

Optimizing the shape of an ultra-low particulate combustion (ULPC) chamber for a common-rail diesel engine

Mohammad Malekpoor¹, Rahim Khoshbakhti Saray^{1,2*}, Seyed Mehdi Lashkarpour³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

2- Vehicle Research Institute, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- Motorsazan Company, Iran Tractor Manufacturing, Tabriz, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Common-rail Diesel Engine
Optimization
Combustion Chamber
Ultra-Low Particulate Combustion
Multi-Objective Genetic Algorithm

ABSTRACT

Optimal fuel utilization in internal combustion engines plays a crucial role in enhancing fuel economy, reducing emissions, and mitigating environmental impacts. In this study, the combustion chamber geometry of a common-rail diesel engine is optimized to lower fuel consumption and exhaust emissions while maintaining the baseline power output. To this end, a closed-cycle engine model was developed using AVL FIRE software and validated at an operating speed of 2000 rpm. Indicated Specific Fuel Consumption (ISFC), NO_x, and soot emissions were defined as the primary objective functions. The geometric parameters of the piston bowl, constrained by specified upper and lower bounds, served as inputs for a Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA). Computational Fluid Dynamics (CFD) outputs, including NO_x and soot levels for each design configuration, were evaluated to analyze emission variations throughout the optimization process. The algorithm generated a total of 240 design cases. Among the five optimal candidates initially identified, two were discarded due to power degradation. From the remaining three, a final optimum design was selected. For this selected geometry, changes in soot and ISFC were negligible (ISFC increased by only 0.052% compared to the baseline), whereas NO_x emissions were reduced by approximately 2%. Overall, the optimization yielded a piston bowl design that minimizes NO_x and soot emissions while keeping fuel consumption strictly comparable to the baseline combustion chamber.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: khoshbakhti@sut.ac.ir (R. Khoshbakhti Saray)

Received 8 November 2025; Accepted 28 April 2026

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Malekpoor M, Khoshbakhti Saray R, Lashkarpour SM. Optimizing the shape of an ultra-low particulate combustion (ULPC) chamber for a common-rail diesel engine. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):18-35. doi: [10.22034/ER.2026.2076354.1110](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2076354.1110)

بهینه‌سازی شکل محفظه احتراق با ذرات معلق بسیار اندک برای یک موتور دیزلی لوله مشترک

محمد ملک‌پور^۱، رحیم خوش‌بختی سرای^{۲*}، سید مهدی لشکرپور^۳

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

۲- پژوهشکده خودرو، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران

۳- شرکت موتورسازان، تراکتورسازی ایران، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
کلیدواژه‌ها: موتور دیزلی لوله مشترک بهینه‌سازی محفظه احتراق احتراق کم دود روش وراثت چندهدفه	بهره‌برداری بهینه از سوخت در موتورهای درون‌سوز نقش مهمی در بهبود اقتصاد سوخت، کاهش آلایندگی و در نتیجه محدودسازی اثرات زیست‌محیطی دارد. در این پژوهش، بهینه‌سازی هندسه محفظه احتراق یک موتور دیزلی لوله مشترک با هدف کاهش مصرف سوخت و آلایندگی‌های خروجی، بدون افت توان موتور، مدنظر قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا الگوی چرخه بسته موتور در نرم‌افزار ای‌وی‌ال فایر توسعه داده شد و در شرایط کاری ۲۰۰۰ ددد صحت‌سنجی شد. در فرایند بهینه‌سازی، شاخص‌های مصرف سوخت، اکسیدهای ازت و دوده به‌عنوان اهداف اصلی تعریف شدند. همچنین متغیرهای هندسی کاسه سمبه با تعیین حدود بالا و پایین، به‌عنوان ورودی روش بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شدند. خروجی‌های شبیه‌سازی شامل مقادیر اکسیدهای ازت و دوده در هر پیکربندی محفظه، ارزیابی و روند تغییرات آن‌ها در طول فرایند بهینه‌سازی تحلیل شد. در مجموع ۲۴۰ طرح در چارچوب روش ایجاد و بررسی شد. از میان پنج طرح منتخب اولیه، دو طرح به دلیل افت توان کنار گذاشته شد. از سه طرح باقی‌مانده، یک طرح نهایی انتخاب گردید که در آن تغییر محسوسی در دوده و مصرف سوخت مشاهده نشد؛ مصرف سوخت تنها ۰.۰۵۲ درصد افزایش یافت که تقریباً برابر با حالت پایه است، اما مقدار اکسیدهای ازت حدود ۲ درصد کاهش پیدا کرد. در نهایت، هندسه‌ای به‌دست آمد که ضمن حفظ مصرف سوخت نزدیک به محفظه پایه، کمترین مقدار آلایندگی‌های اکسیدهای ازت و دوده را تولید می‌کند.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: khoshbakhti@sut.ac.ir (رحیم خوش‌بختی سرای)

دریافت ۱۷ آبان ۱۴۰۴؛ پذیرش ۸ اردیبهشت ۱۴۰۵

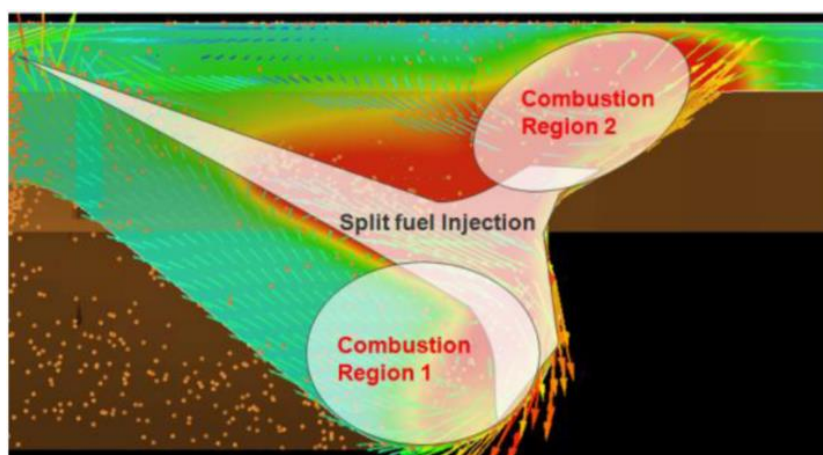
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Malekpoor M, Khoshbakhti Saray R, Lashkarpour SM. Optimizing the shape of an ultra-low particulate combustion (ULPC) chamber for a common-rail diesel engine. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):18-35. doi: 10.22034/ER.2026.2076354.1110

۱- مقدمه

موتورهای دیزل آلاینده‌های کربن مونواکسید و هیدروکربن‌های نسوخته کمتری نسبت به موتورهای بنزینی تولید می‌کنند، اما در مقابل، آلاینده اکسیدهای ازت، ذرات دوده، از آلاینده‌های مهم این موتورها به شمار می‌آیند که در صورت عدم کنترل آنها صدمات جبران ناپذیری برای سلامتی بشر و محیط زیست وارد می‌شود [۱]. حرکت هوا نقش بسیار مهمی در اختلاط سوخت و هوا و احتراق و شکل‌گیری آلاینده‌ها، بویژه در نزدیکی نقطه مکث بالا ایفا می‌کند [۲]. همراه با حرکت هوا توسط چرخش و جریان چلانسی^۱، ویژگی‌های دیگر مانند فواره، فشار تزریق، زاویه پاشش و زمان تزریق، تأثیر قابل توجهی بر احتراق موتور دیزل دارند و برای دستیابی به عملکرد بهتر و آلاینده‌های کمتر، این خصوصیات باید با هندسه کاسه سمبه به خوبی مطابقت داشته باشد [۳]. هندسه کاسه ورودی مجدد^۲، بطور گسترده در موتورهای دیزلی تزریق مستقیم دور تند استفاده شده است. کاسه سمبه به شکل ورود مجدد، برای بهبود اختلاط سوخت و هوا در محفظه احتراق اصلی به دلیل جریان جت چلانسی، بویژه در موتورهای دیزلی پر دور، مناسب است. این طرح محدودیت‌هایی نیز برای کاهش ذرات معلق دارد، زیرا بیشتر احتراق فقط در محفظه احتراق اصلی رخ می‌دهد و در نتیجه از هوا در ناحیه بالایی سمبه استفاده نمی‌شود. به این دلایل، یک شکل جدید محفظه احتراق، به نام احتراق با ذرات دوده بسیار اندک^۳ (احتراق کم دود) طرح شده است که ورودی کاسه سمبه، برای استفاده از هوا در ناحیه بالایی کاسه سمبه، قطر زیادی داشته باشد.

در سال‌های اخیر، سازندگان موتور تلاش کرده‌اند با معرفی طرح‌های نوین برای هندسه کاسه سمبه، بازده احتراق را بهبود دهند. یکی از این طرح‌ها، هندسه احتراق کم دود است که با تقسیم جریان سوخت به دو ناحیه احتراق، اختلاط سوخت و هوا را ارتقا می‌دهد. در این طرح، بخشی از سوخت در داخل کاسه و بخش دیگر در ناحیه بالای آن پخش می‌شود تا از هوای موجود در هر دو ناحیه به‌طور مؤثرتری استفاده شود. مطالعات نشان داده‌اند که جریان چرخشی ایجادشده در کاسه (ناحیه احتراق ۱) و گردابه اضافی در بخش بالایی کاسه (ناحیه احتراق ۲)، مطابق شکل ۱، موجب بهبود اختلاط و افزایش نرخ اکسیدشدن دوده می‌شود. همچنین گزارش شده است که این طرح بویژه برای موتورهای تجاری با گشتاور قوی و سرعت‌های پایین مناسب است و می‌تواند امکان کاهش چشمگیر آلاینده ذرات معلق را فراهم کند، زیرا اختلاط بهبود یافته منجر به اکسیدشدن سریع‌تر دوده در مرحله انبساط می‌شود [۴].



شکل ۱ مفهوم احتراق با ذرات معلق بسیار کم با هندسه کاسه سمبه و افشانه سوخت [۴]

¹ Squish

² Re-entrant Bowl

³ Ultra-Low Particulate Combustion

چن و لو [۵] با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی^۱ به بهینه‌سازی محفظه احتراق یک موتور دیزلی پرداختند و هدف آن‌ها کاهش هم‌زمان دوده و اکسیدهای ازت با حفظ توان موتور بود. شبیه‌سازی‌ها در ای‌وی‌ال فایر انجام شد و نتایج نشان داد که هندسه بهینه با ایجاد جریان چرخشی قوی‌تر، فرآیند اختلاط هوا و سوخت را تسریع کرده و تشکیل و اکسیدشدن دوده را بهبود می‌بخشد. یافته‌ها بیان می‌کند که محفظه‌های کم‌عمق و با قطر کمتر برای کاهش دوده مناسب‌ترند، در حالی که محفظه‌های عمیق‌تر تمایل به تولید اکسیدهای ازت کمتر دارند.

یو و همکاران [۶] نیز عملکرد یک موتور ۲.۴ لیتری دیزلی مجهز به محفظه احتراق کم دود را برای کاربردهای خارج‌جاده‌ای بررسی کردند. در مقایسه با محفظه پایه از نوع ورودی مجدد، هندسه احتراق کم دود با تقویت جریان جت چلانش و اختلاط سوخت و هوا، پتانسیل قابل توجهی در کاهش دوده از طریق اکسیدشدن سریع‌تر نشان داد. نتایج روش طراحی آزمون و شبیه‌سازی‌ها بیانگر آن است که تغییر زاویه پاشش تأثیر اندکی بر آلاینده‌ها داشته و به‌طور کلی، منحنی اکسیدهای ازت-دوده در طرح احتراق کم دود نسبت به محفظه پایه بهبود یافته است.

گنزل و همکاران [۷] یک مطالعه محاسباتی برای بررسی اثر هندسه کاسه، هدف‌گیری فواره و نسبت چرخش در شرایط احتراق رقیق و دمای پایین در موتورهای دیزلی سنگین انجام دادند. با استفاده از روش وراثت چندهدفه، آن‌ها نشان دادند که ترکیب مناسبی از متغیرهای هندسی و فواره می‌تواند به حداقل‌سازی هم‌زمان آلاینده‌ها و بهبود اکسیدشدن دوده و CO منجر شود. نتایج تأکید می‌کند که زاویه هدف‌گیری فواره بیشترین تأثیر را بر روند تشکیل آلاینده‌ها دارد.

شنرو گول [۸] شکل یک کاسه سمبه چرخش دوگانه را با بهره‌گیری از دینامیک محاسبات سیالاتی و روش وراثت چندهدفه بهینه‌سازی کردند. ابعاد کاسه برای حداقل‌سازی دوده و اکسیدهای ازت بهینه شد و طرح نهایی با بهبود اختلاط هوا و سوخت، موجب کاهش آلاینده‌گی و افزایش بهره‌وری سوخت گردید.

ژو و همکاران [۹] یک محفظه احتراق چرخشی جداگانه برای بهبود مصرف هوا معرفی و عملکرد آن را با محفظه دوچرخشی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که زاویه محفظه داخلی تأثیرگذارترین متغیر در عملکرد احتراق تک چرخشی است و پس از آن عمق محفظه و قطر نواحی داخلی و خارجی قرار می‌گیرند. محفظه احتراق چرخشی نسبت به محفظه دوچرخشی مصرف سوخت کمتر و بازده حرارتی بالاتری ارائه داد.

مباشری و پنگ [۱۰] اثر هندسه‌های مختلف محفظه ورودی مجدد را در یک موتور دیزلی پر دور بررسی کردند. تحلیل ۱۳ هندسه متفاوت نشان داد که قطر کم کاسه عامل اصلی افزایش دوده است و افزایش قطر می‌تواند به نقطه عملکردی بهینه منجر شود.

جی و همکاران [۱۱] یک موتور دیزلی دور تند را با استفاده از NSGA-II و دینامیک محاسبات سیالاتی بهینه‌سازی کردند. آن‌ها دریافتند که در بار کامل، توزیع مناسب سوخت بین ناحیه چلانش و کاسه برای کاهش آلاینده‌ها ضروری است، اما در بار متوسط، هدف‌گیری فواره تأثیر کمتری نسبت به متغیرهای هندسی دارد. در بار کم، تمرکز بر جلوگیری از احتراق ناقص اهمیت بیشتری دارد.

چن و همکاران [۱۲] با تحلیل عددی، هندسه‌های مختلف سامانه احتراق چرخش جانبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که زاویه انحراف جریان مهم‌ترین متغیر هندسی است و پس از بهینه‌سازی، چرخش جانبی عملکرد بهتری از نظر مصرف سوخت و کاهش دوده نسبت به DSCS ارائه می‌دهد.

ریسی و همکاران [۱۳] با تحلیل عددی، هندسه‌های مختلف سیستم احتراق چرخش جانبی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که زاویه انحراف جریان مهم‌ترین متغیر هندسی است و پس از بهینه‌سازی، احتراق چرخش جانبی طولی عملکرد بهتری از نظر مصرف سوخت و کاهش دوده نسبت به احتراق با چرخش جانبی دوگانه ارائه می‌دهد.

یو و همکاران [۱۴] با ادامه مطالعات خود روی محفظه احتراق کم دود، متغیرهایی مانند سرعت جریان نازل، نسبت

¹ Nonlinear Programming with Quadratic Linearization (NLPQL)

چرخش و هندسه کاسه را بهینه‌سازی کردند. افزایش ۱۰ درصدی جریان نازل و افزایش ۰.۲ واحدی نسبت چرخش، منجر به بهبود ۲ درصدی مصرف سوخت در شرایط کاری مختلف شد.

هو و همکاران [۱۵] هفت متغیر طراحی موتور دیزلی را با استفاده از دو روش بهینه‌سازی غیرخطی و روش وراثت چندهدفه بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که بهینه‌سازی غیرخطی به‌تنهایی قادر به نزدیک‌شدن به طرح‌های بهینه نیست، در حالی که وراثت چندهدفه مجموعه‌ای غنی از طرح‌های پارتو با عملکرد بهتر در زمینه کاهش اکسیدهای ازت، دوده و مصرف سوخت ارائه می‌دهد. سپس با استفاده از طرح بهینه وراثت چندهدفه به‌عنوان نقطه شروع بهینه‌سازی غیرخطی، طراحی بهینه‌تری با مقادیر کمتر آلاینده‌ها حاصل شد. تحلیل فرآیند احتراق نیز بیانگر آن بود که تزریق دیر هنگام سوخت و کاهش شدت سوئیل عوامل اصلی کاهش اکسیدهای ازت هستند. افزون بر این، نقشه‌های روش سطح پاسخ برای بررسی حساسیت متغیرها نسبت به آلاینده‌ها و مصرف سوخت به‌کار گرفته شد.

با توجه به بررسی پیشینه پژوهش، می‌توان گفت بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه هندسه محفظه احتراق، تأثیر قابل توجهی بر بهبود فرآیند احتراق، عملکرد و کاهش آلاینده‌های موتورهای دیزلی داشته‌اند و تطابق نتایج شبیه‌سازی‌های عددی با داده‌های آزمایشگاهی این موضوع را تأیید می‌کند. در این تحقیقات، انتخاب الگوی احتراق، تعیین متغیرهای هندسی، نسبت چرخش، زمان پاشش سوخت و سایر متغیرهای مرتبط اهمیت ویژه‌ای داشته است. با این حال، تعداد مطالعاتی که محفظه‌های احتراق کم دود را بررسی کرده‌اند، محدود است، که نشان‌دهنده امکان انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه است.

در کار حاضر، پس از توسعه و صحت‌گذاری الگوی چرخه بسته یک موتور دیزلی در شرایط کارکردی مختلف، بهینه‌سازی هندسه محفظه احتراق مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار ای‌وی‌ال‌فایر که تنها از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی، Nelder-Mead و GA پشتیبانی می‌کند، از روش وراثت برای بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شده است تا ترکیبی از کاهش آلاینده‌ها و حفظ توان موتور حاصل شود.

۲- مواد و روش‌ها

در نرم‌افزار ای‌وی‌ال‌فایر می‌توان تمامی فرآیندهای داخل استوانه را توسط یک الگوی شبکه بندی شده متحرک، از زمان بسته شدن دریچه ورودی تا زمان باز شدن دریچه خروجی شبیه‌سازی کرد. مقاله حاضر بررسی بهینه‌سازی هندسه یک محفظه احتراق کم دود در یک موتور دیزلی با لوله مشترک ساخت شرکت موتورسازان را ارائه می‌کند. شکل این محفظه، پیشتر طی مطالعاتی در شرکت موتورسازان طراحی، ساخته و در شرایط مختلف کارکردی موتور مورد آزمون قرار گرفته است. در مطالعه حاضر از یک الگوی سه بعدی به منظور شبیه‌سازی محفظه احتراق استفاده شده است. در ابتدا الگو با استفاده از داده‌های تجربی صحت‌سنجی شده و پس از تعیین الگوها و مشخصات دقیق موتور، بررسی استقلال از شبکه و صحت‌گذاری الگو با نتایج تجربی، بهینه‌سازی با روش وراثت شروع می‌شود تا بهترین طرح ممکن تعیین گردد.

۲-۱- مشخصات موتور انتخابی و شرایط کارکردی

در این کار، تمام محاسبات عددی فقط برای چرخه بسته موتور از لحظه بسته شدن دریچه ورودی تا لحظه باز شدن دریچه خروجی موتور انجام گرفته است. موتور مورد بررسی یک موتور دیزل با محفظه احتراق کم دود با پاشش لوله مشترک است که مشخصات کامل آن در جدول ۱ و شرایط کارکردی مورد بررسی در جدول ۲ درج شده است.

پس از مشخص کردن شرایط اولیه، شرایط مرزی برای شبیه‌سازی احتراق بصورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۲).

- شرط مرزی سمبه که از نوع شرط مرزی دیوار است و دمای ۶۰۰ کلوین اعمال می‌شود.

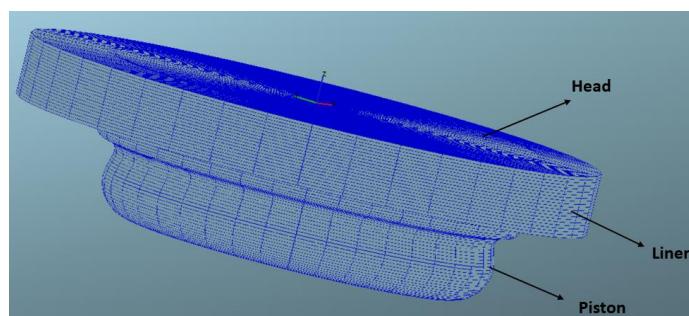
- شرط مرزی بوش استوانه از نوع شرط مرزی دیوار است و به دلیل ثابت بودن دیواره‌ها سرعت در جهت‌های u, v, w صفر و دمای آن 500 کلوین تعریف می‌شود.
- شرط مرزی بستر از نوع شرط مرزی دیوار و سرعت در جهت‌های u, v, w برابر با صفر و دمای آن 550 کلوین وارد می‌شود.
- شروط بعدی نیز بصورت ورودی/خروجی جرم و شار حرارتی صفر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱ مشخصات و ابعاد موتور

نوع موتور	اشتعال تراکمی
قطر (متر)	۰.۱۰۰
پیمایش سمبه (متر)	۰.۱۲۷
بازوی اتصال (متر)	۰.۲۱۹
شعاع لنگ (متر)	۰.۰۶۳۵
نسبت تراکم	۱۶.۵۷
بیشترین گشتاور (N.m/rpm)	۳۸۷/۱۴۰۰
بیشترین قدرت (hp/rpm)	۹۴/۲۰۰۰
تعداد سوراخ افشانه	۷
تعداد استوانه	۴
تنفس	پرخوران

جدول ۲ شرایط کارکردی موتور در شرایط بار کامل و دور ۲۰۰۰ دد

دور موتور (دد)	۲۰۰۰
فشار اولیه (بار)	۲.۵۶
دمای اولیه سوخت (کلوین)	۳۳۰
دمای هوای ورودی (کلوین)	۳۵۰
زمان بسته شدن دریچه ورودی (درجه)	۲۳۵
زمان باز شدن دریچه خروجی (درجه)	۴۳۸
زمان شروع پاشش پیلوت (درجه)	۳۳۰ (۳۰ درجه قبل از نقطه مکث بالا)
زمان شروع پاشش اصلی (درجه)	۳۶۰
فشار پاشش (بار)	۱۳۰۰



شکل ۲ شرایط مرزی اعمال شده

۲-۲- تنظیمات پاشش

برای بدست آوردن نمودار پاشش، از نرم‌افزار GT-Power استفاده شد. در این نرم‌افزار از افشانه BOSCH-Solenoidinjector-Payri برای شبیه‌سازی پاشش استفاده شد. تعداد سوراخ ها ۷ و قطر سوراخ نازل ۰.۱۳ میلی‌متر وارد شد. در این الگو، بیشتر ابعاد و اندازه‌های مربوط به نقشه افشانه، توسط شرکت موتورسازان تعیین و وارد شد. در مطالعه حاضر، پاشش سوخت در دو مرحله انجام می‌گیرد. ابتدا پاشش اصلی رخ می‌دهد و مقدار بسیار کمی از سوخت وارد محفظه شده و در مرحله بعد پاشش اصلی انجام می‌گیرد. پس از این مراحل باید مشخصات کارکردی افشانه در دور مشخص تعیین گردد که در جدول ۳ و ۴ خلاصه شده است.

جدول ۳ مشخصات پاشش اصلی در شرایط بار کامل و دور ۲۰۰۰ دد

۴.۵	بیشترین زمان شبیه‌سازی (ms)
۱۳۰۰	فشار لوله سوخت مشترک (bar)
۳۳۰	دمای سوخت (K)
۱۰۱.۵۱	فشار محفظه (bar)
۰.۰۰۰۰۰۰۱	زمان شروع پاشش (ms)
۱.۰۹۸۷	ET (ms)
۶۱.۷	بیشترین جرم پاشش شده (mg)
۲۸	بیشترین دستور برقی (A)

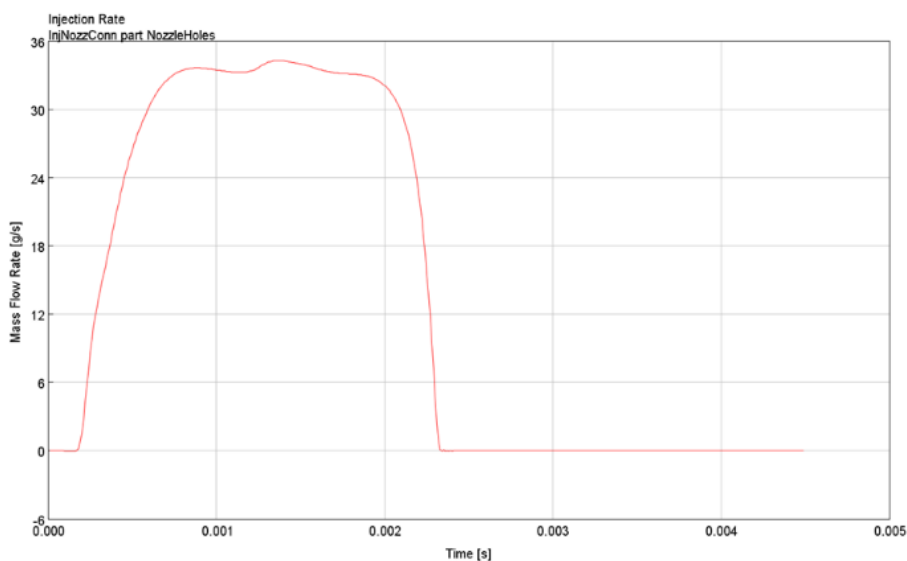
جدول ۴ مشخصات پاشش پایلوت در شرایط بار کامل و دور ۲۰۰۰ دد

۷	بیشترین زمان شبیه‌سازی (ms)
۱۳۰۰	فشار لوله سوخت (bar)
۳۳۰	دمای سوخت (K)
۳۱.۳۵	فشار محفظه (bar)
۲.۵	زمان شروع پاشش (ms)
۰.۲۴۷۸	ET (ms)
۲.۵	بیشترین جرم پاشش شده (mg)
۲۸	بیشترین دستور برقی (A)

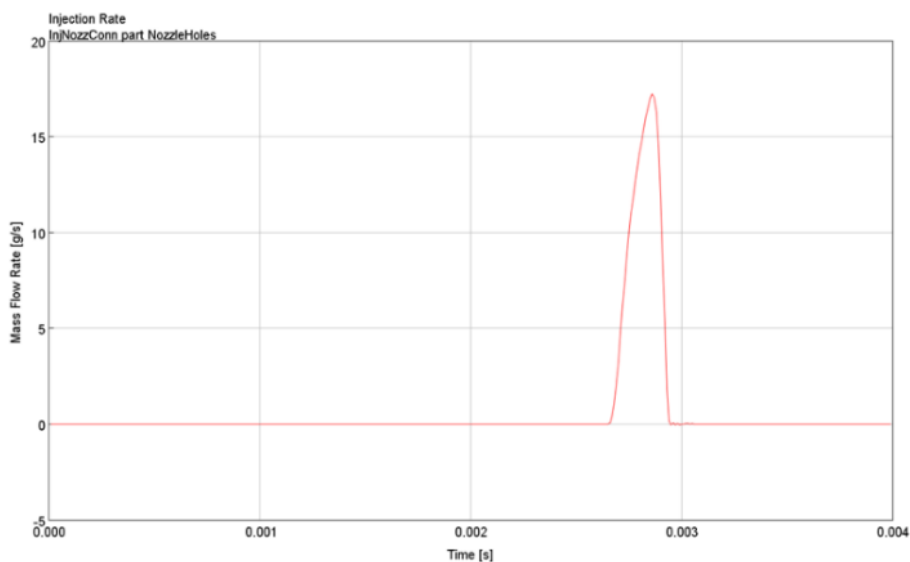
نرخ پاشش برای پاشش اصلی و پاشش پایلوت در نمودارهای زیر برای دور ۲۰۰۰ دد در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. نرخ پاشش بدست آمده بصورت مقادیر جدولی در نرم‌افزار ای‌وی‌ال فایر وارد می‌گردد.

۲-۳- شبکه‌بندی و الگوها

در این کار به دلیل اینکه افشانه در جهت محور Xها مقدار کمی جابه‌جایی دارد، شبکه‌بندی محفظه احتراق بصورت کامل وارد نرم‌افزار می‌شود. پس از وارد کردن تنظیمات مربوط به شبکه‌ها، شبکه با اندازه ۰.۶ میلی‌متر، ضخامت لایه‌مرزی به اندازه ۰.۲ میلی‌متر و فاصله با اندازه ۳.۲ میلی‌متر برای افشانه در جهت محور Xها، زده می‌شود (شکل ۵). الگوهای استفاده شده در شبیه‌سازی سه‌بعدی از قبیل شکست قطرات، آسفنگی، انتقال حرارت و ... در جدول ۵ آورده شده‌اند.



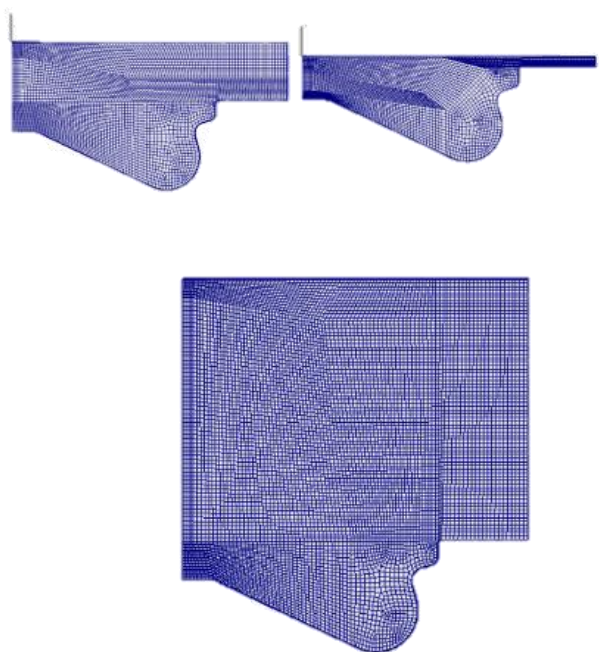
شکل ۳ نمودار پاشش اصلی برای دور ۲۰۰۰ دد



شکل ۴ نمودار پاشش پاپلوت برای دور ۲۰۰۰ دد

جدول ۵ الگوهای استفاده شده در شبیه‌سازی

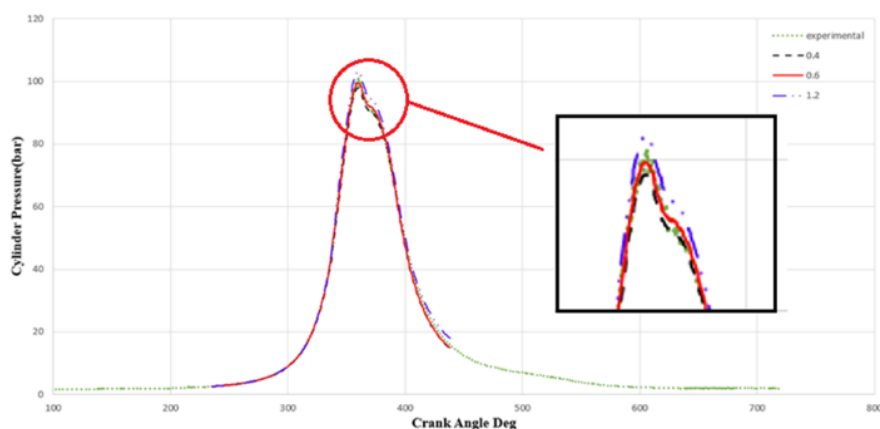
Combustion	ECFM-3Z
Turbulence	K-Zeta-f
Wall Treatment	Hybrid Wall Treatment
Wall Heat Transfer	Standard Wall Function
Drop Drag	Schiller Naumann
Evaporation	Dukowicz
Breakup	Wave
Particle Interaction	Schmidt
Wall Interaction	Walljet2
NOx	Extended Zeldovich
Soot	Hiroyasu/Nagle/Strickland-Constable



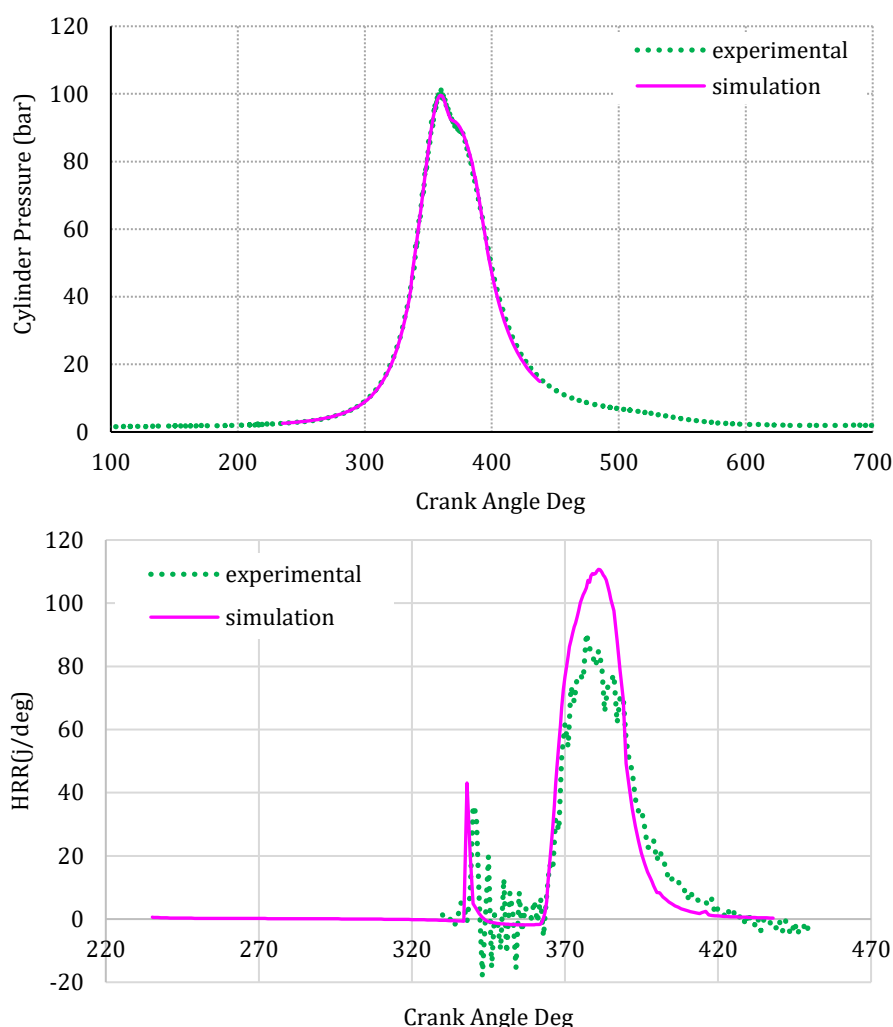
شکل ۵ شبکه‌بندی دوبعدی محفظه احتراق

۲-۴- استقلال از شبکه و صحت‌گذاری نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی استقلال از شبکه، از سه اندازه مختلف برای شبکه با ضخامت لایه‌مرزی یکسان برای هر سه، استفاده شد. شبکه ریز با اندازه ۰.۴ میلی‌متر، شبکه متوسط با اندازه ۰.۶ میلی‌متر و شبکه درشت با اندازه ۱.۲ میلی‌متر در این بررسی به کار برده شد و نتایج این بررسی در قالب تغییرات منحنی فشار داخل استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ در شکل ۶ نشان داده شده است. برای اینکه محاسبات با شبکه ریز طولانی‌تر بود از شبکه با اندازه متوسط استفاده شد. برای اینکه فرآیند بهینه‌سازی بدرستی انجام شود، در ابتدا باید الگوی شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی تطابق خوبی داشته باشد. سوخت مورد استفاده در شبیه‌سازی، هپتان نرمال انتخاب شد. همانطور که از شکل ۷ مشاهده می‌شود، پیش‌بینی تغییرات فشار داخل استوانه بر حسب زاویه میل‌لنگ از الگوی شبیه‌سازی شده در توافق خوبی با نتایج تجربی متناظر می‌باشد اما مقدار کمی تفاوت در منحنی‌های HRR در زوایای نزدیک به نقطه مکث بالا مشاهده می‌شود.



شکل ۶ منحنی فشار با سه مش مختلف ریز، متوسط و درشت به همراه نتایج تجربی



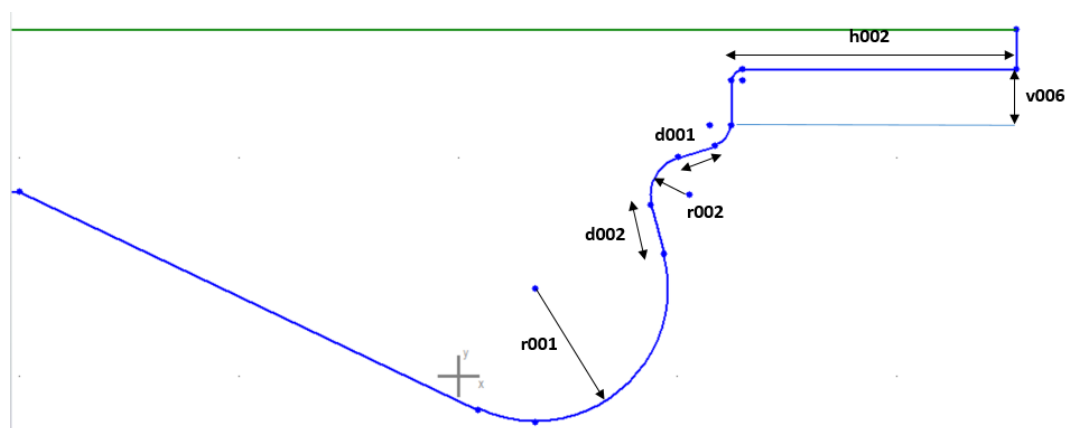
شکل ۷ نتایج فشار داخل استوانه برحسب زاویه لنگ و نرخ آزادسازی انرژی با نتایج تجربی در ۲۰۰۰ دد

۳- نتایج و بحث

مقادیر پایه، کمینه و بیشینه شش متغیر هندسی انتخاب شده برای هندسه محفظه احتراق، مطابق شکل ۸، در جدول ۶ ارائه شده است. این بازه‌های تغییرات برای متغیرهای هندسی با توجه به اهداف بهینه‌سازی شامل کمینه‌سازی اکسیدهای ازت، دوده و مصرف سوخت تعیین شده‌اند. از آنجا که در طول فرآیند پاشش، سوخت به دو ناحیه بالایی و پایینی محفظه احتراق هدایت می‌شود، یکی از متغیرهای منتخب، شعاع کاسه سمبه اصلی (r001) است تا تأثیر آن بر فرآیند احتراق بررسی شود. نقطه برخورد اولیه فواره سوخت نیز نقش مهمی در نحوه تقسیم آن به دو ناحیه دارد؛ به همین دلیل، متغیرهای d001، d002 و r002 به عنوان متغیرهای مؤثر بر این ناحیه انتخاب شده‌اند. علاوه بر این، متغیرهای v006 و h002 نیز بترتیب بر عمق کاسه و قطر ناحیه بالایی کاسه اثرگذار هستند.

پس از تعیین متغیرها و اهداف بهینه‌سازی، مقادیر متغیرهای خود روش با توجه به مرجع [۱۵] مطابق جدول ۸ تنظیم شد.

روش وراثت، ۲۴۰ آزمایش برای بهینه‌سازی ایجاد کرد. از بین این ۲۴۰ آزمایش، ۸۶ آزمایش غیرقابل اجرا ایجاد شد و در چرخه بهینه‌سازی تأثیری نداشت. طبق شکل ۹ به جز اکسیدهای ازت که بعد از محدوده مشخص شده نوسانات اندکی داشت، تقریباً از محدوده مشخص شده اهداف مدنظر تغییرات زیادی نداشته و تقریباً به همگرایی رسیده‌اند.



شکل ۸ متغیرهای محفظه احتراق

جدول ۶ بازه‌های کمینه و بیشینه متغیرهای انتخابی (مقادیر به میلی‌متر می‌باشند)

متغیرهای طراحی	کمترین	پایه	بیشترین
d001	۰.۸۸۱	۱.۷۶۲	۲.۶۴۳
d002	۱.۱۵۴	۲.۳۰۹	۳.۴۶۴
r001	۳.۰۵	۶.۱	۹.۱۵
r002	۰.۹	۱.۸	۲.۷
h002	۶.۵	۱۳	۱۹.۵
v006	۱.۲۷	۲.۵۴	۳.۸۱

جدول ۷ اهداف بهینه‌سازی

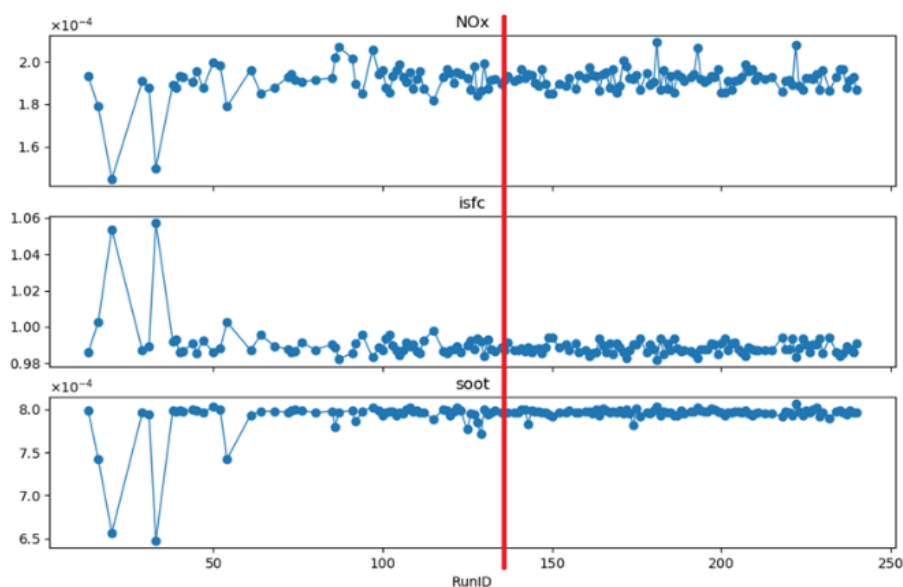
هدف	نوع	پایه
اکسیدهای ازت	کمینه‌سازی	۰.۰۰۰۲۱۳
مصرف سوخت	کمینه‌سازی	۰.۹۵۱۰
دوده	کمینه‌سازی	۰.۰۰۰۷۸۱

جدول ۸ مقادیر متغیرهای روش وراثت

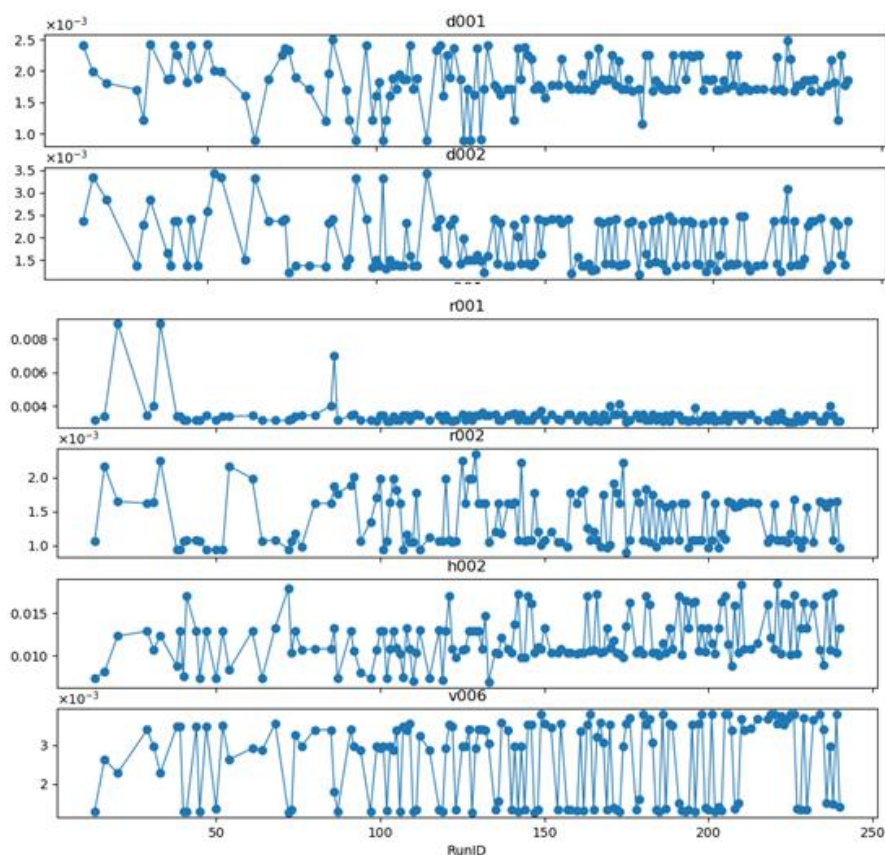
Distribution for crossover probability	۱۰
Number of generations	۱۰
Crossover probability	۰/۷
Distribution for mutation probability	۱۰
Population size	۲۰
Mutation probability	۰/۱

طبق نتایج حاصل، در میان متغیرهای هندسی بررسی شده، تنها متغیر r001 دارای نوسانات محدود بوده و در یک بازه مشخص متمایل به مقادیر کمتر از مقدار پایه قرار گرفته است (شکل ۱۰). این موضوع از نظر فیزیکی قابل تفسیر است؛ زیرا کاهش شعاع کاسه اصلی موجب متمرکزتر شدن ناحیه جریان گردابه‌ای و افزایش شدت اختلاط موضعی سوخت و هوا

می‌شود. این بهبود در اختلاط، اختلاف دما را یکنواخت‌تر کرده و تشکیل اکسیدهای ازت را محدود می‌کند، بدون اینکه اختلاط آن قدر ضعیف شود که موجب افزایش دوده گردد. بنابراین مقدار بهینه r001 باید کمتر از مقدار اولیه باشد تا توازن مناسب میان دما، اقامت سوخت و اختلاط برقرار شود.



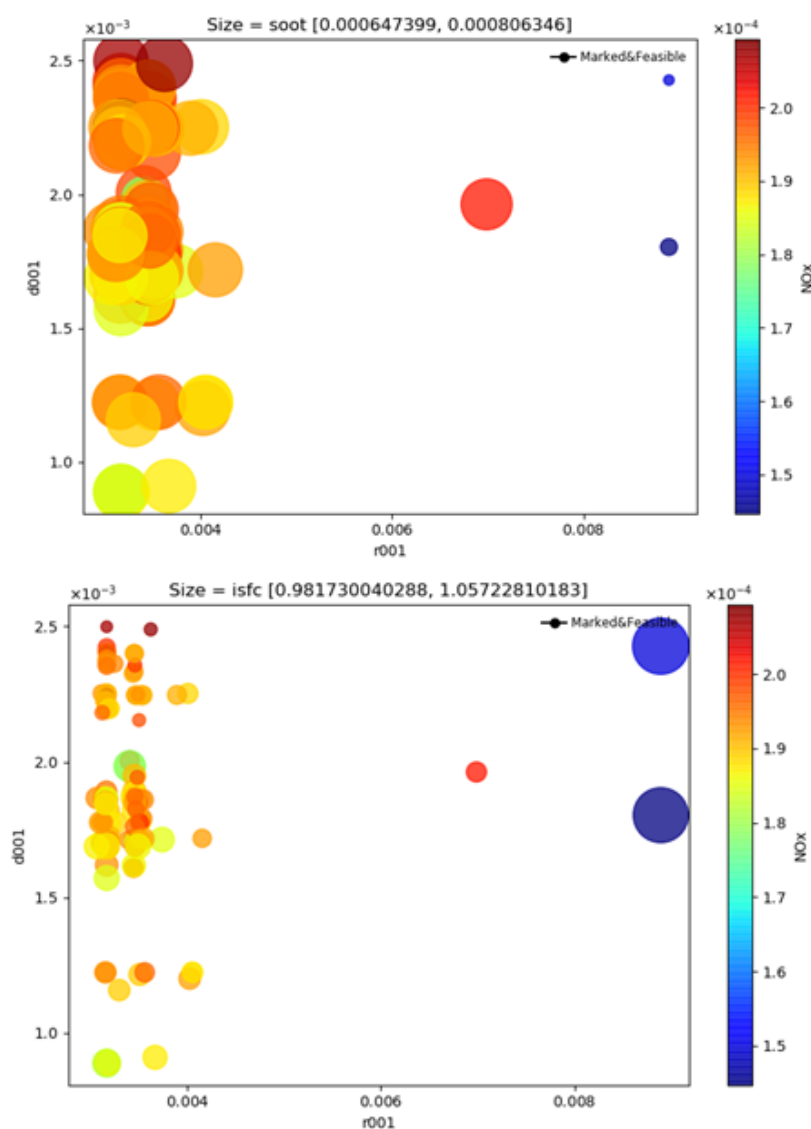
شکل ۹ خروجی روش برای اهداف مدنظر



شکل ۱۰ داده‌های خروجی روش بهینه‌سازی برای متغیرهای هندسی

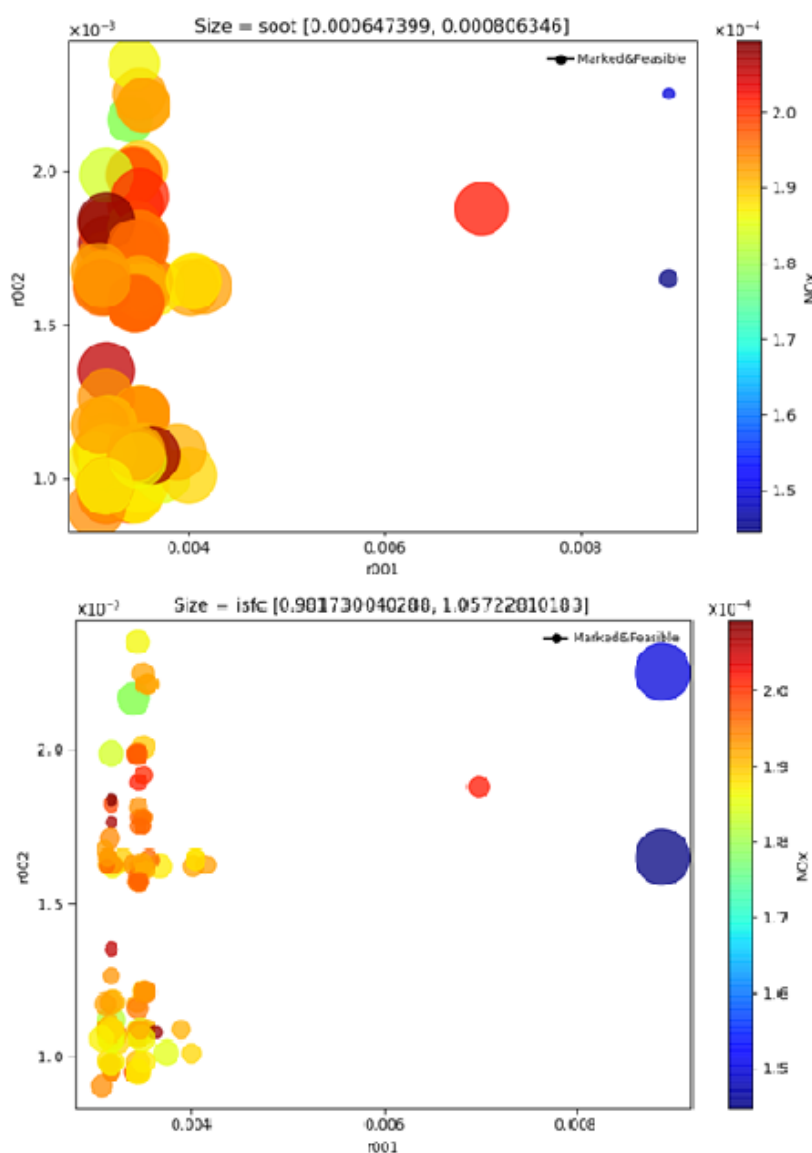
نمودار چهاربعدی حبابی (شکل ۱۱) نیز این روند را تأیید می‌کند. کاهش مقادیر $r001$ و $d001$ باعث می‌شود بیشتر نقاط طراحی در محدوده رنگ زرد و نارنجی قرار گیرند که نشان‌دهنده کاهش محسوس اکسیدهای ازت است. علت فیزیکی این رفتار، کاهش حجم مؤثر ناحیه بالایی و در نتیجه پایین‌تر بودن دمای اوج احتراق در مرحله پس‌مخلوط‌سازی است. از طرفی، اندازه حباب‌ها نشان‌دهنده مقدار (دوده) تغییرات چشمگیری ندارد و در محدوده متوسط باقی می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد که کاهش این متغیرها اختلاط اولیه را آن‌قدر تضعیف نمی‌کند که موجب تشکیل هسته‌های دوده شود و ساختار جریان همچنان قادر به حفظ کیفیت اختلاط در فاز پراکندگی سوخت است.

درخصوص مصرف سوخت نیز کاهش مقادیر $r001$ و $d001$ سبب تغییرات قابل‌توجهی نمی‌شود که این موضوع از منظر فیزیکی قابل‌انتظار است؛ زیرا این دو متغیر عمدتاً بر کیفیت احتراق و تولید آلاینده‌ها اثر مستقیم دارند، اما تأثیر آن‌ها بر تلفات حرارتی و زمان‌بندی آزادسازی انرژی محدود است. با این حال، تعدادی از نقاط طراحی با اندازه حباب‌های کوچک (دوده) پایین و مصرف سوخت کمتر مشاهده شدند. این نقاط به دلیل نسبت تراکم بسیار کم و ایجاد کاهش نامطلوب در دمای تراکم اولیه، از گزینه‌های معتبر خارج شدند. نسبت تراکم پایین سبب کاهش دمای پیش‌مخلوط و افزایش احتمال احتراق ناقص می‌شود که اگرچه دوده را کم می‌کند، اما با منطق فنی یک موتور دیزلی سازگار نیست.



شکل ۱۱ نمودار حبابی برای مقایسه تأثیر $r001$ و $d001$ بر آلاینده‌های اکسیدهای ازت و دوده و مصرف سوخت

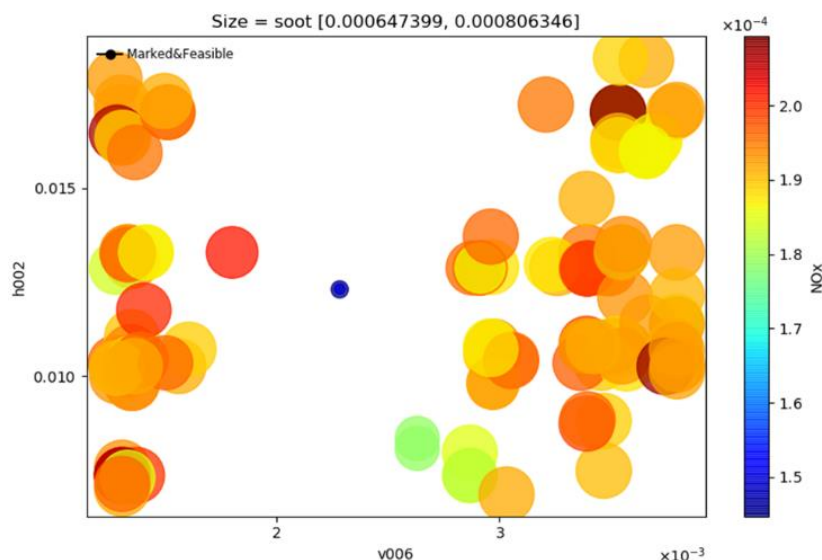
همچنین مطابق شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که مقادیر حدی متغیر $r002$ (یعنی نزدیک به مقادیر کمینه و بیشینه)، عملکرد بهتری از نظر آلاینده‌گی ارائه می‌دهند، در حالی که مقادیر میانی این متغیر مطلوب نیستند. این رفتار نشان می‌دهد که $r002$ نقش دوگانه‌ای در هدایت سوخت به نواحی بالایی و پایینی محفظه ایفا می‌کند. در مقادیر کمینه، سوخت بیشتر به ناحیه مرکزی و کاسه اصلی هدایت شده و فرصت اختلاط مناسب‌تری ایجاد می‌شود، و در مقادیر بیشینه، سوخت تمایل بیشتری برای انتشار به ناحیه بالایی دارد که به بهبود رقیق‌سازی موضعی و کاهش اوج دما کمک می‌کند. اما مقادیر میانی $r002$ باعث توزیع نامتعادل و نیمه‌متمرکز سوخت شده، در نتیجه سبب افزایش دوده به دلیل نواحی غنی‌شده و افزایش اکسیدهای ازت به دلیل افزایش دما در نواحی دیگر می‌گردند.



شکل ۱۲ نمودار حبابی برای مقایسه تاثیر $r001$ و $r002$ بر آلاینده‌های اکسیدهای ازت و دوده و مصرف سوخت

با توجه به شکل ۱۳، محدوده‌های بهینه برای کاهش اکسیدهای ازت شامل اندکی افزایش در متغیر $v006$ (عمق کاسه) و کاهش در متغیر $h002$ (قطر ناحیه بالایی کاسه) است. این روند نشان می‌دهد که افزایش عمق کاسه باعث هدایت بهتر جریان چرخشی و افزایش مدت اختلاط سوخت‌وهوا در ناحیه مرکزی می‌شود و از تشکیل نواحی بسیار داغ

جلوگیری می‌کند که منجر به تولید اکسیدهای ازت می‌شوند. از سوی دیگر، کاهش h_{002} موجب محدود شدن گسترش شعله در ناحیه بالایی و جلوگیری از تشکیل لایه‌های نازک و داغ نزدیک دیواره می‌شود که معمولاً نقاط بالقوه تولید اکسیدهای ازت هستند. به طور کلی، ترکیب افزایش جزئی عمق کاسه و کاهش قطر ناحیه بالایی، الگوی جریان را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که احتراق یکنواخت‌تر و دمای اوج کمتر گردد و در نتیجه تولید اکسیدهای ازت کاهش یابد. اطلاعات مربوط به پنج طرح انتخاب‌شده، شامل مقادیر کمی متغیرها و عملکرد آلاینده‌گی، در جداول ۹ و ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۳ نمودار حبابی برای مقایسه تاثیر v_{006} و h_{002} بر آلاینده‌های اکسیدهای ازت و دوده

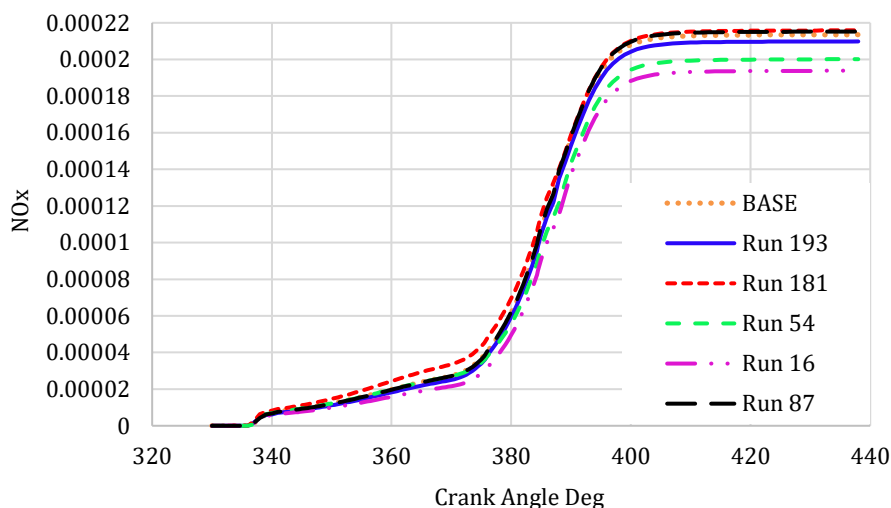
جدول ۹ مقایسه مقادیر پیشنهادی برای محفظه احتراق در مقایسه با مقادیر پایه متناظر (مقادیر به میلی‌متر هستند)

شماره طرح	d001	d002	r001	r002	h002	v006
پایه	۱.۷۶۲	۲.۳۰۹	۶.۱	۱.۸	۱۳	۲.۵۴
۱۶	۱.۹۸۳	۳.۳۴۳	۳.۴۰۱	۲.۱۶۷	۸.۰۷۲	۲.۶۳۱
۵۴	۱.۹۸۳	۳.۳۴۳	۳.۴۰۱	۲.۱۶۷	۸.۳۳۷	۲.۶۳۱
۸۷	۲.۴۹۸	۲.۴۱۹	۳.۱۶۲	۱.۷۶۳	۷.۳۶۵	۱.۳۰۷
۱۸۱	۲.۲۵۲	۱.۴۱۳	۳.۱۶۲	۱.۸۳۷	۱۷.۰۲۱	۳.۵۳۱
۱۹۳	۲.۲۴۶	۲.۲۶۳	۳.۱۶۲	۱.۶۲۵	۱۶.۴۶۸	۱.۲۸۵

جدول ۱۰ مقادیر اهداف بهینه‌سازی برای پنج حالت بهینه در مقایسه با مقادیر متناظر در حالت پایه

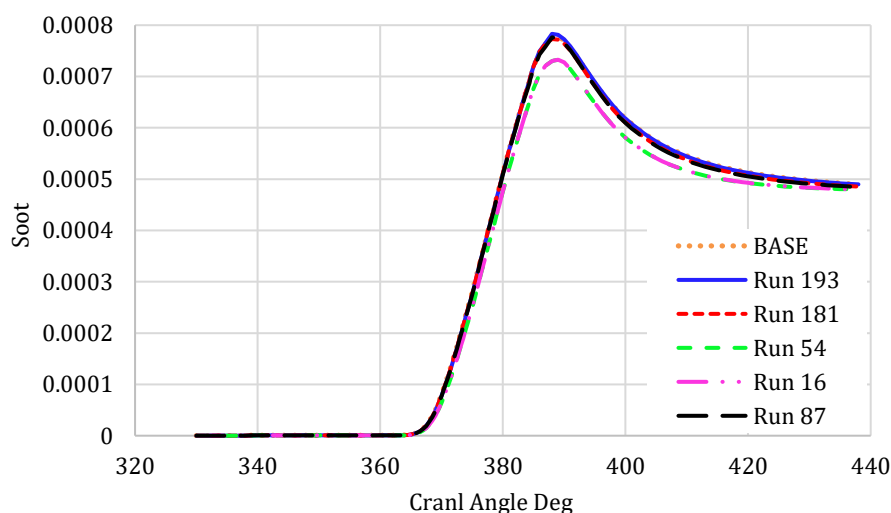
شماره طرح	نسبت تراکم	اکسیدهای ازت	دوده	مصرف سوخت (کیلوگرم در کیلووات‌ساعت)
پایه	۱۶.۵۷	۰.۰۰۰۲۱۳	۰.۰۰۰۷۸۱	۰.۹۵۱۰
۱۶	۱۵.۴۸	۰.۰۰۰۱۹۳	۰.۰۰۰۷۲۹	۰.۹۶۹۳
۵۴	۱۵.۴۸	۰.۰۰۰۰۲	۰.۰۰۰۷۲۹	۰.۹۶۹۳
۸۷	۱۶.۵۷	۰.۰۰۰۲۱۵	۰.۰۰۰۷۷۶	۰.۹۵۰۲
۱۸۱	۱۶.۵۷	۰.۰۰۰۲۱۵	۰.۰۰۰۷۷۳	۰.۹۵۰۲
۱۹۳	۱۶.۵۷	۰.۰۰۰۲۰۹	۰.۰۰۰۷۸۳	۰.۹۵۱۵

براساس نمودار شکل ۱۴، تغییرات آلاینده اکسیدهای ازت برای طرح‌های پیشنهادی نشان می‌دهد که طرح‌های ۱۹۳، ۱۶ و ۵۴ بیشترین کاهش را در این آلاینده ایجاد کرده‌اند، در حالی که طرح‌های ۱۸۱ و ۸۷ از نظر اکسیدهای ازت عملکردی نزدیک به محفظه پایه دارند. این کاهش در طرح‌های ۱۶ و ۵۴ عمدتاً ناشی از تغییر الگوی جریان و کاهش دمای اوج احتراق است که در نتیجه شعاع کاسه سمبه اصلی (r_{001}) کمتر، مقادیر بهینه متغیرهای نقطه برخورد اولیه فواره سوخت شامل d_{001} ، d_{002} و r_{002} ، عمق کاسه بیشتر و قطر ناحیه بالایی کمتر کاسه حاصل می‌گردد و باعث توزیع متفاوت سوخت در محفظه می‌شود.



شکل ۱۴ تغییرات منحنی اکسیدهای ازت بر حسب زاویه میل‌لنگ در طرح‌های پیشنهادی

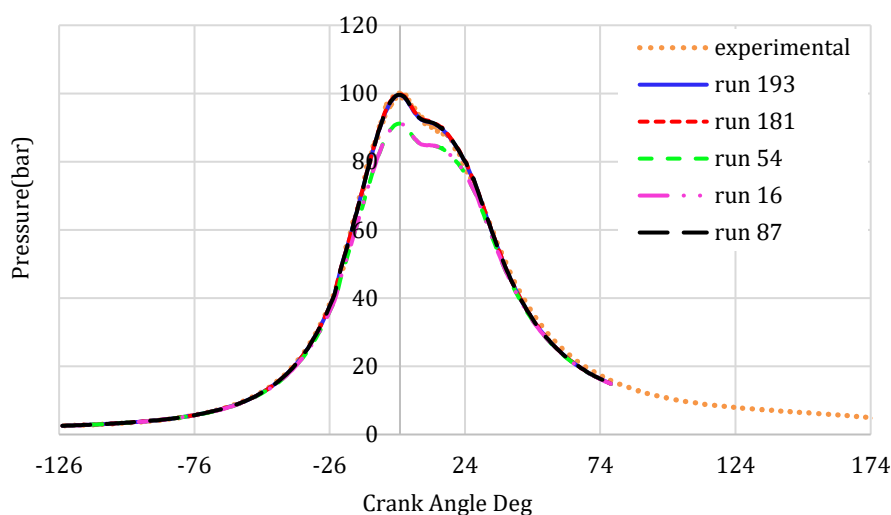
همچنین مطابق شکل ۱۵، مقدار دوده در طرح‌های ۱۸۱ و ۱۹۳ تقریباً مشابه محفظه پایه بوده و تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود؛ در طرح ۸۷ مقدار دوده اندکی کاهش یافته است. اما طرح‌های ۱۶ و ۵۴ بیشترین کاهش دوده را نشان می‌دهند. این کاهش عمدتاً به دلیل بهبود اختلاط سوخت و هوا و افزایش نسبی زمان اقامت ذرات در نواحی غنی‌شده برای اکسیدشدن دوده است.



شکل ۱۵ مقایسه تغییرات منحنی دوده بر حسب زاویه میل‌لنگ در طرح‌های پیشنهادی

با وجود عملکرد مناسب طرح‌های ۱۶ و ۵۴ در کاهش همزمان اکسیدهای ازت و دوده، هر دو طرح به دلیل کاهش نسبت تراکم ($CR = 15.4852$) توان کمتری تولید می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۱۶ نشان داده شده است، کاهش نسبت تراکم باعث افت فشار اوج استوانه شده و در نتیجه بازده نامی و توان خروجی کاهش یافته است. بنابراین، با وجود مزیت آلاینده‌گی، این طرح‌ها به دلیل عدم حفظ توان موتور حذف شدند.

از میان سه طرح باقی‌مانده یعنی طرح‌های ۸۷، ۱۸۱ و ۱۹۳، نتایج جاکی از آن است که طرح‌های ۱۸۱ و ۸۷ از نظر آلاینده‌گی اختلاف قابل‌توجهی با یکدیگر ندارند. در مقابل، طرح ۱۹۳ با وجود ایجاد تغییرات بسیار کم در دوده و مصرف سوخت، توانست کاهش مشخصی در اکسیدهای ازت نسبت به محفظه پایه ارائه دهد. مقدار مصرف سوخت در این طرح تنها ۰.۰۵۲ درصد افزایش داشته است که عملاً قابل چشم‌پوشی است و نشان می‌دهد که مصرف سوخت ویژه همچنان در محدوده حالت پایه باقی مانده است. در نتیجه، طرح ۱۹۳ به عنوان محفظه احتراق بهینه انتخاب شد، زیرا توان را حفظ کرده، افزایش محسوسی در مصرف سوخت ندارد، و کاهش ملایم اما پایدار در اکسیدهای ازت ارائه می‌دهد، بدون آنکه باعث افزایش دوده شود.



شکل ۱۶ منحنی تغییرات فشار بر حسب زاویه میل‌لنگ برای طرح‌های بهینه و پایه در ۲۰۰۰ دد

۴- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، بهینه‌سازی هندسه محفظه احتراق یک موتور دیزلی با سامانه پاشش لوله مشترک ساخت شرکت موتورسازان بود. فرآیند بهینه‌سازی برای دور نامی ۲۰۰۰ دد و با استفاده از روش وراثت انجام شد. اهداف اصلی شامل کاهش آلاینده‌های دوده و اکسیدهای ازت و کاهش یا حفظ مصرف سوخت ویژه نامی بود، به گونه‌ای که توان موتور نیز حفظ شود. پیش از انجام بهینه‌سازی، طراحی اولیه محفظه احتراق بر اساس مطالعات گسترده از طریق بهگزینی طرح‌های محفظه احتراق موجود و تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی انجام شده بود. در نتیجه، هندسه اولیه دارای عملکرد مناسبی بوده و به همین دلیل، انتظار تغییرات بزرگ در فرآیند بهینه‌سازی وجود نداشت. نتایج نیز این موضوع را تأیید کردند و نشان دادند که تغییرات نهایی در متغیرهای هندسی به‌طور کلی محدود بوده است. شش متغیر هندسی انتخاب‌شده برای بهینه‌سازی هندسه محفظه احتراق، شعاع کاسه سمبه اصلی ($r001$)، متغیرهای نقطه برخورد اولیه فواره سوخت شامل متغیرهای $d001$ ، $d002$ و $r002$ ، و متغیرهای $v006$ و $h002$ نیز بترتیب عمق کاسه و قطر ناحیه بالایی کاسه را شامل می‌شدند. پس از اجرای روش وراثت، پنج طرح پیشنهادی نهایی شد. دو طرح به دلیل کاهش توان حذف گردیدند. از بین سه طرح باقی‌مانده، طرح شماره ۱۹۳ به عنوان گزینه نهایی انتخاب شد. در این طرح،

متغیرهای هندسی $r001$ ، $r002$ ، $d001$ و $v006$ نسبت به محفظه پایه کاهش یافتند و سایر متغیرها اندکی افزایش نشان دادند. کاهش دوده و مصرف سوخت در این طرح محسوس نبود، به‌طوری‌که مصرف سوخت تنها 0.052 درصد افزایش داشت که عملاً می‌توان آن را برابر با مقدار پایه تلقی کرد. با این حال، آلایندگی اکسیدهای ازت حدود 2 درصد کاهش یافت که بهبود قابل‌قبولی نسبت به وضعیت پایه محسوب می‌شود.

در مجموع، نتایج نشان داد که با وجود کیفیت مناسب طراحی اولیه، بهینه‌سازی انجام‌شده توانست طرحی با کمترین مقدار اکسیدهای ازت و دوده و با مصرف سوخت بسیار نزدیک به حالت پایه ارائه دهد، بدون آن‌که عملکرد توان موتور تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین، طرح 193 به‌عنوان طرح محفظه احتراق بهینه برای موتور مورد مطالعه انتخاب شد.

References

- [1] Yao M, Zheng Z, Liu H. Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. *Progress in energy and combustion science*. 2009 Oct 1;35(5):398-437.
- [2] Andersson Ö, Miles PC. Diesel and diesel LTC combustion. *Encyclopedia of automotive engineering*. 2014 Apr 17;1:36. doi: [10.1002/9781118354179.auto120](https://doi.org/10.1002/9781118354179.auto120)
- [3] Yoo D, Song J, Kim Y, Jung W, Kim D. Fuel consumption improvement of 2.4 L ULPC diesel engine by optimizing the combustion system; Nozzle, swirl ratio and piston bowl geometry. InSAE 2015 World Congress & Exhibition 2015 Apr 14. SAE Technical Paper.
- [4] Yoo D, Kim D, Jung W, Kim N, Lee D. Optimization of diesel combustion system for reducing PM to meet tier4-final emission regulation without diesel particulate filter. InSAE/KSAE 2013 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting 2013 Oct 14. SAE Technical Paper. doi: [10.4271/2013-01-2538](https://doi.org/10.4271/2013-01-2538)
- [5] Chen Y, Lv L. The multi-objective optimization of combustion chamber of DI diesel engine by NLPQL algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 2014 Dec 5;73(1):1332-9.
- [6] Yoo D, Kim D, Jung W, Kim N, Lee D. Optimization of diesel combustion system for reducing PM to meet tier4-final emission regulation without diesel particulate filter. InSAE/KSAE 2013 International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting 2013 Oct 14. SAE Technical Paper. doi: [10.4271/2013-01-2538](https://doi.org/10.4271/2013-01-2538)
- [7] Genzale CL, Reitz RD, Wickman DD. A computational investigation into the effects of spray targeting, bowl geometry and swirl ratio for low-temperature combustion in a heavy-duty diesel engine. *SAE Transactions*. 2007 Jan 1:88-102. doi: [10.4271/2007-01-0119](https://doi.org/10.4271/2007-01-0119)
- [8] Şener R, Gül MZ. Optimization of the combustion chamber geometry and injection parameters on a light-duty diesel engine for emission minimization using multi-objective genetic algorithm. *Fuel*. 2021 Nov 15;304:121379.
- [9] Zhou H, Li X, Zhao W, Liu F. Effects of separated swirl combustion chamber geometries on the combustion and emission characteristics of DI diesel engines. *Fuel*. 2019 Oct 1;253:488-500.
- [10] Mobasheri R, Peng Z. Analysis of the effect of re-entrant combustion chamber geometry on combustion process and emission formation in a HSDI diesel engine. InSAE 2012 World Congress & Exhibition 2012 Apr 16. SAE Technical Paper.
- [11] Ge HW, Shi Y, Reitz RD, Wickman DD, Willems W. Optimization of a HSDI diesel engine for passenger cars using a multi-objective genetic algorithm and multi-dimensional modeling. *SAE International Journal of Engines*. 2009 Jan 1;2(1):691-713.
- [12] Li X, Chen Y, Su L, Liu F. Effects of lateral swirl combustion chamber geometries on the combustion and emission characteristics of DI diesel engines and a matching method for the combustion chamber geometry. *Fuel*. 2018 Jul 15;224:644-60.
- [13] De Risi A, Donato T, Laforgia D. Optimization of the combustion chamber of direct injection diesel engines. InSAE 2003 World Congress & Exhibition 2003 Mar 3. SAE technical paper.
- [14] Yoo D, Song J, Kim Y, Jung W, Kim D. Fuel consumption improvement of 2.4 L ULPC diesel engine by optimizing the combustion system; Nozzle, swirl ratio and piston bowl geometry. InSAE 2015 World Congress & Exhibition 2015 Apr 14. SAE Technical Paper.
- [15] Hu N, Zhou P, Yang J. Comparison and combination of NLPQL and MOGA algorithms for a marine medium-speed diesel engine optimisation. *Energy conversion and management*. 2017 Feb 1;133:138-52.