



DOI: 10.22034/IJCHE.2021.292612.1123



DOR: 20.1001.1.17355400.1401.21.122.2.6

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

Effect of Triangular Injection Rate Shape on the Performance of a Reactivity Controlled Compression Ignition Engine

T. Yazdani Motlagh¹, L. N. Azadani^{2*}

1- M. Sc. Student of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology

2- Assistant Professor of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology

Email: Lazadani@aut.ac.ir

Abstract

Injection rate shape has an important effect on the performance of internal combustion engines. In this study, the effect of three triangular injection rate shapes, including left triangle, middle triangle, and right triangle, which were distinguished by the parameter a equal to 0, 0.5, and 1, respectively, on the performance of a Reactivity Controlled Compression Ignition (RCCI) engine were investigated and compared with the square injection rate shape. It was realized that by increasing, the gross indicated efficiency (GIE) and nitrogen oxides (NO_x) emissions increased, while unburned hydrocarbons (UHC) and carbon monoxide (CO) emissions decreased. The highest GIE and the lowest UHC and CO emissions were obtained by the right triangle, which were 9.9% higher and 27.45% and 25.51% lower than those obtained by the square injection rate shape, while the lowest NO_x emissions were obtained by the left triangle, which was 14.15% lower than that obtained by the square injection rate shape.

Received: 28 June 2021

Accepted: 2 September 2021

Page Number: 24-34

Keywords:

Triangular Injection Rate Shape,
Reactivity Controlled Compression Ignition Engine,
Natural Gas,
Computational Fluid Dynamics

Please Cite this Article Using:

Yazdani Motlagh, T., Azadani, L. N., "Effect of Triangular Injection Rate Shape on the Performance of a Reactivity Controlled Compression Ignition Engine", Iranian Chemical Engineering Journal, Vol. 21, No. 122, pp. 24-34, In Persian, (2022).



تأثیر شکل پاشش مثلثی بر روی عملکرد موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش پذیری کنترل شده

تارا یزدانی مطلق^۱، لایلا نصر آزادانی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

پیام نگار: Lazadani@aut.ac.ir

چکیده

شکل پاشش یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد موتورهای احتراق داخلی است. در این مقاله، تأثیر سه نوع شکل پاشش مثلثی یعنی مثلث چپ، وسط، و راست که با پارامتر a برابر با به ترتیب 0 ، $0/5$ و 1 متمایز می‌شوند، بر عملکرد موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش پذیری کنترل شده^۱ بررسی و با شکل پاشش مستطیلی مقایسه شده است. با افزایش a مقدار بازدهی ناخالص تعیین شده^۲ (GIE) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) افزایش می‌یابند، در حالی که مقدار هیدروکربن‌های نسوخته^۳ (UHC) و مونواکسید کربن^۴ (CO) کاهش می‌یابد. بالاترین میزان GIE و کم‌ترین میزان UHC و CO مربوط به شکل پاشش مثلثی راست است که به ترتیب $9/9$ درصد بیشتر و $27/45$ و $25/51$ درصد کمتر از شکل پاشش مستطیلی هستند، در حالی که کم‌ترین میزان NOx تولیدشده به وسیله شکل پاشش مثلثی چپ حاصل می‌شود که $14/15$ درصد کمتر از شکل پاشش مستطیلی است.

کلیدواژه‌ها:

شکل پاشش مثلثی،
موتور احتراق اشتعال تراکمی با
واکنش پذیری کنترل شده،
گاز طبیعی،
دینامیک سیالات محاسباتی

* تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

یزدانی مطلق، ت.، نصر آزادانی، ل.، "تأثیر شکل پاشش مثلثی بر روی عملکرد موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش پذیری کنترل شده"، نشریه مهندسی شیمی ایران، سال بیست و یکم، شماره ۱۲۲، صص. ۳۴-۲۴، (۱۴۰۱).

1. Reactivity Controlled Compression Ignition Engine
2. Gross Indicated Efficiency
3. Unburned Hydrocarbons
4. Carbon Monoxide

۱. مقدمه

موتورهای احتراق داخلی، نقش بسیار مهمی را در صنعت حمل و نقل ایفا می‌کنند؛ از این روی، محققان به دنبال راهی برای افزایش بازده و هم‌چنین کاهش میزان آلاینده‌های تولیدشده در موتورهای احتراق داخلی هستند. در این راستا، روشی نوین به نام احتراق دما پایین^۱ به عنوان روشی جدید مطرح شده است [۱]. از آنجایی که برای انجام واکنش‌های تولید اکسیدهای نیتروژن به انرژی فعال‌سازی بالایی نیاز است، دمای پایین در این روش منجر می‌شود که مقدار اکسیدهای نیتروژن (NOx) تولیدشده کاهش یابد. هم‌چنین، دمای پایین در این موتورها سبب می‌شود که زمان شروع احتراق به تأخیر بیافتد و در نتیجه آن زمان بیشتری برای اختلاط سوخت و هوا فراهم شود. در این راستا، ناحیه‌های دما بالا و غنی از سوخت در محفظه احتراق کاهش می‌یابد و مقدار دوده کمتری نیز تولید می‌شود [۲]. روش نوین احتراق دمای پایین به سه دسته احتراق تراکمی همگن^۲، احتراق تراکمی پیش مخلوط^۳ و احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده تقسیم می‌شود. در موتورهای احتراق تراکمی همگن، مخلوط پیش‌آمیخته از هوا و سوخت از راه دریچه ورودی وارد محفظه احتراق می‌شود، سپس بر اثر تراکم مخلوط پیش‌آمیخته و ازدیاد فشار و دما، احتراق آغاز می‌شود. یکی از مهم‌ترین مشکلات در این نوع موتورها نبودن کنترل بر روی زمان شروع احتراق است. هم‌چنین به دلیل اشتعال هم‌زمان مخلوط سوخت و هوا از چندین نقطه، گرمای آزادشده با سرعت بالا در محفظه احتراق، پخش و باعث نرخ افزایش فشار^۴ بالایی می‌شود. بنابراین، این نوع موتورها نمی‌توانند در شرایط عملیاتی با بار بالا به خوبی کار کنند [۳]. در نوع دوم موتورها یا موتورهای احتراق تراکمی پیش‌مخلوط، مخلوط پیش‌آمیخته هوا و بخشی از سوخت از راه دریچه ورودی وارد محفظه احتراق می‌شود. سپس بخشی دیگر از سوخت به صورت مستقیم به داخل محفظه احتراق پاشش می‌شود. با وجود این که در موتورهای احتراق تراکمی پیش‌مخلوط، کنترل بر روی زمان شروع احتراق وجود دارد و مقدار نرخ افزایش فشار کاهش می‌یابد؛ اما هم‌چنان این موتورها قادر نیستند که در شرایط عملیاتی با بار بالا کار کنند [۴].

در موتورهای احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده از دو نوع سوخت با واکنش‌پذیری متفاوت استفاده می‌شود. سوخت با واکنش‌پذیری کمتر به صورت پیش‌مخلوط به همراه هوا و گازهای برگشتی از دریچه خروجی^۵ وارد محفظه احتراق می‌شود، سپس سوخت با واکنش‌پذیری بالاتر به صورت مستقیم در نزدیک نقطه مرگ بالا^۶ به داخل محفظه احتراق، پاشیده و اشتعال آغاز می‌شود [۵]. به دلیل استفاده از دو نوع سوخت با واکنش‌پذیری متفاوت، مدت زمان احتراق^۷ در این نوع موتورها افزایش می‌یابد و در نتیجه آن، مقدار نرخ افزایش فشار کاهش پیدا می‌کند [۴]. بنابراین موتورهای احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده قادر به کارکرد در شرایط عملیاتی با بار بالاتر نیز هستند. در این مقاله، گاز طبیعی و سوخت دیزل به ترتیب به عنوان سوخت با واکنش‌پذیری کمتر و بیشتر استفاده شده‌اند. دلیل اصلی برای استفاده از گاز طبیعی به جای بنزین این است که گاز طبیعی می‌تواند اختلاف واکنش‌پذیری بیشتری با سوخت دیزل نسبت به بنزین داخل محفظه احتراق ایجاد کند و همین امر سبب می‌شود تا مدت زمان احتراق طولانی‌تر شود و در نهایت مقدار نرخ افزایش فشار، کاهش یابد [۶]. در دهه گذشته، مطالعات زیادی بر روی موتورهای احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده به منظور افزایش بازدهی و کاهش میزان آلاینده‌های تولیدشده، انجام شده است. یکی از راه‌های کارآمد در این زمینه بررسی نحوه پاشش سوخت با واکنش‌پذیری بالاتر است [۷]. به طور مثال، در این زمینه تأثیر جرم پاشش، زمان پاشش، زاویه پاشش، فشار پاشش سوخت با واکنش‌پذیری بالاتر بررسی شده است. در حالی که تأثیر شکل پاشش سوخت با واکنش‌پذیری بالاتر در موتورهای احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده به طور دقیق بررسی نشده است. در ادامه تعدادی از مطالعات پرداخته به شکل پاشش در موتورهای احتراق داخلی، مرور شده است.

قربانپور و راسخی به بررسی شکل‌های گوناگون پاشش، مانند چکمه‌ای، رمپ^۸، مستطیلی و ترکیبی بر روی بازده و مقدار آلاینده‌های تولیدشده به وسیله موتور احتراق تراکمی همگن پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که بالاترین میزان بازدهی از شکل

5. Exhaust Gas Recirculation
6. Top Death Center
7. Combustion Duration
8. Ramp

1. Low Combustion Temperature
2. Homogeneous Charge Compression Ignition
3. Premixed Charge Compression Ignition
4. Pressure Rise Rate

یک از فازها و مدل‌های استفاده‌شده برای حل معادلات حاکم بیان می‌شوند. سپس نتایج استقلال از شبکه و اعتبارسنجی ارائه می‌شوند.

۲-۱ معادلات حاکم

فرایند احتراق در موتور احتراق داخلی یک مسئلهٔ دوفازی است. در این پژوهش از روش اویلری-لاگرانژی^۴ برای شبیه‌سازی بهره گرفته شده است. به‌طور دقیق‌تر، مخلوط سوخت پیش‌آمیخته و هوا که در فاز گاز هستند به‌عنوان فاز پیوسته در نظر گرفته می‌شود؛ در حالی که سوخت دیزل پاشیده‌شده به‌عنوان فاز ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر فاز گاز شامل معادلهٔ پیوستگی، انتقال گونهٔ شیمیایی، تکانه (مومنتوم) و انرژی هستند و به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = \dot{\rho}^s \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} Y_i) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D \vec{\nabla} Y_i) + \dot{\rho}_i^c + \dot{\rho}_i^s \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\vec{\nabla} p - \frac{2}{3} \vec{\nabla} (\rho k) + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F}^s \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho e) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} e) = -p \vec{\nabla} \cdot \vec{u} - \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s \quad (4)$$

که ρ ، u ، Y_i و e به‌ترتیب چگالی، سرعت، کسر جرمی جزء i و انرژی درونی هستند. τ ، p ، g ، j ، k و ε نشان‌دهندهٔ فشار، تنش، شتاب گرانش، فلاکس انتقال حرارت، انرژی جنبشی تلاطم، و اتلاف انرژی تلاطم هستند. $\dot{\rho}_i^c$ ، F^s و \dot{Q}^s بیانگر عبارت‌های چشمهٔ ناشی از تبخیر قطرات مایع سوخت هستند و $\dot{\rho}_i^c$ و \dot{Q}^c عبارت‌های چشمهٔ ناشی از واکنش شیمیایی هستند. D نشانگر ضریب نفوذ جرم است.

معادلات حاکم بر فاز مایع نیز شامل معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی هستند و به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\frac{dm_d}{dt} = -\frac{m_d}{\tau_e} \quad (5)$$

4. Eulerian-Lagrangian

پاشش رمپ و مستطیلی حاصل می‌شود [۸]. شوای^۱ و همکاران به بررسی تأثیر زمان پاشش و شکل‌های پاشش مستطیلی، دوزنقه‌ای، مثلثی، چکمه‌ای، چکمه‌ای برعکس، اسپلین^۲ و اسپلین برعکس بر روی عملکرد موتور احتراق تراکمی پرداختند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که تأثیر شکل پاشش بر روی عملکرد موتور در هنگامی که سوخت دیزل دیرتر پاشیده می‌شود، بیشتر است. هم‌چنین مقدار کاهش در میزان دوده، کربن مونواکسید و هیدروکربن‌های نوسختهٔ تولیدشده در شکل‌های پاشش چکمه‌ای و مستطیلی بیشتر از دیگر شکل‌هاست [۹]. یزدانی و همکاران شکل پاشش چکمه‌ای به‌همراه شش متغیر دیگر را بهینه‌سازی کردند تا عملکرد موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده را که با سوخت‌های دیزل و بنزین کار می‌کرد، افزایش دهند. نتایج بهینه‌سازی نشان می‌دهد که زمان پاشش چکمه‌ای بالاتر و سرعت پاشش چکمه‌ای پایین‌تر منجر به کاهش کربن مونواکسید و هیدروکربن‌های نوسخته می‌شود [۱۰]. مطلق و همکاران نیز با بهینه‌سازی نرخ پاشش و شیب پاشش شکل پاشش رمپ توانستند مقدار بازدهی ناخالص تعیین‌شده و آلاینده‌های تولیدشده در موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده را که با سوخت‌های گاز طبیعی و دیزل کار می‌کرد، به‌ترتیب افزایش و کاهش دهند [۱۱]. در مطالعات بالا تأثیر شکل پاشش بر عملکرد موتورهای احتراق داخلی با پاشش مستقیم سوخت به‌طور مفصل بررسی شده است؛ اما اثر شکل پاشش بر عملکرد موتورهای احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده کمتر بررسی شده است. چون اثر شکل پاشش مثلثی بر عملکرد موتورهای احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده تاکنون بررسی نشده، در این مقاله تأثیر شکل پاشش مثلثی بر روی بازده و آلاینده‌های تولیدشده به‌وسیلهٔ یک موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده بررسی می‌شود.

۲. مدل‌سازی

در این پژوهش، از نرم‌افزار اپن فوم^۳ برای شبیه‌سازی جریان دوفازی سوخت و هوا در موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده استفاده شده است. در این بخش معادلات حاکم بر هر

1. Shuai
2. Spline
3. OpenFOAM

عملیاتی موتور ذکر شده است. البته شبیه‌سازی از زمان بسته‌شدن دریچه ورودی تا زمان باز شدن دریچه خروجی انجام شده است. همچنین چون شش سوراخ برای پاشش سوخت دیزل وجود دارد، تنها یک ششم محفظه احتراق شبیه‌سازی شده و شرایط تناوبی^۶ در دیواره‌های اطراف اعمال شده است.

جدول ۱. مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی.

Table 1. Models used in the simulation.

Description	Model
Turbulence model	RNG k-ε [13]
Breakup phenomenon	Kelvin-Helmholtz-Rayleigh-Taylor [14]
Collision	Nordin [15]
Heat transfer	Ranz-Marshall correlation [16]
Drag coefficient	Schiller-Neumann correlation [17]
Turbulence-chemistry interaction	Partially-stirred reactor combustion [18]

جدول ۲. مشخصات هندسی موتور و نازل [۱۹].

Table 2. Engine and injector specifications [19].

Engine specification	
Type of Engine	Caterpillar 3401E SCOTE
Displacement (L)	2.44
Bore × stroke (mm)	137.2×165.1
Connecting rod length (mm)	261.6
Compression ratio	16.1:1
Swirl ratio	0.7
Engine speed (rpm)	1300
Direct-injected Mass fraction (-)	0.07
IVC (° ATDC)	-143
EVO (° ATDC)	130
Injector specification	
Injector Type	Common rail
Number of holes	6
Hole diameter (μm)	250
Included spray angle (°)	145
Injection pressure (bar)	954

6. Periodic

$$\frac{d\bar{u}_d}{dt} = -\frac{\bar{u}_d - \bar{u}}{\tau_u} + \bar{g} \quad (6)$$

$$\frac{dT_d}{dt} = \frac{T - T_d}{\tau_h} f - \frac{1}{c_{l,d}} \frac{h_v(T_d)}{\tau_e} \quad (7)$$

که T_d ، u_d ، m_d و T میانگرم، سرعت و دمای قطرات مایع هستند و T دمای فاز گاز است. τ_h ، τ_u ، τ_e زمان آسایش تبخیر، انتقال تکانه و انتقال حرارت را نشان می‌دهند. h_v انتالپی تبخیر قطرات، $c_{l,d}$ گرمای ویژه قطرات و f نشان‌دهنده ضریب تصحیح انتقال حرارت به دلیل انتقال جرم است.

۲-۲ مدل‌های شبیه‌سازی

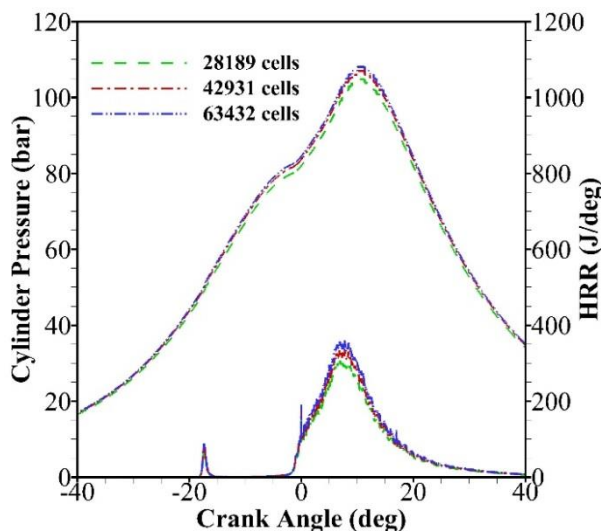
در این پژوهش، موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده، از سوخت با واکنش‌پذیری کمتر گاز طبیعی و سوخت با واکنش‌پذیری بیشتر دیزل استفاده می‌کند. خواص شیمیایی گاز طبیعی و سوخت دیزل به ترتیب مشابه نرمال-هپتان و متان در نظر گرفته شده است و در نهایت از سازوکاری متشکل از ۷۶ گونه شیمیایی و ۴۶۴ واکنش شیمیایی برای بررسی شیمی احتراق حاکم بر مسئله استفاده شده است [۱۲]. مدل‌های استفاده شده برای شبیه‌سازی موتور احتراق به صورت خلاصه در جدول (۱) آورده شده‌اند. همچنین، برای گسسته‌سازی عبارات‌های مربوط به نفوذ، جابه‌جایی و ناپایا در معادلات انتقال به ترتیب از روش‌های گسسته‌سازی حجم محدود تصحیح‌شده خطی گوس^۱، بالا دست گوس^۲ و اویلر^۳ استفاده شده است. علاوه بر این، برای حل هم‌زمان سرعت و فشار در معادلات بقای جرم و تکانه، از روش پیرو^۴ بهره گرفته شده است. در نهایت لازم به ذکر است که در این پژوهش، روش گام زمانی متغیر یا عدد کورانت^۵ برابر با ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است.

۲-۳ استقلال از شبکه

نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج نیمین و همکاران [۱۹] مقایسه شده و در جدول (۲) ویژگی‌های هندسی موتور و مشخصات پاشش در مطالعه نیمین و همکاران آورده شده است. در جدول (۳) نیز شرایط

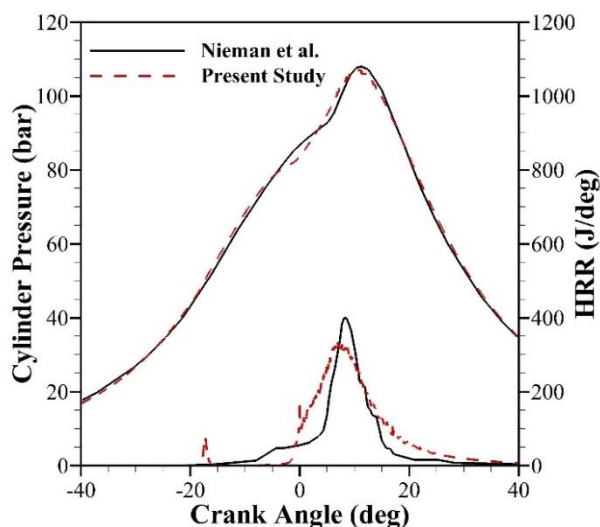
1. Gauss Linear Corrected
2. Gauss Upwind
3. Euler
4. PISO
5. Courant Number

نتایج حاصل از نیمین و همکاران [۱۹] مقایسه شد. شکل (۳)، نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد و چنان که پیداست تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاضر و نتایج نیمین و همکاران وجود دارد.



شکل ۲. استقلال شبکه از مش.

Figure 2. Grid independence test.



شکل ۳. مقایسه نتایج نرخ حرارت آزاد شده و فشار داخل

سیلندر حاصل از شبیه‌سازی و نیمین و همکاران [۱۹].

Figure 3. Comparison of the heat release rate and in-cylinder pressure for this study and Neiman et al.'s study [19].

هم‌چنین، نتایج حاصل از بازدهی ناخالص تعیین شده، مقدار نرخ بیشینه افزایش فشار^۲، مقدار کربن مونواکسید، هیدروکربن‌های

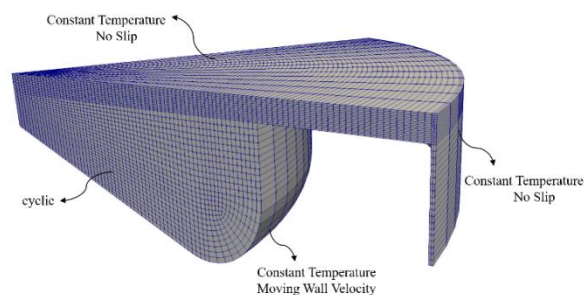
2. Maximum Pressure Rise Rate

جدول ۳. شرایط عملیاتی موتور [۱۹].

Table 3. Engine operating conditions [19].

Parameter	Value
IMEP (bar)	9
Intake pressure (bar)	1.75
Intake temperature (0C)	60
Total fuel mass (mg)	89
Methane mass percent (%)	85
Premixed fuel equivalence ratio	0.29
Diesel SOI 1 (° ATDC)	-87.3
Diesel SOI 2 (° ATDC)	-38.3
Fraction of diesel in first injection (%)	40
EGR (%)	0

شکل (۱) نشان‌دهنده هندسه و مش موتور در نقطه مرگ بالاست. این شبکه‌بندی از نوع منظم^۱ و دارای ۴۲۹۳۱ سلول است. برای بررسی استقلال نتایج از شبکه از دو نوع مش دیگر با تعداد سلول‌های ۲۸۱۸۹ و ۶۳۴۳۲ استفاده شده است. شکل (۲)، مقدار حرارت آزاد شده و فشار داخل سیلندر برای هر سه نوع شبکه‌بندی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبکه‌بندی با تعداد ۴۲۹۳۱ و ۶۳۴۳۲ سلول وجود دارد؛ در حالی که مقداری اختلاف در نتایج حاصل از شبکه‌بندی با ۲۸۱۸۹ سلول مشاهده می‌شود. با توجه به این موضوع، شبکه‌بندی با ۴۲۹۳۱ سلول به‌عنوان مبنا برای شبیه‌سازی انتخاب شد.



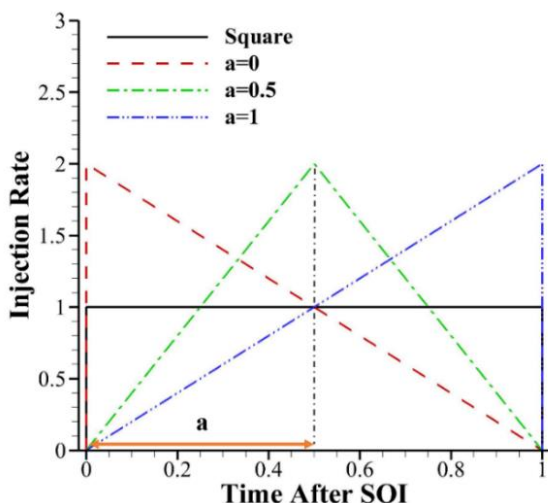
شکل ۱. شکل هندسی موتور در نقطه مرگ بالا با ۴۲۹۳۱ سلول.

Figure 1. Engine geometry with 42,931 cells at the top dead center.

۴-۲ اعتبارسنجی

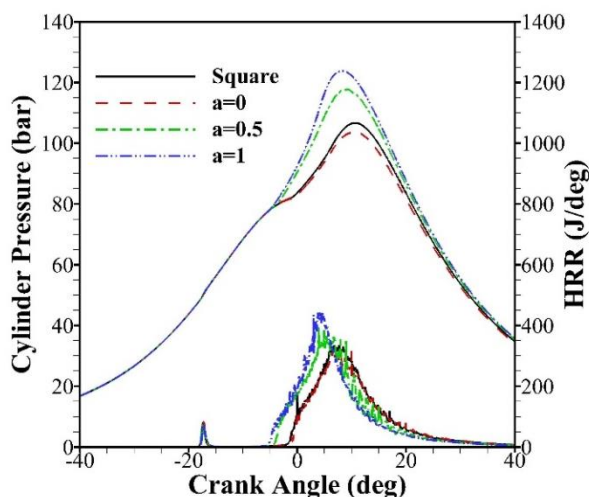
مقدار حرارت آزاد شده و فشار سیلندر حاصل از شبیه‌سازی حاضر با

1. Structure



شکل ۴. شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی.

Figure 4. Triangular and square injection rate shapes.



شکل ۵. تأثیر پارامتر a بر روی حرارت آزاد شده و فشار داخل سیلندر.

Figure 5. Effect of a on the heat release rate and in-cylinder pressure.

برای درک نقش شکل پاشش مثلثی بر روی فرایند احتراق در موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده، تأثیر شکل پاشش مثلثی بر روی نرخ تبخیر سوخت دیزل بررسی شده است. شکل (۶) تأثیر شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی را بر روی نرخ تبخیر سوخت دیزل در پاشش دوم مقایسه کرده است. با توجه به شکل، در زوایای میل‌لنگ کم، شکل‌های پاشش مثلثی چپ و راست، به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان نرخ تبخیر را دارند؛ زیرا در زوایای میل‌لنگ پایین، نرخ تزریق برای شکل پاشش

سنوخته و اکسیدهای نیتروژن تولیدشده در جدول (۴) مقایسه شده است. این جدول نیز تطابق بسیار خوب نتایج پژوهش حاضر را با نتایج نیمین و همکاران نشان می‌دهد.

جدول ۴. مقایسه مقادیر پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی حاضر و نیمین و همکاران [۱۹].

Table 4. Comparison of the results of the present study and Neiman et al.'s study [19].

Objectives	Neiman et al [19]	Present study
GIE (%)	50.5	50.4
NO _x (g/kW.h)	0.02	0.0193
CO (g/kW.h)	1.8	1.38
UHC (g/kW.h)	2.5	6.9

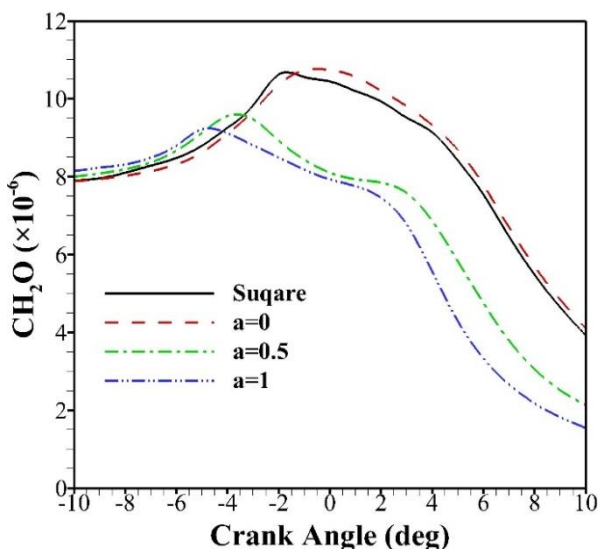
۲. نتایج

در این بخش، نتایج تأثیر شکل پاشش مثلثی بر روی میزان حرارت آزادشده، فرایند احتراق و مقدار آلاینده‌های تولیدشده به‌وسیله موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده بررسی شده است. لازم به ذکر است که با توجه به این که مدت زمان پاشش و جرم پاشش سوخت دیزل در هر دو شکل پاشش مثلثی و مستطیلی یکسان است؛ برای تعریف شکل پاشش مثلثی تنها یک متغیر مستقل لازم است که با a نمایش داده شده است. شکل (۴) نشان‌دهنده نحوه تغییر سرعت تزریق سوخت دیزل با شکل‌های پاشش مستطیلی و مثلثی با مقادیر متفاوت a است.

شکل (۵) تأثیر پارامتر a را بر روی میزان حرارت آزادشده و فشار داخل سیلندر نشان می‌دهد. با توجه به شکل، هنگامی که مقدار a برابر با یک باشد، کمترین میزان تأخیر در اشتعال^۱ و بیشترین فشار درون سیلندر مشاهده می‌شود. علاوه بر این موضوع با افزایش مقدار a ، تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد؛ در حالی که مقدار فشار درون سیلندر و بیشینه حرارت آزادشده افزایش می‌یابند. همچنین با توجه به شکل، فشار داخل سیلندر برای شکل پاشش مستطیلی بیشتر از شکل پاشش مثلثی چپ با a برابر با صفر است.

1. Ignition Delay

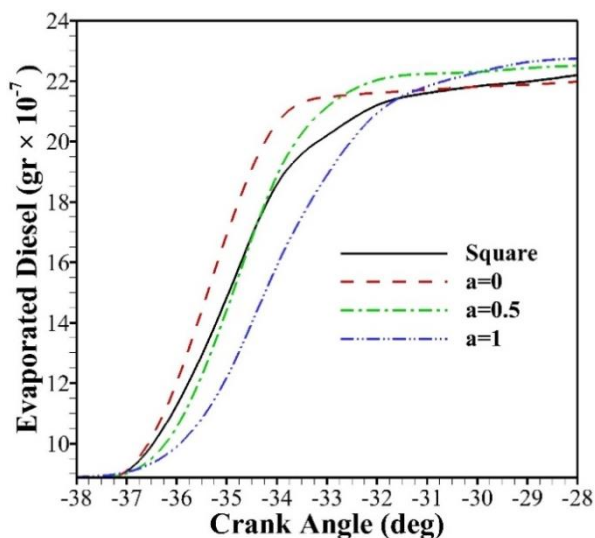
و در نهایت اشتعال زودتر آغاز شود. با توجه به این موضوع، شکل پاشش مثلثی راست دارای کم‌ترین تأخیر در اشتعال و بالاترین مقدار بازدهی است.



شکل ۷. تأثیر پارامتر a بر روی میزان فرمالدهید تولیدشده.
Figure 7. Effect of a on the formaldehyde formation.

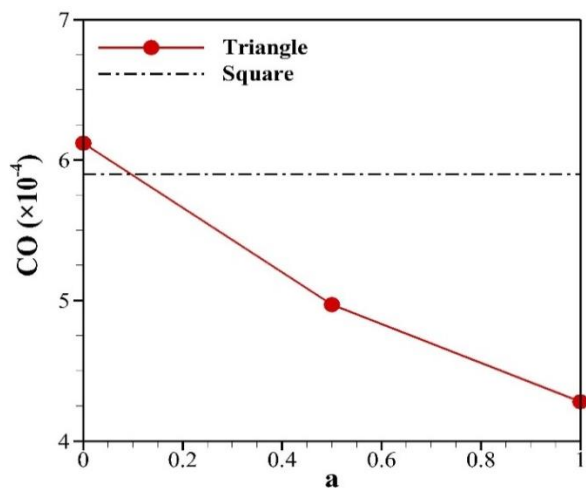
شکل (۸) تغییرات مقدار بازدهی ناخالص تعیین شده را برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، شکل پاشش مثلثی چپ دارای کم‌ترین مقدار بازده است که برابر با ۴۸/۴۵ درصد است. با افزایش مقدار a به ۰/۵ و ۱، مقدار تأخیر در اشتعال کم می‌شود و در نتیجه مقدار بازدهی نسبت به شکل پاشش مستطیلی به ترتیب به میزان ۶/۲ درصد و ۹/۹ درصد افزایش می‌یابد. شکل (۹) میزان تغییرات جزء جرمی هیدروکربن‌های نسوخته را برای شکل‌های پاشش گوناگون سوخت دیزل نشان می‌دهد. چون که احتراق برای شکل پاشش مثلثی راست زودتر آغاز می‌شود بنابراین انتشار شعله نیز بهتر انجام می‌گیرد و در نهایت سبب می‌شود تا مقدار هیدروکربن بیشتری داخل محفظه احتراق سوزانده شود. با توجه به این موضوع، شکل پاشش مثلثی راست با جزء جرمی هیدروکربن نسوخته برابر با ۰/۰۰۲۱۶، دارای کم‌ترین میزان هیدروکربن نسوخته است. در نقطه مقابل، انتشار شعله کمتر در شکل پاشش مثلثی چپ منجر می‌شود که بیشترین میزان هیدروکربن نسوخته تولید شود که به میزان ۲۴/۴۸ درصد بیشتر از شکل پاشش مستطیلی است.

مثلثی راست بالاتر از شکل‌های پاشش دیگر است. نرخ تزریق بالاتر منجر می‌شود که فروپاشی قطرات سوخت دیزل بهتر انجام گیرد که در نهایت سبب افزایش نرخ تبخیر می‌شود. در زوایای میل‌لنگ کم، شکل پاشش مستطیلی از نظر نرخ میزان تبخیر در جایگاه دوم قرار می‌گیرد و به دنبال آن شکل‌های پاشش مثلثی وسط و راست در جایگاه سوم و آخر قرار می‌گیرند. این در حالی است که روندی کاملاً برعکس در زوایای میل‌لنگ بالاتر مشاهده می‌شود. چون مقدار سوخت دیزل تزریق شده در تمامی شکل‌های پاشش یکسان است؛ در زوایای میل‌لنگ بیشتر، نرخ تزریق در حالتی که a برابر با یک باشد از دیگر شکل‌های پاشش پیشی می‌گیرد، به گونه‌ای که در انتهای پاشش دوم، شکل پاشش مثلثی راست دارای بالاترین نرخ تبخیر است.



شکل ۶. تأثیر پارامتر a بر روی میزان دیزل تبخیرشده.
Figure 6. Effect of a on the amount of evaporated diesel.

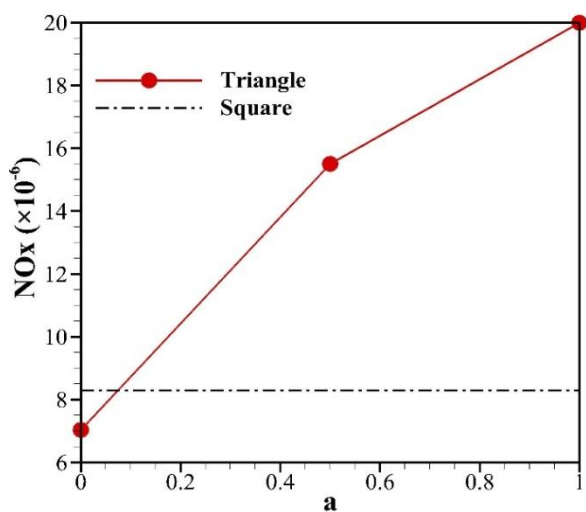
شکل (۷) نمایانگر جزء جرمی فرمالدهید تولیدشده برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی است. با توجه به شکل، شکل پاشش مثلثی راست دارای بالاترین جزء جرمی فرمالدهید است. به این دلیل که نرخ تبخیر بالاتر در شکل پاشش مثلثی راست سبب آمیختگی بهتر سوخت و هوا می‌شود. در نتیجه اختلاط بهتر، مقدار فرمالدهید بیشتری نیز تولید می‌شود چون که واکنش‌های تولید فرمالدهید گرماده است، موردی که فرمالدهید بیشتری تولید می‌کند، دمای بالاتری نیز خواهد داشت. دمای بالاتر در داخل محفظه احتراق باعث می‌شود که فرمالدهید تولیدشده زودتر مصرف



شکل ۱۰. تغییرات جزء جرمی کربن مونواکسید برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی.

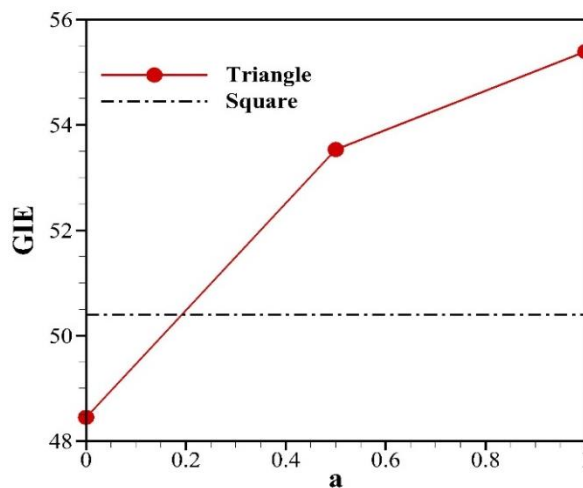
Figure 10. Variation of the mass fraction of carbon monoxide for triangular and square injection rate shapes.

شکل (۱۱) تغییرات جزء جرمی NO_x تولیدشده را برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی نشان می‌دهد. با افزایش مقدار a ، تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد و انتشار شعله بهتر انجام می‌گیرد؛ لذا دمای داخل سیلندر افزایش یابد. در نتیجه شکل پاشش مثلثی راست دارای بالاترین دمای داخل سیلندر و به دنبال آن بیشترین مقدار NO_x تولید شده است. این در حالی است که مقدار NO_x تولیدشده در هنگامی که a برابر با صفر باشد در کمترین حالت قرار دارد و برابر با $7/04 \times 10^{-6}$ است.



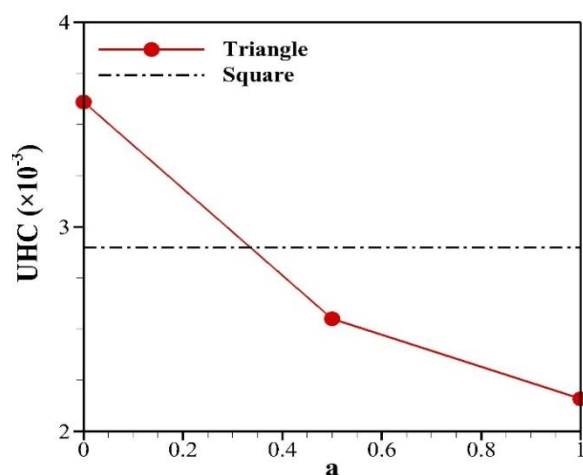
شکل ۱۱. تغییرات جزء جرمی اکسیدهای نیتروژن برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی.

Figure 11. Variation of the mass fraction of nitrogen oxides for triangular and square injection rate shapes.



شکل ۸. تغییرات مقدار بازدهی ناخالص تعیین شده برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی.

Figure 8. Variation of the gross indicated efficiency for triangular and square injection rate shapes.



شکل ۹. تغییرات جزء جرمی هیدروکربن‌های نسوخته برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی.

Figure 9. Variation of the mass fraction of unburned hydrocarbons for triangular and square injection rate shapes.

شکل (۱۰) تغییرات جزء جرمی کربن مونواکسید تولیدشده برای شکل‌های پاشش مثلثی و مستطیلی را نشان می‌دهد. چنان که در شکل دیده می‌شود با افزایش مقدار a ، مقدار کربن مونواکسید تولیدشده کاهش می‌یابد؛ زیرا با افزایش مقدار a ، انتشار شعله در محفظه احتراق بهتر انجام می‌گیرد و مقدار بیشتری کربن مونواکسید تولید می‌شود. در نتیجه با اعمال شکل پاشش مثلثی راست، مقدار کربن مونواکسید تولیدشده به میزان ۲۷/۴۵ درصد نسبت به شکل پاشش مستطیلی کاهش می‌یابد.

- controlled by mixtures stratification and fuel reactivity", *Front. Mech. Eng.*, 1, p. 1-15, (2015).
- [5] Kokjohn, S. L., Hanson, R. M., Splitter, D. A., Reitz, R. D., "Fuel reactivity controlled compression ignition (RCCI): a pathway to controlled high-efficiency clean combustion", *Int. J. Engine Res.*, 12(3), pp. 209-226, (2011).
- [6] Ansari, E., Poorghasemi, K., Khoshbakht Irdmousa, B., Shahbakhti, M., Naber, J., "Efficiency and Emissions Mapping of a Light Duty Diesel - Natural Gas Engine Operating in Conventional Diesel and RCCI Modes", *SAE International*, pp. 1-15, (2016).
- [7] Li, J., Yang, W., Zhou, D., "Review on the management of RCCI engines", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 69, pp. 65-79, (2017).
- [8] Ghorbanpour, M., Rasekhi, R., "A parametric investigation of HCCI combustion to reduce emissions and improve efficiency using a CFD model approach", *Fuel*, 106, pp. 157-165, (2013).
- [9] Shuai, S., Abani, N., Yoshikawa, T., Reitz, R. D., Park, S. W., "Evaluation of the effects of injection timing and rate-shape on diesel low temperature combustion using advanced CFD modeling", *Fuel*, 88(7), pp. 1235-1244, (2009).
- [10] Yazdani, K., Amani, E., Naderan, H., "Multi-objective optimizations of the boot injection strategy for reactivity controlled compression ignition engines", *Int. J. Engine Res.*, 20(8-9), pp. 889-910, (2019).
- [11] Motlagh, T. Y., Azadani, L. N., Yazdani, K., "Multi-objective optimization of diesel injection parameters in a natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition engine", *Appl. Energy*, 278, p. 115746, (2020).
- [12] Rahimi, A., Fatehifar, E., Saray, R. K., "Development of an optimized chemical kinetic mechanism for homogeneous charge compression ignition combustion of a fuel blend of n-heptane and natural gas using a genetic algorithm", *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.*, 224(9), pp. 1141-1159, (2010).
- [13] Han, Z., Reitz, R. D., "Turbulence Modeling of Internal Combustion Engines Using RNG κ - ϵ Models", *Combust. Sci. Technol.*, 106(4-6), pp. 267-295, (1995).
- [14] Beale, J. C., Reitz, R. D., "Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model", *At. Sprays*, 9(6), pp. 623-60, (1999).
- [15] Nordin, P., Complex chemistry modeling of diesel spray combustion: PhD thesis, Sweden: Chalmers University, (2000).

۴. نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر شکل پاشش مثلثی بر روی عملکرد و مقدار آلاینده‌های تولیدشده در یک موتور احتراق اشتعال تراکمی با واکنش‌پذیری کنترل‌شده که با سوخت‌های گاز طبیعی و دیزل کار می‌کند، بررسی شده است. سه نوع شکل پاشش مثلثی شامل مثلث چپ، مثلث وسط و مثلث راست بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر شکل پاشش از مثلث چپ به مثلث وسط و سپس مثلث راست، مقدار تأخیر در اشتعال کاهش می‌یابد و انتشار شعله بهتر انجام می‌گیرد که منجر به افزایش مقدار بازدهی ناخالص تعیین‌شده و NO_x تولیدشده و کاهش مقدار کربن مونواکسید و هیدروکربن‌های نسوخته داخل محفظه احتراق می‌شود. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که برای شکل پاشش مثلثی چپ میزان بازدهی و میزان NO_x تولیدشده به ترتیب ۳/۸۷ درصد و ۱۴/۱۵ درصد نسبت به شکل پاشش مستطیلی کاهش می‌یابند. برای شکل پاشش مثلثی وسط میزان بازدهی ۶/۲۱ درصد نسبت به شکل پاشش مستطیلی افزایش می‌یابد؛ در حالی که مقدار NO_x تولیدشده به میزان ۸۲/۹۲ افزایش می‌یابد. علاوه بر این شکل پاشش مثلثی راست دارای بالاترین میزان بازدهی است که برابر با ۵۵/۴۰ درصد است؛ اما لازم به ذکر است که این بازدهی در ازای افزایش در مقدار NO_x تولیدشده به دست می‌آید. درنهایت، کمترین مقدار کربن مونواکسید و هیدروکربن‌های نسوخته با شکل پاشش مثلثی راست به دست می‌آید که به ترتیب به میزان ۲۷/۴۵ و ۲۵/۵۱ درصد کمتر از شکل پاشش مستطیلی هستند.

مراجع

- [1] Dec, J. E., "Advanced compression-ignition engines - Understanding the in-cylinder processes", *Proc. Combust. Inst.*, 32 II(2), pp. 2727-2742, (2009).
- [2] Reitz, R. D., Duraisamy, G., "Review of high efficiency and clean reactivity controlled compression ignition (RCCI) combustion in internal combustion engines", *Prog. Energy Combust. Sci.*, 46, pp. 12-71, (2015).
- [3] Yao, M., Zheng, Z., Liu, H., "Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines", *Prog. Energy Combust. Sci.*, 35(5), pp. 398-437, (2009).
- [4] Wang, H., Zheng, Z., Liu, H., Yao, M., "Combustion mode design with high efficiency and low emissions

- [16] Ranz, W. E., "Evaporation from drops, Parts I & II", Chem Eng Prog., 48, pp. 141-146, (1952).
- [17] Schiller, L., Naumann, Z., "A drag coefficient correlation", Z. Ver. Deutsch. Ing, 77, pp. 318-320, (1935).
- [18] Chen, J. Y., "Stochastic modeling of partially stirred reactors", Combust. Sci. Technol., 122(1-6), pp. 63-94, (1997).
- [19] Nieman, D. E., Dempsey, A. B., Reitz, R. D. "Heavy-Duty RCCI Operation Using Natural Gas and Diesel", SAE Int J Engines, 5(2), pp. 270-285, (2018).