

بررسی عددی تاثیر استفاده از محیط متخلخل در موتور احتراق داخلی جرقه‌ای

سحر جعفری نیولوئی
دانشجوی دکترا، دانشکده مکانیک، دانشگاه
صنعتی اصفهان
sahar.jafari@me.iut.ac.ir

رسول نژادزارعی
دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده
مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
rasoolnejadzaree@yahoo.com

سید عبدالله حسن دخت
دانشجوی دکترا، دانشکده مکانیک، دانشگاه
صنعتی اصفهان
a.hassan@me.iut.ac.ir

چکیده

تولید آلاینده‌ها را به حداقل می‌رساند. استفاده از محیط متخلخل در موتور احتراق تراکمی نتایج مطلوبی داشته است. هوای ورودی به موتور در چرخه مکش تحت تاثیر ناحیه متخلخل بوده و در چرخه تراکم بخش بزرگی از هوا وارد ناحیه متخلخل شده و با توجه به دمای بالای این ناحیه پیش گرم می‌شود در انتهای کورس تراکم سوخت با فشار بالا درون ناحیه متخلخل تزریق شده قطرات سوخت به سرعت تبخیر شده و احتراق با سرعت بالا انجام می‌پذیرد. بخش عمده‌ای از احتراق درون ناحیه متخلخل رخ داده و فاز جامد محیط بخش بزرگی از انرژی گرمایی را به خود جذب می‌کند. به طور کلی موتورهای محیط متخلخل به دو دسته تماس دائم بین سیلندر و محیط متخلخل و نیز تماس دوره‌ای بین سیلندر و محیط متخلخل تقسیم می‌شوند.

ایده استفاده از ناحیه متخلخل در محفظه احتراق موتور در سال ۲۰۰۱ به وسیله دارست^۳ و وکلاس^۴ [۲] ارائه گردید. در این طرح یک موتور تک سیلندر دیزل انتخاب شده و بر روی سر سیلندر از یک محیط متخلخل استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بیشینه دما درون موتور کاهش یافته و سهم بزرگی از انرژی آزاد شده توسط ناحیه متخلخل جذب شده است. همچنین آلاینده‌های این موتور بسیار کم و نزدیک صفر بود. پارک^۵ و کاویانی [۳] شبیه‌سازی یک موتور دیزل تک سیلندر که دارای یک محیط متخلخل درون محفظه احتراق بود را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که فشار درون سیلندر افزایش چشمگیری باوجود ناحیه متخلخل دارد و کار انجام شده بیشتر بوده و راندمان موتور افزایش می‌یابد. مازاهو^۶ و زیاهو^۷ [۴] به کمک برنامه کیوا شبیه‌سازی موتور محیط متخلخل را انجام دادند. آن‌ها به نقش مهم سرعت و نیز زمان پاشش سوخت تاکید داشته، سوخت را به شکل مستقیم بر روی ناحیه داغ متخلخل تزریق کردند و نشان دادند که دمای اولیه محیط متخلخل نقش کلیدی در روند احتراق دارد. لیو^۸ و همکاران [۵] احتراق در یک موتور محیط متخلخل دوناحیه‌ای را شبیه سازی نمودند. ایشان دمای ورودی به موتور، فشار ورودی و نیز میزان هوای اضافی را بر روی دما و فشار میانگین موتور را بررسی کردند. ژاو^۹ و همکاران [۶] به مطالعه عددی احتراق تراکمی سوخت هیدروکربنی در موتور محیط متخلخل پرداختند. آن‌ها احتراق سوپرادیاباتیکی مخلوط متان و هوا را در موتور با تماس دوره‌ای با چهار ساختار مختلف از تخلخل مد نظر قرار دادند؛ نتایج حاکی از این بود که عامل اصلی در شروع احتراق تراکمی، دمای اولیه

نیاز به سوخت‌های فسیلی در جهان روبه افزایش است. در حال حاضر بیش از ۹۰ درصد از انرژی جهان به کمک احتراق سوخت‌های فسیلی حاصل می‌گردد. احتراق در ناحیه متخلخل روشی نو در راستای افزایش راندمان احتراق و کاستن از میزان آلاینده‌ها است. در این تحقیق با اضافه نمودن یک ناحیه متخلخل به سرسیلندر یک موتور احتراق داخلی جرقه‌ای تاثیر دما و فشار اولیه هوای ورودی به موتور بر پارامترهای اساسی موتور و نیز آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد به ازای دمای ورودی بالاتر، دمای میانگین در سیلندر بیشتر شده و میزان آلاینده مونواکسید کربن افزایش می‌یابد؛ درحالی‌که میزان تولید NO_x کاهش یافته است. همچنین فشار اولیه هوا عامل کلیدی در راندمان موتور و نیز تولید آلاینده‌ها است.

کلمات کلیدی: موتور احتراق داخلی، محیط متخلخل، آلاینده‌ها، احتراق همگن، انتقال حرارت

۱- مقدمه

افزایش سریع رشد جمعیت باعث شده نیازهای بشر به کمک رشد تکنولوژی برآورده شود. مصرف سوخت‌های فسیلی در صنایع و نیز مشکلات زیست محیطی توجه محققان را به سمت تولید آلاینده‌های کمتر سوق داده است. موتورهای احتراق داخلی از جمله خودروها سهم بزرگی در مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها دارند. مشکل عمده موتورهای امروزی تشکیل مخلوط غیرهمگن درون محفظه احتراق است که حاصل این نوع اختلاط تشکیل هیدروکربن‌های نسوخته، مونواکسیدکربن، دوده و اکسیدهای نیتروژن در محصولات احتراق است. استفاده از کاتالیزورها جهت کاهش غلظت آلاینده‌ها در کوتاه مدت مطلوب است ولی با گذشت عمر کاتالیزور کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد. روش‌های دیگری مانند استفاده از افشانه‌ها در فشار بالا، استفاده از پایش گازهای خروجی در تنظیم نسبت سوخت و هوا، استفاده از تله ذرات^۱ در موتورهای اشتعال تراکمی برای کاهش ذرات معلق در گازهای خروجی استفاده شده است [۱]. این روش‌ها نتوانسته بدون تاثیر در کاهش قدرت موتور به حذف آلاینده‌ها بپردازد. راه کمینه سازی آلاینده‌ها در کنار حفظ توان خروجی موتور، دست‌یابی به احتراق همگن است. احتراق در محیط متخلخل به عنوان مفهوم جدیدی در احتراق ارائه شده است. نخستین بار بن^۲ [۱] در سال ۱۹۱۲ اولین بویلر و هیتر دارای محیط متخلخل را ارائه نمود. این نوع احتراق با شکل‌دهی مخلوطی همگن و پیش گرمایش سوخت و هوا فرآیند احتراق را تسریع بخشیده و میزان

³ Durest

⁴ Weclas

⁵ Park

⁶ Mahzhao

⁷ Zhigou

⁸ Lio

⁹ Zhou

¹ Particulate traps

² Bone

Bore, B, (mm)	52
Stroke, (2a), (mm)	46
Connecting rod, (mm)	81
Compression ratio	9
Speed, (rpm)	2000
Spark timing in terms of crank angle	25° btdc
Intake manifold pressure (P ₀), (bar)	1
Relative fuel-air ratio	1
Fuel	C8H18 <iso> (gasoline)
Length porous zone, (mm)	15
High porous zone, (mm)	4

جدول ۲: خواص محیط متخلخل

Property	Dimension	Alumina
Density	kg/m ³	3987
Specific thermal capacity	J/gK	0.9
Absorption coefficient	1/m	3.7
Scattering coefficient	1/m	50.88
Total emissivity at 2000 K	-	0.28
Scattering albedo	-	0.93

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{V}^r = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم:

$$\rho \frac{D\mathbf{V}^r}{Dt} = \rho \mathbf{g}^r - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V}^r + S_i \quad (2)$$

در معادله ۲ جمله S_i مربوط به تخلخل می‌باشد که در ادامه به آن اشاره می‌شود. معادله انرژی در فاز گاز برابر است با:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v} (\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j^{\mathbf{u}} + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{v}) \right) + S_i \end{aligned} \quad (3)$$

در این معادله جمله سمت راست بیانگر میزان جابه‌جایی انرژی در اثر انتقال حرارت رسانایی، انتشار گونه‌ها و نیز اثرات ویسکوزیته است. $\mathbf{J}_j^{\mathbf{u}}$ ضریب انتشار گونه j است و h بیان‌کننده آنتالپی گاز می‌باشد. جمله S_i انرژی در ناحیه متخلخل است. k_{eff} بیانگر تاثیر انتقال حرارت هدایتی است و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_{eff} = k + k_t \quad (4)$$

که k ضریب انتقال حرارت رسانایی و k_t بیانگر ضریب هدایت توربولانسی است که مطابق با مدل توربولانسی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

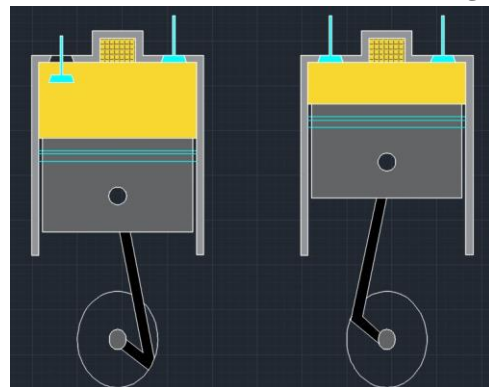
۳-۱- الگوی اغتشاش

تاکنون مدل خاصی جهت بیان اغتشاش درون ناحیه متخلخل ارائه نشده است. در این تحقیق از مدل $k - \epsilon$ بدون تغییر استفاده شده است.

ناحیه متخلخل می‌باشد. هونگشنگ^{۱۰} و همکاران [۷] به بررسی ترمودینامیکی سیکل حرارتی موتور محیط متخلخل با اتصال دوره‌ای پرداخته و سیکل ترمودینامیکی ایده‌آل موتور متخلخل را مورد مطالعه قرار دادند. ایشان رابطه‌ای بین کار خروجی و راندمان حرارتی بدست آوردند. ژاو و همکاران [۸] به بررسی عددی انتقال حرارت و احتراق در موتور با پیستون متخلخل پرداختند. آنها نشان دادند ویژگی‌های انتقال حرارت و نیز تولید آلاینده‌ها در موتور متخلخل نسبت به موتورهای معمولی بسیار چشمگیر است. از طرفی تغییر در میزان تخلخل تغییرات قابل توجهی در میزان انتقال حرارت ایجاد می‌کند. محمدی و همکاران [۱۰] موتور تزریق مستقیم با محیط متخلخل را شبیه‌سازی کردند. ایشان محیط متخلخل را به عنوان یک بازیاب حرارتی در نظر گرفتند و تغییرات دما و فشار و آلاینده‌ها را بررسی کردند. بیشترین حجم تحقیقات در زمینه اثر افزودن ناحیه متخلخل به موتور احتراق تراکمی بوده و تحقیقات مناسبی در زمینه اثر محیط متخلخل بر عملکرد موتور احتراق جرقه‌ای موجود نیست. در این تحقیق اثر افزودن محیط متخلخل بر کاهش آلاینده‌ها و عملکرد موتور احتراق جرقه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در کار حاضر صرفاً مرحله احتراق و انبساط شبیه‌سازی نشده و مرحله مکش نیز در شبیه‌سازی وارد شده است که باعث شده روند تشکیل سوخت و هوا نیز بهتر بررسی شود.

۲- مدل عددی

در مدل دوبعدی موتور تماس دائم متخلخل، محیط متخلخل در بستار بین درجه ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است. شکل ۱ شماتیک مسئله را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک مسئله

در مدل حاضر برای ساده‌سازی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- ناحیه متخلخل همگن بوده و در واکنش‌های شیمیایی شرکت نمی‌کند.
 - از اثرات تشعشع گاز در مقابل فاز جامد صرف‌نظر گردیده است.
- در جدول ۱ مشخصات موتور شبیه‌سازی شده آورده شده است. علاوه‌براین جنس ناحیه متخلخل، اکسید آلومینیوم در نظر گرفته شده است. مشخصات ناحیه متخلخل مطابق جدول ۲ می‌باشد [۱۱].

۳- معادلات حاکم

دینامیک سیالات محاسباتی ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی موتور می‌باشد با توجه به فرضیات در نظر گرفته شده معادلات به شکل زیر بیان می‌شوند:

جدول ۱: مشخصات موتور

مقادیر	پارامترها
--------	-----------

¹⁰ Hongsheng

فشار متناسب با سرعت سیال در سلول محاسباتی می‌باشد. با فرض محیط متخلخل با تخلخل همگن رابطه ۱۰ به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha} v_j + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (11)$$

در این معادله پارامتر α بیانگر میزان نفوذپذیری بوده و ماتریس‌های قطری C و D به وسیله $\frac{1}{\alpha}$ و C_2 ساده‌سازی شده‌اند. معادله انرژی ناحیه متخلخل با رابطه ۱۲ بیان می‌شود:

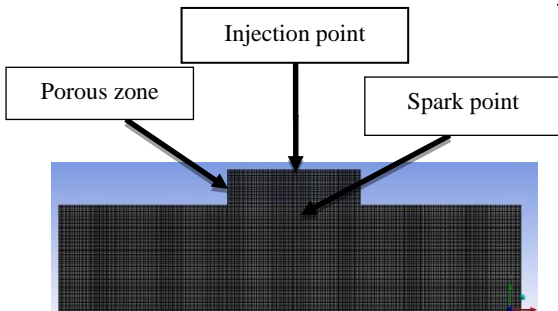
$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) \quad (12)$$

$$= \nabla \cdot \left[K_{eff} \nabla T - \left(\sum_i h_i J_i \right) + \left(\bar{\tau} \cdot \bar{v} \right) \right] + S_f^h$$

در این معادله پارامتر E بیانگر میزان انرژی، زیرنویس‌های f و s به ترتیب بیان کننده فاز مایع و جامد و γ میزان تخلخل محیط متخلخل را نشان می‌دهد. K_{eff} اثر انتقال حرارت رسانایی در محیط متخلخل و S_f^h آنتالپی فاز سیال را نشان می‌دهد.

۴- الگوی شبکه محاسباتی حل

در شکل ۲ شبکه محاسباتی مورد استفاده در شبیه‌سازی نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل محاسباتی

شبیه‌سازی از نقطه مرگ بالا و همراه با باز شدن دریچه ورودی آغاز شده در این حالت دمای اولیه برای ناحیه متخلخل برابر ۱۱۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. گرادینان دما در فاز جامد و سیال صفر است. مکان افشانه سوخت در بالای محیط متخلخل روی محور سیلندر و جرقه در وسط سیلندر قرار دارد و میزان تخلخل در ناحیه متخلخل برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است.

۴-۱- شرایط مرزی

(۱) شرط مرزی فشار ورودی: از شرط مرزی فشار ورودی برای دریچه هوا در چرخه مکش استفاده شده که بعد از زاویه ۱۸۰ درجه لنگ به شرط مرزی دیواره‌ای تغییر داده شده است.

(۲) شرط مرزی سطح داخلی: از شرط مرزی سطح داخلی بین ناحیه متخلخل و سیلندر در راستای حرکت آزادانه سیال و تبادل جرم و انرژی بین این دو ناحیه استفاده شده است.

(۳) شرط مرزی دیواره‌ای: از شرط مرزی دیواره‌ای برای دیواره‌های سیلندر و نیز پیستون متحرک استفاده شده است. دمای دیواره‌ها برابر ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است.

۵- نتایج

۵-۱- تأثیر دمای اولیه هوای ورودی به سیلندر

در شکل ۳ تأثیر دمای اولیه هوای ورودی به سیلندر بر روی دمای کاری موتور نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود دما بعد از جرقه با شروع فرآیند احتراق درون سیلندر افزایش می‌یابد. از طرفی انبساط ناگهانی گازهای حاصل از احتراق فشار درون موتور را افزایش داده است. در دماهای

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla u$$

$$+ \sigma : \nabla u + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + \dot{W}^s \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) = -\left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon_2} - C_{\varepsilon_3}\right) \rho \varepsilon \nabla u$$

$$+ \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{pr_{\varepsilon}} \right) \nabla \varepsilon \right]$$

$$+ \frac{\varepsilon}{k} \left[C_{\varepsilon 1} \sigma : \nabla u - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_s \dot{W}^s \right] \quad (6)$$

۳-۲- الگوی احتراق

مدل احتراق قسمتی پیش‌آمیخته با توجه به روندکاری موتور جرقه‌ای انتخاب شده است. در مدل احتراقی قسمتی پیش‌آمیخته چگالی متوسط f اجزا به کمک تابع چگالی احتمال مشخص می‌شود که از رابطه ۷ حاصل می‌شود:

$$\bar{\phi} = \int_0^1 \int_0^1 \phi(f, c) p(f, c) df dc \quad (7)$$

تابع تعریف شده در معادله از دو تابع f و c تشکیل شده است، که c بیانگر محل جبهه شعله بوده و به عنوان متغیر واکنش بیان می‌شود. در این تحقیق از معادله G به جای C استفاده شده است. F کسر مخلوط بوده و مقادیر آن از جریان سوخت به دست می‌آید و از رابطه ۸ حاصل می‌شود:

$$f = \frac{z_i - z_{i,ox}}{z_{i,fuel} - z_{i,ox}} \quad (8)$$

زیر نویس i بیانگر کسر جرمی اولیه برای گونه Am، زیر نویس ox جریان اکسید کننده و زیر نویس fuel جریان سوخت را مشخص می‌کند. با فرض شعله آرام رقیق تنها معادلات مربوط به گونه‌های سوخته و نسوخته در نظر گرفته می‌شود و f متوسط به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\bar{\phi} = \bar{c} \int_0^1 \phi_b(f) p(f) df + (1-\bar{c}) \int_0^1 \phi_u(f) p(f) df \quad (9)$$

۳-۳- الگوی پاشش سوخت

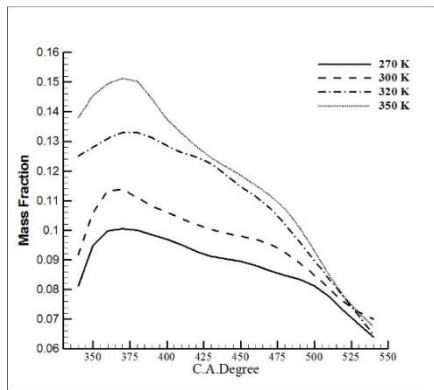
ایزواکتان به عنوان سوخت مایع در راستای محور موتور و در مرکز و بالای ناحیه متخلخل پاشیده می‌شود. سوخت به شکل مجزا از جریان اکسیدکننده وارد سیلندر می‌شود. از مدل‌سازی فاز مجزا برای تزریق سوخت به سیلندر استفاده شده است. جزئیات استفاده از این روش در منبع [۱۳ و ۱۲] آورده شده است.

۴-۳- الگوی ناحیه متخلخل

در ناحیه متخلخل فشار سیال کم می‌شود. این افت به وسیله معادله مومنوم توصیف می‌شود و انتقال حرارت در این محیط با فرض تعادل حرارتی بین ناحیه متخلخل و سیال محاسبه می‌شود.

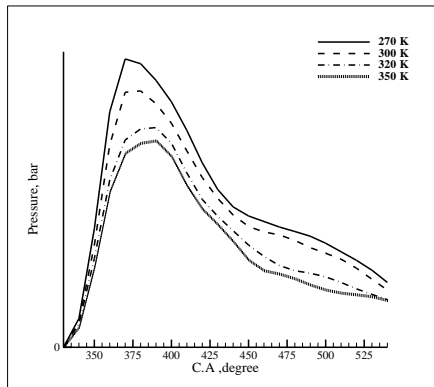
$$S_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (10)$$

جمله اول سمت راست معادله ۱۰ به معادله دارسی معروف بوده و بیانگر میزان افت ویسکوزیته است و جمله دوم معادله بیانگر میزان افت اینرسی می‌باشد که در مختصات کارتزین در سه راستای XYZ بیان می‌شود. همچنین C و D ماتریس‌های توزیع مربوط به ناحیه تخلخل می‌باشند. میزان افت جریان سیال در یک سلول محاسباتی متناسب با گرادینان فشار در هر یک از سلول‌های محاسباتی محیط متخلخل است. میزان این افت



شکل ۵: تاثیر دمای هوای ورودی بر تشکیل مونواکسیدکربن

مقایسه نتایج حاکی از این است که رفتار آلایندگی NO_x متفاوت می‌باشد و با وجود تاثیر مستقیم بیشینه دما بر روی این آلایندگی در دماهای بالاتر از 2200 کلوین امکان شروع اکسیداسیون برای نیتروژن‌های موجود در هوای ورودی به موتور فراهم است. در این حالت عامل کلیدی در تشکیل آلایندگی NO_x ، غلظت اکسیژن و نیتروژن درون ناحیه واکنش است. شکل ۶ میزان تشکیل آلایندگی NO_x را در طول فرآیند کار موتور نشان می‌دهد.



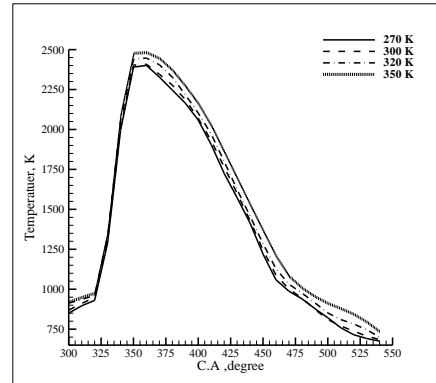
شکل ۶: تاثیر دمای هوای ورودی بر تشکیل آلایندگی NO_x

مطابق شکل ۶ با وجود اینکه بیشینه دما حاصل از احتراق در دمای ورودی 350 کلوین بوده ولی بیشترین میزان تولید NO_x در دمای اولیه 270 کلوین وجود دارد. این امر به دلیل حجم بیشتر نیتروژن و اکسیژن حاضر در سیلندر و شرکت کننده در احتراق می‌باشد. این امر نشان دهنده اهمیت میزان تاثیر گذاری غلظت نیتروژن بر روی تشکیل NO_x است. در واقع با افزایش دما به بیشتر از 2200 کلوین شرایط برای تشکیل اکسیدهای نیتروژن فراهم بوده و در این حالت غلظت نیتروژن موجود در ناحیه واکنش اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

۵-۲- تاثیر فشار اولیه هوای ورودی بر سیلندر

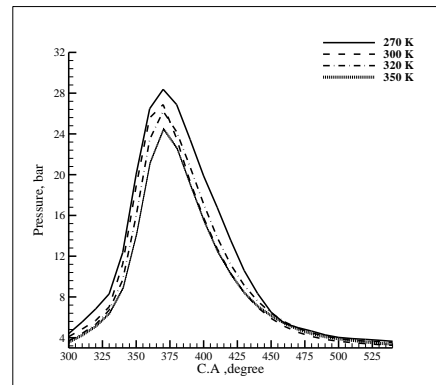
عامل کلیدی در کنترل میزان هوای ورودی به موتور فشار اولیه هوا می‌باشد. با افزایش فشار هوای ورودی به موتور رژیم جریان اغتشاش بیشتری داشته و مخلوط همگن تری برای احتراق فراهم می‌آید. همچنین فشار اولیه باعث شده چرخش رو به مرکز مخلوط افزایش یابد. این امر پیش گرمایش مخلوط را افزایش داده و گرادیان‌ها دما را درون سیال کاهش می‌دهد. در این حالت دمای اولیه هوای موتور برابر 220 کلوین در نظر گرفته شده است. شکل ۷ تاثیر فشار هوای ورودی بر دمای میانگین سیلندر را نشان می‌دهد.

پایین‌تر با توجه به چگالی بالاتر، هوای بیشتری طی چرخه مکش وارد محفظه احتراق می‌شود و این امر باعث شده که دما کمتر افزایش یابد. با توجه به زمان ثابت باز و بسته شدن سوپاپ ورودی و نیز دبی جرمی یکسان در زمان پاشش سوخت میزان هوای ورودی در دماهای متفاوت بر روی نسبت سوخت و هوای موتور تاثیرگذار است. در واقع علاوه بر دمای اولیه بالاتر حجم کمتری از هوا نیز به سیلندر وارد شده است. در شبیه‌سازی که لیو و همکاران [۷] برای موتور احتراق تراکمی انجام داده‌اند نیز نتایج مشابهی بدست آمده است



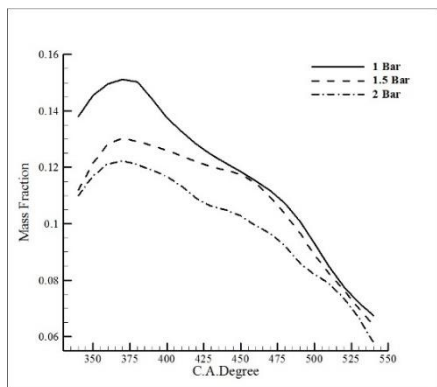
شکل ۳: تاثیر دمای اولیه هوای ورودی بر دمای میانگین سیلندر

حجم هوای ورودی به سیلندر در طی مرحله مکش تحت تاثیر دمای اولیه هوای ورودی است. میزان هوای ورودی بر روی فشار کاری موتور تاثیر می‌گذارد. مطابق شکل ۴ بیشینه فشار به ازای حجم هوای ورودی بیشتر اتفاق می‌افتد. در حالتی که دما به 350 کلوین رسیده حجم هوای ورودی کاهش می‌یابد به نحوی که نسبت سوخت به هوا زیاد می‌شود. در نتیجه محصولات تولیدی حجم کمتری داشته و انبساط گازهای حاصل از احتراق نیز کم می‌شود. این امر باعث کاهش فشار میانگین سیلندر و در نتیجه افت راندمان موتور شده است.

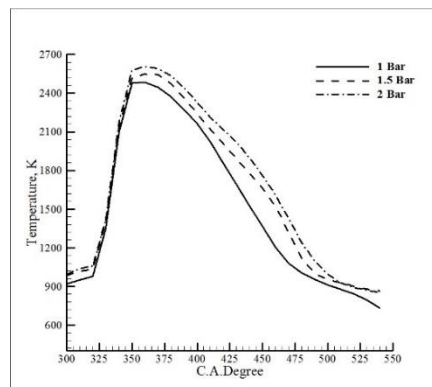


شکل ۴: تاثیر دمای اولیه هوای ورودی بر فشار میانگین سیلندر

شکل ۵ میزان تولید آلایندگی مونواکسید کربن را نشان می‌دهد که مستقیماً تحت تاثیر نسبت سوخت و هوا در طول چرخه کاری موتور و فرآیند احتراق می‌باشد. طبق نتایج، باتوجه به عدم وجود اکسیژن کافی در دمای اولیه بالاتر میزان تولید مونواکسیدکربن بیشتر است. به نحوی که در دمای اولیه 350 کلوین بیشینه مونواکسیدکربن تولید شده و با کاهش دمای اولیه هوای ورودی به سیلندر به 270 کلوین و افزایش چگالی هوا، به علت کافی بودن میزان اکسیژن در موتور، اختلاط مناسب بین قطرات سوخت و هوا پیش از فرآیند احتراق انجام می‌گیرد و مونواکسید کمتری تشکیل می‌شود.

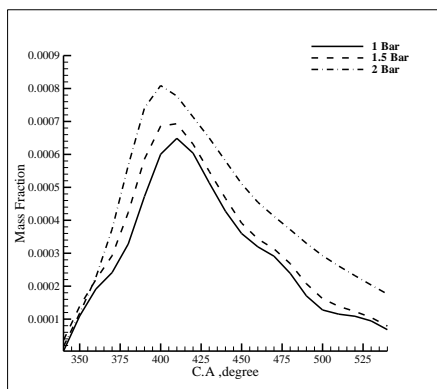


شکل ۹: تاثیر فشار اولیه هوای ورودی بر تشکیل مونواکسید کربن



شکل ۷: تاثیر فشار اولیه هوای ورودی بر دمای میانگین سیلندر

شکل ۱۰ روند تشکیل آلاینده NO_x را در طول چرخه کاری موتور نشان می‌دهد.



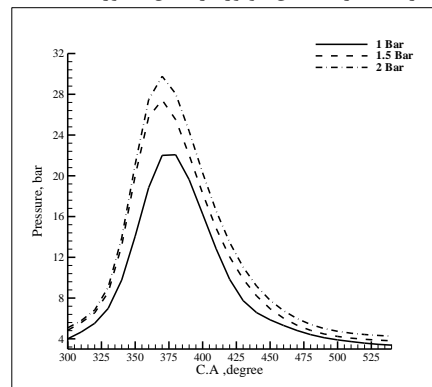
شکل ۱۰: تاثیر فشار اولیه هوای ورودی بر تشکیل آلاینده NO_x

همانگونه که در نمودارها دیده می‌شود، افزایش فشار اولیه هوای ورودی به سیلندر باعث افزایش آلاینده NO_x شده است. حجم نیتروژن بیشتر در ناحیه واکنش از یک سو و دمای بالاتر حاصل از فرآیند احتراق از سوی دیگر تولید آلاینده NO_x را افزایش می‌دهد. میزان حجم کمتر نیتروژن در فشار اولیه ۱ بار و نیز دمای میانگین پایین‌تر در این فشار باعث شده است NO_x در مقایسه با فشار ۱/۵ و ۲ بار به میزان کمتری تولید شود.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل دوبعدی از یک موتور احتراق جرقه‌ای محیط متخلخل بررسی شده است. هدف از این پژوهش، دست‌یابی به بهینه دما و فشار ورودی برای هوا در راستای کمینه کردن آلاینده‌ها در کنار حفظ توان موتور است. نتایج حاصله نشان می‌دهد با حضور ناحیه داغ متخلخل درون موتور و تزریق مستقیم سوخت در این ناحیه، پیش گرمایش سوخت و هوا به خوبی انجام شده و این عامل کلیدی در کاستن از میزان آلاینده‌ها دما هوای ورودی به موتور می‌باشد؛ به نحوی که با کاهش میزان دمای هوای ورودی میزان آلاینده مونواکسیدکربن کاهش می‌یابد. با این حال به دلیل غلظت بیشتر نیتروژن موجود در سیلندر NO_x افزایش می‌یابد. نشان داده شد تغییر فشار هوای ورودی به موتور، جریان رو به مرکز را افزایش می‌دهد. در این حالت با افزایش فشار ورودی به موتور تبادل حرارت بین محیط متخلخل و نیز مخلوط سوخت و هوا بیشتر شده و احتراق کامل‌تری شکل می‌گیرد که در نتیجه آن میزان آلاینده مونواکسیدکربن نیز کاهش یابد.

نتایج نشان می‌دهد در فشار اولیه بالاتر تبادل جرم بیشتر بین سیلندر و ناحیه متخلخل انجام شده و پیش گرمایش مخلوط بهتر انجام شده است. این امر باعث شده قطرات سوخت زودتر تبخیر شده و بنابراین سهم شعله پیش‌آمیخته نسبت به شعله نفوذی افزایش یافته و احتراق همگن در دمای بالاتر رخ دهد. از سوی دیگر با افزایش فشار اولیه حجم بیشتری از هوا به درون موتور راه یافته است که باعث شده فشار کاری موتور را تحت تاثیر قرار دهد. تغییرات فشار میانگین موتور در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸: تاثیر فشار اولیه هوای ورودی بر فشار میانگین سیلندر

مطابق نتایج، بیشینه فشار موتور در فشار ۲ بار می‌باشد. در این فشار در مرحله مکش حجم بیشتری از هوا وارد موتور شده و بعد از انجام احتراق، سیال بیشتری متراکم شده است. تراکم سیال گرم از یک سو و حرکت رو به بالای سیلندر از سوی دیگر باعث افزایش فشار میانگین سیلندر می‌شود. این امر افزایش کار خروجی موتور و در نتیجه راندمان بهتری را در پی دارد. پیش گرمایش مناسب و تشکیل مخلوط همگن از یک سو و نیز وجود حجم بیشتر اکسیژن درون موتور به ازای فشار بالاتر هوا در ورودی باعث شده که احتراق کامل‌تری شکل بگیرد. شکل ۹ روند تشکیل مونواکسید کربن این حالت را درون موتور نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در فشار ورودی ۱ بار، اکسیژن کافی در واکنش وجود نداشته و مونواکسیدکربن بیشتری تشکیل شده است. افزایش فشار هوای ورودی موتور باعث تغییر در رژیم جریان سیلندر شده و باعث شده اختلاط مناسبی بین قطرات سوخت و جریان هوا شکل گیرد. اختلاط مناسب و حضور اکسیژن کافی در ناحیه واکنش باعث کاهش مونواکسید کربن درون موتور شده است. اما رفتار آلاینده NO_x متفاوت بوده و کمترین میزان از تولید را هنگامی که فشار ورودی برابر ۱ بار است، دارد. می‌توان بیان نمود که انرژی گرمایی حاصل از تبدیل مونواکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن بر روی میزان NO_x تاثیر گذار است.

فهرست علائم

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه
k	ضریب انتقال حرارت رسانایی
k_t	ضریب هدایت توربولانسی
h	انتالپی گاز
j	ضریب انتشار

علائم یونانی

α	نفوذپذیری
μ	ضریب لزجت دینامیکی
ρ	چگالی
γ	تخلخل

زیرنویس‌ها

f	مایع
g	گاز
s	جامد
ox	اکسید کننده
fuel	سوخت

مراجع

- [1] Engineering fundamentals of the internal combustion engine, Pulkarbert, Willard W, 1997.
- [2] Bone, A William, Surface Combustion, Scientific American 74, 103-105, 1912.
- [3] Seyed Mohammad Hashemi, Seyed Abdolmehdi Hashemi, Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in a two-layer porous media burner by numerical simulation, Fuel 202 (2017) 56–65
- [4] F.Durest, M.wecllas, A new type of internal combustion engine based on the porous-medium combustion technique, Proc.Inst.Mech.Eng.215(1).2001.63-81
- [5] Parck C.W.,Kaviany M.,"Evaporating combustion affected by incylinder ;reciprocating porous regenerator"ASME J.Heat transfer,Vol 124,pp.184-194,2002
- [6] Zhigou Z.,Mahozhao X.,Numerical Simulation about Interaction between Pressuer Swirl Spary and Hot Porous Medium., Energy Conversion & Management, Vol 49,pp.1047-1055,2008.
- [7] H.Liu.,M. Xie.,D.Wu."Simulation of a porous meadium engine using a two-zone combustion model",Applied Thermal Engineering 29.3198-3197.,2009
- [8] Z.Zhao.,C.Wang.,M.Xie."Numerical study on the realization of compression ignition in a type of porous medium engine fueled with Isooctane",Fuel 88.2291-229.,2009
- [9] Liu, Hongsheng, M. Xie, and D. Wu, Thermodynamic analysis of the heat regenerative cycle in porous medium engine, Energy Conversion and Management 50.2 (2009): 297-303, 2009.
- [10] Lei ZhoZ, Mao-Zhao Xie, Kai Hong Luo, Numerical study of heat transfer and combustion in IC engine whth a porous media piston region, Applied Thermal Engineering 65 (2014) 597-604

[11] Seyed Mohammad Hashemi, Seyed Abdolmehdi Hashemi, Flame stability analysis of the premixed methane-air combustion in a two-layer porous media burner by numerical simulation, Fuel 202 (2017) 56–65

[11] S. A. Morsi and A. J. Alexander. An Investigation of Particle Trajectories in Two- Phase Flow Systems. J. Fluid Mech., 55(2):193{208, September 26 1972.

[12] E. Turkel and V. N. Vatsa. Choice of variables and preconditioning for time dependent problems. Technical Report AIAA-2003-3692, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 16th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, Orlando, Florida, June 2003.

[13] آرش محمدی، علی جزایری، مسعود ضیا بشر حق "شبه سازی موتور تزریق مستقیم با استفاده از محیط متخلخل" فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، فصل هفتم، شماره بیست و سوم تابستان ۱۳۹۰