

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

رسول نژادزارعی

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه  
آزاداسلامی واحد نجف‌آباد rasoolnejadzareei@yahoo.com

امیر همایون مقدادی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاداسلامی واحد نجف‌آباد،  
amir\_meghdadi@pmc.iaun.ac.ir

سیدعبدالله حسن دخت

دانشجوی دکترا، دانشکده فنی و مهندسی مکانیک، دانشگاه  
صنعتی اصفهان  
a.hassan@me.iut.ac.ir

### چکیده

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 در حالیکه 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

### فهرست علائم

$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه
$k$	ضریب انتقال حرارت رسانایی
$k_t$	ضریب هدایت توربولانسی
$h$	آنتالپی گاز
$j$	ضریب انتشار

### علائم یونانی

$\mu$	ضریب لزجت دینامیکی
$\rho$	چگالی
$\alpha$	نفوذپذیری
$\gamma$	تخلخل
$f$	مایع
$g$	گاز
$s$	جامد
$ox$	اکسید کننده
$feul$	سوخت

### 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 حاصل این نوع اختلاط تشکیل هیدروکربن‌های نسوخته، مونواکسید کربن، 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 آن کاهش می‌یابد. روش‌های دیگری مانند استفاده از افشانها در فشار بالا، استفاده از پایش گازهای خروجی در تنظیم نسبت سوخت و هوا، استفاده از تله ذرات<sup>۱</sup> 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 ارایه شده است. نخستین بار بن<sup>۲</sup> [۱] در سال ۱۹۱۲ اولین بویلر و هیتر دارای محیط متخلخل را ارایه نمود. این نوع احتراق با شکل‌دهی مخلوطی همگن و پیش‌گرمایش سوخت و هوا فرآیند احتراق را تسریع بخشیده و میزان 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 پیش‌گرم 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 دوره ای بین سیلندر و محیط متخلخل تقسیم می‌شوند.

ایده استفاده از ناحیه متخلخل در محفظه احتراق موتور در سال ۲۰۰۱ به وسیله دارست<sup>۳</sup> و وکلاس<sup>۴</sup> [۲] ارایه گردید در این طرح یک موتور تک سیلندر دیزل انتخاب شده و بر روی سر سیلندر از یک محیط متخلخل استفاده نموده‌اند. 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. در سال ۲۰۰۲ پارک<sup>۵</sup> و کاویانی [۳] شبیه‌سازی یک موتور دیزل تک سیلندر که دارای یک محیط متخلخل درون محفظه احتراق بود را بررسی نموده‌اند نتایج نشان داد که فشار درون سیلندر افزایش چشمگیری با وجود ناحیه متخلخل دارد و کار انجام شده بیشتر بوده و راندمان موتور افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۰۸ مازاهو<sup>۶</sup> و زیاهو<sup>۷</sup> [۴] به کمک برنامه کیوا شبیه‌سازی موتور محیط متخلخل را انجام داده‌اند آن‌ها به نقش مهم سرعت و نیز زمان پاشش سوخت تاکید داشته، سوخت را به شکل مستقیم بر روی ناحیه داغ متخلخل تزریق کرده‌اند و نشان داده‌اند که دمای اولیه محیط متخلخل نقش کلیدی در روند احتراق دارد. در سال ۲۰۰۹ لیو<sup>۸</sup> و همکاران [۵] احتراق در یک موتور محیط متخلخل دوناچه‌ای را شبیه سازی نموده‌اند، در این بررسی به دمای ورودی به موتور، فشار ورودی و نیز میزان هوای اضافی را بر روی دما و فشار میانگین موتور بررسی نموده‌اند. ژاو<sup>۹</sup> و همکاران [۶] ۲۰۰۹ به بررسی عددی احتراق تراکمی سوخت هیدروکربنی در موتور محیط متخلخل پرداختند، آن‌ها احتراق سوپرادیاباتیکی مخلوط متان و هوا را در موتور با تماس دوره ای با چهار ساختار مختلف از تخلخل مد نظر قرار دادند، نتایج نشان داد عامل اصلی در شروع احتراق تراکمی دمای اولیه ناحیه متخلخل می‌باشد. در سال ۲۰۰۹ هونگشنگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۷] به بررسی ترمودینامیکی سیکل حرارتی موتور محیط متخلخل با اتصال دوره‌ای پرداخته آن‌ها به طور خلاصه سیکل ترمودینامیکی ایده‌آل موتور متخلخل را بررسی کردند و رابطه‌ای بین کار

<sup>1</sup> Particulate traps

<sup>2</sup> Bone

<sup>3</sup> Durest

<sup>4</sup> Weclas

<sup>5</sup> Park

<sup>6</sup> Mahzhao

<sup>7</sup> Zhigou

<sup>8</sup> Lio

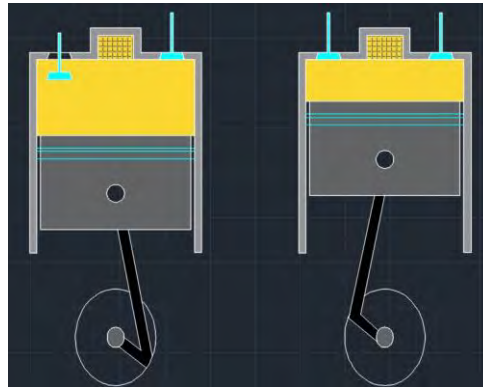
<sup>9</sup> Zhou

<sup>10</sup> Hongsheng

خروجی و راندمان حرارتی بدست آوردند. در سال ۲۰۱۴ ژاو و همکاران [۸] به بررسی عددی انتقال حرارت و احتراق در موتور با پیستون متخلخل پرداختند آنها نشان دادند ویژگی های انتقال حرارت و نیز تولید الاینده ها در موتور متخلخل نسبت به موتورهای معمولی بسیار چشمگیر است. از طرفی تغییر در میزان تخلخل تغییرات قابل توجهی در میزان انتقال حرارت ایجاد می کند. در سال ۱۳۹۰ محمدی و همکاران [۱۰] موتور تزریق مستقیم با محیط متخلخل را شبیه سازی کردند آنها محیط متخلخل را به عنوان یک بازیاب حرارتی در نظر گرفتند و تغییرات دما و فشار و آلاینده ها 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 این تحقیق 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<sup>۱۱</sup>

مدل دوبعدی از موتور تماس دایم متخلخل در نظر گرفته شده است، محیط متخلخل در بستار بین دریچه ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است، شکل ۱ شماتیک مسیله را نشان می‌دهد، مشخصات کارکرد موتور در جدول ۱ آمده است.



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.

جدول ۱ مشخصات موتور

۱	Bore, B, mm	۵۲
۲	Stroke, (2a), mm	۴۶
۳	Connecting rod, mm	۸۱
۴	Compression ratio (r)	۹
۵	Speed, rpm	۲۰۰۰
۶	Spark timing in terms of crank angle	btdc ۲۵°

<sup>11</sup> Numerical Models

۷	Intake manifold pressure( $P_0$ ),bar	۱
۸	Relative fuel-air ratio	۱
۹	Fuel	C8H18<iso>(gasoline)
۱۰	Length porous zone	۱۵ <sub>mm</sub>
۱۱	High porous zone	ξ <sub>mm</sub>

جنس ناحیه متخلخل، اکسید آلومنیوم در نظر گرفته شده است. مشخصات ناحیه متخلخل مطابق جدول ۲ است. [۱۱]

جدول ۲: خواص محیط متخلخل

Property	Dimension	Alumina
Density	kg/m <sup>3</sup>	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

### ۲-۱- معادلات حاکم

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

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

معادله مومنتوم نیز مطابق رابطه ۲ خواهد بود:

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

در معادله ۲ جمله  $S_i$  مربوط به تخلخل می‌باشد که در معادله ۵ بیان شده است. برای بیان معادله انرژی در فاز گاز از رابطه ۳ استفاده می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_i \quad (3)$$

در معادله ۳ جمله سمت راست بیانگر میزان جابه‌جایی انرژی در اثر انتقال حرارت رسانایی، انتشار گونه‌ها و نیز اثرات ویسکوزیته است. جمله  $S_i$  انرژی در ناحیه متخلخل است و مطابق رابطه ۶ بیان می‌شود.

$k_{eff}$  بیانگر تاثیر انتقال حرارت هدایتی است و از رابطه ۴ 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،  $z$  ضریب انتشار گونه  $z$  است،  $h$  بیان کننده آنتالپی گاز است.

## ۲-۲- الگوی اغتشاش

تاکنون مدل خواسی جهت بیان اغتشاش درون ناحیه متخلخل ارائه نشده است، در این تحقیق از مدل  $K-\varepsilon$  بدون تغییر استفاده شده است.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u + \sigma : \nabla u + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu}{\rho r_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + \dot{W}^s \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) = -\left( \frac{2}{3} C_\varepsilon - C_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon \nabla \cdot u + \nabla \cdot \left[ \left( \frac{\mu}{\rho r_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[ C_{\varepsilon 1} \sigma : \nabla u - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_s \dot{W}^s \right] \quad (6)$$

## ۲-۳- 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<sup>۱۲</sup> 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  $f, c$  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  $i$  ام، 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:

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

## ۲-۴- 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 اکسید کننده وارد سیلندر می‌شود از مدل سازی فاز مجزا<sup>۱۳</sup> برای تزریق سوخت به سیلندر استفاده شده است. جزئیات استفاده از این روش در منبع [۱۲ و ۱۳] آورده شده است.

<sup>12</sup> Probability density function

<sup>13</sup>-Modeling discrete phase

### ۵-۲- 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 سمت راست معادله ۱۰ به معادله داری معروف بوده و بیانگر میزان افت ویسکوزیته است و جمله سمت چپ معادله بیانگر میزان افت اینرسی می‌باشد. در مختصات کارتزین در سه راستای X, Y, Z بیان می‌شود. همچنین C, D ماتریس‌های توزیع مربوط به ناحیه تخلخل می‌باشند، میزان افت جریان سیال در یک سلول محاسباتی متناسب با گرادیان فشار در هر یک از سلول‌های محاسباتی محیط متخلخل است، میزان این افت 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 معادله ۱۰ پارامتر  $\alpha$  بیانگر میزان نفوذپذیری بوده و ماتریس‌های قطری C, D به وسیله  $\alpha^{-1}$  و C ساده‌سازی شده‌اند.

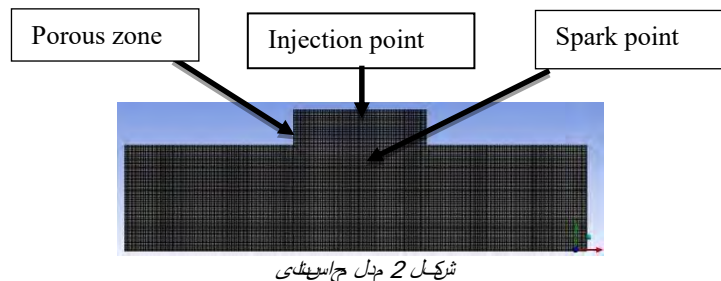
معادله انرژی ناحیه متخلخل

$$\frac{\partial}{\partial t} (\gamma \rho_f E_f + (1-\gamma) \rho_s E_s) + \nabla \cdot \left[ K_{eff} \nabla T - \left( \sum_i h_i J_i \right) + (\bar{\tau} \cdot \bar{v}) \right] + S_f^h \quad (12)$$

در معادله ۱۲ پارامتر E بیانگر میزان انرژی و زیرنویس S, f به ترتیب بیان کننده فاز جامد و مایع،  $\gamma$  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 می‌دهند.

### ۳- الگوی شبکه محاسباتی حل:

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



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، همچنین گرادیان دما در فاز جامد و سیال برابر صفر در است. مکان افشانه سوخت در بالای محیط متخلخل روی محور سیلندر و جرقه در وسط سیلندر زده می‌شود، میزان تخلخل در ناحیه متخلخل برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است.

### ۱-۳- شرایط مرزی<sup>۱۴</sup>

۱- شرط مرزی فشار ورودی<sup>۱۵</sup>

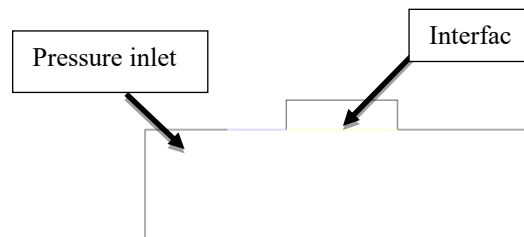
از شرط مرزی فشار ورودی برای دریچه هوا در چرخه مکش استفاده شده که بعد از زاویه ۱۸۰ درجه لنگ به شرط مرزی دیواره‌ای تغییر داده شده است.

۲- شرط مرزی سطح داخلی<sup>۱۶</sup>

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<sup>۱۷</sup>

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

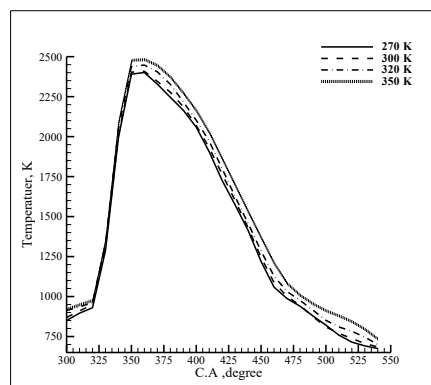


شکل ۳ شرایط مرزی حل

### ۴- نتایج و بحث روی نتایج

#### ۱-۴- تاثیر دمای اولیه هوای ورودی به سیلندر

در شکل ۴ تاثیر 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 یافته است. انبساط ناگهانی گازهای حاصل از احتراق فشار درون موتور را افزایش داده است. در دماهای پایین‌تر با توجه به چگالی بالاتر هوای بیشتری طی چرخه مکش وارد محفظه احتراق در دمای پایین‌تر 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 تاثیر گذار 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 حاصل شد.



شکل ۴ تاثیر دمای اولیه هوای ورودی بر دمای کاری موتور

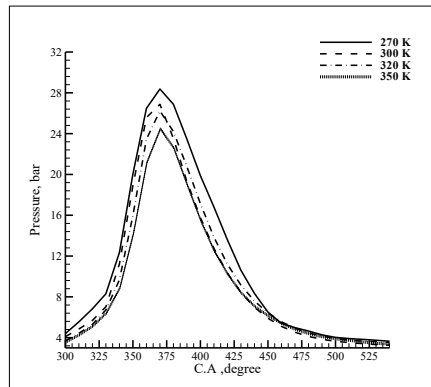
<sup>14</sup> Boundary condition

<sup>15</sup> Pressure Inlet

<sup>16</sup> Interface

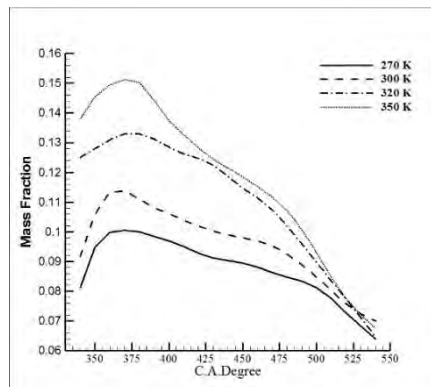
<sup>17</sup> Wall

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 ۵ بیشینه فشار به ازای حجم هوای ورودی بیشتر اتفاق می‌افتد. در حالتی که دما به ۳۵۰ کلوین رسیده حجم هوای ورودی کاهش یافته به نحوی که نسبت سوخت به هوا کم بوده و در نتیجه محصولات تولیدی نیز حجم کمتری داشته و انبساط گازهای حاصل از احتراق کم بوده که باعث کاهش فشار میانگین سیلندر و در نتیجه افت راندمان موتور شده است.



شکل ۵ تغییر دمای اولیه هوای ورودی و فشار میانگین سیلندر

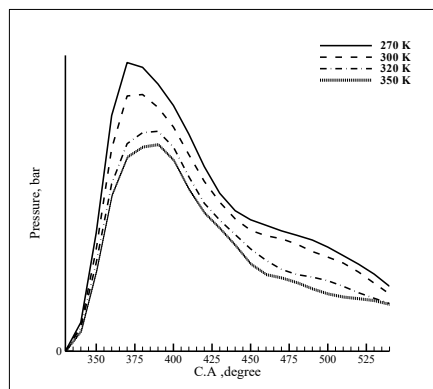
شکل ۶ میزان تولید آلاینده مونواکسید کربن را نشان می‌دهد که به شکل مستقیم تحت تاثیر نسبت سوخت و هوا در طول چرخه کاری موتور و فرآیند احتراق می‌باشد.



رسم‌خطی تغییر دمای اولیه هوای ورودی و تولید مونواکسید کربن

همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده با توجه به عدم وجود اکسیژن کافی در دمای اولیه بالاتر میزان تولید مونواکسید کربن بیشتر است. به نحوی که در دمای اولیه ۳۵۰ کلوین بیشینه مونواکسید کربن تولید شده و با کاهش دمای اولیه هوای ورودی به سیلندر به ۲۷۰ کلوین و افزایش چگالی هوا میزان اکسیژن کافی در موتور وجود داشته، در این حالت اختلاط مناسب بین قطرات سوخت و هوا پیش از فرآیند احتراق انجام شده و مونواکسید کمتری تشکیل شده است. اما رفتار آلاینده  $NO_x$  متفاوت است و با وجود تاثیر مستقیم بیشینه دما بر روی این آلاینده در دماهای بالاتر از ۲۲۰۰ کلوین امکان شروع اکسیداسیون برای نیتروژن‌های موجود در هوای ورودی به موتور فراهم است در این حالت عامل کلیدی در تشکیل آلاینده  $NO_x$  غلظت اکسیژن و نیتروژن درون ناحیه واکنش است. شکل ۷ میزان تشکیل آلاینده  $NO_x$  را در طول فرآیند کار موتور نشان می‌دهد.



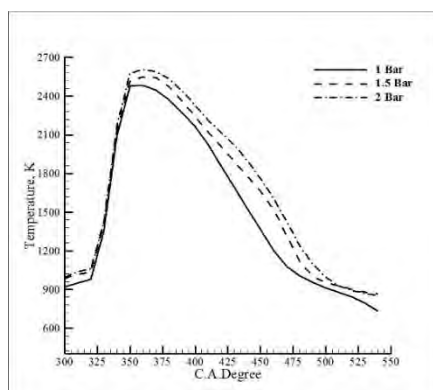


شکل ۷: تغییر دمای هوای ورودی نسبت به  $NO_x$

مطابق شکل ۷ با وجود اینکه بیشینه دما حاصل از احتراق در دمای ورودی ۳۵۰ کلوین بوده ولی بیشترین میزان تولید  $NO_x$  در دمای اولیه ۲۷۰ کلوین به وجود آمده است. که 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 ۲۲۰۰ کلوین شرایط برای تشکیل اکسیدهای نیتروژن فراهم بوده و در این حالت غلظت نیتروژن موجود در ناحیه واکنش اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

#### ۲-۴- تاثیر فشار اولیه هوای ورودی بر سیلندر

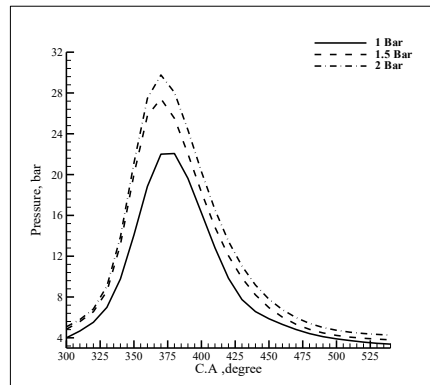
عامل کلیدی در کنترل میزان هوای ورودی به موتور فشار اولیه هوا می‌باشد. با افزایش فشار هوای ورودی به موتور رژیم جریان اغتشاش بیشتری داشته و مخلوط همگن تری برای احتراق فراهم می‌آید. همچنین فشار اولیه باعث شده چرخش رو به مرکز مخلوط افزایش یابد این امر پیش گرمایش مخلوط را افزایش داده و گرادیان‌ها دما را درون سیال کاهش می‌دهد. در این حالت دمای اولیه هوای موتور برابر ۳۲۰ کلوین در نظر گرفته شده است. شکل ۸ تاثیر فشار هوای ورودی بر دمای میانگین سیلندر را نشان می‌دهد.



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

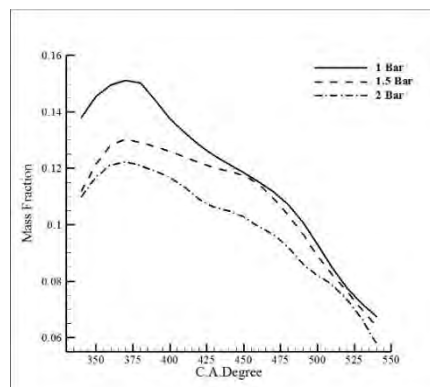
مطابق شکل ۸ در فشار اولیه بالاتر تبادل جرم بیشتر بین سیلندر و ناحیه متخلخل انجام شده و پیش گرمایش مخلوط بهتر انجام شده است. این امر باعث شده قطرات سوخت زودتر تبخیر شده و بنابراین سهم شعله پیش آمیخته نسبت به شعله نفوذی افزایش یافته و احتراق همگن در دمای بالاتر رخ دهد. از سوی دیگر با افزایش فشار اولیه 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 ۹ نشان داده شده است.



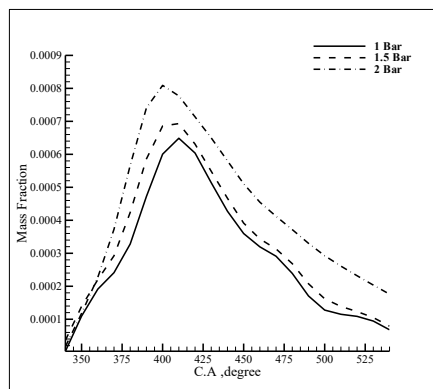
شکل ۹ تغییرات فشار متوسط ورودی موتور در

شکل ۹ نشان می‌دهد 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، تراکم سیال گرم از یک سو و حرکت رو به بالای سیلندر از سوی دیگر باعث افزایش فشار میانگین سیلندر می‌شود، این امر کار بزرگتر موتور و افزایش راندمان 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 ۱۰ روند تشکیل مونواکسید کربن را درون موتور نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ تغییرات فشار متوسط ورودی موتور در

مطابق شکل ۱۰ در فشار ورودی ۱ بار اکسیژن کافی در واکنش وجود نداشته و مونواکسید کربن بیشتری تشکیل شده است. افزایش فشار هوا 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. امارتار آلاینده  $NO_x$  متفاوت بوده و کمترین میزان از تولید را هنگامی که فشار ورودی برابر ۱ بار است. می‌توان بیان نمود که انرژی گرمایی حاصل از تبدیل مونواکسید کربن به دی‌اکسید کربن بر روی میزان  $NO_x$  تاثیر گذار است. شکل ۱۱ روند تشکیل آلاینده  $NO_x$  را در طول چرخه کاری موتور نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: تغییرات فشار اولیه موادی ورودی بر روی تولید  $NO_x$

مطابق شکل ۱۱ با 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 که  $NO_x$  در مقایسه با فشار ۱/۵ و ۲ بار به میزان کمتری تولید شود.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک مدل دوبعدی از یک موتور احتراق جرقه‌ای محیط متخلخل بررسی شده، خاصیت اساسی که مورد بررسی شده دست‌یابی به بهینه دما و فشار ورودی برای هوا در راستای کمینه‌سازی 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 پیش‌گرمایش سوخت و هوا به خوبی انجام شده و 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 یافته ولی به دلیل غلظت بیشتر نیتروژن موجود در سیلندر  $NO_x$  افزایش می‌یابد. همچنین فشار هوای ورودی به موتور رژیم جریان را درون موتور تغییر داده و 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 باعث شده میزان آلاینده مونواکسیدکربن نیز کاهش یابد.

## 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.wecillas, 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., Kaviyany 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 "شبیه سازی موتور تزریق مستقیم با استفاده از محیط متخلخل" فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات موتور، فصل هفتم، شماره بیست و سوم تابستان ۱۳۹۰