Archive of SID

علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره سیزدهم، شماره دو، تابستان ۹۰

بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد بهینه سیستم مدیریت موتور (EMS) به روش DoE

فریده عتابی[۱*]

far-atabi@jamejam.net

مصطفی خضری[۱]

حمید ایرانی[۲]

تاریخ دریافت:۸۷/۱/۱۵ تاریخ پذیرش:۸۷/۳/۱۳

چکیده

یکی از بزرگ ترین منابع آلاینده هوا در شهرهای بزرگ ، خودروهای در حال تردد در خیابان ها می باشد که هزینه های کلانی اعم از جانی و مالی را بر شهروندان تحمیل می نماید. به منظور کاهش این خسارات ، خودروسازان پیوسته فن آوری های جدیدی را به خدمت می گیرند، تا میزان آلاینده های خروجی محصولات خود را کم تر نمایند. در سال های اخیر با تولید خودروهای مجهز به موتورهای انژکتوری که کنترل پاشش سوخت آن ها به صورت الکترونیکی توسط واحد کنترل موتور (ECU) صورت می پذیرد، دستیابی به این اهداف تا حدود زیادی میسر شده است. در این میان نحوه تنظیم و کالیبره کردن سیستم مدیریت موتور (EMS) اهمیتی روزافزون یافته است. مهم ترین وظیفه تنظیم کننده سیستم مدیریت موتور، رسیدن به نقطه بهینه آلاینده خروجی ، مصرف سوخت و عملکرد خودرو است.

در این تحقیق از طریق مدل سازی به روش DoE ضمن کالیبره کردن بهینه سیستم مدیریت موتور، هزینه و زمان انجام این کار نیز کاهش یافته و تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور با علم به ورودی های موجود نظیر دور و بار موتور و خروجی های مطلوب مانند آلاینده های خروجی و گشتاور موتور از نرم افزار MBC MODEL استفاده گردیده که از زیر مجموعه های نرم افزار MATLAB می باشد. سپس برای بهینه کردن مدل فوق و اعمال تنظیمات مورد نظر از نرم افزار CAGE استفاده شده است.

نتایج این تحقیق نشان می دهد که با استفاده از این روش می توان تاثیر کالیبراسیون سیستم مدیریت موتور را بر پارامترهای مختلف بررسی نمود و بسته به نیاز ، هر کدام از آن ها را تغییر داد تا با اعلام آن به واحد کنترل موتور بسته به شرایط موجود ، فرمان لازم

۱- استادیار دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران*(نویسنده مسئول).

۲- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

www.SID.ir

Archive of SID

توسط این واحد به عملگرهای موتور داده شود. بدین ترتیب دسترسی به وضعیت بهینه موتور از لحاظ عملکـرد، آلاینـده هـای خروجـی و مصرف سوخت، با کم ترین هزینه و زمان با دقت زیاد حاصل می گردد.

واژه های کلیدی: عملکرد بهینه موتور ، سیستم مدیریت موتور(EMS) ، واحد کنترل موتـور(ECU) ، روش DoE ، کالیبراسـیون ، نرم افزار MBC-MODEL.

مقدمه

یکی از بزرگ ترین معضل های بشر در سـالیان اخیـر مسئله آلودگی هوا می باشـد کـه ایـن امـر در شـهرهای بـزرگ شدت بیشتری دارد. در این میان نقش خودروها به عنوان یکـی از بزرگ ترین منابع تولید آلاینده های هوا در شهرها بسـیار پـر رنگ است. از این رو یکی از مهم تـرین برنامـه هـای مقابلـه بـا آلودگی هوا ، کنترل آلاینده های خروجی از خودروها می باشد. در ایران بدین منظور برنامه های مختلفی در دست اجـرا اسـت که می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- توسعه ناوگان حمل و نقل عمومی
- جایگزینی خودروهای فرسوده و قـدیمی بـا اتومبیـل های جدید مطابق با استاندارد موجود
- فراهم نمـودن تسـهیلات لازم قـانونی بـرای کـاهش هزینه های وسایل کنترلی
- لزوم رعایت ضوابط طرح ترافیک در سـاعات ممنـوع توسط رانندگان
- جلوگیری از تردد خودروهای دارای نقص فنی
- جایگزین کردن سوخت های گازی و یا برقی به جای بنزین و گازوئیل
- ملـزم نمـودن سـازندگان اتومبیـل هـای داخلـی بـه تبعیت از استانداردهای آلودگی هوا
- تشویق دارندگان وسایل نقلیه به نصب دستگاه هـای کاهش دهنده آلودگی ناشی از اگزوز اتومبیل ها

در حال حاضر در ایـران اسـتاندارد EURO II بـرای آلاینده های خروجی از خودروها مورد استفاده می باشد. بـرای رسـیدن بـه ایـن اسـتاندارد خودروسـازان ملـزم بـه اسـتفاده از واکنشگر شیمیایی برای تبدیل آلاینده های خروجی از اگزوز به انواع کم ضررتر و همچنین سیستم مـدیریت موتـور بـه منظـور پایش و کنترل فرآیندهای مختلف موتور مانند پاشش سوخت و جرقه می باشند. این سیستم ضمن کاهش آلاینده های خروجی و مصرف سوخت خودروها، عملکرد آن ها را نیز به مقـدار قابـل توجهی بالا می برد.

استاندارد EURO II توسط اتحادیه اروپا وضع شـده و بـرای کلیـه وسـایل موتـوری قابـل اجـرا مـی باشـد. در ایـن استاندارد برای میزان دی اکسید کربن خروجی خودروها حـدی مشخص نشـده اسـت. در اسـتاندارد اروپـایی محـدودیت هـای آلاینده های خروجی از خودروها بـا گذشـت زمـان بـه صـورت پلکانی افزایش می‌یابد (جدول ۱).

جدول ۱- استاندارد اروپایی آلاینده های خروجی از خودروهای بنزینی در سال های مختلف(۱)

سطح استاندارد	تاریخ اجرا	g/km				
		CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Euro I	جولای ۱۹۹۲	۲/۷۲	-	۰/۹۷	-	-
Euro II	ژانویه ۱۹۹۶	۲/۲	-	۰/۵	-	-
Euro III	ژانویه ۲۰۰۰	۲/۳۰	۰/۲۰	-	۰/۱۵	-
Euro IV	ژانویه ۲۰۰۵	۱	۰/۱۰	-	۰/۰۸	-
Euro V(پیشنهادی)	سپتامبر ۲۰۰۹	۱	۰/۰۷۵	-	۰/۰۶	۰/۰۰۵

www.SID.ir

Archive of SID

سیستم مدیریت موتور

تا زمانی که قوانین کنترل آلاینده ها به تصویب نرسیده بود امکان طراحی موتوری که فاقد تجهیزات الکترونیکی باشد، وجود داشت. با تصویب این قوانین نیاز به تجهیزات کنترل الکترونیکی موتور ضروری گشت و امکان استفاده از تجهیزات مکانیکی قدیمی نظیر کاربراتور و دلکو بدین منظور از بین رفت. کنترل کارکرد موتور نیاز به یک پردازنده پرقدرت دارد و واحد کنترل موتور (ECU)[1] این وظیفه را بر عهده دارد. ECU با پایش خروجی های موتور و مدیریت مصرف سوخت و آلاینده ها، ورودی های موتور را تعیین می کند. همچنین با جمع آوری اطلاعات از بیش از ده حسگر، اطلاعات کلیه قسمت های موتور (از دمای مایع خنک کننده تا میزان اکسیژن اگزوز) را به دست می آورد. با این اطلاعات و انجام محاسبات زیاد، فرمان هایی همچون نحوه زمان‌بندی جرقه ، میزان سوخت پاشش شده و مقادیر نسبت هوا به سوخت در هر یک از شرایط کاری به موتور داده می شود تا بهترین عملکرد آن با کمترین میزان آلاینده خروجی و مصرف سوخت انجام پذیرد.

این مجموعه که عمل مدیریت و مراقبت را بر عهده دارد سیستم مدیریت موتور (EMS)[2] نامیده شده و متشکل از سه بخش اصلی است. این سه بخش عبارتند از:

- حسگرها برای جمع آوری اطلاعات و شناسایی حالت کاری
- عملگرها برای اجرای فرمان ها
- مدار مراقبت یا رایانه

آرایش مجموعه مراقبت را اعم از حسگرها و عملگرها ، موضوع و شیء مورد مدیریت تعیین می کند(۲).

حسگرها

حسگرها ابزاری هستند که از آن ها برای دریافت اطلاعات استفاده می شود. حسگرهایی که انتخاب می شوند باید اطلاعاتی را در اختیار رایانه قرار دهند که رایانه بتواند با استفاده از پردازش آن ها کمیتی را که باید تنظیم کند به دست آورد. به عنوان مثال با توجه به این که نسبت هوا به سوخت یکی از اهداف تنظیمی رایانه موتور است، نیاز به اندازه گیری دبی هوای ورودی به موتور می باشد که این امر با نصب حسگر دریچه گاز و همچنین استفاده از حسگرهای دما و سرعت موتور انجام خواهد پذیرفت(۳). برخی حسگرهای متداول در موتورهای امروزی عبارت از حسگر دور موتور ، حسگر فشار مطلق منیفولد ورودی، حسگر موقعیت دریچه گاز (TPS)[3] ، حسگر دمای آب موتور (WTS)[4] ، حسگر دمای هوای ورودی به موتور (ATS)[5] ، حسگر میل بادامک (CAMS)[6] ، حسگر اکسیژن (λS) ، حسگر کوبش و حسگر سرعت خودرو می باشند.

عملگرها

پس از دریافت اطلاعات از حسگرها ، رایانه موتور برای دستیابی به اهداف برنامه ریزی شده، فرمان هایی به قسمت های مختلف موتور صادر می کند که اجرای آن ها بر عهده عملگرها می باشد. انتخاب عملگرها در مجموعه مدیریت موتور قدری ساده تر از انتخاب حسگرهاست، زیرا متناسب با هر عملی که انجام می‌شود باید عملگر مربوط به آن بر روی موتور نصب شده باشد.

برخی عملگرهای متداول در خودروهای امروزی عبارت از انژکتور ها، کویل، پمپ بنزین برقی، موتور گامی و فن برقی می باشند.

واحد کنترل موتور (ECU)

واحد کنترل موتور یک سیستم الکترونیکی متشکل از مدار پردازنده، درگاه های ورودی برای دریافت داده از حسگرها و درگاه های خروجی برای ارسال فرمان به عملگرها است که کنترل قسمت های مختلف موتورهای احتراق داخلی را برعهده دارد. ساده ترین انواع ECU کنترل مقدار سوخت پاشیده شده

1- Engine Control Unit
2- Engine Management System

3- Throttle Position Sensor
4- Water Temperature Sensor
5- Air Temperature Sensor
6- Camshaft Sensor

www.SID.ir

Archive of SID

در هر سیلندر موتور را بر عهده دارد. ECU های پیشرفته تر علاوه بر این کنترل زمان جرقه، زمان‌بندی متغیر سوپاپ ها، سطح بار اعمال شده از سوی توربوشارژر (در موتورهای توربو) و کنترل برخی تجهیزات جانبی را بر عهده دارد. برخی از مهم ترین وظایف ECU کنترل پاشش سوخت، کنترل زمان جرقه و کنترل زمان‌بندی سوپاپ ها می باشد(۴).

کالیبراسیون سیستم مدیریت موتور

کالیبراسیون به مجموعه ای از فعالیت ها گفته می شود که هدف از آن تنظیم رایانه موتور در کلیه حالات از قبیل روشن کردن، گرم کردن، سرعت آرام، رانندگی با سرعت صرفه جویانه، حرکت با سرعت تند، حرکت با حداکثر قدرت، شتاب گیری، ترمزگیری و غیره به منظور دستیابی به بهترین شرایط از نظر عملکرد، آلایندگی و مصرف سوخت در شرایط کارکرد مختلف موتور است. اجرای برنامه مدیریت موتور نیازمند استفاده از تعداد زیادی مقدار عددی معلوم است که عمل مدیریت موتور را انجام دهد. این برنامه شامل محاسبه نسبت هوا به سوخت بهینه، پیشرسی جرقه بهینه، موقعیت شیرتنظیم هوای سرعت آرام، تنظیم میزان پاشش سوخت، فاز پاشش (زمان ابتدا و انتهای پاشش) و زاویه جرقه است.

این فرآیند شامل تعداد زیادی از آزمایش های گوناگون در شرایط متفاوت است که نتیجه آن تنظیم ضرایب، ثابت ها، جداول و متغیرهای متعدد به کار گرفته شده برای مراقبت موتور است. با توجه به وجود شرایط کاری مختلف برای موتور، راهبردهای مختلفی متناسب با هر وضعیت در نظر گرفته شده است، تا در نتیجه آن کارآمدی مطلوب از موتور به دست آید. این راهبردها را می توان در گروه های زیر تفکیک نمود:

- تنظیم سرعت آرام
- تنظیم سوخت و جرقه مصرف اقتصادی
- تنظیم سوخت و جرقه حالت تمام بار
- تنظیم راه اندازی موتور سرد
- تنظیم راه اندازی موتور گرم
- تنظیم سوخت و جرقه در شرایط گذرا

به منظور تنظیم جداول، ثابت ها و ضرایب به کار گرفته شده برای هر یک از شرایط فوق لازم است تا شرایط متناسب با آن ایجاد و سپس عملیات تنظیمات مربوط انجام شود(۵).

شناسایی وضعیت موتور در نقاط کاری مختلف فعالیتی است که نگاشت موتور نامیده می شود و در آزمایشگاه موتور آن را انجام می شود. طی این فعالیت کلیه متغیرهای موتور شامل قدرت، گشتاور، مصرف سوخت و آلودگی به ازای مقادیر مختلف نسبت هوا به سوخت و آوانس جرقه در کلیه نقاط کاری دقیقا آزمایش شده و داده های آن ثبت می شود. به منظور کنترل دقیق رفتار موتور در هر شرایط کاری از یک سری جداول تنظیم در مجموعه مراقبت الکترونیکی استفاده می شود که به آن ها جداول نگاشت موتور (شکل ۱) گویند.

www.SID.ir

Archive of SID

Speed break points

Torque break points	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	5000
10	0.640	0.627	0.035	0.077	0.395	0.595	0.155	0.049
20	0.059	0.699	0.193	0.364	0.989	0.932	0.161	0.356
30	0.782	0.8	0.176	0.053	0.266	0.120	0.846	0.087
40	0.938	0.197	0.040	0.073	0.369	0.920	0.346	0.553
50	0.655	0.022	0.945	0.682	0.480	0.861	0.940	0.017
70	0.695	0.424	0.82	0.191	0.682	0.895	0.327	0.859
100	0.871	0.499	0.583	0.224	0.501	0.576	0.705	0.266
120	0.004	0.724	0.920	0.765	0.213	0.422	0.796	0.186

Calibration values

شکل ۱- ساختار نگاشت اصلی (ECU)(۶)

کالیبراسیون سیستم مدیریت موتورهای بنزینی بر پایه مدل‌سازی به روش DoE[1]

تعریف استانداردهای سخت گیرانه تر آلودگی برای خودروها یکی از مهم ترین مواردی است که باعث می شود سازندگان خودرو توجه اساسی به کالیبراسیون بهینه سیستم مدیریت موتور داشته باشند. با مقایسه یک موتور بنزینی که براساس استاندارد EURO IV تنظیم شده است با یک موتور تولید شده در دهه ۷۰ میلادی می توان نتیجه گرفت که عملکرد موتور خودروهای مدرن بسیار بهتر از انواع قدیمی نیست ولی آلاینده های تولیدی آن ها ۱۰۰ برابر کم‌تر از خودروهای قدیمی است. جدا از قوانین آلودگی شرایط بازار و گرایش مصرف کنندگان به سوی خودروهای اقتصادی و کم مصرف نیز از دلایلی است که کالیبراسیون بهینه موتورها را الزامی می سازد. همزمان با بسط و توسعه استفاده از ECU در خودرو و لزوم کنترل عملگرهای بیشتر موتور نظیر سیستم زمانبندی متغیر سوپاپ ها و همچنین توربوشارژر احتمالات بیشتری برای بررسی در سیستم مدیریت موتور مطرح می گردد. روش سنتی کالیبراسیون ECU برای چنین کاربردی نمی تواند مفید واقع گردد. یک بررسی نشان داده است که برای کالیبراسیون یک موتور بنزینی که دارای سیستم زمان‌بندی متغیر سوپاپ ها می باشد حدود ۱۰۲۴۰۰ نقطه باید اندازه گیری و تست شود که انجام این تعداد تست بسیار هزینه بر و زمان بر خواهد بود. در صورت داشتن اتاق آزمون موتور تمام خودکار این تعداد آزمایش ۳ هفته و در صورت آزمایش توسط اپراتور چند ماه زمان لازم است تا این آزمون ها انجام گردد. به همین دلیل انجام روش سنتی کالیبراسیون در مورد موتورهای جدید امکان پذیر نمی باشد. بنابراین بهترین راه حل استفاده از روش طراحی آزمایش ها (DoE) می باشد. با به کارگیری این روش کالیبراسیون نمونه ذکر شده با تغییر سرعت، بار، زمان‌بندی سوپاپ ها و زمان‌بندی پاشش نیازمند ۶۹ نقطه است و با در نظر گرفتن ۱۰ محدوده جرقه برای هر نقطه در مجموع ۶۹۰ نقطه مورد نیاز است.

به کارگیری DoE نه تنها برای کاهش تعداد اندازه گیری ها مفید است، بلکه باعث بهینه شدن کالیبراسیون و ایجاد یک مدل منطبق با رفتار موتور واقعی می شود. این مدل این امکان را فراهم می‌سازد که رفتار موتور در مقابل برخی پارامترهای ورودی شبیه سازی شود. بنابراین می توان کالیبراسیون موتور را از اتاق های تست موتور به رایانه منتقل نمود و این امر به معنای کاهش هزینه ها و صرفه جویی در زمان اندازه گیری است.

به طور خلاصه می توان گفت که هدف استفاده از DoE در این تحقیق عبارت است از:

1- Design of Experiment

www.SID.ir

Archive of SID

- دستیابی به بهترین تعامل بین عملکرد مصرف سوخت و آلودگی
- افزایش ابعاد کالیبراسیون موتور از طریق به کارگیری وسیع سیستم های جدید با درجه بیشتر آزادی
- رعایت قوانین جدید آلودگی و مصرف سوخت
- حداقل نمودن زمان مورد نیاز و هزینه های کالیبراسیون

در زیر مراحل کالیبراسیون موتور با استفاده از DoE توضیح داده خواهد شد.سپس مدل ارایه شده با جزئیات بیشتری شامل برخی نکات آماری و ریاضی بررسی و در نهایت محدودیت های روش مدل سازی بیان خواهد شد (۶) .

مواد و روش ها

فرآیند کالیبراسیون با استفاده از DoE مستلزم رایانه، اتاق تست و تجهیزات شاسی دینامومتر می باشد. گام اول درک نیازمندی ها و الزامات اندازه گیری است. این نیازمندی ها شامل ساختار آزمون، شناسایی امکانات آزمون مورد نظرو شرایط و داده هایی است که در موتور مورد نظر باید اندازه گیری شوند. گام بعدی تعیین ورودی های مستقل و انتخاب ساختار مدل مناسب است. بدین منظور یک اندازه گیری ابتدایی باید انجام پذیرد تا حدود و بازه های متغیر ورودی ها مشخص شود. سپس امکان تعیین فضای طرح و اندازه گیری ها در آزمایشگاه موتور فراهم می آید. پس از انجام آزمون ها باید داده های به دست آمده تحلیل و ارزیابی شوند. در صورتی که داده های تست مورد تایید قرار نگرفتند، فضای طرح دوباره تعیین شده و آزمون بار دیگر تکرار می شود. در صورت تایید مدل، آمارهای آن مورد بازبینی قرار می گیرد تا از دقت آن اطمینان حاصل شود. پس از اطمینان از پایداری مدل می توان از آن استفاده نمود. هدف از بهینه سازی یافتن تنظیماتی است که باعث کاهش مصرف سوخت، کاهش آلودگی و افزایش عملکرد می گردد. به منظور چک نمودن عملکرد بهینه کالیبراسیون، تست موتور در آزمایشگاه ضروری است. پس از تایید بهینه بودن کالیبراسیون امکان آزمون آلودگی فراهم می آید.

ساخت مدل

در این قسمت هدف ایجاد مدلی است که قادر به شبیه سازی رفتار موتور در برابر تغییر ورودی های تاثیر گذار آن باشد. سپس با پیدا کردن نقاط و تنظیمات بهینه سعی در دسترسی به بهترین حالت ممکن از جهات کاهش مصرف سوخت و آلایندگی و افزایش بازده موتور می شود.

برای این منظور از نرم افزار جامع MATLAB ویرایش R2006R و زیر مجموعه این نرم افزار برنامه MBC MODEL جهت طراحی مدل استفاده شده است.

موتور مورد نظر که از اطلاعات آن برای ایجاد مدل استفاده می شود، یک موتور چهار سیلندر بنزینی با حجم موتور ۱۸۰۰ سی سی و مجهز به سیستم زمان‌بندی متغیر سوپاپ ها می باشد.

در این راستا نخستین گام تعیین تعداد سطوح مدل است. عموماً برای موتورهای بنزینی از مدل های دو مرحله ای استفاده می شود. دلایل این امر حساسیت و تاثیر گذاری میزان پیش رسی جرقه روی مشخصه های خروجی موتور و همچنین غیر قابل پیش بینی بودن میزان تغییرات پیش رسی جرقه به دلیل احتراق ناقص حاصل از کوبش می باشد. اما در صورت شناخت کامل رفتار موتور امکان استفاده از مدل یک مرحله ای نیز وجود دارد. روش کار بدین صورت است که فضای آزمون مطابق مدل دو مرحله ای با حذف کردن متغیر محلی (که در این جا زاویه پیش‌رسی جرقه است) تعیین می گردد و حتی آزمون نیز بر اساس روش دو مرحله ای صورت می گیرد. اما پس از انجام آزمون داده ها بر اساس زاویه پیش‌رسی جرقه بالاترین گشتاور، در صورتی که این نقطه در محدوده کوبش نباشد، انتخاب شده و سپس مدل یک مرحله ای بر اساس داده های فیلتر شده و با کیفیت مطلوب ساخته می شود. بر این اساس در ادامه کار مدل یک مرحله ای انتخاب می‌شود.

دومین گام، شناسایی ورودی های مدل است. در این مرحله لازم است که عوامل موثر بر روی پارامترهای خروجی مدل تعیین گردد. برخی از این عوامل عبارت از دور موتور، بار (شارژ) موتور، نسبت هوا به سوخت، زمان‌بندی جرقه،

www.SID.ir

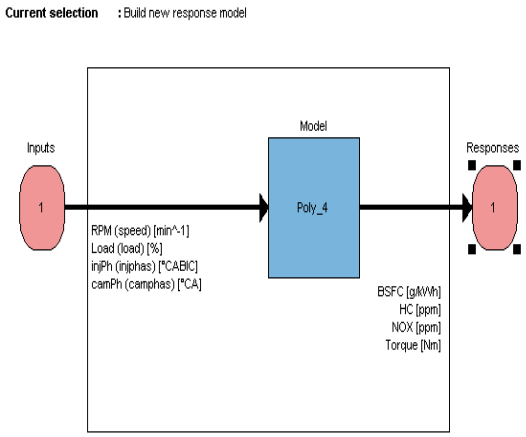
Archive of SID

زمان‌بندی پاشش سوخت، میزان EGR[1] ، موقعیت توربوشارژر، زمان‌بندی سوپاپ ها، نوع سوخت، دمای موتور، دمـای هـــوای ورودی می باشند.

بـا اسـتفاده از تجربیـات قبلـی مـی تـوان بـه میـزان تاثیرگذاری هر یک از پارامترهای ورودی پـی بـرد و در صـورت امکان، تعدادی از آن ها را از مدل حذف نمود. باید توجه داشت که کم شدن تعداد ورودی ها به صورت مسـتقیم باعـث کـاهش تعداد آزمایش ها و در نتیجـه صـرفه جـویی در وقـت و هزینـه خواهد شد. شایان ذکـر اسـت کـه سـاخت مـدل بـرای شـرایط استوکیومتریک (λ=۱) در نظر گرفته شده است و در این صورت نسبت هوا به سوخت از لیست ورودی های مدل خارج می شود. با در نظر گرفتن همین تجربیات، ورودی های مدل شامل چهار گزینه دور موتور، بار موتور ،زمان پاشش سـوخت و زمـان‌بنـدی سوپاپ ها تعیین گردید.

گام بعدی مشخص کردن نوع مدل است. تجربه نشـان داده است که در مورد کاربردهای موتوری سـاختار چنـد جملـه ای درجه ۳ تا ۶ مناسب می باشد. در مدل سازی موتور بنزینـی مورد نظر، مـدل درجـه ۴ انتخـاب گردیـد. ایـن مـدل از دقـت مناسبی برخوردار بوده و نیاز به انجام آزمایش های زیادی ندارد. در صورتی که از روش دو مرحله ای اسـتفاده شـده بـود، مـدل محلی درجه ۳ انتخاب می شد.

در گام بعد فضای آزمـون بایـد تعیـین شـود. در ایـن قسمت مدلی انتخـاب مـی گـردد کـه در آن نقـاط بـه صـورت یکنواخـت در فضـای طـرح پراکنـده گـردد. در ایـن بخـش بـا مشخص شدن تعداد ورودی ها و درجه مدل تعداد نقـاط مـورد نظر نیز به دست می آید که باید بـا پـیش بینـی امکـان حـذف نقاط خارج از محدوده، بنا به تجربه تعداد نقـاط را افـزایش داد. (شکل ۲)



شکل ۲- مدل یک مرحله ای موتور و ورودی ها و خروجی های آن در نرم افزار MBC-MODEL

آخرین گام در ساخت مدل تعیین خروجی های مـدل اسـت. خروجـی هـای مـورد انتظـار مـدل شـامل پارامترهـای عملکردی، مصرف سوخت و آلودگی است. در ایـن مـدل چهـار فاکتور گشتاور، مصرف مخصوص سوخت، اکسیدهای نیتروژن و هیدروکربن های نسوخته موتور به عنوان خروجی در نظر گرفته می شود. با تعیین این عوامل مدل اولیـه سـاخته شـده و نقـاط مورد نیاز جهت انجام آزمون هـای مـــوتـــور مشـخص مـی گردد. (شکل های ۳ و ۴) همان گونه که قبلاً اشاره گردید، ایـن تعداد آزمون بسیار کم تر از تعداد آزمون هایی است کـه بـدون استفاده از روش DoE باید انجام می پذیرفت. اما با وجود قلیل بودن تقریبا تمام فضای آزمون را شامل می شود.

حال می باید بر اساس این نقاط آزمـون هـای مـورد نظـر را در اتاق آزمون موتور انجام داد.

1- Exhaust Gas Recycle

www.SID.ir

Archive of SID

Model for y

Coding

speed: [1050,4051] → speed: [-1,1]

load: [13.24,71.91] → load: [-1,1]

injphas: [181,427] → injphas: [-1,1]

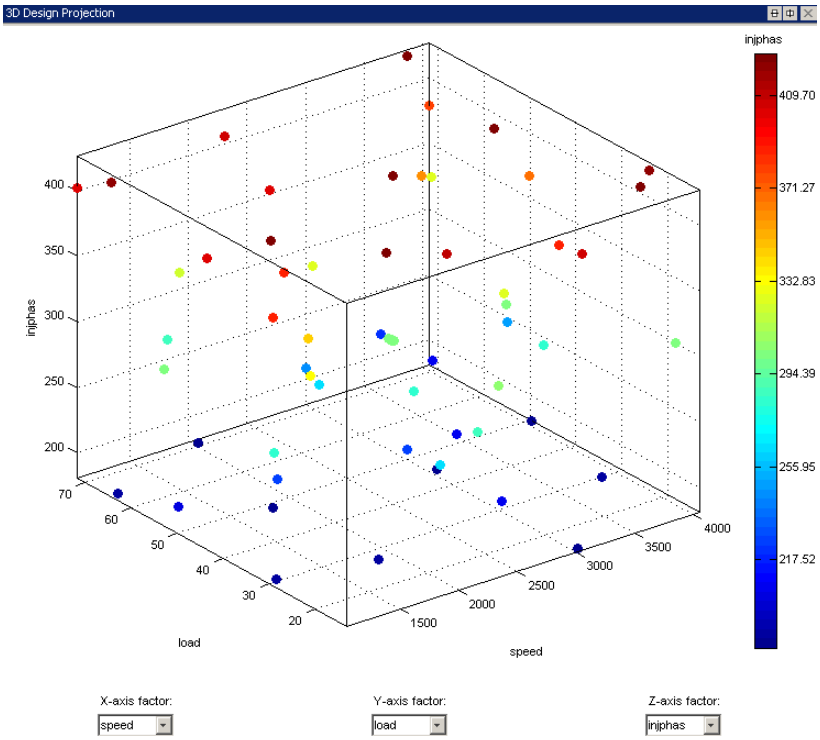
camphas: [-38.59,1.804] → camphas: [-1,1]

f(speed^4, load^4, injphas^4, camphas^4)

$1 + 2*speed + 17*load + 27*injphas + 33*camphas + 3*speed^2 + 8*speed*load + 12*speed*injphas + 15*speed*camphas + 18*load^2 + 22*load*injphas + 25*load*camphas + 28*injphas^2 + 31*injphas*camphas + 34*camphas^2 + 4*speed^3 + 5*speed^2*load + 6*speed^2*injphas + 7*speed^2*camphas + 9*speed*load^2 + 10*speed*load*injphas + 11*speed*load*camphas + 13*speed*injphas^2 + 14*speed*injphas*camphas + 16*speed*camphas^2 + 19*load^3 + 20*load^2*injphas + 21*load^2*camphas + 23*load*injphas^2 + 24*load*injphas*camphas + 26*load*camphas^2 + 29*injphas^3 + 30*injphas^2*camphas + 32*injphas*camphas^2 + 35*camphas^3 + 36*speed^4 + 37*load^4 + 38*injphas^4 + 39*camphas^4$

شکل ۳- مدل ساخته شده بر اساس فرضیات ارایه شده به نرم افزار MBC-MODEL

پس از انجام آزمون ها باید نتایج آن ها را برای تعیین ضرایب مدل وارد نمود و نسبت به صحه گذاری مقادیر آن ها اقدام کرد. یکی از اقداماتی که برای صحه گذاری نتایج آزمون ها باید انجام داد، حذف نتایجی است که در آن مقدار $\lambda<$٪۹۹ است. زیرا در این شرایط واکنشگر امکان کارکرد مناسب را از دست داده و میزان آلاینده ها بیشتر از حد مجاز خواهد شد.



شکل ۴- نحوه توزیع نقاط در روش DoE به وسیله نرم افزار MBC-MODEL

www.SID.ir

Archive of SID

حال می توان شرایط هرکدام از خروجی ها را مشاهده و نسبت به حذف نقاط خارج از محدوده اقدام نمود. باید توجه داشت که حذف این نقاط نباید به صورت بی رویه باشد. به عنوان مثال حذف نقاط خارج از محدوده ای که در حدود مرزی داده ها قرار دارند، چندان مناسب نیست. زیرا این عمل باعث می گردد که مدل در نقاط مرزی و گوشه ها فاقد داده بوده و دقت خود را از دست بدهد.

گام بعد تعیین محدودیت پارامترهای ورودی است. در حالت عادی محدودیت پارامترهای ورودی از حدودی که از انجام آزمون به دست آمده است، تعیین می شود. این امر بدین منظور صورت می گیرد که اگر نقطه ای به مدل داده شود که خارج از محدوده عملکرد مدل باشد ، پاسخ تخمینی توسط مدل از اعتبار ساقط گردد.

در این مرحله ساخت مدل به پایان رسیده است و باید نسبت به بهینه کردن آن اقدام نمود.

بهینه سازی مدل موتور

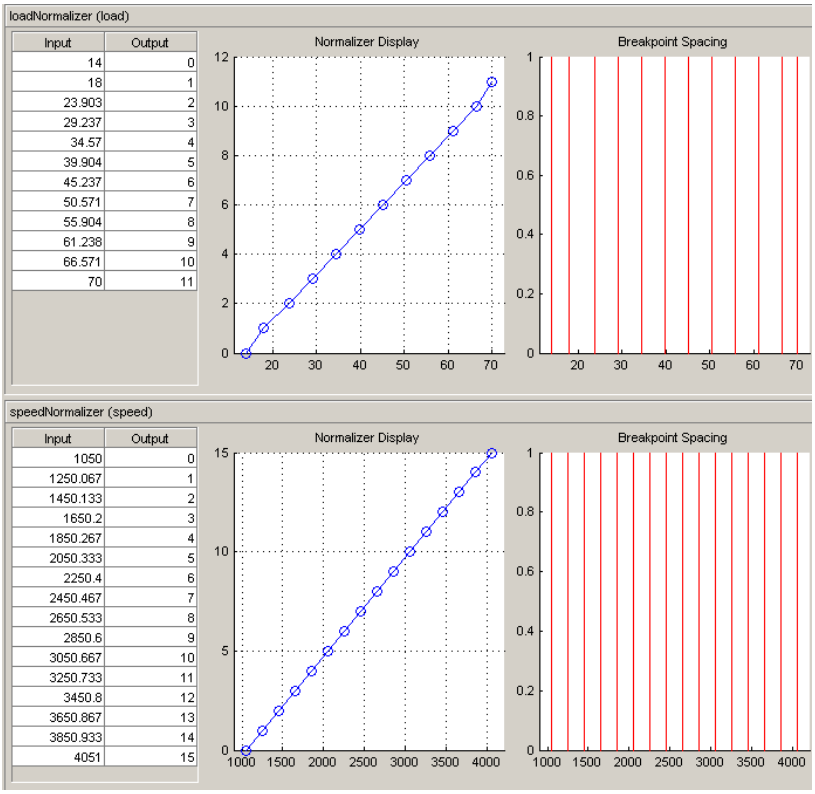
هدف نهایی کالیبراسیون سیستم مدیریت موتور، بهبود عملکرد آن و کمینه کردن پارامترهایی نظیر مصرف سوخت و آلاینده های خروجی است. نکته مهمی که در این میان وجود دارد تعارض بین این اهداف است. به صورتی که معمولاً بهینه سازی پارامترهایی نظیر گشتاور موتور و مصرف سوخت باعث افزایش آلاینده های خروجی می شود، یا این که کاهش آلاینده ای نظیر HC باعث افزایش آلاینده دیگری نظیر NO_X خواهد شد. همچنین برخی اوقات این عمل باعث ورود موتور به نواحی غیر مجاز مانند محدوده کوبش می گردد. از این رو کالیبره کردن موتور امری بسیار حساس بوده و نیاز به تجربه زیاد در شناخت موتور و نیازهای آن و همچنین آشنایی با مقررات محدود کننده مصرف سوخت و آلاینده های خروجی دارد. یکی از این حساسیت ها شناخت محدوده هایی از عملکرد موتور است که در آن میزان انتشار آلاینده ها و مصرف سوخت در حد مقادیر زیر استاندارد باقی می ماند. در بحث کالیبره نمودن باید توجه داشت که معمولاً دو پارامتر دور و بار موتور تحت تاثیر شرایط رانندگی و جاده می‌باشند و موتور با تغییر شرایط پاشش سوخت و زمان‌بندی سوپاپ ها سعی می کند که بهترین وضعیت رانندگی را فراهم آورد. (قبلاً بیان شد که به علت این که محدوده مدل مورد نظر در نواحی نیمه بار است ، نسبت هوا به سوخت همواره در حدود استوکیومتریک در نظر گرفته شده و این پارامتر از لیست ورودی ها حذف گردیده است) برای انجام این منظور از یکی دیگر از نرم افزارهای جانبی MATLAB به نام CAGE استفاده شده است.

برای انجام این امر ابتدا مدلی که در مرحله قبل ساخته شد به نرم افزار معرفی گردید. با توجه به نیاز به تنظیم دو پارامتر پاشش سوخت و زمان‌بندی سوپاپ ها، در این مرحله دو جدول جدید تهیه شد و با توجه به تعداد پارامترهای نیازمند به تنظیم، تعداد جداول نیز متناسب با آن افزایش یافت.

سپس در هر یک از جداول مزبور پارامتر قابل تغییر مشخص گردید. در این مرحله لازم است که نقاط مهم در هر جدول شناسایی شوند. معمولاً کارشناسان موتور برخی نقاط کلیدی خاص را برای کالیبراسیون موتور مورد استفاده قرار می دهند. از جمله این نقاط محل هایی است که منحنی بازده حجمی در آن محدوده رفتار خطی دارد. برای پیدا کردن این نقاط در اتاق تست با بارهای مختلف موتور آزمایش شده و بازده حجمی آن اندازه گیری می شود. سپس ناحیه هایی که در آن بازده حجمی به صورت خطی است شناسایی شده و دو نقطه مرزی آن به عنوان نقاط مهم انتخاب می گردد. در این تحقیق با توجه به عدم امکان انجام تست بازده حجمی، از نقاط انتخابی نرم افزار استفاده می شود. توسط نرم افزار محدوده پارامترهای مورد بررسی به تعداد نواحی مشخصی تقسیم گردیده و از این طریق نقاط انتخابی به دست آمده است. تعداد این نقاط منطبق با تعداد خانه های جدول ECU است (شکل ۵).

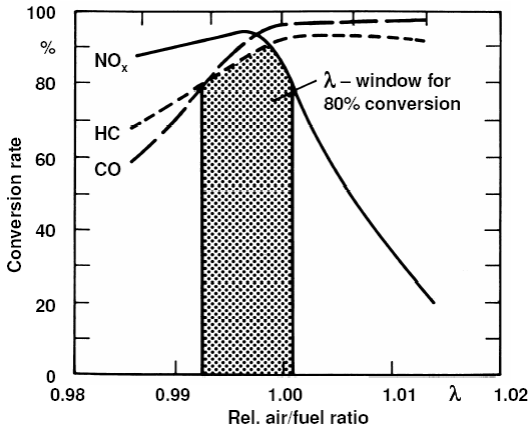
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۵- نحوه تعیین نقاط انتخابی مدل توسط نرم افزار CAGE

با تنظیمات انجام یافته در این مرحله دو جدول مشابه جداول موجود در برنامه ECU، تشکیل شده و در قسمت پایین این جداول منحنی های مربوط به سه پارامتر مورد نظر پدید می آید. با توجه به این که منحنی های ایجاد HC و CO نسبت به رفتار موتور کاملاً مشابه می باشد، در این مرحله تنها به بررسی وضعیت HC پرداخته می شود(شکل ۶).

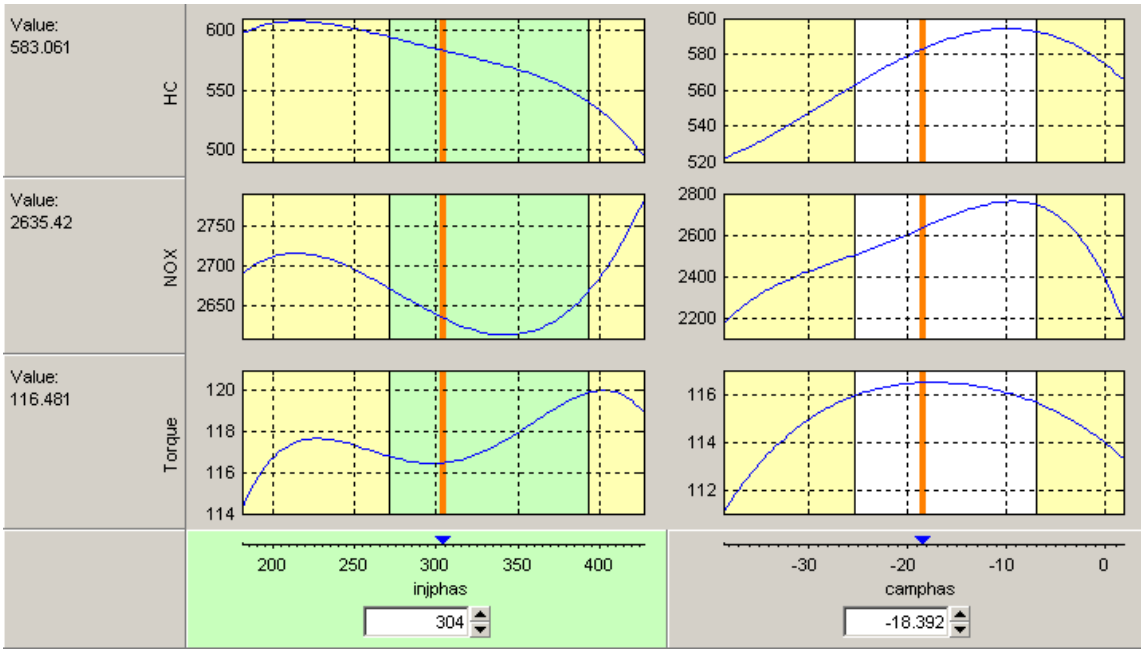


شکل ۶- میزان تغییرات آلاینده های مختلف در تقابل با نسبت هوا به سوخت

حال لازم است با علم به نیازهای موتور و محدودیت‌های قانونی مصرف سوخت و آلاینده های خروجی نسبت به تنظیم دو پارامتر قابل تنظیم (زمان پاشش و زمان‌بندی سوپاپ ها) اقدام گردد. این تنظیمات می تواند برای کلیه نقاط جدول انجام شود. اما در صورت لزوم پس از تنظیم چند نقطه، می توان توسط نرم افزار و از طریق درون‌یابی آن را به کلیه نقاط جدول بسط داد (شکل ۷). در مرحله تنظیمات برنامه با توجه به محدودیت هایی که در آزمون مشاهده شده است در برخی نقاط (که معمولاً در گوشه ها قرار دارند) بازه تغییرات بسیار محدود می گردد. حتی در برخی اوقات در یک نقطه کلا اعلام غیر معتبر بودن مدل را می نماید.

www.SID.ir

Archive of SID



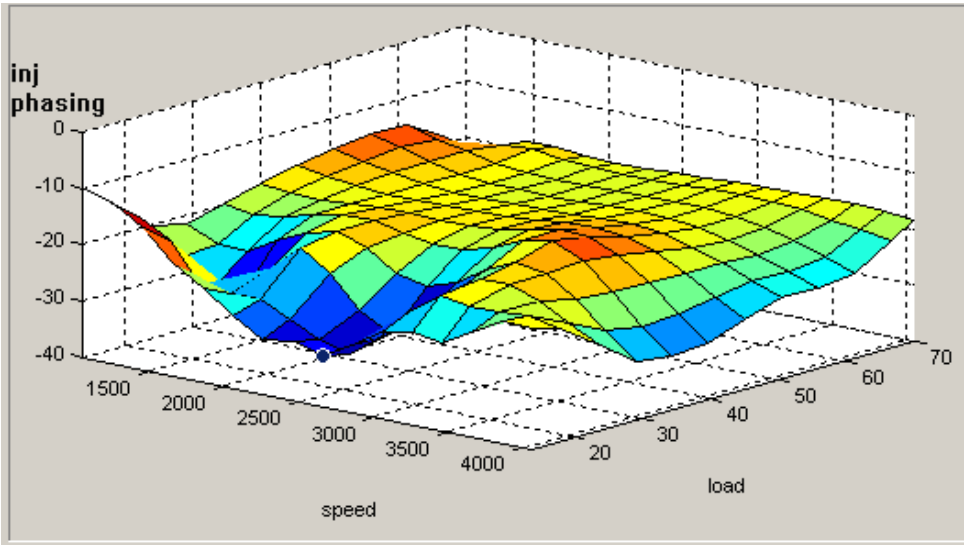
شکل ۷- نمودارهای تنظیم مقادیر گشتاور ، *HC* و NO_X توسط نرم افزار CAGE

در این بحث مهم ترین نکته تعیین نقاطی است که در آن ناحیه هم عملکرد موتور مناسب باشد و هم مصرف سوخت و میزان انتشار آلاینده ها کم باشد. بنابراین باید با شناخت مناسب از موتور، نقاطی را که در آن عملکرد اولویت دارد شناسایی نموده و تنظیمات بر این اساس انجام گیرد. تنظیمات انجام یافته در جدول به صورت شماتیک توسط نرم افزار نمایش داده می شود. در این مرحله می توان دو نمودار بر اساس پارامترهای قابل تنظیم ترسیم نمود.

یکی از نکاتی که به هنگام تنظیم باید رعایت گردد و در این مرحله مشاهده می شود، اجتناب از ایجاد نقاط شکست در منحنی است. وجود این نقاط به معنی تنظیم دو نقطه نزدیک هم در جدول با داده های کاملاً متفاوت است. به هنگام تنظیم، برخی پارامترها دارای دو نقطه بیشینه می باشد که با توجه به وضعیت پارامترهای دیگر، یک نقطه انتخاب می شود. این امر باعث می شود که وضعیت دو نقطه نزدیک به هم تفاوت زیاد داشته و در نمودار به صورت پستی و بلندی نشان داده شوند. در صورتی که جدول به همین صورت به ECU داده شود، در هنگام رانندگی و گذر از این نقاط ECU فرمان های فوق را به موتور می دهد، به عنوان مثال وضعیت پاشش سوخت کاملاً تغییر خواهد نمود و این موضوع بر حرکت خودرو و در نتیجه آسایش سرنشینان تاثیر خواهد گذاشت. از این رو باید تا حد امکان از ایجاد این شرایط اجتناب نمود (شکل ۸).

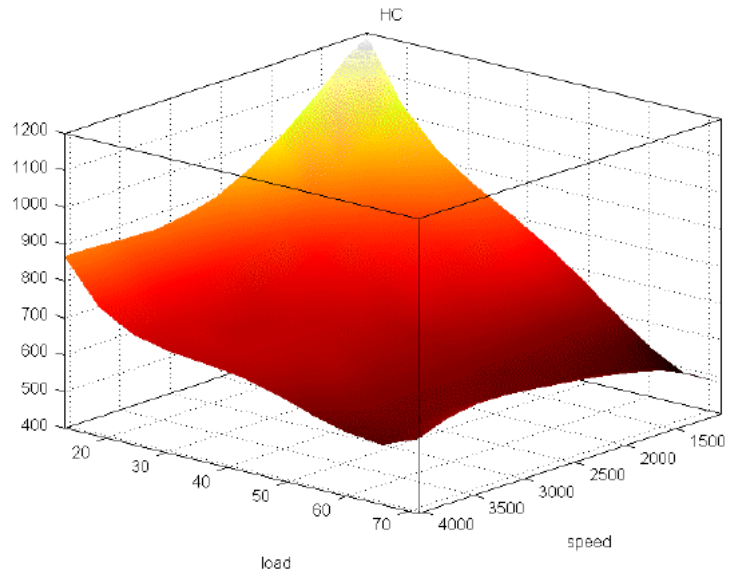
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸- نمونه ای از نمودار تغییرات زمانبندی پاشش اصلاح شده توسط نرم افزار CAGE

همچنین می توان وضعیت هرکدام از خروجی های مدل را بر اساس ورودی ها در نموداری مشاهده کرد. برای این کار لازم است که دو ورودی به دلخواه تعیین شده و به ورودی سوم عدد ثابتی داده شود تا بتوان نمودار مربوطه را مشاهده نمود. به عنوان مثال شکل ۹ میزان انتشار HC را بر اساس تغییرات بار و سرعت نشان می دهد. همان گونه که در شکل ملاحظه می شود میزان انتشار HC در وضعیت دور و بار کم، زیاد بوده و با افزایش این متغیرها وضعیت مناسبی پیدا می کند.



شکل ۹- تحلیل میزان انتشار HC بر اساس تغییرات بار و سرعت توسط نرم افزار CAGE

www.SID.ir

Archive of SID

در پایان دو جدول متغیرهای قابل تنظیم به وسیله ECU (که برای موتور مورد نظر در این تحقیق زمان پاشش سوخت و زمان‌بندی سوپاپ ها بود) بهینه شده و آماده ارسال به ECU می باشد. اما این مرحله، پایان کار نیست. ECU با راهبرد تعیین شده توسط این جدول روی خودرو نصب شده و تست قابلیت رانش آن انجام می شود و با مقایسه شرایط آزمایشگاهی و شرایط واقعی، تصحیحات لازم بر روی جدول اعمال شده و جدول نهایی به ECU داده می شود (جدول ۲).

ECU در هر لحظه به وسیله حسگرها وضعیت موتور را با یک یا چند خانه جدول تطبیق داده و در صورت لزوم با میان‌یابی، بهترین زمان پاشش و وضعیت زمان‌بندی سوپاپ را انتخاب می نماید. بدین ترتیب موتور می تواند شرایط بهینه از نظر میزان مصرف سوخت، آلاینده های خروجی و عملکرد را در شرایط ثابت داشته باشد.

جدول ۲- جدول وضعیت زمان بندی سوپاپ نسبت به تغییرات بار و دور موتور

Project item: camphasing

spe... \ load	14	18	23.903	29.237	34.57	39.904	45.237	50.571	55.904	61.238	66.571	70
1050	-24.036	-17.852	-8.335	0.197	8.256	15.825	23.064	30.118	37.081	44.006	50.925	55.376
1250.067	-24.345	-18.159	-8.41	0.277	8.277	15.691	22.791	29.746	36.644	43.531	50.43	54.876
1450.133	-24.528	-18.392	-8.441	0.357	8.189	15.405	22.372	29.245	36.099	42.968	49.864	54.313
1650.2	-24.507	-18.334	-8.524	0.251	7.832	14.888	21.766	28.597	35.439	42.314	49.227	53.691
1850.267	-24.416	-18.307	-8.846	-0.455	7.077	14.098	20.96	27.8	34.667	41.577	48.527	53.015
2050.333	-24.373	-18.421	-9.401	-1.419	6.023	13.068	19.975	26.871	33.799	40.769	47.777	52.298
2250.4	-24.4	-18.653	-10.079	-2.473	4.822	11.88	18.859	25.845	32.863	39.915	46.993	51.554
2450.467	-24.468	-18.94	-10.791	-3.54	3.572	10.62	17.68	24.774	31.898	39.041	46.198	50.803
2650.533	-24.532	-19.217	-11.467	-4.561	2.345	9.366	16.508	23.714	30.946	38.182	45.416	50.064
2850.6	-24.548	-19.425	-12.038	-5.473	1.204	8.196	15.419	22.727	30.052	37.369	44.672	49.358
3050.667	-24.481	-19.512	-12.436	-6.197	0.224	7.203	14.492	21.869	29.258	36.632	43.986	48.702
3250.733	-24.314	-19.45	-12.609	-6.623	-0.455	6.509	13.796	21.183	28.592	35.994	43.376	48.11
3450.8	-24.059	-19.245	-12.552	-6.695	-0.583	6.188	13.361	20.689	28.071	35.465	42.852	47.592
3650.867	-23.768	-18.947	-12.34	-6.527	-0.447	6.151	13.156	20.375	27.692	35.049	42.417	47.152
3850.933	-23.541	-18.675	-12.104	-6.279	-0.214	6.264	13.115	20.209	27.439	34.738	42.069	46.788
4051	-23.475	-18.632	-11.951	-6.049	0.033	6.441	13.174	20.152	27.288	34.518	41.8	46.497

جمع بندی نتایج

با وجود این که بیش از هفتاد درصد آلودگی هوای شهرهای بزرگ ایران به وسیله خودروها تولید می گردد، تحقیقات کمی در این خصوص صورت پذیرفته است که از علل این امر می توان به پیچیده بودن علم موتور، گران بودن وسایل انجام تحقیق و در دسترس نبودن آن وسایل اشاره نمود. توجه به این امر می تواند اهمیت انجام این گونه تحقیقات را آشکار سازد.

در این تحقیق مدلی از موتور به وسیله نرم افزار MBC-MODEL ساخته و ورودی‌ها و خروجی های مهم در آن لحاظ گردید. سپس به وسیله نرم افزار CAGE مدل مورد نظر با توجه به خواسته های قانونی و مشتری بهینه گردید. جداول خروجی این مدل به ECU ارسال می گردد و ECU بر اساس داده های آن فرمان های لازم را به عملگرهای موتور می دهد.

دستاورد مهم این تحقیق انجام کالیبراسیون صحیح و آسان سیستم مدیریت موتور بدون پرداخت هزینه‌های بالا می باشد. با استفاده از روش DoE ، تعداد آزمون های لازم برای کالیبراسیون موتور حدود ۹۹٪ کاهش یافته و صرفه جویی زیادی در هزینه و زمان به عمل می آید، ضمن آن که دقت کار هم افزایش یافته و از بسیاری خطاهای ناخواسته جلوگیری می‌شود. دستاورد مهم دیگر این تحقیق، امکان کاهش آلاینده های خروجی موتور در صورت وضع نمودن استانداردهای سخت گیرانه تر می باشد. آخرین نتیجه این تحقیق ساخت مدل شبیه سازی عملکرد موتور است. ساخت این مدل از این رو اهمیت دارد که در صورت آشنایی با نحوه

www.SID.ir

Archive of SID

ساخت آن می توان این مدل را برای هر موتور دیگری که نتایج آزمون های موتوری آن در دست باشد، اجرا نمود و موتور مـورد نظر را کالیبره نمود.

منابع

1. http://en.wikipedia.org
2. S.Pischinger, 2006, Internal Combustion Engines (Volume 1 & 2), (Second edition)

۳. واحـد تحقیقـات مـدیریت موتـور شـرکت تحقیقـات موتور ایران خودرو ، ۱۳۸۰، جـزوه کارگـاه آموزشـی اصول طراحی مجموعه مدیریت موتور

4. D.B. Kittelson, 2005, Fuel Injection and Ignition, University Of Minnesota,
5. Kiencke Uwe & Nielsen Lars, Automotive Control Systems, 2000, Society of Automotive Engineers SAE
6. Kalantari Keivan, 2006, Development of a Multi-Stage Modeling Concept for Calibration of Passenger Vehicle Engines, Master Thesis of Aachen University

www.SID.ir