

تأثیر نسبت هم‌ارزی بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی با استفاده از مدل انتقال حرارتی آسانیس

مسعود رابطی^{*۱}

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد سوسنگرد، دانشگاه آزاد اسلامی، سوسنگرد، ایران، masoud.rabeti@gmail.com

* نویسنده مخاطب

چکیده

احتراق اشتعال تراکمی مخلوط همگن به دلیل بازده گرمایی بالا و تولید دوده و اکسیدهای نیتروژن کم، مورد توجه محققین قرار گرفته است. ارزیابی اثرات پارامترهای ورودی بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن از زمینه‌های مطالعاتی محققین موتور می‌باشد. در این مقاله، از مدل نیمه تجربی انتقال حرارتی آسانیس در یک مدل صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای کوپل با سینتیک مفصل شیمیایی برای بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی استفاده شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار متلب انجام شده است. ابتدا مدل صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای کوپل با سینتیک مفصل شیمیایی با داده‌های تجربی صحت‌سنجی گردید. سپس اثر نسبت هم‌ارزی بر پارامترهای فشار درون سیلندر، دمای درون سیلندر، نرخ آزاد سازی انرژی و شار حرارتی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که افزایش نسبت هم‌ارزی منجر به جلوگیری از احتراق شده و بیشینه فشار، دما، نرخ آزاد سازی انرژی و شار گرمایی را افزایش داده است.

کلمات کلیدی: موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن، گاز طبیعی، مدل آسانیس، نسبت هم‌ارزی

مقدمه

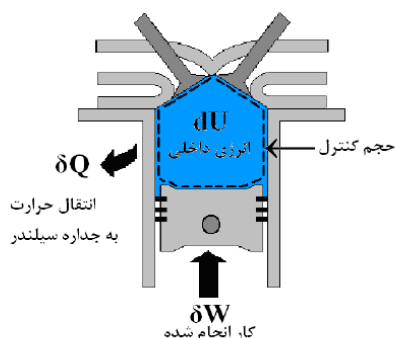
موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن یک نوع از موتورهای احتراقی کم دما سوز است. موتور کم دما سوز ترکیبی از عملکرد موتورهای اشتعال جرقه‌ای و اشتعال تراکمی است. موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن از مخلوط سوخت و هوا همانند موتورهای بنزینی استفاده می‌کند و تأکید بر عملکرد اشتعال تراکمی همچون موتورهای دیزلی دارد. موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن دارای بازده حرارتی بالا بوده و دوده و اکسیدهای نیتروژن کمی منتشر می‌کند. مشکلاتی نیز از قبیل بازه عملکردی محدود و عدم کنترل شروع احتراق برای موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن وجود دارد [۱] و [۲].

حل‌های عددی یکی از رویکردهای پر کاربرد در تحلیل مسائل حوزه موتورهای درون سوز است. یکی از روش‌های شبیه‌سازی موتورهای اشتعال تراکمی مخلوط همگن استفاده از مدل صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای است. زمان حل بسیار کم، از مزیت‌های شبیه‌سازی صفر بعدی است. با استفاده از شبیه‌سازی موتورهای احتراق داخلی اثرات پارامترهای مختلف عملکردی ورودی بر پارامترهای احتراقی موتور مورد بررسی قرار می‌گیرد. از بین مطالعات شبیه‌سازی صفر بعدی صورت گرفته در زمینه موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن می‌توان به این موارد اشاره نمود. اثرات اضافه کردن فرمالدهید بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی با استفاده از شبیه‌سازی صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای توسط جهانیان و جزایری [۳] انجام شد. مدل‌سازی صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای و چند ناحیه‌ای برای موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن توسط فتیحی و همکاران [۴] مورد مطالعه قرار گرفت. نماز و جهانیان [۵] با استفاده از مدل ترمودینامیکی تک‌ناحیه‌ای به تحلیل انرژی و اکسرژی یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت هیدروژن پرداختند. کنگسیرپارپ و همکاران [۶] مدل‌های احتراقی تک‌ناحیه‌ای و چند ناحیه‌ای برای بررسی احتراق اشتعال

تراکمی مخلوط همگن را مورد مطالعه قرار دادند. این مدل‌ها به منظور مطالعه اثر دمای ورودی و کسر باقیمانده گاز مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که مدل تک ناحیه‌ای توانایی تخمین شروع احتراق را دارد. ماهروس و همکاران [۷] به بررسی اثرات زمان‌بندی متغیر سوپاپ بر عملکرد یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن پرداختند. نتایج نشان دادند که استفاده از زمان‌بندی غیر معمول سوپاپ ورودی، محدوده عملکردی بار کم را در مقایسه با زمان‌بندی معمول سوپاپ ورودی افزایش می‌دهد. هیروودین و همکاران [۸] به ارزیابی پیش‌بینی احتراق موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با استفاده از مدل صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای پرداختند. در این مطالعه روش‌های کنترل زمان اشتعال خود به خودی با افزودن هیدروژن و تغییر دمای هوای ورودی مورد بررسی قرار گرفتند. زمان اشتعال خود به خودی با تغییر فاکتورهای فوق‌الذکر تغییر می‌کند و فاز احتراق با افزایش همه پارامترها پیش می‌افتد. رابطی و همکاران [۹] به بررسی مدل‌های انتقال حرارتی جهت تعیین شار حرارتی موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی با استفاده از مدل ترمودینامیکی پرداختند. نتایج نشان دادند که مدل‌های نیمه تجربی انتقال حرارت هوهنبرگ و آسانیس بهترین عملکرد در تعیین شار حرارتی موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی را دارند. در مطالعه دیگری از رابطی و همکاران [۱۰] آزادسازی انرژی واکنش‌های دمایی و آزاد سازی انرژی واکنش‌های دمابالا در یک مدل ترمودینامیکی صفر بعدی برای سوخت بنزین در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن بررسی گردید. در مقاله حاضر، به بررسی اثر نسبت هم‌ارزی بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی با استفاده از مدل نیمه تجربی انتقال حرارت آسانیس پرداخته شده است. مدل صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای کوپل با سینتیک مفصل شیمیایی در نرم افزار متلب توسعه داده شد. با در نظر گرفتن شرایط عملکردی نتایج ارائه و تحلیل شده است.

مدل صفر بعدی تک‌ناحیه‌ای

در مدل تک‌ناحیه‌ای مخلوط درون محفظه احتراق به صورت همگن و گاز ایده‌آل در نظر گرفته شده و کلیه خواص مخلوط در هر لحظه یکنواخت است. شماتیک مدل تک ناحیه‌ای در شکل ۱ آورده شده است.

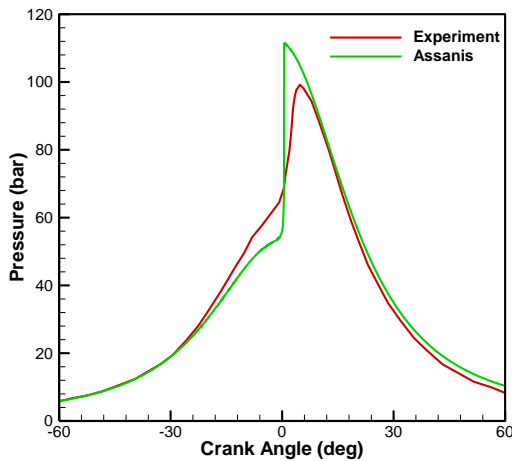


شکل ۱: شماتیک مدل تک‌ناحیه‌ای [۱۱]

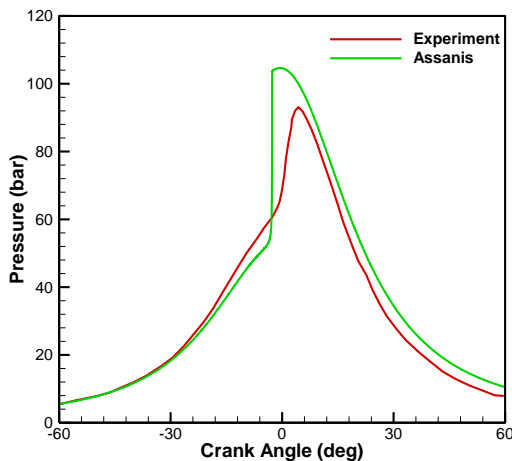
جدول ۳: مشخصات موتور [۱۵]

۱	تعداد سیلندرها
۸۲/۵۵	قطر سیلندر (mm)
۱۱۴/۳	طول کورس (mm)
۱۶	نسبت تراکم
گاز طبیعی	سوخت
۷۰۰	دور موتور (rpm)
۵۶ ABDC	بسته شدن سوپاپ هوا
۵۶ BBDC	بازشدن سوپاپ دود

در شکل ۲ و شکل ۳ مقایسه نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی برای فشار درون سیلندر در دو نسبت هم ارزی متفاوت آورده شده است.



شکل ۲: مقایسه فشار درون سیلندر شبیه سازی شده با نتایج تجربی



شکل ۳: مقایسه دمای درون سیلندر شبیه سازی شده با نتایج تجربی

صحت سنجی انجام شده بیانگر تقریب مناسب نتایج شبیه سازی با نتایج تجربی می باشد.

پس از اطمینان از عملکرد مدل صفربعدی تک ناحیه ای، به بررسی اثر نسبت هم ارزی بر پارامترهای فشار درون سیلندر، دمای درون سیلندر، نرخ آزادسازی انرژی و شار گرمایی پرداخته می شود. نسبت های هم ارزی از ۰,۲ تا ۰,۷ در نظر گرفته شده اند. شرایط کاری موتور در جدول ۱ آورده شده است. در شکل ۴ به بررسی اثر نسبت هم ارزی بر الگوی فشار درون

با کد نویسی در نرم افزار متلب مدل صفربعدی تک ناحیه ای توسعه داده شده است. جهت تعیین خواص لحظه ای مخلوط از ماژول کانتر استفاده شده است. معادلات بقای انرژی، تغییرات کسر جرمی گونه های شیمیایی، معادله حالت گاز کامل و تغییر حجم محفظه احتراق باید به صورت همزمان حل شود که این معادلات در پایین به ترتیب آورده شده است. از مکانیزم مفصل شیمیایی GRI Mech 3.0 [۱۲] که شامل ۵۳ گونه شیمیایی و ۳۲۵ واکنش است، بهره گرفته شد [۹].

$$dQ - dW = dU \quad (۱)$$

$$\frac{dY_i}{dt} = \frac{\omega_i MW}{\rho} \quad (۲)$$

$$PV = \frac{m_{tot} R_u T}{MW} \quad (۳)$$

$$\frac{dV}{dt} = V_c \left[\frac{1}{2} (r_c - 1) (\sin \theta \frac{d\theta}{dt} - \frac{1}{2} (R_c^2 - \sin^2 \theta)^{-\frac{1}{2}} (-\sin 2\theta) \frac{d\theta}{dt}) \right] \quad (۴)$$

جهت محاسبه انتقال حرارت مابین سیال و دیواره محفظه (Q) از مدل انتقال حرارتی آسانیس استفاده شده است.

مدل انتقال حرارتی آسانیس (چانگ) اصلاح شده مدل و شنی برای موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن است [۹].

$$Q = hA\Delta T \quad (۵)$$

$$h = aP^b V^b L^d T^e \quad (۶)$$

$$V = C_1 C_m + C_2 \frac{V_s T_r}{P_r V_r} (p - p_0) \quad (۷)$$

$$P_0 = \frac{(r_c V_d)^{\gamma} P_r}{V^{\gamma}} \quad (۸)$$

$$L = L_c \quad (۹)$$

ضرائب مدل و ضرائب ثابت به ترتیب در جداول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱: ضرائب مدل آسانیس [۹]

a	b	d	e
۰/۰۱۳	۰/۸	b-۱	-۰/۷۳

جدول ۲: ضرائب ثابت [۹]

C ₂	C ₁	مرحله
۰	۶/۱۸	مکش
۰	۲/۲۸	تراکم
۰/۰۰۳۲۴	۲/۲۸	احتراق و تخلیه

تمامی علائم بکار گرفته شده در روابط فوق در قسمت علائم تعریف شده اند.

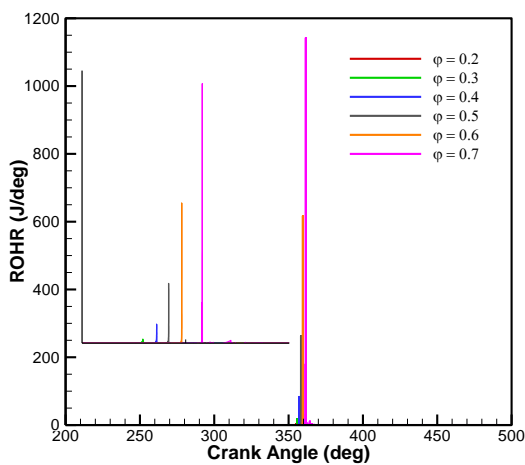
با توجه به این که معادلات مربوط به محاسبه کسر جرمی گونه های شیمیایی در بسیاری از مراجع [۱۳] و [۱۴] به تفصیل بیان شده است از آوردن این معادلات در این مقاله اجتناب شده است.

بحث بر روی نتایج

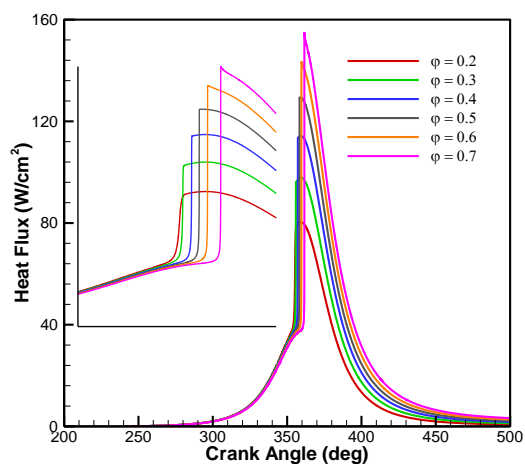
برای شبیه سازی از نرم افزار متلب استفاده شده است. از ماژول کانتر جهت تعیین خواص لحظه ای مخلوط بهره گرفته شده است. از مدل نیمه تجربی انتقال حرارتی آسانیس در شبیه سازی صفربعدی تک ناحیه ای استفاده شده است. نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی برگرفته از مرجع [۱۵] در دو حالت عملکردی متفاوت مقایسه شده است. این مقایسه برای موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن انجام شده است. مشخصات این موتور در جدول ۳ آورده شده است.

بیشینه نرخ آزادسازی انرژی را افزایش دهد. همچنین با افزایش نسبت هم ارزی آزادسازی انرژی زودتر رخ داده و احتراق جلو افتاده و زودتر اتفاق افتاده است.

اثر نسبت هم ارزی بر شار گرمایی در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است با افزایش نسبت هم ارزی مقدار گرمای تلف شده بیشتر شده است. انتقال حرارت از مخلوط سوخت و هوا به دیواره‌های سیلندر به عنوان حرارت هدر رفته در نظر گرفته می‌شود. هر چه نسبت هم ارزی بیشتر شود مقدار سوخت درون مخلوط بیشتر شده و انرژی بیشتری آزاد می‌گردد و حرارت بیشتری به دیواره‌های سیلندر منتقل می‌شود و تلف می‌گردد. در شار حرارتی ضریب انتقال حرارت h با استفاده از مدل نیمه تجربی انتقال حرارت آسانیس محاسبه شده است.



شکل ۶: اثر نسبت هم ارزی بر نرخ آزادسازی انرژی

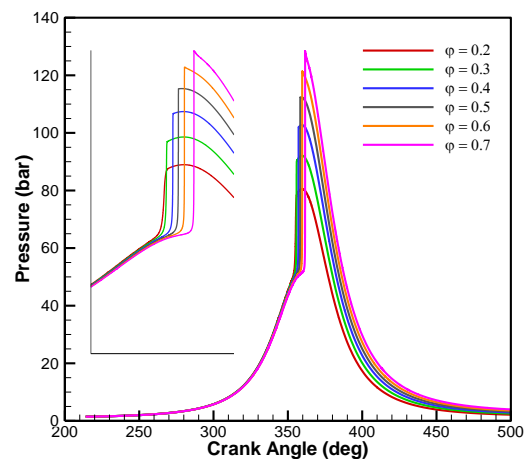


شکل ۷: اثر نسبت هم ارزی بر شار حرارتی

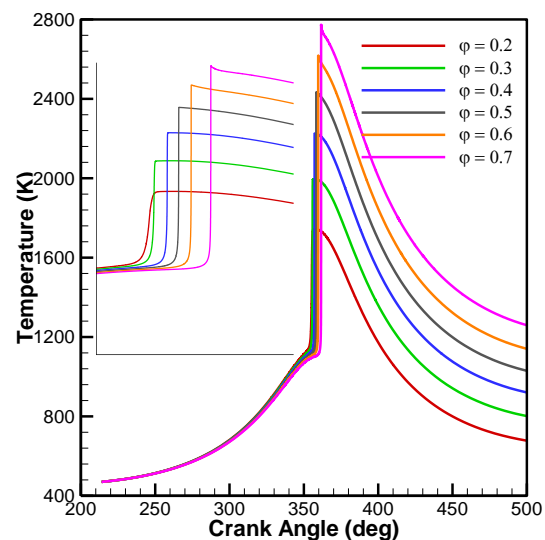
نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل صفر بعدی تک ناحیه ای با در نظر گرفتن سینتیک مفصل شیمیایی برای یک موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی توسعه داده شده است. در شبیه سازی انجام شده جهت محاسبه شار گرمایی از مدل نیمه تجربی انتقال حرارتی آسانیس استفاده شده است. اثر نسبت هم ارزی بر عملکرد موتور اشتعال تراکمی مخلوط

سیلندر پرداخته شده است. به این منظور ۶ نسبت هم ارزی متفاوت لحاظ گردید. نتایج از لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی تا لحظه باز شدن سوپاپ خروجی آورده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، با افزایش نسبت هم ارزی، مقدار بیشینه فشار درون سیلندر زیادتر شده است. دلیل این اتفاق افزایش جرم سوخت و انرژی آزاد شده می‌باشد. اثر نسبت هم ارزی بر الگوی دمای درون سیلندر در شکل ۵ نمایش داده شده است. همانند شکل ۴ از ۶ نسبت هم ارزی مختلف از ۰.۲ تا ۰.۷ استفاده شده است. اثر نسبت هم ارزی بر الگوی دمای درون سیلندر همانند اثر نسبت هم ارزی بر فشار بوده و با افزایش نسبت هم ارزی، مقدار بیشینه دما زیادتر شده است. با افزایش نسبت هم ارزی مقدار سوخت درون مخلوط بیشتر شده که همین امر منجر به افزایش بیشینه دمای درون سیلندر می‌شود.



شکل ۸: اثر نسبت هم ارزی بر فشار درون سیلندر



شکل ۹: اثر نسبت هم ارزی بر دمای درون سیلندر

شکل ۶ به بررسی تاثیر نسبت هم ارزی بر نرخ آزادسازی انرژی پرداخته است. این نمودار برای ۶ نسبت هم ارزی متفاوت ترسیم شده است. تغییرات نرخ آزادسازی انرژی از لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی تا باز شدن سوپاپ خروجی برای ۶ نسبت هم ارزی مختلف آورده شده است. با مشاهده این نمودار مشخص می‌شود که افزایش نسبت هم ارزی مقدار

- 6- Kongsereparp, P., Kashani, B. and Checkel, M.D., 2005, "A stand-alone multi-zone model for combustion in HCCI engines", In ASME 2005 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 265-274.
- 7- Mahrous, A.M., Potrzebowski, A., Wyszynski, M.L., Xu, H.M., Tsolakis, A. and Luszcz, P., 2009, "A modelling study into the effects of variable valve timing on the gas exchange process and performance of a 4-valve DI homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine", *Energy Conversion and Management*, 50(2), 393-398.
- 8- Hairuddin, A.A., Yusaf, T. and Wandel, A.P., 2016, "Single-zone zero-dimensional model study for diesel-fuelled homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines using Cantera", *International Journal of Automotive & Mechanical Engineering*, 13(2).
- 9- Rabeti, M., Ranjbar, A.A., Jahanian, O., Ardebili, S.M.S. and Solmaz, H., 2021. "Investigation of important semi-empirical heat transfer models for a natural gas-fueled HCCI engine". *Energy Reports*, 7, 8652-8666.
- 10- Rabeti, M., Jahanian, O., Ranjbar, A.A., Safieddin Ardebili, S.M. and Solmaz, H., 2021. "Potential of Semi-Empirical Heat Transfer Models in Predicting the Effects of Equivalence Ratio on Low Temperature Reaction and High Temperature Reaction Heat Release of an HCCI Engine". *Journal of Applied and Computational Mechanics*. In press.
- ۱۱- رابطی مسعود، جهانیان امید، رنجبر علی اکبر، صفی الدین اردبیلی سید محمد. ۱۴۰۰. "ارزیابی مدل‌های نیمه‌تجربی انتقال حرارت برای تعیین شار حرارتی در موتور اشتعال تراکمی مخلوط همگن با سوخت گاز طبیعی" مهندسی مکانیک مدرس ۱۲ (۲۱)، ۸۱۰-۷۹۷.
- 12- Smith GP, Golden DM, Frenklach M, Moriarty NW, Eiteneer B, Goldenberg M, Bowman CT, Hanson RK, Song S, Gardiner Jr WC, Lissianski VV. 1999, GRI 3.0 Mechanism. Gas Research Institute (http://www.me.berkeley.edu/gri_mech).
- 13- Jahanian O, Jazayeri SA. 2012, A "comprehensive numerical study on effects of natural gas composition on the operation of an HCCI engine". *Oil & Gas Science and Technology-Revue d'IFP Energies nouvelles*. 67(3), 503-15.
- 14- Hairuddin AA, Yusaf TF, Wandel AP. 2011, "Predicting the combustion behaviour of a diesel hcci engine using a zero-dimensional single-zone model". *InProceedings of the 11th Australian Combustion Symposium (ACS 2011)*; 1(1): 130-133. Combustion Institute, Australian and New Zealand Section
- 15- Poorghasemi K, Saray RK, Bahlouli K, Zehni A. 2016, "3D CFD simulation of a natural gas fueled HCCI engine with employing a reduced mechanism". *Fuel*. 182, 816-30.

همگن برر سی شده است. نتایج نشان دادند که افزایش نسبت هم ارزی باعث افزایش شار حرارتی و به تبع آن افزایش حرارت تلف شده می‌گردد. افزایش نسبت هم ارزی منجر به افزایش فشار و دمای درون سیلندر و نرخ آزادسازی انرژی می‌گردد. افزایش نسبت هم ارزی زمان شروع احتراق را جلو می‌اندازد.

فهرست علائم

a, b, d, e	ضرائب مدل
A	سطح مقطع، m^2
C_m	سرعت متوسط پیستون، m/s
h	ضریب انتقال حرارت، $W/m^2 K$
L, L_c	طول مشخصه، ارتفاع لحظه‌ای، m
MW	جرم مولی، $kg/mole$
P, P_0	فشار، فشار موتور گردانی، Pa
Q	گرما، W
R_u	ثابت جهانی گازها، $J/mole K$
r_c	نسبت تراکم
R_c	نسبت طول شاتون به شعاع لنگ
t	زمان، s
T	دما، K
U	انرژی داخلی، W
V, V_c, V_s	حجم، حجم لحظه‌ای، حجم جایجایی m^3/kg
W	کار، W
Y	کسر جرمی، kg
	فهرست علائم یونانی
θ	زاویه لنگ، deg
$\dot{\omega}$	نرخ تغییر غلظت گونه شیمیایی، $mole/s$
ρ	چگالی، kg/m^3
	زبرنویس‌ها
r	لحظه بسته شدن سوپاپ ورودی
tot	کل
	بالانویس‌ها
γ	نسبت ظرفیت‌های گرمایی ویژه

مراجع

- 1- Bhurat, S.S., Pandey, S., Chintala, V. and Ranjit, P.S., 2019, "Technical barriers and their solutions for deployment of HCCI engine technologies—a review", *International Journal of Ambient Energy*, 1-14.
- 2- Onishi, S., Jo, S.H., Shoda, K., Jo, P.D. and Kato, S., 1979, "Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)—a new combustion process for internal combustion engines", *SAE Transactions*, 1851-1860.
- 3- Jahanian O, Jazayeri SA. 2010, "The Effects of Using Formaldehyde as an Additive on the Performance of an HCCI Engine Fueled with Natural Gas". *InASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 44298, 601-609.
- 4- Fathi M, Jahanian O, Ganji DD, Wang S, Somers B. 2017, "Stand-alone single-and multi-zone modeling of direct injection homogeneous charge compression ignition (DI-HCCI) combustion engines". *Applied Thermal Engineering*. 125:1181-90.
- 5- Namar MM, Jahanian O. 2019, "Energy and exergy analysis of a hydrogen-fueled HCCI engine". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 137(1):205-15.