صلنامه تحقیقات مکانیک کاربردی
جلد ۲، شماره ۴، ص‌ص ۳۵ الی ۴۲، بهار ۱۳۹۰
تاریخ دریافت: ۸۹/۰۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۲/۲۲

پیشنهاد روشی برای بهینه سازی مصرف سوخت و کاهش آلودگی تولیدی در موتورهای احتراق داخلی

علی شهیدی نژاد – کارشناس ارشد رشته معماری کامپیوتر – دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم
غلامرضا لطیف شبگاهی– استادیار، سیستم های کامپیوتری با تحمل خرابی – دانشگاه آزاد اسلامی واحد قم
E-mail: shahidinezhad@gmail.com

چکیده: مهمترین عامل برای کنترل فرآیند احتراق و آلاینده های تولیدی در موتورهای احتراق داخلی، کنترل نسبت هوا به سوخت می باشد. در این مقاله با طراحی یک جدول جستجو، مقدار هوای ورودی به سیلندر را تخمین زده و با طراحی یک کنترل کننده فازی، مقدار سوخت تزریقی به سیلندر را تعیین می کنیم. یک موتور احتراق داخلی را در محیط سیمولینک شبیه سازی کرده و سپس جدول جستجو و کنترل کننده فازی را در محیط سیمولینک شبیه سازی کرده و به موتور شبیه سازی شده اعمال می کنیم. شبیه سازی به دست آمده را به ازای ورودی ها و خطاهای مختلف آزمایش کرده و به صورت عددی و گرافیکی نشان می دهیم که روش پیشنهادی قادر است نسبت هوا به سوخت را با خطای کمتری نسبت به روش های مشابه، تنظیم کند.

واژه های کلیدی: نسبت هوا به سوخت، کنترل کننده فازی و شبیه سازی.

Suggesting a Method for Optimization of Fuel Consumption and Decreasing Emission in ICEs

A. Shahidinezhad, Department of Computer Architecture, Gom Islamic Azad
G. Latif-Shabgahi, Department of Computer Systems, Gom Islamic Azad

Abstract: The most important factor to control combustion and emission in internal combustion engines is controlling air fuel ratio. In this paper, the amount of air entering the cylinders is estimated by using a look up table and the amount of injecting fuel into the cylinders is determined by designing a fuzzy controller. First we simulate an internal combustion engine in simulink environment then we simulate look up table and fuzzy controller and apply them to the simulated engine. In addition to compare system performance with different inputs, we inject different errors into the simulation and evaluate the controller performance in the presence of disparate errors. It is shown graphically and numerically that the designed controller improves system function in determining air fuel ratio compared with existing controllers.

۱- مقدمه

به دلیل افزایش روزافزون قوانینی که در رابطه با آلودگی حاصل از خودروها تنظیم می‌شود، کنترل نسبت هوا به سوخت یک زمینه تحقیقاتی فعال در شرکت‌های خودروسازی می‌باشد. به منظور به‌حداقل رساندن آلودگی‌های مضر در خودروها از واکنشگر سه‌منظوره که به اگزوز وصل می‌شود استفاده می‌شود. واکنشگر سه منظوره مونواکسید کربن و هیدروکربن‌ها را اکسید می‌کند و اکسیدهای نیتریک را کاهش می‌دهد. واکنشگر سه منظوره هنگامی با حداکثر کارایی کار می‌کند که نسبت هوا به سوخت، نزدیک به مقدار ایده‌آل ۱۴/۶ باشد [۴-۱]. در واقع عامل مهم برای کنترل احتراق و آلاینده‌های تولیدی موتور، کنترل نسبت هوا به سوخت می‌باشد [۴-۱]. برای دستیابی به حداکثر بازده واکنشگر سه‌منظوره و کاهش چشمگیر آلاینده‌های تولیدی موتور، نیاز به کنترل بسیار دقیق نسبت هوا به سوخت با استفاده از فیدبک سنسور اکسیژن می‌باشد. بنابراین هدف این مقاله کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های تولیدی موتور با بکارگیری از یک کنترل‌کننده فازی می‌باشد. در واقع در هر لحظه باید تشخیص داده‌شود که در مرحله مکش، چه مقدار هوا داخل سیلندر می‌شود، سپس مقدار سوخت را تخمین زده و در نهایت با استفاده از خروجی کنترل‌کننده فازی، روی مقدار سوخت تخمین زده‌شده به گونه‌ای تاثیر بگذارد که در لحظات بعدی نسبت هوا به سوخت به مقدار ایده‌آل خود نزدیک شود. استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی گرافیکی سیستم‌های دینامیکی، بدلیل تلاش مهندسین خودرو برای کاهش زمان توسعه و کاهش هزینه‌های سیستم‌های کنترلی جدید، بیش از پیش معمول شده‌است. در این مقاله، موتور یک خودرو به دور از پیچیده‌گی‌های غیرضروری در محیط (SIMLINK) نرم‌افزار (MATLAB) شبیه‌سازی می‌کنیم. برای تخمین مقدار هوای داخل سیلندر در [۳و۴] از خوشه‌بندی فازی استفاده شده‌است، در [۵] این کار توسط الگوریتم جعبه‌سیاه فازی پیاده‌سازی شده است، در [۶] این کار توسط شبکه عصبی انجام شده‌است، در [۷] این کار با بکارگیری از PSO صورت گرفته‌است و در [۸] این کار با بکارگیری از یک جدول جستجو انجام شده‌است. در این مقاله به منظور تخمین مقدار سوخت داخل سیلندر از یک جدول جستجو استفاده می‌کنیم تا کنترل‌کننده نسبت هوا به سوخت را بهتر مورد آزمایش قراردهیم. برای طراحی کنترلر نسبت هوا به سوخت در [۱] از یک کنترلر PID خودکار که ضرایب کنترلی آن با استفاده از یک کنترلر فازی و به صورت آنلاین تنظیم می‌شود استفاده‌شده‌است و در [۳و۴] از کنترلر PID و کنترلر PID همراه با پیش‌بینی‌کننده اشمیت، استفاده شده‌است. در این مقاله از یک کنترل‌کننده فازی استفاده می‌کنیم. در بخش دوم پس از توصیف فیزیکی مدل موتور، یک خودرو را به دور از پیچیده‌گی‌های غیرضروری با استفاده از نرم‌افزار (SIMLINK) شبیه‌سازی می‌کنیم. در بخش سوم کنترلر فازی را با کمترین پیچیده‌گی و به‌گونه‌ای طراحی می‌کنیم که در شرایط کارکرد عادی و همچنین با وجود خطا بتواند عملکرد سیستم را بهبود دهد. پس از طراحی کنترلر فازی در محیط FIS (MATLAB)، کنترلر را در محیط (SIMLINK) وارد کرده و به سیستم اعمال می‌کنیم و در بخش چهارم روش پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

۲- توصیف فیزیکی موتور یک خودرو و شبیه‌سازی آن

پس از توصیف فیزیکی مدل موتور آن رادر محیط (SIMLINK) شبیه‌سازی می‌کنیم. جزئیات مربوط به مدل موتور برگرفته شده از کمپانی موتور فورد می‌باشد[۹].

۲-۱- توصیف فیزیکی موتور

نرخ هوایی که به مجرای ورودی وارد می‌شود توسط دو تابع کنترل می‌شود؛ یکی تابع زاویه صفحه دریچه گاز که به صورت تجربی حاصل می‌شود و دیگری تابعی از فشار جو و

فشار مجرا می‌باشد. نرخ جرمی هوای ورودی به مجرای ورودی به صورت معادله (۱) تعریف می‌شود.

$$\dot{m}_{ai} = f(\theta).g(p_m) \qquad (۱)$$

که در آن $f(\theta)$ به صورت معادله(۲) می باشد.

$$f(\theta) = 2.821 - 0.05231\theta + 0.10299^2 - 0.000063\theta^3 \qquad (۲)$$

در این معادله θ زاویه دریچه گاز می‌باشد. $g(p_m)$ به صورت معادله (۳) می‌باشد.

$$g(p_m) = \begin{cases} 1, & P_m \le \frac{P_{amb}}{2} \\ \frac{2}{P_{amb}}\sqrt{P_m P_{amb} - P_m^2}, & \frac{P_{amb}}{2} \le P_m \le P_{amb} \\ -1, & P_m \ge 2P_{amb} \end{cases} \qquad (۳)$$

که در این معادله P_m فشار مجرا و P_{amb} فشار محیط می‌باشد[9-11]. نرخ جریان جرمی هوایی که مدل از مجرا به داخل سیلندرها پمپ می‌کند در معادله (۴) توصیف شده‌است.

$$\dot{m}_{ao} = -0.366 + 0.08979NP_m - 0.0337NP_m^2 + 0.0001N^2p_m \qquad (۴)$$

که در این معادله N دور موتور (rad/s) و P_m فشار مجرا برحسب (bar) می‌باشد.

نرخ تغییرفشار مجرا طبق معادله(۵) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\dot{P}_m = \frac{RT}{V_m}(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{ao}) \qquad (۵)$$

که در این معادله R ثابت گاز ویژه، T دما (K)، V_m حجم مجرا (m^3)، $\dot{m}_{ao}$ نرخ جریان جرمی خروجی از مجرا (g/s) و $\dot{P}_m$ نرخ تغییر فشار مجرا (g/s) می‌باشد[۳و۹].

حسگر اکسیژن مقدار اکسیژن موجود در گازهای خروجی را اندازه‌گیری کرده و یک ولتاژ بین صفر و یک تولید می‌کند. همانطور که در معادله (۶) نشان داده شده است، عملگر این حسگر به صورت یک تابع tanh می‌باشد.

$$EGO = \frac{1 - \tanh(4(AFR - 14.6))}{2} \qquad (۶)$$

که در این معادله **AFR** نسبت هوا به سوخت می‌باشد.

۲-۲- شبیه‌سازی موتور در محیط SIMLINK

در این بخش با استفاده از ابزارهای محیط SIMLINK، موتور یک خودرو که شرح عملکرد آن در بخش قبل به صورت فیزیکی توصیف شد را شبیه‌سازی می‌کنیم. شکل (۱) بالاترین سطح سازی در SIMLINK را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل(۱) مشاهده می‌شود شبیه‌سازی به دو زیرسیستم اصلی تقسیم شده‌است و دور موتور ۳۰۰ rad/s درنظرگرفته شده‌است. زیرسیستم تخمین سوخت به‌منظور تخمین میزان سوخت مورد نیاز برای پاشش طراحی شده‌است و زیرسیستم موتور، در واقع با توجه به سوخت تخمین زده‌شده، میزان بازشدن دریچه گاز و دور موتور، مثل یک موتور خودرو عمل‌کرده و ما را از چگونگی عملکرد موتور باخبر می‌کند. به محض اینکه موتور شروع به کار می‌کند زیرسیستم موتور فشار هوای مجرای ورودی را برای زیرسیستم سوخت ارسال می‌کند. این زیرسیستم با توجه به فشار هوای مجرا و دور موتور، میزان سوخت مورد نیاز برای احتراق را تخمین زده و به زیرسیستم موتور ارسال می‌کند. زیرسیستم موتور خود به دو زیرسیستم تقسیم می‌شود؛ یکی زیرسیستم دریچه گاز و مجرا است که در این زیرسیستم نحوه عملکرد دریچه گاز و مجرا براساس روابط (۵-۱) شبیه‌سازی شده‌است. دیگری زیرسیستم ترکیب، احتراق و حسگر اکسیژن است که در این زیرسیستم فرآیندهای ترکیب و احتراق به صورت یک تاخیر در نظرگرفته شده‌اند و از طرفی حسگر اکسیژن براساس معادله (۶) شبیه‌سازی شده‌است. در زیرسیستم تخمین سوخت ابتدا، میزان هوای ورودی به سیلندر توسط زیرسیستم تخمین هوا، تخمین‌زده می‌شود و سپس عدد به‌دست‌آمده بر ۱۴/۶ تقسیم می‌شود تا مقدار سوخت تعیین شود. وظیفه زیرسیستم تخمین هوا، تخمین جریان هوای ورودی

به سیلندر می‌باشد تا براساس آن مقدار سوختی که باید در سیلندر پاشش شود، تعیین شود. برای طراحی و شبیه‌سازی این بخش از یک جدول جستجو استفاده شده‌است [۸]. تخمین میزان هوایی که قبل از مرحله احتراق، داخل سیلندر است همواره یکی از چالش‌ها بوده‌است زیرا عواملی چون میزان رطوبت، میزان فشار جو، استهلاک قطعات خودرو، تغییرات ناگهانی زاویه دریچه گاز و غیره بر روی سوخت تخمین زده شده تاثیر گذار هستند. در این مقاله به منظور بررسی بهتر عملکرد کنترلر نسبت هوا به سوخت، این قسمت را با استفاده از یک جدول جستجو طراحی و شبیه‌سازی می‌کنیم. جریان هوای ورودی موتور در [۹] به صورت معادله (۷) تعریف شده است.

$$q = C_{pump}(N, P_m)NP_m \qquad (۶)$$

در [۹] تابع C_{pump} به صورت یک جدول جستجو ارائه شده‌است. همانطور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود زیرسیستم تخمین هوا، دارای دو ورودی و یک خروجی است. برای پیاده‌سازی معادله (۷) از جدول جستجو استفاده شده‌است. در واقع براساس فشار مجرا و دور موتور، جریان هوای ورودی به سیلندر تخمین زده می‌شود. ورودی‌های جدول جستجو دور موتور و فشار مجرا می‌باشند. در جدول جستجو مقادیر برای دور موتور، بازه ۰ تا ۱۰۰۰ و برای فشار مجرا، بازه ۰ تا ۰/۹۵ در نظر گرفته‌شده است.

۳- طراحی و شبیه‌سازی کنترلر فازی

هدف از کنترل ثابت نگهداشتن نسبت هوا به سوخت در یک مقدار به خصوص ایده‌آل می‌باشد. در واقع با استفاده از اطلاعاتی که از حسگر اکسیژن به دست می‌آید ، هدف این است که روی سوخت تخمینی به‌گونه‌ای تاثیر گذاشته شود که در لحظات بعدی خروجی حسگر اکسیژن حاکی از بهبود در ترکیب هوا و سوخت باشد. حسگر اکسیژن، رقیق و غلیظ بودن مخلوط سوخت و هوا را با ارسال ولتاژهای صفر تا یک ولت تعیین می‌کند. هنگامی که یک ولتاژ کم ارسال می‌کند حاکی از سوخت رقیق در داخل سیلندر است و هنگامی که یک ولتاژ زیاد ارسال می‌کند حاکی از سوخت غلیظ در داخل سیلندر - است و اگر ولتاژی نزدیک به‌نیم ارسال کند حاکی از ترکیب ایده‌آل هوا و سوخت می‌باشد.. برای کنترلر فازی دو ورودی در نظرگرفته شده است که یکی مقدار قبلی حسگر اکسیژن و دیگری مقدار فعلی حسگر اکسیژن می‌باشد. تابع عضویت برای ورودی اول و ورودی دوم به صورت شکل (۳) درنظر گرفته‌شده‌اند. در این تابع عضویت از متغیرهای زبانی L ، N ، H ، VH و VL استفاده شده‌است که L به‌معنی کم، N به‌معنی نرمال، H به‌معنی زیاد، VL به معنی خیلی‌کم و VH به‌معن خیلی زیاد می‌باشند. تابع عضویت خروجی به صورت شکل (۴) در نظرگرفته شده است. توابع عضویت براساس حداکثر خطای ممکن در یک خودرو تنظیم می‌شوند. دراین مقاله حداکثر خطا ۲۰٪ در نظرگرفته شده‌است زیرا خطای بیش از ۲۰٪ غیرمعمول است و احتمالا قطعه‌ای از خودرو معیوب شده‌است. برای خروجی از پنج متغیر زبانی VR، R، N، L و VL استفاده شده است که VR به‌معنی خیلی‌غلیظ، R به‌معنی غلیظ، N به‌معنی نرمال، L به‌معنی رقیق و VL به‌معنی خیلی‌رقیق می‌باشند. باتوجه به مقدار فعلی حسگر اکسیژن (ورودی اول) و مقدار قبلی حسگر اکسیژن (ورودی دوم) و اطلاعات تکنسین، پایگاه قواعد را همانطور که در جدول(۱) نشان داده شده، تشکیل داده‌می‌شود.[۸]. توابع عضویت و پایگاه قواعد در محیط FIS متلب وارد کرده و موتور استنتاج را ممدانی در نظر می‌گیریم زیرا در خروجی به مقادیر دقیق نیاز است[۱۲]. سپس کنترلر فازی را وارد محیط SIMLINK نموده و به موتور شبیه‌سازی شده الحاق می‌کنیم. خروجی کنترلر باید در مقدار سوخت تخمین زده‌شده ضرب شود. بنابراین در داخل زیرسیستم تخمین سوخت، این تغییرات اعمال می‌شود.

۴- آزمایش شبیه‌سازی

برای این که بدانیم اضافه کردن کنترلر تا چه حد در عملکرد موتور در تعیین نسبت هوا به سوخت تاثیرگذاراست باید عملکرد موتور با کنترلر را با موتور بدون کنترلر به‌ازای ورودی-های مختلف آزمایش کرد. برای مقایسه عملکرد آنها می‌توان نمودار نسبت واقعی هوا به سوخت آنها را مقایسه نمود. برای مقایسه دقیق‌تر، زیرسیستمی که امکان محاسبه و مشاهده انتگرال مربعات خطا را می‌دهد را در محیط SIMLINK پیاده‌سازی و به شبیه‌سازی اضافه می‌شود. هنگامی که شبیه‌سازی‌ها آزمایش می‌شوند اگر انحراف نسبت هوا به سوخت از ۱۴/۶، کمتر از ۱٪ باشد این خطا قابل گذشت‌است. زیرا تاثیر بسیار ناچیزی در مقدار سوخت مصرفی و آلاینده‌های خودرو دارد [۱و۳و۴].

۴-۱- آزمایش شبیه سازی به ازای ورودی های مختلف

پس از اعمال ورودی شکل (۵) به عنوان زاویه دریچه گاز به شبیه سازی با کنترلر فازی و اجرای شبیه سازی به مدت ۳۰ میلی ثانیه، نسبت واقعی هوا به سوخت به صورت شکل (۶) می باشد. **در صورتی که با اعمال همین ورودی در شبیه سازی بدون کنترلر فازی نسبت واقعی هوا به سوخت به صورت شکل (۷) می باشد.**

ورودی شکل (۵) در مدت زمان کمی دارای تغییرات ناگهانی شدید است اما همانطوریکه در شکل(۶) نشان داده‌شده انحراف نسبت به ۱۴/۶ بسیار ناچیز(کمتر از ۱٪) است. انتگرال مربعات خطا برای شبیه‌سازی بدون کنترلر فازی ۱/۹۷۵ و برای شبیه-سازی با کنترلر فازی ۰/۰۰۸۱ می‌باشد و هنگامی که از یک موج دندان اره‌ای با دوره تناوب ۴ms و دامنه ۲۰ به عنوان زاویه دریچه گاز استفاده می‌کنیم انتگرال مربعات خطا برای شبیه‌سازی بدون کنترلر فازی ۱/۹۶۶ و برای شبیه‌سازی با کنترلر فازی ۰/۰۰۵۵۹ می‌باشد.

با توجه به این که در مقالات مختلف از مدل‌های متفاوتی از خودرو و ورودی‌های متفاوتی(از نظر نوع و شکل) استفاده شده‌است در ادامه به صورت درصدی نتایج بدست آمده را با دیگر نتایج مقایسه خواهیم نمود. باید خاطر نشان‌کرد که به منظور آزمایش بهتر عملکرد سیستم طراحی‌شده، ورودی هایی که در این مقاله مورد نظراست سیستم را به بدترین نحو ممکن به مخاطره می‌اندازد. در [۱] از یک کنترلر PID که ضرایب آن به صورت آنلاین و توسط یک کنترلر فازی تنظیم می‌شوند، استفاده شده است که با درنظر گرفتن دو ورودی دریچه گاز مختلف ۶۶ ٪ و ۳۶ ٪ نسبت به حالت بدون کنترلر بهبودی حاصل شده‌است. در [۳و۴] از کنترلر PID و پیش‌گوئی اشمیت استفاده شده‌است که با درنظر گرفتن دریچه گاز به صورت یک تک پله، انتگرال مربعات خطا برای حالتی که از کنترلر PID استفاده می‌شود ۴/۹۶۰۵ و برای حالتی که از کنترلر PID و پیش‌گوئی اشمیت استفاده می شود ۳/۱۰۴۱ می‌باشد. درصورتیکه با بکارگیری از کنترلر فازی که در این مقاله توصیف شد، درصد بهبودی به‌ازای ورودی موج مربعی ۹۹/۶٪ و به‌ازای موج دندان اره‌ای ۹۹/۷٪ نسبت به حالت بدون کنترلر بهبودی حاصل شده-است. و از طرفی هم ورودی را پیچیده‌تر درنظر گرفته شده که برای این هم که از مدار ساده‌تری برای طراحی کنترلر استفاده شده‌است. در هیچیک از مراجع عملکرد سیستم را در حضور خطا بررسی نکرده‌اند. در ادامه به سیستم خطا تزریق‌کرده و در حضور خطا عملکرد آن بررسی می‌شود.

۴-۲- آزمایش شبیه‌سازی در حضور خطا

خطا می تواند از سنسورها، قطعات خودرو و یا شرایط جوی حاصل شود[۸]. تمامی خطاها نهایتا منجر به فاصله گرفتن نسبت هوا به سوخت از مقدار ایده آل می شوند. بنابراین خطا را در داخل زیرسیستم تخمین سوخت به عنوان ضریبی به مقدار هوای تخمین زده شده تزریق می کنیم. جدول (۲) انتگرال مربعات خطا به ازای ورودی موج مربعی شکل (۵) و ضرایب مختلف برای شبیه سازی های با و بدون کنترلر را نشان می

دهد. همانطور که در جدول (۲) نشان داده شده با به کار گیری از کنترلر فازی، انتگرال مربعات خطا در حضور خطا های مختلف بسیار ناچیز است.

۵- نتیجه‌گیری

موتور احتراق داخلی را به دور از پیچیده گی های غیرضروری در محیط سیمولینک شبیه سازی کردیم. برای تخمین میزان هوای داخل سیلندر از یک جدول جستجو استفاده کردیم. سپس کنترلر فازی را طراحی و به شبیه سازی الحاق کردیم. کنترلر فازی را به ازای ورودی هایی که سیستم را به بدترین نحو ممکن به مخاطره می اندازند آزمایش کردیم و نشان دادیم که به ازای این ورودی ها، کنترلر فازی قادر است، نسبت هوا به سوخت را با خطایی کمتر از ۱٪ نسبت به ۱۴/۶ تنظیم کند. سپس به موتور خطاهای مختلف تزریق کرده و نتایج بدست آمده را در جدول (۲) نمایش دادیم.

۶- مراجع

[1] Ghaffari, A., Shamekhi, A.H., Saki, A. and Kamrani, E., "Adaptive Fuzzy Control for Air-fuel Ratio of Automobile Spark Ignition Engine", Proc. of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 36, Dec, 2008.

[۲] وثوقی، غ.ر.، سعیدی، م.ح.و میری، س،م.، "پایش نسبت هوا به سوخت در موتور احتراق داخلی با استفاده از پایشگرهای فازی، انتگرالی و فازی – انتگرالی"، مجله تحقیقات موتور، شماره۷ ، پاییز۸۴.

[3] Copp, D.G., Burnham, K.J. and Lockett, F.P., "Model Comparison for Feed Forward Air/Fuel Ratio Control", UKACC Int. Conf. on Control, Sept. 1998.

[4] Copp, D.G., Burnham, K.J. and Lockett, F.P., "Fuzzy Modeling Techniques Applied to an Air/Fuel Ratio Control System", The Institution of Electrical Engineers, Printed and published by the IEE, Savoy Place, London WC2R OBL, 8 1998.

[5] Bastian, A., "Modeling Fuel Injection Control Maps Using Fuzzy Logic", Laboratory for Int. Fuzzy Engineering Research (LIFE), IEEE, JAPAN, 1994.

[6] Huang, T., "Neural Network Modeling and Feedback Error Learning Control for Automotive Fuel-Injection System", IEEE, United States, 2006.

[7] Pita Gil, G., Talon, V., Sandou, G., Godoy, E. and Dumur, D., "Robust Non-linear Control Applied to Internal Combustion Engine Air Path Using Particle Swarm Optimization",18th IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009.

[8] MathWorks, Inc, "Using simulink® and state flow TM in Automotive Applications", © 1998 by The Math Works, Inc.

[9] Crossley, P.R. and Cook, J.A., "A Nonlinear Engine Model for Drive Train System Development:, IEE Int. Conf. 'Control 91', Conf. Publication 332, Vol. 2, 25-28 March, Edinburgh, U.K, 1991, PP. 921-925.

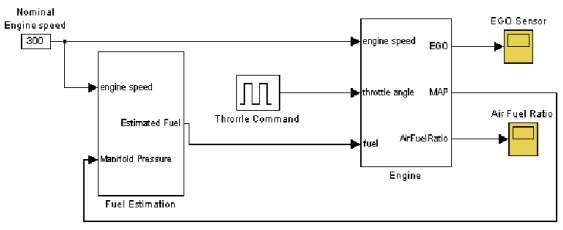
[10] Weeks, R.W. and Moskwa, J.J., "Automotive Engine Modeling for Real-Time Control Using MATLAB-SIMULINK", SAE 950417, Power Train Control Research Laboratory University of Wisconsin-Madison, 1995.

[11] Pulkrabek, W., "Eng. Fundamentals of the Int. Combustion Engine", ISBN-13: 9780131918559 , 504, pp, 2004-08-19.

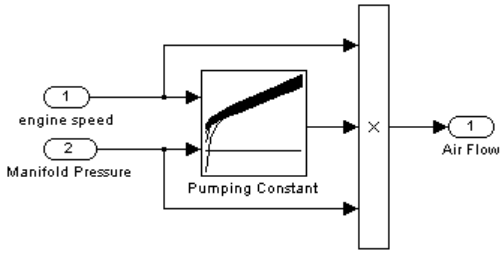
[12] Lie-xin, W., "A Course in Fuzzy Systems and Control", 618 pages, ISBN / ASIN: 0135930057. EAN: 9780135930052, Publication Date: 1996-11-20.

جدول(۱) : پایگاه قواعد فازی

ورودی اول \ ورودی دوم	VL	L	N	H	VH
VH	VR	VR	VR	VR	VR
H	R	R	R	R	R
N	N	N	N	N	N
L	L	L	L	L	L
VL	VL	VL	VL	VL	VL



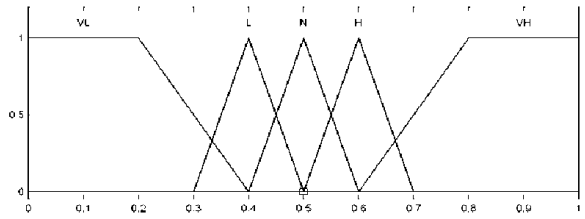
شکل (۱): بالاترین سطح شبیه‌سازی



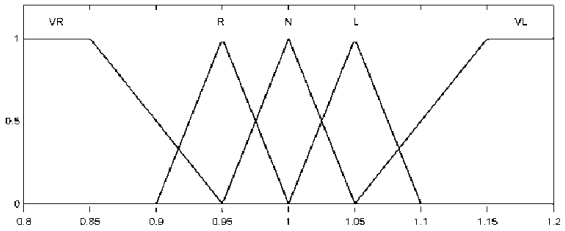
شکل (۲): زیرسیستم تخمین هوا

جدول(۲)- انتگرال مربعات خطا ی شبیه سازی ها در حضور خطا های مختلف

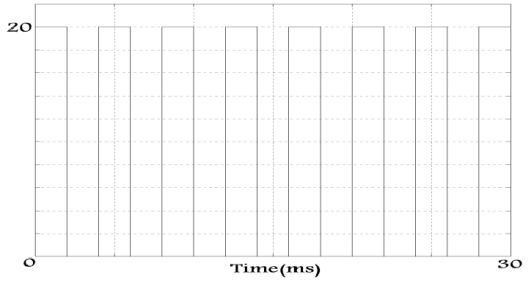
میزان خطا	شبیه‌سازی بدون کنترلر	شبیه‌سازی با کنترلر
۱/۲	۱۷۵/۳	۰/۲۱۳۱
۰/۸	۳۰۴/۶	۱/۴۶۲
۱/۱	۵۹/۳۱	۰/۷۴۱۷
۰/۹	۵۳/۱۳	۰/۰۶۸۸
۱	۱/۹۷۵	۰/۰۰۸۱



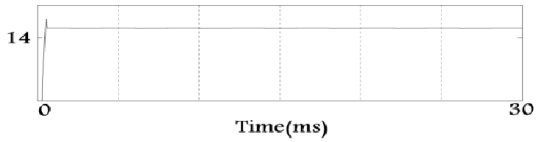
شکل (۳): توابع عضویت برای ورودی های اول و دوم



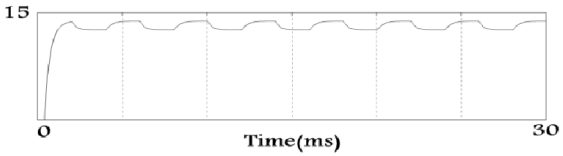
شکل (۴): تابع عضویت خروجی



شکل (۵): موج مربعی به عنوان زاویه دریچه گاز



شکل (۶): نسبت واقعی هوا به سوخت برای شبیه‌سازی با کنترلر فازی



شکل (۷): نسبت واقعی هوا به سوخت برای شبیه‌سازی بدون کنترلر فازی