ISME2013-1437

بهینه‌سازی عملکرد و مصرف سوخت موتور SI با استفاده از زمانبندی متغیر سوپاپ مکش

محمد تقی‌زاده[۱]، امیرحسین شامخی[۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد نیرو محرکه خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک / دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، Mohamad.t64@gmail.com
[۲] استادیار گروه خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک / دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، shamekhi@kntu.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر فناوری زمان‌بندی متغیر سوپاپ، در موتورهای احتراق داخلی مورد توجه قرار گرفته است. این فناوری بر روی سوپاپ تخلیه و مکش و یا هر دو قابل اعمال بوده و با استفاده از آن می‌توان مقدار جرم گاز گذرنده از سوپاپ‌ها را به منظور افزایش قدرت و گشتاور و همچنین کاهش آلایندگی موتور، کنترل کرد. هدف از کار حاضر، بررسی اثر زمانبندی متغیر سوپاپ مکش بر روی بازده حجمی و گشتاور خروجی و تاثیر آن بر مصرف سوخت یک موتور SI است. ابتدا یک مدل شبه‌بعدی، ترمودینامیکی، دو ناحیه‌ای و سیکل باز در نرم‌افزار GTpower توسعه داده شد سپس نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی صحه‌گذاری و مورد مقایسه قرار گرفت. پس از آن با استفاده از نتایج خروجی مدل شبیه‌ساز در زمانبندی‌های مختلف، یک مدل شبکه عصبی Feedforward توسعه داده شد. این مدل دارای دو ورودی و سه خروجی است که زمان باز و بسته شدن سوپاپ به عنوان ورودی و پارامترهای بازده حجمی، گشتاور و مصرف سوخت به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، زمانبندی‌های بهینه برای ۳ حالت پرشتاب (بیشترین گشتاور) و کم مصرف (مصرف سوخت کم) و حالت‌های میانی ارائه شد. در کار حاضر، با استفاده از مکانیزم زمانبندی متغیر سوپاپ مکش، بازده حجمی و گشتاور خروجی در دورهای پایین به ترتیب به میزان ۵/۴ و ۵/۶ درصد و در دورهای بالا به میزان ۲/۸ و ۲/۳ درصد افزایش داشته‌اند. همچنین در زمانبندی‌های بهینه مربوط به حالت کم مصرف، مصرف سوخت به میزان ۲۴٪ درصد کاهش پیدا کرد.

واژه های کلیدی

موتور اشتعال جرقه‌ای، بازده حجمی، زمان‌بندی متغیر سوپاپ، شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک، مصرف سوخت

مقدمه

در موتورهای احتراق داخلی، به طور معمول زمان‌بندی سوپاپ‌های مکش و دود ثابت است و عموما زمان‌بندی‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که موتور بطور نسبی در همه دورها عملکرد مناسبی داشته باشد. کنترل سوپاپ‌ها یکی از موثرترین پارامترها در زمینه کنترل گازها و بهینه‌سازی بازده حجمی و آلایندگی موتور است.[1]

زمانبندی متغیر سوپاپ سیستمی است که علاوه بر کنترل زمان باز شدن سوپاپ طول دوره باز بودن سوپاپ را نیز کنترل می‌کند.

با بکارگیری این تکنولوژی در مرحله مکش، می‌توان تنفس موتورهای مکش طبیعی را بهینه کرد، در نتیجه گشتاور و توان خروجی موتور نیز افزایش می‌یابند. به منظور بهبود عملکرد موتورهای احتراق داخلی بررسی‌های زیادی انجام شده است. هاگن و همکارانش با طراحی و آزمایش یک سامانه متغیر زمانبندی سوپاپ مکش توانستند مصرف سوخت و آلایندگی موتور مورد آزمایش را پایین بیاورند.[2]

آلکیداس با معرفی فناوری‌های مختلف استفاده شده در موتور که باعث بالا بردن کارایی موتور می‌شوند از مکانیزم زمانبندی متغیر سوپاپ، به عنوان یکی از کلیدی‌ترین روش‌ها یاد می‌کند.[3]

پورخصالیان و شامخی نیز با استفاده از مکانیزم زمانبندی سوپاپ دود توانستند مصرف سوخت و آلایندگی یک موتور اشتعال جرقه‌ای را پایین بیاورند.[4]

کروتر در مقاله‌اش راهکارهای موجود برای کنترل بار موتور بوسیله‌ی تغییر زمانبندی هر دو سوپاپ تخلیه و مکش و همچنین بالا رفتن بازدهی سیکل را نشان داد.[5]

قاضی میر سعید و شامخی نیز با استفاده از بهینه‌سازی زمانبندی و لیفت سوپاپ مکش، راندمان حجمی یک موتور SI را بهبود بخشیدند.[6] در کار حاضر نیز هدف بررسی اثر زمانبندی متغیر سوپاپ مکش بر روی گشتاور و مصرف سوخت موتور TU5 است.

برای این منظور تکنیک‌هایی که بکار برده می‌شوند باید قابلیت مدل‌سازی و پیشگویی رفتار سیستم‌های پیچیده را داشته باشند. پی بردن به رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم و تعیین رابطه بین آن‌ها در مسائل بهینه‌سازی ضرورت دارد. اما روابط ریاضی که بتواند یک سیستم واقعی را مدل کند بسیار پیچیده و در مواقعی دستیابی به آن غیر ممکن خواهد بود.

روش‌های محاسباتی نرم‌افزاری یکی از روش‌های جایگزین برای حل این مشکل است. به عنوان مثال منطق فازی، شبکه‌های عصبی و روش‌های بهینه‌سازی تکاملی توانایی بالایی را در زمینه حل و کنترل و بهینه‌سازی سیستم‌های غیر خطی پیچیده از خود نشان داده‌اند.

موتور TU5 که موتور خودروی پژو ۲۰۶ می‌باشد از جمله موتورهای روز دنیاست که در این مقاله استفاده از مکانیزم زمانبندی متغیر، در آن مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی و صحه‌گذاری نتایج

همان گونه که ذکر شد برای مدل‌سازی موتور TU5 از نرم‌افزار GTpower استفاده شده است. رویه مدلسازی از بخش تغذیه موتور آغاز شده و شامل بخش‌های فیلتر هوا، دریچه گاز، منیفولد ورودی هوا، دریچه‌های ورودی، انژکتورها، سیلندرها، بخش زنجیره لنگ، دریچه‌های خروجی و نهایتاً بخش منیفولد دود می‌باشد بدین ترتیب چرخه موتور تکمیل می‌شود.

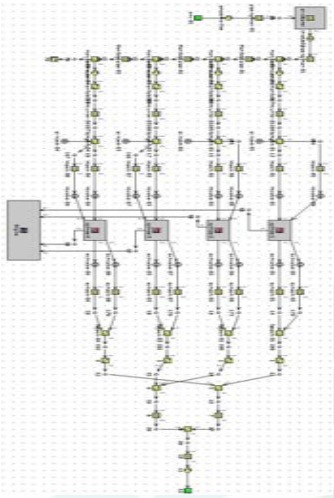
مدل جریانی مورد استفاده در معادلات حل، شامل معادلات ناویر-استوکس[1] می‌باشد که شامل معادلات پایستاری انرژی، پیوستگی و مومنتم است. این معادلات در یک بعد حل می‌شوند به این معنی که همهٔ مقادیر به طور میانگین در مسیر حرکتشان در نظر گرفته می‌شوند. مشخصات موتور مورد بررسی در جدول (۱) نشان داده شده است.

سیستم مکش نقش مهمی در تنفس موتور ایفا می‌کند بنابراین مدل‌سازی این بخش از موتور از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به همین دلیل مشخصات هندسی منیفولد و راهگاه‌ها از نقشه‌های دوبعدی سیستم مکش موتور، در نرم‌افزار منظور شده است. در موتورهایی که از سیستم‌های پرخورانی استفاده نمی‌کنند انتقال حرارت در سیستم مکش نقش کمتری ایفا می‌کند بنابراین از انتقال حرارت در اکثر بخش‌های مدل سیستم مکش صرف نظر شده است.

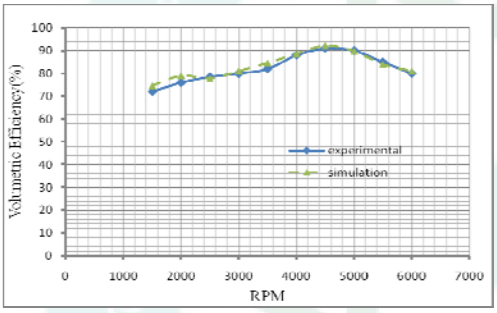
جدول ۱: مشخصات موتور TU5

ردیف	مشخصات	
۱	نام موتور	TU5JP4
۲	نوع مکش	تنفس طبیعی
۳	حجم موتور(cc)	۱۵۸۷
۴	قطر داخلی سیلندر (mm)	۷۸/۵
۵	کورس پیستون (mm)	۸۲
۶	طول شاتون (mm)	۱۳۳/۵
۷	نسبت تراکم	۱۰/۸ و ۱۱
۸	زاویه باز شدن سوپاپ مکش	10°bTDC
۹	زاویه بسته شدن سوپاپ مکش	50°aBDC
۱۰	زاویه باز شدن سوپاپ دود	34°bBDC
۱۱	زاویه بسته شدن سوپاپ دود	20°aTDC

شماتیک کلی مدل در شکل (۱) نشان داده شده است. همچنین مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در شکل‌های (۲) تا (۴) نشان داده شده است.

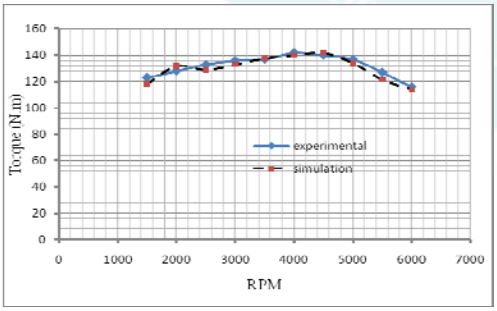


شکل ۱: شماتیک مدل ساخته شده در نرم‌افزار GTpower



شکل ۲: مقایسه بازده حجمی در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حالت تمام بار

مقایسه گشتاور خروجی با نتایج آزمایشگاهی در شکل (۳) نشان داده شده است. میزان خطا در نمودار گشتاور نیز مانند نمودار توان برابر با ۲/۲٪ می‌باشد. در شکل (۴) نیز نتایج bsfc در شبیه‌سازی برای دورهای مختلف در حالت تمام بار با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

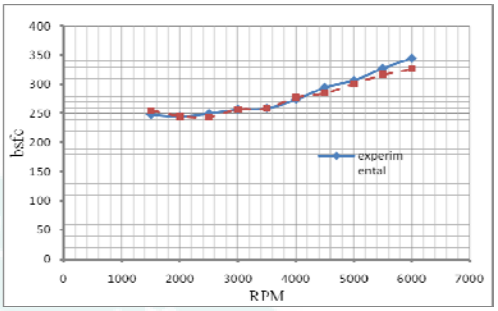


شکل ۳: مقایسه گشتاور خروجی در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حالت تمام بار

در نمودار مربوط به bsfc نیز میانگین خطا برابر با ۲/۱٪ است. bsfc که همان مصرف سوخت ویژه ترمزی است در واقع از نسبت مصرف

[1] Navier- Stokes

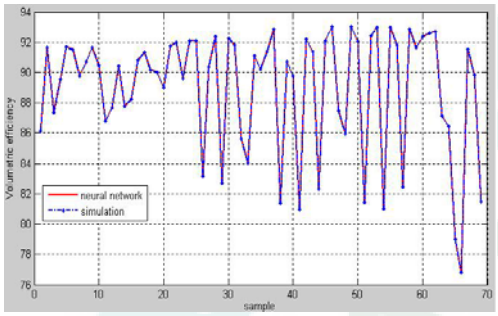
سوخت به توان ترمزی موتور بدست می‌آید. با توجه به اینکه مقدار توان خروجی موتور با دقت خوبی صحه‌گذاری شده است، می‌توان گفت که پارامتر مصرف سوخت موتور در شبیه‌سازی دارای دقت بالایی است. بنابراین نتایج حاصل از شبیه‌سازی تا حد بالایی قابل استناد بوده و می‌توان از این نتایج برای بهینه‌سازی استفاده کرد.



شکل ۴: مقایسه bsfc در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حالت تمام بار

شبکه عصبی

معمولا زاویه بازشدن سوپاپ ورودی بین ۱۰ تا ۳۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا و زاویه بسته شدن ۵۰ تا ۷۰ درجه بعد از نقطه مرگ پایین می‌باشد[7]، اما برای گسترده کردن دامنه جستجو در الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی چندهدفه، محدوده باز شدن سوپاپ مکش را بین ۰ تا ۳۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا و محدوده بسته شدن سوپاپ مکش را بین ۳۰ تا ۹۰ درجه بعد از نقطه مرگ پایین درنظر می‌گیریم. پس از به اجرا گذاشتن مدل برای زمانبندی‌های مختلف و جمع‌آوری نتایج خروجی، با توجه به گسسته بودن داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و به‌منظور بیان رابطه بین ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم بصورت تابع، نیاز به مدلی داریم که علاوه بر اینکه باید به عنوان یک تابع عمل کند باید از قدرت پیشگویی بالایی نیز برخوردار باشد تا بتواند نقاطی را که در داده‌های شبیه‌سازی وجود ندارند، به خوبی پیش‌بینی کند. همچنین برای تعریف تابع شایستگی در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه از این مدل استفاده می‌شود. شبکه‌های عصبی[۲]، با قابلیت قابل توجه آنها در استنتاج معانی از داده‌های پیچیده یا مبهم، می‌تواند برای استخراج الگوها و شناسایی روش‌هایی که آگاهی از آنها برای انسان و دیگر تکنیک‌های کامپیوتری بسیار پیچیده و دشوار است به کار گرفته شود. با توجه به ویژگی‌های شبکه عصبی در زمینه پیشگویی نتایج و قدرت انطباق آن با داده‌های جدید، در این کار از یک مدل شبکه عصبی برای تعریف تابع استفاده می‌کنیم. مدل مورد نظر از نوع Feed Forward بوده که از الگوریتم پس انتشار خطا برای آموزش آن استفاده شده است. در این مدل از ۳ لایه مخفی استفاده شده است که به ترتیب هر یک دارای ۱۰،۱۵،۱۰ نرون می‌باشند. شبکه عصبی دارای ۲ ورودی و ۳ خروجی می‌باشد، زمان باز و بسته شدن سوپاپ مکش به عنوان ورودی شبکه عصبی و پارامترهای بازده حجمی، گشتاور و مصرف سوخت به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده است، در مجموع از ۱۰ مدل شبکه عصبی برای ۱۰ دور کاری موتور در حالت تمام بار و از ۴۶۵۰ داده برای آموزش استفاده شده است. افزایش بی‌رویه در پارامترهای خروجی منجر به افزایش لایه‌های میانی می‌شود و آموزش شبکه را پیچیده‌تر می‌کند. در این کار از ۳ پارامتر عملکردی با توجه به نیاز مسئله، به عنوان خروجی شبکه عصبی استفاده شده است. در شکل ۵ نتایج پیشگویی مدل شبکه عصبی برای ۷۰ داده تست در دور ۴۰۰۰ دور بر دقیقه برای بازده حجمی در حالت تمام بار نشان داده شده است.



شکل ۵: پیشگویی مدل شبکه عصبی برای ۷۰ داده تست در دور ۴۰۰۰ دور بر دقیقه برای بازده حجمی در حالت تمام بار

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی برای یافتن راه‌حل برای بهینه‌سازی مسائل پیچیده، با کمک علم رایانه است. این الگوریتم نوع خاصی از الگوریتمهای تکاملی است که براساس نظریه تکاملی داروین بنیان‌گذاری شده و از تکنیک‌های زیست‌شناسی استفاده می‌کند. الگوریتم‌های تکامل‌پذیر بر روی جمعیت‌هایی از افراد به جای یک تک پاسخ کار می‌کنند، از این رو جستجو به صورت موازی می‌تواند صورت گیرد. موضوع بحث بهینه‌سازی چندهدفه[۳]، مسائلی است که دارای دو یا چند معیار بهینگی هستند که غالبا با هم در تعارض می‌باشند. این گونه مسائل، در شاخه‌های مختلف علوم پایه، مهندسی و اقتصاد، روز به روز بیشتر مطرح می‌شوند و از این رو نیاز به روش‌های مناسب برای حل دقیق و صحیح این مسائل، در حال افزایش است. مشکل اصلی که در برخورد با این گونه مسائل مطرح است، این است که بر خلاف مسائل بهینه‌سازی تک هدفه که دارای یک جواب بهینه هستند، در مسائل بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از جواب‌ها وجود دارند که هر کدام از دیدگاهی می‌توانند بهینه باشند. این مجموعه از جواب‌ها در حوزه بهینه‌سازی چندهدفه، به جبهه پارتو[۴] معروف هستند. در این مقاله هدف تعیین شده در بهینه‌سازی چندهدفه، افزایش گشتاور موتور و کاهش مصرف سوخت است و

[۲] Artificial neural network

[۳] Multi objective optimization

[۴] Pareto Front

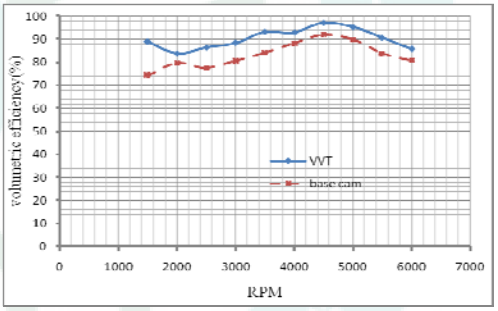
زمان باز و بسته شدن سوپاپ مکش پارامترهایی هستند که به منظور هدف تعیین شده باید بهینه شوند. بدین منظور مدل شبکه عصبی تعریف شده در بخش قبل را به عنوان تابع شایستگی[5] یا تابع هزینه[6] به الگوریتم ژنتیک معرفی می‌کنیم.

نتایج

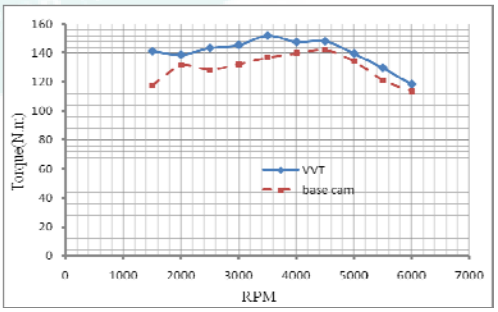
نتایج بهینه‌سازی چندهدفه را در ۳ بخش کلی می‌توان تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از: زمانبندی بهینه برای حالت گشتاور ماکزیمم، زمانبندی بهینه برای حالت مصرف سوخت کمتر و زمانبندی بهینه برای حالت‌های میانی.

الف) زمانبندی بهینه از برای هدف گشتاور ماکزیمم

اگر از دیدگاه افزایش گشتاور به مسئله نگاه شود، زمانبندی ارائه شده توسط بهینه‌سازی چندهدفه، منجر به افزایش بازده حجمی و گشتاور خروجی موتور در دورهای پایین به ترتیب به میزان ۵/۴ و ۵/۶ درصد و در دورهای بالا به میزان ۲/۸ و ۲/۳ درصد می‌شود. نتایج بازده حجمی برای دو حالت VVT و پایه در شکل (۶) نشان داده شده است. همچنین نتایج گشتاور ترمزی نیز برای دو حالت VVT و پایه در شکل (۷) نشان داده شده است.

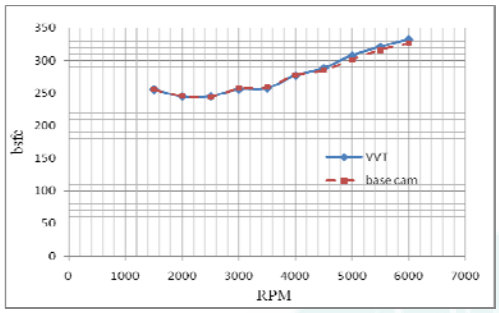


شکل ۶: نمودار بازده حجمی در دو حالت VVT و پایه از دیدگاه افزایش گشتاور خروجی



شکل ۷: نمودار گشتاور خروجی در دو حالت VVT و پایه از دیدگاه افزایش گشتاور خروجی

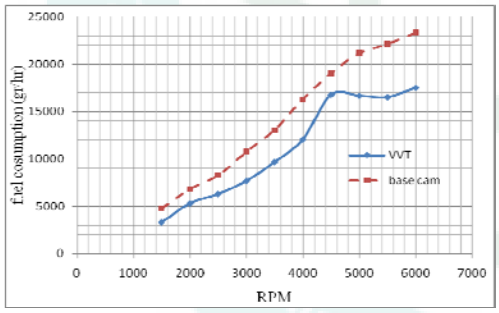
مقادیر bsfc برای دو حالت VVT و پایه در شکل (۸) نشان داده شده است. این پارامتر در تمامی دورها برای دو حالت ثابت مانده است، ارتقاء توان به همراه ثابت ماندن bsfc از مزایای این روش است.



شکل ۸: نمودار bsfc در دو حالت VVT و پایه از دیدگاه افزایش گشتاور خروجی

ب) زمانبندی بهینه از برای هدف مصرف سوخت کمتر

در این دیدگاه زمانبندی‌های ارائه شده توسط بهینه‌سازی چندهدفه منجر به مصرف کمتر سوخت در موتور می‌شوند. با استفاده از این زمانبندی‌ها، مصرف سوخت خودرو بصورت میانگین تا ۲۴٪ کاهش داده می‌شود. مصرف سوخت در دو حالت VVT و پایه در شکل (۹) نشان داده شده است.



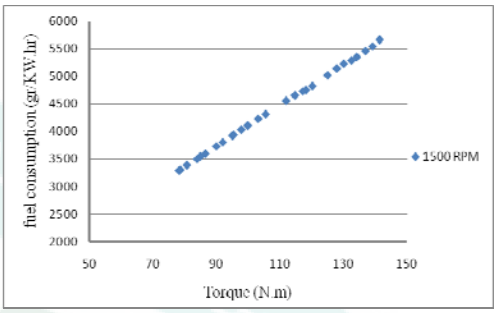
شکل ۹: مقایسه مصرف سوخت در دو حالت VVT و پایه از دیدگاه کاهش مصرف سوخت

ج) زمانبندی بهینه برای حالت‌های میانی

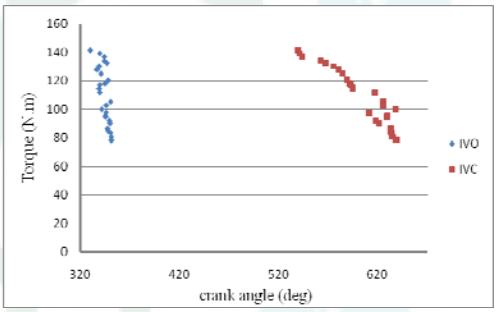
همانطور که گفته شد نتایج خروجی بهینه‌سازی چندهدفه، مجموعه‌ای از جواب‌هایی است که هر یک از دیدگاهی می‌تواند بهینه باشد. این نتایج در قالب جبهه پرتو ارائه می‌شوند. با افزایش توان و گشتاور، مصرف سوخت موتور نیز افزایش می‌یابد و برعکس آن با کاهش مصرف سوخت موتور، توان و گشتاور موتور کاهش پیدا می‌کند. زمانبندی‌های مربوط به شرایط طراحی مختلف در جبهه پرتو، در قالب دو نمودار نشان داده شده است. در واقع این دو نمودار نوعی

[5] Fitness function
[6] Cost function

MAP زمانبندی برای شرایط طراحی مختلف را نشان می‌دهند. نمودار اول مصرف سوخت بر حسب گشتاور در شرایط طراحی مختلف را نشان می‌دهد و نمودار دوم زمانبندی مربوط به گشتاورهای مختلف را نشان می‌دهد، این نمودارها حالت جامع دارند، بدین ترتیب با استفاده از این نمودارها می‌توان زمانبندی‌های مربوط به هر شرایط طراحی را بدست آورد. این نمودارها برای دور ۱۵۰۰ RPM در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰: نمودار مصرف سوخت بر حسب گشتاور برای زمانبندی‌های مختلف، استخراج شده از نتایج جبهه پرتو در دور ۱۵۰۰ RPM در حالت تمام بار



شکل ۱۱: نمودار گشتاور بر حسب زمانبندی‌های مختلف، استخراج شده از نتایج جبهه پرتو در دور ۱۵۰۰ RPM در حالت تمام بار

در شکل ۱۱ نقطه صفر (مرجع) برای زاویه لنگ، نقطه مرگ بالا در لحظه احتراق یا جرقه است. به عبارتی زاویه ۳۲۰ درجه در نمودار همان زاویه ۴۰ درجه قبل از نقطه مرگ بالا است. گشتاور موتور TU5 در دور ۱۵۰۰ RPM برابر با ۱۲۳ N.m است که با استفاده از مکانیزم زمانبندی متغیر سوپاپ مکش به ۱۴۲ N.m نیز می‌رسد. از نمودارهای بالا می‌توان زمانبندی‌های مربوط به حالت‌های میانی و یا زمانبندی‌های مربوط به گشتاور کمتر و مصرف سوخت کمتر را بدست آورد. در واقع این نمودارها حالت جامعی دارند و طراحی‌ها برای دو هدف گشتاور ماکزیمم و مصرف سوخت کمتر را می‌توان از آن استخراج کرد.

نتیجه‌گیری

مکانیزم زمانبندی متغیر سوپاپ مکش برای هر دور، یک زمانبندی بهینه با توجه به هدف مورد نظر ارائه می‌دهد. با توجه به نیاز مسئله ۳ هدف برای بهینه‌سازی چندهدفه تعیین شد. اگر از دیدگاه افزایش بازده حجمی و گشتاور به مسئله نگاه شود، زمانبندی ارائه شده بازده حجمی و گشتاور خروجی موتور را در دورهای پایین به ترتیب به میزان ۵/۴ و ۵/۶ درصد و در دورهای بالا به میزان ۲/۸ و ۲/۳ درصد افزایش می‌دهد. و اگر از دیدگاه کاهش مصرف سوخت خودرو به مسئله نگاه شود، زمانبندی ارائه شده برای مکانیزم زمانبندی متغیر، بصورت میانگین به میزان ۲۴٪، مصرف سوخت را کاهش می‌دهد. همچنین با استفاده از MAP زمانبندی ارائه شده در هر دور، می‌توان برای شرایط مختلف یک زمانبندی بهینه بدست آورد. در نهایت با توجه به مطالب عنوان شده می‌توان نتیجه گرفت که مکانیزم زمانبندی متغیر بهترین روش برای کنترل جریان ورودی و در نتیجه کنترل عملکرد موتور می‌باشد.

مراجع

[1] Atashkari A., Narimanzadeh N., Golcu M., Khalkhali A., Jamali A., Modeling and multi-objective optimization of a variable valve-timing spark-ignition engine polynomial neural networks and evolutionary algorithm, Energy conversion and management 48(2007) 1029-1041

[2] Haugen D.J., Blackshear P.L Pipho M.J., J.Rsler., Modificationof a quad 4 Engine to permit late intake valve closure, SAE paper 921663,1992

[3] Alkidas, Alex. C., Combustion advancement in Gasoline Engines, Energy conversion and management, 48 (2007) 2751-2761

[4] pourkhesalian A.M., shamekhi A.H., salami F., NOx control using variable exhaust valve timing, SAE paper 2010 world Congress and Exhibition.

[5] Kereuter P., Heuser P., Reinike-Murmann J., Erz R., Peter U., Bocker O., Variable Valve actuation-switchable and Consciously variable valve lift, SAE world congress, Detroit, Michigan, USA, 2003-01-0026,2003

[6] Ghazimirsaeid A., Jazayeri A., Shamekhi A.H., Improving Volumetric Efficiency Using Intake Valve Lift And Timing Optimization In SI Engine

[7] Heywood J.B., Internal Combustion Engine Fundamentals., McGraw-Hill, 1988