

بررسی اثر متغیرهای مهم در تشخیص کوبش با استفاده از علائم فشار درون استوانه در موتور بنزینی

امیر حسن کاکایی

استادیار دانشکده مهندسی خودرو - دانشگاه علم و صنعت ایران
kakaee_ah@iust.ac.ir

محمد مومنی موحد*

کارشناسی ارشد مهندسی خودرو - دانشگاه علم و صنعت ایران
m_momeni@ip-co.com

علی اصغر محمودی

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو
a_mahmoudi@ip-co.com

محمد غفوری

کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو
m_ghafuri@ip-co.com

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۸۸/۶/۱۲ پذیرش نهایی مقاله: ۸۸/۱۲/۱

چکیده

متغیرهای زیادی در اندازه‌گیری و تحلیل علائم (سیگنال) فشار درون استوانه برای تشخیص صحیح کوبش تأثیرگذار می‌باشند. متغیرهای اندازه‌گیری شامل بسامد نمونه‌برداری، تعداد چرخه‌های مورد نیاز برای تشخیص صحیح کوبش، محل نصب حسگر و طریقه نصب آن است. متغیرهای تحلیل داده‌ها شامل خصوصیات تصفیه (فیلتراسیون)، انتخاب پنجره محاسباتی از چرخه موتور، نحوه تعریف شدت کوبش و روش استفاده از آن برای تشخیص کوبش می‌باشد. اثر این متغیرها در تشخیص کوبش به همراه نحوه انتخاب بهینه آنها با استفاده از تحلیل نتایج آزمونهای انجام شده با موتور ملی پرخوران در این مقاله ارائه شده است. یادآوری این نکته ضروری است که بر خلاف بیشتر مقالات، مقادیر یا روش‌های بهینه ارائه شده برای شرایط کاری خاصی از موتور نبوده است و تقریباً تمامی محدود عملکرد آن‌را در بر می‌گیرد. تبدیل فوری به سریع و تصفیه رقومی از روش‌های مهم برای پردازش اطلاعات حسگرها می‌باشند که نحوه محاسبه و کاربرد آنها بررسی شده است. تبدیل فوری به سریع بسامد اصلی نوسانات علائم ورودی را مشخص و تصفیه رقومی نوسانات ایجاد شده را با بسامدهای غیر دلخواه حذف می‌نماید.

با بررسی نتایج آزمونها مشخص می‌شود که کوبش در بسامدهایی خاص به علت حالت(مد)های ارتعاشاتی صوتی در محفظه احتراق رخ می‌دهد که روش‌هایی برای پیش‌بینی و محاسبه این بسامدها ارائه شده است. یادآوری: بسامد اصلی نوسانات ایجاد شده در اثر کوبش در این موتور حدود ۸ کیلوهرتز می‌باشد. به طور کلی تعیین دقیق این بسامدها برای بررسی اثر تصفیه و مکان بهینه قرارگیری حسگر فشار استوانه، کاربرد زیادی دارند.

کلیدواژه‌ها: تشخیص کوبش، فشار درون استوانه، تحلیل حساسیت، متغیرهای بهینه، موتور بنزینی

۱- مقدمه

■ کوبش یکی از متغیرهای اساسی است که بر روی توان خروجی، بازده حرارتی و عمر موتور بنزینی تأثیرگذار است، زیرا کوبش عامل مهمی است که نسبت تراکم و بازدهٔ تنفسی را محدود می‌کند و با ایجاد موج‌های فشاری شدید و شکستن لایهٔ مرزی حرارتی، باعث تخریب موتور می‌شود [۱]. اگر بتوان این پدیده را به طور دقیق و خودکار در شرایط آزمایشگاهی^۱ تشخیص داد، می‌توان آنرا با روش‌های مختلف مانند تغییر زاویهٔ جرقه‌زنی، رقت (نسبت هوا به سوخت) و... مهار نمود تا موتور در شرایط نزدیک به وقوع کوبش قرار گیرد و وارد محدودهٔ آن نشود. در این شرایط است که موتور با بیشترین بازده کار می‌کند و آسیبی به آن نمی‌رسد.

سامانهٔ پایش موتور^۲ با استفاده از تحلیل علائم حسگر کوبش^۳، وظیفه تشخیص و پایش آنرا بر عهده دارد که جداول و متغیرهای مورد نیاز برای این منظور با استفاده از علائم فشار درون استوانه تنظیم می‌شوند. به عبارت دیگر دقیق‌ترین حسگر برای تشخیص کوبش، حسگر فشار درون استوانه است و سایر حسگرها (مانند حسگر ارتعاشات بدنهٔ موتور که در تولید انبوه خودرو استفاده می‌شود، حسگر صدا، حسگر دمای دیوارهٔ محفظهٔ احتراق برای اندازه‌گیری انتقال حرارت، حسگر دمای گازهای خروجی، حسگر جریان یونی و...) با استفاده از آن تنظیم می‌شوند و علت عدم استفاده از آن در خودرو، قیمت گران و پیچیدگی نصب آن می‌باشد، بنابراین تشخیص کوبش با استفاده از علائم فشار درون استوانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تاکنون روش‌های متفاوتی برای تشخیص کوبش با حسگر فشار درون استوانه ارائه شده است، اما تفاوت روش‌ها و اثر متغیرهای اندازه‌گیری و تحلیل علائم فشار درون استوانه برای بهبود تشخیص کوبش بررسی نشده است. همچنین نتایج بیشتر مقالات، برای شرایط کاری خاصی ارائه شده است. با استفاده از روش‌ها و متغیرهای ارائه شده در این مقاله، امکان بهبود تشخیص کوبش در تمامی نقاط کاری موتور فراهم می‌شود.

۲- سخت افزارها و نرم افزارها

توجه شود که تمامی آزمایشها در اتاق آزمون شرکت تحقیقات موتور ایران خودرو انجام شده است و به طور کلی سخت افزارهای مورد استفاده برای آزمایش، شامل این موارد می‌باشند:

۱- موتور ملی با مشخصات

نوع موتور	چهاراستوانه، دو سوخته (گاز و بنزین) و پرخوران
حجم موتور	۱۶۴۶ لیتر
نسبت تراکم	۹٫۹
قطر استوانه	۷۸٫۶ میلی‌متر
طول مسیر سمبه	۸۵ میلی‌متر
طول دسته سمبه	۱۳۴٫۵ میلی‌متر
فشار پاشش سوخت	۳٫۵ بار

۲- لگام ترمز

به طور کلی با استفاده از این وسیله می‌توان با یک ورودی، یکی از متغیرهای اصلی خروجی یعنی دور موتور و یا گشتاور خروجی را ثابت نمود و با ورودی دریاچه گاز یکی از متغیرهای دور موتور، گشتاور خروجی، بازدهٔ تنفسی و یا خود دریاچه گاز را در مقدار دلخواه تنظیم نمود.

۳- حسگر فشار درون استوانه

در آزمایش‌ها از دو نوع حسگر فشار استفاده شده است. حسگر فشار شمی^۴ (KISTLER 6117BFD13) که به جای شمع معمولی بسته می‌شود و علاوه بر ایجاد جرقه، فشار درون استوانه را نیز ثبت می‌کند. مزیت مهم این حسگر سادگی نصب آن می‌باشد ولی در شرایط کاری موتور با بازدهٔ تنفسی بزرگ با مشکل عدم احتراق مواجه می‌شود. همچنین این حسگر قادر به ثبت نوسانهای اصلی ایجاد شده در اثر کوبش نمی‌باشد. نوع دیگر حسگر فشار (AVL GH12D)، با ایجاد سوراخهایی در بستار^۵ نصب می‌شود. مشکل عمدهٔ این حسگر پیچیدگی نصب آن است. خصوصیات کامل این حسگرها مانند محدودهٔ کاری، بسامد طبیعی، تغییر در حساسیت و... در مرجع [۲] آمده است.

۴- حسگر زاویهٔ لنگ

برای رسم منحنی فشار استوانه بر حسب زاویهٔ لنگ از این حسگر استفاده می‌شود.

۵- رابط‌های حسگر فشار درون استوانه و رایانه

علائم خروجی از حسگر فشار درون استوانه وارد تقویت کننده می‌شود. خروجی تقویت کننده را می‌توان در نوسان‌نما (اسیلوسکوپ) مشاهده نمود و یا به همراه علائم حسگر لنگ، وارد سخت افزار Indimaster نمود. در نهایت علائم خروجی از طریق مجرای چاپگر^۶ وارد رایانه و امکان رسم منحنی فشار استوانه فراهم می‌شود.

۴ - Spark Plug Pressure Transducer
۵ - Cylinder Head
۶ - Printer Port

۱ - Test bench
۲ - ECU (Engine Control Unit)
۳ - Knock Sensor

۶- رابط‌های موتور و رایانه

رابط ES590 از زیر مجموعه ETAS، برای برقراری ارتباط بین رایانه و واحد پایش موتور آزمایشگاهی^۱، به کار برده می‌شود. با برقراری این ارتباط می‌توان فرمان دلخواه را به تمامی عملگرها صادر نمود. همچنین از نرم افزارهایی برای اندازه‌گیری و تحلیل اطلاعات فشار درون استوانه استفاده شده است که کاربرد هر یک از آنها در مرجع [۲] آمده است:

AVL 670 Indimaster, Calcgraf,
AVL Concerto 3.7
INCA 5.4
Matlab 7.1

۳- شرایط آزمون

به طور کلی می‌توان گفت که محدوده تغییرات شرایط عملکرد موتور برای آزمایش‌ها بدین شرح می‌باشد:

محدوده سرعت	۵۵۰۰-۸۵۰۰ دور بر دقیقه
بازده تنفسی	۷۰-۱۴۰ درصد
لامبدا (نسبت هوا به سوخت واقعی تقسیم بر معادل درست استوکیومتری آن)	۰٫۷-۱٫۲
عدد اکتان بنزین	۸۷ و ۹۵
زمان جرقه‌زنی	از حالت بدون وقوع کوبش تا کوبش سنگین
دمای هوای ورودی	۲۵-۶۰ درجه سانتیگراد
دمای آب خنک‌کاری	۴۰-۱۰۰ درجه سانتیگراد

۴- نکات مهم در پردازش اطلاعات حسگرها

در این بخش به معرفی تبدیل فوریه، تبدیل سریع فوریه و تصفیه رقومی پرداخته می‌شود.

۴-۱- تبدیل فوریه

علائم متناوب پیوسته می‌توانند به مجموعه‌ای از علائم سینوسی تجزیه شوند، به طوری که دامنه و فاز اجزا تابعی از بسامد باشند. بنابراین تبدیل فوریه یعنی بیان اطلاعات تابعی در حوزه بسامد. این تبدیل اطلاعات کاملاً یکسانی با تابع اصلی دارد. نکته مهم در استفاده از نمودار به دست آمده از تبدیل فوریه این است که بیشترین بسامدی از اجزا که می‌تواند تحلیل شود (بسامد نایکوئیست)، نصف بسامد نمونه‌برداری است [۳].

ETK ECU - ۱

۴-۲- تبدیل سریع فوریه (FFT)

تبدیل گسسته فوریه DFT^۲ یک دنباله از اعداد را به اجزایی با بسامدهای متفاوت تبدیل می‌کند. این عملگر کاربرد زیادی دارد اما محاسبه مستقیم آن از تعریف، به کندی صورت می‌پذیرد. FFT قاعده‌ای کارآمد برای محاسبه DFT و معکوس آن می‌باشد. متداول‌ترین قاعده برای محاسبه FFT، قاعده Cooley-Tukey است. این قاعده بر اساس تقسیم نمودن تعداد داده‌ها به اجزای کوچکتر^۳ به طور بازگشتی^۵ می‌باشد. در صورتی که تعداد داده‌ها توانی از ۲ باشد، به طور متناوب می‌توان آنها را به دو بخش مساوی تقسیم نمود و در این حالت قاعده بسیار کارآمد است. روش کامل محاسبه تبدیل فوریه گسسته با استفاده از این قاعده، در مرجع [۴] آمده است.

با محاسبه تبدیل فوریه منحنی فشار استوانه، نمودار طیف قدرت از منحنی فشار استوانه در هر چرخه به دست می‌آید. توجه شود که به دلیل تغییرات زیاد چرخه به چرخه شدت کوبش در شرایطی ثابت از عملکرد موتور، نمودار طیف قدرت از منحنی فشار استوانه برای هر چرخه به طور جداگانه محاسبه می‌شود و امکان میانگین‌گیری از نمودار فشار استوانه در چند چرخه وجود ندارد. با استفاده از این نمودار می‌توان دامنه نوسانات منحنی فشار استوانه را در هر بسامد در بیشینه بسامد ممکن (بسامد نایکوئیست) تعیین نمود. شکل (۱) چنین نموداری را در شرایط وقوع کوبش سنگین، نشان می‌دهد. اهمیت این گونه نمودارها در تعیین بسامد حالت(مد)های ارتعاشاتی و دامنه نسبی آنها می‌باشد. نمودار نشان می‌دهد که بسامد اصلی کوبش که مطابق با حالت(مد) ارتعاشاتی محیطی اول است، در حدود ۸ کیلوهرتز می‌باشد. توجه شود که منحنی فشار استوانه در شرایط سرعت دورانی ۵۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۹۰ درصد، زمان جرقه‌زنی ۲۱ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۰٫۸۷ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد به دست آمده است.

۲ - Fast Fourier Transformation
۳ - Discrete Fourier Transformation
۴ - Divide and Conquer Algorithm
۵ - Recursively

۵- تعیین شدت کوبش

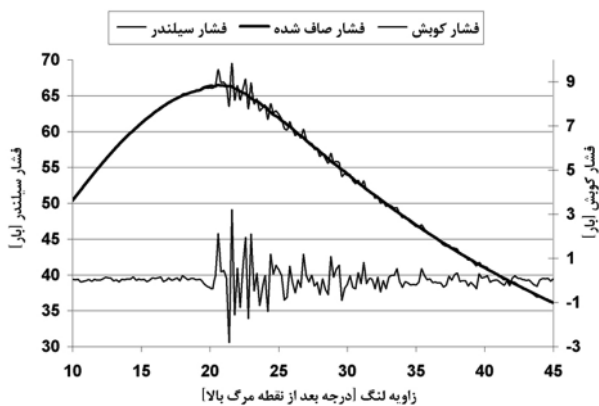
با توجه به نتایج ارائه شده در مرجع [۶] برای ارزیابی روش‌های تعیین شدت کوبش با استفاده از مقایسه نتایج آزمون در شرایط ثابت، از روش‌هایی برای تعیین شدت کوبش استفاده شده است:

- حذف میانگین منحنی فشار
- مشتق سوم منحنی فشار

در ادامه این بخش به طور خلاصه، نحوه تعیین شدت کوبش با استفاده از این دو روش بیان می‌شود.

۵-۱- حذف میانگین منحنی فشار

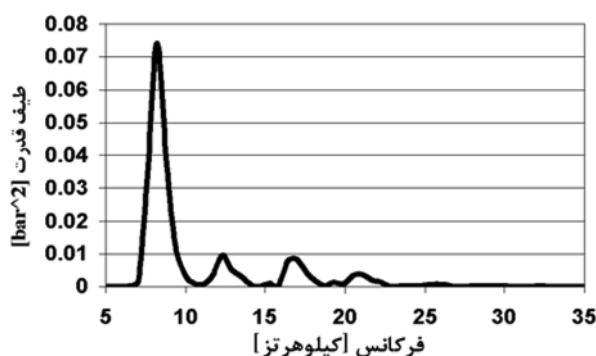
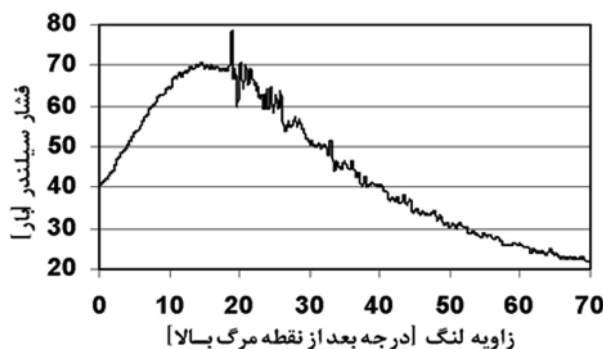
در این روش، منحنی تصفیه شده^۴ بهینه برای فشار استوانه محاسبه و از منحنی اصلی فشار استوانه کم می‌شود. منحنی به دست آمده، منحنی فشار کوبش نامیده می‌شود. بیشینه مقدار منحنی با اصلاحاتی، به عنوان شدت کوبش در هر چرخه معرفی می‌شود [۷]. نحوه محاسبه فشار بیشینه کوبش (PKP)^۵ در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ نحوه محاسبه شدت کوبش با روش حذف میانگین منحنی فشار

منحنی فشار استوانه در شکل (۲) با استفاده از روش حذف میانگین منحنی فشار و منحنی فشار استوانه در شرایط: سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۱۰۰ درصد، زمان جرقه‌زنی ۱۶ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۱ و دمای هوای ورودی ۳۱ درجه سانتیگراد محاسبه شدت کوبش ترسیم شده است.

مقدار منحنی صاف شده در هر نقطه برابر میانگین نقاطی از چپ و راست نقطه مورد نظر می‌باشد. توجه شود که با افزایش تعداد نقاط میانگین گیری، منحنی صاف‌تر می‌شود. تعداد نقاط بهینه، تابع سرعت دورانی موتور است و به گونه ای انتخاب می‌شود که حدود ۲ درجه قبل و بعد از نقطه مورد نظر وجود داشته باشد. با انتخاب دقیق تعداد نقاط بهینه،



شکل ۱ منحنی فشار استوانه و نمودار طیف قدرت از آن

۴-۳- تصفیه رقمی

تصفیه رقمی، قاعده‌ای محاسباتی است که یک دنباله از اعداد ورودی را به خروجی تبدیل می‌کند. در این روش یک دنباله از بسامدها از دنباله ورودی حذف می‌شوند.

برای محاسبه منحنی تصفیه شده، تبدیل فوریه علائم اصلی، محاسبه و با یک تابع پنجره‌ای ضرب می‌شود، به طوری که مقدار تبدیل برای بسامدهای غیردلخواه صفر می‌شود. سپس معکوس تبدیل فوریه محاسبه می‌شود و علائم تصفیه شده به دست می‌آید.

صافی پایین گذر^۱: بدون حذف بسامدهای کمتر از بسامد برش، حذف کامل بسامدهای بیشتر از بسامد برش
صافی بالا گذر^۲: بدون حذف بسامدهای بیشتر از بسامد برش، حذف کامل بسامدهای کمتر از بسامد برش
صافی میان گذر^۳: بدون حذف بسامدها در نوار مشخص شده، حذف کامل بسامدهای خارج از نوار [۵].

نمونه‌هایی از منحنی فشار استوانه در شرایط وقوع کوبش و نمودارهای تصفیه شده آن و همچنین روش محاسبه منحنی تصفیه شده در نرم افزارها، در مرجع [۲] آمده است.

۴ - Smoothed Pressure
۵ - PKP: Peak Knock Pressure

۱ - Low Pass Filter
۲ - High Pass Filter
۳ - Band Pass Filter

هنگام وقوع خوداشتعالی به وجود می‌آیند. حالت‌های ارتعاشاتی می‌توانند محیطی و شعاعی باشند و بسامدها برای موتورهای اشتعال جرقه ای در اندازه خودروهای سواری در حدود ۲۵-۵ کیلوهرتز هستند.

حالت‌های ارتعاشاتی برای محفظه احتراق استوانه‌ای شکل می‌توانند به طور تحلیلی با استفاده از معادله (۴) پیش بینی شوند، در حالی که برای شکل‌های پیچیده تر باید از روش‌های عددی استفاده نمود. برای اولین بار، در اپریل ۱۹۳۸ [۹] در سال این معادله را ارائه کرد. درکی مناسب از حالت(مد)های ارتعاشاتی صوتی، هنگام اندازه‌گیری و تحلیل اطلاعات فشار استوانه برای تشخیص کوبش به‌ویژه برای بررسی اثر تصفیه و مکان بهینه قرارگیری حسگر کاربرد زیادی دارد.

$$f_{m,n} = \frac{C \cdot \rho_{m,n}}{\pi B} \quad (4)$$

که در آن:

m : شماره حالت(مد) نوسانی محیطی

n : شماره حالت(مد) نوسانی شعاعی

$f_{m,n}$: بسامد ارتعاشاتی برای حالت(مد) m,n بر حسب هرترتز

$\rho_{m,n}$: ضریب حالت(مد) ارتعاشاتی

C : سرعت صوت بر حسب متر بر ثانیه

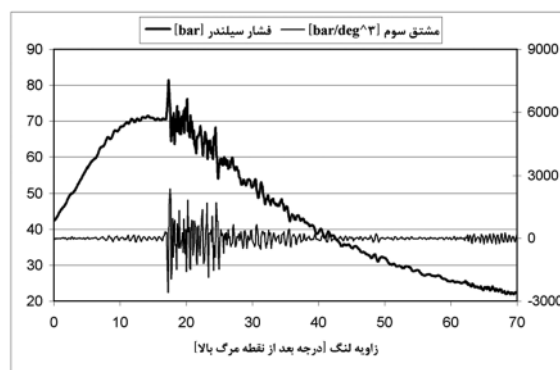
B : قطر استوانه بر حسب متر

در این معادله از ارتعاشات محوری صرف‌نظر شده است زیرا ارتفاع محفظه احتراق در نقطه مکث بالا نسبت به قطر خیلی کوچک است. شکل (۴) بعضی از حالات تشدید شعاعی و محیطی را نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۱) پنج حالت ارتعاشاتی صوتی اول و بسامد آنها وجود دارد. سرعت صوت برای محاسبه بسامد حالات ارتعاشاتی برابر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در شرایط وقوع کوبش در نظر گرفته شده است [۱۰]. نویسندگان متعددی، ضریب حالت ارتعاشاتی را تخمین زده‌اند [۱۱].

اولین حالت(مد) ارتعاشاتی از منحنی طیف قدرت از فشار کوبش، حدود ۷ کیلوهرتز می‌باشد.

۵-۲- مشتق سوم منحنی فشار

در این روش، شدت کوبش با محاسبه مشتق سوم منحنی فشار استوانه و اعمال تصحیحاتی برای تعریف حد مجاز در شرایط مختلف کاری موتور به دست می‌آید. چکل [۸] به این نتیجه رسیده است که مشتق سوم منحنی فشار در هنگام وقوع کوبش، مقدار مطلق بیشتری دارد و این روش حتی با ثبت یک عدد در هر دو درجه دقت مناسبی دارد. نمودار مشتق سوم منحنی فشار استوانه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳ نمودار مشتق سوم منحنی فشار استوانه

در شکل (۳) نمودار مشتق سوم منحنی فشار استوانه در شرایط: سرعت دورانی ۵۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۹۰ درصد، زمان جرقه‌زنی ۲۱ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۰.۸۷ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد ترسیم شده است. قابل ذکر است که در سرعت‌های دورانی تند موتور، روش دوم مناسب‌تر است.

۶- حالت(مد)های ارتعاشاتی صوتی

با به دست آوردن نمودار طیف قدرت از منحنی فشار استوانه در تمامی شرایط کاری موتور در هنگام وقوع کوبش، مشاهده می‌شود که همواره دامنه‌های بیشتر در بسامدهایی خاص رخ می‌دهند. این پدیده با رسم منحنی فشار استوانه و نمودار طیف قدرت از آن در شرایطی کاملاً متفاوت، در مرجع [۲] نشان داده شده است. در ادامه این بخش به بررسی علت وقوع این پدیده مهم پرداخته می‌شود.

کوبش در بسامدهایی خاص به علت حالت‌های ارتعاشاتی صوتی در محفظه احتراق رخ می‌دهد. این موجهها از سرعت تند آزاد شدن انرژی در

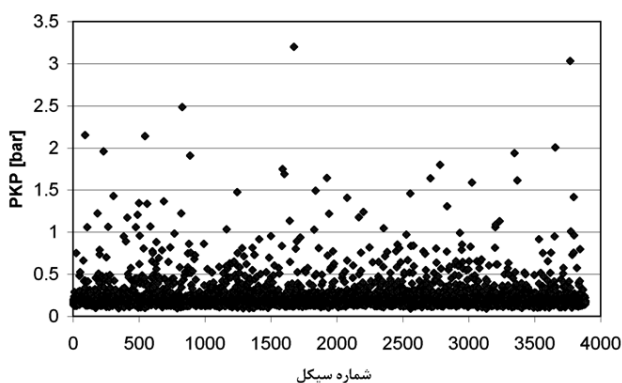
عنوان مثال حسگر فرار گرفته در مرکز محفظه احتراق، برای تمام حالات محیطی روی یک خط گرہ قرار می‌گیرد و تمایل دارد که به حالات ضعیفتر شعاعی پاسخ دهد [۱۲].

۷- اثر متغیرهای اندازه‌گیری فشار درون استوانه در شدت کوبش

در این بخش اثر متغیرهای اندازه‌گیری فشار درون استوانه در شدت کوبش بررسی و نحوه انتخاب بهینه آنها توضیح داده می‌شود. این متغیرها شامل بسامد نمونه‌برداری، تعداد چرخه‌های مورد نیاز برای تشخیص صحیح کوبش، محل نصب حسگر و طریقه نصب آن می‌باشد.

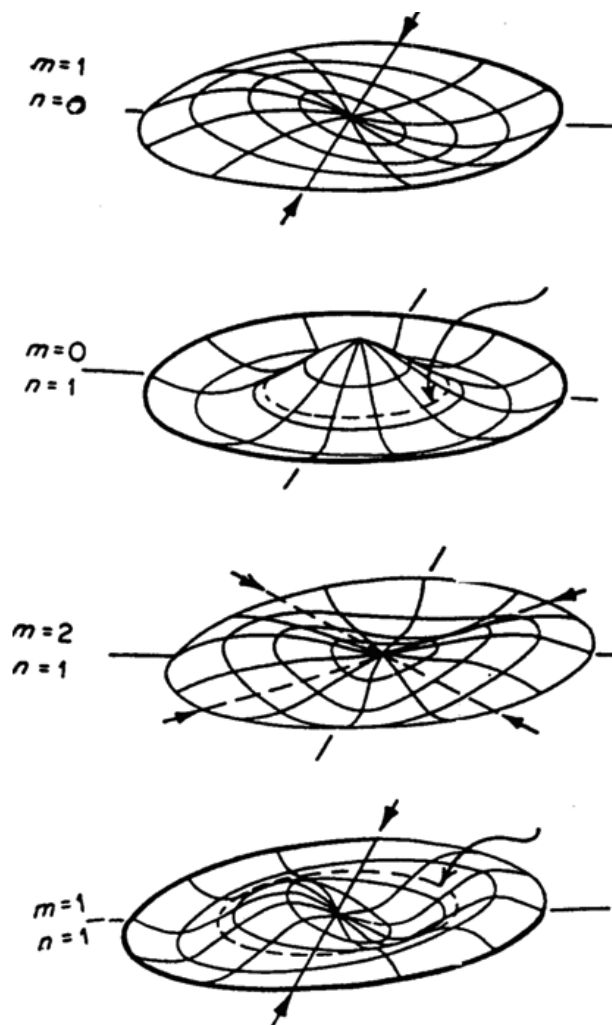
۷-۱- اثر تعداد چرخه‌ها در شدت کوبش

معمولاً تعداد ۲۰۰ تا ۳۰۰ چرخه برای محاسبه فشار مؤثر متوسط^۱ در نظر گرفته می‌شود. آیا این تعداد چرخه برای محاسبه شدت کوبش با توجه به تغییرات چرخه به چرخه آن کافی است؟ برای پاسخ به این سوال به بررسی میزان تغییرات شدت کوبش در چند چرخه متوالی پرداخته می‌شود. شکل (۵) تغییرات فشار بیشینه کوبش را بر حسب شماره چرخه در شرایط کوبش متوسط نشان می‌دهد.



شکل ۵ تغییرات فشار بیشینه کوبش در شرایط کوبش متوسط، سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه و بازه تنفسی ۱۰۰ درصد

در شکل (۶) نمودار بسامد انباشته^۲ برای فشار بیشینه کوبش در سه زمان جرقه‌زنی متفاوت دیده می‌شود. در شرایطی که بیشترین پیشی زمان جرقه‌زنی وجود دارد، تنها ۲۰ درصد چرخه‌ها فشار بیشینه‌ای بیش از ۰,۲۵ بار (نوفه‌های پس زمینه در نمودار فشار) دارند و به عنوان چرخه همراه با کوبش شناخته می‌شوند.



شکل ۴ نمودار بعضی از حالات تشدید محیطی و شعاعی [۵]

جدول ۱ حالات ارتعاشاتی صوتی و بسامد آنها

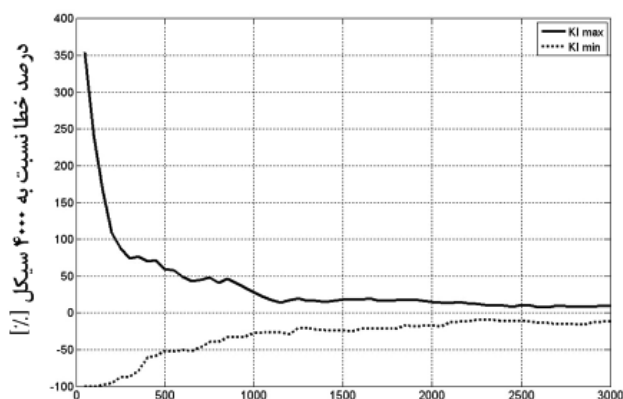
m, n	۱,۰	۲,۰	۳,۰	۰,۱	۱,۱
Mode Shape					
$\rho_{m,n}$	۱,۸۴۱	۳,۰۵۴	۴,۲۰۱	۳,۸۳۲	۵,۳۳۲
$f_{m,n}$	۷,۵	۱۲,۳	۱۷,۱	۱۵,۴	۲۱,۶

مقایسه این بسامدها با شکل (۱)، تقریب خوب این معادله را نشان می‌دهد. برای به دست آوردن نتایج دقیقتر شبیه سازی رایانه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود یا برنامه‌های CFD لازم است.

ذکر این نکته ضروری است که بیشترین نوسانات فشار برای هر حالت هنگامی به دست می‌آید که حسگر بین خطوط گرہ قرار گیرد. به

MEP - ۱

Cumulative Frequency - ۲



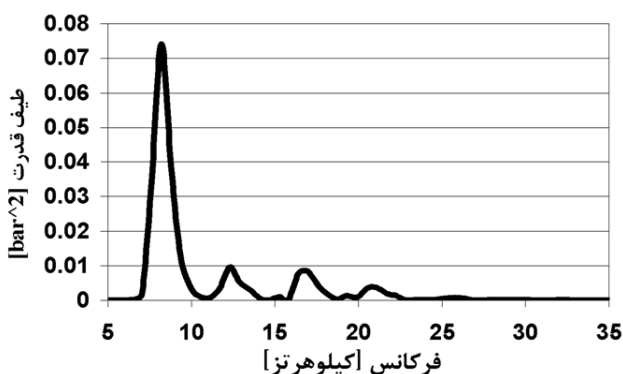
تعداد سیکل‌های انتخاب شده برای تحلیل

شکل ۷ اثر تعداد چرخه‌ها در بیشینه و کمینه شدت کوبش محاسبه شده در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه و بازده تنفسی ۱۰۰ درصد

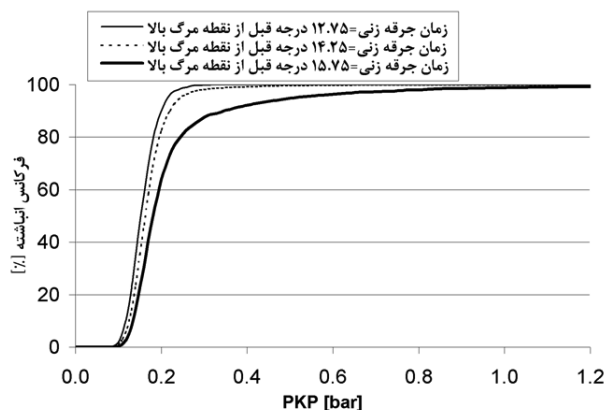
نتایج این شکل‌ها نگران کننده است و نشان می‌دهد که باید کمینه تعداد ۱۰۰۰ چرخه برای محاسبه شدت کوبش در نظر گرفته شود و در این حالت میزان عدم اطمینان حدود ۳۰ درصد است. البته توجه شود که این مقدار حد نهایی برای ۵۰۰ نمونه را نشان می‌دهد و شدت کوبش تعداد زیادی از چرخه‌ها به مقدار ۴۰۰۰ چرخه نزدیکترند. بنابراین اگر امکان تحلیل تعداد کمی چرخه وجود دارد (به عنوان مثال به دلیل ظرفیت اطلاعات یا زمان اندازه‌گیری محدود) می‌توان اندازه‌گیری را چندین بار انجام داد و از حدهای نهایی شدت کوبش چشم پوشی کرد و یا از آنها میانگین‌گیری نمود.

۷-۲- اثر بسامد نمونه‌برداری بر شدت کوبش

برای بررسی اثر بسامد نمونه‌برداری، ابتدا با بسامدی بزرگ، داده‌برداری می‌شود (۰٫۱ درجه در سرعت دورانی ۵۰۰۰ دوربردقیقه یعنی معادل ۳۰۰ کیلوهرتز)، سپس با استفاده از رسم منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه (شکل ۸)، بیشترین بسامد مفید برای تحلیل کوبش به دست می‌آید.



شکل ۸ منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه در شرایط: سرعت دورانی ۵۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۹۰ درصد، زمان چرخه‌زنی ۲۱ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۰٫۸۷ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد



شکل ۶ نمودار بسامد انباشته برای فشار بیشینه کوبش در سه زمان چرخه زنی متفاوت، سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه و بازده تنفسی ۱۰۰ درصد

این شکل‌ها تغییرات زیاد چرخه به چرخه شدت کوبش را نشان می‌دهند، بنابراین بررسی اثر تعداد چرخه‌ها برای تشخیص صحیح کوبش ضروری به نظر می‌رسد. قابل یادآوری است که در سایر شرایط کاری موتور نیز تغییرات زیاد چرخه به چرخه شدت کوبش به‌وضوح دیده می‌شود.

اثر تعداد چرخه‌ها در تعیین شدت کوبش، به وسیله نمونه‌برداری تا ۴۰۰۰ چرخه متوالی از اطلاعات فشار استوانه و سپس محاسبه شدت کوبش برای نمونه‌های مختلف کوچک‌تر از این اطلاعات (۵۰ تا ۳۰۰۰ چرخه) تخمین زده شده است. برای هر مورد انتخابی ۵۰۰ نمونه مختلف با فاصله یکسان انتخاب می‌شود. به عنوان مثال برای بررسی اثر ۱۰۰۰ چرخه داریم:

$$Offset = \frac{4000 - 1000}{500} = 6$$

$$First : 1 - 1000$$

$$Second : 7 - 1006$$

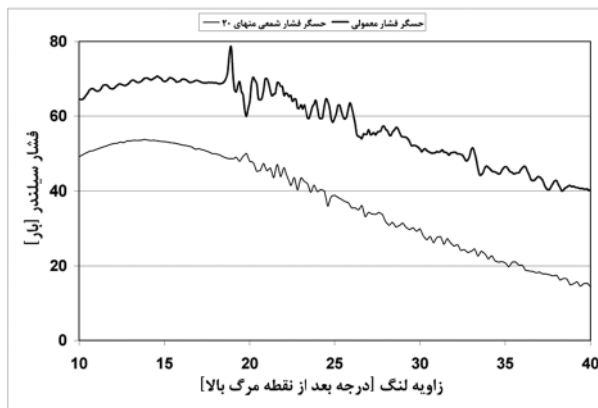
$$Third : 13 - 1012$$

.

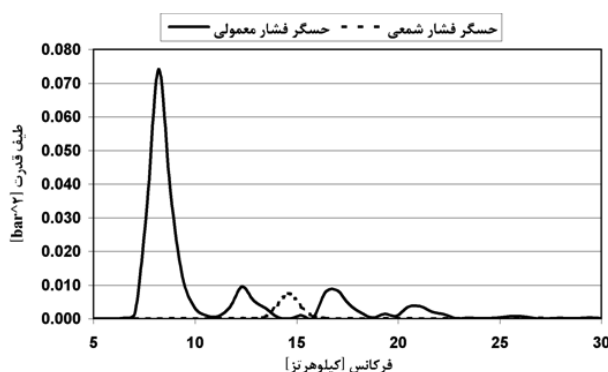
.

$$500th : 2995 - 3994$$

نتایج در شکل (۷) نشان داده شده است:



شکل ۹ مقایسه منحنی فشار استوانه در دو نوع حسگر



شکل ۱۰ مقایسه منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه در دو نوع حسگر

نتیجه به دست آمده از این دو نمودار و به ویژه نمودار دوم این است که نوسانات منحنی فشار استوانه در حسگر فشار شمعی دارای دامنه کمتر و بسامد بیشتر می‌باشد. حسگر فشار شمعی انرژی چندانی در بسامد حالت ارتعاشاتی محیطی اول، نشان نمی‌دهد اما دارای قله‌ای کوچک در حدود ۱۵ کیلوهرتز است که مطابق با بسامد اولین حالت ارتعاشاتی شعاعی می‌باشد. به علت قرارگیری این حسگر در مرکز محفظه احتراق، روی یک گره منطبق می‌شود و حساس به حالات ارتعاشاتی محیطی (نوسانات اصلی ایجاد شده به وسیله کوبش) نیست و فقط می‌تواند به حالات ارتعاشاتی ضعیف‌تر شعاعی پاسخ دهد. بنابراین مقادیر کمی از شدت کوبش با این حسگر به دست می‌آیند، هر چند میزان دقت تشخیص کوبش با این حسگر در محدوده قابل قبولی می‌باشد.

همان‌گونه که در بخش ۶ اشاره شد، با به دست آوردن نمودار طیف قدرت از منحنی فشار استوانه در تمامی شرایط کاری موتور در هنگام وقوع کوبش، مشاهده می‌شود که همواره دامنه‌های بیشتر در بسامدهای خاص رخ می‌دهند. بنابراین نمودار طیف قدرت در سایر شرایط کاری موتور نیز شبیه نمودارهای ارائه شده در این مقاله است و نتیجه ارائه شده

با توجه به نمودار شکل (۸) می‌توان گفت که بیشترین بسامد مفید برای تحلیل نوسانات ایجاد شده به وسیله کوبش برابر ۲۵ کیلوهرتز می‌باشد و با توجه به ضابطه نایکویست یعنی بیشترین بسامدی که می‌تواند تحلیل شود، نصف بسامد نمونه‌برداری است، کمینه بسامد نمونه‌برداری برابر ۵۰ کیلوهرتز پیشنهاد می‌شود. قابل یادآوری است که با رسم منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه، در سایر شرایط کاری موتور نیز مشاهده می‌شود که بیشترین بسامد مفید برای تحلیل نوسانات ایجاد شده به وسیله کوبش برابر ۲۵ کیلوهرتز می‌باشد.

در شرایطی که اندازه‌گیری با دقت زاویه‌ای ثابت انجام می‌شود، دقت زاویه مورد نیاز در کمترین سرعت اندازه‌گیری به دست می‌آید. به عنوان مثال در سرعت دورانی ۱۰۰۰ دوربر دقیقه، بسامد نمونه‌برداری برابر ۲۵ کیلوهرتز، دقت زاویه‌ای برابر ۰٫۱۲ درجه را القاء می‌کند:

$$1000 \text{ rpm} = 1000 \cdot \frac{360}{60} = 6000 \text{ deg/s} \Rightarrow \text{Resolution} = \frac{6000 \text{ deg/s}}{50000 \text{ 1/s}} = 0.12$$

مشخص است که در سرعت‌های بیشتر می‌توان از وضوح زاویه کمتری استفاده نمود.

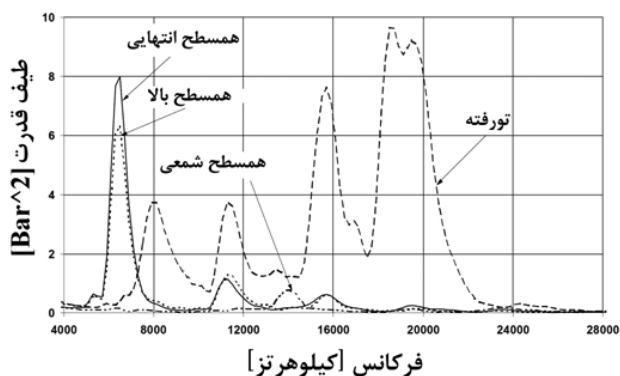
علت مناسب نبودن بسامد نمونه‌برداری بزرگ، این است که داده‌برداری قوی‌تری مورد نیاز است و حجم بیشتری از اطلاعات برای ذخیره‌سازی و پردازش به دست می‌آید.

۳-۷- اثر محل نصب حسگر و طریقه نصب آن در شدت کوبش

برای بررسی این اثر باید تعدادی حسگر در مکان‌های مختلف استوانه نصب گردند و نمودارهای فشار با یکدیگر مقایسه شوند.

همان‌گونه که در بخش خصوصیات موتور اشاره شد، در این مقاله داده‌های دو نوع حسگر فشار شمعی و معمولی تحلیل شده‌اند که حسگر اول در مرکز محفظه احتراق و حسگر دوم نزدیک به دیواره استوانه نصب شده است. توجه شود که داده‌برداری با این حسگرها، در شرایط یکسان از عملکرد موتور ولی در زمانهای متفاوت انجام شده است.

با رسم نمودار فشار استوانه و منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه برای این دو نوع حسگر می‌توان آنها را با یکدیگر مقایسه نمود. این نمودارها در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده‌اند. قابل ذکر است که این نمودارها در شرایط سرعت دورانی ۵۰۰۰ دوربر دقیقه، بازده تنفسی ۹۰ درصد، زمان جرقه‌زنی ۲۱ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۰٫۸۷ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد ترسیم شده‌اند.



شکل ۱۳ مقایسه منحنی‌های طیف قدرت برای چهار حسگر به طور همزمان [۷]

در این دو نمودار نیز نتایج قبلی به‌وضوح دیده می‌شوند. همچنین مشاهده می‌شود که دو حسگر همسطح بالا^۲ و همسطح انتهایی^۳ سازگاری خوبی با یکدیگر دارند و چون نزدیک به دیواره استوانه می‌باشند، نسبت به حالات ارتعاشاتی محیطی حساس هستند و قله‌هایی در سه حالت اول محیطی نشان می‌دهند [۷].

حسگر تورفته^۴ حتی در حالت عدم وقوع کوبش مقادیر شدت کوبش زیادی دارد و این پدیده به دلیل وقوع تشدید در حسگر می‌باشد. بنابراین در مورد طریقه نصب حسگر می‌توان گفت که راهگاه‌های اتصال طولانی نباید استفاده شود زیرا باعث وقوع پدیده تشدید در حسگر می‌شود و تشخیص کوبش را مشکل می‌کند [۷].

۸- اثر متغیرهای تحلیل فشار درون استوانه

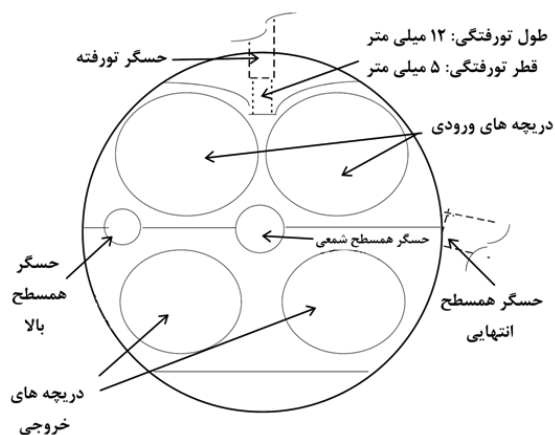
از میان متغیرهای تحلیل داده‌ها، نحوه تعریف شدت کوبش و روش استفاده از آن برای تشخیص کوبش (نحوه تعریف حد مجاز شدت کوبش) در مرجع [۶] بررسی شده است. در این بخش تنها به بررسی روش انتخاب بسامد تصفیه و پنجره محاسباتی از چرخه موتور پرداخته می‌شود.

۸-۱- بسامد تصفیه

برای انتخاب بسامد تصفیه در شرایط کاری خاص، منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه را رسم و بسامدهایی که دامنه نمودار در آنها قابل توجه نیست را حذف می‌نماییم [۱۳].

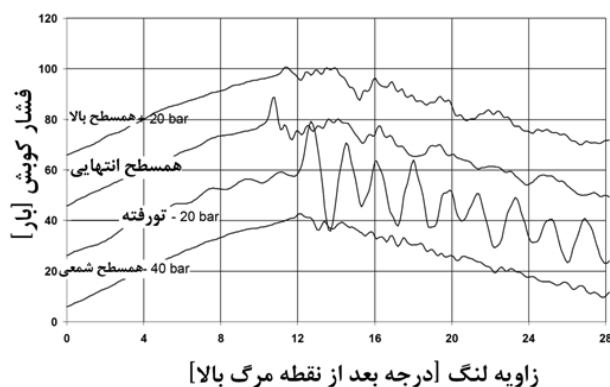
با توجه به بسامد حالات اصلی ارتعاشاتی محیطی و شعاعی که در ابتدای مقاله توضیح داده شد و با توجه به تغییرات اندک آنها در شرایط کاری مختلف، می‌توان در تمامی شرایط کاری موتور از یک صافی میان گذر با بسامد ۲۵-۴ کیلوهرتز استفاده نمود.

در این بخش را تأیید می‌کند. برای تعمیم و به‌نوعی تصدیق^۱ نتایج به دست آمده از این بخش، نتایج آزمایش‌های ارائه شده در مرجع [۷] نیز بررسی می‌شوند. در استوانه چهارم موتور ارزیابی شده در این مرجع، تعداد چهار عدد حسگر وجود دارد. مکان قرارگیری این حسگرها در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ مکان قرارگیری حسگرها در استوانه چهارم [۷]

با رسم نمودار فشار استوانه و منحنی طیف قدرت از نمودار فشار استوانه در چرخه همراه با کوبش برای هر چهار حسگر می‌توان به‌خوبی آنها را با یکدیگر مقایسه نمود. این منحنی‌ها در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۲ مقایسه منحنی‌های فشار استوانه برای چهار حسگر به طور همزمان [۷]

۸-۲- پنجره محاسباتی از چرخه موتور

در الگوهای ارائه شده در این مقاله برای تعیین شدت کوبش، این پنجره برای محدوده جستجوی فشار بیشینه کوبش و وضوح زاویه بزرگ مورد نیاز آن باید شناخته شود. وضوح زاویه کمتر می‌تواند در خارج از پنجره برای محاسبه فشار مؤثر متوسط و تحلیل سرعت احتراق، به کار رود. همچنین در بخشهایی از چرخه موتور نوساناتی در نمودار فشار استوانه دیده می‌شود که به علت وقوع کوبش نیست و با انتخاب بهینه پنجره محاسباتی می‌توان آنها را حذف نمود.

برای تعیین دقیق محدوده پنجره مورد نیاز در نقطه کاری مورد نظر (دور و بازده تنفسی مشخص) به این شکل عمل می‌شود:

علائم فشار استوانه از یک صافی بالاگذر با بسامد ۲ کیلوهرتز عبور داده می‌شود. زاویه شروع پنجره محاسباتی، حدود زاویه فشار بیشینه تصفیه شده می‌باشد و پایان آن جایی است که دامنه نوسانات فشار تصفیه شده کمتر از ۳۰ کیلوپاسکال شود. توجه شود که محدوده پنجره محاسباتی با در نظر گرفتن تمامی شرایط کاری ممکن برای دور موتور و بازده تنفسی مورد نظر، از جمله رقت، زمان جرقه زنی، دمای هوای ورودی و نوع سوخت متفاوت به دست می‌آید. این روش در شرایط سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه و بازده تنفسی ۱۰۰ درصد در شکل (۱۴) نشان داده شده است. توجه شود که نمودار تصفیه شده فشار استوانه در چهار مقدار لامبدا، زمان جرقه زنی و دمای هوای ورودی متفاوت (با شرایط کوبش متفاوت) بررسی شده است.

شرایط عملکرد موتور در بخشهای مختلف این نمودار به این شرح می‌باشد:

الف: سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۱۰۰ درصد، زمان جرقه زنی ۱۶٫۵ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۰٫۹ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد

ب: سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۱۰۰ درصد، زمان جرقه زنی ۱۷٫۲۵ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۱ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد

ج: سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۱۰۰ درصد، زمان جرقه زنی ۱۸ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۱٫۱ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد

د: سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربردقیقه، بازده تنفسی ۱۰۰ درصد، زمان جرقه زنی ۱۲ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۱ و دمای هوای ورودی ۳۰ درجه سانتیگراد

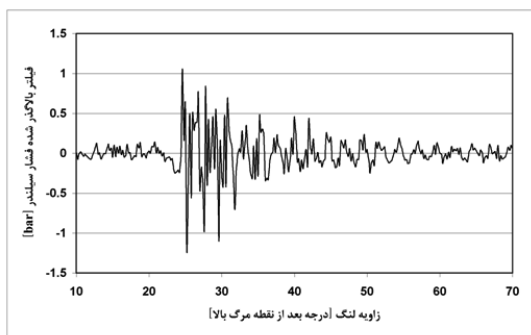
با توجه به تعریف ارائه شده برای زاویه شروع و پایان پنجره محاسباتی، محدوده پنجره محاسباتی در هر بخش از نمودار به این شرح است:

الف: ۶۲-۲۱ درجه بعد از نقطه مکث بالا

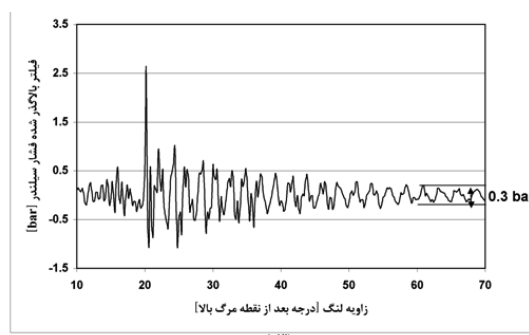
ب: ۵۸-۲۲ درجه بعد از نقطه مکث بالا

ج: ۶۰-۲۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا

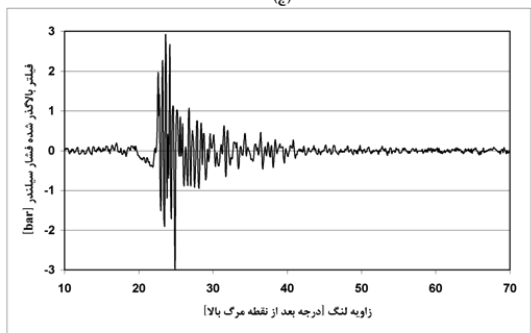
د: ۵۴-۲۳ درجه بعد از نقطه مکث بالا



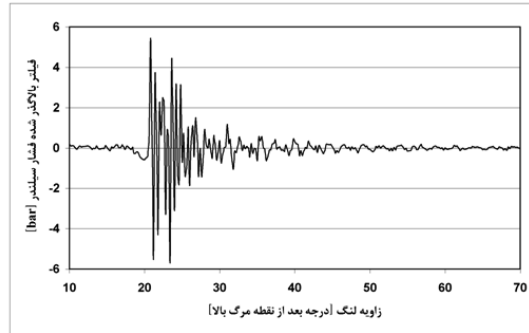
(ج)



(ف)



(د)



(ب)

شکل ۱۴ نمودارهای تصفیه شده فشار استوانه برای تعیین محدوده پنجره محاسباتی از چرخ موتور

برای محاسبه خودکار پنجره محاسباتی، می‌توان با تقریبی مناسب از این روش استفاده نمود: [۱۳]

پنجره محاسباتی به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که ۲۰ داده قبل از زاویه فشار بیشینه استوانه و ۱۰۷ داده بعد از آن وجود داشته باشد. توجه شود که در این روش بسامد نمونه‌برداری ۵۰ کیلوهرتز می‌باشد، به عبارت دیگر می‌توان گفت که زمان داده‌برداری برابر ۲۰ میکروثانیه می‌باشد. بنابراین در سرعت‌های مختلف، دقت زاویه داده‌برداری متفاوت است و از معادله (۴) به دست می‌آید:

$$Resolution (CA) = \frac{rpm * 6}{50000} \quad (4)$$

به عنوان مثال در سرعت دورانی ۵۰۰۰ دوربر دقیقه دقت زاویه‌ای برابر ۰٫۶ به دست می‌آید. فشار بیشینه استوانه برای این موتور و در این سرعت دورانی، حدود ۱۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا قرار دارد و چون در محاسبات ۱۰۷ داده بعد از فشار بیشینه وجود دارند، زاویه مناسب برای خاتمه پنجره محاسباتی برابر ۸۰ درجه بعد از نقطه مکث بالا به دست می‌آید، بنابراین نوفه‌ی ناشی از باز شدن دریچه خروجی در این پنجره وجود ندارد. (باز شدن دریچه خروجی در این موتور ۱۷ درجه قبل از نقطه مکث پایین می‌باشد).

۹- نتیجه گیری

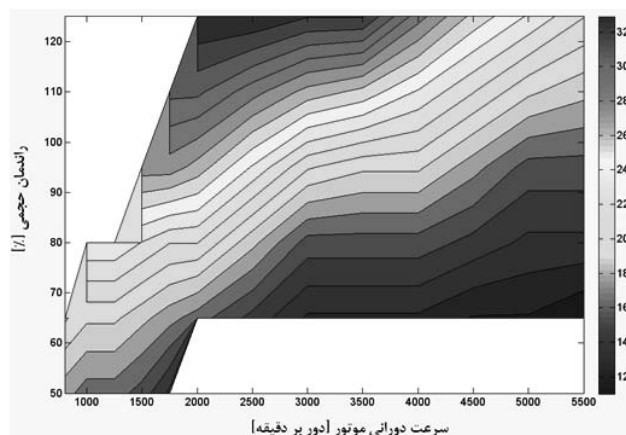
این مقاله نشان داد که شدت کوبش به دست آمده بر اساس تحلیل اطلاعات فشار درون استوانه به طور چشمگیری به متغیرهای اندازه‌گیری و تحلیل وابسته است که باید بهینه آنها انتخاب شود. متغیرهای اندازه‌گیری شامل بسامد نمونه‌برداری، تعداد چرخه‌های مورد نیاز برای تشخیص صحیح کوبش، محل نصب حسگر و طریقه نصب آن می‌باشد. متغیرهای تحلیل داده‌ها شامل خصوصیات تصفیه، انتخاب پنجره محاسباتی از چرخه موتور، نحوه تعریف شدت کوبش و روش استفاده از آن برای تشخیص کوبش می‌باشد.

روش‌های متعددی برای تعیین شدت کوبش با استفاده از علائم فشار درون استوانه وجود دارند. با توجه به نتایج ارائه شده در مرجع [۶] برای ارزیابی روش‌های تعیین شدت کوبش با استفاده از مقایسه نتایج آزمون در شرایط ثابت، روش‌های حذف میانگین منحنی فشار و مشتق سوم منحنی فشار به عنوان روش‌های بهینه انتخاب شده‌اند. در شرایطی که نوفه‌های پس زمینه بسیاری وجود دارد مانند سرعت‌های دورانی بزرگ موتور، روش دوم مناسب‌تر است.

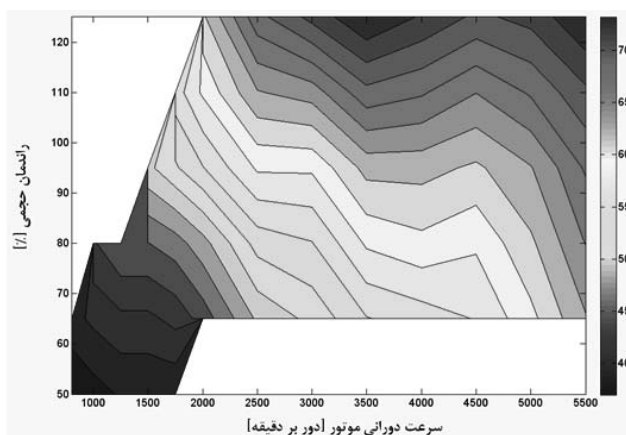
تعاملی بین تعداد چرخه‌ها، بسامد نمونه‌برداری و محدوده پنجره

بنابراین محدوده پنجره محاسباتی در سرعت دورانی ۳۰۰۰ دوربر دقیقه و بازده تنفسی ۱۰۰ درصد برابر ۶۲-۲۱ درجه بعد از نقطه مکث بالا می‌باشد. توجه شود که نتیجه به دست آمده برای سوخت با عدد اکتان ۸۷ نیز در همین محدوده می‌باشد.

برای به دست آوردن پنجره محاسباتی از چرخه موتور در سایر دوره‌ها و بازده‌های تنفسی، روش قبلی تکرار می‌شود. در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) منحنی‌هایی برای زوایای شروع و خاتمه پنجره محاسباتی موتور بر حسب دور و بازده تنفسی نشان داده شده است. توجه شود که فقط مناطقی نشان داده شده‌اند که از جمله نقاط کاری موتور است و احتمال وقوع کوبش در آنها وجود دارد. به عبارت دیگر بخش سفید در قسمت بالای نمودار از جمله نقاط کاری موتور نیست و در بخش سفید از قسمت پایین نمودار احتمال وقوع کوبش وجود ندارد.



شکل ۱۵: زوایای مناسب (بعد از نقطه مکث بالا) برای شروع پنجره محاسباتی بر حسب دور و بازده تنفسی



شکل ۱۶: زوایای مناسب (بعد از نقطه مکث بالا) برای خاتمه پنجره محاسباتی بر حسب دور و بازده تنفسی

Reference:

- [1] M. Castagné, J. P. Dumas, S. Henriot and F. A. Lafossas, "New Knock Localization Methodology for SI Engines", SAE Paper 2003-01-1118, 2003.
- [2] A.H. Kakaee, M. Momeni, "Optimum Empirical Method for Knock Detection in a Spark Ignition Engine for Engine Mapping & Calibration", Thesis for the Degree of Master of Science, Iran university of science and technology, 1388
- [3] Alex Gil Sanches, Felipe Soto Pau, "Identification and Quantification of Knock in Internal Combustion Engines using Spectral Analysis", SAE Paper 2001-01-3923, 2001
- [4] Cooley, James W., and John W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," Math. Comput. 19: 297-301, 1965
- [5] Gao Xiaofeng, Richard Stone, and Chris Hudson, "The Detection and Quantification of Knock in Spark Ignition Engines", SAE Paper 932759, 1993
- [6] A.H. Kakaee, M. Momeni, " Evaluation and Development of Methods for Knock Detection using Cylinder Pressure Data", ICICE-6-1197, Tehran, Olympic hotel, 1388
- [7] Michael F.J. Brunt, Christopher R. Pond, John Biundo, "Gasoline Engine Knock Analysis using Cylinder Pressure Data", SAE Paper 980896, 1998
- [8] Checkel, M.D. and Dale, J.D., 'Testing a Third Derivative Knock Indicator on a Production Engine', SAE Paper 861216, 1986.
- [9] Draper, C.S., "Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine", J. Aeronautical Sciences, Vol. 5, No 6, 1938.
- [10] J. M. Towers, R. L. Hoekstra, "Engine Knock, A Renewed Concern in Motorsports -A Literature Review", SAE Paper 983026, 1998.
- [11] Pan, J. and Sheppard, C.G.W., "A theoretical and Experimental Study of the Modes of End Gas Autoignition Leading to Knock in S.I. Engines", SAE 942060, 1994.
- [12] R. Worret, S. Bernhardt, F. Schwarz and U. Spicher, "Application of Different Cylinder Pressure Based Knock Detection Methods in Spark Ignition Engines", SAE Paper 2002-01-1668, 2002.
- [13] C. Hudson, X. Gao, R. Stone, "Knock measurement for fuel evaluation in spark ignition engines", Fuel 80 (2001) 395-407.

محاسباتی، برای به دست آوردن بهترین تکرارپذیری و دقت و همچنین کمترین تحلیل مورد نیاز، می‌تواند انجام شود. این تعامل به نوع کاربرد و امکانات موجود بستگی دارد اما برای تنظیم موتور، تعداد ۱۰۰۰ چرخه کاری و بسامد نمونه‌برداری برابر ۵۰ کیلوهرتز پیشنهاد می‌شود یعنی در سرعت‌های تند، می‌توان از دقت زاویه کمتری استفاده نمود. محدوده پنجره محاسباتی وابسته به شرایط کاری موتور است و زاویه مناسب برای شروع و پایان این پنجره بر حسب دور و بازده تنفسی به دست می‌آید، اما به طور تقریبی می‌توان از ۵ تا ۷۵ درجه بعد از نقطه مکث بالا را به عنوان محدوده پنجره محاسباتی برای این موتور انتخاب نمود.

بسامدهای ارتعاشاتی محفظه احتراق را می‌توان با تقریب خوبی به طور تحلیلی پیش بینی نمود. همچنین با استفاده از نمودار طیف قدرت از منحنی فشار استوانه در شرایط وقوع کوبش، می‌توان آنها را مشاهده نمود. توجه شود که بسامد اصلی نوسانات ایجاد شده در اثر کوبش برای این موتور حدود ۸ کیلوهرتز می‌باشد. تعیین دقیق این بسامدها برای بررسی اثر تصفیه و مکان بهینه قرارگیری حسگر فشار استوانه کاربرد زیادی دارند.

محل نصب حسگر اثر مهمی روی دامنه و بسامد علائم به دست آمده و بنابراین شدت کوبش محاسبه شده دارد. حسگر قرار گرفته در مرکز محفظه احتراق، حساسیت کمی به حالات ارتعاشاتی اصلی (محیطی) دارد و فقط به حالات ارتعاشاتی ضعیفتر شعاعی پاسخ می‌دهد.

۱۰- سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری شرکت ایپکو در اجرای آزمایش‌ها و به ویژه آقایان مهندس رستمی، حاج باقری و مرادی که اطلاعات ارزشمندی در اختیارم قرار دادند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۱۱- فهرست علائم

CA	Crank Angle	زاویه لنگ
KI	Knock Intensity	شدت کوبش
PKP	Peak Knock Pressure	فشار بیشینه کوبش
PS	Power Spectrum	طیف قدرت