

بهینه‌سازی متغیرهای تنظیم موتورهای درونسوز با استفاده از طراحی آزمایش‌ها

امیر بختیاری*

کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس
bakhtiari.62@yahoo.com

* نویسنده مسؤل / پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۸۷/۸/۱۱

رضا برادران کاظم‌زاده

دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

کیوان کلانتری

کارشناس ارشد مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو

چکیده

در این مقاله با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش‌ها به بهینه‌سازی متغیرهای تنظیم^۱ موتور خودرو با اهداف کمیته‌سازی مصرف سوخت و آلایندگی‌های محیط زیست موتورهای درونسوز پرداخته می‌شود. تقاضای روزافزون در مورد کاهش آلایندگی‌های محیط زیست و مصرف سوخت و دیگر مشخصات موتور خودروها، منجر به پیچیدگی موتورها و سامانه‌های^۲ پایش^۳ قوای محرکه گردیده است. روش‌های سنتی تنظیم، نیازمند زمان طولانی و هزینه‌های گزاف است و تنظیم موتورهای درونسوز امروزی - با متغیرهای متعدد و در حال افزایش واحد پایش موتور^۴ به روش‌های سنتی، با نیاز به کاهش زمان توسعه قوای محرکه در تناقض است. در این مقاله، روش‌شناسی کاربردی و نمونه عملی آن برای تنظیم موتور و تعیین مقادیر بهینه پایش بر پایه الگوی رایانه‌ای، با استفاده از طراحی آزمایش‌ها و الگوسازی آماری، ارائه شده که مزایای استفاده از طراحی آزمایش‌ها^۵ و روش‌های الگوسازی آماری^۶ را در توسعه الگوهای کاربردی و با هدف کاهش زمان و هزینه آزمایش‌ها نشان می‌دهد. همچنین قاعده بهینه‌سازی برای حل مسأله چندمعیاره این تحقیق که مبنای آن ضرایب وزنی متغیر پویاست، ارائه شده که برای مسأله موردی ذکر شده، آزمون شده و نتایج آن ذکر گردیده است.

ابزاری برای کاهش زمان تنظیم موتور فراهم کرده است [۱]. کاربرد شبیه‌سازی آماری سبب شده تا تصویری از تأثیر متقابل متغیرها و نحوه اثر آن‌ها بر متغیرهای موتور به دست آید [۵ و ۷]. استفاده هم‌زمان از طراحی آزمایش‌ها و روش‌های شبیه‌سازی آماری برای برآورد الگوی متغیرهای خودرو، علاوه بر کاهش زمان و هزینه، به تنظیم بهینه موتور کمک زیادی می‌کند. نرم‌افزارهای متعددی برای خودکاری مراحل طراحی آزمایش، الگوسازی، تنظیم و ارزیابی آن نوشته شده اند که از جمله آن‌ها جعبه ابزار Calibration Based Model در نرم‌افزار توانمند Matlab است که در این تحقیق در مراحل مختلف از آن استفاده شده است.

مهمترین مزیت استفاده از این نرم‌افزارها این است که مهندسان تنظیم را قادر می‌سازد تا تأثیر متغیرها را در فضای چندبعدی مشاهده و ارزیابی کنند [۱]. تنظیمی که با این روش انجام می‌شود و روش‌هایی که در این مقاله بیان می‌گردد برای وضعیت پایدار^۱ موتور است و تنظیم شرایط خاص مانند سربالایی، موتور در حال گرم شدن و ... با آزمایش‌هایی در اتاق آزمون و یا روی خودروی در حال حرکت و به صورت مستقیم انجام می‌شود. شکل (۱) روند قانون محدودیت آلایندگی‌های تولیدی

کلیدواژه‌ها: تنظیم، طراحی آزمایش‌ها، پسروری^۷، بهینه‌سازی چندمعیاره، شبیه‌سازی آماری

۱- مقدمه

■ برای دستیابی به اهداف کمترین میزان مصرف سوخت و آلایندگی در موتور خودرو و در عین حال بیشترین گشتاور خروجی آن به تنظیمی بهینه نیازمندیم. متغیرهای متعدد خودرو و متغیرهای مختلفی که باید هم‌زمان بهینه شوند، موجب شده تا روش‌های سنتی که در آن با تغییر این متغیرها، سعی در بهینه کردن متغیرهای مختلف داشتند، با چالش جدی مواجه شوند [۱، ۲ و ۸]. تأثیر متقابل متغیرها بر هم، متعدد بودن متغیرها، حساسیت شدید متغیرها در تغییر از مقداری به مقدار دیگر و غیره، دشواری‌های این کار را نشان می‌دهد. در چند سال اخیر، طراحی آزمایش‌ها

۱- Calibration

۲- System

۳- Control

۴- Engine Control Unit (ECU)

۵- Design of Experiments (DOE)

۶- Statistical Modeling

۷- Regression

www.SID.ir

Steady State - 1

شناخته شده مانند روش تاگوچی^۹، باکس - بنکن^{۱۰}، طرح مرکب مرکزی^{۱۱} و ... از جمله این طرح های متعارف هستند[۶].

دلایل متعددی وجود دارد که استفاده از روش های متعارف در طراحی آزمایش تنظیم موتور را محدود و یا غیرممکن می کند. نخست این که با افزایش تعداد سطوح عامل و تعداد متغیرها، تعداد آزمایش ها به روش های متعارف به صورت نمایی رشد می کند، تا جایی که اجرای این آزمایش ها از لحاظ زمان و هزینه غیرممکن می شود. شکل ۴ تعداد آزمایش های مورد نیاز را برای تنظیم با طرح آزمایش کامل نشان می دهد که شامل همه ترکیب های سطوح عامل متغیرهاست.

دوم این که لزوم مقارن بودن فضای طرح در طرح های متعارف برای حفظ ویژگی هایی چون متعامد بودن، دوران پذیری و ... از دیگر محدودیت های روش های متعارف طرح آزمایش است. حال آن که در آزمایش های موتور خودرو به علت محدودیت های فضای طرح امکان ایجاد یک فضای مقارن غیرممکن است. سوم این که همان طور که گفته شد، روش های متعارف منجر به تولید الگوهای چندجمله ای حد اکثر از درجه دوم می شود، در حالی که برای الگو کردن رفتار سامانه در موتور خودرو عموماً به الگوهای چندجمله ای از درجات سه، چهار یا حتی بالاتر نیاز است، ضمن این که استفاده از الگوهای غیرخطی و از جمله شبکه ها در الگوسازی رفتار پاسخ در موتور خودرو نیز امری رایج و در برخی موارد ضروری است.

با توجه به آن چه گفته شد، روش های جدیدی در طراحی آزمایش مورد نیاز است که ضمن دارا بودن توانایی در ایجاد الگوهای خطی از درجات بالا و یا الگوهای غیرخطی، می توانند تعداد آزمایش های مورد نیاز را نیز کاهش دهند.

V-Optimal یکی از این روش هاست که به عنوان یکی از بهترین روش ها برای تنظیم خودرو شناخته شده است. در این روش حداقل تعداد نقاط طرح آزمایش را نوع و درجه الگو و تعداد متغیرهای آن تعیین می نماید. در صورت نیاز می توان نقاط اضافی را نیز به آن اضافه کرد[۱]. در واقع V-Optimal فرآیندی کمینه ساز است و در این فرآیند، آرایش نقاط فضای طرح را به گونه ای تنظیم می کند که پراکنش خطای پیش بینی به کمترین برسد. مقدار Optimal-V با این

$$V_{eff} = \frac{1}{n_C} \sum_j x_j^T (X_C^T X_C)^{-1} x_j \quad (1)$$

در این معادله X_C ، سطرهای جدول پسروری، X_C جدول پسروری و n_C تعداد نقاط نامزد در فضای طرح هستند. شکل ۵ تصویری چهاربعدی را (بعد چهارم با رنگ نقاط مشخص شده است) از فضای طرح نمایش می دهد.

در این طرح، متغیرها ۴ عدد و الگوی استفاده شده پسروری خطی از درجه ۴ است. حداقل نقاط طرح مورد نیاز در این طرح با این مشخصات، ۳۹ نقطه است که ۳۹ نقطه نیز به آن افزوده شده و در مجموع ۷۸ نقطه در این طرح، برای آزمایش ها و شبیه سازی به دست آمده است. این نقاط اضافی هم برای افزایش صحت و دقت الگو ساخته شده و هم برای حذف نقاط بردن هشته^{۱۲} از فضای طرح است.

۳- الگوسازی

موتور مطالعه شده در این تحقیق موتوری بنزینی افشانه ای ۱۸۰۰ سی سی ساخت شرکت پژو فرانسه است که قابلیت تنظیم زمان پاشش سوخت به پشت محافظه احتراق و زمان بازشدن دریچه ورود مخلوط هوا و سوخت به محافظه احتراق را دارد. در هر یک از نقاط فضای طرح به دست آمده، آزمایش ها روی این موتور و

موتور خودرو در استاندارد^۱ اروپایی را نشان می دهد که نیاز به بهینه سازی موتور را از بعد آلاینده های تولیدی مشخص می کند.

۲- تعریف مسأله

متغیرهای موتور که در این تحقیق، بررسی شده اند، عبارتند از:

- ۱- سرعت دورانی موتور (N): سرعت چرخش میل لنگ بر حسب دور بر دقیقه است.
 - ۲- بار^۲ (L): میزان گشودگی دریچه گاز (زاویه تراتل) موتور و نشان دهنده فشار هوای درون چندراهه^۳ است.
 - ۳- زمان شروع پاشش سوخت (InjPh): زاویه میل لنگ در هنگام پاشش سوخت به پشت محافظه احتراق است.
 - ۴- زمان بازشدن دریچه سوخت (CamPh): زاویه میل لنگ در زمان آغاز بازشدن دریچه محافظه احتراق است.
- البته در این موتور، زاویه پیش رسی جرعه زنی^۴ نیز متغیر است که نشان دهنده زاویه میل لنگ در هنگام جرعه زنی به وسیله شمع است، ولی در فرآیند خودکار تنظیم و در شبیه سازی استفاده نمی شود و به طور جداگانه و با جارو کردن^۵ مقادیر مختلف برای گشتاور تنظیم می شود. شکل (۲) نحوه جارو کردن زاویه جرعه زنی را بر حسب گشتاور و تعیین مقدار بهینه زاویه پیش رسی جرعه را در گشتاور بیشینه نشان می دهد.

متغیرهای پاسخ بررسی شده در این تحقیق عبارتند از:

- ۱- مقدار مصرف سوخت بر گشتاور خروجی^۶ [g/kwh] با هدف کمینه سازی
- ۲- HC: مقدار آلاینده هیدروکربن نسوخته در مجرای دود [ppm] با هدف کمینه سازی
- ۳- NOx: مجموع مقدار آلاینده های اکسیدهای نیتروژن [ppm] با هدف کمینه سازی

به طور کلی مراحل تنظیم موتور خودرو را با استفاده از طراحی آزمایش ها و بر پایه الگوسازی آماری می توان به صورت فرآیند^۷ (شکل ۳) نشان داد. همان طور که در این فرآیند نشان داده شده، به غیر از انجام آزمایش ها و اعتبارسنجی نتایج تنظیم که در آزمایشگاه موتور مجهز به لگام انجام می شود، همه مراحل تنظیم به صورت خودکار (و در محیط رایانه) انجام می گیرد.

۲- طراحی آزمایش ها

کاربرد طراحی آزمایش ها از حدود دهه سوم قرن بیستم در صنایع کشاورزی و شیمیایی آغاز شد[۶] و تاکنون در بسیاری از شاخه های علمی از مزایای آن در تحلیل سامانه ها استفاده شده، اما استفاده از آن در تنظیم موتور خودرو به کمی بیش از یک دهه اخیر باز می گردد[۱]. آن چه بیشتر به عنوان طراحی آزمایش ها شناخته شده، طرح های آزمایش متعارف^۸ با دو تا سه سطح عاملی است که منجر به تولید سطوح پاسخ چندجمله ای از درجه اول یا دوم می گردد. روش های متعارف

۱- Standard

۲- Load

۳- Manifold

۴- Spark Advance

۵- Sweep

۶- Break Specific Fuel Consumption

۷- Flowchart

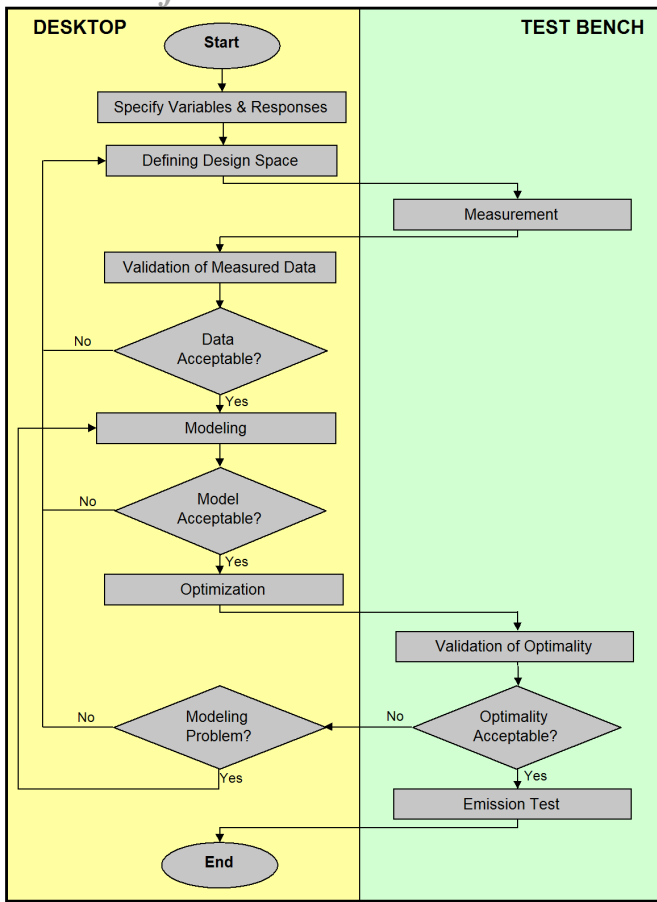
۸- Classic

۹- Taguchi Method

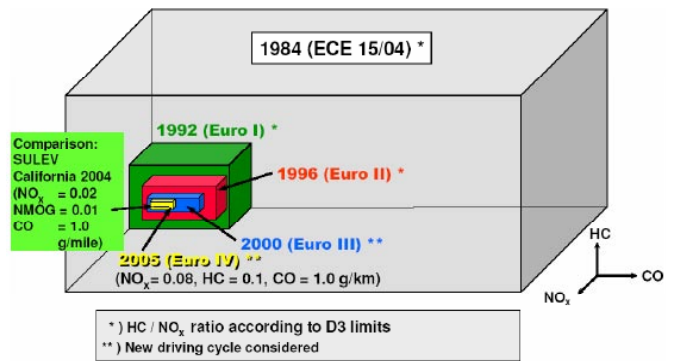
۱۰- Box-Behnken

۱۱- Central Composite Design

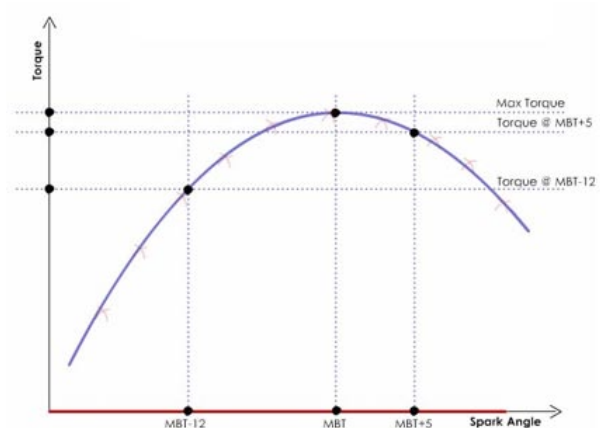
۱۲- Outliers



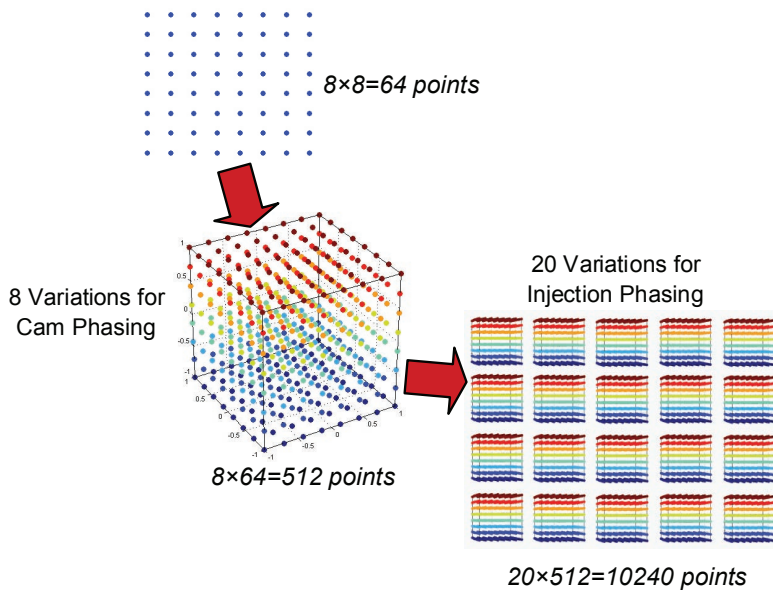
شکل ۳ فرآیند نامی مراحل تنظیم موتور با استفاده از طراحی آزمایش ها و بر پایه الگوسازی آماری [۱]



شکل ۱ روند قانون محدودیت آلاینده های تولیدی موتور خودرو در استانده اروپایی

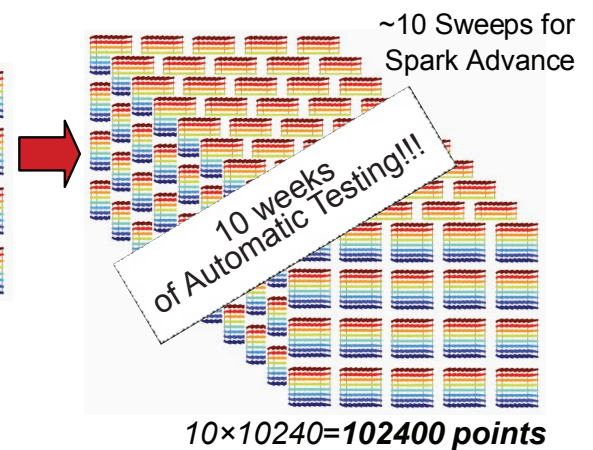


شکل ۲ جارو کردن زاویه جرقه برای یافتن نقطه بهینه آن



Aim of Calibration Task:

- Spark Advance MAP
- Cam Phasing MAP
- Injection Phasing MAP



شکل ۴ تعداد آزمایش های مورد نیاز در موتور بررسی شده به روش های معمول طراحی آزمایش، شامل همه ترکیب های سطوح عاملی

Archive of SID

در اتقاق آزمون انجام می شود و مقدار هر یک از متغیرهای پاسخ که شامل مصرف سوخت و میزان آلاینده هاست، اندازه گیری می شود. نتایج به دست آمده از آزمایش برای شبیه سازی وارد نرم افزار Matlab می شود. در این تحقیق از الگوهای پسروی که شامل ترکیب های کامل متغیرهاست، استفاده شده است. در فرآیند انتخاب درجه الگو باید به دو مسأله به طور همزمان توجه داشت که برآیند آن ها درجه الگو را تعیین می کند. اولاً درجه الگو را آن قدر اضافه می کنیم تا برازش مناسبی صورت گیرد و پاسخ الگو به نقاط اعتبارسنجی^۱ نزدیک به مقدار واقعی آن باشد و در عین حال، الگو بیش از حد به داده های آزمایش برازش نشود. Over (Fitting) و قابلیت تبیین فرآیند را در نقاط غیرآزمایشی از دست ندهد. در مجموع، پاسخ الگو در نقاط اعتبارسنجی شاخص مناسبی برای انتخاب الگو از بین درجات مختلف است. با مقایسه الگوها از درجات مختلف در این تحقیق برای هر یک از متغیرهای پاسخ الگو پسروی خطی درجه چهارم که جملات اثرهای متقابل آن تا درجه سوم هستند، به عنوان بهترین الگو به دست آمد.

معادله جدول پسروی خطی چندمتغیره که از آن برای الگوسازی استفاده شده، به این شرح است:

$$Y = X.b + e \quad (2)$$

$$b = (X'X)^{-1} X'Y \quad (3)$$

هر یک از این الگوها به طور جداگانه بررسی و تحلیل آماری شده اند و نقاط دورافتاده از همه مشاهدات حذف می شود. ضریب تعیین^۲ و ضریب تعیین تعدیل شده برای الگوهای برازش شده به شرح جدول (۱) است. پیوست (۲) رویه های سه بعدی برازش شده را در دو نقطه از نگاهت موتور برای هر چهار الگو نشان می دهد. همچنین در ادامه الگوی برازش شده برای تابع پاسخ BSFC برای نمونه ارائه شده است. در این الگوی ریاضی متغیرهای X_1 تا X_4 به ترتیب نشان دهنده دور موتور، بار، زاویه پاشش سوخت و زاویه بازشدن دریچه سوخت است:

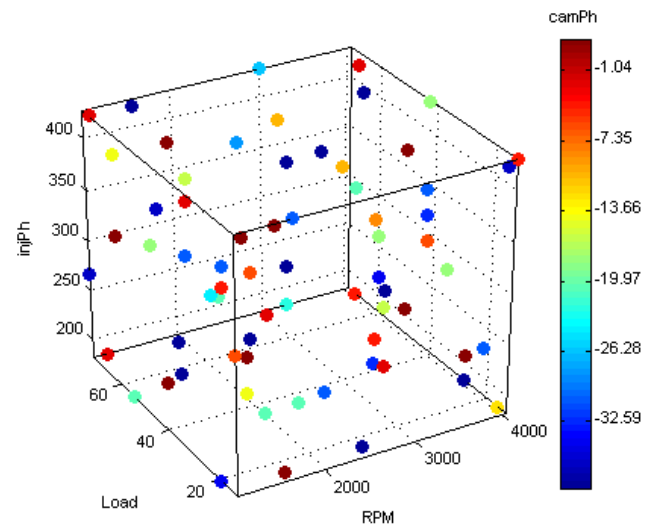
$$\begin{aligned} BSFC = & 280.8247 + 46.47 \times X_1 + 57.06 \times X_2 + 1.64 \times X_3 - 2.28 \times X_4 - 80.73 \times X_1 \times X_2 - 70.36 \times X_1 \times X_3 - 41.76 \times X_1 \times X_4 - 11.53 \times X_1 \times X_4 - 151.74 \times X_2 \times X_3 + 24.38 \times X_2 \times X_4 + 61.22 \times X_2 \times X_4 + 41.97 \times X_3 \times X_4 + 22.27 \times X_3 \times X_4 + 140.36 \times X_4 \times X_4 - 15.30 \times X_3 - 110.71 \times X_1 \times X_2 - 53.45 \times X_1 \times X_3 - 17.16 \times X_1 \times X_4 + 16.81 \times X_1 \times X_2 + 43.25 \times X_1 \times X_3 - 5.76 \times X_1 \times X_4 - 1.99 \times X_2 \times X_3 - 30.57 \times X_2 \times X_4 + 52.92 \times X_3 \times X_4 - 356.40 \times X_3 \times X_4 - 52.71 \times X_2 \times X_3 - 40.24 \times X_2 \times X_4 - 46.61 \times X_2 \times X_3 - 6.81 \times X_2 \times X_4 - 1.05 \times X_2 \times X_4 + 50.65 \times X_3 \times X_4 + 31.13 \times X_3 \times X_4 - 34.50 \times X_3 \times X_4 + 540.11 \times X_4 - 58.14 \times X_4 - 9.71 \times X_4 + 133.17 \times X_4 + 34 - 145.65 \times X_4 \end{aligned}$$

جدول ۱ مقادیر ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده برای الگوهای برازش شده

Response Model	R^2	$R^2_{Adjusted}$
BSFC	۹۹.۳۹٪	۹۹.۳۵٪
HC	۹۸.۲۰٪	۹۸.۰۸٪
NO _x	۹۹.۳۴٪	۹۹.۳۹٪

Validation Points -1
Coefficient of Determination -2

4D Design Projection for "V-Optimal Design"



شکل ۵ فضای طرح ایجاد شده برای مسأله تحقیق به روش V-Optimal

۴- بهینه‌سازی

مهم‌ترین فعالیت در فرآیند تنظیم، بهینه‌سازی است و عبارت از تعیین نقطه بهینه مقادیر متغیرهای پایش پذیر در نقاط مختلف نگاشت^۱ است، به طوری که متغیرهای پاسخ، بهینه باشند. نگاشت یک موتور را ترکیب‌های سطوح مختلف سرعت دورانی و بار موتور تشکیل می‌دهد. به عبارت دیگر در موتوری که متغیرهای پایش پذیر آن زاویه ورود سوخت و زاویه پاشش سوخت هستند. برای بهینه‌سازی باید به ازای هر سرعت دورانی و بار مشخص، مقدار این متغیرهای پایش پذیر را در نقطه کمترین مصرف سوخت و آلاینده‌ها تنظیم کرد. بنابراین نخست باید عمل بهینه‌سازی برای تک تک نقاط نگاشت انجام شود و دوم این که با یک مسأله بهینه‌سازی چندمعیاره مواجه هستیم که لزوماً نقاط بهینه متغیرهای مختلف پاسخ در یک محل اتفاق نمی‌افتد.

الگوی ریاضی این مسأله به این صورت است:

$$\text{Min } \{F_{\text{BSFC}}\}, \text{Min } \{F_{\text{HC}}\}, \text{Min } \{F_{\text{NOx}}\}$$

Subject to:

$$c(x) \leq 0$$

$$\text{ceq}(x) = 0$$

$$\text{Aeq} \cdot x = \text{beq}$$

$$\text{A} \cdot x \leq \text{b}$$

$$\text{lb} \leq x \leq \text{ub}$$

در این الگو، محدودیت‌های غیرخطی متعلق به حدود فضای طرح مسأله است و با برازش یک رویه به نقاط گوشه‌ای فضای طرح به دست می‌آید. محدودیت‌های خطی که در این مسأله از نوع مساوی هستند، برای تثبیت متغیرهای دور و بار نگاشت موتور در هر مرحله از بهینه‌سازی، در آن نقطه از نگاشت استفاده می‌شوند و در نهایت حدود بالا و پایین برای پایش متغیرها در محدوده قابل تغییر استفاده می‌شوند.

۵- بهینه‌سازی مسائل چندهدفه

روش معمول در حل این مسائل، روش تشکیل تابع هزینه است که در آن تابع هزینه عبارت است از ترکیب خطی توابع پاسخ با ضرایب وزنی ثابت که در ابتدای بهینه‌سازی تعیین می‌شود. مشکل اصلی در این روش، ثابت بودن وزن هر یک از توابع در تابع هزینه است. در این تحقیق، ما روشی برای تعیین ضرایب به صورت پویا و بر حسب شرایط مسأله در نقاط مختلف کارکرد موتور ارائه کرده ایم که در ادامه، می‌آید.

قاعده کلی این روش به این شرح است:

۵-۱- تشکیل نگاشت موتور

سطوح شکست متغیرهای سرعت دورانی و بار موتور در این مرحله تعیین می‌شود. جدول ترکیب سطوح این متغیرها نقاطی را مشخص می‌کند که بهینه‌سازی متغیرهای پایش پذیر که در این تحقیق، زاویه پاشش سوخت و زاویه ورود سوخت هستند، در آن نقاط انجام می‌شود. نخستین نقطه از نگاشت به عنوان نقطه آغاز بهینه‌سازی انتخاب می‌شود.

۵-۲- بهینه‌سازی تک تک متغیرهای پاسخ به صورت جداگانه

در این مرحله هر یک از توابع پاسخ با استفاده از روش‌های جستجوگر مانند روش نیوتنی، بهینه‌سازی می‌شوند و مقدار متغیرها در این نقاط بهینه تعیین می‌شود.

۵-۳- مقایسه پاسخ‌های به دست آمده از بهینه‌سازی

مهم‌ترین متغیر در صنعت امروز خودروسازی، متغیر مصرف سوخت است. همان‌طور که میزان آلاینده‌ها نیز به لحاظ نیاز به دستیابی به استانداردهای معتبر جهانی بسیار مهم است. به همین دلیل مقادیر توابع هدف HC و NO_x در نقطه بهینه متغیر مصرف سوخت با مقادیر بهینه خود این متغیرها مقایسه می‌شود. در صورتی که اختلاف کمتر از ۱۰ درصد^۲ باشد، نقطه بهینه متغیر مصرف سوخت را به عنوان نقطه بهینه آن ناحیه از نگاشت انتخاب می‌کنیم. در غیر این صورت، به مرحله بعد می‌رویم.

۵-۴- تعیین ضرایب وزنی برای تشکیل تابع هزینه

تابع هدف هزینه از ترکیب خطی سه تابع اصلی با ضرایب وزنی پویا که در هر یک از نقاط نگاشت جداگانه محاسبه می‌شود، تشکیل می‌شود که در آن ضرایب وزنی از معادلات ۵، ۶ و ۷ محاسبه می‌شود. در این معادلات اگر مقدار متغیر آلایندگی در نقطه بهینه مصرف سوخت خیلی از مقدار بهینه خود این توابع بیشتر باشد، ضریب وزنی آن نیز افزایش می‌یابد. ضریب وزنی مصرف سوخت نیز از جمع مقدار تابع آن در نقاط بهینه آلاینده‌ها تقسیم بر مقدار بهینه خود تابع تشکیل می‌شود تا در صورتی که مقدار این متغیر در نقاط بهینه دیگر متغیرها از مقدار بهینه خود این تابع خیلی بیشتر بود، ضریب وزنی آن افزایش یابد.

۵-۵- بهینه‌سازی تابع هزینه

با بهینه‌سازی تابع هزینه به دست آمده در مرحله قبل، مقادیر متغیرها در نقطه بهینه جدید به دست می‌آید و این نقطه به عنوان نقطه بهینه متغیرهای پایش پذیر در آن ناحیه از نگاشت انتخاب می‌شود. یادآوری می‌شود که نقاط بهینه به دست آمده، لزوماً بهینه کلی تابع در هر نقطه نگاشت نیست و ممکن است قاعده بهینه‌سازی که از روش‌های جستجوگر نرم‌افزار Matlab است، در بهینه محلی به دام بیافتد. همچنین با توجه به این که روی مقدار بیشینه آلاینده‌ها در هر نقطه از نگاشت موتور محدودیت قرار داده نشده، ممکن است مقدار آلاینده‌ها در چرخه استاندارد آزمون آلایندگی بیش از مقدار مجاز گردد که در این صورت در چند نقطه از نگاشت که بیشترین آلایندگی را دارند، باید بهینه‌سازی مجدد با اعمال محدودیت در مقدار آلاینده‌ها

(۴)

$$\text{Cost Function} = \frac{1000}{w(1) \times F(\text{BSFC}) / \text{FBSFC}_0 + w(2) \times F(\text{HC}) / \text{FHC}_0 + w(3) \times F(\text{NOx}) / \text{FNOx}_0}$$

$$W(1) = 3 \times [F_{\text{BSFC}}(X_{\text{HC}}) + F_{\text{BSFC}}(X_{\text{NOx}})] / F_{\text{BSFC}}(X_{\text{BSFC}}) \quad (5)$$

$$W(2) = 2 \times F_{\text{HC}}(X_{\text{BSFC}}) / F_{\text{HC}}(X_{\text{HC}}) \quad (6)$$

۲- مقدار ۱۰ درصد در نتیجه اجرای قاعده ارائه شده با مقادیر مختلف و آزمون و خطا برای یافتن بهترین مقدار تفاوت مقادیر بهینه متغیرها به دست آمده است.

N	load	InjPh	CamPh	HC (ppm)	NO _x (ppm)	BSFC (g/KWh)
۳۱۵۰	۵۴	۴۲۷	-۳۹	۵۲۶	۲۰۵۹	۱۳۹
۳۱۵۰	۶۰	۴۲۵	-۳۹	۵۱۷	۲۱۰۱	۱۰۴
۳۴۵۰	۳۷	۴۲۷	-۳۹	۵۴۵	۱۸۸۶	۱۷۸
۳۴۵۰	۴۳	۴۲۷	-۳۹	۵۳۴	۱۹۶۸	۱۶۶
۳۴۵۰	۴۸	۴۲۶	-۳۹	۵۲۳	۱۹۹۰	۱۴۴
۳۴۵۰	۵۴	۴۲۰	-۳۹	۵۱۷	۲۰۱۲	۱۱۷
۳۷۵۰	۳۷	۴۲۷	-۳۹	۵۱۱	۱۸۹۳	۱۷۲
۳۷۵۰	۴۳	۴۲۷	-۳۹	۵۰۲	۱۹۴۲	۱۵۲
۳۷۵۰	۶۶	۳۹۰	-۳۸	۵۲۸	۲۱۱۹	۱۰۰
۴۰۵۰	۳۱	۴۲۷	-۳۹	۴۶۳	۱۸۶۲	۲۴۱
۴۰۵۰	۳۷	۴۲۷	-۳۹	۴۵۱	۱۹۶۸	۱۹۶
۴۰۵۰	۴۳	۴۲۷	-۳۹	۴۴۴	۱۹۷۹	۱۶۷
۴۰۵۰	۴۸	۴۲۱	-۳۹	۴۴۱	۱۹۵۷	۱۴۴

جدول ۲ مقادیر بهینه متغیرها در قسمتی از نگاشت موتور که به روش ضرایب وزنی پویا محاسبه شده است.

N	load	InjPh	CamPh	HC (ppm)	NO _x (ppm)	BSFC (g/KWh)
۳۱۵۰	۵۴	۲۹۸	-۱۸	۶۳۹	۲۷۸۵	۲۶۲
۳۱۵۰	۶۰	۲۶۷	-۲۲	۶۲۱	۲۶۸۷	۲۴۵
۳۴۵۰	۳۷	۲۹۴	-۱۵	۷۱۲	۲۸۶۹	۳۰۰
۳۴۵۰	۴۳	۳۱۰	-۱۴	۷۰۱	۲۹۸۶	۲۹۶
۳۴۵۰	۴۸	۲۷۳	-۱۸	۶۷۶	۲۸۵۷	۲۸۹
۳۴۵۰	۵۴	۲۵۲	-۲۵	۶۲۵	۲۶۲۶	۲۷۹
۳۷۵۰	۳۷	۲۹۸	-۱۸	۶۸۸	۲۸۱۰	۳۲۸
۳۷۵۰	۴۳	۲۹۱	-۲۶	۶۱۷	۲۵۹۳	۳۴۸
۳۷۵۰	۶۶	۲۶۶	-۱۸	۶۳۰	۳۷۰۶	۲۱۹
۴۰۵۰	۳۱	۳۱۵	-۱۸	۶۶۸	۲۸۱۶	۴۱۸
۴۰۵۰	۳۷	۳۰۶	-۲۶	۵۷۳	۲۶۲۵	۴۲۱
۴۰۵۰	۴۳	۳۵۷	-۲۱	۶۱۶	۲۸۶۰	۳۳۹
۴۰۵۰	۴۸	۲۹۵	-۲۸	۵۴۹	۲۶۰۹	۳۷۳

جدول ۳ مقادیر بهینه متغیرها در قسمتی از نگاشت موتور که به روش ضرایب وزنی ثابت محاسبه شده است.

$$W(۳) = ۲ \times FNO_x(XBSFC) / FNO_x(XNO_x) \quad (۷)$$

صورت پذیرد. همچنین برای ارزیابی قابلیت این قاعده در مقایسه با روش ضرایب وزنی ثابت مسأله فوق با روش ضرایب ثابت نیز حل شده و نتایج آن در ادامه مقایسه می شود. این مراحل برای هر یک از نقاط نگاشت موتور انجام می شود که نتیجه آن ایجاد نگاشت بهینه و تنظیم موتور در حالت پایدار است. نمونه نتایج حاصل از اجرای الگوریتم فوق برای موتور مورد مطالعه در این تحقیق در جدول ۲ ارائه شده است. این نتایج، با نتایج حاصل از روش حل مسأله چندمعیاره با ضرایب وزنی ثابت^۱ که در جدول ۳ ارائه شده، قابل مقایسه است. ردیف های این دو جدول شامل مقادیر یکسان سرعت دورانی و بار موتور است که نقاط بهینه زاویه پاشش و زاویه ورود سوخت، از دو روش یادشده در آن محاسبه شده و مقادیر متغیرهای آلاینده و مصرف سوخت در ستون های بعدی آن است. با مقایسه این دو قاعده در هر سه متغیر پاسخ، برتری قاعده ارائه شده در این مقاله نسبت به روش ضرایب وزنی ثابت مشخص می گردد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تنظیم موتور خودرو با استفاده از روش های نوین طراحی آزمایش و شبیه سازی آماری و به صورت کاملاً خودکار ارائه شد. همچنین روشی برای حل مسائل چندمعیاره با ضرایب وزنی پویا که در هر نقطه از نگاشت، بر حسب شرایط مسأله در نقاط مختلف کارکرد موتور تعیین می شود، ارائه شده است. با این حال ممکن است استفاده از روش های ابتکاری^۲ به جای روش های بهینه سازی جستجوگر که در فرآیند بهینه سازی از افتادن توابع پاسخ به دام بهینه های محلی تا حدودی جلوگیری می کند، نتایج بهتری در پی داشته باشد. همچنین شبیه سازی با شبکه های عصبی مصنوعی ممکن است منجر به تولید الگوهای بهتر برای پیش بینی متغیرهای پاسخ گردد. موارد ذکر شده موضوع تحقیق های بعدی برای توسعه روش های تنظیم موتور است که توسط محققین فعلی این مقاله در دست اجرا است.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو که ابزار آزمایش ها و نیز راهنمایی های فنی و علمی راجع به موضوع تحقیق را فراهم و ارائه کرده، کمال تشکر و قدردانی را دارد. از جناب آقای دکتر کاظم زاده که راهنمایی های ایشان هدایت گر مسیر تحقیق و به ثمر رسیدن آن بود، کمال تشکر و قدردانی را دارد. همچنین از آقای مهندس کلانتری که دانش و تجربه خود را در زمینه روش های نوین تنظیم و نرم افزار Matlab در اختیار این جانب قرار دادند، صمیمانه قدردانی می نماید.

پیوست (۱) جدول تعاریف متغیرها و علائم مقاله

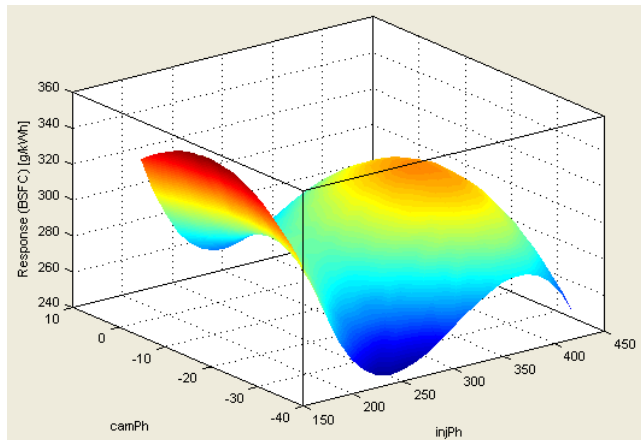
متغیر یا متغیر	شرح متغیر
$F_{BSFC}, F_{HC}, F_{NO_x}$	توابع متغیرهای پاسخ مصرف سوخت و آلاینده ها
$F_{BSFC}^*, F_{HC}^*, F_{NO_x}^*$	مقدار اولیه متغیرهای پاسخ مصرف سوخت و آلاینده ها
$X_{BSFC}, X_{HC}, X_{NO_x}$	متغیرهای مصرف سوخت و آلاینده ها
$W(۱), W(۲), W(۳)$	ضرایب وزنی توابع مصرف سوخت و آلاینده ها

۱- ضرایب ثابت تابع هزینه برتریب برای مصرف سوخت، آلاینده HC و NOx عبارتند از ۵ و ۳ و ۳ که این ضرایب با سعی و خطا جهت یافتن بهترین نسبت ضرایب و همچنین اولویت بندی توابع پاسخ به دست آمده است.

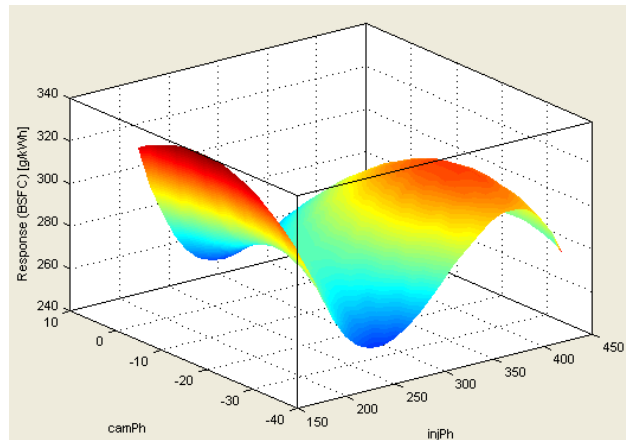
Heuristic-۲

پیوست ۲) سطوح پاسخ متغیرهای الگوشده در مسأله: برای چهار تابع پاسخ در این تحقیق نمودار سه بعدی توابع در سرعت های ۲۲۵۰ و ۳۴۵۰ دور بر دقیقه و در بار ثابت ۳۷ درصد رسم و با یکدیگر مقایسه شده است. علت انتخاب این سطوح از نگاهت موتور، کیفیت نمودارهای رسم شده در این منطقه برای تصویری کردن پیچیدگی های الگو است. رنگ قرمز بیشترین مقدار پاسخ و رنگ آبی کمترین ترین مقدار را نشان می دهد ■

N=۲۲۵۰ rpm, L=۳۷

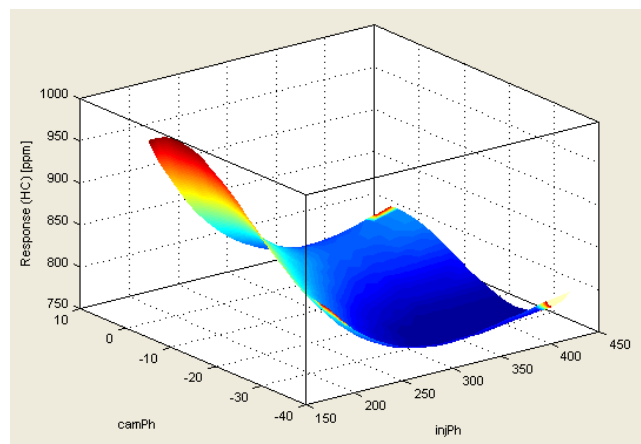


N=۳۴۵۰ rpm, L=۳۷

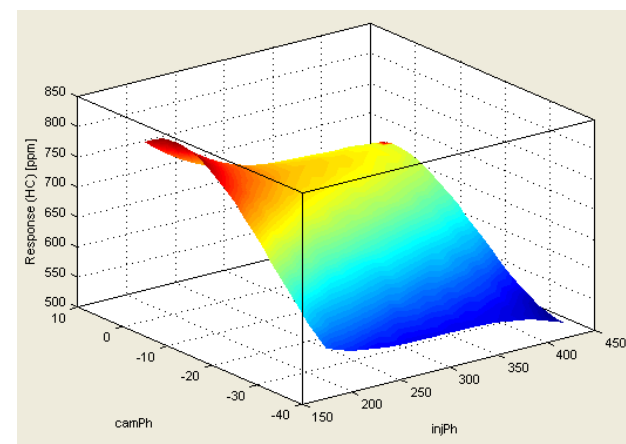


نمودار تغییرات متغیر BSFC بر حسب متغیرهای زمان پاشش و ورود سوخت که در بار ۳۷ درصد و دو سرعت ۲۲۵۰ و ۳۴۵۰ رسم شده است.

N=۲۲۵۰ rpm, L=۳۷

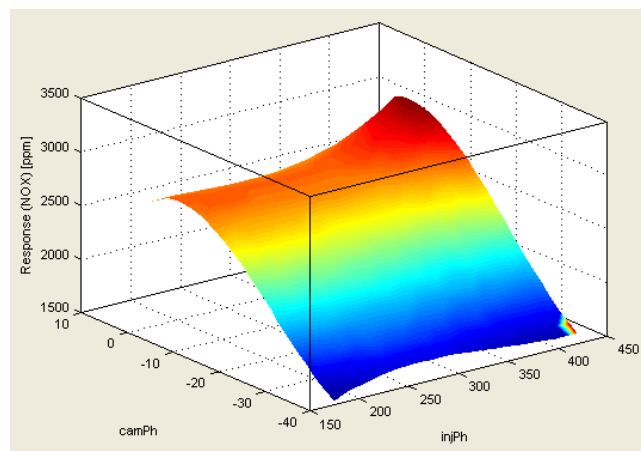


N=۳۴۵۰ rpm, L=۳۷

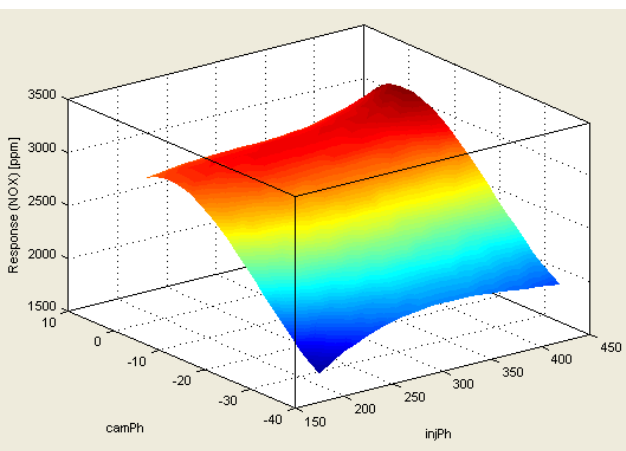


نمودار تغییرات متغیر HC بر حسب متغیرهای زمان پاشش و ورود سوخت که در بار ۳۷ درصد و دو سرعت ۲۲۵۰ و ۳۴۵۰ رسم شده است.

N=۲۲۵۰ rpm, L=۳۷



N=۳۴۵۰ rpm, L=۳۷



نمودار تغییرات متغیر NO_x بر حسب متغیرهای زمان پاشش و ورود سوخت که در بار ۳۷ درصد و دو سرعت ۲۲۵۰ و ۳۴۵۰ رسم شده است.

References:

1. Guerrier, Mark and Gawsey, Paul. "The Development of Model Based Methodologies for Gasoline IC Engine Calibration.", SAE International, (2004):1-9.
2. Vossoughi, G. R. and Rezazadeh, S. "Optimization of the calibration for an internal combustion engine management system using multi-objective genetic algorithms.", IEEE Congress, (2005):2, 3 and 6.
3. Stuhler, H. and T. Kruse. "Automated Model-Based GDI Engine Calibration Adaptive Online DoE Approach", Direct Injection SI Engine Technology, (2002): 5-6.
4. Schöggel, P. and H. M. Koegeler. "Automated EMS Calibration using Objective Drivability Assessment and Computer Aided Optimization Methods", Electronic Engine Controls, (2002): 3-5.
5. Rask, E. and Sellnau, M. "Simulation-Based Engine Calibration: Tools, Techniques, and Applications"; SAE International (2004):1
6. Montgomery, D. C. Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons, 1991.
7. Dvorak, T. and R. Hoekstra. "Optimization Internal Combustion Engine Performance through Response Surface Methodology"; SAE International, (1996): 4-7.
8. Rabih Omran and Younes, R. "Genetic Algorithm for Dynamic Calibration of Engine's Actuators", SAE International, (2007): 2-4.
9. Ghafari, M., Mahmoudi, A., Moradi, A., and Rostami, M. Engine Calibration Textbook. Tehran, Iran Khodro Center of Engine Research (2007).
10. Help section of Matlab Software, Edition 7.1