



فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineerresearch.ir



ارائه راهبرد تعیین زمان جرقه مرز کوبش در موتورهای پرخوران اشتعال جرقه‌ای

محمد مومنی موحد^۱، حسن بصیرت تبریزی^{۲*}، سید مصطفی میرسلیم^۳، محمود جمالی^۴

^۱دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، m.momeni@aut.ac.ir

^۲دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، hbasirat@aut.ac.ir

^۳دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، mirsalim@csr.ir

^۴شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (اییکو)، تهران، ایران، m.jamali@ip-co.com

*نویسنده مسئول، شماره تماس: ۰۲۱-۶۴۵۳۳۴۵۵

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۰۹ مرداد ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۰ شهریور ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی

کوبش

زمان جرقه

موتور پرخوران اشتعال جرقه‌ای

تنظیم زمان جرقه در شرایط مرزی وقوع کوبش، برای دستیابی به بیشینه بازده حرارتی و همچنین محافظت از قطعات، هدف اصلی این مقاله می‌باشد. در رایانه موتورهای امروزی، امکان مهار وقوع کوبش با استفاده از اطلاعات حسگر کوبش وجود دارد. مهمترین مشکل استفاده از حسگر کوبش این است که در این روش امکان پیش‌بینی وقوع کوبش و شدت آن توسط رایانه موتور تا قبل از وقوع کوبش وجود ندارد. در این مقاله، الگویی برای پیش‌بینی کوبش و تعیین زمان جرقه مرزی آن در شرایط کاری گوناگون موتور ارائه شده است. این شرایط کاری به عنوان ورودی‌های الگو، توسط حسگرهای موتور و یا با شبیه‌سازی در رایانه موتور تشخیص داده می‌شوند. در الگوی ارائه شده، اثر متغیرهای دور و بار نسبی موتور، دمای چند راهه هوا و دمای آب خنک کاری در وقوع کوبش در نظر گرفته شده است. زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش در ترکیب‌های مختلف این عوامل، خروجی اصلی الگوی نهایی است. مقایسه زمان جرقه خروجی الگوی ارائه شده با نتایج آزمون در یک موتور پرخوران بنزینی، دقت خوب الگوی ارائه شده را نشان می‌دهد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

(۱) مقدمه

می‌شوند [۹]. با توجه به اینکه مقادیر لحظه‌ای عوامل ذکر شده در خودروها و در شرایط مختلف مشخص است، امکان محاسبه زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش، در ترکیب‌های مختلف این عوامل وجود دارد.

سایر عوامل متغیر و مؤثر در وقوع کوبش، شامل رطوبت هوای ورودی، نوع سوخت، لقی قطعات مختلف و وقوع یک خرابی، حسگری ندارند و بسادگی قابل شبیه‌سازی نیستند. در این شرایط از تنظیم حلقه بسته زمان جرقه استفاده می‌شود. برای این منظور با استفاده از تحلیل داده‌های حسگر کوبش، وقوع کوبش و شدت آن در یک استوانه تشخیص داده می‌شود و با توجه به شدت کوبش تعیین شده، زمان جرقه آن استوانه با تأخیر لازم همراه می‌شود.

مهمترین مشکل این روش نیاز به تکرار پشت سر هم این مراحل می‌باشد؛ وقوع کوبش با شدت‌های مختلف، تشخیص کوبش و شدت آن، ایجاد تأخیر لازم در زمان جرقه زنی، حذف مجدد تأخیر ایجاد شده در زمان جرقه زنی، وقوع کوبش مجدد و تکرار این فرایند. به عبارت دیگر کوبش‌های بسیاری با شدت‌های مختلف در هنگام تنظیم حلقه بسته زمان جرقه رخ خواهند داد و لازم است که تا حد امکان، اثر متغیرهای تأثیرگذار در وقوع کوبش را پیش‌بینی نمود [۱۰]. تعیین زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش با استفاده از آزمون در تمامی ترکیب‌های مختلف متغیرهای اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده شامل دور موتور، بار نسبی، دما و فشار هوای ورودی، دمای آب خنک کاری، نسبت هوا به سوخت و فشار دود در پایین دست دریچه‌ها امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین ارائه الگویی^۶ برای محاسبه زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش با در نظر گرفتن اثر این متغیرها ضروری به نظر می‌رسد.

در اکثر مطالعات قبلی، تنها اثر برخی از شرایط کاری تأثیرگذار در وقوع کوبش و در شرایط کاری خاصی بررسی شده است. به عنوان مثال، استفان^۷ اثر هر یک از عوامل مهم در وقوع کوبش را در یک نقطه کاری ثابت بررسی کرده است [۱۱]. جنیفر^۸ و همکاران اثر تغییر نسبت هوا به سوخت و فشار چندراهه هوا بر عدد اکتان مورد نیاز برای دستیابی به زمان جرقه بهینه را در دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه (د.د.د.)، دمای آب ۹۰ درجه و دمای هوای ۲۰ درجه سانتیگراد بررسی کرده‌اند [۱۲]. سایکالی^۹ و همکاران، عدد متان مورد نیاز برای رسیدن به شرایط مرزی کوبش در اثر تغییر بار نسبی موتور، نسبت هوا به سوخت و زمان جرقه را محاسبه کرده‌اند و اثر عوامل دور موتور، دمای محیط و دمای آب خنک کاری را در نظر نگرفته‌اند [۱۳].

در این مقاله اثر تمامی متغیرهای مهم و تأثیرگذار در وقوع کوبش و در اغلب شرایط کاری موتور بررسی شده است. همچنین در این مقاله

احتراق خود به خودی^۱ بخشی از گازهای نسوخته قبل از رسیدن شعله به علت افزایش دما و فشار، کوبش^۲ نامیده می‌شود. هنگامی که مقدار زیادی از انرژی سوخت به طور خود به خود آزاد شود، فشار و دما به طور محلی افزایش می‌یابد و باعث ایجاد موج فشاری شدید می‌شود. بنابراین وقوع کوبش باعث توزیع فشار غیر یکنواخت در محفظه احتراق می‌شود و حسگرهایی که در مکان‌های مختلف نصب شده‌اند، در یک لحظه فشارهای متفاوتی را نشان می‌دهند تا زمانی که موج فشاری تولید شده از بین برود [۱-۳].

کوبش یکی از عوامل اصلی است که بر روی توان خروجی، بازده حرارتی و عمر موتور بنزینی تأثیرگذار است؛ زیرا کوبش عاملی اساسی است که نسبت تراکم و بازده تنفسی را محدود می‌کند و با ایجاد موج‌های فشاری شدید، باعث تخریب موتور می‌گردد [۴-۵]. در نقاطی از نواحی کاری موتور که احتمال وقوع کوبش وجود دارد، هدف اصلی از تنظیم زمان جرقه این است که موتور در شرایط نزدیک به وقوع کوبش کار کند و در عین حال وارد محدوده آن نشود. در این شرایط است که بیشترین بازده از موتور انتظار می‌رود و آسیبی به آن نمی‌رسد [۶-۸].

عوامل بسیاری بر وقوع کوبش و شدت آن تأثیرگذارند. برخی از این عوامل تأثیرگذار ثابت‌اند و مقادیر بهینه آنها در مرحله طراحی موتور تعیین می‌شود که از جمله آنها می‌توان نسبت تراکم، محل قرارگیری شمع و هندسه محفظه احتراق را نام برد. اثر این عوامل در وقوع کوبش و زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش، در خودروها و شرایط کاری مختلف ثابت است و بنابراین نیازی به بررسی اثر این عوامل برای تنظیم زمان جرقه نمی‌باشد. از سوی دیگر برخی از عوامل تأثیرگذار در وقوع کوبش، در خودروها و شرایط کاری مختلف ثابت نیستند و تغییرات چشمگیری دارند که مهمترین آنها شامل دور موتور، بار نسبی موتور^۳ (جرم لحظه‌ای هوای وارد شده به هر استوانه^۴ تقسیم بر بیشینه جرم امکان‌پذیر ورودی به هر استوانه در شرایط استاندارد)، دما، فشار و رطوبت هوای ورودی، دمای آب خنک کاری، نسبت هوا به سوخت (رقت)، فشار دود در پایین دست دریچه‌ها، نوع سوخت، لقی^۵ قطعات مختلف و وقوع یک خرابی مانند گرفتگی مسیر دود می‌باشد.

در رایانه موتورهای امروزی، برای برخی از شرایط کاری اشاره شده شامل دور موتور، دما و فشار هوای ورودی، نسبت هوا به سوخت و دمای آب خنک کاری حسگر مستقیم وجود دارد و برخی دیگر از آنها شامل بار نسبی و فشار دود در پایین دست دریچه‌ها شبیه‌سازی

1 Auto Ignition

2 Knock

3 Engine Load

4 Cylinder

5 Tolerance

6 Model

7 Stephen

8 Jennifer

9 Saikaly

جدول ۱: خصوصیات موتور

واحد	مقدار مشخصه	نام مشخصه
-	پرخوران بنزینی	نوع موتور
Lit	۱,۷	حجم
-	۹,۵	نسبت تراکم
-	۴	تعداد استوانه
mm	۷۸,۶	قطر استوانه
mm	۸۵	طول مسیر سمبه
mm	۱۳۴,۵	طول دسته سمبه
bar	۳,۵	فشار پاشش سوخت
N.m	۲۱۵	بیشینه گشتاور (از دور ۲۲۰۰ تا ۴۸۰۰ د.د.د.)
kW	۱۱۰	بیشینه توان (۵۵۰۰ د.د.د.)

جدول ۲: شرایط آزمون‌ها

واحد	بازه آزمون‌های انجام شده	نام شرط کاری
rpm	۸۵۰ - ۵۸۰۰	دور موتور
%	۴۰ - ۱۴۰	بار نسبی
-	۰,۷۵ - ۱	لامبدا
°C	۳۰ - ۹۰	دمای چندراهه هوا
°C	۷۰ - ۱۲۰	دمای آب خنک‌کاری
-	۹۵	عدد اکتان بنزین

منظور از دمای چندراهه هوا در تمامی آزمون‌ها، "دمای هوای ورودی در چندراهه هوا" می‌باشد که در ادامه این مقاله، به اختصار با "دمای چندراهه هوا" ذکر شده است.

منظور از بار نسبی در جدول ۲، جرم لحظه‌ای هوای وارد شده به هر استوانه، تقسیم بر بیشینه جرم امکان‌پذیر ورودی به هر استوانه در شرایط استاندارد می‌باشد. مقدار دقیق بار نسبی در شرایط کاری مختلف با استفاده از اطلاعات حسگر دما و فشار چند راهه هوا، شبیه‌سازی می‌شود. معادله (۱)، روش محاسبه بار نسبی در هر لحظه را نشان می‌دهد:

$$engine\ load(\%) = \frac{M}{M_{ref}} = \frac{\frac{PV}{RT}}{\frac{P_{ref}V_{ref}}{RT_{ref}}} = \frac{P}{1013} \frac{V}{V_{ref}} \frac{273}{T} \quad (1)$$

V و V_{ref} در معادله (۱)، بترتیب برابر حجم استوانه در لحظه بسته شدن دریچه ورودی و کل حجم جابجایی استوانه می‌باشد. متغیر T در این رابطه، دمای هوای تازه‌ی داخل محفظه احتراق در لحظه بسته‌شدن دریچه ورودی بر حسب درجه کلون است که از روی دمای چندراهه هوا و سایر شرایط کاری موتور، شبیه‌سازی می‌شود. متغیر P فشار هوای تازه‌ی داخل محفظه احتراق در لحظه بسته شدن دریچه ورودی بر حسب میلی‌بار می‌باشد. این فشار از روی فشار چند

روشی جدید برای تشخیص وقوع کوبش و تعیین شرایط مرزی وقوع آن با استفاده از اندازه‌گیری صدای کوبش (محفظه احتراق) و تحلیل داده‌های فشار درون استوانه ارائه شده است. با استفاده از نتایج آزمون‌ها در شرایط کاری مختلف، در انتهای مقاله، الگویی برای تعیین زمان جرقه مرزی کوبش ارائه شده است. قابل ذکر است که الگوی ارائه شده به گونه‌ای توسعه یافته است که امکان زینبندی^۱ الگو در اتاق آزمون وجود داشته و در رایانه موتور به صورت بلادرنگ^۲ قابل اجرا باشد. پس از مقدمه، خصوصیات موتور و شرایط آزمون‌های انجام شده در بخش دوم توضیح داده شده است. روش تشخیص وقوع کوبش و تعیین شرایط مرزی وقوع آن با استفاده از اندازه‌گیری صدای کوبش (محفظه احتراق) به صورت برخط^۳ و تحلیل داده‌های فشار درون استوانه به صورت برون خط^۴ در بخش سوم توضیح داده شده است. اثر عواملی که حسگر مستقیم دارند و یا قابل شبیه‌سازی‌اند، در بخش چهارم بررسی شده است. با توجه به نتایج بخش چهارم، الگویی برای تنظیم زمان جرقه در مرز وقوع کوبش در بخش پنجم ارائه شده است. در انتهای مقاله، نتایج اصلی در بخش ششم جمع‌بندی شده‌اند.

۲) تجهیزات و شرایط آزمون

از یک موتور چهار استوانه بنزینی پرخوران با پاشش سوخت در چند راهه هوا^۵ برای شبیه‌سازی و ارزیابی الگوی ارائه شده استفاده شده است. حسگرهای دما و فشار در نقاط مختلف مسیرهای ورودی و خروجی نصب شده است. همچنین شار سوخت مصرفی با بیشینه خطای ۰,۱۲ درصد و بسامد ۲۰ کیلوهرتز اندازه‌گیری شده است. از شار سوخت مصرفی و نسبت هوا به سوخت اندازه‌گیری شده برای محاسبه شار هوای ورودی استفاده شده است. برخی از خصوصیات موتور مورد بحث در جدول ۱ ذکر گردیده است. یکی از مهمترین محدودیت‌های اعمال شده در تمامی آزمون‌ها، عدم افزایش دمای گازهای خروجی بالادست توربین از ۹۳۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. برای این منظور در دوره‌های تند و بار نسبی‌های زیاد موتور، مخلوط هوا و سوخت غنی شده است تا دمای گازهای خروجی در ۹۳۰ درجه سانتیگراد ثابت باقی بماند و در سایر شرایط کاری که دمای گازهای خروجی از حد مجاز خود فراتر نمی‌رود، مقدار لامبدا (اضافه هوا: نسبت هوا به سوخت واقعی تقسیم بر نسبت هوا به سوخت درست) برابر ۱ تنظیم گردید. به طور کلی، شرایط کاری مهم در آزمون‌های انجام شده در جدول ۲ ذکر شده است.

1 Calibration

2 Real Time

3 Online

4 Offline

5 Multi Point Port Fuel Injection

6 Stoichiometric

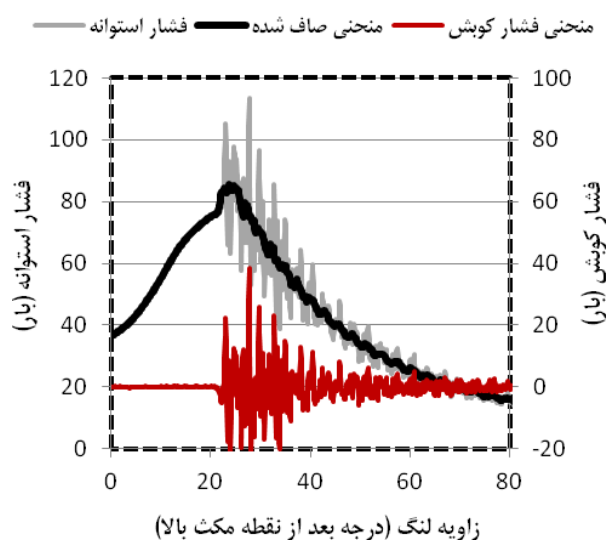
۳-۱) تعیین شدت کوبش با روش حذف میانگین منحنی فشار استوانه

در این روش، یک منحنی صاف شده^۱ بهینه برای فشار درون استوانه محاسبه شده و از منحنی اصلی فشار استوانه کم می‌شود. منحنی به دست آمده منحنی فشار کوبش^۲ نامیده می‌شود و بیشینه قدر مطلق این منحنی، به عنوان شدت کوبش در هر چرخه معرفی می‌شود [۱۴]. نحوه محاسبه منحنی صاف شده و منحنی فشار کوبش در شرایط سرعت دورانی ۳۵۰۰ دور در دقیقه، بار نسبی ۱۴۰ درصد، زمان چرخه ۶ درجه قبل از نقطه مکث بالا، لامبدا ۰.۸۳، دمای هوای چندراهه هوا ۴۳ درجه و دمای آب ۹۰ درجه سانتیگراد، در شکل ۱ نشان داده 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 میانگین‌گیری، منحنی صاف‌تر می‌شود. نوفه^۳های پس زمینه احتمالی موجود در منحنی فشار درون استوانه، تا حد زیادی با کاهش تعداد نقاط میانگین‌گیری حذف خواهند شد.

۳-۲) تشخیص وقوع کوبش و شرایط مرزی وقوع آن با تعریف حد مجاز شدت کوبش

روشی جالب برای تشخیص کوبش با توجه به شدت‌های کوبش تعیین شده در بخش قبل، تعریف دو حد مجاز برای چرخه‌های مجزا می‌باشد. گذر از حد مجاز اول نشان‌دهنده وقوع کوبش سبک^۴ و گذر از حد مجاز دوم نشان‌دهنده وقوع کوبش سنگین^۵ می‌باشد.



شکل ۱: محاسبه شدت کوبش با حذف میانگین فشار استوانه

راهه هوا و فشار جزئی گازهای پسماند محاسبه می‌شود. بخش اصلی گازهای پسماند با توجه به عدم همپوشانی در چرخه‌ها در موتور مورد آزمون، گازهای باقیمانده در استوانه پس از بسته شدن دریچه دود است و از روی فشار گازهای خروجی شبیه‌سازی می‌شود.

با توجه به اینکه موتور مورد بررسی یک موتور پرخوران است، امکان دستیابی به بار نسبی بیش از ۱۰۰ درصد نیز وجود دارد. یعنی با توجه به افزایش فشار هوای چند راهه هوا از فشار سطح دریا در برخی از آزمون‌ها، جرم هوای ورودی به موتور بیش از بیشینه جرم هوای ورودی ممکن در شرایط استاندارد بوده است. بنابراین بیشینه بار نسبی در آزمون‌های انجام شده، برابر ۱۴۰ درصد بوده است.

۳) تشخیص وقوع کوبش و تعیین شرایط مرزی وقوع آن

دقیق‌ترین حسگر برای تشخیص وقوع کوبش، حسگر فشار درون استوانه می‌باشد و سایر حسگرها مانند حسگر ارتعاشات بدنه موتور که در تولید انبوه خودرو استفاده می‌شود، حسگر صدا، حسگر اندازه‌گیری انتقال حرارت، حسگر دمای گازهای خروجی، حسگر جریان یونی با استفاده از آن تنظیم می‌شوند و علت عدم استفاده از حسگر فشار درون استوانه در خودرو، قیمت بالا و پیچیدگی نصب آن می‌باشد [۱۴].

همانگونه که در بخش مقدمه ذکر شد، از اندازه‌گیری صدای کوبش (محفظه احتراق) به صورت برخط برای تعیین شرایط مرزی کوبش استفاده شده است. موج فشاری به وجود آمده در اثر وقوع کوبش در محفظه احتراق، منجر به ایجاد صدای شدیدی می‌شود. این صدا به کمک لوله مسی متصل شده به بدنه موتور انتقال پیدا کرده و به آسانی با گوش انسان قابل شنیدن است. در شرایط مرزی وقوع کوبش در آزمون‌های مختلف، شدت این صدا و تعداد تکرارهای آن باید بسیار محدود باشد. واضح است که تعیین شرایط مرزی کوبش به کمک شنیدن صدای کوبش (محفظه احتراق)، روشی کیفی است و دقت لازم را ندارد. بنابراین در این مقاله، مقدار تقریبی زمان چرخه مرزی کوبش به کمک شنیدن صدای کوبش (محفظه احتراق)، به صورت برخط تعیین شده است و از تحلیل داده‌های فشار درون استوانه به صورت برون خط برای تعیین دقیق شرایط مرزی کوبش استفاده شده است.

روش‌های بسیار زیادی برای تعیین شدت کوبش با استفاده از حسگر فشار درون استوانه وجود دارد که با توجه به بررسی نتایج آزمون و مقایسه دقت روش‌های مختلف، در این مقاله از روش حذف میانگین منحنی فشار استوانه استفاده شده است. در ادامه این بخش، نحوه تعیین شدت کوبش و شرایط مرزی وقوع کوبش با استفاده از این روش به طور خلاصه بیان می‌شود.

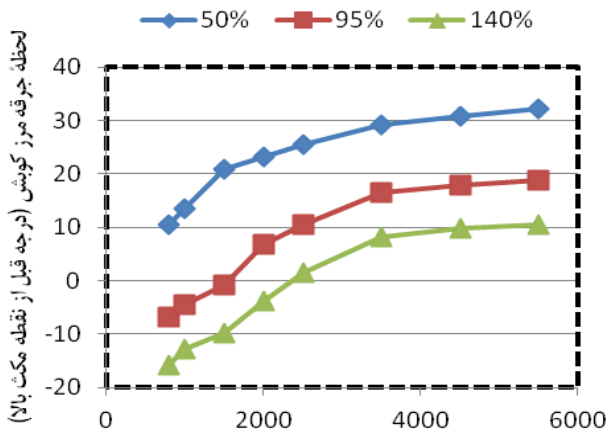
1 Smoothed Pressure

2 Knock Pressure

3 Noise

4 Light Knock

5 Heavy Knock



دور موتور (دد)

شکل ۲: لحظه جرقه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب دور موتور در بار نسبی‌های مختلف

سایر شرایط ورودی این آزمون‌ها ثابت بوده است، یعنی در تمامی آزمون‌ها دمای چندراهه هوا برابر ۲۰ درجه سانتیگراد و دمای آب خنک کاری برابر ۹۰ درجه سانتیگراد است. همچنین با توجه به توضیحات بخش دوم، در صورت عدم افزایش دمای گازهای خروجی در پایین دست دریچه‌ها از حد مجاز خود، مقدار لامبدا برابر ۱ و در سایر شرایط، مخلوط هوا و سوخت تا حدی غنی شده است که دمای گازهای خروجی در ۹۳۰ درجه سانتیگراد باقی بماند. همانگونه که در بخش مقدمه ذکر شد، با توجه به اینکه داده‌های شکل ۲ متعلق به موتور پرخوران می‌باشد، بار نسبی بیش از ۱۰۰ درصد نیز در نمودار وجود دارد. قابل ذکر است که تا سرعت دورانی ۲۰۰۰ د.د.د.، سرعت دورانی تنجار^۳ چندان زیاد نبوده و امکان دستیابی به بار نسبی زیاد وجود نداشته و داده‌های نشان داده شده در شکل، از نقاط آزمون نیستند.

در بار نسبی ۵۰ درصد و دورهای تندتر از ۲۰۰۰ د.د.د.، با توجه به تمایل اندک به وقوع کوبش، امکان دستیابی به جرقه معادل بیشینه گشتاور^۴ وجود داشته است و زمان جرقه نشان داده در شکل ۲ متعلق به این شرایط می‌باشد. مهمترین دلیل پیشروی بیشتر زمان جرقه با افزایش دور موتور در این شرایط، افزایش طول احتراق بر حسب درجه با افزایش دور موتور می‌باشد. از طرف دیگر، مقادیر منفی در شکل، نشان دهنده تمایل شدید کوبش در موتور پرخوران بوده و برای حذف وقوع کوبش، زمان جرقه بعد از نقطه مکث بالا^۵ بوده است.

با توجه به نتایج شکل ۲، وابستگی زمان جرقه زنی معادل شرایط مرزی کوبش به دور موتور چشمگیر است و افزایش دور موتور از ۸۰۰ تا ۵۸۰۰ د.د.د. (محدوده سرعت دورانی کاری موتور) منجر به

نتایج آزمون نشان می‌دهد که به عنوان یک تقریب مناسب در روش حذف میانگین منحنی فشار استوانه، حد مجاز اول از معادله (۲) و حد مجاز دوم از معادله (۳) قابل محاسبه است.

$$\text{pressure threshold } 1 = \frac{ENSP}{1000} (\text{bar}) \quad (2)$$

$$\text{pressure threshold } 2 = \frac{ENSP}{5000} (\text{bar}) \quad (3)$$

که ENSP سرعت دورانی موتور بر حسب د.د.د. می‌باشد. گذر از حد مجاز اول برای درصد کمی از چرخه‌ها (حداکثر ۲ تا ۳ درصد)، نشان دهنده عبور از شرایط مرزی کوبش نیست ولی شدت کوبش هیچ یک از چرخه‌ها در شرایط مرزی وقوع کوبش، نباید از حد مجاز دوم بیشتر شود.

۴) اثر شرایط عملکرد موتور در زمان جرقه مرزی کوبش^۱

در این بخش اثر عواملی که حسگر مستقیم دارند و یا در رایانه موتور شبیه‌سازی می‌شوند، در وقوع کوبش بررسی می‌شود. همان‌گونه که اشاره شد، این موارد شامل دور موتور، بار نسبی موتور، دما و فشار هوای ورودی، دمای آب خنک‌کاری، نسبت هوا به سوخت و فشار دود در پایین دست دریچه‌ها می‌باشند. بررسی اولیه عوامل اشاره شده نشان می‌دهد که این موارد مستقل از یکدیگر نیستند. به عبارت دیگر بار نسبی موتور، نسبت مستقیم با فشار هوای ورودی دارد. همچنین برای خودروی سالم، فشار دود در پایین دست دریچه‌ها با ثابت ماندن دور و بار نسبی موتور و دمای چندراهه هوا، تقریباً ثابت می‌ماند و تغییر چندانی نخواهد داشت و اثر تغییر اندک فشار خروجی در اثر تغییر ارتفاع و سایر عوامل را می‌توان به تنظیم حلقه بسته زمان جرقه واگذار نمود [۱۵]. بنابراین تنها اثر عوامل دور و بار نسبی موتور، دمای چندراهه هوا، دمای آب خنک‌کاری و نسبت هوا به سوخت در زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش بررسی گردید. در ادامه، با تغییر هر یک از عوامل ذکر شده در آزمون‌های مختلف، زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش با اندازه‌گیری صدای کوبش (محفظه احتراق) و تحلیل داده‌های فشار درون استوانه، تعیین شده است.

۴-۱) دور موتور

با افزایش دور موتور، شدت آشفستگی^۲ و سرعت شعله افزایش می‌یابد. با افزایش سرعت شعله، گازهای نسوخته با سرعت بیشتری مصرف شده و احتمال وقوع کوبش کم می‌شود [۱۶]. در شکل ۲، لحظه جرقه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب دور موتور و در بار نسبی‌های مختلف دیده می‌شود.

³ Compressor

⁴ MBT: Maximum Brake Torque

⁵ TDC: Top Dead Center

¹ KLSA: Knock Limit Spark Advance

² Turbulence

با توجه به نتایج این شکل، وابستگی زمان جرعه زنی معادل شرایط مرزی کوبش به بار نسبی هم چشمگیر است و افزایش بار نسبی موتور از ۵۰ تا ۱۴۰ درصد (محدوده بار نسبی موتور که احتمال وقوع کوبش در آن وجود دارد) منجر به تأخیر زمان جرعه در حدود ۲۵ درجه در تمامی دوره‌های موتور خواهد شد. همچنین با توجه به این شکل، شیب کاهش زمان جرعه با افزایش بار نسبی تقریباً ثابت است.

۴-۳) دمای چندراهه هوا

با افزایش دمای چندراهه هوا، بیشینه دمای چرخه کاری موتور و در نتیجه تمایل به وقوع کوبش افزایش می‌یابد [۱۱]. شکل ۴، اثر تغییر دمای چندراهه هوا را در دور موتورهای مختلف، بار نسبی ۱۰۰ درصد و دمای آب ۹۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد.

کمینه دمای چندراهه هوای قابل تنظیم در آزمایشگاه موتور با افزایش توان خنک کاری خنک کن میانی، برابر ۲۰ درجه سانتیگراد بوده است. این شکل نشان می‌دهد که دمای چندراهه هوا اثر چشمگیری بر زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش دارد و افزایش دمای چندراهه هوا از ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتیگراد (محدوده کاری دمای چندراهه هوا در اغلب شرایط محیطی) منجر به تأخیر زمان جرعه در حدود ۵ تا ۱۲ درجه خواهد شد. یکی دیگر از نکات اصلی این نمودار، تأخیر بیشتر زمان جرعه در سرعت‌های دورانی کندتر می‌باشد. به عبارت دیگر اثر افزایش تمایل به وقوع کوبش با افزایش دمای چندراهه هوا، در سرعت‌های دورانی کند بیشتر است. در شکل ۵ اثر تغییر دمای چندراهه هوا در بار نسبی‌های مختلف، دور موتور ۳۰۰۰ د.د.د. و دمای آب ۹۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است.

در موتور مورد آزمون، در بار نسبی ۴۰ درصد و کمتر احتمال وقوع کوبش وجود ندارد، بنابراین با افزایش دمای چندراهه هوا نیازی به تأخیر زمان جرعه برای حذف وقوع کوبش نمی‌باشد. مشابه شکل ۴، نتایج شکل ۵ اثر چشمگیر دمای چندراهه هوا بر زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش را تأیید می‌کند.

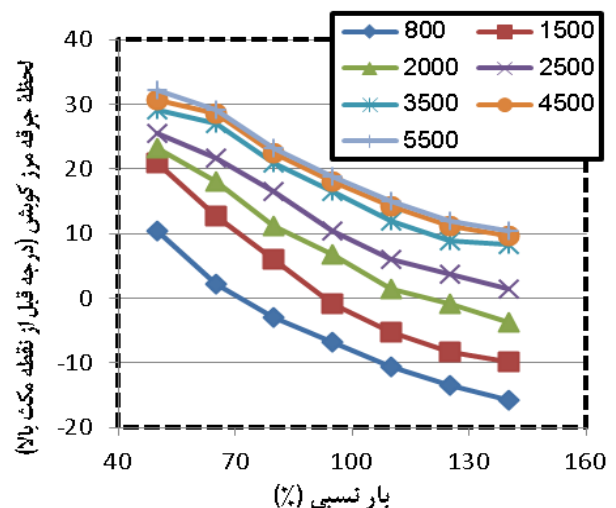
۴-۴) دمای آب خنک کاری موتور

با افزایش دمای آب خنک کاری، انتقال حرارت از موتور کاهش و بیشینه دمای چرخه و در نتیجه تمایل به وقوع کوبش افزایش می‌یابد [۱۸]. شکل ۶، اثر تغییر دمای آب را در دور موتورهای مختلف، بار نسبی ۱۰۰ درصد و دمای هوای ۵۰ درجه سانتیگراد نشان می‌دهد.

پیشرسی زمان جرعه تا حدود ۳۰ درجه در تمامی بارهای نسبی خواهد شد. نکته دیگر این نمودار این است که شیب تغییرات زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش، در سرعت‌های دورانی کند بیشتر است. به عبارت دیگر، در ابتدا با افزایش سرعت دورانی موتور، تمایل به وقوع کوبش کاهش چشمگیری دارد و پس از سرعت دورانی ۳۰۰۰ د.د.د. تمایل به وقوع کوبش با شیب کمتری کاهش می‌یابد. یکی از دلایل این پدیده، کاهش سهم انتقال حرارت و در نتیجه کاهش اثر افزایش سرعت شعله برای کم کردن تمایل به وقوع کوبش در سرعت‌های دورانی تند می‌باشد.

۴-۲) بار نسبی

با افزایش بار نسبی، بیشینه فشار داخل استوانه افزایش و تمایل به وقوع کوبش نیز افزایش می‌یابد [۱۷]. شکل ۳ اثر بار نسبی را در دوره‌های مختلف نشان می‌دهد. مشابه آزمون‌های شکل ۲، سایر شرایط ورودی آزمون‌های این شکل ثابت بوده است. همچنین بار نسبی بیش از ۱۰۰ درصد در این نمودار نیز وجود دارد و زمان جرعه در دوره‌های کند و بار نسبی زیاد، بعد از نقطه مکث بالا بوده است. به دلیل عدم تمایل به وقوع کوبش در هیچ یک از سرعت‌های دورانی در بار نسبی کمتر از ۵۰ درصد، کمینه بار نسبی موجود در این نمودار برابر ۵۰ درصد می‌باشد. از سوی دیگر در سرعت‌های دورانی تند، امکان دستیابی به بار نسبی بیش از ۱۴۰ درصد (با بستن بیشتر دریچه هدررو) وجود داشته است اما به دلیل محدودیت بیشینه گشتاور خروجی و همچنین بیشینه دور تجار، بیشینه بار نسبی موجود در این نمودار برابر ۱۴۰ درصد می‌باشد.



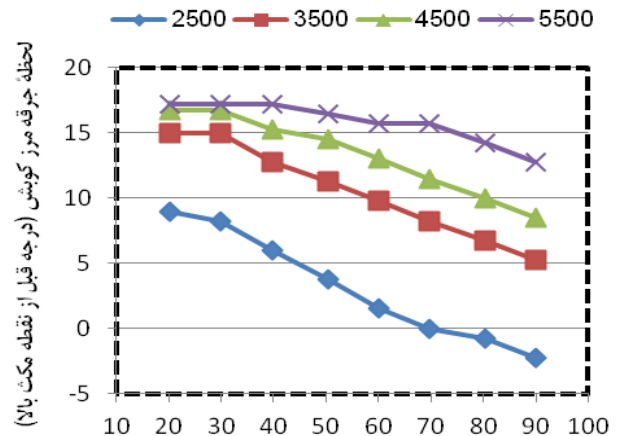
شکل ۳: لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب بار نسبی در دور موتورهای مختلف

با وجود این که در شرایط گرمایش موتور، امکان کارکرد آن با دمای کمتر از ۷۰ درجه سانتیگراد وجود دارد، اما امکان کارکرد موتور در شرایط پایدار با دمای کمتر از ۷۰ درجه و در آزمایشگاه موتور وجود نداشته است. نتایج این شکل نشان می‌دهد که دمای آب اثر چشمگیری بر زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش دارد و افزایش دمای آب از ۷۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد، منجر به تأخیر زمان جرعه نمودار، ثابت ماندن تقریبی میزان کاهش زمان جرعه در سرعت‌های دورانی مختلف می‌باشد.

در شکل ۷، اثر تغییر دمای آب در بار نسبی‌های مختلف، دور موتور ۳۰۰۰ د.د.د. و دمای هوای ۵۰ درجه سانتیگراد نشان داده شده است. مشابه نتایج شکل ۵، در بار نسبی ۴۰ درصد و کمتر احتمال وقوع کوبش وجود ندارد و افزایش دمای آب منجر به تأخیر زمان جرعه نمی‌شود. همچنین مشابه شکل ۶، نتایج این شکل نیز نشان می‌دهد که افزایش دمای آب از ۷۰ تا ۱۲۰ درجه سانتیگراد، منجر به تأخیر زمان جرعه در حدود ۷ درجه می‌شود و میزان تأخیر زمان جرعه در بارهای نسبی بیش از ۴۰ درصد تقریباً ثابت است.

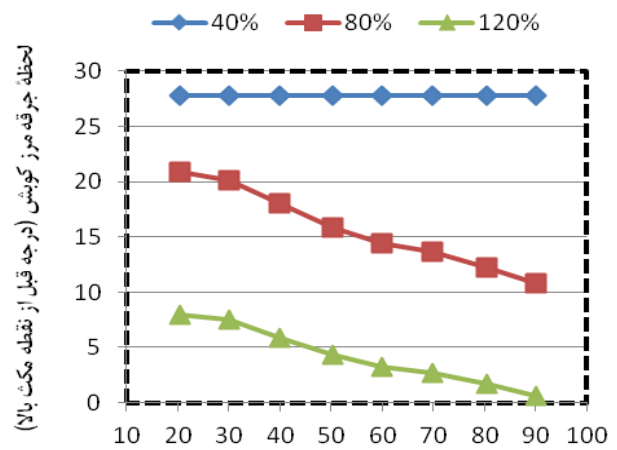
۴-۵) رقت (نسبت هوا به سوخت)

در صورت ثابت ماندن تمامی عوامل ورودی، گشتاور خروجی موتور و فشار بیشینه چرخه، در شرایطی کمی غنی تر از حالت درست (استوکیومتری)، بیشترین مقدار را دارد [۱۲]. از طرف دیگر، بیشینه دمای شعله در نسبت هوا به سوخت درست رخ می‌دهد و با غنی و یا رقیق تر شدن مخلوط هوا و سوخت، دمای شعله کاهش می‌یابد [۱]. این دو اثر در شرایط غنی شدن مخلوط هوا و سوخت از حالت درست، با یکدیگر تقابل داشته و میزان تمایل به وقوع کوبش را تعیین می‌کنند. لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب لامبدا در دور موتور ۳۰۰۰ د.د.د.، بار نسبی ۱۰۰ درصد، دمای چندراهه هوای ۲۰ درجه سانتیگراد و دمای آب خنک کاری ۹۰ درجه سانتیگراد، در شکل ۸ دیده می‌شود. لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش با تغییر لامبدا از ۱ تا ۰٫۹ تقریباً ثابت می‌ماند. به عبارت دیگر، بیشترین تمایل به وقوع کوبش در لامبدا ۱ تا ۰٫۹ وجود دارد و با غنی تر شدن مخلوط هوا و سوخت، اثر کاهش دمای شعله، بیشتر از اثر افزایش کم گشتاور خروجی موتور است و تمایل به وقوع کوبش کاهش می‌یابد. همچنین، اثر رقیق شدن مخلوط هوا و سوخت در کاهش تمایل به وقوع کوبش بیشتر است. مهمترین دلیل این پدیده، کاهش شدید بیشینه دما و فشار داخل استوانه و در نتیجه گشتاور خروجی موتور با رقیق شدن مخلوط می‌باشد. اثر تغییر لامبدا در محدوده شرایط کاری موتور (۰٫۷۵ تا ۱) کمتر از اثر تغییر سایر شرایط عملکرد موتور است. به عبارت دیگر، تغییر لامبدا از ۱ تا ۰٫۷۵ منجر به پیشروی زمان جرعه در حدود ۵ درجه می‌شود.



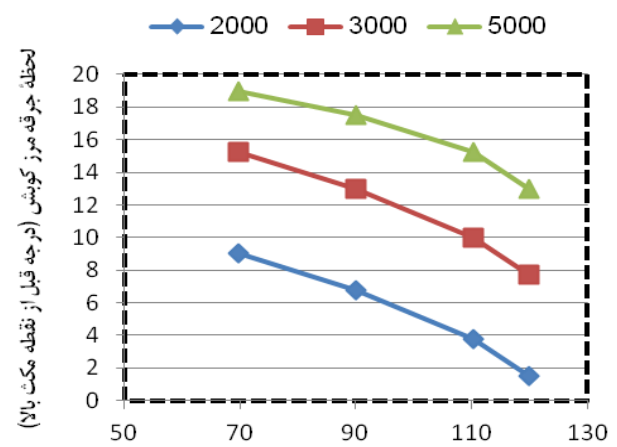
دمای چندراهه هوا (درجه سانتیگراد)

شکل ۴: لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب دمای چندراهه هوا در دور موتورهای مختلف



دمای چندراهه هوا (درجه سانتیگراد)

شکل ۵: لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب دمای چندراهه هوا در بار نسبی‌های مختلف



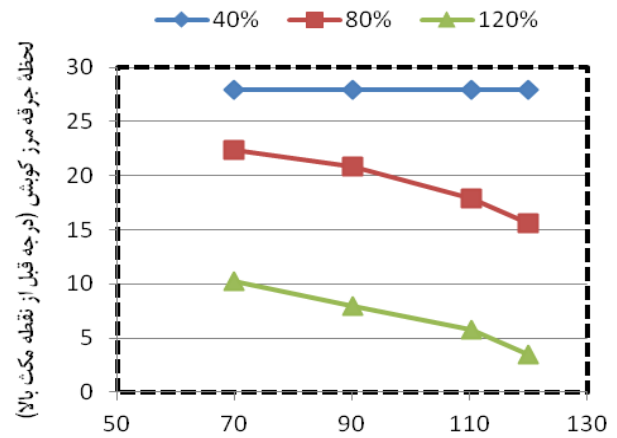
دمای آب خنک کاری (درجه سانتیگراد)

شکل ۶: لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب دمای آب در دور موتورهای مختلف

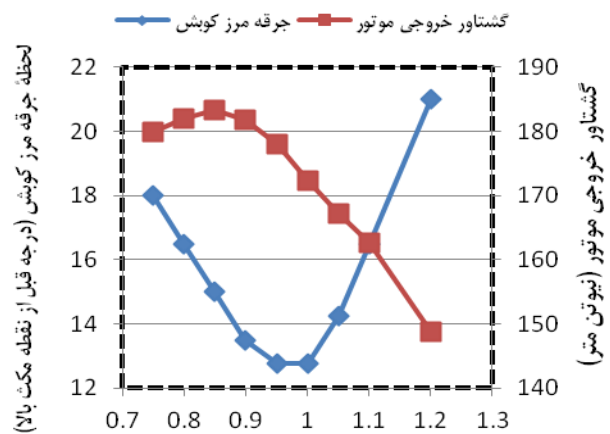
خواهد بود. لذا یک الگوی ممکن، در نظر گرفتن جدولی چهاربعدي و اجرای آزمون در تمامی ترکیب‌های مختلف چهار عامل، برای محاسبه زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش می‌باشد. با توجه به نیاز به اجرای آزمون‌های متعدد، چنین الگویی منطقی به نظر نمی‌رسد. برای تکمیل یک جدول دوبعدی با ۱۰ نقطه در هر محور، نیاز به اجرای ۱۰۰ آزمون در شرایط مختلف می‌باشد و بنابراین ایجاد جدول بیش از دو بعد در رایانه موتور، منطقی به نظر نمی‌رسد. با در نظر گرفتن دو بعد به عنوان پیشینه ابعاد جدول الگوی نهایی، باید دو متغیر را به عنوان متغیرهای جدول پایه اصلی انتخاب نمود. پرواضح است که تغییر دور و بار نسبی موتور در شرایط کاری خودرو، بسیار بیشتر از تغییر دمای چندراهه هوا و دمای آب می‌باشد. همچنین با توجه به نتایج حاصل از بخش قبلی، میزان تغییر زمان جرعه با تغییر دور و بار نسبی موتور در محدوده شرایط کاری موتور، بیشتر از تغییر زمان جرعه با تغییر دمای چندراهه هوا و دمای آب می‌باشد. با در نظر گرفتن این موارد، متغیرهای دور و بار نسبی موتور به عنوان متغیرهای جدول پایه اصلی در نظر گرفته می‌شوند. این جدول، "جدول دو بعدی زمان جرعه پایه" نامیده می‌شود که محور افقی آن دور موتور و محور عمودی بار نسبی موتور می‌باشد. در هر محور ۸ نقطه شکست برای داشتن دقت لازم در نظر گرفته می‌شود و با قرارگیری دور و بار نسبی موتور در بین نقاط شکست، از میانبایی خطی برای یافتن زمان جرعه خروجی جدول، با نام "زمان جرعه پایه" استفاده می‌شود.

زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش در این جدول پایه، برای دمای چندراهه هوا، دمای آب خنک کاری و لامبدا مرجع با آزمون به دست می‌آید. دمای چندراهه هوای مرجع برابر ۲۰ درجه سانتیگراد، دمای آب مرجع برابر ۹۰ درجه سانتیگراد و لامبدا مرجع برابر ۱ به شرط عدم افزایش دمای گازهای خروجی و کمتر از ۱ برای ثابت نگه داشتن دمای گازهای خروجی به میزان ۹۳۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. بنابراین اثر تغییر دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک کاری در هر دور و بار نسبی موتور، باید به صورتی دیگر در الگو وارد شود.

نتایج بخش قبلی نشان داد که با افزایش دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک کاری، زمان جرعه نسبت به حالت‌های مرجع، با مقداری تأخیر همراه می‌شود. بنابراین بهترین راه برای محاسبه زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش، افزودن مقداری تأخیر و یا پیشی به زمان جرعه مرجع می‌باشد. در ادامه این بخش، روش شبیه‌سازی تغییرات زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا و دمای آب بررسی می‌شود.



شکل ۷: لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب دمای آب در بار نسبی‌های مختلف



شکل ۸: لحظه جرعه معادل شرایط مرزی کوبش بر حسب لامبدا

۵) شبیه‌سازی زمان جرعه معادل شرایط مرزی وقوع کوبش

نتایج شکل ۸ نشان داد که اثر تغییر لامبدا در محدوده شرایط کاری موتور (۰٫۷۵ تا ۱) در تغییر زمان جرعه مرزی کوبش چندان زیاد نیست. از سوی دیگر در یک دور، بار نسبی و دمای چندراهه هوای ثابت، مقدار لامبدا تقریباً ثابت است. همچنین مقدار لامبدا در تمامی شرایط کاری برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود و تنها برای جلوگیری از افزایش دمای گازهای خروجی، غنی‌تر می‌شود. با در نظر گرفتن این موارد و حذف متغیر لامبدا از عوامل ورودی، اثر دور و بار نسبی موتور، دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک کاری در زمان جرعه معادل شرایط مرزی کوبش در نظر گرفته می‌شود و اندک تغییر احتمالی لامبدا در حالت ثابت ماندن چهار عامل یاد شده، به تنظیم حلقه بسته زمان جرعه واگذار می‌شود.

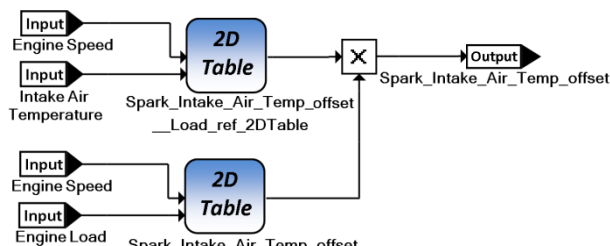
بنابراین الگوی نهایی برای تنظیم زمان جرعه بر حسب چهار عامل دور و بار نسبی موتور، دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک کاری

1 Spark_Ref_2DTable

2 Spark_Ref

با در نظر گرفتن الگوی کاهش تأخیر لازم در زمان جرعه با افزایش دور موتور، جدول اصلی بر حسب دور موتور و دمای چندراهه هوا در نظر گرفته می شود و مقادیر تأخیر لازم در این جدول برای یک بار نسبی مشخص محاسبه می شوند. سپس برای اصلاح میزان تأخیر لازم در بار نسبی های مختلف، از خروجی جدول دوم به عنوان ضریب استفاده می شود. نتایج آزمون ها نشان می دهد که این ضریب در دماهای هوای ورودی مختلف تفاوت چندانی نداشته و لازم است که تابع دور و بار نسبی موتور باشد. با توجه به شکل ۱۰، جدول اصلی در بار نسبی ۸۰ درصد (بیشترین تأخیر لازم در این بار نسبی وجود دارد) محاسبه شده و مقدار ضریب در سایر بارهای نسبی محاسبه خواهد شد. واضح است که در جدول ضریب، مقادیر بار نسبی ۴۰ درصد برابر صفر و بار نسبی ۸۰ درصد برابر یک و در سایر بارهای نسبی، عددی بین صفر و یک می باشد. خروجی جدول اصلی (بر حسب دور موتور و دمای چندراهه هوا)، "مقدار پایه برای تغییر زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا از مقدار مرجع" و خروجی جدول ضریب، "مقدار تصحیح برای تغییر زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا از مقدار مرجع" نامیده می شود. بنابراین مقدار نهایی تأخیر لازم در اثر تغییر دمای چندراهه هوا با نام "تغییر زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا از مقدار مرجع" از قاعده نشان داده شده در شکل ۱۱، به دست می آید.

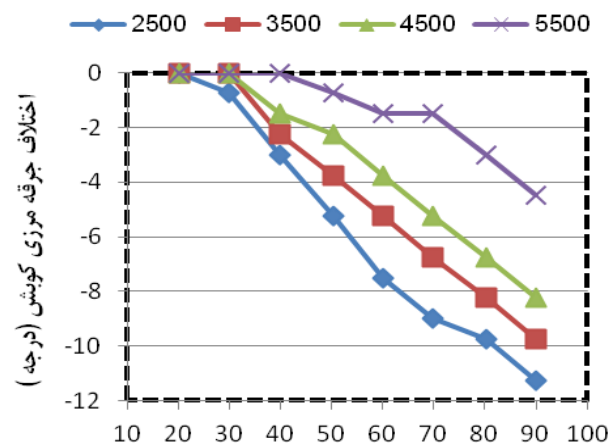
با توجه به نتایج بخش قبل، میزان تغییر لازم در زمان جرعه با تغییر دمای آب، وابستگی چندانی به دور و بار نسبی موتور ندارد و تنها در بار نسبی کمتر از ۴۰ درصد (با توجه به عدم احتمال وقوع کوبش)، تغییر لازم در زمان جرعه صفر می شود. بنابراین میزان تغییر لازم در زمان جرعه با تغییر دمای آب با یک جدول دو بعدی تابع دمای آب و بار نسبی موتور شبیه سازی می شود و خروجی این جدول، "تغییر زمان جرعه در اثر تغییر دمای آب از مقدار مرجع" نامیده می شود.



شکل ۱۱: روش محاسبه تغییر زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا

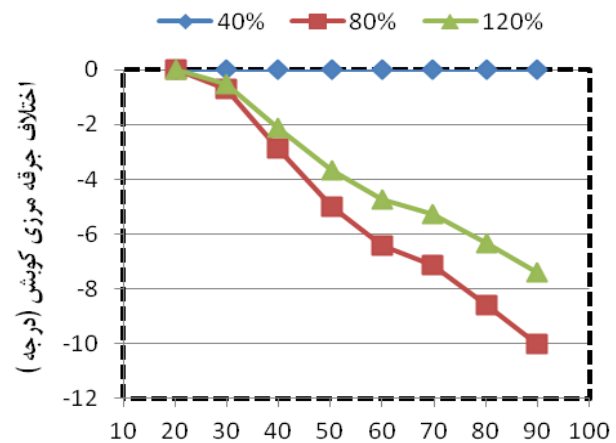
در شکل های ۹ و ۱۰ میزان تغییر زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا در دور موتور و بار نسبی های مختلف، نشان داده شده است. داده های این شکل ها، همان داده های شکل های ۴ و ۵ می باشد که از منظر دیگری بررسی شده اند.

این شکل ها، نشان می دهند که میزان تأخیر لازم در زمان جرعه به شدت تابع دور و بار نسبی موتور می باشد. به عبارت دیگر با افزایش دور موتور، تأخیر لازم در زمان جرعه کاهش می یابد و با افزایش بار نسبی موتور، تأخیر لازم در زمان جرعه ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. با توجه به اینکه امکان تعریف یک جدول سه بعدی (تابع دمای چندراهه هوا و دور و بار نسبی موتور) در رایانه موتور وجود ندارد، می توان از حاصل ضرب دو جدول دو بعدی استفاده نمود.



شکل ۹: میزان تأخیر لازم در زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا (درجه سانتیگراد)

شکل ۹: میزان تأخیر لازم در زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا نسبت به حالت مرجع در دور موتورهای مختلف



شکل ۱۰: میزان تأخیر لازم در زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا (درجه سانتیگراد)

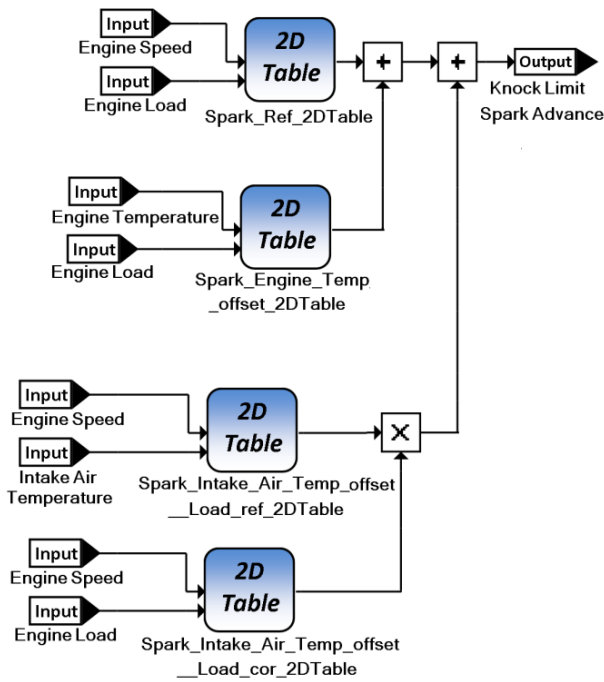
شکل ۱۰: میزان تأخیر لازم در زمان جرعه در اثر تغییر دمای چندراهه هوا نسبت به حالت مرجع در بار نسبی های مختلف

1 Spark_Intake_Air_Temp_offset_Load_ref

2 Spark_Intake_Air_Temp_offset_Load_cor

3 Spark_Intake_Air_Temp_offset

4 Spark_Engine_Temp_offset



شکل ۱۳: الگوی محاسبه زمان جرجه معادل شرایط مرزی کوبش

دو معادله جمع موجود در بالای نمودار، نشان دهنده افزودن مقدار تأخیر لازم به زمان جرجه پایه در اثر افزایش دمای آب خنک کاری و دمای چندراهه هوا از حالت مرجع می‌باشد. خروجی حاصلضرب موجود در پایین نمودار، مقدار تأخیر لازم در زمان جرجه در اثر افزایش دمای چندراهه هوا است. جدول اول این حاصلضرب، مقدار تأخیر پایه در یک بار نسبی ثابت را نشان می‌دهد. برای سایر بارهای نسبی، جدول تصحیح به صورت ضرب اعمال شده است تا به راحتی مقدار تأخیر خروجی در بارهای نسبی کم با ضرب در مقدار صفر حذف شوند.

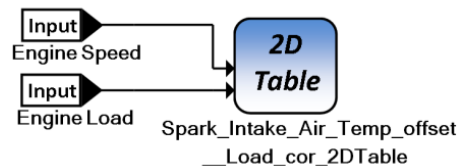
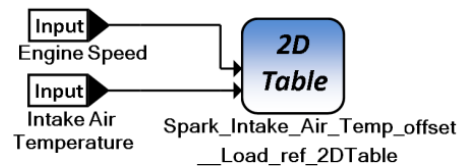
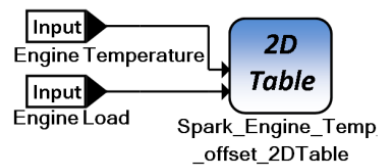
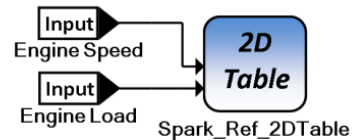
اعداد موجود در هر جدول با اجرای آزمون و با تغییر شرایط ورودی تعیین می‌شوند. زمان جرجه خروجی محاسبه شده از این الگو، در ترکیب‌های مختلف دور و بار نسبی موتور، دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک کاری، معادل شرایط مرزی کوبش خواهد بود.

برای ارزیابی الگوی ارائه شده، زمان جرجه معادل شرایط مرزی کوبش محاسبه شده از الگوی نهایی، با زمان جرجه به دست آمده از آزمون، مقایسه شده است. نتایج ارزیابی انجام شده، در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

آزمون‌های شکل ۱۴ در ترکیب‌های مختلف عوامل ورودی شامل دور و بار نسبی موتور، دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک کاری انجام شده است. نتایج این شکل دقت خوب الگوی ارائه شده برای شبیه‌سازی زمان جرجه معادل شرایط مرزی کوبش را نشان می‌دهد.

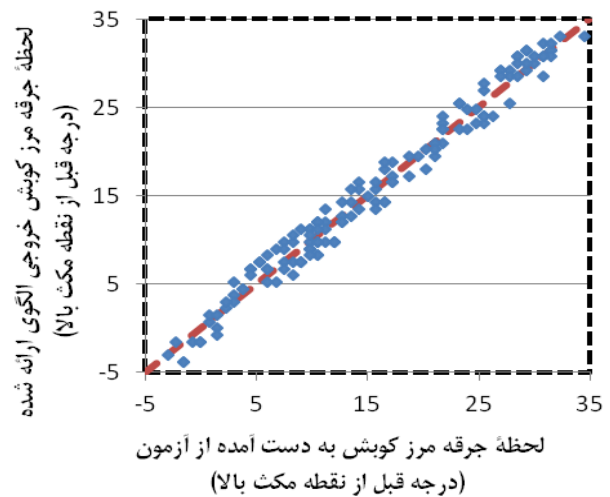
در شکل ۱۲، جداول دو بعدی موجود در الگوی نهایی نشان داده شده است. متغیر ورودی اول هر جدول، محور افقی و ورودی دوم محور عمودی را نشان می‌دهد.

هر کدام از جداول نشان داده شده در شکل ۱۲، جدولی دو بعدی با ۸ نقطه در هر محور می‌باشد. متغیر خروجی هر جدول با نام خود جدول است و تنها عبارت "جدول دوبعدی" از انتهای آن حذف شده است. خروجی جدول اول، زمان جرجه پایه در دور و بار نسبی‌های مختلف و دمای چندراهه هوا، دمای آب و لامبدای مرجع را نشان می‌دهد. خروجی جدول دوم، میزان تغییر لازم در زمان جرجه در صورت تغییر دمای آب نسبت به حالت مرجع را نشان می‌دهد و حاصلضرب خروجی جداول سوم و چهارم، میزان تغییر لازم در زمان جرجه در صورت تغییر دمای چندراهه هوا نسبت به حالت مرجع را نشان می‌دهد. در نهایت، حاصلضرب خروجی جدول سوم و چهارم، با خروجی جداول اول و دوم جمع می‌شود و زمان جرجه معادل شرایط مرزی کوبش را تشکیل می‌دهند. الگوی نهایی محاسبه زمان جرجه معادل شرایط مرزی کوبش، در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲: جداول موجود در الگوی نهایی به‌مراه ورودی آنها

- [3] T. Jean-Hugh, D. Bernard, D.P. Marie-Agnes, Engine knock detection from vibration signals using pattern recognition, *Meccanica*, Vol. 32, pp. 431-439, 1997
- [4] M. Castagne, J.P. Dumas, S. Henriot, F.A. Lafossas, New knock localization methodology for SI engines, SAE International, Paper No. 2003-01-1118, 2003
- [5] G. Derrico, T. Lucchini, S. Merola, C. Tornatore, Application of a thermodynamic model with a complex chemistry to a cycle resolved knock prediction on a spark ignition optical engine, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 389-399, 2012
- [6] J.M. Towers, R.L. Hoekstra, Engine knock, a renewed concern in motorsports, A literature review, SAE International, Paper No. 983026, 1998
- [7] N. Collings, T. Ma, Knock detection alternatives for production vehicles, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 199, No.4, pp. 301-307, 1985
- [8] A. Teraji, T. Tsuda, T. Noda, M. Kubo, T. Itoh, Development of a three-dimensional knock simulation method incorporating a high-accuracy flame propagation model, *International Journal of Engine Research*, Vol. 6, pp. 73-83, 2005
- [9] R.P. Bob, L.M. Adolph, Recent sensors for automotive applications, *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, pp. 1106-1119, 1987
- [10] M. Pennese, A. Bucci, F. Damasceno, G. Montanari, Sigma@ on knock phenomenon control of flex fuel engines, SAE Paper, 2005-01-3990, 2005
- [11] S. Russ, A review of the effect of engine operating conditions on borderline knock, SAE International, Paper No. 960497, 1996
- [12] J.A. Topinka and M.D. Gerty, J.B. Heywood, J.C. Keck, Knock behavior of a lean-burn, H₂ and CO enhanced, SI gasoline engine concept, SAE International, Paper No. 2004-01-0975, 2004
- [13] K. Saikaly, O.L. Corre, C. Rahmouni, L. Truffet, Preventive knock protection technique for stationary SI engines fuelled by natural gas, *Fuel Processing Technology*, Vol. 91, pp. 641-652, 2010
- [14] M. Momeni, A.H. Kakaee, Optimum empirical method for knock detection in a spark ignition engine for engine mapping and calibration, MSc Thesis, Iran University of Science and Technology, 1388
- [15] M.O. Peter, A mean-value model for estimating exhaust manifold pressure in production engine applications, SAE International, Paper No. 2008-01-1004, 2008
- [16] G. Fontana, E. Galloni, Knock resistance in a small turbocharged spark-ignition engine, SAE International, Paper No. 2006-01-2995, 2006
- [17] M.D. Gerty, J.B. Heywood, An investigation of gasoline engine knock limited performance and the effects of hydrogen enhancement, SAE International, Paper No. 2006-01-0228, 2006



شکل ۱۴: مقایسه زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش به دست آمده از آزمون و خروجی الگوی ارائه شده

۶ نتیجه گیری

در این تحقیق، اثر متغیرهایی که حسگر مستقیم داشته و یا قابل شبیه‌سازی‌اند، در زمان جرقه معادل شرایط مرزی کوبش بررسی شده است. این موارد شامل دور و بار نسبی موتور، نسبت هوا به سوخت، دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک‌کاری می‌باشد. با توجه به تغییر اندک نسبت هوا به سوخت با ثابت ماندن چهار عامل دیگر، اثر تغییر نسبت هوا به سوخت به تنظیم حلقه بسته زمان جرقه واگذار می‌شود. با فرض‌های صورت گرفته، اثر دور و بار نسبی موتور، دمای چندراهه هوا و دمای آب خنک‌کاری در نظر گرفته شده و الگویی برای تنظیم زمان جرقه در مرز وقوع کوبش در ترکیب‌های مختلف این چهار عامل ارائه شده است. مقایسه زمان جرقه خروجی الگوی ارائه شده با نتایج آزمون، دقت خوب الگوی ارائه شده را نشان می‌دهد. این الگو به گونه‌ای توسعه یافته است که امکان زینه‌بندی آن در اتاق آزمون وجود داشته و در رایانه موتور به صورت بلادرنگ قابل اجرا باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از همکاری شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) در اجرای آزمون‌ها و بویژه آقایان مهندس رستمی، محمودی و غفوری تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- [1] J.B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill Book Company, New York, 1988
- [2] S.S. Merola, P. Sementa, C. Tornatore, Experiments on knocking and abnormal combustion through optical diagnostics in a boosted spark ignition port fuel injection engine, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 93-101, 2011

[18] E. Corti, C. Forte, Statistical analysis of indicating parameters for knock detection purposes, SAE International, Paper No. 2009-01-0237, 2009



The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineersearch.ir



Determination of knock borderline ignition timing in turbocharged spark ignition engines

M. Momeni Movahed¹, H. Basirat Tabrizi^{2*}, S.M. Mirsalim³, M. Jamali⁴

¹Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, m_momeni@aut.ac.ir

²Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, hbasirat@aut.ac.ir

³Amirkabir University of Technology and Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir

⁴ Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran, m_jamali@ip-co.com

*Corresponding Author, Phone Number: +98-21-64543455

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 31 July 2013

Accepted: 01 September 2013

Keywords:

Modeling

Knock

Spark advance

Turbocharged spark ignition engine

ABSTRACT

The component protection and the thermal efficiency increase are main targets of controlling ignition timing on the knock borderline. The closed-loop knock control is possible with the data analysis, obtained from the knock sensor. However, in this method, the knock prediction and the knock intensity determination are not possible before the knock occurrence. A model to predict the knock and determine its borderline ignition timing, in different engine operating conditions, is presented in this study. These operating conditions, as inputs to the model, were detected using engine sensors' signals or by simulations in the engine control unit. The effect of the engine speed, the engine load, the engine temperature and the intake manifold temperature on the knock occurrence was considered in presented model. The output of the model was knock borderline ignition timing in different combinations of mentioned variables. Experimental results from a modern gasoline turbocharged engine were used to validate the model. Estimated ignition timing from the model was in very good agreement with the experimentally measured knock borderline.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.