



استخراج محدوده کاری مناسب عملگرها در موتور توربو GDI مجهز به VVT جهت شروع فرایند طراحی آزمون

امیر اکبری سولاً^{۱*}، محمدرضا بهرام بیگی^۲

a_akbari@ip-co.com

m_bahrambeigi@ip-co.com

^۱ کارشناس توسعه نگاشت موتور، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

^۲ رئیس اداره توسعه نگاشت در سطح موتور، شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

چکیده

کاهش کیفیت هوا و گرمایش زمین، سازندگان خودرو را نیز همانند بسیاری از صنایع دیگر برآن داشته تا با افزایش بازدهی موتورهای احتراق داخلی، مصرف سوخت و تولید آلاینده‌ها را کاهش دهند. این الزام در کنار تلاش برای کاهش اندازه موتورهای احتراق داخلی، منجر به هرچه پیچیده‌تر شدن آن‌ها شده است. ضمناً عدم بهره‌مندی موتورهای بروز از کالیبراسیون مناسب، جز اتلاف هزینه و زمان برای طراحی و ساخت موتور، نتیجه‌ای در بر نخواهد داشت. لذا روش‌های کالیبراسیون نیر بایستی همسو با توسعه موتورها، توسعه پیدا کند.

باید توجه داشت که افزایش تعداد عملگرهای سامانه مدیریت موتور، افزایش تصاعدی زمان و هزینه نگاشت رایانه موتور را در پی دارد. یکی از راه‌های اولیه ولی در عین حال پراهمیت برای کم کردن زمان کالیبراسیون، تعیین محدوده عملکردی مناسب عملگرها و متعاقب آن تعیین محدوده برای متغیرهای کالیبراسیونی نظیر زاویه باز و بست سوپاپ‌ها، زوایای فازهای مختلف پاشش و نسبت هرکدام از فازها به منظور کاهش تعداد آزمون‌های نگاشت در سطح موتور است.

پژوهش حاضر در راستای توسعه‌ی موتورهای بنزینی پرخوران با قابلیت تزریق مستقیم سوخت و مجهز به سامانه زمان بندی متغیر سوپاپ‌ها، به عنوان پیچیده‌ترین و بروزترین موتورهای داخل کشور، در شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو انجام شده است. در چنین موتورهایی استخراج محدوده کاری مناسب عملگرها جهت شروع فرایند نگاشت رایانه موتور و نیز افزایش سرعت و کیفیت امر کالیبراسیون، بسیار حائز اهمیت است. در صورتیکه محدوده کاری عملگرها به روش مناسبی محدودسازی نشود، انجام نگاشت بسیار پیچیده و زمان‌بر یا حتی غیرممکن خواهد بود.

در این پژوهش، متغیرهای نگاشت پایه موتور نظیر نسبت هوا به سوخت، زاویه جرقه، زمان بندی سوپاپ‌ها، زاویه پاشش سوخت، کسر جرمی فازهای پاشش و فشار پاشش در چندین موتور نسبتاً مشابه مورد مطالعه قرار گرفته و محدوده مناسب عملگرها از روی الگوبرداری و تحلیل بدست آمده است. برای این منظور، نقشه عملکردی موتور به سه ناحیه تقسیم شده است: ناحیه داخل چرخه رانندگی اروپا، ناحیه دور پایین- بار بالا و ناحیه دور بالا. این ناحیه بندی منجر به مقید شدن محدوده و کاهش حالات محتمل برای انجام آزمون کالیبراسیون خواهد شد و دیگر نیازی به روبش همه نقاط کاری برای یافتن نقطه کاری بهینه نخواهد بود. به این ترتیب وسعت محدوده کاری عملگرها جهت آزمون‌های نگاشت تا ۹۹٪ کاهش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: محدوده کاری، موتور توربو، تزریق مستقیم، زمان بندی متغیر سوپاپ، طراحی آزمون.



Determining the Operating Range of the Actuators in a Turbocharged GDI Engine with VVT for Design of the Experiments

Amir Akbari Sula^{1*}, Mohammadreza Bahrambeigi²

^{1*}Engine Calibration Department, Irankhodro Powertrain Company (IPCO)

a_akbari@ip-co.com

²Engine Calibration Company, Irankhodro Powertrain Company (IPCO)

m_bahrambeigi@ip-co.com

Abstract

Air pollution and global warming have urged automotive manufacturers, like many other industries, to improve the efficiency of internal combustion engines to reduce fuel consumption and emissions. This necessity, along with efforts toward engine downsizing, has led to increasingly complex engine systems. Moreover, the absence of proper calibration in modern engines results only in wasted time and costs during engine design and development. Therefore, calibration methods must also improve along with engine technologies.

The growing number of actuators in engine management system significantly increases the time and cost of ECU calibration. One of the fundamental yet crucial approaches to reduce calibration effort is to identify the appropriate operational range of actuators. This, in turn, allows defining practical boundaries for calibration variables such as valve opening and closing angles, injection phase angles, and the relative ratio of each phase. This help reduce the number of required engine-level calibration tests.

This research was carried out at Irankhodro Powertrain Company (IPCO), concentrating on the development of turbocharged gasoline direct injection engines equipped with variable valve timing. These are currently the most advanced engines developed domestically. In such engines, extracting optimal actuator operating ranges is critical for initiating ECU mapping and improving the speed and quality of the calibration process. Without proper constraint of these ranges, the mapping process can become highly complex, time-consuming, or even infeasible.

In this study, base calibration variables such as air-fuel ratio, spark timing, valve timing, injection timing, injection split ratio, and fuel pressure were collected from several similar engines. Suitable actuator operating ranges were derived through benchmarking. The engine map was divided into three regions: NEDC driving cycle zone, low-speed high-load zone, and high-speed zone. This segmentation helps constrain the test domain and reduce the number of possible calibration states, eliminating the need for exhaustive point-by-point mapping. This method reduced the operational domain of the actuators for calibration tests up to 99%.

Keywords: Operating Range, Turbo Engine, Direct Injection, Variable Valve Timing, Design of Experiment.



مقدمه

در سالیان گذشته با افزایش چالش‌های جهانی پیرامون گرمایش زمین، آلودگی هوا و محدودیت ذخایر سوخت‌های فسیلی، صنایع بخصوص صنعت خودروسازی به سمت توسعه فناوری‌های جدید در زمینه پیشرانده‌های درونسوز حرکت کرده اند. این حرکت با اهدافی نظیر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلایندگی‌های زیست محیطی و ذرات معلق آغاز شده و در همین راستا فناوری‌هایی نظیر تزریق مستقیم بنزین^۱ (GDI)، پرخورانی و زمان بندی متغیر سوپاپ‌ها^۲ (VVT) بطور گسترده در طراحی موتورهای احتراق داخلی مورد توجه قرار گرفته اند.

ترکیب فناوری‌های فوق، ضمن دستیابی به توان بالا و راندمان حجمی بهتر، امکان کنترل دقیق‌تر بر احتراق و آلایندگی را فراهم می‌سازد. اگرچه این فناوری‌ها باعث افزایش عملکرد و بازدهی حرارتی موتور می‌شود، اما ساختار کنترلی و عملکردی موتور، بخصوص سامانه مدیریت موتور^۳ (EMS) را به‌طور چشم‌گیری پیچیده‌تر می‌کند. افزایش تعداد عملگرها و به تبع آن افزایش تعداد متغیرهای کنترلی مستقل، فرآیند نگاشت رایانه موتور^۴ (ECU) را با چالش‌های جدی مواجه می‌کند. برای یک موتور GDI دارای VVT، زمان باز و بست سوپاپ ورودی و خروجی، فشار پاشش، تعداد مراحل پاشش، نسبت پاشش در هر مرحله، زاویه فازهای پاشش، زاویه جرقه‌زنی و نسبت هوا به سوخت، متغیرهای پایه موتور هستند که بایستی کالیبره شوند. ضمناً موتور پرخوران^۵ اساساً دارای نقشه عملکردی وسیع‌تری هست که تعداد نقاط کاری آزمون‌های نگاشت را افزایش می‌دهد. لذا نداشتن رویکرد ساختاریافته برای آزمون‌های کالیبراسیونی، منجر به افزایش چشمگیر زمان و هزینه توسعه موتور و حتی از بین رفتن امکان نگاشت موتور می‌شود.

یکی از گام‌های کلیدی برای ساده‌سازی فرایند نگاشت موتور، استخراج محدوده عملکردی بهینه عملگرها در مراحل ابتدایی توسعه است. این محدوده‌ها با کوچکتر کردن فضای روبش نقاط کاری، امکان طراحی آزمون‌های هدفمندتر، صرفه‌جویی در زمان و کاهش تمرکز بر آزمون‌های آزمایشگاهی را فراهم می‌کند.

پیشینه پژوهش

پیچیدگی موتورهای جدید، تحقیقات در سطح بین‌المللی مرتبط با موضوع بهینه‌سازی فرایند نگاشت ECU را افزایش داده است. همانطور که اشاره شد، یکی از راهکارهای اثربخش در این زمینه، محدودسازی دامنه عملکردی عملگرها پیش از نگاشت جداول پایه موتور است. این مهم می‌تواند از طریق مطالعه تجربی یا شبیه سازی

موتورهای مشابه و فهم فیزیک حاکم بر آن میسر شود. بعلاوه تکنیک‌های تحلیل داده و الگوریتم‌های طراحی آزمون نیز می‌توانند بسیار مفید باشند. ضمناً الگوبرداری از موتورهای مشابه از طریق انجام آزمون‌های موتوری، یک روش دقیق برای کسب اطلاعات در مورد محدوده عملکردی عملگرها جهت شروع فرایند نگاشت می‌باشد.

محققان شرکت PSA Group در سال ۲۰۱۴ با ارائه اطلاعاتی درباره طراحی احتراقی موتور EB Turbo PureTech نشان دادند که استفاده ترکیبی از پاشش چندمرحله‌ای، زمان‌بندی بهینه سوپاپ‌ها و انژکتورهای پرفشار ۲۰۰ بار، نه تنها باعث کاهش مصرف سوخت تا ۲۱ درصد شده، بلکه موجب پایداری بیشتر احتراق در بارهای پایین شده است [1]. در این تحقیق، بهینه‌سازی موقعیت انژکتور، شکل پیستون، خنک‌کاری سرسیلندر و استراتژی‌های تزریق نقش مهمی در تعیین محدوده عملکرد پایداری موتور نشان دادند. این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که تنظیم دقیق عملگرها، بخصوص در موتورهای پیچیده‌تر، تا چه اندازه می‌تواند در عملکرد موتور موثر باشد. برای تنظیم دقیق عملگرها، باید محدوده‌های کاری به دقت بررسی شوند که بنظر می‌رسد این مهم برای موتورهای پیچیده‌تر با روش‌های سنتی ممکن نباشد. ایزرمن و سیکنز توسعه مدل-مبنای کنترل یک موتور احتراق داخلی را بر همین چارچوب بررسی کردند [2]. مدل‌های دینامیکی استفاده شده در این تحقیق که ترکیبی از مدل‌های فیزیکی و داده محور بودند، توانستند رفتار موتور را با خطای کمتر از ۳ درصد نسبت به داده‌های واقعی آزمون پیش بینی کنند. این فرایند بهینه سازی، زمان کالیبراسیون را برای موتور نمونه تا ۵۰ درصد کاهش داد. کوپر و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ در حین توسعه طراحی موتورهای سه سیلندر مجموعه قوای محرکه MAHLE، به منظور توسعه همزمان طراحی و کالیبراسیون به خصوص از نقطه نظر آلایندگی، با بررسی دقیق محدوده‌های عملکردی اجزای موتور از روی شبیه سازی سیکل موتور، از روش‌های طراحی آزمون^۶ (DoE) بهره بردند [3]. آن‌ها ادعا کردند که شناخت محدوده عملکردی و استفاده از ابزارهای DoE بعد از آن، به کاهش ریسک طراحی و توسعه سریع‌تر نگاشت کمک می‌کند. البته بررسی پژوهش دیگری در همین حوزه نشان می‌دهد که استفاده از رویکرد محدودسازی هوشمندانه دامنه کاری عملگرها پیش از طراحی آزمون یک راهبرد حائز اهمیت در یافتن نقاط بهینه عملگرها بوده است. بطوریکه محققان همین شرکت در سال ۲۰۰۹ نیز از راهبرد مطرح شده، برای تسریع در یافتن نقاط آزمون صحنه گذاری موتور بر روی دینامومتر استفاده کردند [4].

در یک مطالعه‌ی دیگر، بورگراف و همکاران در سال ۲۰۲۰، روشی برای استخراج نیمه خودکار محدوده‌های ایمن عملکرد عملگرها پیشنهاد کردند که بر پایه تحلیل عملکرد دینامیکی موتور و داده‌های واقعی آزمون استوار بود [5]. این پژوهش نیز تأیید می‌کند که

¹ Gasoline Direct Injection

² Variable Valve Timing

³ Engine Management System

⁴ Electronic Control Unit

⁵ Turbocharged Engine

⁶ Design of Experiment



شناسایی مرزهای عملکردی اجزای سامانه مدیریت موتور، به عنوان گام ابتدایی در نگاشت، نقش حیاتی دارد. این فرآیند نه تنها حجم آزمون‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی نظیر انتشار آلایندگی و مصرف سوخت، روند کالیبراسیون را هوشمندتر و کارآمدتر می‌کند.

ضمناً پژوهش‌های پیشرفته‌تری نیز با رویکرد مبتنی بر شبیه‌سازی‌های گسترده و یادگیری ماشین^۱ برای عبور از چالش استخراج ناحیه‌های کاری در سیکل‌های رانندگی گذرا، ارائه شده است. در یکی از این مطالعات آیتال و پراسانا در سال ۲۰۱۹ با ایجاد حجم وسیعی از داده‌های شبیه‌سازی شده و آموزش یک مدل جایگزین عصبی، توانستند به دقت عملکرد موتور و انتشار آلاینده‌ها از آن را در نقاط مختلف کاری پیش‌بینی کنند [6]. این رویکرد برخلاف آزمون‌های تجربی سنگین، تنها به تعداد بسیار محدودی شبیه‌سازی نیاز داشت. نکته قابل توجه، اهمیت دانستن فضاهای کاری موتور برای انجام این شبیه‌سازی هاست.

شرکت AVL نیز به عنوان یکی از مهمترین مراجع توسعه آزمون‌های موتوری در جهان، در نرم‌افزار CAMEO، با استفاده از الگوریتم‌های طراحی آزمایش و ساختارهای ناحیه‌بندی شده، روشی ساختاریافته برای نگاشت ارائه داده است [7]. این رویکرد با تلفیق داده‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی، به مهندسان امکان داد تا نقاط آزمون را به صورت هدفمند انتخاب کرده و عملکرد عملگرها را در محدوده‌ای منسجم ارزیابی کنند.

در ادبیات داخلی نیز، بیشتر پژوهش‌ها بر روی شبیه‌سازی جریان، بررسی تأثیر متغیرهایی نظیر زاویه پاشش یا تحلیل میدانی عملکرد موتورها تمرکز داشته‌اند و استخراج محدوده‌های کاربردی عملگرها در قالب الگوبرداری از داده‌های واقعی آزمون موتوری مورد توجه قرار نگرفته است. در این میان شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو^۲ (IPCO)، پیشگام توسعه موتورهای بروز در داخل کشور، با بهره‌مندی از سلول‌های مجهز و استاندارد آزمون موتور متصل به لگام ترمزی^۳، به این مهم بصورت جدی پرداخته است. پژوهش حاضر با اتکا به داده‌های تجربی از الگوبرداری موتورهای توسعه یافته و تجاری شده و بررسی تطبیقی رفتار آن‌ها، در کنار تجربه چندین ساله توسعه و نگاشت موتورهای محصولات گروه صنعتی ایران خودرو، تلاشی برای توسعه الگویی بومی جهت بهینه‌سازی کالیبراسیون موتورهای توربوشارژ با فناوری GDI مجهز به CVVT می‌باشد.

روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور بررسی و استخراج محدوده کاری مناسب برای عملگرهای پایه‌ی موتور GDI، چهار موتور تجاری شده و سه

موتور توسعه‌ای در شرکت ایپکو، مورد بررسی و الگوبرداری قرار گرفتند. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه از روی آزمون احتراقی موتور در اتاق آزمون استخراج شده است. آزمون‌ها بصورت پایا به کمک دینامومتر انجام شده و شرایط مرزی آزمون تا حد امکان مشابه بوده است. با توجه به نهایی بودن نرم افزار ECU، مقادیر متغیرهای هدف در این آزمون‌ها، الگویی واقعی برای شناخت مرزهای کاری منطقی برای عملگرهایی نظیر VVT، پمپ سوخت پرفشار و افشانه-های تزریق مستقیم فراهم می‌سازد. ویژگی کلی موتورها در جدول ۱ قرار دارد.

برای موتور GDI، معمولاً حداکثر سه مرحله پاشش مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ لذا به فرض داشتن دو عملگر کنترل زاویه میل سوپاپ، مجموعاً ۱۰ متغیر پایه بایستی در هر نقطه کاری تعیین شوند به گونه‌ای که پایداری احتراق حفظ شود و آلایندگی و مصرف سوخت بهینه باشد. متغیرهای پایه نگاشت عبارتند از: زاویه جرکه زنی، نسبت هم ارز هوا به سوخت، نسبت جرمی پاشش اول به کل، نسبت جرمی پاشش دوم به کل، زاویه شروع یا پایان پاشش اول، زاویه شروع یا پایان پاشش دوم، زاویه شروع یا پایان پاشش سوم، فشار ریل سوخت، زاویه میل بادامک ورودی و زاویه میل بادامک خروجی.

آنچه که باعث طولانی شدن مراحل نگاشت و افزایش هزینه آن می‌شود، متغیرهایی هستند که باید جهت یافتن نقطه بهینه جاروب شوند. از بین ۱۰ متغیر فوق، زاویه جرکه و نسبت هوا به سوخت، متغیر مستقل نمی‌باشند؛ چرا که برای هر نقطه کاری با هر ترکیبی از مقادیر متغیرهای دیگر، مقدار آن‌ها عملاً منحصر به فرد است. به این ترتیب که در هر نقطه کاری، زاویه جرکه بایستی چنان تعیین شود که احتراق در وضعیت بیشینه گشتاور ترمزی^۴ رخ داده یا در مرز کوبش^۵ قرار داشته باشد. نسبت هم‌ارز هوا به سوخت نیز مگر در موارد استثنا، وابسته به دمای گازهای خروجی از موتور است. زیرا غنی سازی ترکیب سوخت و هوا بخصوص در احتراق بنزین‌سوز، با هدف خنک شدن گازهای خروجی از موتور با هدف حفاظت از قطعات سامانه خروجی موتور انجام می‌گیرد. بنابراین در یک موتور GDI مجهز به VVT دوگانه، عملاً با ۸ متغیر مستقل مواجه هستیم.

یک راهکار موثر در کاهش متغیرهای مستقل در فرایند نگاشت، ناحیه بندی محدوده کاری موتور است. این مهم کمک می‌کند تا نیاز نباشد برخی از متغیرهای مستقل در برخی از نواحی جاروب شوند یا دست‌کم محدوده آن به تناسب وضعیت کاری موتور در آن ناحیه، کاهش یابد. شکل ۱، ناحیه بندی را با ذکر ویژگی عملکردی موتور از نقطه نظر فشار پاشش، استراتژی پاشش و زمان بندی سوپاپ‌ها نشان می‌دهد. دسته بندی داده‌های آزمون و تعیین محدوده‌ها نیز متعاقباً با همین رویکرد انجام شده است.

⁴ Maximum Break Torque (MBT)

⁵ Knock Borderline (KBL)

¹ Machine Learning Algorithms

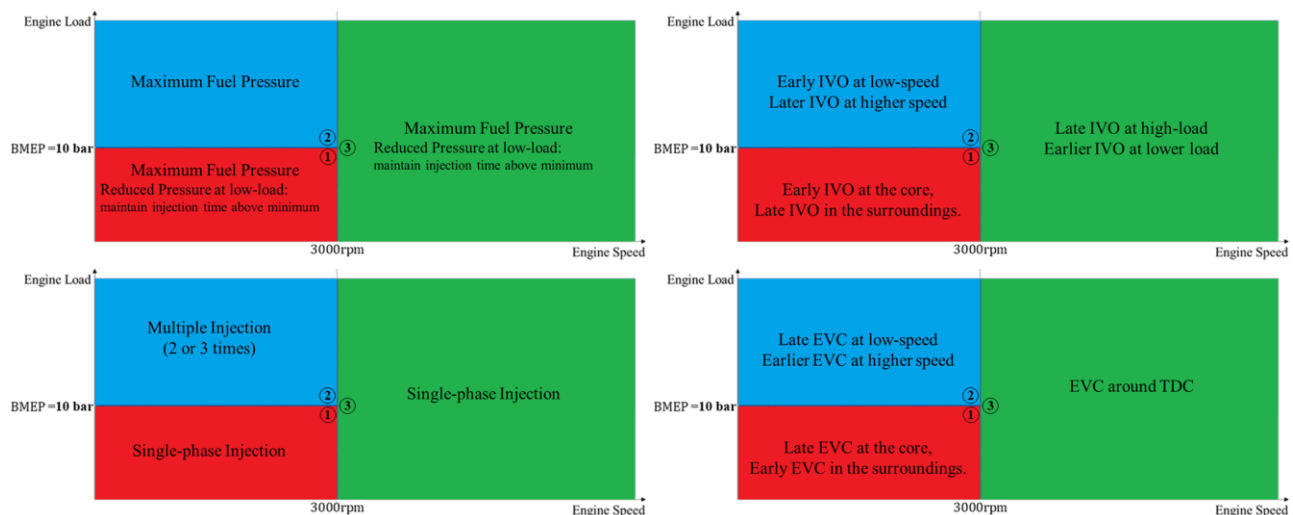
² Irankhodro Powertrain Company

³ Dynamometer



جدول ۱: مشخصات موتورهای بررسی شده جهت یافتن محدوده کاری عملگرها.

مشخصه موتور	موتور شماره ۱	موتور شماره ۲	موتور شماره ۳	موتور شماره ۴	موتور شماره ۵	موتور شماره ۶	موتور شماره ۷
نوع موتور	۳ سیلندر خطی	۳ سیلندر خطی	۴ سیلندر خطی	۴ سیلندر خطی	۴ سیلندر خطی	۴ سیلندر خطی	۳ سیلندر خطی
حجم موتور	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۶۰۰	۱۵۰۰	۱۶۰۰	۱۶۰۰	۱۳۰۰
نوع سوخت رسانی	تزریق مستقیم	تزریق مستقیم	تزریق مستقیم	تزریق مستقیم	تزریق راهگاهی	تزریق راهگاهی	تزریق راهگاهی
نوع هوارسانی	توربوشارژ	توربوشارژ	توربوشارژ	توربوشارژ	تنفس طبیعی	توربوشارژ	توربوشارژ
زمان بندی سوپاپ‌ها	CVVT دوگانه	CVVT دوگانه	CVVT دوگانه	CVVT دوگانه	CVVT دوگانه	CVVT دوگانه	CVVT دوگانه



شکل ۱: ناحیه بندی محدوده کاری موتور جهت کاهش حالات مورد نیاز برای جاروب متغیرهای مستقل.

به ویژگی افشانه‌های مورد استفاده، فشار سوخت پایین‌تری اعمال شود. بر همین اساس، شکل ۲ محدوده عملیاتی پمپ سوخت فشار بالا را در موتورهای مورد بررسی نشان می‌دهد.

تحقیقات مختلفی وجود دارد که نشان می‌دهد تزریق چندمرحله‌ای سوخت، ضمن بهبود کیفیت احتراق و دستیابی به گشتاور مناسب، تمایل به کوبش را کاهش می‌دهد. بنابراین عمدتاً در دورهای میانی و پایین با بار نسبتاً بالا از این رویکرد استفاده می‌شود. در این محدوده عملکردی موتور، پاشش دو یا سه مرحله‌ای متداول است. شکل‌های ۳، ۴ و ۵ به ترتیب کسر جرمی پاشش فاز اول، دوم و سوم را به کل پاشش سوخت نشان می‌دهد. در موتورهای شماره ۲ و ۳ برخلاف دو موتور GDI دیگر، از پاشش سوم بطور کلی استفاده نشده است. با در نظر داشتن نواحی معرفی شده در شکل ۱، در هر چهار موتور بررسی شده، نواحی ۱ و ۳ عملاً پاشش چند مرحله‌ای نداشته‌اند. در ناحیه ۲ نیز حدوداً نیمی از پاشش در فاز اول و مابقی بسته به دو یا سه‌گانه بودن استراتژی پاشش، بین فازهای بعدی تقسیم شده‌اند.

بحث بر روی نتایج

بنزین در موتورهای GDI معمولاً تا فشار ۲۰۰ بار پشت افشانه‌ها تامین می‌شود. در مواردی نظیر موتور شماره ۴، فشار سوخت تا ۳۵۰ بار نیز افزایش یافته است. رهیافت اصلی در کنترل این عامل، بالا بردن فشار تا حد امکان، جهت بهبود احتراق و بطور خاص کاهش آلایندگی ذرات معلق^۱ می‌باشد. اما در برخی نقاط کاری، مخصوصاً بار کم و دور پایین نیاز است جهت دور شدن از محدودیت پاشش کمینه افشانه‌ها، فشار سوخت به حد کافی کاهش یابد.

به سبب محدود شدن مدت زمان پاشش به یک حد کمینه، تدابیر پاشش سوخت و فشار ریل سوخت با هم ارتباط پیدا می‌کنند؛ بطوریکه در برخی مواقع نظیر بارهای میانی در دورهای پایین، استراتژی پاشش چندگانه سوخت با هدف کاهش تمایل به کوبش، باعث کوچک شدن مدت زمان پاشش می‌شود؛ لذا ممکن است بسته

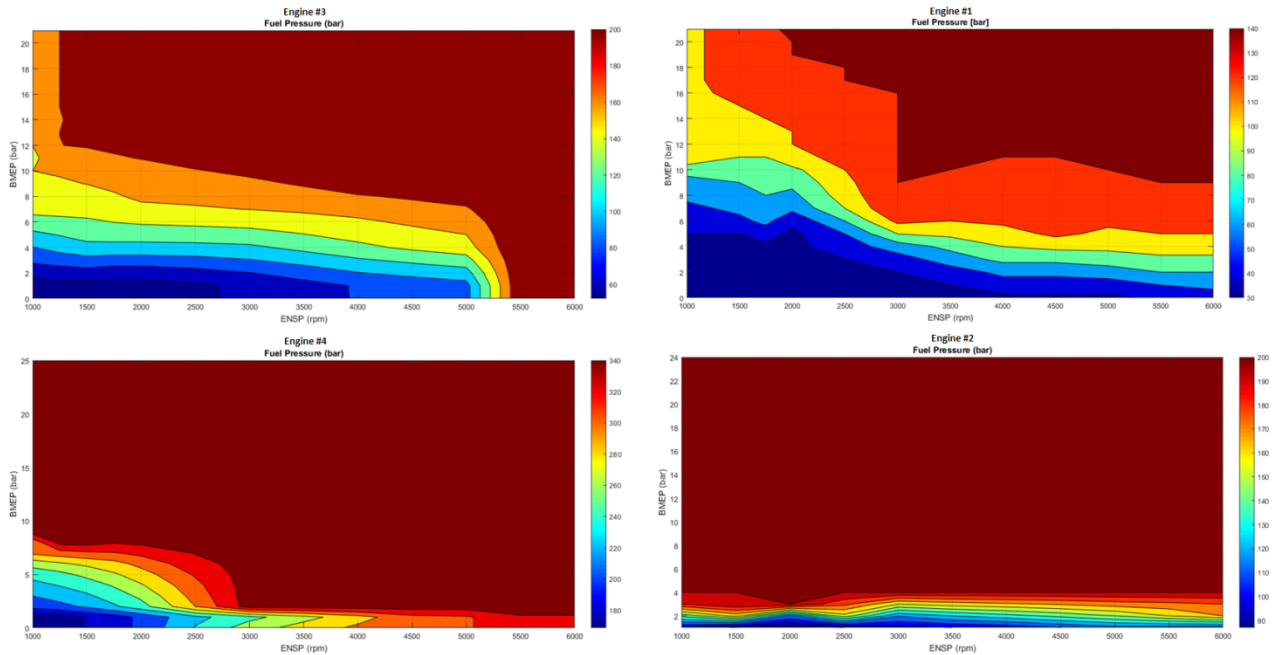
^۱ Particulate Matter (PM)



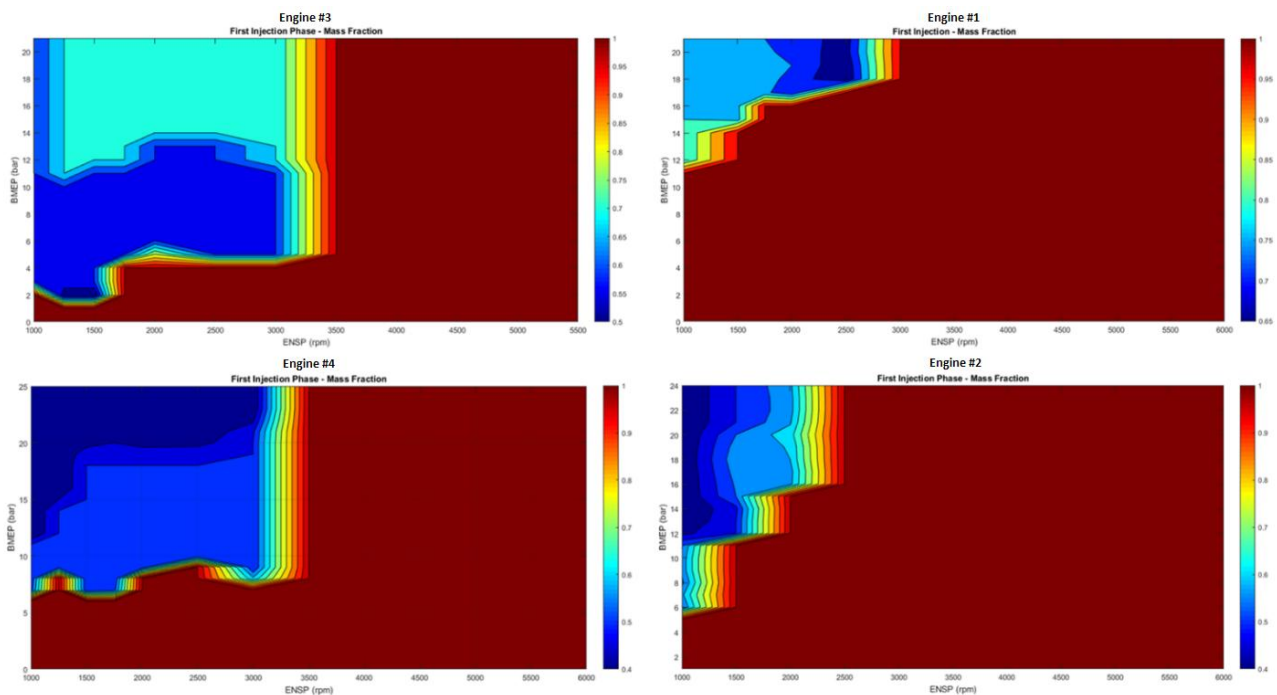
ترتیب برای فاز اول، دوم و سوم نشان داده شده است. معیار بیان زاویه پاشش، فاصله برحسب درجه لنگ از نقطه مرگ بالا در شروع احتراق می‌باشد.

نکته قابل تامل، روند تغییرات زاویه پاشش نسبت به دور و بار موتور می‌باشد. بطور کلی می‌توان از تحلیل داده‌ها ادعا کرد که افزایش دور موتور با تسریع پاشش و افزایش بار موتور با تاخیر در زمان بندی پاشش همراه است.

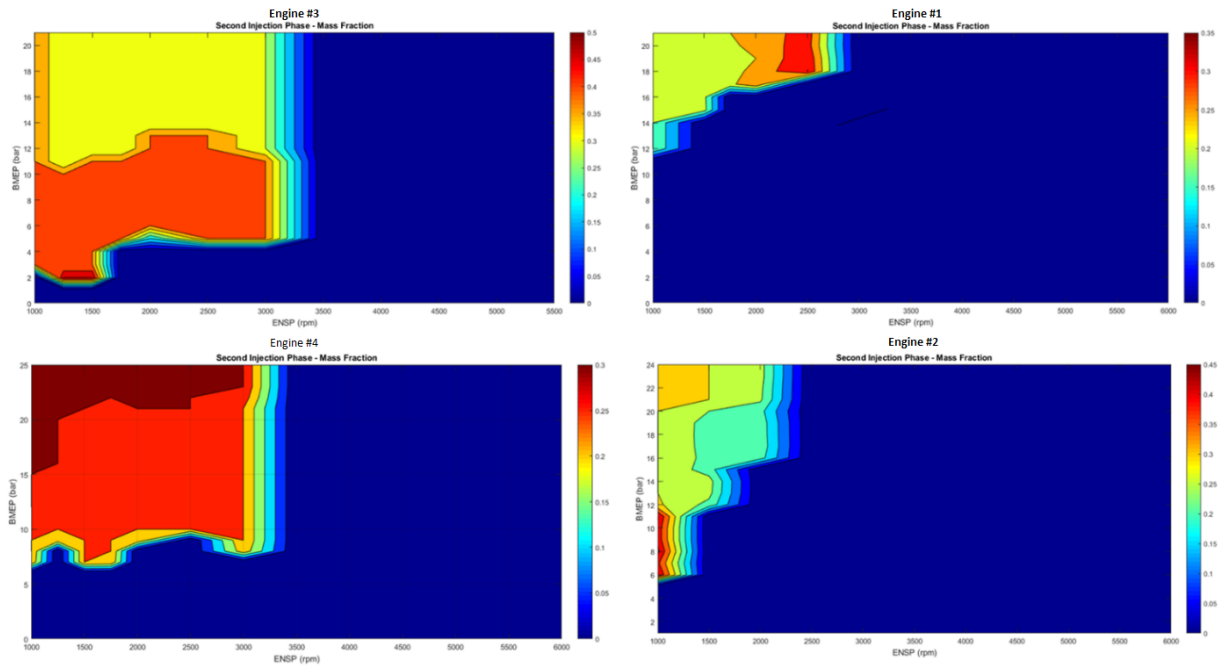
از نقطه نظر زاویه پاشش نیز، بطور کلی می‌توان گفت که پاشش اول کاملاً در مرحله مکش انجام می‌شود. پاشش دوم حوالی نقطه مرگ پایین می‌باشد. معمولاً اگر پاشش سوم وجود داشته باشد، زمان پاشش دوم کمی تسریع شده و از اواخر مکش آغاز می‌شود اما در استراتژی دو پاشش، عمدتاً زمان پاشش دوم تا اوایل مرحله تراکم نیز می‌تواند به تاخیر بیفتد. پاشش سوم نیز بسته به زمان جرقی زنی بهتر است اندکی جابجا شود اما معمولاً در نیمه دوم مرحله تراکم رخ می‌دهد. زمان بندی پاشش موتورهای بررسی شده، در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به



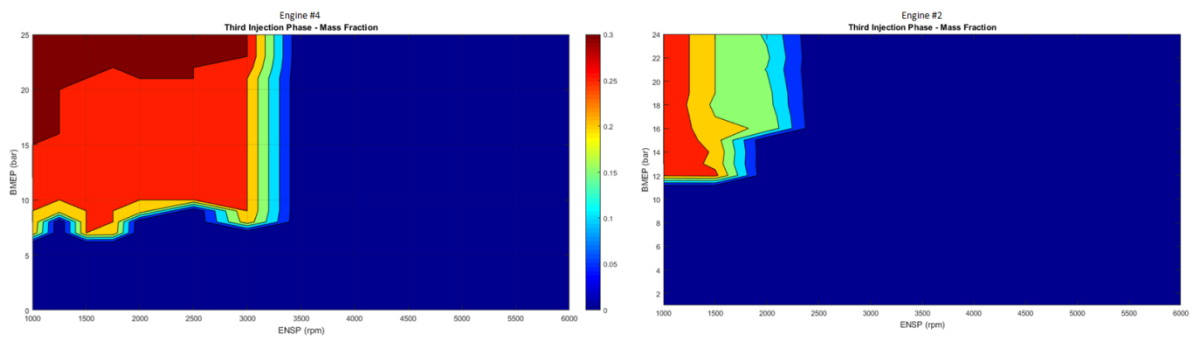
شکل ۲: محدوده فشار ریل سوخت در موتورهای بررسی شده.



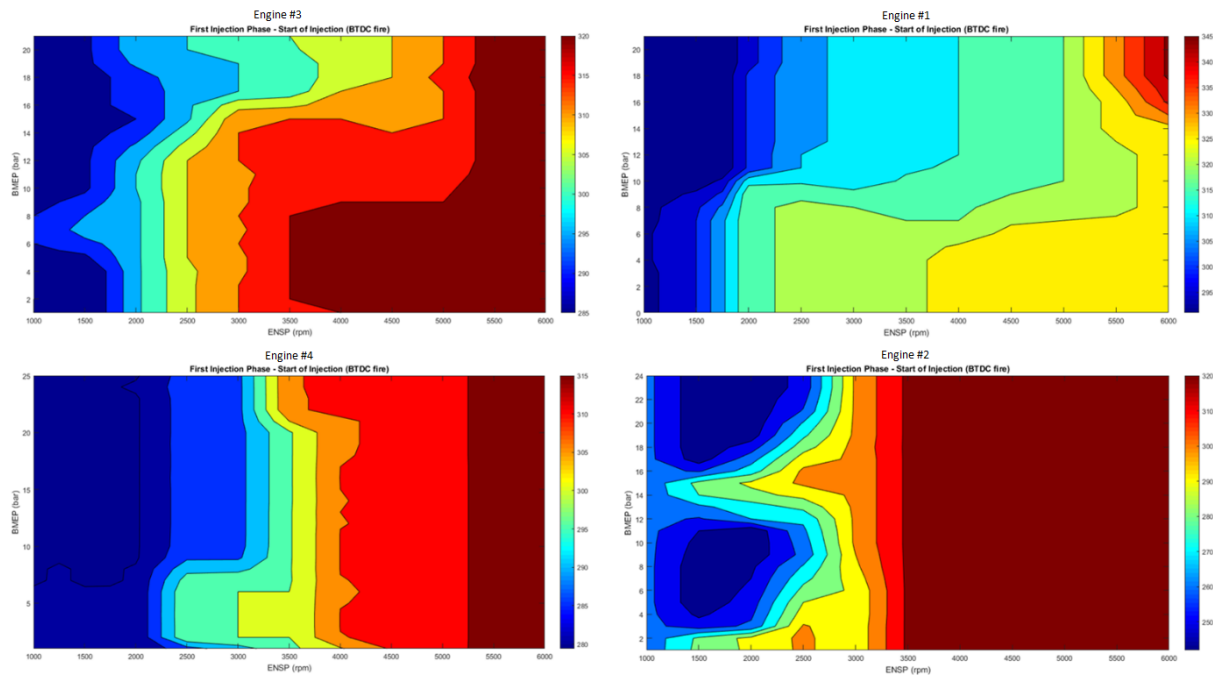
شکل ۳: کسر جرمی پاشش سوخت در فاز اول نسبت به کل سوخت پاشیده شده.



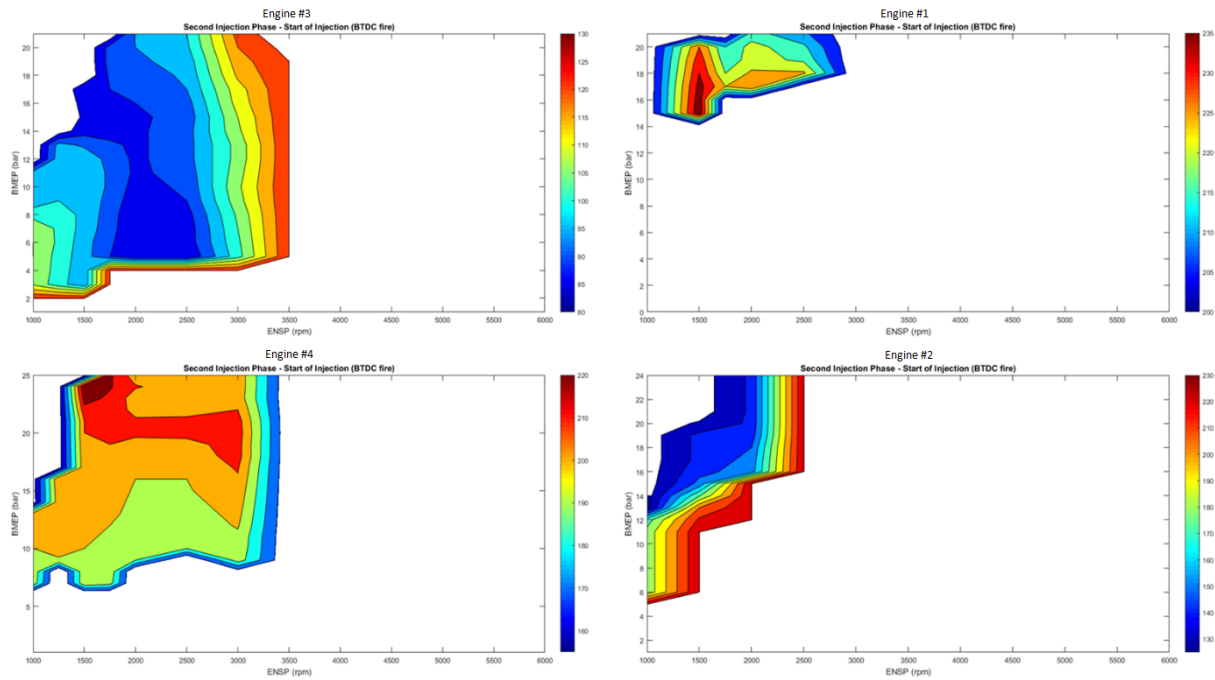
شکل ۴: کسر جرمی پاشش سوخت در فاز دوم نسبت به کل سوخت پاشیده شده.



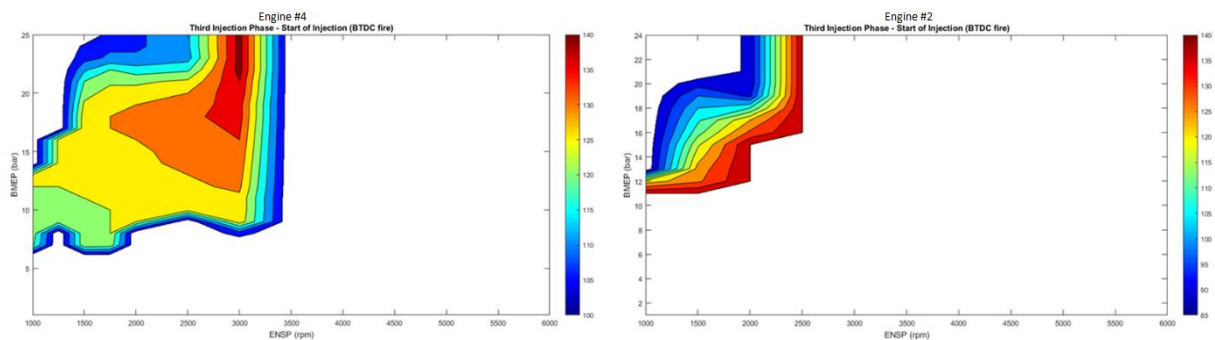
شکل ۵: کسر جرمی پاشش سوخت در فاز سوم نسبت به کل سوخت پاشیده شده.



شکل ۶: زاویه پاشش سوخت در فاز اول قبل از نقطه مرگ بالا.



شکل ۷: زاویه پاشش سوخت در فاز دوم قبل از نقطه مرگ بالا.



شکل ۸: زاویه پاشش سوخت در فاز سوم قبل از نقطه مرگ بالا.

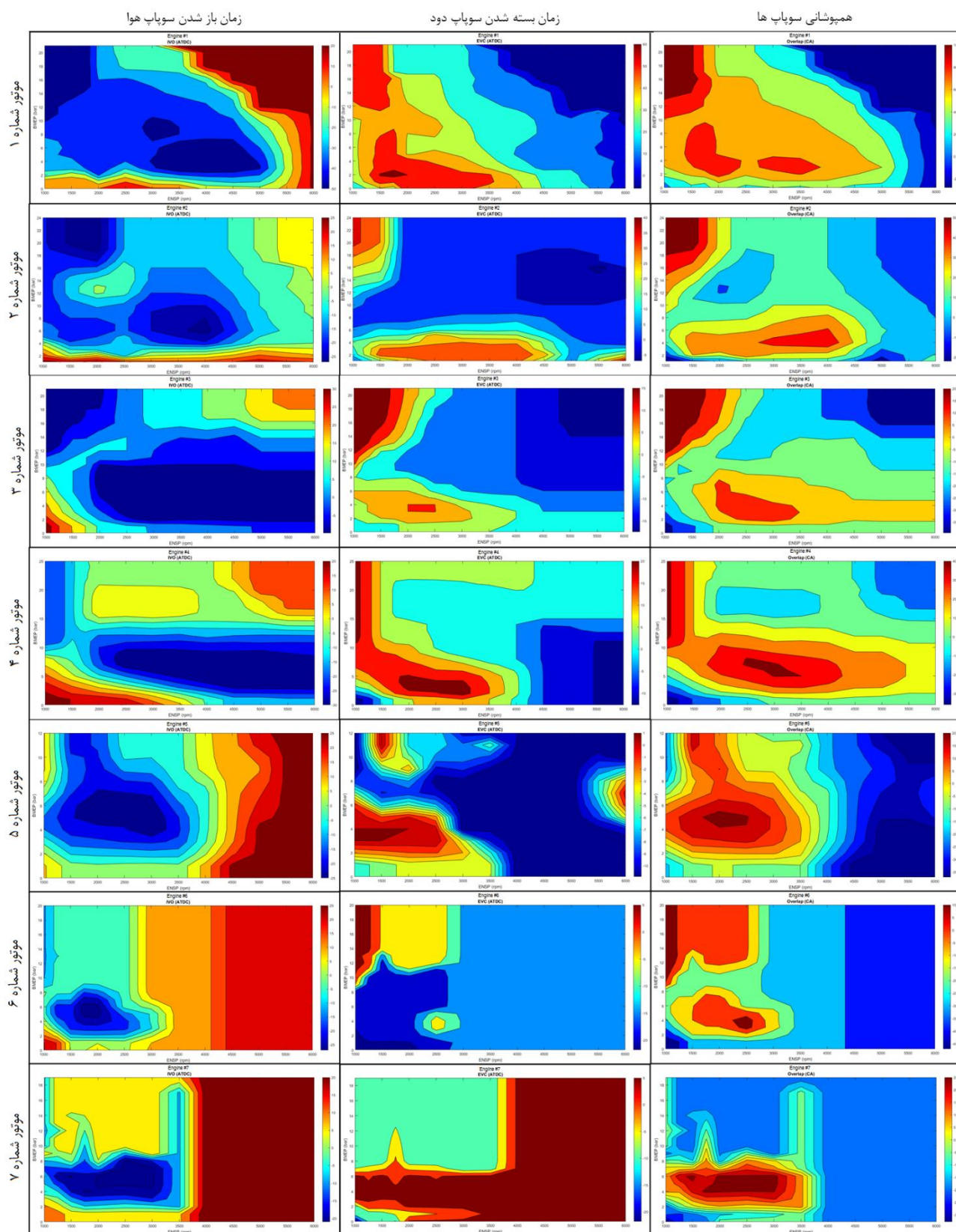
نتیجه گیری

تجمع نتایج استخراج شده از آزمون‌های الگوبرداری، در کنار ناحیه بندی نقشه عملکردی موتور، محدوده‌های کاری منطقی برای هر کدام از عملگرها را مشخص می‌کند. با در دست داشتن چنین اطلاعاتی، آزمون‌های نگاشت رایانه موتور تسهیل شده و حجم فعالیت‌ها جهت یافتن نقاط کاری بهینه بطور چشمگیری کاهش می‌یابد. جداول ۲، ۳ و ۴، محدوده کاری استخراج شده برای عملگرها را بصورت خلاصه به ترتیب برای نواحی ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد. در نتیجه نه تنها محدوده روبش هر متغیر مستقل را کوچکتر می‌شود، در برخی نواحی متغیرهای مستقل حذف می‌شوند. بطوریکه اکنون می‌توان ادعا کرد فشار ریل سوخت عملاً یک متغیر مستقل نمی‌باشد و می‌توان آن را در هر نقطه برابر با مقدار پیشینه قرار داد؛ مگر اینکه بدلیل محدودیت کمینه مدت زمان پاشش انژکتور، فشار را کم کرد.

در مورد زمان بندی باز و بسته شدن سوپاپ‌ها، علاوه بر موتورهای تجاری که داده‌های آن‌ها در بخش قبلی ارائه شد، ۳ مورد از محصولاتی که نگاشت آن‌ها در شرکت ایپکو انجام شده نیز به بانک اطلاعاتی این پژوهش اضافه شدند. شکل ۹ زمان باز شدن سوپاپ هوا، بسته شدن سوپاپ دود و همپوشانی سوپاپ‌ها بصورت مصور ارائه شده است. هسته‌ای با میزان همپوشانی زیاد در دور و بار میانی موتور مشهود است. در نواحی با بار موتور بسیار کم، تمایل به بسته شدن دیر هنگام سوپاپ هوا برای نزدیک کردن موتور به چرخه اتکینسون^۱ و کاهش تخریب راندمان حجمی دیده می‌شود. در محدوده‌ی بار بالا در دور موتور پایین، افزایش همپوشانی سوپاپ‌ها با هدف روبش دود^۲ و افزایش هوای تازه در محفظه احتراق می‌باشد. در دورهای بالا نیز عملاً هدف دستیابی به گشتاور قابل قبول بوده و روند ویژه و خاصی در انتخاب نقاط نهایی CVVT دیده نمی‌شود.

¹ Atkinson Cycle

² Scavenging



شکل 9: زمان بندی باز شدن سوپاپ هوا، بسته شدن سوپاپ دود و همپوشانی باز بودن سوپاپ‌ها.

موتوری به روش سنتی و از طریق روش نقاط کاری بصورت فاکتوریل کامل، به علت افزایش تصاعدی تعداد حالات، به هیچ وجه

با یک نگاه کلی به درجات آزادی یک موتور GDI و توربوشارژر مجهز به VVT دوگانه، به وضوح مشخص است که امکان نگاشت چنین



جدول ۴: محدوده کاری استخراج شده برای عملگرها در ناحیه ۳

عنوان متغیر	محدوده	یکا	توضیح
فشار سوخت	۶۰ تا ۳۵۰	بار	متغیر وابسته
نسبت	فاز ۱	-	رویش نقاط
جرم	فاز ۲		کاری نیاز
پاشش	فاز ۳		نیست
زمان	فاز ۱	درجه لنگ	یک متغیر مستقل
بندی	فاز ۲	(قبل از مرگ بالا)	
پاشش	فاز ۳	-	
زمان	باز شدن هوا	درجه لنگ	دو متغیر مستقل
بندی	سوپاپ‌ها	(بعد از مرگ بالا)	
	شدن دود	۲۵ تا ۳۰	
	بسته	۱۵ تا ۱۵	

ممکن نیست. با مشخص شدن محدوده‌ها، تعداد حالات آزمون در مقایسه با فاکتوریل کامل تا ۹۹٪ کاهش می‌یابد.

اگرچه چنین کاهش در تعداد آزمون‌ها بسیار مهم و حیاتی است، اما همچنان نمی‌توان عملگرها را حتی در دامنه‌های محدود شده به روش سنتی تنظیم کرد. با در نظر گرفتن فواصل منطقی و نه چندان ریز برای رویش نقاط کاری عملگرها و با در دست داشتن محدوده‌های بدست آمده، تعداد آزمون‌ها در روش نگاشت سنتی برای پوشش کل نقشه عملکردی موتور، از چند ده میلیون آزمون تجاوز می‌کند. لذا استخراج محدوده کاری عملگرها در واقع مقدمه‌ای برای استفاده از روش‌ها جدید نگاشت نظیر استفاده از ابزارهای طراحی آزمون و نگاشت مدل محور می‌باشد.

جدول ۲: محدوده کاری استخراج شده برای عملگرها در ناحیه ۱

عنوان متغیر	محدوده	یکا	توضیح
فشار سوخت	۶۰ تا ۳۵۰	بار	متغیر وابسته
نسبت	فاز ۱	-	رویش نقاط
جرم	فاز ۲		کاری نیاز
پاشش	فاز ۳		نیست
زمان	فاز ۱	درجه لنگ	یک متغیر مستقل
بندی	فاز ۲	(قبل از مرگ بالا)	
پاشش	فاز ۳	-	
زمان	باز شدن هوا	درجه لنگ	دو متغیر مستقل
بندی	سوپاپ‌ها	(بعد از مرگ بالا)	
	شدن دود	۲۵ تا ۳۰	
	بسته	۲۵ تا ۲۰	

مراجع و منابع

- [1] Souhaite, P. and Mokhtari, S., 2014. Combustion system design of the new PSA Peugeot Citroën EB TURBO PURE TECH engine. In Internationaler Motorenkongress 2014: Antriebstechnik im Fahrzeug (pp. 49-72). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [2] Isermann, R. and Sequenz, H., 2016. Model-based development of combustion-engine control and optimal calibration for driving cycles: general procedure and application. IFAC-PapersOnLine, 49(11), pp.633-640.
- [3] Cooper, A., Stodart, A., Hancock, D., Duke, S., Miller, J. and Reader, S., 2019. Development of Two New High Specific Output 3 Cylinder Engines for the Global Market with Capacities of 1.2 l and 1.5 l (No. 2019-01-1193). SAE Technical Paper.
- [4] Lumsden, G., OudeNijeweme, D., Fraser, N. and Blaxill, H., 2009. Development of a turbocharged direct injection downsizing demonstrator engine. SAE International Journal of Engines, 2(1), pp.1420-1432.
- [5] Burggraf, T., Joswig, M., Pfetsch, M.E., Radons, M. and Ulbrich, S., 2020. Semi-automatically optimized calibration of internal combustion engines. Optimization and Engineering, 21(1), pp.73-106.
- [6] Aithal, S.M. and Balaprakash, P., 2019, May. MaLTESE: Large-scale simulation-driven machine learning for transient driving cycles. In International Conference on High Performance Computing (pp. 186-205). Cham: Springer International Publishing.
- [7] AVL List GmbH. (2019). CAMEO – Advanced calibration tool for efficient engine development. AVL Technical White Paper. Retrieved from <https://www.avl.com>

جدول ۳: محدوده کاری استخراج شده برای عملگرها در ناحیه ۲

عنوان متغیر	محدوده	یکا	توضیح
فشار سوخت	۳۵۰	بار	بیشینه فشار
نسبت	فاز ۱	-	دو متغیر مستقل
جرم	فاز ۲		
پاشش	فاز ۳		
زمان	فاز ۱	درجه لنگ	سه متغیر مستقل
بندی	فاز ۲	(قبل از مرگ بالا)	
پاشش	فاز ۳	-	
زمان	باز شدن هوا	درجه لنگ	دو متغیر مستقل
بندی	سوپاپ‌ها	(بعد از مرگ بالا)	
	شدن دود	۲۵ تا ۱۰	
	بسته	۱۵ تا ۳۰	