با گرفته شدن مسیر خروجی، فشار در ورودی صافی افزایش پیدا کرده و توسط این حسگر می‌توان سطوح مختلف گرفتگی را نسبت به مقدار تغییر فشار دسته‌بندی و مقدار انسداد در صافی را همانند آن دانست. به‌منظور مشاهده سرعت دورانی محور پرخوران و تغییرات آن بسته به شرایط آزمایش مورد نظر، نزدیک‌ترین محل از نظر فاصله به محور، در بخش تنجار پرخوران به علت دمای کاری خنک‌تر نسبت به گردا سوراخ و حسگر جریان گردابی نصب گردید (شکل ۴).



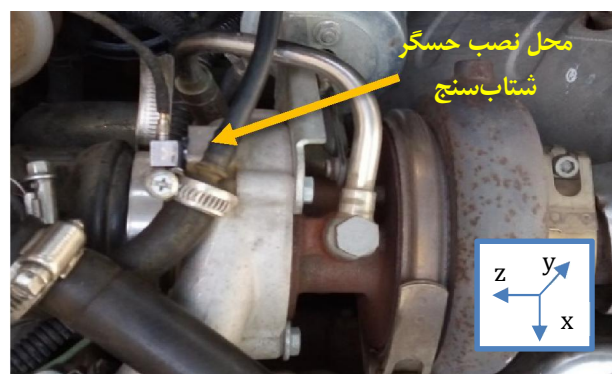
شکل ۴ تصویر محل نصب حسگر دورسنج محور پرخوران

برای خواندن و ذخیره‌سازی داده‌های حاصل از این حسگر در ذخیره‌کننده اطلاعات از یک خوانشگر سرعت ساخت کشور آلمان از نوع Micro-Epsilon Dz135 و حسگر جریان گردابی Ds05 همراه با آن استفاده شد. برخی از مشخصات این خوانشگر و حسگر آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ مشخصات حسگر دورسنج پرخوران به همراه خوانشگر آن

بازه دمای کاری (سانتی‌گراد)	۴۰- تا ۲۴۰
فاصله حسگر تا پره تنجار (میلی‌متر)	۱ تا ۰,۱
بیشترین سرعت قابل خوانش (د.د.د.)	۴۰۰,۰۰۰
بازه ولتاژ کاری (ولت)	۱۰ تا ۰

برای ذخیره داده‌های ارتعاشی پرخوران در شرایط مختلف آزمایش، اقدام به نصب حسگر ارتعاش‌سنج بر روی پرخوران گردید. به دلیل اینکه ارتعاش پدید آمده ناشی از دوران محور پرخوران مد نظر است، لذا باید حسگر در نزدیک‌ترین محل نسبت یاتاقان‌های محور نصب گردد. لذا حسگر بر روی محفظه تنجار به دلیل دمای خنک‌تر با چسب مخصوص نصب شد (شکل ۵).



شکل ۵ حسگر شتاب‌سنج نصب‌شده بر روی پرخوران

حسگر استفاده شده از نوع سه محوری ساخت کشور آمریکا بوده و ارتعاش‌های هر سه محور مختصاتی را اندازه‌گیری می‌کند. نوع و مشخصات حسگر به کار برده شده در جدول ۳ قابل مشاهده است.

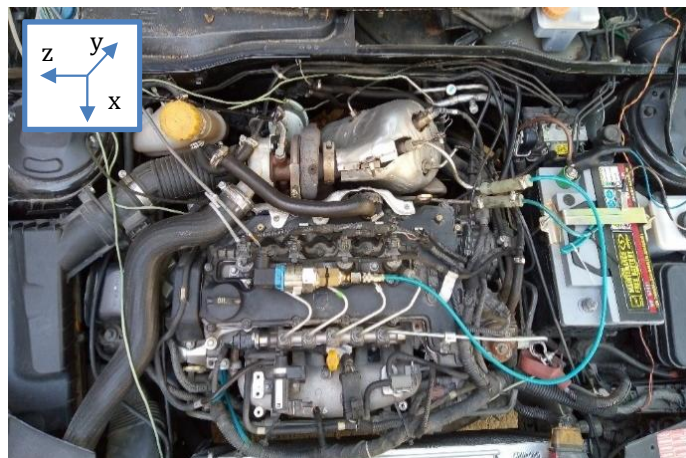
جدول ۳ مشخصات حسگر شتاب‌سنج

نوع حسگر	PCB 339A30
ابعاد (میلی‌متر)	۱۰×۱۰×۱۰
بازه اندازه‌گیری (متر بر مجذور ثانیه)	± ۴۹۰۵
بازه دمای کاری (سانتی‌گراد)	۱۶۳ تا -۵۴
ولتاژ تحریک (ولت)	۳۰ تا ۱۸

به‌منظور تبدیل و تقویت داده‌های ارسالی از حسگر شتاب‌سنج، یک تقویت‌کننده شارژ B&K NEXUS مدل ۲۶۹۲ کم نوفه با پهنای گسترده استفاده شد.

سامانه داده‌برداری شامل یک ورودی PCLD-۸۷۱۰ و یک دستگاه داده‌برداری نوع PCI-۱۷۱۰ ساخت شرکت Advanteq بود. داده‌ها به‌صورت برخط در یک رایانه ذخیره شدند. شکل ۶ محل نصب حسگرها و تصویر موتور آماده آزمایش را نشان می‌دهد.

با انجام آزمون اولیه برای بررسی سرعت پرخوران و فهمیدن بازه کاری آن و با توجه به اصل نایکوئیست^۱ داده‌برداری در این آزمون ۱۶ کیلوهرتز انتخاب شد تا تمامی اجزاء بسامدهای موجود در پرخوران پوشش داده شود و پدیده ارتعاشی از دست نرود.



شکل ۶ نمای کلی موتور و حسگرهای نصب‌شده برای آزمایش

۳-۲- انجام آزمون

پیش از انجام آزمون‌های لازم، بایدی برای جلوگیری از خطای آزمایشی و فشار اولیه، عمل احیا برای صافی ذرات دوده انجام می‌شد. لازم به ذکر است در موتور مورد بررسی عمل احیای صافی به‌صورت پیمایشی و پس از مسافت ۲۰۰ کیلومتر برای رایانه موتور تعریف شده است.

پس از انجام فرآیند احیا، برای بررسی هدف این پژوهش سطوح مختلفی از گرفتگی ایجاد شد. از آنجاکه کار کردن موتور به‌منظور گرفتگی صافی بدون پیمایش و ایجاد بار بر روی موتور فرآیندی طولانی است و همچنین از طرفی دیگر اندازه‌گیری مقدار گرفتگی صافی ذرات از نظر وزن دوده برای دسته‌بندی چندین سطح از گرفتگی به‌صورت پله‌ای و منظم با هر بار باز و بسته کردن صافی و وزن کردن آن امکان‌پذیر نیست، لذا از گرفتگی مسیر خروجی به‌منظور ایجاد فشار بازگشتی و جلوگیری از خروج گاز استفاده شد. در این روش برای جلوگیری از پدید آمدن سروصدا

¹ Nyquist

و ارتعاش ناشی از خروج گاز از شکاف ایجاد شده در مسیر خروجی، پس از صدا خفه کن یک شیار بر روی لوله خروجی ایجاد شد. به وسیله یک تیغه فلزی و قرار دادن آن در شکاف ایجاد شده، به مقدار دلخواه از خروج گاز جلوگیری به عمل آمده و فشار بازگشتی بر روی پرخوران به هر مقدار قابل مهاری ایجاد می شود (شکل ۷).

به دلیل جلوگیری از فشار بیش از اندازه به موتور و امکان خروج گازهای حاصل از احتراق در سطوح مختلف گرفتگی مسیر، به پیشنهاد کارشناسان مرکز آزمون و انجام آزمون و خطا، به مقدار ثابت و تعریف شده برای بیشترین مقدار از انسداد تعریف و روی تیغه فلزی علامت گذاری شد تا بیشتر از آن مساحت مشخص مسیر خروجی مسدود نگردد (شکل ۸).



شکل ۷ محل ایجاد شکاف و نصب تیغه فلزی برای ایجاد گرفتگی در مسیر گاز خروجی



شکل ۸ تیغه فلزی به منظور شبیه سازی گرفتگی کامل صافی دوده.

در جدول ۴ متغیرهای مستقل و وابسته این پژوهش را مشاهده می کنیم. در ادامه به تشریح انجام این آزمون ها و نحوه ایجاد متغیرها پرداخته خواهد شد.

جدول ۴ شرایط و متغیرهای مستقل و وابسته آزمایش

متغیرهای مستقل	دور (د.د.د.)	درصد گرفتگی صافی ذرات	زاویه پره های VGT
سطوح	۰	۰	تحت اختیار و مهار رایانه موتور
		۳۳	
		۶۶	
	۱۰	۹۹	ثابت نگه داشتن در بیشترین زاویه
		۰	تحت اختیار و مهار رایانه موتور
		۳۳	
	۱۰	۶۶	ثابت نگه داشتن در بیشترین زاویه
		۹۹	
متغیرهای وابسته	داده های ارتعاشی پرخوران	سرعت دورانی پرخوران	دمای ورودی DPF مصرف سوخت

در آزمون‌های انجام گرفته، دور موتور توسط تغییر تنظیمات رایانه مرکزی موتور بر روی ۲۵۰۰ د.د. ثابت شد. دلیل انتخاب این دور از موتور را می‌توان پایین بودن نوفه ناشی از قطعات متحرک موتور و مرحله بالا رفتن سرعت دورانی پرخوران دانست.

با ثابت نگه داشتن دور موتور بر روی ۲۵۰۰ د.د، بدون گرفتگی در مسیر اطلاعات به دست آمده از حسگرها به مدت ۵ ثانیه ذخیره شد. پس از آرام شدن مجدد موتور و پایین آمدن دور موتور و دمای صافی ذرات دوده، مجدداً آزمایش ۴ مرتبه تکرار شد تا صحت اطلاعات به دست آمده مورد بررسی قرار گیرد.

در حالت دوم تیغه فلزی تا بیشینه مساحت در نظر گرفته شده در شکاف ایجاد شده قرار گرفت. تکرار این آزمایش نیز همانند حالت بدون گرفتگی انجام شد. با توجه به داده حاصل از حسگر فشارسنج در دو حالت بدون گرفتگی و بیشینه سطح مجاز تعریف شده گرفتگی، اقدام به تقسیم‌بندی بین این دو فشار برای به دست آمدن دو سطح دیگر از گرفتگی شد. بدین معنا که طبق جدول ۵ حالت بدون گرفتگی (۰٪)، ۱/۳ بیشینه گرفتگی (۳۳٪)، ۲/۳ بیشینه گرفتگی (۶۶٪) و حالت گرفتگی کامل (۹۹٪) تعریف شد.

در این ۴ حالت از گرفتگی، پره‌های VGT پرخوران تحت اختیار رایانه موتور زاویه لازم را گرفته و در مرحله بعد برای مشاهده تأثیر زاویه این پره‌ها بر عملکرد پرخوران، به وسیله تغییرات در تنظیمات رایانه موتور در حالت بیشینه خود قرار گرفت. سپس همانند حالت اول آزمایش‌های شماره ۱ تا ۴ برای به دست آمدن سطوح مختلف از گرفتگی انجام گرفت. در مرحله بعد از آزمون‌های برنامه‌ریزی شده، به علت اینکه در دور ۲۵۰۰ د.د پرخوران به دور دورانی بالایی دست نیافته بود، لذا سرعت دورانی موتور به ۳۲۰۰ د.د افزایش یافت. دلیل انتخاب این دور را می‌توان حد آستانه شروع ارتعاشات دارای نوفه زیاد و دور موتوری دانست که بیشترین استفاده را در چرخه‌های رانندگی دارد. شرایط آزمایش و تکرارهای آن مانند دور ۲۵۰۰ د.د در ۸ حالت مختلف انجام شد.

در این تحقیق پس از ذخیره‌سازی داده‌های حسگر شتاب‌سنج، به دلیل امکانات و قابلیت‌های کاربردی و در نظر گرفته شده، از نرم‌افزار متلب به منظور استخراج ویژگی، تحلیل داده‌ها و طیف‌ها و برنامه‌نویسی برای به دست آوردن نمودارهای مورد نظر استفاده شد.

۳-۳- استخراج ویژگی

به‌طور کلی برای انتخاب و استخراج ویژگی‌های مورد نظر جهت پردازش داده‌ها تکنیک‌های مختلفی وجود دارد که ادامه به آن اشاره شده است.

۳-۳-۱- استخراج ویژگی در حوزه زمان^۱

از کمیت‌های مناسب در این زمینه می‌توان به گشتاورهای آماری داده‌ها اشاره کرد که اطلاعات خوبی را در بر دارند [۲۳]. اولین و دومین گشتاور مقادیر میانگین و انحراف معیار می‌باشند. گشتاور سوم، که نسبت به مکعب انحراف معیار، یکسان شده است، اسکینوس نام دارد. تمامی اطلاعات کلی و جزئی در درون داده‌های حوزه زمان وجود دارد ولی در این حوزه تنها اطلاعات کلی قابل دسترس است؛ اما برای به دست آوردن اطلاعات دقیق‌تر مانند اینکه ارتعاشات موجود دارای چه بسامدهایی هستند، از حوزه زمان نمی‌توان استفاده کرد. بنابراین با تبدیل داده‌ها به حوزه بسامد می‌توان محتوای بسامدی موجود در ارتعاش موتور را به دست آورد. همچنین می‌توان دریافت که ارتعاشات ناشی از هر قطعه چقدر است.

¹ Time Domain

۳-۲-۳-۳- استخراج ویژگی در حوزه بسامد^۱

تحلیل حوزه بسامد یا تحلیل طیفی سیگنال ارتعاشات، شاید پرکاربردترین روش برای عیب‌یابی می‌باشد. تبدیل فوریه گسسته DFT^۲ و بسط سری فوریه FFT، معمول‌ترین روش‌های تشخیص عیب هستند که به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. DFT اطلاعاتی در مورد یک داده‌های عددی فراهم کرده و طیف بسامدی مختلط آن را می‌دهد. از آن اطلاعات می‌توان اجزای بسامدی تشکیل دهنده سیگنال را استخراج کرد [۲۴].

۳-۲-۳-۱- بررسی بسامد کاری پرخوران

به‌عنوان اولین ویژگی استفاده شده از حوزه بسامد که از داده ذخیره شده استخراج شد، می‌توان به بسامد کاری پرخوران و تغییرات آن در شرایط مختلف کاری اشاره کرد. با توجه به داده‌های حسگر دورسنج و همچنین توجه به بسامدهای غالب در کل داده می‌توان به دنبال این بسامد کاری بود و در بخش ۴ به آن پرداخته شده است.

۳-۲-۳-۲- چگالی طیف توان

چگالی طیفی توان^۳ برای موج ارتعاشی بیانگر نحوه توزیع توان موج ارتعاشی در بسامدهای سازنده آن موج ارتعاشی است. به‌عبارتی دیگر چگالی طیف توان، مشخص می‌کند که هر مؤلفه بسامدی موج ارتعاشی دارای چه مقدار توان است. توان برابر با میانگین مربعات موج ارتعاشی در نظر گرفته می‌شود. در حوزه بسامد این مقدار برابر با مربع دامنه مقادیر تبدیل فوریه سریع موج ارتعاشی است [۲۵].

این روش باعث کاهش نوسانات شامل نوفه در دامنه توان می‌شود. البته در عوض رزولوشن بسامدی کاهش می‌یابد؛ زیرا در این حالت تعداد نقاط داده بسیار کمتری برای محاسبه هر FFT در اختیار ما قرار دارد. چگالی طیفی قدرت به دلیل کارایی محاسباتی و سهولت در تفسیر، پرکاربردترین روش تحلیل موج ارتعاشی و همچنین دارای وضوح بسامد محدود است. PSD به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۶]:

$$E_x = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt \quad (۱)$$

۳-۲-۳-۳- شار طیفی^۴

شار طیفی تغییر طیفی بین دو قاب پی‌درپی را اندازه‌گیری می‌کند و به‌عنوان تفاوت مربعی بین بزرگنمایی‌های یکسان شده طیف دو پنجره کوتاه مدت متوالی محاسبه می‌شود:

$$Fl_{(i,i-1)} = \sum_{k=1}^{wf_L} [EN_i(k) - EN_{i-1}(k)]^2 \quad (۲)$$

شار طیفی برابر اندازه‌گیری سرعت تغییر طیف توان یک موج ارتعاشی است که با مقایسه طیف توان برای یک پنجره در برابر قدرت از پنجره قبلی محاسبه می‌شود. به‌طور دقیق‌تر، معمولاً به‌عنوان حد وسط بین دو طیف یکسان محاسبه می‌شود. به این ترتیب شار طیفی به قدرت کلی (از آنجا که طیف‌ها یکسان شده‌اند) و همچنین ملاحظات زاویه (از آنجا که فقط مقادیر مقایسه می‌شوند) بستگی ندارد. از شار طیفی می‌توان برای تعیین زمان رخداد یک موج ارتعاشی یا در تشخیص شروع آن استفاده کرد.

^۱ Frequency Domain

^۲ Discrete Fourier Transform

^۳ Power Spectral Density (PSD)

^۴ Flux Spectral

۳-۲-۴- شیب طیفی^۱

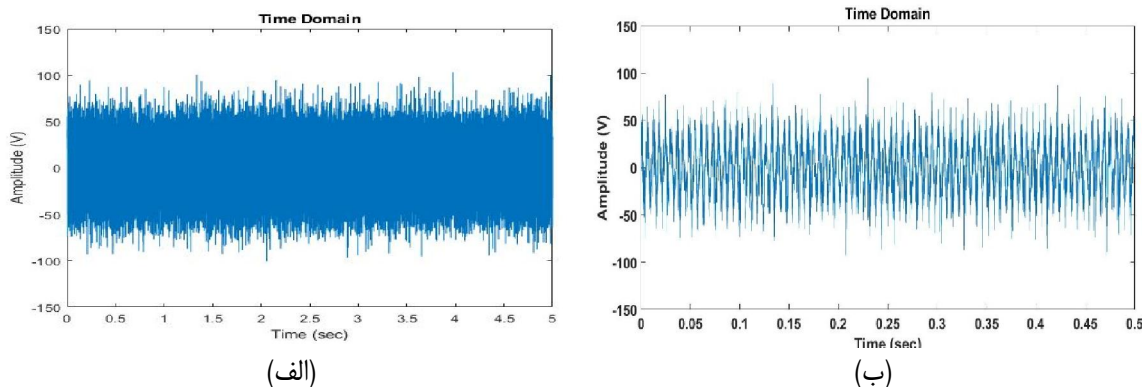
در پردازش موج ارتعاشی عددی، اندازه‌گیری مقدار سرعت طیف یک موج ارتعاشی به سمت بسامدهای بالا است که با استفاده از رگرسیون خطی محاسبه می‌شود.

$$s = (R_{F_1} - R_{F_0}) / (\lambda_1 - \lambda_0) \quad (3)$$

۴- نتایج و بحث

۴-۱- آزمایش‌های انجام گرفته در دور موتور ۲۵۰۰ د.د.

در حالت بدون گرفتگی آزمایش نخست انجام گرفت و معیاری برای مقایسه با حالت‌های دیگر آزمایش شد. به دلیل شباهت داده‌های ضبط شده در ۳ راستای مختصاتی و ۴ تکرار این آزمایش، شکل ۹ داده‌های ارتعاشی تکرار اول از ارتعاشات راستای افقی خودرو (به مدت ۵ و ۰.۵ ثانیه) نشان داده شده است. به دلیل اینکه در آزمایش‌های مربوطه خرابی و تغییر شرایط کارکردی به صورت ثابت و بدون تغییر در زمان هستند، لذا از روی نمودار حوزه زمان نمی‌توان داده‌های مناسبی استخراج کرد.



شکل ۹ موج ارتعاشی طولی حالت بدون گرفتگی مسیر خروجی در دور ۲۵۰۰ د.د؛ الف) در مدت زمان ۵ ثانیه، ب) در مدت زمان ۰.۵ ثانیه

شکل ۱۰ ارتعاشات در حوزه بسامد برای آزمایش نخست را نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که بسامد دو برابر دور موتور (۸۳،۳ هرتز) همراه با هماهنگ اول آن (۱۶۶،۶ هرتز) که ناشی از احتراق است، بسامد غالب بوده و حسگر شتاب‌سنج با دقت و صحت کافی توانسته است داده‌های دور موتور را به ثبت برساند.

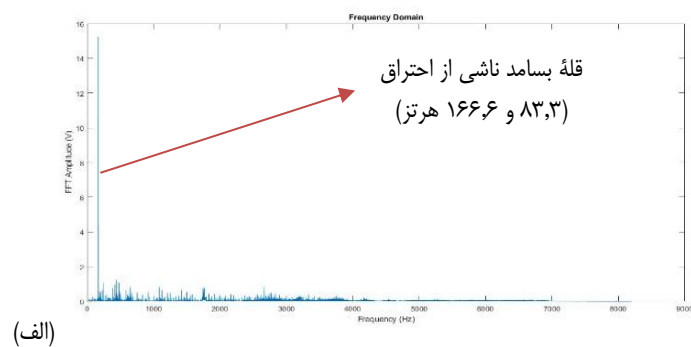
با توجه به داده‌های حسگر دورسنج نصب شده در پرخوران برای سرعت دورانی و همچنین محل نصب حسگر ارتعاش‌سنج و فاصله آن با محور پرخوران، می‌توان دریافت که بسامد اصلی در بازه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز برای چرخش محور پرخوران است. شکل ۱۱ نشانگر آن است که این بسامد کاری در این آزمایش در راستای عمود بیشتر نمایان بوده و وضوح بسامدی بهتری دارد.

انجام آزمون و خطا و اعمال تبدیل فوریه به بازه‌های مختلف زمانی از تکرارهای مختلف، منجر به یافتن بهترین بازه زمانی برای اعمال تبدیل فوریه و تحلیل در حوزه بسامد، یعنی بازه یک ثانی‌های از موج ارتعاشی ذخیره شده گردید (شکل ۱۳).

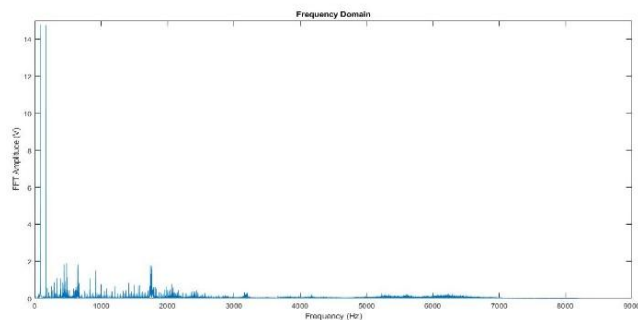
دلیل این اختلاف را می‌توان این‌گونه بیان کرد که با توجه به سرعت بالای چرخش محور پرخوران نسبت به سایر قطعات متحرک موتور، بسامد کاری بالاتری داشته و در بازه‌های زمانی کمتر وضوح بسامدی بیشتری را نمایان می‌کند.

¹ Spectral Slope

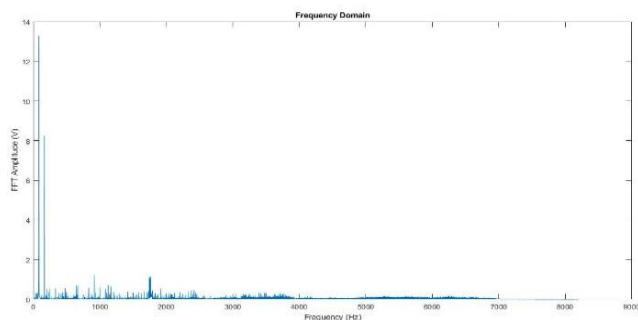
لذا موج ارتعاشی تبدیل به داده‌های ۱ ثانی‌های شدند و در حوزه بسامد تحلیل شدند. با تبدیل این عدد به مقدار د.د.د. (ضرب در ۶۰) به صورت متوسط به عدد ۱۰۸۲۴۰ خواهیم رسید که اختلاف ناچیز با حسگر دورسنج دارد. بنا به دلایل ذکر شده، علت صحیح‌تر بودن داده‌های شتاب‌سنج را از جمله دقت و تکرارپذیری در تکرارهای مختلف و شناسایی دور موتور و نزدیک بودن عدد به دست آمده نسبت به محاسبات و انتظارات از این پرخوران دانست.



(الف)

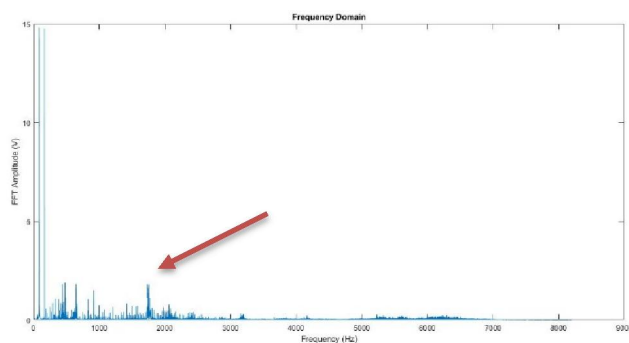


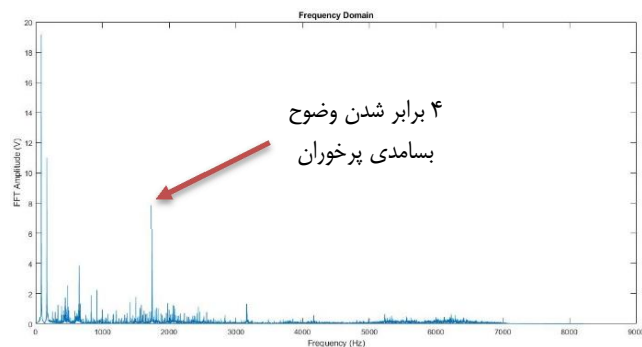
(ب)



(ج)

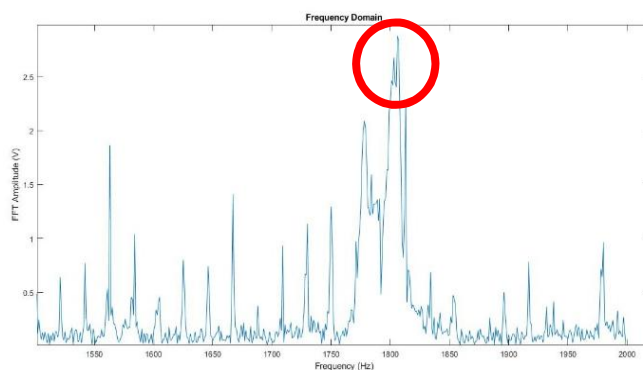
شکل ۱۰ ارتعاشات در حوزه بسامد آزمایش ۱: (الف) راستای طولی، (ب) راستای عمود، (ج) راستای عرضی





شکل ۱۱ افزایش وضوح بسامد پرخوران، با کاهش بازه زمانی موج ارتعاشی (راستای قائم)

با تغییر مقدار قرارگیری پره‌های VGT از حالت تحت اختیار رایانه موتور به بالاترین مقدار از زاویه ممکن (۱۰۰٪) در آزمایش بعدی، دور پرخوران افزایش پیدا می‌کند که این امر در هر دو از حسگرهای دورسنج و شتابسنج قابل مشاهده است. به سبب این تغییر پاشش سوخت نیز افزایش پیدا کرده و دمای ورودی صافی را نیز بالا می‌برد. در مرحله بعد همان‌گونه که گفته شد مسیر خروج دود به مقدار $1/3$ یا ۳۳٪ از بیشترین مقدار مجاز از گرفتگی، مسدود شد و آزمایش به انجام رسید. در مرحله سوم آزمایش، با افزایش سطح گرفتگی مسیر خروجی به مقدار ۶۶٪ حداکثر گرفتگی مجاز در نظر گرفته شده، مجدداً در ۴ تکرار ۵ ثانیه اقدام به ذخیره موج ارتعاشی از حسگر شتابسنج شد. همانند دو آزمایش قبلی با اعمال صافی میان‌گذر در بازه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ هرتز به‌منظور یافتن بسامد پرخوران در بازه‌های یک ثانیه‌ای از موج ارتعاشی انجام شد که به‌صورت نمونه در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.



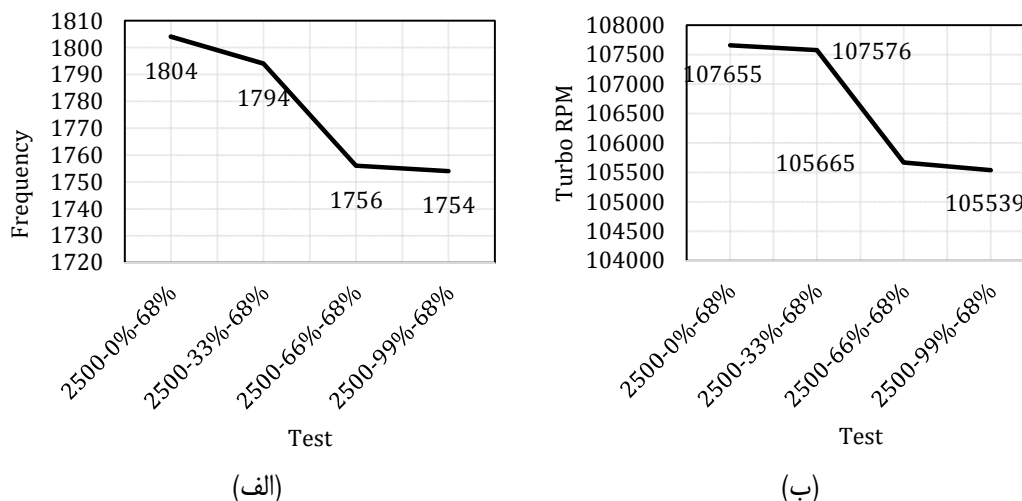
شکل ۱۲ اعمال صافی میان‌گذر در حوزه بسامد بر داده‌های ارتعاشی راستا قائم مقدار ۶۶٪ حداکثر گرفتگی مجاز، دور ۲۵۰۰ د.د. موتور

در آخرین مرحله از آزمایش‌های دور موتور ۲۵۰۰ د.د.، مقدار انسداد مسیر خروجی را به بیشترین حد مجاز یا اصطلاحاً ۹۹٪ رسانیده شد.

۴-۲- نتایج آزمایش‌های دور ۲۵۰۰ د.د.

به‌منظور جمع‌بندی داده‌های ۴ آزمایش نخست که همگی مربوط دور موتور ۲۵۰۰ د.د. و دو حالت نحوه قرارگیری پره‌های VGT در ۶۸٪ و ۱۰۰٪ از مقدار زاویه حرکتی خود بودند، در شکل ۱۳ الف نمودار بسامد ناشی از چرخش پرخوران در ۴ سطح از گرفتگی را مشاهده می‌کنیم. آن‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش گرفتگی در مسیر خروج دود، نمودار بسامد پرخوران ابتدا به‌صورت افزایشی

رفتار کرده و سپس در مرحله آخر که همان بیشینه مقدار انسداد است، مجدداً کاهش یافته و از دور پرخوران کاسته می‌شود. صحت این اتفاق را می‌توان با توجه به شکل ۱۳ ب که نشانگر داده‌های ذخیره شده از حسگر دورسنگ هستند را نشان داد.

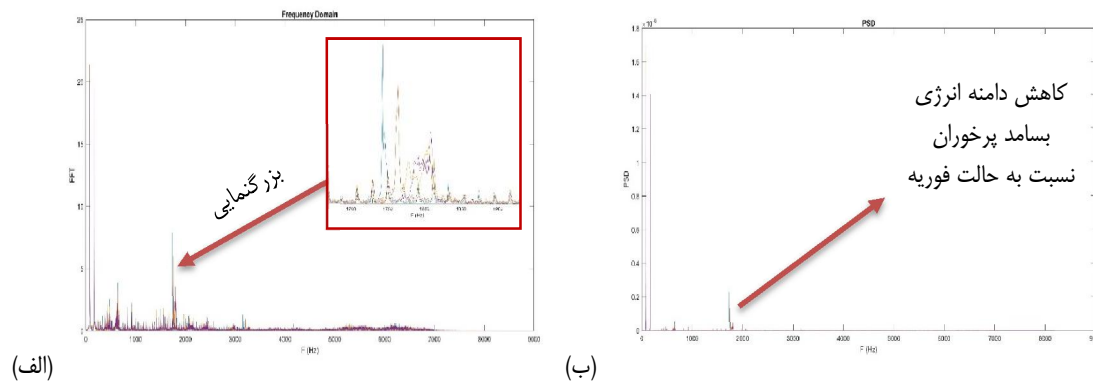


شکل ۱۳ نمودار رفتار پرخوران در ۴ سطح از گرفتگی مسیر خروج دود در دور ۲۵۰۰ د.د.د. موتور: الف) بسامد پرخوران، ب) سرعت دورانی پرخوران

منظور از اعداد مندرج در محور افقی به ترتیب: دور موتور (د.د.د.)، مقدار گرفتگی مسیر خروجی (درصد)، زاویه قرارگیری پره‌های VGT (%).

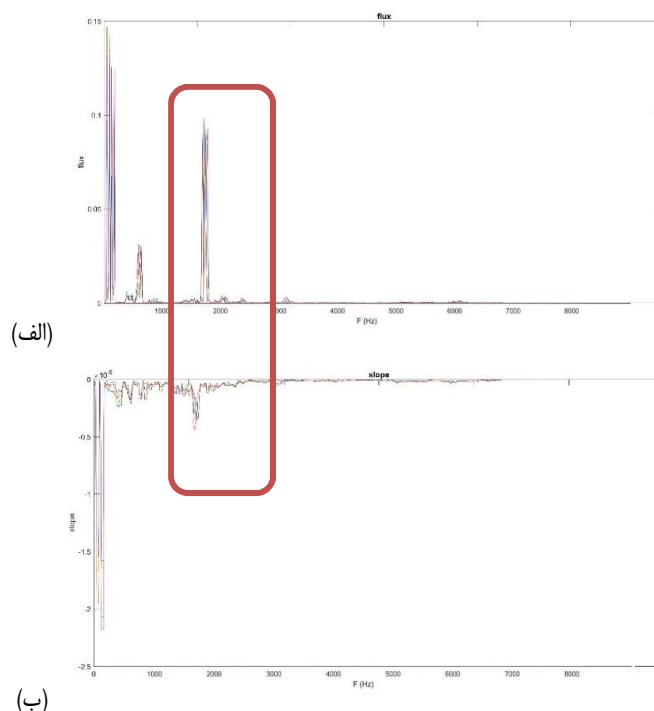
با توجه به شکل ۱۴ و خاصیت چگالی طیف توان و رابطه آن، مقادیر فوریه به توان ۲ می‌رساند. لذا مقادیر بسامد-هایی که از بقیه انرژی بیشتری دارند، بیشتر نمایان شده و مقادیر دیگر بسامدی با انرژی کمتر، کوچک‌تر می‌شوند. در این شرایط از آزمایش با دور موتور ۲۵۰۰ د.د.د. به دلیل غالب بودن بسامد فرآیند احتراق در موتور، در صورت استفاده از PSD مقادیر بسامد پرخوران نسبت به حالت تبدیل فوریه کوچک‌تر شده و تشخیص آن را مشکل می‌سازد.

لذا با وجود تغییر در بسامد و دور پرخوران در شرایط آزمایشی دور ۲۵۰۰ د.د.د. موتور، می‌توان دلیل عدم تغییرات قابل توجه و روند مناسب در تغییر بسامد پرخوران نسبت مقدار گرفتگی مسیر خروجی که معادل گرفتگی DPF است را پایین بودن دور پرخوران و به طبع آن عدم تأثیرپذیری مناسب از گرفتگی DPF دانست.



شکل ۱۴ مقایسه مقدار نمایان‌سازی بسامد ۴ سطح گرفتگی پرخوران در دو حالت: الف) تبدیل فوریه، ب) چگالی طیف توان

در ادامه و با بررسی موج ارتعاشی پرخوران در ۴ سطح از گرفتگی مسیر خروجی به کمک دو ویژگی شار طیفی و شیب طیفی مشاهده شد که از میان ویژگی‌های استخراج شده، شار طیفی قابلیت بیشتری در نمایان‌سازی بسامد پرخوران در این دور دورانی از موتور (و به طبع آن دور پرخوران) را دارا است (شکل ۱۵).



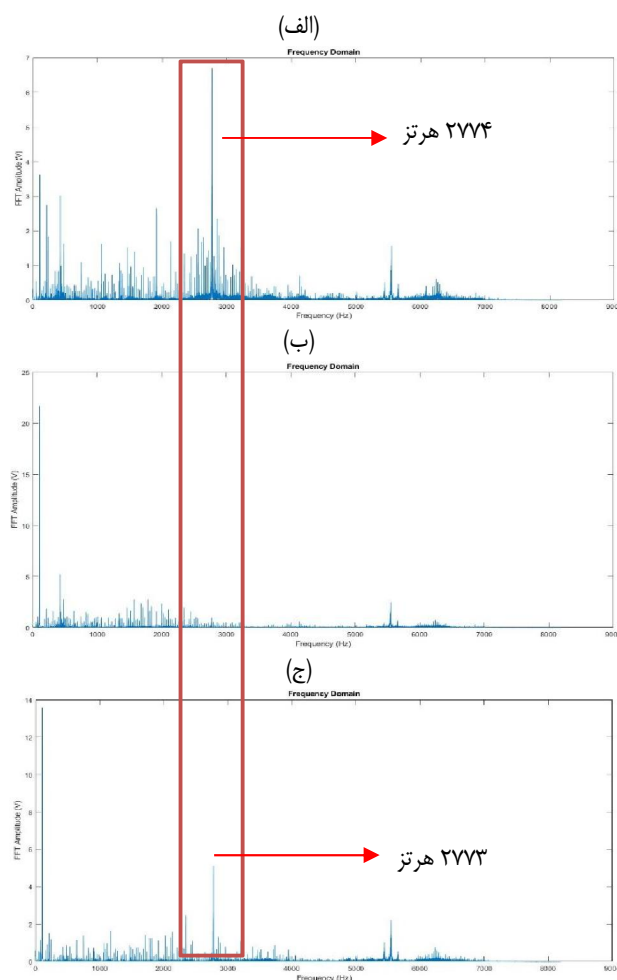
شکل ۱۵ مقایسه مقدار نمایان‌سازی بسامد ۴ سطح گرفتگی پرخوران در دو حالت: (الف) شار طیفی، (ب) شیب طیفی

۴-۳- آزمایش‌های انجام گرفته در دور موتور ۳۲۰۰ د.د

در مرحله اول همانند سری قبلی در حالت بدون گرفتگی برای ذخیره داده شتاب‌سنج به‌عنوان داده مبنا اقدام شد. شکل ۱۶ نمودار طیف بسامدی حاصل از اعمال تبدیل فوریه بر داده‌ها یک تکرار ۵ ثانی‌های از این آزمایش را نشان می‌دهد. بسامد غالب ۱۰۶٫۶ هرتز مربوط فرآیند احتراق در موتور بوده که نشانگر سرعت دورانی موتور است و دقت و صحت این روش از شناسایی رفتار قطعات مکانیکی را نشان می‌دهد. پس از این بسامد، دو قله انرژی در شکل مشاهده می‌شود که بنا به دلایل ذکر شده در بخش قبلی می‌توان فهمید که قله اول بسامد کاری پرخوران و قله دوم هم ناشی از هماهنگی نخست این پدیده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود در این سرعت از دور موتور، پرخوران به دور بالایی رسیده و به‌صورت شهودی هم صدای آن شنیده می‌شد. لذا به سهولت نسبت به آزمایش‌های قبلی اثر بسامدی آن در کل طیف قابل تفکیک است.

راستای طولی و عرضی خودرو به ترتیب (X و Z) به بهترین نحو این پدیده را نشان می‌دهند و حتی در راستای طولی انرژی بسامد پرخوران از انرژی بسامد احتراق بیشتر است، اما در محور قائم (Y) بسامد مربوط پرخوران به دلایلی همچون نوفه یا خنثی شدن نیرو در آن جهت به سبب نیروی حرکت گازهای ناشی از احتراق، تأثیر چرخش پرخوران بر داده ذخیره شده توسط حسگر آن‌چنان قابل‌رویت نبوده و تنها در ضریب اول آن می‌توان قله انرژی را مشاهده کرد. با مقایسه داده‌های حاصله از آزمایش ۱ (بدون گرفتگی) در هر دو دور موتور مورد آزمایش، می‌بینیم که با افزایش ۷۰۰ د.د.د موتور، سرعت دورانی پرخوران تغییر قابل توجه داشته و در حدوداً ۱۰۰۰ دور در ثانیه (۶۰،۰۰۰ د.د.د) افزایش

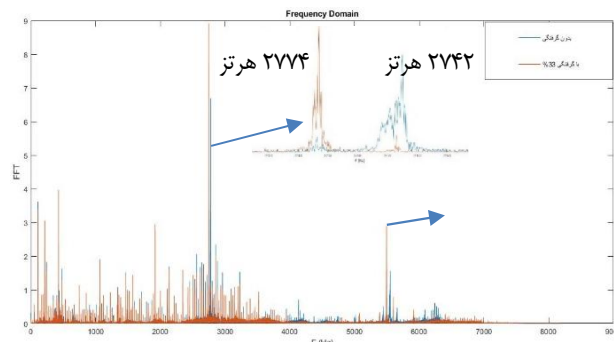
پیدا کرده است که این تغییر نشان‌دهنده اهمیت سرعت دورانی موتور در هنگام آزمایش تشخیص گرفتگی DPF بر اساس رفتار ارتعاشی پرخوران است.



شکل ۱۶ طیف بسامدی ارتعاش سنج در حالت بدون گرفتگی در دور ۳۲۰۰ د.د.د موتور: (الف) راستای طولی، (ب) راستای قائم، (ج) راستای عرضی

در مرحله دوم آزمایش که تنظیم دستی پره‌های VGT است، مشاهده می‌شود که وقتی به حداکثر مقدار زاویه تعریف شده می‌رسد، سرعت چرخشی پرخوران به مقدار قابل توجه افزایش یافته به سبب بالا رفتن مقدار شار هوا در ورودی موتور، پاشش سوخت افشانه‌ها نیز افزایش می‌یابد. این تغییرات برخلاف نتایج آزمایش‌های دور ۲۵۰۰ د.د.د موتور نشان‌دهنده بالا رفتن انرژی و سرعت گازهای خروجی در هنگام ورود به پرخوران و برخورد با پره‌های آن است. در مرحله دوم با ایجاد گرفتگی به وسیله انسداد مسیر خروجی با ورق تسمه‌ای به مقدار ۱,۳ حداکثر مقدار مجاز تعریف شده، داده حسگرها در تکرارهای مختلف ذخیره شد.

در نمودار حوزه بسامد این طیف از داده‌ها، همانند حالت بدون گرفتگی بر روی راستای قائم پدیده‌های قابل شناسایی نیست ولی در راستای طولی خودرو به وضوح در بازه بسامدی ۲۵۰۰-۳۰۰۰ هرتز، بنا به انتظار عملکرد پرخوران در این قسمت، شاهد قله انرژی بلندی هستیم که نسبت به حالت قبلی بسامد کوتاه‌تری را نشان داده و ضریب اول آن نیز به وضوح در بسامد ۵۴۹۴ هرتز قابل دیدن است و گواه این امر نیز داده حاصل از حسگر دورسنج است که سرعت دورانی کُندتری را برای پرخوران در این حالت به ثبت رسانده است. در شکل ۱۷ طیف موج ارتعاشی در حوزه بسامد را می‌بینیم که با نتایج حاصل از آزمایش قبلی مقایسه شده و کاهش بسامد پرخوران به چشم می‌خورد.



شکل ۱۷ مقایسه طیف داده حوزه بسامدی در دو وضعیت از گرفتگی مسیر خروجی در دور موتور ۳۲۰۰ د.د.د؛ رنگ آبی بدون گرفتگی، رنگ قرمز با گرفتگی ۳۳٪

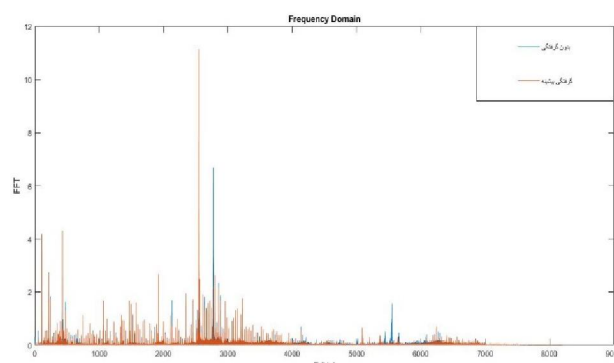
با افزایش سطح گرفتگی مسیر خروجی گازهای حاصل از احتراق به مقدار ۶۶٪ حداکثر مقدار مجاز، نسبت به شرایط قبلی آزمایش‌ها به موتور فشار مضاعفی وارد شده و این پدیده به‌صورت شهودی هم از نظر تغییر در سروصدای حاصله از موتور و سوت پرخوران مشاهده شد. حسگر فشارسنج نصب شده در ورودی DPF، عدد ۳۴ کیلوپاسکال را به ثبت رسانده که این رقم برای سلامت کارکرد قطعات موتور بسیار مخرب است و علاوه بر آن سبب افزایش مصرف سوخت و کاهش بازده موتور به دلیل برگشت گاز به درون محفظه احتراق می‌شود.

بسامد کاری پرخوران با میانگین مقدار تکرارهای آزمایش ۲۶۵۹ هرتز، انرژی قابل‌توجهی داشته و از میان سایر پدیده‌هایی که در ایجاد طیف تأثیرگذار بوده‌اند غالب‌تر است.

در آخرین مرحله از آزمایش‌ها، بیشترین حد ممکن از مقدار انسداد مسیر را ایجاد نموده و به دلیل فشار بالایی توسط حسگر فشارسنج نشان داده شد (۴۵ کیلوپاسکال)، همان‌گونه که گفته شد برای جلوگیری از آسیب به موتور و پرخوران، مدت زمان انجام آزمایش را کاهش داده و داده‌هایی با طول ۳ ثانیه برداشت شد.

شکل ۱۸ نمایانگر انرژی قوی بسامد کاری پرخوران در این حالت نسبت به وضعیت بدون گرفتگی است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود همراه با افزایش انرژی، بسامد کاری پرخوران کاهش یافته که این امر نشانگر کاهش سرعت گازهای خروجی و همانند حالت گرفته شدن DPF خواهد بود.

در این آزمایش به دلیل فشار بالایی که به پرخوران وارد می‌شد، از حالت VGT ۱۰۰٪ هیچ آزمایشی انجام نشد و داده‌های موجود نتیجه مطلوب را مشخص کردند و خللی در موضوع پدید نیامد.

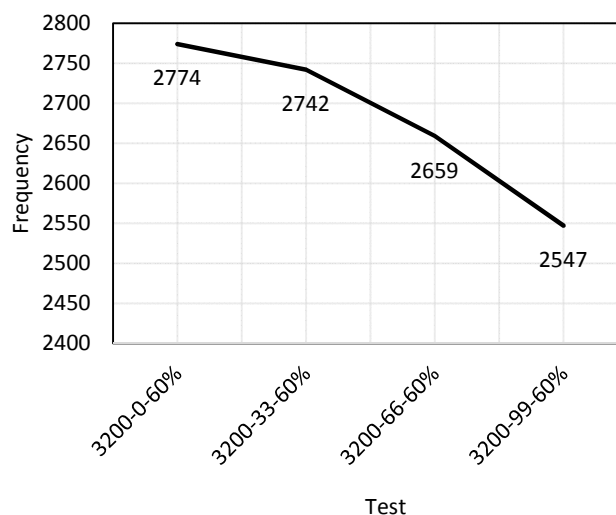


شکل ۱۸ مقایسه طیف داده حوزه بسامدی در دو وضعیت از گرفتگی مسیر خروجی در دور موتور ۳۲۰۰ د.د.د؛ رنگ آبی بدون گرفتگی، رنگ قرمز با گرفتگی ۹۹٪

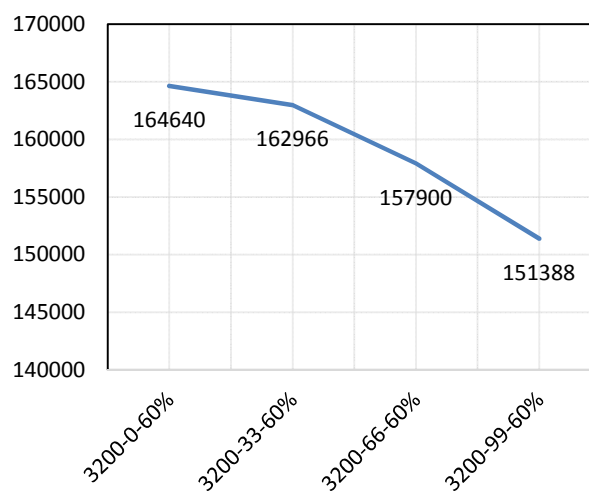
۴-۴- تحلیل نتایج آزمایش‌های دور ۳۲۰۰ د.د.د

در این سری از آزمایش‌ها، برخلاف آزمایش‌های دور ۲۵۰۰ د.د.د، روند معناداری قابل مشاهده و تشخیص است. بدین گونه که با افزایش سطح گرفتگی از سرعت دورانی پرخوران کاسته می‌شود که دلیل این امر هم همان گونه که ذکر شده، با انسداد مسیر خروجی سرعت گازهای حاصل از احتراق کاسته می‌شود و انرژی لازم برای به چرخش درآوردن گردا نیز به طبع آن پایین می‌آید.

در شکل ۱۹ (الف) نمودار بسامد کاری پرخوران در ۴ سطح از گرفتگی را مشاهده می‌کنیم. این اعداد با توجه به یکسان بودن بسامد پرخوران در هر سه راستای مختصاتی، به عنوان نمونه از راستای طولی خودرو برداشت شده است. در شکل ۲۰ (ب) داده حاصل از حسگر دورسنج پرخوران را می‌بینیم که همان روند کاهش سرعت به ازای افزایش سطح گرفتگی را نشان می‌دهد با این تفاوت که به دلیل تنظیم نبودن حسگر، صحت اعداد به دست آمده درست نبوده اما در تکرارهای مختلف دقت مناسبی را شاهد بودیم. داده حاصل از این حسگر از بسامد به دست آمده از حسگر شتاب‌سنج کمتر است و انتظار می‌رود سرعت دورانی در بازه حسگر شتاب‌سنج صحیح باشد.



(الف)

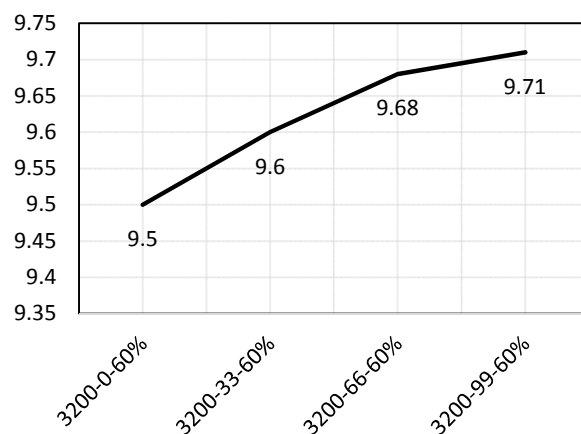


(ب)

شکل ۱۹ نمودار رفتار پرخوران در ۴ سطح از گرفتگی مسیر خروج دود در دور ۳۲۰۰ د.د.د موتور: (الف) بسامد پرخوران، (ب) سرعت دورانی پرخوران

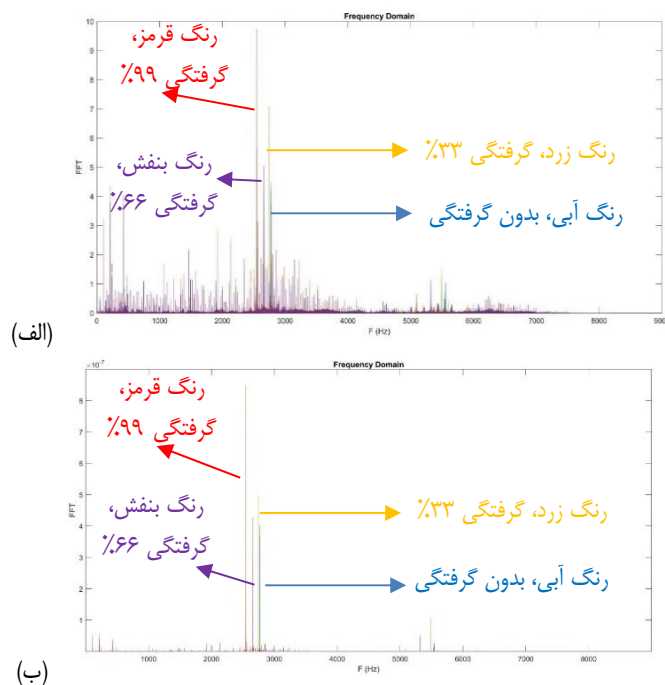
منظور از اعداد مندرج در محور افقی به ترتیب: دور موتور (د.د.د.)، مقدار گرفتگی مسیر خروجی (درصد)، زاویه قرارگیری پره‌های VGT (%).

در شکل ۲۰ نمودار مربوط مصرف سوخت نسبت سطوح مختلف گرفتگی را شاهد هستیم.



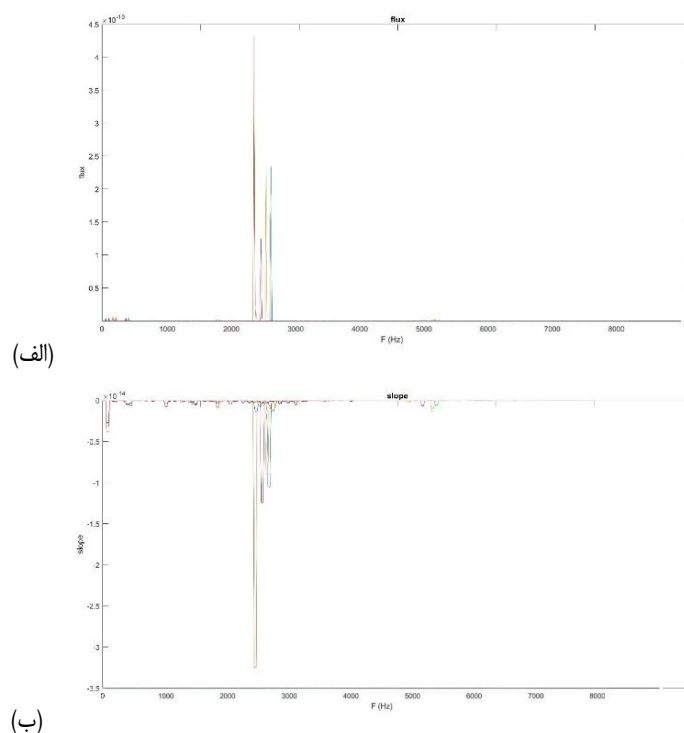
شکل ۲۰ نمودار روند افزایش مصرف سوخت به ازای افزایش گرفتگی

نمودار طیف بسامدی داده‌های هر ۴ آزمایش در شکل ۲۱ الف نمایش داده شده است. به دلیل بالا بودن انرژی بسامد ناشی از پرخوران به‌وضوح قابل تشخیص است، اما چنانچه از چگالی طیف توان استفاده کنیم، سایر بسامدها به دلیل پایین بودن انرژی وضوح کمتری پیدا کرده و رخداد مد نظر بیشتر نمایان می‌گردد (شکل ۲۱ ب).



شکل ۲۱ طیف بسامدی داده حسگر شتاب‌سنج در ۴ سطح از گرفتگی مسیر خروج دود در دور ۲۵۰۰ د.د.د موتور: (الف) حوزه بسامد، (ب) اعمال چگالی طیف توان

با بررسی و استخراج دو ویژگی شار طیفی و شیب طیفی از داده ضبط شده از پرخوران، طبق شکل ۲۲ می‌بینیم که هر دو ویژگی قابلیت خوبی در نمایان‌سازی رخداد داشته و همانند شرایط آزمایش در دور موتور ۲۵۰۰ د.د. همچنان شار طیفی توانایی بیشتری از نمایان‌سازی رخداد نسبت به سایر ویژگی‌ها را از خود به نمایش می‌گذارد. پس از آن چگالی طیف توان و شیب طیفی در مرتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند.



شکل ۲۲ مقایسه مقدار نمایان‌سازی بسامد ۴ سطح گرفتگی پرخوران در دو حالت: الف) شار طیفی، ب) شیب طیفی

۵- نتیجه‌گیری

- در ابتدا با انجام آزمون و ذخیره‌سازی موج ارتعاشی به مدت ۵ ثانیه، پس از اعمال تبدیل فوری و استخراج ویژگی‌ها مشاهده شد که با کاهش زمان نمونه‌برداری به ۱ ثانیه، وضوح بسامدی بالاتری در بازه بسامد ناشی از سازوکار پرخوران دیده می‌شود.

- در این پژوهش و برای موتور مذکور مشاهده شد که در دور ۲۵۰۰ د.د. که یکی از متغیرهای مستقل آزمایش محسوب می‌شد، پرخوران در ابتدای نقشه کاری خود قرار گرفته بود و با توجه به داده‌های حاصل از حسگرها و همچنین صدای زوزه مانند خود پرخوران شاهد این امر بودند. در این دوره موتور تغییرات بسامد کاری پرخوران ناشی از سطوح گرفتگی مسیر خروجی قابل تشخیص بود و با توجه به تکرارپذیری و روند مناسبی که مشاهده گردید، اما همچنان به دلیل پایین بودن سطح تغییرات در بسامد کاری امکان خطا یا مشابهت در تشخیص سطوح گرفتگی وجود داشت. لذا دور موتور ۳۲۰۰ د.د. نیز از دیگر متغیرهای مستقل آزمایش انتخاب و اجرا شد. در این دور از موتور مشاهده گردید که پرخوران کاملاً وارد عمل شده و نسبت به افزایش ۷۰۰ د.د. در موتور، افزایش چشمگیر ۶۰،۰۰۰ د.د. را تجربه می‌کند. در این آزمایش و داده‌های ارتعاشی این دور از موتور با انجام تبدیل فوری و استخراج ویژگی‌های مناسب، قابل مشاهده است که سطوح مختلف گرفتگی چگونه بر روی بسامد کاری پرخوران تأثیر داشته و این روند از تکرارپذیری مناسبی برخوردار است.

- با اعمال تبدیل فوریه و با استخراج‌های قله‌های بسامد کاری پرخوران نسبت به سطوح مختلف گرفتگی، مشاهده شد که راستای طولی خودرو در نشان دادن و وضوح بالاتر بسامدی بهتر عمل می‌کند.

- از میان ویژگی‌های قابل استخراج و بررسی شده در این پژوهش، نتیجه بر آن شد که چگالی طیف توان و شار طیفی^۱ در میان سایر ویژگی‌ها در نشان دادن بسامدهای ناشی از کارکرد پرخوران در سطوح مختلفی از گرفتگی مسیر دود توانمندتر هستند.

- با توجه داده‌های حاصل از دورسنج پرخوران، نتیجه گرفته شد که در دور موتورهای تند (در نتیجه چرخش تندتر پرخوران) خطای مشهودی پدید می‌آید که می‌تواند ناشی از ساختمان خود حسگر باشد. با کمک حسگر شتاب‌سنج مشاهده شد که دقت و صحت مناسبی در تشخیص سرعت دورانی پرخوران حتی در دورهای تند وجود دارد که این امر ناشی از مزیت‌های تحلیل‌های ارتعاشی محسوب می‌شود.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق و طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) به‌منظور فراهم‌سازی بستر آزمایشگاه و همکاری در انجام آن اعلام می‌دارند.

References

- [1] A. Romagnoli, R. Martinez-Botas, Heat transfer analysis in a turbocharger turbine: An experimental and computational evaluation, *Applied Thermal Engineering*, 38 (2012) 58-77, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.022>.
- [2] S. Shaaban, Experimental investigation and extended simulation of turbocharger non-adiabatic performance, Ph.D. Thesis, Hannover University, (2004), Germany.
- [3] D. Crescenzo, V. Olsson, J.A. Sola, H. Wu, A. Cronhjort, E. Lycke, O. Leufven, O. Stenlaas, Turbocharger speed estimation via vibration analysis, *SAE Technical Paper* 2016-01-0632, (2016). <https://doi.org/10.4271/2016-01-0632>.
- [4] J. Fang, Z. Meng, J. Li, Y. Du, Y. Qin, Y. Jiang, W. Bai, G.G. Chase, The effect of operating parameters on regeneration characteristics and particulate emission characteristics of diesel particulate filters, *Applied Thermal Engineering*, 148 (2019) 860-867, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.066>.
- [5] G. Schäffner, K. Rusch, D. Chatterjee, G. Zitzler, Diesel Particulate Filter: Exhaust aftertreatment for the reduction of soot emissions, MTU Friedrichshafen GmbH, (2014), Germany.
- [6] G. Kadijk, Roadworthiness Test Investigations of Diesel Particulate Filters Roadworthiness test investigations of diesel particulate filters, TNO: Innovation for life, (2013), Netherlands.
- [7] F. Terres, J. Michelin, H. Weltens, Soot filtration and regeneration behaviour of particulate filters for diesel passenger cars, *MTZ worldwide*, 63/7 (2002) 10-14. <https://doi.org/10.1007/BF03227555>.
- [8] A.S. Willsky, A survey of design methods for failure detection in dynamic systems, *Automatica*, 12/6 (1976) 601-611. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(76\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(76)90041-8).
- [9] N. Baydar, A. Ball, Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 17/4 (2003) 787-804. <https://doi.org/10.1006/mssp.2001.1435>.
- [10] H. Ahmadi, K. Mollazade, A practical approach to electromotor fault diagnosis of Imam Khomeini silo by vibration condition monitoring, *African Journal of Agricultural Research*, 4/4 (2009) 383-388, <https://doi.org/10.5897/AJAR.9000011>.
- [11] S.-t. Wan, H.-m. Li, Z.-f. Xu, Y.-g. Li, Analysis of Generator Vibration Characteristic on Stator Winding Inter-Turn Short Circuit Fault, *PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING*, (2004).
- [12] L.F. Villa, A. Reñones, J.R. Perán, L.J. de Miguel, Angular resampling for vibration analysis in wind turbines under non-linear speed fluctuation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25/6

¹ Flux Spectral

- (2011) 2157-2168. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.01.022>.
- [13] M.M. Ettefagh, M.H. Sadeghi, V. Pirouzpanah, H. Arjmandi Tash, Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: A parametric modeling approach, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22/6 (2008) 1495-1514. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2007.11.027>.
- [14] R. Kunze, The environmental challenge for the automotive industry, MSc in Automotive Systems Engineering Course Notes, Loughborough University, (2004).
- [15] P. Magar, S. Anwar, A. Izadian, A Virtual Sensor for Soot Load Estimation in Diesel Particulate Filters. Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 4A: Dynamics, Vibration, and Control, (9-15 November 2018), Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [16] N. Aretakis, K. Mathioudakis, M. Kefalakis, K. Papailiou, Turbocharger Unstable Operation Diagnosis Using Vibroacoustic Measurements. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference. Volume 1: Turbo Expo 2003, (16-19 June 2003), Atlanta, Georgia, USA.
- [17] A.V. Pai, S. Walsh, D. O'Boy, R. Chen, Turbocharger surge noise measurement and solution using experimental techniques, The 22nd International Congress on Sound and Vibration (ICSV22), (12-16 July 2015), Florence, Italy.
- [18] J.A. Calvo, V. Diaz, J.L. San Roman, Controlling the turbocharger whistling noise in diesel engines, *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2/1 (2006) 17-28. <https://doi.org/10.1504/IJNV.2006.008524>.
- [19] O. Chiavola, F. Palmieri, E. Recco, Vibration analysis to estimate turbocharger speed fluctuation in diesel engines, *Energy Procedia*, 148 (2018) 876-883, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.107>.
- [20] O. Chiavola, F. Palmieri, E. Recco, Turbocharger speed estimation via vibration measurements for combustion sensing, *Energy Procedia*, 126 (2017) 842-849, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.281>.
- [21] F. Ponti, V. Ravaglioli, M. De Cesare, Estimation methodology for automotive turbochargers speed fluctuations due to pulsating flows, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 137/12 (2015), <https://doi.org/10.1115/1.4030839>.
- [22] G. Vichi, I. Stiaccini, M. Becciani, G. Ferrara, L. Ferrari, A. Bellissima, R. Minamino, Detection of Cylinder-to-Cylinder Injection Variation in a Four-Stroke Diesel Engine by Monitoring the Turbocharger Speed, SAE Technical Paper 2015-32-0761, (2015).
- [23] P. Girdhar, 2004. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance, Elsevier Science, (2004), ISBN: 9780080480220, 0080480225.
- [24] M.L. Adams, Rotating Machinery Vibration: From Analysis To Troubleshooting, Marcel Dekker, (2000), ISBN: 9780429207471, 0429207476.
- [25] A. Mertins, Signal analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications, J Wiley, (1999), ISBN: 9780470852446, 0470852445.
- [26] B. Boashash, Time-Frequency Signal Analysis and Processing: A Comprehensive Reference, Elsevier Science, (2015), ISBN: 9780123985255, 0123985250.