

بهینه‌سازی جدول جست‌وجو موتور تک‌سیلندر بنزینی احتراق داخلی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،
alireza111akbari@gmail.com

علیرضا اکبری

استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران،
mdahmardeh@iust.ac.ir

مسعود دهمرده*

مربی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران،
nasiri@sharif.edu

سیاد نصیری

چکیده

یکی از راه‌کارهای ارائه شده جهت کاهش میزان آلاینده‌ی موتورسیکلت استفاده از سیستم‌های سوخت‌رسانی انژکتوری به جای سیستم‌های کاربراتوری می‌باشد. در این مقاله، یک موتورسیکلت تک سیلندر ۱۵۰cc با سیستم سوخت‌رسانی انژکتوری که جداول جست و جوی آن در دسترس می‌باشد را انتخاب کرده سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و حداقل مربعات مقادیر پاشش سوخت در جدول فوق را اصلاح نموده که در این فرآیند چرخه رانندگی مورد استفاده ECE40 و گشتاور خروجی و میزان آلاینده‌ی CO به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این مقاله مدل موتورسیکلت به همراه مدل کنترل کننده ارائه شده است. نتایج پس از بهینه‌سازی در مدل شبیه‌سازی و تست‌های عملی انجام شده میزان CO، HC، CO₂، NOx به ترتیب در حدود ۲۰٪، ۵٪، ۱۹٪، ۱٪ کاهش یافته است. همچنین میزان گشتاور خروجی حدود ۱۲٪ افزایش داشته است. با توجه به نتایج تست آلاینده‌ی در مرکز آزمون تست آلاینده‌ی توانسازان، موتورسیکلت مورد نظر قادر به دریافت مجوز آلاینده‌ی یورو-۳ می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: موتورسیکلت، بهینه‌سازی، جداول جست و جو، آلاینده‌ی، یورو-۳.

Optimization of the lookup table for a single-cylinder internal combustion engine

A. R. Akbari
M. Dahmardeh
S. Nasiri

School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
School of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Employment of optimized fuel injected motorcycle rather than carbureted ones is a key to reduce pollution. This article studies a 150-cc fuel injected motorcycle, where its engine management unit (ECU) data are optimized, using genetic algorithm and the least squares method, in order to operate at the optimal engine operating points. The ECE40 driving cycle is employed, and the output torque and CO emissions are studied as the objective functions during the optimization procedure. The motorcycle model and the controller models are presented. Simulation results as well as the experimental ones show a reduction of CO by about 20%, CO₂ by 5%, HC by 19%, and NOx by about 1%. Moreover, the output torque is increased by about 12%. According to the emission test results, the motorcycle is able to pass the Euro-3 standard. The proposed optimization technique provides a solution to have an optimal ECU for a specific application.

Keywords: Motorcycle, Optimization, Lookup Table, Pollution, Euro-3.

شتاب‌گیری بالا و شیب روی مناسب و مصرف سوخت کم، باعث شده تا خودروسازان به فکر استفاده از سیستم سوخت‌رسانی و مدیریت موتور^۱ جایگزین سیستم‌های کاربراتوری باشند. سیستم سوخت‌رسانی انژکتوری دارای مزایایی همچون بالارفتن راندمان حرارتی و افزایش قدرت حجمی، توزیع یکنواخت سوخت در کلیه سیلندرها، گشتاور بالا در دورهای پایین، کاهش مصرف سوخت، کارکرد بهتر در هوای سرد و کاهش گازهای آلاینده خروجی می‌باشد. برای برآورده نمودن موارد فوق نیاز به یک واحد کنترل کننده شامل استراتژی‌های کنترلی می‌باشد که با نام واحد کنترل الکترونیکی^۲ شناخته می‌شود. مهم‌ترین هدف سیستم کنترل الکترونیکی موتور، اعمال تنظیمات دقیق بر روی دو عامل کنترل نسبت سوخت به هوا و همچنین کنترل زمان بندی جرقه می‌باشد. در حقیقت، واحد کنترل الکترونیکی با توجه به اطلاعات سنسورها وضعیت و شرایط موتور را تحلیل کرده و پاسخ‌های مناسب را به خروجی‌هایی همچون انژکتور، شمع، موتور مرحله ای کنارگذر هوا

۱- مقدمه

طبق آمار ۳/۵ میلیون دستگاه موتورسیکلت شماره‌گذاری شده در تهران وجود دارد که حدود یک میلیون دستگاه از این تعداد موتورسیکلت هم‌زمان در خیابان‌های شهر در حال تردد هستند و این موتورسیکلت‌ها روزانه ۳۸۰ تن آلاینده به هوای تهران می‌فرستند. موتورسیکلت‌های شهر تهران روزانه حدود ۱۶ میلیون کیلومتر در تهران پیمایش دارند. به ویژه آن‌که بیش از ۹۵ درصد موتورسیکلت‌های موجود در شهر تهران را موتورسیکلت‌های کاربراتوری تشکیل می‌دهند که آلودگی بسیار زیادی تولید می‌کنند [۱]. طبق تحقیقات انجام شده میزان مصرف سوخت و تولید آلاینده موتورسیکلت در شهرهای بزرگ مانند تهران به ترتیب ۲۹/۳ درصد و ۱۶/۲ درصد می‌باشد. این وسیله نقلیه با داشتن سهم ۶/۱۷ درصد از مصرف سوخت نسبت به سایر وسایل حمل و نقل، منشا نزدیک به ۲۰ درصد از آلاینده‌ی محیط زیست می‌باشد [۲]. در همین راستا یکی از راه‌کارهای ارائه شده استفاده از سیستم‌های سوخت‌رسانی انژکتوری به جای سیستم‌های کاربراتوری می‌باشد. از سوی دیگر به دلیل کاهش منابع فسیلی و همچنین برآورده کردن نیاز و رضایت‌مندی مشتری، به طور مثال

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: mdahmardeh@iust.ac.ir

¹ Engine management system (EMS)

² Electronic control unit (ECU)

و ... اعمال می‌کند. نحوه ارائه پاسخ‌های مناسب به ورودی‌های مختلف معمولاً در جداول جست و جو^۱ ذخیره می‌شود تا بتوان به ازای ورودی‌های مختلف و در زمان کوتاه، پاسخ مناسب را در خروجی ارائه کرد.

مرجع [۳] با استفاده از روش‌های کنترل PID و جبران کننده‌های غیرخطی، کنترل زمان پاشش سوخت یک موتور تک سیلندر با حجم ۱۲۵CC بر روی میز تست را ارائه کرده است. روش کنترل ارائه شده به نحوی است که علاوه بر بهینه‌سازی مصرف سوخت و کنترل آلاینده‌گی از افت توان خروجی موتور به میزان قابل توجهی جلوگیری کرده است. اما این تست در شرایط آزمایشگاهی انجام شده و اطلاعات تست جاده ای آن موجود نمی‌باشد.

در مرجع [۴] بر روی یک موتور FMI ۱۵۶ مورد استفاده در موتورسیکلت FY125-3P به کنترل عملکرد موتور از طریق استراتژی کنترل پهنای پالس الکترونیکی ارسالی به سیم‌پیچ‌های انژکتور جهت بازنگه‌داشتن سوزن انژکتور و در نتیجه مدت زمان پاشش سوخت پرداخته‌اند. در این تحقیق، نقاطی از عملکرد موتور به عنوان گره تعریف شده است و نقاط دیگر از طریق درون‌یابی خطی تعیین می‌شود تا موتور در نقطه بهینه کار کند. انتخاب گره‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است به‌نحوی که در محدوده تغییرات بزرگ‌تر، گره‌های بیشتر و نزدیک به هم انتخاب می‌شوند تا دقت عملکرد در این نقاط بیشتر و بهتر باشد، گرچه این امر منجر به زیاد شدن زمان کالیبراسیون می‌شود. متغیرهای ورودی برای انتخاب گره‌ها شامل سرعت موتور و فشار هوای ورودی است که فاصله گره‌ها برای فشار هوای ورودی ۵kPa و فاصله انتخابی برای دور موتور ۵۰۰ RPM می‌باشد. از معایب این طرح می‌توان به عدم وجود اطلاع دقیق بین گره‌ها اشاره کرد و با توجه به رفتار غیر خطی موتور، نمی‌توان در این نقاط عملکرد بهینه ای را توقع داشت.

مرجع [۵] با ایده رقیق سوز کردن سعی در بهبود عملکرد موتورسیکلت داشته است. اگرچه این کار به دلیل کنترل زمان پاشش سوخت توسط سیستم‌های کنترلی و از طرف دیگر کنترل جریان هوای ورودی با حرکت دریچه گاز توسط راننده، کار دشواری است. بنابراین برای موتور رقیق سوز میزان هوای ورودی باید به صورت خودکار و بر حسب جریان هوای ورودی کنترل شود و جریان هوای ورودی به میزان زیادی به فشار آن بستگی دارد. چون چن و همکارانش، اقدام به کنترل فشار هوای ورودی به وسیله یک کنترل کننده الکترونیکی نموده‌اند. در این پژوهش موقعیت دریچه گاز به عنوان ورودی کنترل کننده تطبیقی جهت حفظ فشار هوای ورودی استفاده شده است و بر همین اساس کنترل کننده مجرای کنارگذری را جهت تنظیم میزان هوای ورودی به موتور کنترل خواهد کرد.

فبریسو و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۲ مقاله‌ای را با عنوان طراحی و تست سیستم مدیریت الکترونیکی برای موتورسیکلت کوچک اشتعال جرقه‌ای ارائه نموده‌اند. در این سیستم با کنترل سوخت، جرقه و هوای دور آرام سطح آلاینده‌های خروجی کاهش یافته و در محدوده مجاز استاندارد قرار گرفته است.

نکامورا و همکاران [۷] تزریق سوخت الکترونیکی^۲ را ارائه کرده است که قابلیت نصب بر روی موتورسیکلت‌های کوچک را دارد. در این سیستم به دلیل عدم استفاده از حسگر اکسیژن، قابلیت کنترل سوخت به‌صورت حلقه بسته و تثبیت آن در محدوده استوکیومتری وجود ندارد. همچنین به دلیل عدم استفاده از حسگر تعیین موقعیت دریچه‌گاز، عملکرد این سیستم در حالت گذرا مطلوب نبوده و خطای قابل ملاحظه‌ای به همراه دارد.

شرکت هند [۸] بسته آماده نصب انژکتوری را جهت پیاده‌سازی بر روی موتورسیکلت‌هایی با حجم موتور ۵۰ سی‌سی در سال ۲۰۰۳ به بازار ارائه نمود. با استفاده از این مجموعه مصرف سوخت در شرایط واقعی در حدود ۱۰ درصد کاهش یافته و عملکرد آن در سایر شرایط عملکردی نیز بهبود یافته است.

علوی و همکاران [۹] در سال ۱۳۹۲ آزمونی بر روی موتورسیکلت تک سیلندر چهار زمانه با حجم موتور زیر ۲۰۰ سی‌سی و با سیستم کاربراتورری در چرخه استاندارد شهری ECE40 انجام داده‌اند تا بتوانند با یافتن راهکارهایی الزامات استاندارد آلاینده‌گی یورو-۳ را برآورده نمایند [۱۰].

عتابی و همکاران [۱۱] پژوهشی در رابطه با تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد بهینه سیستم واحد کنترل موتور انجام داده‌اند. در این تحقیق، 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. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از این روش می‌توان تاثیر کالیبراسیون سیستم مدیریت موتور را بر پارامترهای مختلف بررسی نمود و بسته به نیاز، هرکدام از آنها را تغییر داد تا با اعلام آن به واحد کنترل موتور بسته به شرایط موجود، فرمان لازم توسط این واحد به عملگرهای موتور داده شود.

این مقاله با اعمال دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات، با حفظ سادگی و کارآمدی به بهینه‌سازی عملکرد موتورسیکلت انژکتوری می‌پردازد. همچنین با حداقل تغییر در مصرف سوخت بهینه شده به صورت عملی، میزان کاهش حداکثری آلاینده‌گی و افزایش حداکثری گشتاور خروجی ایجاد شده است. در ادامه، سیستم کنترلی موتور معرفی می‌شود. سپس به معرفی دو روش بهینه‌سازی می‌پردازیم. مدلسازی، نتایج تست عملی و عددی و تفسیر آنها در ادامه آورده شده است. یکی تمایزات این مقاله با سایر کارهای انجام شده، عدم اکتفا به نتایج نظری و انجام کار به‌صورت عملی در فضای آزمایشگاهی که به صورت کامل بومی‌سازی شده است می‌باشد. تمامی نتایج بدست آمده از مدلسازی و تمام صحنه‌گذاری‌ها به صورت عملی انجام شده است. نتایج آزمایشات صورت گرفته در مراکز تست آلاینده‌گی استاندارد تاییدی بردرستی عملکرد ما می‌باشد.

۲- سیستم کنترلی موتور

عمده شرایط کاری موتور توسط دو پارامتر اصلی مشخص می‌شود، یکی دور موتور که توسط حسگر دور موتور نصب شده بر روی فلاپویل

² Electronic fuel injection (EFI)

¹ Lookup table

۳-۲- بار موتور

بار اعمال شده به موتور یکی از اساسی ترین پارامترهایی می باشد که با توجه به آن عملکرد موتور تغییر می کند و نمایانگر حالت های مختلف عملکرد موتور می باشد. برای مثال هرچه بار اعمال شده به موتور بیشتر باشد درجه گاز بیشتر باز می شود و میزان فشار هوای منیفولد ورودی افزایش پیدا می کند در نتیجه سوخت بیشتری به داخل سیلندر تزریق می شود.

۳-۳- تابع هزینه

جهت تعریف تابع هزینه، پارامترهایی در نظر گرفته می شود که از اهمیت بالاتری برخوردار می باشد. در اینجا، میزان آلایندگی گاز منواکسید کربن (CO)، مقدار مصرف سوخت، و گشتاور تولیدی به عنوان پارامترهای مورد نظر و با ملاحظات زیر در تابع هزینه در نظر گرفته شده است.

۳-۴- آلایندگی

یکی از مهمترین پارامتری که موتور سازان به دنبال بهبود آن می باشدند کاهش میزان انتشار آلاینده های خروجی از موتور می باشد بر همین اساس استاندارد های مختلفی برای آن تعریف شده است که همواره سخت گیرانه تر می شوند بر همین اساس مهمترین تابع برای بهینه سازی را کاهش آلاینده های خروجی از موتور قرار داده ایم. به عنوان نمونه گاز منواکسید کربن (CO) را به دلایلی از جمله خطرناک بودن و وابستگی کمتر به عواملی نظیر دمای موتور [۱۳]، و همچنین تاثیر مستقیم آن بر سایر آلاینده ها مانند CO₂، از بین آلاینده ها انتخاب شده و در تابع هزینه مدل شده است.

۳-۵- مصرف سوخت

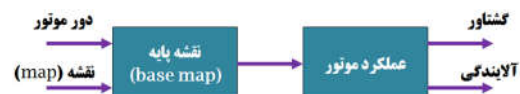
مصرف سوخت یکی از پارامترهای اصلی مدنظر طراحان موتور می باشد و مشتریان هم به دنبال خودرهای با مصرف سوخت پایین می باشند از این رو هدف دیگری که به دنبال آن هستیم کاهش میزان مصرف سوخت می باشد.

۳-۶- گشتاور تولیدی

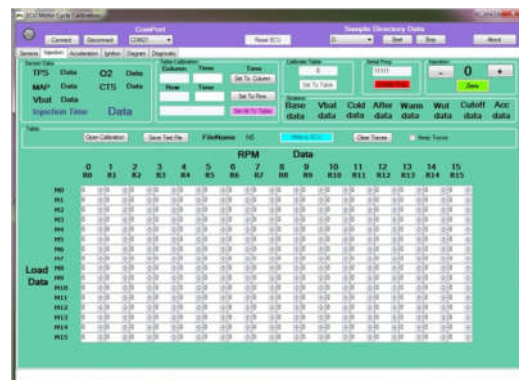
گشتاور تولیدی موتور معرف عملکرد موتور می باشد به نحوی که هر چه میزان آن بیشتر باشد رضایت مشتری و عملکرد موتور بهتر است. در این جا، به دنبال جلوگیری از کاهش گشتاور خروجی هستیم و در صورت امکان مقدار آن را افزایش دهیم.

تابع هزینه تابعی است که با کمینه شدن آن پارامترهای طراحی با قیدهای مشخص بدست می آید. در مسئله حاضر هدف نزدیک کردن میزان گشتاور و CO به مقادیر مطلوب و حفظ یا کاهش مصرف سوخت می باشد. پس بنابراین مجموع خطای گشتاور و CO از حالت مطلوب و همچنین مجموع مصرف سوخت از ابتدای تست تا انتهای آن می تواند تابع هزینه این مسئله بهینه سازی در نظر گرفته شود و از آنجایی که خطا چه مثبت و چه منفی برای ما مهم است پس قدر مطلق خطای گشتاور و CO را در تابع هزینه در نظر می گیریم.

اندازه گیری شده و دیگری بار اعمال شده بر روی موتور که با میزان بازشدگی درجه گاز و تاثیر آن بر روی فشار مطلق هوای ورودی و اندازه گیری آن توسط سنسور MAP می باشد پس از اندازه گیری، این اطلاعات، وارد جداول جست و جو شده و با توجه به شرایط موجود مدت زمان مناسب برای پاشش سوخت انتخاب می شود و خروجی موتور میزان گشتاور تولیدی و آلاینده های منتشر شده از آن می باشد [۱۲]. شکل ۱ نمایشی از نحوه مدیریت عملکرد موتور به همراه نقشه پایه را نشان می دهد. همچنین شکل ۲ تصویری از نمای جدول جست و جو در موتورسیکلت را نشان می دهد که ستون عمودی آن میزان بار موتور است که اطلاعات آن از حسگر MAP دریافت شده و ستون افقی آن میزان دور موتور است و هر سلول بیانگر مدت زمان پاشش سوخت می باشد. (به دلیل محرمانه بودن مقادیر، از نمایش اعداد حقیق معذور میباشیم).



شکل ۱- ساختار واحد کنترلی موتور



شکل ۲- نمایی از جدول جست و جو

۳- بهینه سازی

الگوریتم بهینه سازی انتخاب شده یک الگوریتم بهینه سازی چند متغیره می باشد که در ادامه به تشریح هر کدام می پردازیم.

۳-۱- دور موتور

یکی از متغیرهای در نظر گرفته شده دور موتور می باشد که با تغییرات آن موتور در حالت های عملکردی مختلف (دور آرام، حالت عادی، Cut-Off) قرار می گیرد و متناسب با آن سوخت مورد نیاز به موتور تزریق می شود. همچنین هر چه راننده میزان فشار به پدال گاز را افزایش دهد توقع دارد دور موتور افزایش پیدا کند و به همان میزان سرعت و توان خروجی از موتور نیز افزایش یابد و نیز توقع دارد با افزایش سرعت فشار دادن پدال گاز فرایند افزایش سرعت و توان با شتاب بیشتری انجام شود.

¹ Manifold Absolute Pressure sensor

$$\text{cost function} = \omega_1 \int_0^t |\text{torque}_{\text{normal}} - \text{torque}_{\text{desired}}| dt + \quad (1)$$

$\omega_2 \int_0^t |\text{CO}_{\text{normal}} - \text{CO}_{\text{desired}}| dt + \omega_3 \int_0^t T dt$

که در آن $\text{torque}_{\text{normal}}$ مقدار گشتاور حاصل از تست عملی و $\text{torque}_{\text{desired}}$ گشتاور مطلوب، $\text{CO}_{\text{normal}}$ مقدار آلاینده‌گی CO در تست عملی، $\text{CO}_{\text{desired}}$ مقدار آلاینده‌گی CO مطلوب، T مدت زمان پاشش انژکتور سوخت می‌باشد.

۳-۷- قیود طراحی

در مسئله حاضر پارامترهای طراحی که بر روی زمان پاشش سوخت تاثیر می‌گذارند نمی‌تواند از یک بازه زمانی پایین‌تر یا بالاتر باشد؛ چرا که عملکرد موتور احتراقی مورد آزمایش به شدت تحت تاثیر زمان پاشش سوخت است و همواره می‌بایست نزدیک به مقادیر جدول پاشش باشد زیرا زیاد شدن بیش از حد زمان پاشش موجب افزایش مصرف سوخت، افزایش آلاینده‌های CO و HC، احتراق ناقص و ... می‌شود هم چنین کاهش بیش از حد آن باعث عدم عملکرد مناسب و لرزش موتور، پدیده خاموشی زودرس شعله، عدم زمان استارت مناسب، خاموش شدن موتور و ... شود. اندازه تغییرات مجاز بر روی زمان پاشش از طریق آزمایشات انجام شده بر روی موتور بدست آمده است. این قید چه بازه بالایی آن چه بازه پایینی آن باید به گونه ای انتخاب شود که موتور عملکرد عادی خود را حفظ کند. با آزمایش‌های انجام شده میزان این تغییرات مجاز برای تمامی پارامترها به صورت مساوی به اندازه $\pm 200 \mu\text{s}$ انتخاب شده است.

۴- مدلسازی

جهت پیاده سازی مسئله بهینه سازی ابتدا باید مدلی از عملکرد موتور احتراق داخلی مورد بحث بدست آوریم، کلیه مراحل مدلسازی فوق در نرم افزار MATLAB/SIMULINK انجام شده است. شمای کلی مدلسازی موتور مورد نظر در نرم افزار در شکل ۳ نشان داده شده است. برای انجام فرایند بهینه‌سازی ابتدا باید رفتار موتور را مدلسازی کرد. جهت مدل کردن عملکرد موتور از سه ورودی دور موتور، میزان پاشش سوخت (مدت زمان باز بودن انژکتور سوخت) و فشار مطلق منیفولد هوای ورودی استفاده شده است. همچنین جهت مدلسازی موتور از مدل فازی MATLAB با در نظر گرفتن توابع عضویت خطی که خروجی آن گشتاور و میزان آلاینده CO تولیدی می‌باشد استفاده شده است که در شکل ۳ با عنوان توابع مدلسازی رفتار موتور نمایش داده شده است. سپس خروجی‌های مدل با خروجی آزمایشات عملی بررسی شده به نحوی که موتور را در دور و بار مشخص با مصرف سوخت از پیش تعیین شده مطابق شکل ۲ تنظیم شده است. سپس میزان CO و گشتاور خروجی در واقعیت و مدلسازی با یکدیگر تطبیق داده شده، پس از صحت داده‌های خروجی مدل با خطای کمتر از ۱/۱٪، ادامه کار انجام شده است.

برای وارد کردن مدت زمان پاشش سوخت به مدل موتور از خروجی جدول جست و جو که در شکل ۳ با نام جدول جست و جو مشخص شده است استفاده شده است. این بلوک دارای یک نمودار دو بعدی است که با داشتن دور موتور میزان پاشش سوخت در شرایط

کاری مختلف موتور تعیین می‌گردد.

از آنجایی که پارامترهای طراحی بر روی میزان مصرف سوخت تاثیر می‌گذارند در سیستمی که قرار است در مسئله بهینه سازی استفاده شوند این پارامترها باید به صورت متغیر در نظر گرفته شوند. این تغییرات همان متغیرهای طراحی با قیود مشخص هستند. هم‌چنین برای بالاتر بردن انعطاف در مسئله، متغیرهای طراحی با توجه به دور موتور انتخاب کرده ایم یعنی با توجه به بازه دور موتور از متغیرهای مختلف طراحی استفاده می‌شود.

در مرحله بعد مقادیر مطلوب CO و گشتاور تعریف می‌شوند. در مسئله حاضر گشتاور مطلوب ۱/۲ برابر گشتاور واقعی و همچنین CO مطلوب ۰/۸ برابر CO واقعی در نظر گرفته شده است. در نهایت انتگرال خطای گشتاور واقعی از گشتاور مطلوب و همچنین انتگرال خطای CO نسبت به CO مطلوب مقدار تابع هزینه را تشکیل می‌دهند. همچنین در شکل شماره ۴ نمودار سه بعدی جدول جست و جو نمایش داده شده در شکل ۲ مشاهده می‌شود. ستون عمودی مدت زمان پاشش سوخت و ستون‌های افقی دور موتور و بار موتور می‌باشد. در واقع این نمودار بیان‌گر آن است که در هر دور و بار موتور چه میزان سوختی باید به داخل منیفولد هوا پاشیده شود.

۵- الگوریتم‌های بهینه سازی

شکل ۵ مراحل مختلف بهینه سازی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نمایش داده شده است، فرآیند با جدول جست و جو شروع می‌شود. سپس موتورسیکلت در سیکل رانندگی ECE40 با جدول جست و جوی ابتدایی آزمایش و اطلاعات مربوط به گشتاور و میزان آلاینده‌گی خروجی ذخیره شد. بعد از آن با توجه به نتایج خروجی و با استفاده از مدل فازی توابع موتور مدلسازی شد، سپس خروجی‌های مدل با حالت واقعی مقایسه و صحت‌گذاری شد. پس از آن الگوریتم‌های بهینه سازی به جداول جست و جو اعمال شد و تفاضل خروجی مدل اولیه با خروجی مدل بهینه سازی شده مجدداً به عنوان ورودی به الگوریتم‌های بهینه سازی وارد می‌شود. این فرایند تا رسیدن به بهینه ترین حالت ادامه می‌یابد.

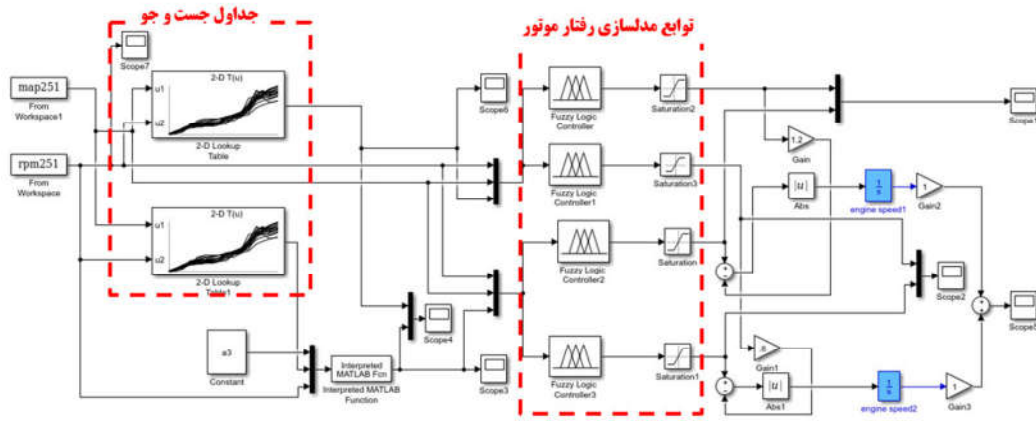
۵-۱- الگوریتم بهینه سازی ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA^1) یکی از پرکاربردترین روش‌های بهینه سازی است که کاربردهای فراوانی در رشته‌های مختلف علوم و مهندسی دارد. الگوریتم‌های ژنتیک اغلب گزینه خوبی برای تکنیک‌های پیش‌بینی بر مبنای رگرسیون هستند. مسئله‌ای که باید حل شود دارای ورودی‌هایی می‌باشد که طی یک فرایند الگوبرداری شده از تکامل ژنتیکی به راه‌حلی تبدیل می‌شود سپس راه‌حل‌ها به‌عنوان کاندیداها توسط تابع ارزیاب مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و چنانچه شرط خروج مسئله فراهم شده باشد الگوریتم خاتمه می‌یابد. الگوریتم ژنتیک بطور کلی یک الگوریتم مبتنی بر تکرار است که اغلب بخش‌های آن به صورت فرایندهای تصادفی انتخاب می‌شوند. الگوریتم‌های ژنتیک برای روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی در حل مسائل خطی، محدب و برخی

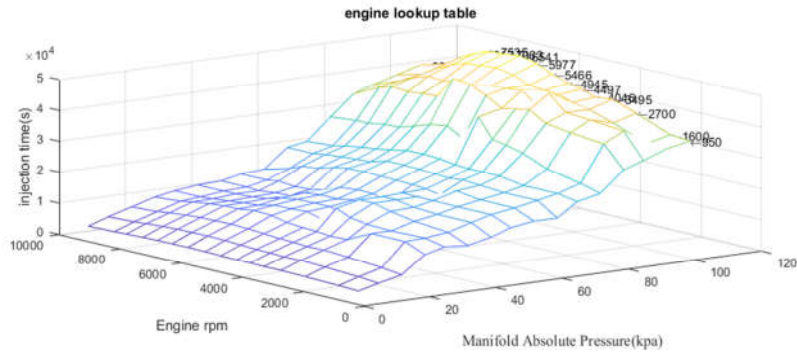
¹ Genetic algorithm

میباشد. و توابع هدف ۱/۲ برابر شدن گشتاور خروجی و ۰/۸ برابر شدن مصرف سوخت با تغییرات $\pm 200\mu s$ میباشد.

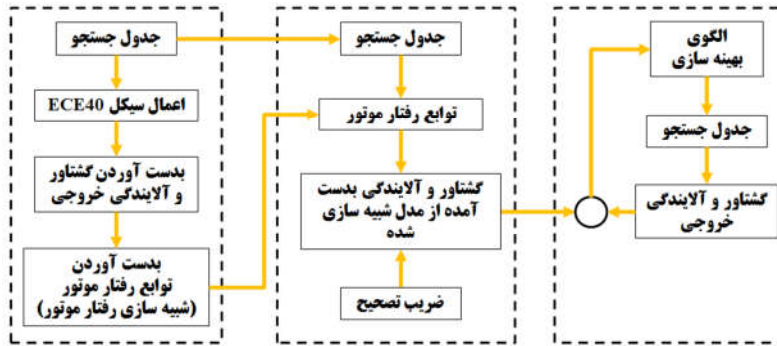
مشکلات مشابه بسیار موفقی بوده‌اند ولی الگوریتم‌های ژنتیک برای حل مسائل گسسته و غیر خطی بسیار کارتر می باشند [۱۴]. در این مقاله تعداد نقاط مورد بهینه شدن (جمعیت) ۲۲۵ عدد (به تعداد سلول جدول جست و جو نشان داده شده از شکل ۲) با ترانس تغییرات



شکل ۳- مدلسازی موتور در نرم افزار



شکل ۴- جدول جست و جو سه بعدی زمان پاشش موتور



شکل ۵- الگوریتم بهینه سازی پیشنهادی

۵-۲- روش حداقل مربعات

روش‌های مختلفی برای بدست آوردن مدل ریاضی یک سیستم ناشناخته وجود دارد که اصول کار همه آنها بر مینیمم کردن خطای بین پاسخ مدل و مقدار واقعی استوار است. در این مقاله از روش کمینه مربعات (LS^۱) استفاده شده است.

در روش برازش داده ها^۲ مقدار اندازه‌گیری شده به صورت کلی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$z = h(x) + v \quad (2)$$

در رابطه بالا $h(x)$ تابعی از بردار پارامترها است که مقادیر اندازه گیری شده را مدل می‌کند و v فاکتور اغتشاشات سیستم مانند نویز و خطای اندازه‌گیری است. هدف از برازش پیدا کردن بردار x به صورتی است که داده‌ها با کمترین خطای ممکن برازش شوند. اگر \hat{x} به عنوان تخمینی از x در نظر گرفته شود خطای E بصورت اختلاف مقدار اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = z - h(\hat{x}) \quad (3)$$

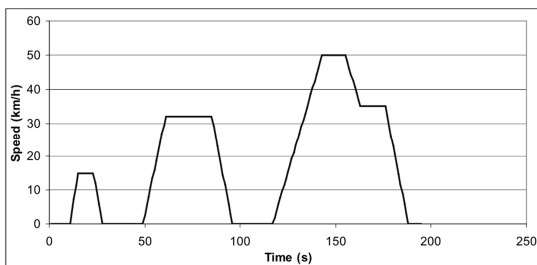
برازش روشی است برای پیدا کردن \hat{x} که نرم خطای $\|E\|$ باقیمانده را به حداقل برساند. نرم‌های مختلف منجر به جوابهای مختلف می‌شوند [۱۵].

۶- نتایج و تفسیر

یک موتورسیکلت مجهز به سیستم سوخت‌رسانی انژکتوری و با مشخصات داده شده در جدول ۱ تهیه شد و آزمون‌های هوای سرد، موتور گرم و سیکل شهری بر روی آن انجام شد. سپس با استفاده از دینامومتر میزان آلاینده‌های خروجی، مصرف سوخت و حداکثر سرعت در چرخه شهری ECE40 [۱۶] نشان داده شده در چرخه ۶، اندازه‌گیری گردید (شکل ۷).

جدول ۱- مشخصات موتورسیکلت موتور آزمون

تک‌سیلندر چهارزمانه	نوع موتور
۱۴۹/۴	حجم سیلندر (سی‌سی)
۶۲	قطر داخلی سیلندر (میلی‌متر)
۴۹/۵	کورس پیستون (میلی‌متر)
۲	تعداد سوپاپ ها
OHC	چیدمان سوپاپ ها
۹/۱ : ۱	نسبت تراکم
هوا خنک	سیستم خنک کننده
CDI	سیستم جرقه زنی

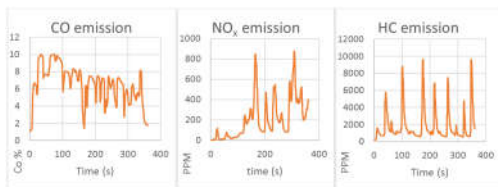


شکل ۶- الگوی آزمون چرخه شهری ECE40



شکل ۷- نحوه استقرار موتورسیکلت بر روی شاسی دینامومتر

نتایج تست میزان آلاینده‌های خروجی موتورسیکلت و روند تغییرات آنها در چرخه شهری در شکل ۸ نشان داده شده است.



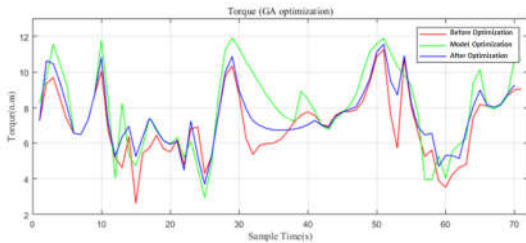
شکل ۸- نتایج تست آلاینده‌گی میزان CO, HC, NOx در چرخه شهری

نتایج بهینه سازی میزان انتشار آلاینده منواکسید کربن به عنوان یکی از پارامترهای لحاظ شده تابع هزینه در بهینه سازی در شکل های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. این عمل با استفاده از دو روش الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و همچنین الگوریتم بهینه سازی حداقل مربعات انجام شده است. با توجه به شکل ۹ میزان کاهش CO با استفاده از روش بهینه سازی الگوریتم ژنتیک در حالت مدلسازی (Model optimization) و آزمون های عملی پس از اعمال میزان پاشش بهینه سازی شده در جداول جست و جو (after optimization) نسبت به حالت قبل از بهینه سازی (Before optimization) به ترتیب ۲۷/۵٪ و ۴۷/۴٪ و در بهینه سازی به روش حداقل مربعات (شکل ۱۰) در حالت مدلسازی و آزمون های عملی به ترتیب ۲۴/۵۸٪ و ۱۸/۵۶٪ می باشد.

¹ Least squares

² Data Fitting

سومین پارامتر در نظر گرفته شده در تابع هزینه میزان افزایش گشتاور خروجی است که با استفاده از دو روش الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و همچنین الگوریتم بهینه سازی حداقل مربعات بهینه سازی شده است. با توجه به شکل ۱۳ میزان افزایش گشتاور در بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک در حالت مدلسازی و آزمون های عملی به ترتیب ۱۲/۳۵٪ و ۵/۴۸٪ در بهینه سازی به روش حداقل مربعات شکل ۱۴ در حالت مدلسازی و آزمون های عملی به ترتیب ۱۰/۸۳٪ و ۳/۷۲٪ می باشد.

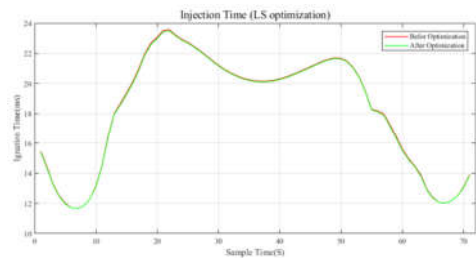


شکل ۱۳- گشتاور خروجی موتورسیکلت بهینه شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک

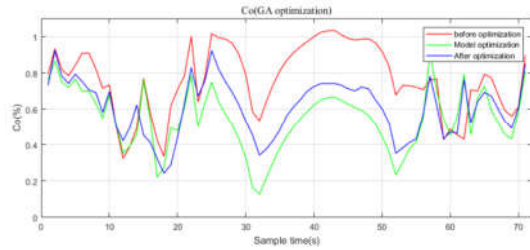
اگرچه سایر آلاینده ها در فرآیند بهینه سازی لحاظ نشده است، ولی میزان انتشار این آلاینده ها، یعنی HC، NOx، CO₂ در این قسمت ارائه می شود تا به بررسی تاثیر فرایند بهینه سازی بر روی مقادیر آنها بپردازیم.

میزان انتشار گاز های آلاینده دی اکسید کربن CO₂ به عنوان پارامتری که متاثر از تابع هزینه در فرآیند بهینه سازی است در شکل های ۱۳ و ۱۴ برای حالت های قبل و بعد از بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات نشان داده شده است که به ترتیب کاهش ۴/۵۹٪ و ۳/۲۲٪ را تجربه کرده است.

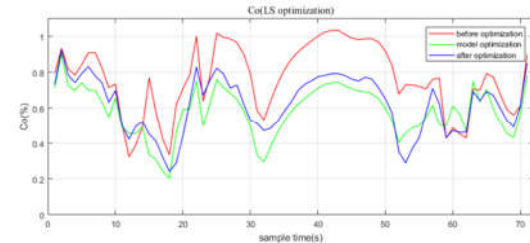
پارامتر دیگری که متاثر از تابع هزینه در بهینه سازی می باشد میزان انتشار هیدرو کربن های نسوخته HC است. با توجه به شکل ۱۵ و شکل ۱۶ میزان تاثیر الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و حداقل مربعات بر روی آن به ترتیب کاهش ۱۸/۵۸٪ و ۹/۶۴٪ است.



شکل ۱۴- گشتاور خروجی موتورسیکلت بهینه شده با استفاده از حداقل مربعات

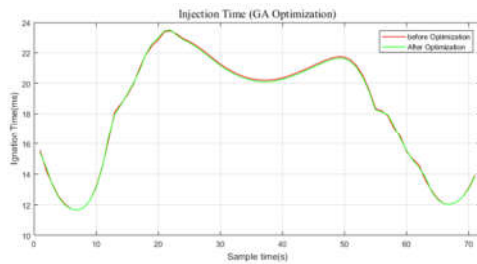


شکل ۹- میزان اندازه گیری شده گاز CO قبل و بعد از بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک

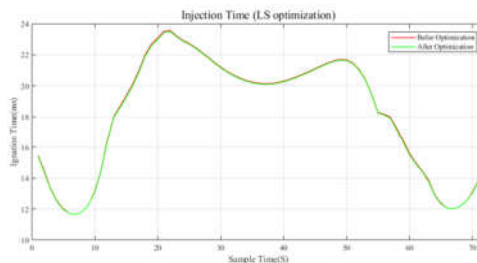


شکل ۱۰- میزان اندازه گیری شده گاز CO قبل و بعد از بهینه سازی با حداقل مربعات

در ادامه نتایج بهینه سازی مصرف سوخت، به عنوان پارامتر دیگری که در تابع هزینه در بهینه سازی در نظر گرفته شده است، بدست آمده با استفاده از دو روش الگوریتم بهینه سازی ژنتیک و همچنین الگوریتم بهینه سازی حداقل مربعات ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱ میزان کاهش مصرف سوخت در بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک در حالت مدلسازی شده و آزمون های عملی ۰/۵٪ در بهینه سازی به روش حداقل مربعات شکل ۱۲ در حالت مدلسازی و آزمون های عملی ۰/۲۵٪ می باشد.



شکل ۱۱- نقشه زمان پاشش سوخت بهینه شده برای چرخه ECE40 با استفاده از الگوریتم ژنتیک



شکل ۱۲- نقشه زمان پاشش سوخت بهینه شده برای چرخه ECE40 با استفاده از حداقل مربعات

سازی ژنتیک کاهش بیشتری نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی حداقل مربعات داشته و همچنین میزان گشتاور و NOx تولیدی در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک بیشتر از الگوریتم بهینه‌سازی حداقل مربعات می‌باشد. همچنین با توجه به کارکرد موتور در حالت عملی رفتار موتور در حالت بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک نرم‌تر و یکنواخت‌تر بوده است.

جدول ۲- نتایج بهینه‌سازی

الگوریتم	الگوریتم ژنتیک	الگوریتم حداقل مربعات
CO مدل بهینه‌سازی شده	↓٪ ۲۷/۵۰	↓٪ ۲۴/۵۸
CO آزمایشات عملی	↓٪ ۲۰/۴۷	↓٪ ۱۸/۵۶
گشتاور خروجی مدل بهینه‌سازی شده	↑٪ ۱۲/۳۵	↑٪ ۱۰/۳۸
گشتاور خروجی در آزمایشات عملی	↑٪ ۵/۴۸	↑٪ ۳/۷۲
زمان پاشش سوخت قبل از بهینه‌سازی	↓٪ ۰/۴	↓٪ ۰/۲۵
CO ₂ بعد از بهینه‌سازی	↓٪ ۴/۵۹	↓٪ ۳/۲۲
HC بعد از بهینه‌سازی	↓٪ ۱۸/۵۸	↓٪ ۹/۶۴
NOx بعد از بهینه‌سازی	↑٪ ۱/۳۶	↑٪ ۱

۷- نتیجه گیری

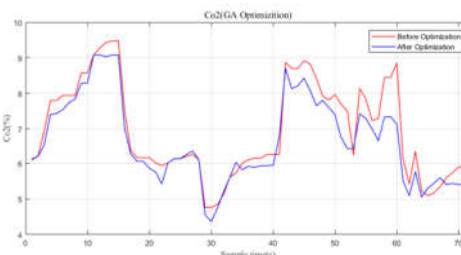
این مقاله با مطالعه یک موتورسیکلت تک سیلندر ۱۵۰ سی سی با سیستم سوخت‌رسانی انژکتوری و با بهینه‌سازی سیستم مدیریت موتور (ECU) به عملکرد بهتر موتور دست یافت. دو روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و الگوریتم حداقل مربعات ارائه شد. پارامترهای مختلف عملکردی موتورسیکلت از جمله آلاینده‌های خروجی نظیر CO₂، CO، HC، NOx، همچنین مصرف سوخت و حداکثر توان خروجی بررسی شد. موتورسیکلت در چرخه رانندگی ECE40 تحت بررسی قرار گرفت. نتایج تست‌های آلاینده‌ها نشان دهنده کاهش حدود ۲۰٪ میزان CO خروجی، کاهش حدود ۵٪ میزان CO₂، کاهش حدود ۱۹٪ میزان HC و کاهش حدود ۱٪ میزان NOx خروجی می‌باشد. همچنین میزان گشتاور خروجی حدود ۱۲٪ افزایش داشته است. همچنین با توجه به نتایج تست آلاینده‌ها در مرکز آزمون، موتورسیکلت مورد نظر مطابق با قوانین استاندارد ملی ایران به شماره ISIRI6789 قادر به دریافت مجوز آلاینده‌ها یورو-۳ می‌باشد.

Emission Results		Phase 1	Test
CO2 Bag Sample	[%]	0.225	
CO2 Bag Ambient	[%]	0.066	
CO2 Bag Net	[%]	0.160	
CO Bag Sample	[ppm]	26.033	
CO Bag Ambient	[ppm]	3.969	
CO Bag Net	[ppm]	22.128	
NOx Bag Sample	[ppm]	3.357	
NOx Bag Ambient	[ppm]	0.078	
NOx Bag Net	[ppm]	3.280	
THC Bag Sample	[ppmC1]	53.023	
THC Bag Ambient	[ppmC1]	38.685	
THC Bag Net	[ppmC1]	14.956	
CO2 Bag	[g/km]	60.408	60.408
CO Bag	[g/km]	0.532	0.532
NOx Bag	[g/km]	0.114	0.114
THC Bag	[g/km]	0.178	0.178

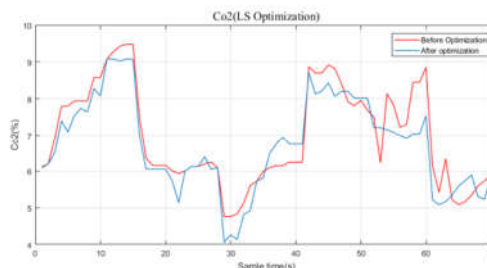
شکل ۱۹- میزان آلاینده‌های خروجی و قبولی تست های انجام شده در مرکز تست توانسازان

۸- مراجع

[۱] میرشی، سمیرا؛ فراز عنایتی آهنگر و وحید حسینی، بررسی تاثیر الگوی رانندگی بر میزان آلاینده‌ها تولیدی توسط خودروها در شهر تهران،

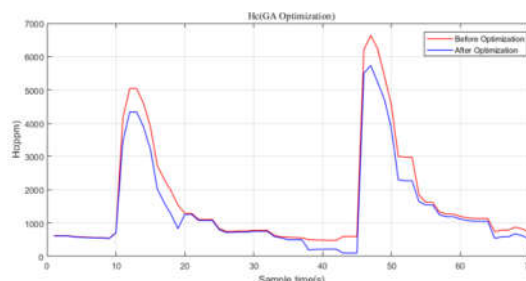


شکل ۱۵- میزان آلاینده‌های CO₂ قبل و بعد از بهینه‌سازی به روش GA

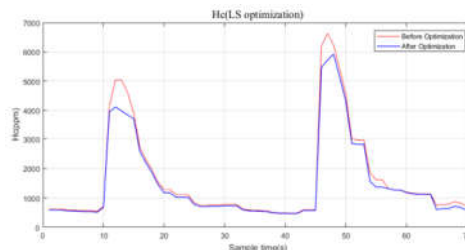


شکل ۱۶- میزان آلاینده‌های CO₂ قبل و بعد از بهینه‌سازی به روش LS

و در نهایت پارامتر میزان انتشار گاز های NOx که متاثر از تابع هزینه است، برای حالت‌های قبل و بعد از بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و حداقل مربعات در شکل ۱۷ و شکل ۱۸ نشان داده شده است که به ترتیب با افزایش ۱/۳۶٪ و ۱٪ مواجه بوده است.



شکل ۱۷- میزان آلاینده‌های HC قبل و بعد از بهینه‌سازی به روش GA



شکل ۱۸- میزان آلاینده‌های HC قبل و بعد از بهینه‌سازی به روش LS

خلاصه نتایج بهینه‌سازی شده در جدول ۲ نشان داده شده است. با مشاهده نتایج نظری و عملی بهینه‌سازی می‌توان نتیجه گرفت میزان CO₂، CO، HC در حالت بهینه‌سازی به روش الگوریتم بهینه

دوازدهمین کنفرانس مهندسی حمل و نقل و ترافیک ایران، تهران، سازمان حمل و نقل و ترافیک تهران، معاونت حمل و نقل و ترافیک شهرداری تهران، ۱۳۹۱.

- [2] Jafari A. J., Ehsanifar M. and Arfacinia H., The Share of Different Vehicles in Air Pollutant Emission in Tehran, Using 2013 Traffic Information, Vol. 2, 2016.
- [3] Wan L. W., Jiang Y., Hong G., Liu X. and Zhang J., Development of Electronic Control System for a Single Cylinder Motorcycle Engine, *SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst.*, Vol. 5, No. 2, pp. 2012-01-0508, Apr. 2012.
- [4] Peng Meichun, Deng Xubing, and Liang Xiaofeng, "Control strategy & calibration of fuel injection impulse width on EFI motorcycle engine," in *2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 2011, pp. 2047-2053.
- [5] Chen B., Wu Y. and Tran A., Control of intake manifold pressure for lean-burn motorcycle engine, *Control. Autom.*, 2013.
- [6] Araújo V. M., Design and tests of electronic management system for small motorcycle spark ignition engines, *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, Vol. 5, pp. 704-712, 2012.
- [7] Nakamura T., Hasegawa T., Suzuki M., Nakamura M. and Sawada Y., Fuel Injection System for Smaller Motorcycles Technical Notes.
- [8] Honda Company, PGM - FI for 4 - stroke 50cc scooters, 2016. <http://dubai-car-dealer.com/honda-pgm-fi-for-4-stroke-50cc-scooters.html>.
- [۹] ابوالحسن علوی، سید محمود و ناصر شفاپی فلاح، آزمون موتورسیکلت برای اخذ شرایط استاندارد آلایندگی یورو ۳، هشتمین همایش موتورهای درونسوز، تهران، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، ۱۳۹۲.
- [۱۰] شرکت گسترش سرمایه گذاری ایران خودرو، آشنایی با استاندارد های آلایندگی یورو، ۱۳۹۲.
- [۱۱] عتابی فریده، خضری مصطفی، ایرانی حمید، بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد بهینه سیستم مدیریت موتور (DoE) به روش EMS، علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۳۹۰.
- [12] Kiencke U. and Nielsen L., *Automotive control systems*. Springer-Verlag, 2000.
- [13] John b Heywood, *internal combustion engine fundamentals*. 1995.
- [14] Sakawa M., *Genetic Algorithms and Fuzzy Multiobjective Optimizatio*. 2002.
- [15] Faculty T. A., Kong S. and I. Fulfillment P., *LINEAR PROGRAMMING ALGORITHMS USING LEAST-SQUARES*, no. May, 2007.
- [16] Barlow T., Latham S., Mccrae I. and Boulter P., A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions, *TRL Publ. Proj. Rep.*, pp. 280, 2009.