



# Numerical Analysis of the Effect of Piston Crown Surface Area to Volume Ratio on Engine Emissions and Thermal Behavior of Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engines With Methane-Diesel Blended Fuel

Sadra Rostami Arnesa<sup>1\*</sup>, Nima Ahmadi<sup>2</sup>, Samad Jafarmadar<sup>3</sup>

<sup>1, 2</sup> Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 2025.05.05

**Revised:** 2025.07.14

**Accepted:** 2025.12.30

### Keyword:

HCCI compression ignition engine

Homogeneous fuel

Nox

Combustion process simulation

Direct injection

### \*Corresponding Author:

Sadra Rostami arnesa

**Email:** [sa-rostami@tvu.ac.ir](mailto:sa-rostami@tvu.ac.ir)

## ABSTRACT

This study numerically investigates the effect of varying the surface area to volume ratio of the piston crown on the performance and emissions of a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) engine using a methane-diesel fuel blend. Four different piston crown geometries (Models 1–4) with a compression ratio of 18:1 were analyzed and validated against experimental data from a TD43 laboratory engine. The results show that reducing the surface area to volume ratio significantly increases in-cylinder temperature, with Model 1 (highest ratio) reaching approximately 1800 K and Model 4 (lowest ratio) reaching up to 2200 K, an increase of 400 K. This temperature rise enhances heat release rates, which can improve thermal efficiency but may also lead to knocking if not properly managed. NO<sub>x</sub> emissions increase with decreasing surface area to volume ratio, with Model 1 producing nearly zero NO<sub>x</sub> emissions, indicating a major advantage. Soot production remains largely unaffected except in Model 4, where it increases by up to 50% due to incomplete combustion. CO emissions decrease with lower ratios, while CO<sub>2</sub> emissions initially increase at higher ratios before dropping beyond a certain threshold. Significant oxygen consumption was observed, suggesting that exhaust gas recirculation (EGR) could help dilute the homogeneous mixture and control combustion phasing.



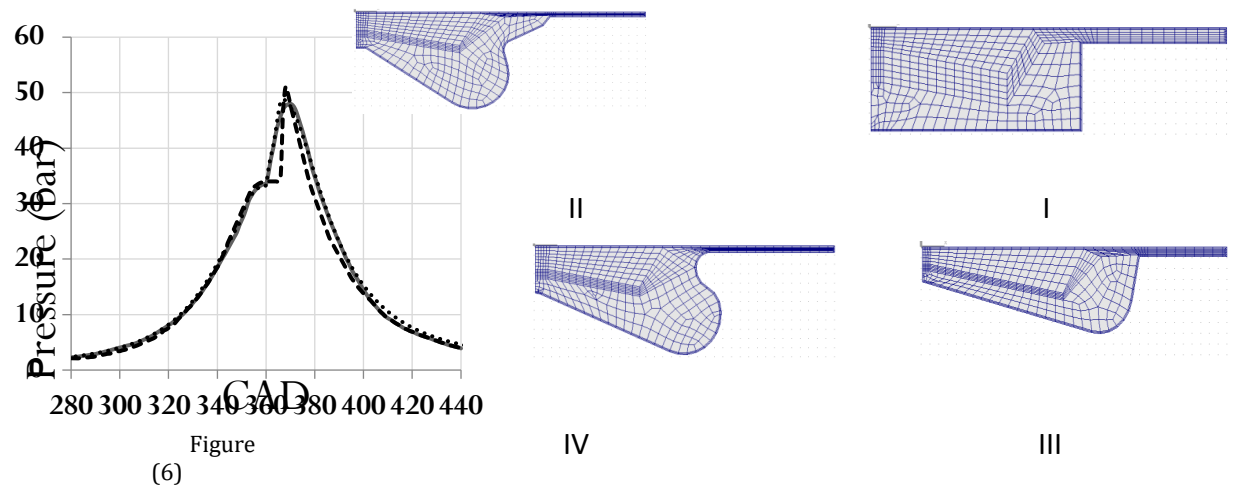
## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

A heat engine is a machine designed to convert energy into useful mechanical motion. This research will examine internal combustion engines that produce motive power. In an internal combustion engine, fuel (usually a fossil fuel) is premixed or injected into a combustion chamber with an oxidizer (usually air) by an electric spark or increased pressure, and in the process produces mechanical power. Homogeneous compression ignition (HCCI1) is a promising alternative to combustion in gasoline and diesel engines that has received serious attention from automakers [1]. The fact that fossil fuels provide a large part of the energy demand. The use of hydrogen, which is a clean energy source, This study concluded that the energy ratio of hydrogen should be between 5 and 20% and the combustion chamber should be designed taking into account the combustion characteristics. The main objective of this study is to highlight the performance of using hydrogen in dual fuel mode in compression ignition engines and to be a resource for researchers who will work on this topic [13,14,..17]. The availability (exergy) of a system in the thermodynamic state, can produce maximum useful mechanical work as a thermo-mechanical system and establish chemical equilibrium with its environment through reversible processes [18,19].

### Methodology

The simulation of the sample engine is examined by AVL Fire software. Of course, considering that the dimensions and geometry of the combustion chamber are of great importance in the simulation, the shape of the piston crown of the sample engine is simulated and studies are carried out. therefore, the modeling of IV, III, II, I engines is carried out according to these studies. To prove the correct operation of simulated engines, the behavior of the pressure-degree-of-crank curve of the simulated model must match the behavior of the experimental pressure-degree-of-crank curve of the prototype engine. If such a match exists, it can be said that the simulated engine behaves like the prototype engine and all the results obtained from it also occur in the prototype engine.



## Results and Discussion

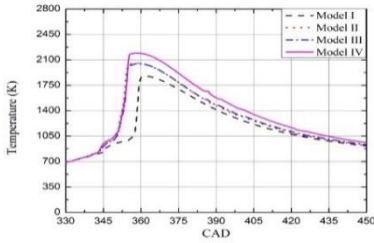


Figure (7)

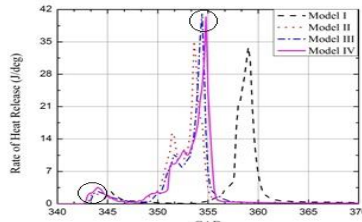


Figure (8)

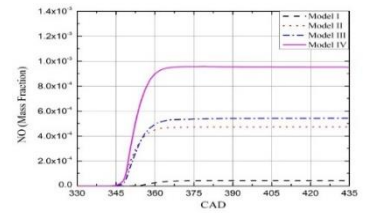


Figure (9)

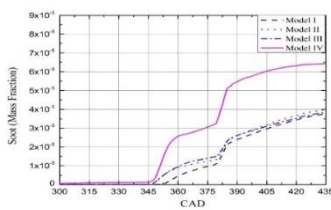


Figure (10)

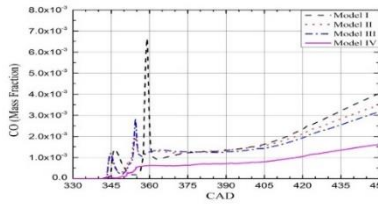


Figure (11)

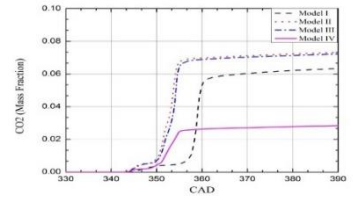


Figure (12)

Figure (7) shows that with a decrease in the surface area to volume ratio of the piston crown, the temperature inside the cylinder increases significantly. Research shows that in model 1, which has the highest surface area to volume ratio, the cylinder temperature is about 2200 K, while in model 4, the temperature inside the cylinder is about 1800 K. Therefore, for a 7-unit increase in surface area to volume ratio, the temperature inside the cylinder increases by 400 K, which is a significant amount. Such a temperature difference can cause a sharp increase in the production of hazardous pollutants. Point 1 of Figure (8) shows that in Model No. 4, heat release starts earlier than in other models. This phenomenon can cause heating of the homogeneous mixture before the main combustion and thus produce a desirable combustion. According to this figure, the highest amount of heat release occurs in Model 4, so by reducing the surface area to volume ratio, the heat release rate increases. The increase in the heat release rate resulting from the reduction in the surface area to volume ratio can have a positive effect on the thermal efficiency of the engine.

Figure (9) shows the changes in NOX emission in each of the simulated engines. According to part a of this figure, it can be said that reducing the surface area to volume ratio of the piston crown has a direct effect on increasing NOX emission in the engine with methane as the primary fuel. Also, according to this figure, NOX emission in model 1 is almost zero, which is a major advantage for this engine. The small difference in NOX emission in model 2 and model 3 is due to their small difference in surface area volume ratio.

## Conclusions

Changes in the surface-to-volume ratio of the piston crown in the range of 55 to 60 have no noticeable effect on the pressure inside the cylinder, but when this range is crossed, the pressure inside the cylinder drops sharply. By reducing the surface-to-volume ratio of the piston crown, the temperature inside the engine cylinder increases significantly. Such a temperature difference can cause a sharp increase in the production of hazardous pollutants. On the other hand, by using this increase in temperature, by preheating the homogeneous inlet mixture or by equipping the

engine with an EGR system, the engine output power can be increased. The increase in the heat release rate, which is caused by the decrease in the surface-to-volume ratio, can have a positive effect on the thermal efficiency of the engine. Reducing the surface-to-volume ratio of the piston crown has a direct effect on increasing the production of NOX pollutants. Reducing the surface-to-volume ratio does not have a significant effect on the amount of soot emitted from the cylinder, but excessively reducing the surface-to-volume ratio of the piston crown causes a sharp increase in the amount of soot produced. This phenomenon can be due to incomplete combustion inside the cylinder. This function is independent of the type of fuel. Therefore, the effect of changes in the surface-to-volume ratio of the piston crown on soot production in these types of engines is insignificant, and its amount is also very small. The low amount of soot emitted from the engine indicates complete combustion inside the cylinder. Reducing the surface-to-volume ratio reduces the production of CO pollutants in the engine with fuel. At high surface-to-volume ratios in the engine, the amount of CO<sub>2</sub> produced is significantly high, but at the same time, after reducing the surface-to-volume ratio from a certain value, its production rate decreases sharply. The amount of O<sub>2</sub> remaining from the combustion process is significant. Therefore, using the EGR system can also dilute the homogeneous inlet mixture.



## تحلیل عددی تأثیر نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر آلاینده‌گی و رفتار حرارتی موتورموتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن با سوخت ترکیبی متان-دیزل

صدرا رستمی ارنساء<sup>۱\*</sup>، نیما احمدی شیخ سرمست<sup>۲</sup>، صمد جعفرمدار<sup>۳</sup>

۱ و ۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهابت، تهران، ایران.

۳- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

هدف این مطالعه، تجزیه و تحلیل تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور (موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن) با مخلوط سوخت متان و دیزل تحت شرایط مختلف و نمونه‌های ۱، ۲، ۳، ۴ با نسبت تراکم ۱۸:۱ و اعتبار بخشی قابل قبول با رفتار موتور آزمایشگاهی TD43 مورد بررسی قرار گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با کاهش نسبت سطح به حجم تاج پیستون، میزان دمای داخل سیلندر افزایش چشمگیری می‌یابد. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد در مدل ۱ که بیشترین مقدار نسبت سطح به حجم را دارد دمای سیلندر در حدود ۱۸۰۰ درجه کلوین بوده در حالی که در مدل ۴ که کمترین مقدار نسبت سطح به حجم را دارد، دمای داخل سیلندر در حدود ۲۲۰۰ درجه کلوین می‌باشد. بنابراین به ازای افزایش ۷ واحدی نسبت سطح به حجم، دمای داخل سیلندر به اندازه ۴۰۰ درجه کلوین افزایش می‌یابد که مقدار قابل توجهی می‌باشد. چنین اختلاف دمایی می‌تواند موجب افزایش شدید تولید آلاینده‌های خطرناک گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید دوده در مدل ۴ که پایین‌ترین نسبت سطح به حجم را دارد، مقدار دوده تولیدی تا ۵۰ درصد به نسبت مدل‌های دیگر افزایش می‌یابد. تغییرات تولید آلاینده ناکس در هریک از موتورهای شبیه‌سازی شده را میتوان گفت که با کاهش نسبت سطح به حجم تاج پیستون تأثیر مستقیمی در افزایش تولید آلاینده ناکس در موتور را دارد. همچنین میتوان بیان کرد که تولید آلاینده ناکس در مدل ۱ تقریباً برابر صفر می‌باشد که یک مزیت عمده برای این موتور به شمار می‌آید.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۳۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

### کلید واژگان:

موتور اشتعال تراکمی HCCI  
سوخت همگن  
NOx  
شبیه سازی فرآیند احتراق  
پاشش مستقیم

### \*نویسنده مسئول:

صدرا رستمی ارنساء

پست الکترونیکی:

[sa-rostami@tvu.ac.ir](mailto:sa-rostami@tvu.ac.ir)

## مقدمه

پیشرفت‌های موتور حرارتی، یک ماشین طراحی شده برای تبدیل انرژی به حرکت مکانیکی مفید می‌باشد. در این تحقیقات موتورهای احتراق داخلی تولید کننده نیرو محرکه، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در موتور احتراق داخلی، سوخت (به طور معمول یک سوخت فسیلی) با اکسید کننده (معمولاً هوا) در محفظه احتراق بصورت پیش آمیخته و با تزریق، بوسیله جرقه الکتریکی و یا افزایش فشار منفجر گشته و طی فرآیندی نیروی مکانیکی را تولید می‌نماید. روش احتراق تراکمی سوخت همگن HCCI (موتورهای اشتعال تراکمی سوخت همگن) جایگزینی امیدوار کننده برای احتراق در موتورهای اتو و دیزل می‌باشد که مورد توجه جدی خودروسازان قرار گرفته است [۱]. این موتور از روش احتراق پیش آمیخته مخلوط هوا/ سوخت رقیق که با نسبت تراکم بالا فشرده شده است استفاده می‌نماید، که این روش موجب احتراق خودکار بطور همزمان در کل محفظه احتراق می‌شود. به لحاظ نظری فرآیند HCCI در مقایسه با فرآیند احتراق موتور دیزل معمولی دارای دمای بالایی برای مناطق رقیق و دمای پایینی برای مناطق غنی می‌باشد. در حال حاضر فرآیند HCCI با توجه به توانایی های بالقوه خود در کاهش اکسیدهای نیتروژن (NOx)، ذرات معلق و گازهای گلخانه‌ای با حفظ راندمان حرارتی بالا، تحت تحقیقات گسترده ای قرار گرفته است [۲]. از آنجا که احتراق HCCI از طریق احتراق خودکار بدست می‌آید، سینتیک شیمیایی مخلوط هوا/سوخت نقش کلیدی در تعیین ویژگی‌های مختلف احتراق (مثل زمان شروع احتراق، مدت زمان احتراق) دارد. اساس کار موتور HCCI ایجاد شرایط مناسب برای احتراق بمنظور دستیابی به بازده بالا در تبدیل سوخت به انرژی می‌باشد. تجزیه و تحلیل تأثیر هندسه کاسه پیستون بر عملکرد احتراق و انتشار گازهای آلاینده موتور احتراق تراکمی همگن (HCCI) با سوخت گاز سنتز که تحت شرایط مخلوط رقیق هوا-سوخت برای استفاده در نیروگاه‌ها کار می‌کند. کاسه پیستون های مختلف با کاهش عمق کاسه پیستون و نسبت مساحت لهیدگی کاسه پیستون پایه با نسبت تراکم یکسان ۱۷٫۱ استفاده شد. علاوه بر این، از چرخش مجدد گاز خروجی (EGR) برای کنترل حداکثر نرخ افزایش فشار (MPRR) موتورهای HCCI با سوخت گاز سنتز استفاده می‌شود در این مطالعه نشان می‌دهد که TIVC مخلوط هوا و سوخت و نرخ اتلاف حرارت از طریق دیواره، عوامل اصلی تأثیرگذار بر فزندی احتراق با تغییر هندسه کاسه پیستون هستند [3].

## پیشینه پژوهش

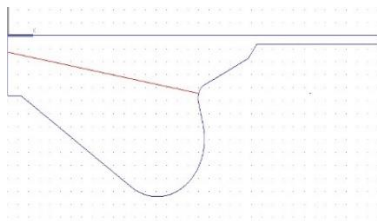
تعامل در یک بررسی استفاده از روغن کاپوک با سوخت دیزل متشکل از (۲۰٪ روغن کاپوک - ۸۰٪ دیزل) با هدف انتقال حرارت بهتر در ناحیه تاج پیستون با کامپوزیت سرامیکی مولایت-لاتانیم (ML) پوشش داده می‌شوند تا انتقال حرارت در طول فرآیند احتراق کاهش یابد، نتایج نشان داد که پیستون پوشش داده شده با ML2 عملکرد موتورهای آزمایشی را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است. به جز انتشار NOx، سایر مقادیر انتشار آلاینده‌ها کاهش یافت [۴]. یک بررسی محاسباتی جامع در مورد تأثیر تغییرات نسبت هم‌رزی ( $\phi$ ) بر عملکرد و انتشار گازهای گلخانه‌ای یک موتور DF-HCCI با استفاده از ترکیبی از ۹۰٪ n-دودکان (پیش ترکیب) و ۱۰٪ اتانول (تزریق اسپری) ارائه می‌دهد. انتشار NOx با افزایش  $\phi$  کاهش می‌یابد، زیرا دماهای بالاتر به تشکیل NOx کمک می‌کنند. انتشار دوده با افزایش  $\phi$  کاهش می‌یابد که با دمای احتراق پایین‌تر مرتبط است [۵]. حداکثر استفاده از سوخت هیدروژن را در یک موتور دو سیلندر با ظرفیت متوسط تحت شرایط بار کم و متوسط بررسی کرد. هیدروژن به عنوان سوخت اصلی عمل کرد و سوخت دیزل صرفاً برای احتراق استفاده شد. کاهش قابل توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای مشاهده شد عملکرد در بار متوسط به دلیل ضربه به ۴۰٪ هیدروژن محدود شد که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به جز NOx شد. در بار کم با ۹۰٪ هیدروژن، هر دو حالت NOx صفر و دود حداقلی را نشان دادند [۶]. این مطالعه به بررسی تأثیر نسبت تراکم (CR) بر ویژگی‌های احتراق و انتشار NOx یک موتور احتراق تراکمی همگن (HCCI) با سوخت

NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌پردازد این مطالعه نشان می‌دهد که افزایش EGR از ۰٪ تا ۴۰٪ منجر به کاهش فشار داخل سیلندر و HRR، به ویژه در کسر حجمی ۲۰٪ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> می‌شود. در غلظت‌های بالاتر H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (۳۰٪ و ۴۰٪)، اثرات رقیق‌سازی EGR کمتر مشهود بود. انتشار NO<sub>x</sub> با افزایش EGR به طور قابل توجهی کاهش یافت [۷]. کیفیت خوداشتعال مورد نیاز بنزین با ترکیب ۲-اتیل هگزیل نیترات (EHN) با بنزین برای اطمینان از پایداری احتراق در بارهای موتور حاصل شد انواع کا سه پیستون مختلف بر سی شد که شامل طرح‌های کا سه پیستون محبوب در موتورهای سنتی احتراق تراکمی (توروثید) و احتراق جرقه‌ای (تخت) نیز می‌شد. نتایج نشان داد که کا سه پیستون تخت، بهبود ۱۷ درصدی در بازده حرارتی ناخالص نشان داده شده و کاهش ۱۶ درصدی و ۴۰ درصدی در انتشار گازهای گلخانه‌ای UHC و CO را نشان می‌دهد [۸]. هند سه پیستون و نسبت تراکم (CR) بر اختلاط سوخت/هوا و احتراق در رژیم‌های مختلف موتورهای LTC، احتراق تراکمی با بار همگن (HCCI)، احتراق پیش‌آمیخته جزئی (PPC) و رژیم گذار از HCCI به PPC بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با زمان احتراق یکسان، CR بالاتر منجر به NO<sub>x</sub> کمتر، اما انتشار بیشتر UHC و CO می‌شود [۹]. احتراق خودبه‌خود را می‌توان توسط اکسیداسیون سوخت که صرفاً توسط واکنش‌های شیمیایی زنجیره‌ای صورت می‌گیرد، شرح داد [۱۰]. به گفته برخی محققان [۱۱]، روند احتراق خودبه‌خود در یک موتور HCCI یک پدیده چند مرحله‌ای تصادفی می‌باشد که در سراسر محفظه احتراق شروع می‌شود و احتمالاً در نقاطی که تعامل بین مخلوط هوا/سوخت با گازهای داغ حداکثر است تمرکز بیشتری دارد [۱۲]. این واقعیت که سوخت‌های فسیلی که بخش زیادی از نیاز انرژی را تأمین می‌کنند، استفاده از هیدروژن، که یک منبع انرژی پاک است [۱۳]، این مطالعه، نتیجه گرفته شد که نسبت انرژی هیدروژن باید بین ۵ تا ۲۰ درصد باشد [۱۴؛ ۱۵] و محفظه احتراق باید با در نظر گرفتن ویژگی‌های احتراق طراحی شود. هدف اصلی این مطالعه برجسته کردن عملکرد استفاده از هیدروژن در حالت سوخت دوگانه در موتورهای احتراق تراکمی و منبعی برای تحقیقاتی است که روی این موضوع کار خواهند کرد [۱۶؛ ۱۷]. دسترس‌پذیری (اگرزژی) یک سیستم در حالت ترمودینامیکی، می‌تواند حداکثر کار مکانیکی مفید را بعنوان سیستم حرارتی- مکانیکی تولید کرده و تعادل شیمیایی با محیط زیست خود را از طریق فرآیندهای برگشت‌پذیر ایجاد نماید [۱۸]. در ادامه کارهای Onishi، فردی به نام Noguchi، بهمراه همکارانش [۱۸] مطالعات آزمایشگاهی را بر روی احتراق HCCI در کمپانی تویوتا ادامه دادند. آنها با یک طیف نگاری مقابل پیستون موتور دریافتند که این نوع احتراق برای موتورهای دوزمانه در حالت‌های خاصی بسیار مناسب است. با این طیف نگاری مشخص شد که اشتعال مخلوط هوا/سوخت از بی‌شمار نقطه شروع شده و هیچگونه جبهه شعله قابل تشخیصی در این نوع احتراق وجود ندارد [۱۹]. با توجه به راندمان پایین موتورهای احتراق داخلی، قسمت بسیار زیادی از انرژی شیمیایی سوخت مصرفی آنها به صورت گرما از طریق سیستم خنک‌کاری به محیط دفع می‌شود، از این‌رو در این مقاله ابتدا یک سیستم خنک‌کاری کلاسیک مورد آزمون قرار گرفت و عملکرد آن ثبت شد آلاینده‌های HC و NO در بیشتر آزمون‌ها به ترتیب حداقل ۱۵،۳۲ درصد، حداکثر ۷۰ درصد و حداقل ۹،۲۸ درصد، حداکثر ۴۶،۵۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد [۲۰]. در این تحقیق، با هدف بهبود متغیرهای سیستم سوخت رسانی و جرقه‌زنی، تأثیر میزان کارکرد فیلتر سوخت بر میزان دمای بنزین خروجی از پمپ سوخت نتایج این تحقیق نشان داد که فیلترهایی با کارکرد بیش از ۱۵۰۰۰ کیلومتر موجب کاهش کیفیت احتراق و راندمان موتور می‌شوند [۲۱]. یکی از راه‌های افزایش راندمان احتراق، ایجاد جریان گردابه در موتور است. در این مقاله، روشی جدید و کم‌هزینه به منظور تولید جریان گردابه در سیلندر ارائه شده است. ابتدا جریان گردابه داخل موتور EF7 استاندارد، درون

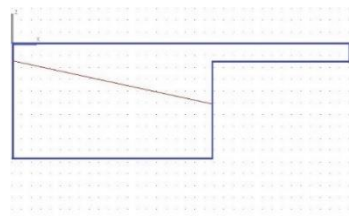
آزمایشگاه در شرایط پایا اندازه‌گیری و تغییرات بر دو ناحیه سرسیلندر اعمال شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش جزئی ضریب جریان در گشودگی‌های کم سوپاپ، می‌توان به جریان گردابه قابل‌قبولی در گشودگی‌های بالای سوپاپ با هزینه کم و تغییرات کم در سرسیلندر نسبت به طرح‌های دیگر دست یافت [۲۲]. همانطور که در پیشینه تحقیق اشاره شد، اکثر مطالعات موجود در حوزه موتورهای HCCI تمرکز خود را بر روی ویژگی‌های سوخت، دمای احتراق، استراتژی‌های کنترل فاز احتراق، و همچنین استفاده از سوخت‌های جایگزین معطوف داشته‌اند. با این حال، تعداد محدودی از پژوهش‌ها به‌طور مستقیم به بررسی تأثیر پارامترهای هندسی مانند نسبت سطح به حجم تاج پیستون پرداخته‌اند. پارامتری که نقش تعیین‌کننده‌ای در نحوه گسترش احتراق، توزیع دما و در نهایت میزان آلاینده‌های تولید شده در موتورهای HCCI دارد. این در حالی است که طراحی مناسب هندسه محفظه احتراق می‌تواند به عنوان یکی از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد موتور و کاهش گستره آلاینده‌ها مطرح شود. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق توسعه یک مدل عددی جامع به منظور بررسی دقیق تأثیر نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر مشخصه‌های حرارتی، احتراقی و الگوی انتشار آلاینده‌های NOx و دوده در موتور HCCI با سوخت ترکیبی متان-دیزل است. این مطالعه ضمن پر کردن یک شکاف موجود در دانش پیشین، زمینه لازم برای طراحی‌های بهینه از نظر هندسه محفظه احتراق را فراهم می‌کند.

### شبیه‌سازی موتور و معادلات حاکم

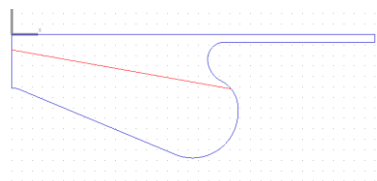
شبیه‌سازی موتور نمونه بوسیله نرم‌افزار AVL Fire مورد بررسی قرار می‌گیرد. البته با توجه به اینکه ابعاد و هندسه محفظه احتراق اهمیت بالایی در شبیه‌سازی دارد لذا شکل تاج پیستون موتور نمونه شبیه‌سازی گردیده و مطالعات انجام می‌گردد. برای شروع کار ابتدا باید مشخصات فیزیکی موتور و شکل دوبعدی تاج پیستون موتور نمونه، و نیز شکل دوبعدی محفظه احتراق در حالت نقطه مرگ بالا (TDC) مشخص گردد. با توجه به اینکه در این کار از شرایط اولیه مطالعات تجربی صورت گرفته بر روی موتور TD43 استفاده شده است [۲۳] لذا مدل سازی موتورهای ۴،۲،۱ با توجه به این مطالعات صورت می‌پذیرد.



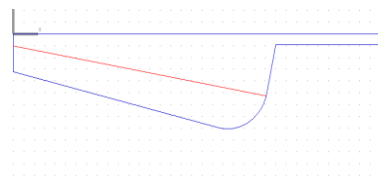
مدل ۲



مدل ۱



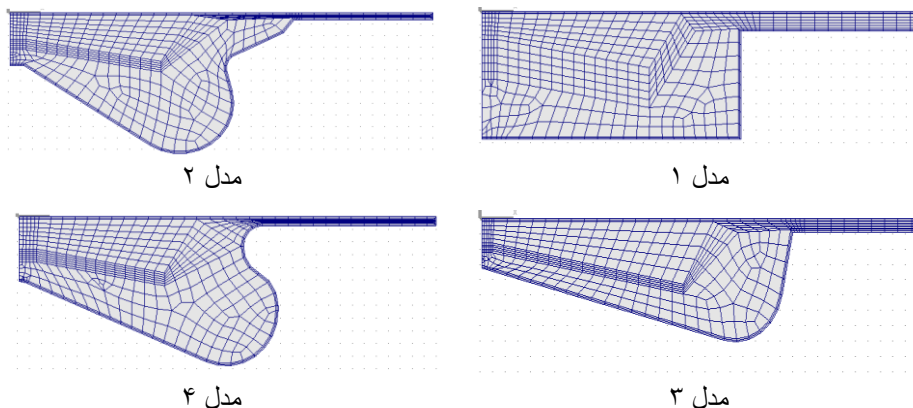
مدل ۴



مدل ۳

### شکل ۱. شبیه‌سازی دوبعدی محفظه احتراق در مدل موتورهای ۴،۳،۲،۱.

با انتخاب طرح دوبعدی تاج پیستون موتور مورد نظر از قسمت Sketcher و تطبیق آن با مدل واقعی، طرح شبیه‌سازی شده آماده‌شد. با اعمال متوسط اندازه سلول‌های مش‌بندی مورد نظر عدم وجود مش‌های نامتقارن بصورت اتوماتیک چک میگردد تا در صورت وجود هرگونه مشکل با اعمال تغییرات مناسب مشکلات مش‌بندی رفع گردد. شکل زیر مش‌بندی دوبعدی سیلندر در حالت TDC را نمایش می‌دهد.



### شکل ۲. مش‌بندی مدل دوبعدی محفظه احتراق در نقطه TDC موتورهای ۴،۳،۲،۱.

#### شرایط مرزی

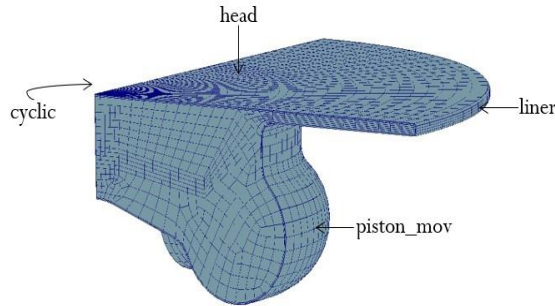
**head:** این مرز به عنوان دیواره در نظر گرفته می‌شود. لذا این شرط مرزی از نظر وضعیت حرکت یک مرز با مؤلفه سرعت صفر بوده و از نظر وضعیت حرارتی دارای دمای ثابت  $480\text{ K}$  می‌باشد. به عبارت دیگر شرط مرزی یک مرز دیوار ساکن با دمای ثابت است.

**Liner:** این مرز نیز به عنوان دیواره در نظر گرفته می‌شود. بنابراین این مرز نیز از نظر وضعیت حرکت یک مرز با مؤلفه سرعت صفر بوده و از نظر وضعیت حرارتی، شرط مرزی با دمای ثابت  $380\text{ K}$  می‌باشد. بنابراین **liner** نیز یک مرز دیوار ساکن با دمای ثابت می‌باشد.

**piston\_mov:** این شرط مرزی نیز از نوع دیواره می‌باشد با این تفاوت که این مرز از نظر وضعیت حرکتی دارای حالت **mesh movement** می‌باشد و از نظر حرارتی با دمای ثابت  $580\text{ K}$  در نظر گرفته می‌شود. بنابراین **piston\_mov** یک مرز متحرک با دمای ثابت است.

**Cyclic:** یک شرط مرزی دارای ورودی/خروجی می‌باشد. لذا بمنظور ایجاد شرایط مناسب، این مرز با حالت پریودیک در نظر گرفته می‌شود.

شکل ۳ شرایط مرزی حاکم بر مدل را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۳. شرایط مرزی حاکم بر محفظه احتراق شبیه‌سازی شده

### معادلات حاکم

#### تجزیه و تحلیل قانون اول ترمودینامیک

نرخ تغییرات دمای مخلوط [۲۳]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-P \frac{dV}{dt} - \frac{dQ_w}{dt} - \sum_i \frac{dN_i}{dt} \bar{h}_i + R_u T \sum_i \frac{dN_i}{dt}}{\sum_i N_i c_{p,i} - N_{mix} R_u} \quad (1)$$

$R_u$  فشار گاز داخل محفظه احتراق،  $N_i$  و  $c_{p,i}$  بترتیب تعداد مول و گرمای ویژه مولی در فشار ثابت می‌باشند.  $R_u$  ثابت جهانی گاز بوده و  $V$  حجم سیلندر می‌باشد.  $Q'_w$  حرارت مبادله شده بین گاز و دیوارهای سیلندر در واحد زمان می‌باشد [۲۳]. معادله (۲) برای محاسبه حرارت مبادله شده ارائه می‌گردد:

$$Q'_w(t) = -h_c(t) A_s (T_g - T_w) \quad (2)$$

ضریب انتقال حرارت:

در معادله (۳)،  $L$  ارتفاع آنی سیلندر،  $T$  و  $P$  به ترتیب دمای گاز و فشار گاز می‌باشند،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای گاز بوده و  $\alpha_{scaling}$  عامل پو سته پو سته شدن موتورها با هندسه‌های مختلف می‌باشد. همه پارامترهای دخیل در معادله فوق بصورت تجربی محاسبه می‌گردد ولی برای محاسبه  $\omega$  از معادله (۴) استفاده می‌شود

$$h_c(t) = \alpha_{scaling} L(t)^{0.2} P(t)^{0.8} T(t)^{0.73} \omega(t)^{0.8} \quad (3)$$

سرعت زاویه‌ای گاز داخل سیلندر:

در معادله (۴)،  $Sp$  سرعت متوسط پیستون،  $Tr$ ،  $Pr$  و  $Vr$  به ترتیب عبارتند از: دما، فشار و حجم در لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی،  $Vd$  حجم جابجایی بوده و  $p$  و  $P_{mot}$  به ترتیب فشار آنی و فشار موتور در لحظه اشتعال می‌باشند.  $C1$  و  $C2$  نیز مقادیر ثابت هستند. در این معادلات مکانیزم شیمیایی جنبشی با ۱۵۵ گونه و ۶۸۹ واکنش بمنظور توصیف احتراق مخلوط ایزوبوتان در نظر گرفته می‌شود. مدل آشفته‌گی که در این شبیه‌سازی مورد استفاده قرار خواهد گرفت از نوع  $k - \epsilon$  می‌باشد.

$$\omega(t) = C_1 S_p + \frac{C_2 V_d T_r}{6 P_r V_r} (p - P_{mot}) \quad (4)$$

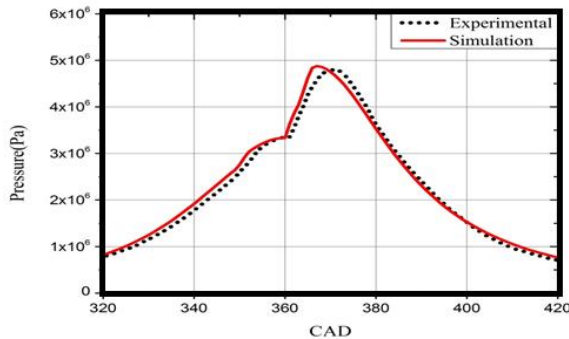
### نتایج موتور شبیه سازی شده

جدول ۲. نسبت سطح به حجم تاج پیستون موتورهای شبیه سازی شده.	
موتور	نسبت سطح به حجم
مدل ۱	۶۴,۴
مدل ۲	۵۹,۲
مدل ۳	۵۸,۹
مدل ۴	۵۷,۲

جدول ۱. مشخصات فیزیکی موتور شبیه سازی شده.	
Cylinder bore	۷۰mm
Stroke	۷۵ mm
Displacement	۹۴۰ cm3
Connecting rod	۱۸۰ mm
Compression ratio	۱۸:۱
Engine speed	rpm۲۰۰۰

### اعتبار بخشی

برای اثبات عملکرد صحیح موتورهای شبیه سازی شده، باید رفتار نمودار فشار- درجه میل لنگ مدل شبیه سازی شده با رفتار نمودار تجربی فشار- درجه میل لنگ موتور نمونه مطابقت داشته باشد. در صورت وجود چنین تطبیقی می توان گفت که موتور شبیه سازی شده رفتاری همانند موتور نمونه دارد و تمامی نتایج حاصل از آن در موتور نمونه نیز رخ می دهد.



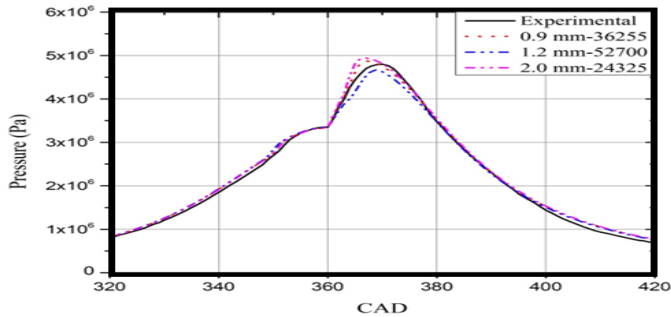
شکل ۴. اعتبار بخشی مدل، تحت سرعت ۶۰۰rpm و دمای مخلوط ورودی ۳۱۳K.

شکل (۴) نشان می دهد که موتور شبیه سازی شده با نرم افزار AVL Fire تطبیق قابل قبولی با رفتار موتور نمونه TD43 دارد. با این مدل می توان مطالعات سیالاتی و ترمودینامیکی مناسبی برای بررسی رفتار موتور HCCI انجام داد.

### استقلال از مش بندی

در این مرحله با تغییر اندازه متوسط سلول های مش بندی باید به یک عدد حداقل از تعداد مش ها رسید که بتواند تجزیه و تحلیل های مورد نیاز برای موتور نمونه را انجام دهد که در این صورت آن مدل، ایده آل ترین مدل از منظر

مش‌بندی برای تحقیقات مورد نظر خواهد بود. شکل (۵) مقایسه‌های بین مدل‌های شبیه‌سازی شده با تعداد مش‌های متفاوت را مورد مقایسه قرار داده است.

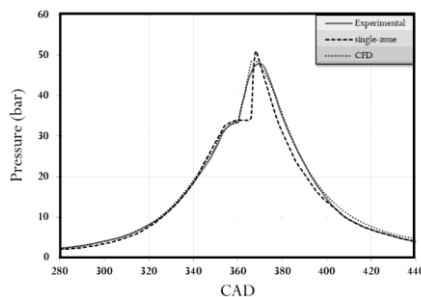


شکل ۵. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای استقلال از مش‌بندی.

با توجه به شکل (۵) و بررسی رفتار هریک از منحنی‌ها، معلوم می‌شود که منحنی مربوط به مش‌بندی با متوسط اندازه مش ۰,۹mm، نزدیکترین رفتار را به منحنی مربوط به نتایج تجربی موتور نمونه دارد لذا شبیه‌سازی با متوسط اندازه مش‌بندی ۰,۹mm برای ادامه مطالعات استفاده خواهد شد.

### مقایسه شبیه‌سازی تک‌منطقه‌ای و مدل CFD

با توجه به اینکه در این تحقیق از نتایج مطالعات Fatehi و Khalilarya [۲۴] استفاده شده است لذا مقایسه‌های بین مدل ارائه شده در مطالعات آنها و نیز مدل شبیه‌سازی شده در این تحقیق ارائه خواهد شد. همانطور که پیشتر گفته شد در مطالعات مذکور [۲۴] از شبیه‌سازی تک‌منطقه‌ای استفاده شده است ولی در این تحقیق یک مدل CFD مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. شکل (۶) این مقایسه را به نمایش می‌گذارد.

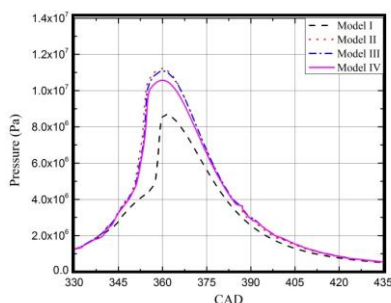


شکل ۶. مقایسه نتایج حاصل از مدل تک‌منطقه‌ای و مدل CFD.

شکل (۶) تغییرات فشار محفظه احتراق را در تابعی از زاویه میل‌لنگ در دو حالت تک‌منطقه‌ای و مدل CFD نشان می‌دهد. این مقایسه نشان از عملکرد مناسب هر دو مدل تک‌منطقه‌ای و مدل CFD می‌باشد. بنابراین با توجه به این عملکرد می‌توان همانند مدل تک‌منطقه‌ای از مدل CFD نیز برای مطالعه و بررسی فرآیند HCCI استفاده کرد.

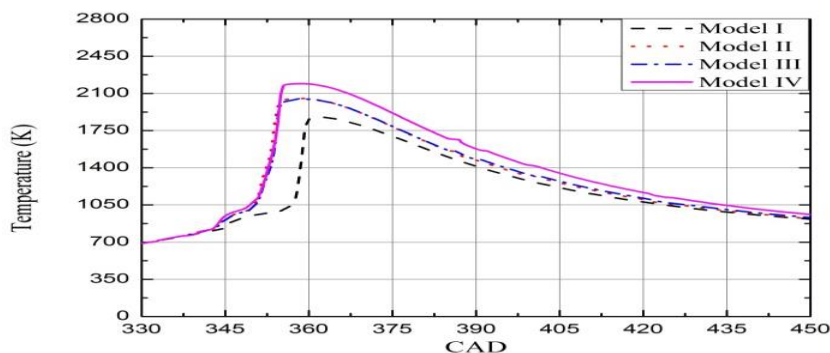
**نتایج:**

تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر فشار داخل سیلندر: با توجه به اینکه فرآیند HCCI بیشتر بعنوان جایگزینی برای موتور احتراق داخلی بکار رفته در وسایل نقلیه در دست بررسی است. شکل (۷) تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون موتورهای شبیه‌سازی شده ۱، ۲، ۳، ۴ بر فشار داخل سیلندر را نمایش می‌دهد [۲۵-۲۷].



شکل ۷. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر فشار داخل سیلندر.

شکل (۷) تغییرات فشار را بعنوان تابعی از زاویه میل‌لنگ برای موتورهایی با نسبت سطح به حجم متفاوت را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون در بازه ۵۵ الی ۶۰ تأثیر محسوسی در فشار داخل سیلندر ندارد ولی با عبور از این محدوده فشار داخل سیلندر بشدت افت میکند. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر متوسط دمای داخل سیلندر: بررسی متوسط دمای سیال داخل سیلندر در طراحی موتور و کنترل آلاینده‌های خروجی از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا در شکل (۸) به بررسی این پارامتر پرداخته شده است.



شکل ۸. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر متوسط دمای داخل سیلندر.

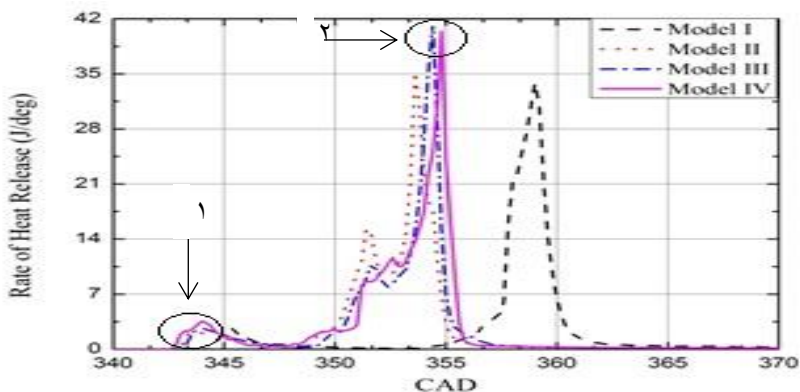
شکل (۸) نشان می‌دهد که با کاهش نسبت سطح به حجم تاج پیستون، میزان دمای داخل سیلندر افزایش چشمگیری می‌یابد. تحقیقات صورت گرفته نشان می‌دهد در مدل ۱ که بیشترین مقدار نسبت سطح به حجم را

دارد دمای سیلندر در حدود  $1800\text{K}$  بوده در حالی که در مدل ۴ دمای داخل سیلندر در حدود  $2200\text{K}$  می‌باشد. بنابراین به ازای افزایش ۷ واحدی نسبت سطح به حجم، دمای داخل سیلندر به اندازه  $400\text{K}$  افزایش می‌یابد که مقدار قابل توجهی می‌باشد. چنین اختلاف دمایی می‌تواند موجب افزایش شدید تولید آلاینده‌های خطرناک گردد. از طرف دیگر با استفاده از این افزایش دما، با پیشگرم نمودن مخلوط همگن ورودی و یا با تجهیز موتور به سیستم EGR میزان توان خروجی موتور را افزایش داد.

با توجه به ویژگی افزایش قابل توجه دما که در تحقیقات صورت گرفته مشاهده می‌گردد، نرخ آزادسازی حرارت توان در موتورهایی که کاربردی غیر از صنعت خودرو دارند برای مثال موتورهای تولید برق و ... بعنوان منبع گرما در سیستم‌های گرمایشی استفاده کرد.

تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر نرخ آزادسازی حرارت:

بررسی میزان حرارت آزاد شده در طراحی موتور و بررسی بازده حرارتی و نیز در راستای کسب درک مناسب از پدیده احتراق داخل سیلندر دارای اهمیت بالایی می‌باشد. لذا در شکل (۹) به بررسی نرخ آزادسازی حرارت از زمان بسته شدن سوپاپ ورودی تا زمان باز شدن سوپاپ خروجی در موتورهای شبیه‌سازی شده، پرداخته شده است.



شکل ۹. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر نرخ آزادسازی حرارت.

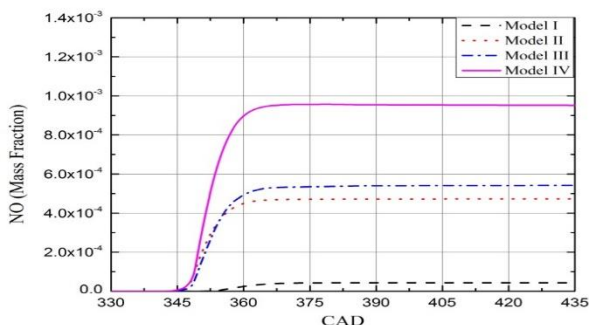
نقطه ۱ از شکل (۹) نشان می‌دهد در مدل شماره ۴ آزادسازی حرارت نسبت به سایر مدلها زودتر شروع می‌گردد این پدیده می‌تواند باعث گرمایش مخلوط همگن پیش از احتراق اصلی و در نتیجه موجب تولید یک احتراق مطلوب گردد. با توجه به این شکل، بیشترین میزان آزادسازی حرارت در مدل ۴ صورت می‌گردد بنابراین با کاهش نسبت سطح به حجم، نرخ آزادسازی حرارت افزایش می‌یابد. افزایش نرخ آزادسازی حرارت که ناشی از کاهش نسبت سطح به حجم می‌باشد می‌تواند تأثیر مثبتی در بازده حرارتی موتور داشته باشد.

بالا بودن نرخ آزاد سازی حرارت مدل ۳ در موقعیت ۲ در واقع ناشی از پایین بودن متوسط نرخ آزاد سازی حرارت این مدل در طول فرآیند می‌باشد به عبارت دیگر متوسط نرخ آزادسازی حرارت مدل ۳ در طول کل فرآیند کمتر از متوسط نرخ آزادسازی حرارت مدل ۴ و بالاتر از متوسط نرخ آزادسازی حرارت مدل ۲ می‌باشد.

نقطه ۲ در شکل (۹) نشان میدهد که بیشترین نرخ آزادسازی حرارت در 10oBTDC تا 5oBTDC متمرکز شده است. این پدیده میتواند باعث ایجاد کوبش در موتور گردد ولی میتوان با مدیریت مناسب سایر پارامترها از بروز کوبش جلوگیری کرد.

### تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید NOX

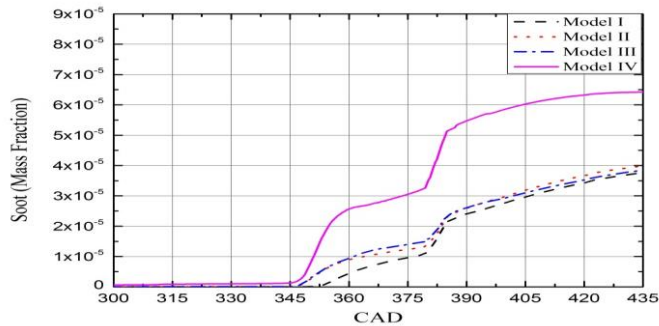
با توجه به اینکه آلاینده NOX یکی از خطرناکترین آلاینده‌های زیست محیطی می‌باشد لذا بررسی میزان انتشار این آلاینده توسط موتورهای احتراق داخلی دارای اهمیت بالایی می‌باشد. شکل (۱۰) میزان تولید NOX برای موتورهایی با نسبت سطح به حجم متفاوت تاج پیستون را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید NOX.

در شکل (۱۰) تغییرات تولید آلاینده NOX در هریک از موتورهای شبیه‌سازی شده نمایش داده شده است. با توجه به قسمت a از این شکل میتوان گفت کاهش نسبت سطح به حجم تاج پیستون تأثیر مستقیمی در افزایش تولید آلاینده NOX در موتور با سوخت اولیه متان دارد. همچنین با توجه به این شکل، تولید آلاینده NOX در مدل ۱ تقریباً برابر صفر می‌باشد که یک مزیت عمده برای این موتور به شمار می‌آید. اختلاف ناچیز تولید آلاینده NOX در مدل ۲ و مدل ۳ بدلیل اختلاف کم آنها در نسبت سطح به حجم می‌باشد. تأثیر هندسه محفظه احتراق بر تولید دوده:

هیدروکربن‌های نسوخته به صورت دوده از موتور خارج می‌گردند. علیرغم اینکه دوده جزء آلاینده‌های خطرناک نمی‌باشد ولی با توجه به اینکه ورود بیش از حد این آلاینده به جو در آینده میتواند خطرناک باشد و نیز برای مدیریت و جلوگیری از هدر رفت سوخت، همواره بررسی میزان دوده خروجی از موتور توصیه گردیده است. لذا شکل (۱۱) میزان دوده خروجی از موتورهای مورد بررسی را نمایش میدهد.

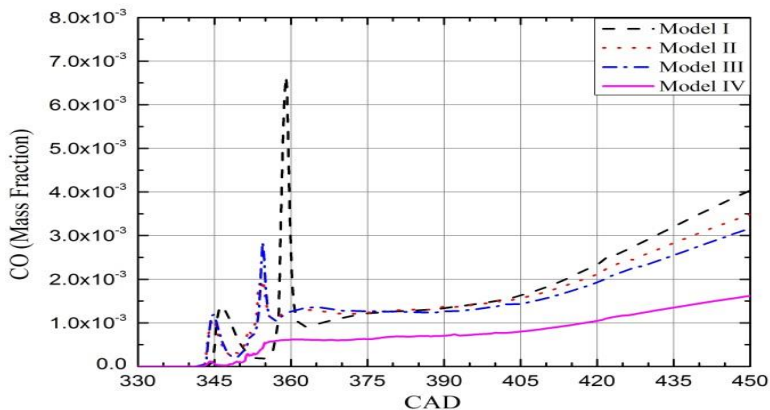


شکل ۱۱. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید دوده.

شکل (۱۱) تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید دوده را نشان میدهد. نشان میدهد در بیشتر حالات کاهش نسبت سطح به حجم تأثیری قابل توجهی بر میزان دوده خروجی از سیلندر ندارد ولی در مدلی که پایین‌ترین نسبت سطح به حجم را دارد، مقدار دوده تولیدی به شدت افزایش می‌یابد. این پدیده میتواند بدلیل احتراق ناقص داخل سیلندر باشد.

تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید CO:

آلاینده CO یکی از خطرناکترین گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. کمبود یک مولکول O در این گاز، موجب پیوند شیمیایی این گاز با اکسیژن موجود در هوا گشته که در نتیجه باعث اختلال در تنفس میگردد، لذا بر روی تولید این آلاینده مهم به نظر میرسد. شکل (۱۲) میزان خروج این آلاینده از موتورهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.

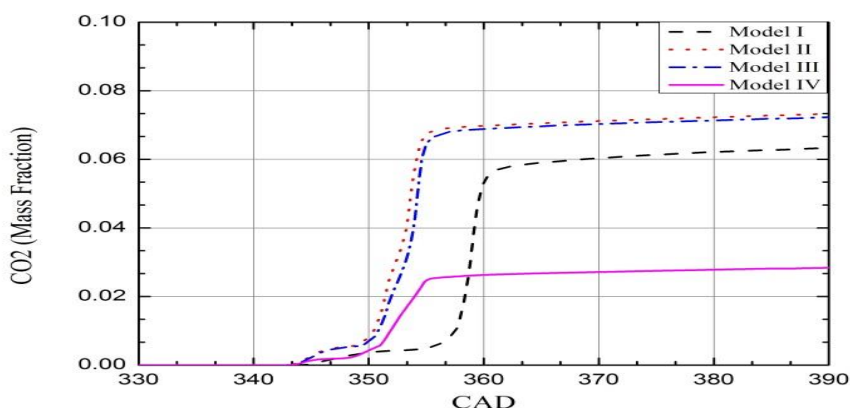


شکل ۱۲. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید آلاینده CO.

شکل (۱۲) تأثیر تغییرات به این شکل می‌توان گفت کاهش نسبت سطح به حجم باعث کاهش تولید آلاینده CO در این نوع موتورها می‌شود.

تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید CO<sub>2</sub>:

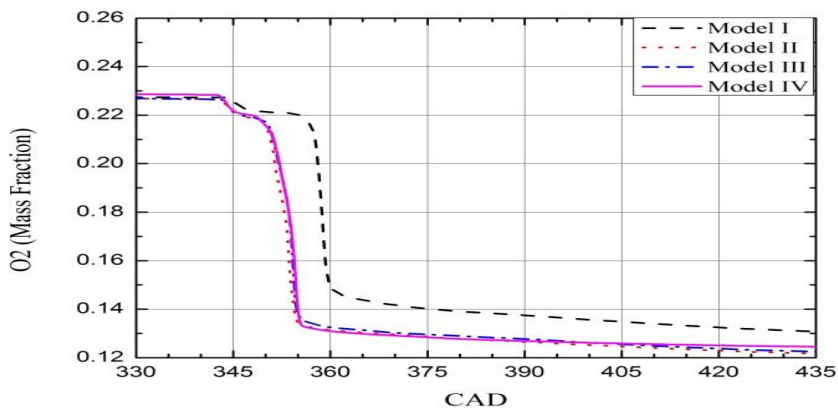
گاز CO<sub>2</sub> جزء گازهای بسیار سمی نمی‌باشد ولی یک گاز خطرناک محسوب می‌گردد. ورود بیش از حد این گاز به داخل جو موجب گرمی آب و هوا و تغییرات اقلیمی گردیده است. لذا هم اکنون کنترل ورود این آلاینده به داخل جو یکی از مهمترین مسئولیت‌های سازمان‌های جهانی می‌باشد. شکل میزان تولید CO<sub>2</sub> از موتورهای مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید CO<sub>2</sub>.

در نسبت سطح به حجم بالا میزان تولید CO<sub>2</sub> به مقدار قابل توجهی بالا می‌باشد ولی در عین حال پس از کاهش از یک مقدار از نسبت سطح به حجم میزان تولید آن بشدت کاهش می‌یابد. نشان می‌دهد با کاهش نسبت سطح به حجم میزان CO<sub>2</sub> خروجی افزایش می‌یابد و در یک محدوده خاص متمرکز می‌گردد. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر مصرف O<sub>2</sub> داخل سیلندر:

اطلاع از تغییرات میزان اکسیژن داخل سیلندر میتواند دید مناسبی برای طراحی موتور و استفاده از سایر سیستم‌های بهینه‌ساز ارائه نماید. شکل (۱۴) تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر مصرف O<sub>2</sub> را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴. تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر مصرف O<sub>2</sub>

شکل (۱۴) تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر مصرف O<sub>2</sub> داخل سیلندر را نشان میدهد. که میزان O<sub>2</sub> مقدار قابل توجهی می‌باشد. بنابراین استفاده از سیستم EGR میتواند موجب رقیق سازی مخلوط همگن ورودی نیز گردد.

### نتیجه‌گیری

مدل CFD که در این کار ارائه شده است دارای رفتار قابل قبولی بمنظور تحقیقات مورد نظر می‌باشد. با بررسی رفتار موتور شبیه‌سازی شده در شرایط مختلف کاری نتایج قابل تأملی بدست آمد که در این فصل این نتایج به اختصار ارائه می‌شود. مدل CFD ارائه شده برای نسبت‌های سطح به حجم متفاوتی مورد بررسی قرار گرفته است.

تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون در بازه ۵۵ الی ۶۰ تأثیر محسوسی در فشار داخل سیلندر ندارد ولی با عبور از این محدوده فشار داخل سیلندر بشدت افت میکند. با کاهش نسبت سطح به حجم تاج پیستون، میزان دمای داخل سیلندر موتور افزایش چشمگیری می‌یابد. چنین اختلاف دمایی می‌تواند موجب افزایش شدید تولید آلاینده‌های خطرناک گردد. از طرف دیگر با استفاده از این افزایش دما، با پیشگرم نمودن مخلوط همگن ورودی و یا با تجهیز موتور به سیستم EGR میزان توان خروجی موتور را افزایش داد. افزایش نرخ آزاد سازی حرارت که ناشی از کاهش نسبت سطح به حجم می‌باشد میتواند تأثیر مثبتی در بازده حرارتی موتور داشته باشد. کاهش نسبت سطح به حجم تاج پیستون تأثیر مستقیمی در افزایش تولید آلاینده NOX دارد. کاهش نسبت سطح به حجم تأثیری قابل توجهی بر میزان دوده خروجی از سیلندر ندارد ولی کاهش بیش از حد نسبت سطح به حجم تاج پیستون موجب افزایش شدید مقدار دوده تولیدی می‌گردد. این پدیده میتواند بدلیل احتراق ناقص داخل سیلندر باشد. این عملکرد مستقل از نوع سوخت می‌باشد. بنابراین تأثیر تغییرات نسبت سطح به حجم تاج پیستون بر تولید دوده در این نوع موتورها ناچیز می‌باشد که مقدار آن نیز بسیار ناچیز است. پایین بودن میزان دوده خروجی از موتور نشانگر احتراق کامل در داخل سیلندر می‌باشد. کاهش نسبت سطح به حجم باعث کاهش تولید آلاینده CO در موتور با سوخت می‌شود. در نسبت

سطح به حجم بالا در موتور میزان تولید CO2 به مقدار قابل توجهی بالا می‌باشد ولی در عین حال پس از کاهش از یک مقدار از نسبت سطح به حجم میزان تولید آن بشدت کاهش می‌یابد. میزان O2 باقیمانده از فرآیند احتراق مقدار قابل توجهی می‌باشد. بنابراین استفاده از سیستم EGR میتواند موجب رقیق‌سازی مخلوط همگن ورودی نیز گردد.

## Reference

- [1] Dubreuil, A., Foucher, F., Mouna1, C., Dayma, G., & Dagaut, P. (2007). *HCCI combustion: Effect of NO in EGR*. Proceedings of the Combustion Institute, 31(2), 2879–2886. [10.1016/j.proci.2006.07.168](https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.168)
- [2] Christensen, M., Hultqvist, A., & Johansson, B. (1999). Demonstrating the multi fuel capability of a homogeneous charge compression ignition engine with variable compression ratio. International Fuels & Lubricants Meeting & Exposition. <https://www.jstor.org/stable/44743532>
- [3] Ali, K., Kim, C., Lee, Y., Oh, S., & Kim, K. (2021). A numerical study to control the combustion performance of a syngas-fueled HCCI engine at medium and high loads using different piston bowl geometry and exhaust gas recirculation. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(8), 082301. <https://doi.org/10.1115/1.4048773>
- [4] Bakthavathsalam, S., Gounder, R. I., & Muniappan, K. (2019). The influence of ceramic-coated piston crown, exhaust gas recirculation, compression ratio and engine load on the performance and emission behavior of kapok oil–diesel blend operated diesel engine in comparison with thermal analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(24), 24772–24794. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05678-x>
- [5] Navanth, A., Sharma, T. K., & Rao, G. A. P. (2024). Computational investigation of equivalence ratio effects on performance and emissions in a dual-fuel homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine with 90% n-dodecane and 10% ethanol. *International Journal of Ambient Energy*, 45(1), 2319637. <https://doi.org/10.1080/01430750.2024.2319637>
- [6] Rameez, P., & Ibrahim, M. M. (2024). Maximizing hydrogen utilization in CI engines: an investigation of dual fuel and RCCI combustion approaches under low and mid-load conditions in a medium duty automotive engine. *Energy Conversion and Management*, 321, 119100. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119100>
- [7] Ali, K., Mohammedali, A. A., & Ali, M. I. H. (2025). Effect of exhaust gas recirculation and compression ratio on combustion characteristics and NOx emissions in an NH3/H2O2 fueled HCCI engine. *Energy Conversion and Management: X*, 26, 101050. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101050>
- [8] Kale, A. V., & Krishnasamy, A. (2023). Numerical investigation on selecting appropriate piston bowl geometry and compression ratio for gasoline-fuelled homogeneous charge compression ignited light-duty diesel engine. *Energy*, 282, 128861. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128861>
- [9] Xu, L., Bai, X.-S., Li, Y., Treacy, M., Li, C., Tunestål, P., Tunér, M., & Lu, X. (2020). Effect of piston bowl geometry and compression ratio on in-cylinder combustion and engine performance in a gasoline direct-injection compression ignition engine under different injection conditions. *Applied Energy*, 280, 115920. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115920>

- [10] Heywood, J. (2018). Internal combustion engine fundamentals. <https://thuvienso.tnut.edu.vn/handle/123456789/1198>
- [11] Taylor, E. (1950). *The ignition of fuels by rapid compression* (410).
- [12] Aleiferis, P. G., Charalambides, A. G., Hardalupas, Y., Taylor, A., & Urata, Y. (2005). Modelling and experiments of HCCI engine combustion with charge stratification and internal EGR. Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3725>
- [13] Ahmadi, N., Rahmani, A., Ghanbari, M., & Rezaadeh, G. (2026). High-sensitivity capacitive sensors with porous dielectrics: theory, simulation, and design framework. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 48(3), 235. <https://doi.org/10.1007/s40430-025-06253-x>
- [14] Gültekin, N., & Cinviz, M. (2023). Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel compression-ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(7), 2801–2820. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.155>
- [15] Abassi, A., Khalilarya, S., & Jafarmadar, S. (2010). The influence of the inlet charge temperature on the second law balance under the various operating engine speeds in DI Diesel engine. *Fuel*, 89(9), 2425–2432. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.04.034>
- [16] Hongqing, F., & Huijie, L. (2010). Second-law analyses applied to a spark ignition engine under surrogate fuels for gasoline. *Energy*, 35(9), 3551–3556. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.003>
- [17] Rakopoulos, C. D., & Giakoumis, E. G. (2006). Second-law analyses applied to internal combustion engines operation. *Progress in energy and combustion science*, 32(1), 2–47. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2005.10.001>
- [18] Huang, Y., Sung, C., & Eng, J. (2004). Dilution limits of n-butane/air mixtures under conditions relevant to HCCI combustion. *Combustion and flame*, 136(4), 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.10.011>
- [19] Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., & Kato, S. (1979). Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)—a new combustion process for internal combustion engines. *SAE Transactions*, 1851–1860. <https://www.jstor.org/stable/44658187>
- [20] Ghasemi Zavaragh, H. (2022). Optimization of the Cooling System of a Gasoline Internal Combustion Engine to Reduce Fuel Consumption and Exhaust Emissions. *Karafan Journal*, 19(1), 291–309. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.284665.1580> (in persian)
- [21] Ghanbari, M and Mozafari Vanani, L . (2021). Evaluation of fuel and spark system variables of a gasoline engine due to lack of timely replacement of fuel filter. *Karafan Journal*, 17(4), 135-147. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128400> (in persian)
- [22] Nasiri, S., Rahimi Asiabaraki, H., & Razaghi, E. (2021). The Effect of Multi-size Valve on Improvement of Swirl Flow for Gas-based EF7 Engine. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 119–134. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128399> (in persian)
- [23] Kirchen, P., Shahbakhti, M., & Koch, C. R. (2007). A skeletal kinetic mechanism for PRF combustion in HCCI engines. *Combustion science and technology*, 179(6), 1059–1083. <https://doi.org/10.1080/00102200600910874>.

- <https://doi.org/10.1080/00102200600910874>
- [24] Ghahfarokhi, F., Khalilarya, S., & Ebrahimi, R. (2013). Energy and exergy analyses of homogeneous charge compression ignition engine. *Thermal Science*, 17(1), 107–117. <https://doi.org/10.2298/TSCI120105217F>
- [25] Samanipour, H., Ahmadi, N., Mirzaee, I., & Abbasalizade, M. (2019). The study of cylindrical polymer fuel cell's performance and the investigation of gradual geometry changes' effect on its performance. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 63(3), 513–526. <https://doi.org/10.3311/PPCh.12793>
- [26] Ahmadi, N., & Rezazadeh, G. (2025). Polymer electrolyte membrane fuel cell performance Revolutionized: Artificial intelligence-validated asymmetric flow channels enhance mass transport via hybrid analytical-numerical frameworks. *Case Studies in Thermal Engineering*, 73, 106445. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106445>
- [27] Ahmadi, N., Taraghi, H., & Sadeghiazad, M. (2015). A numerical study of a three-dimensional proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with parallel and counter flow gas channels. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, 39(M2), 309–323. <https://doi.org/10.22099/ijstm.2015.3242>