



## بررسی عددی آلاینده‌ی یک موتور تک‌سیلندر گازسوز آزمایشگاهی

صابر آزادشهرکی<sup>1</sup>، وحید اصفهانیان<sup>2\*</sup>، علی صلواتی‌زاده<sup>3</sup>، احمد جواهری<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران

3- پژوهشگر، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران

4- پژوهشگر، مهندسی مکانیک، پژوهشکده خودرو، سوخت و محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران

\*تلفون: 021-843951335، evahid@ut.ac.ir، تهران

### چکیده

با توجه به اهمیت آلاینده‌ی موتور و به دلیل هزینه‌بر بودن تست‌های آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی و پیش‌بینی آلاینده‌ی موتور، امری ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، یک مدل از موتور تک‌سیلندر گازسوز آزمایشگاهی با نرم‌افزار ای.وی.ال. بوست شبیه‌سازی شده و پارامترهای آلاینده‌ی آن بررسی شده است. کالیبراسیون موتور یادشده در دور ثابت 2000 دور بر دقیقه و در سه بار مختلف ترمزی (کم، متوسط و درجه کاملاً باز) و همچنین در سه نسبت تراکم مختلف (12، 14، 16) و نسبت هوا به سوخت استوکیومتری انجام شده است. پس از اطمینان از کالیبراسیون موتور در نسبت هوا به سوخت استوکیومتری، مقادیر عدد لاندرا در بازه 0.8-1.25 تغییر کرده و مقادیر آلاینده‌ی‌های اکسیدنیترژن و مونوکسیدکربن محاسبه شده است.

### اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی

دریافت: 16 آبان 1394

پذیرش: 25 دی 1394

ارائه در سایت: 25 بهمن 1394

کلیدواژه‌ها:

شبیه‌سازی عددی

موتور گازسوز تک‌سیلندر

آلاینده‌ی

## A Numerical Simulation for Prediction of Emission of Single Cylinder CNG Engine

Saber Azad<sup>1</sup>, Vahid Esfahanian<sup>2\*</sup>, Ali Salavatizadeh<sup>3</sup>, Ahmad Javaheri<sup>3</sup>

1- Vehicle, Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran.

2- School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Vehicle, Fuel and Environment Research Institute, University of Tehran, Tehran, Iran.

\*P.O.B. 14395-1335, Tehran, Iran, evahid@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Research Note

Received 07 November 2015

Accepted 15 January 2016

Available Online 14 February 2016

Keywords:

Numerical Simulation

CNG Engine

Emission

### ABSTRACT

According to the importance of the engine emission and because of the cost of the laboratory tests, it is necessary to simulate the engine via numerical methods. In this study a numerical simulation of single cylinder SI engine has been carried out to predict the internal combustion engine emission with the AVL BOOST software. The engine calibration has been performed at 2000 rpm engine speed and three loads (part load, mean load and WOT) and three compression ratios (12, 14, 16) with stoichiometric air fuel ratio. After the engine calibration, the Lambda value is changed in the range of 0.8 to 1.25 and the NOx and CO values are calculated.

### 1- مقدمه

از آنجایی که متان اصلی‌ترین محتوای گاز طبیعی است، به دلیل عدد اکتان بالا و گستره وسیع اشتعال، اجازه توسعه موتورهای را تا نسبت تراکم‌های بالا می‌دهد. علاوه بر این، مخلوط رقیق گاز نسبت به مخلوط استوکیومتری مقاوم‌تر در برابر کوبش داشته و بنابراین بازده گرمایی مخلوط رقیق گاز طبیعی می‌تواند به دلیل بالا بودن نسبت گرمایی ویژه، دمای پایین احتراق، نسبت تراکم بالا و کاهش افت‌های درجه‌ها، بیشتر باشد [1، 2]. در رابطه با آلاینده‌ی موتورهای گازسوز، پژوهشهای تجربی و عددی متعددی انجام شده است. مانیوانان و همکاران نشان دادند که میزان انتشار اکسیدهای نیتروژن حاصل از مخلوط رقیق گاز نسبت به موتور بنزینی، به دلیل دمای کمتر احتراق می‌تواند کاهش یابد [2]. دارادی و همکاران به بررسی تجربی

کارکرد موتور و آلاینده‌ی یک موتور تک‌سیلندر در چندین نسبت تراکم (پایین و در محدوده 6-9) پرداختند. نتایج نشان داد که آلاینده‌ی گاز طبیعی (به غیر از مونوکسیدنیترژن<sup>1</sup>) نسبت به دو گاز دیگر کمتر است [3]. دشتی و همکاران به صورت ترمودینامیکی موتورهای اشتعال جرقه‌ای را برای سوخت بنزین و گاز طبیعی شبیه‌سازی کردند. آن‌ها از مدل دو ناحیه‌ای برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی کارکرد، آلاینده‌ی و مصرف سوخت موتور استفاده کردند. همچنین ایشان مطالعات پارامتریک برای بررسی اثر نسبت هوا به سوخت، نسبت تراکم (تا حدود 11) و زمان جرقه در موتورهای اشتعال جرقه‌ای بنزینی و گازی سوخت پرداختند تا توانایی مدل خود را در پیش‌بینی کارکرد موتور نشان دهند [4].

1- NOx

### 3-1-1- مقادیر دبی جرمی

همان‌طور که پیشتر هم اشاره شد از مهم‌ترین توابع هدف در کالیبراسون موتور، مقادیر دبی جرمی سوخت و هواست. کالیبراسیون موتور به‌گونه‌ای انجام شده که مقادیر دبی سوخت و هوای عددی دقیقاً با مقادیر تجربی یکسان باشد و بیشتر خطا از مرتبه آزمایش (1%) قابل قبول است. در جدول 1 مقادیر دبی جرمی سوخت را در حالت عددی و تجربی در نقاط کاری یادشده مشاهده می‌شود. همان‌طور که مشخص است تمامی خطاها زیر 1% است. از آنجایی که میزان خطای هوا نیز با مقدار سوخت برابر است، از یاد مقادیر دبی هوا و خطای آن‌ها خودداری شده است، بنابراین مدل از لحاظ دبی جرمی در بالاترین دقت قرار دارد.

### 3-1-2- منحنی‌های فشار احتراق موتور

پس از مقادیر دقیق دبی سوخت و هوا، مهم‌ترین پارامتر در کالیبراسیون موتور منحنی فشار حاصل از احتراق موتور است. شکل 1، نمودار فشار حاصل از احتراق موتور در بار کامل و در نسبت تراکم 16 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل نتایج احتراق موتور حاصل از مدل عددی با مقادیر تجربی کاملاً یکسان بوده و مقادیر بیشینه فشار و زاویه رخداد آن نیز کاملاً یکسان است. فقط میزان کمی خطا در زمان باز شدن سوپاپ خروجی موتور وجود دارد که به مرور زمان و باز شدن دریچه ورودی موتور اصلاح می‌شود. مقادیر فشار در این محدوده زمانی بسیار پایین است، در مقدار فشار متوسط اندیکاتوری تأثیر ناچیزی دارد، اما به دلیل اهمیت مقدار جرم داخل سیلندر، باید در لحظه بسته‌شدن دریچه ورودی این مقدار خطا به میزان صفر کاهش یابد. با توجه به شکل 1 این مقدار خطا از بین رفته و منحنی تراکم سیلندر حاصل از مدل عددی و مقادیر تجربی کاملاً بر هم منطبق است. مقادیر جدول 2 نیز این مطلب را تأیید می‌کنند.

بدون توجه به منحنی فشار، میزان فشار متوسط اندیکاتوری معیار مناسبی برای کالیبراسیون نیست، زیرا فشار متوسط مقدار انتگرالی از منحنی فشار است و امکان دارد مقادیر فشار در انبساط و هم در تراکم با یکدیگر اختلاف داشته و در نهایت فشار متوسط اندیکاتوری عددی و تجربی یکسان شود.

جدول 1 مقادیر دبی سوخت تجربی و عددی در بار و نسبت تراکم مختلف

Table 1 Numerical and Experimental fuel rate

نسبت تراکم	میزان بار	دبی سوخت عددی (گرم بر سیکل)	دبی سوخت تجربی (گرم بر سیکل)	میزان خطا (درصد)
12	کم	0.01	0.01	صفر
12	متوسط	0.0141	0.014	0.7
12	کامل	0.0189	0.0190	0.5
14	کامل	0.0183	0.0182	0.5
16	کامل	0.0180	0.0179	0.5

جدول 2 مقادیر فشار متوسط اندیکاتوری در بار و نسبت تراکم مختلف

Table 1 The values of Pressure in different loads and CR

نسبت تراکم	میزان بار	فشار متوسط عددی (بار)	فشار متوسط تجربی (بار)	خطا (درصد)
12	کم	3.47	3.53	1.7
12	متوسط	5.08	5.20	2.0
12	کامل	7.18	7.65	6.5
14	کامل	7.1	7.52	5.6
16	کامل	7.1	7.52	5.6

عسگری و همکاران نتایج تجربی و عددی موتورهای گازسوز جرقه‌ای را گزارش دادند. ایشان از مدل صفر بعدی و چند ناحیه‌ای احتراق برای پیش‌بینی اکسید نیتروژن در مدل عددی استفاده کردند. با مقایسه میزان اکسید نیتروژن با مقادیر تجربی، برتری مدل چند ناحیه‌ای به مدل دونا حیه‌ای اثبات شد [5].

حاجیلوی و همکاران به بررسی تجربی اثر نسبت هوا به سوخت و آوانس کردن زمان جرقه در دوره‌های متفاوت پرداختند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان نسبت هوا به سوخت، میزان اکسید نیتروژن کاهش و میزان مونوکسید کربن<sup>1</sup> و هیدروکربن‌های نسوخته<sup>2</sup> افزایش یافته است. آوانس کردن زاویه جرقه نیز اکسیدهای نیتروژن را افزایش داده و بر مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته تأثیر چندانی نداشته است [6]. با مرور بر منابع مختلف مشخص می‌شود که در کارهای عددی کمتر به اثر بار موتور و نسبت تراکم‌های بالا در سیکل باز موتور پرداخته شده است [8,7]؛ بنابراین بررسی این دو پارامتر در یک سیکل باز موتور مهم است.

## 2- مدل عددی

همان‌طور که پیشتر هم اشاره شد در این پژوهش، مدل یک موتور تک سیلندر آزمایشگاهی با نرم‌افزار بوست<sup>3</sup> ساخته شده و سرانجام ضرایب مناسب جریان و احتراق مدل کالیبره شده‌اند.

کالیبراسیون مدل در سه نسبت تراکم 12، 14، 16 و همچنین در سه بار مختلف (شامل فشار متوسط ترمزی 2.4 و حالت دریچه کاملاً باز) انجام شده است. تمامی نقاط کاری در دور 2000 و در محدوده نقطه بیشینه گشتاور ترمزی است.

توابع هدف کالیبراسیون در پژوهش حاضر عبارتند از: منحنی فشار و مقادیر دبی جرمی سوخت و هوا. جهت کالیبراسون دقیق موتور با نتایج تجربی باید منحنی فشار در حالت تراکم و احتراق دقیقاً بر منحنی تجربی منطبق بوده (بیشینه خطای 1%) و میزان کمی خطا (زیر 5%) در قسمت انبساط قابل پذیرش است. مقادیر دبی جرمی سوخت و هوا باید از مرتبه خطای آزمایش (در این پژوهش 1% است) باشد. در پژوهش کنونی نیز مدل عددی به‌گونه‌ای کالیبره شده است که مقادیر دبی جرمی سوخت و هوا با خطای کمتر از 1% با مقادیر تجربی به‌دست‌آمده و منحنی فشار نیز با بیشترین میزان دقت با منحنی تجربی منطبق شده باشد. نتایج کالیبراسون موتور در قسمت پسین آورده شده است.

## 3- بحث و بررسی نتایج

در این قسمت ابتدا نتایج کالیبراسون موتور در مقایسه با مقادیر تجربی و در نسبت هوا به سوخت استوکیومتری آورده شده و پس از کالیبراسون موتور در این نسبت هوا به سوخت، مقدار هوا به سوخت تغییر کرده و نتایج عملکردی و آلایندگی موتور در محدوده عدد لاندای 0.8-1.25 آورده شده است.

### 3-1-1- نتایج کالیبراسون موتور

جهت بررسی صحت کالیبراسون موتور نتایج عددی و تجربی منحنی فشار احتراق موتور و همچنین مقادیر دبی جرمی سوخت و هوا در سه نسبت تراکم 12، 14، 16 و حالت دریچه کاملاً باز موتور آورده شده است.

1- CO  
2- HC  
3- AVL BOOST

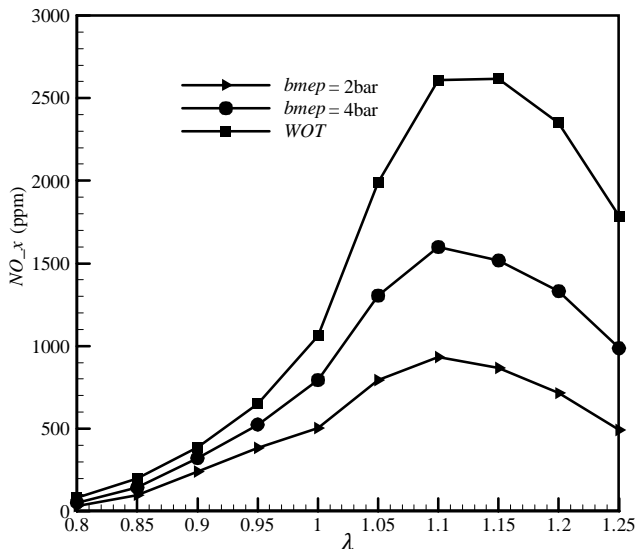


Fig.2 Variations of NOx in three loads for CR=12

شکل 2 منحنی تغییرات اکسید نیتروژن در بارهای مختلف و نسبت تراکم 12

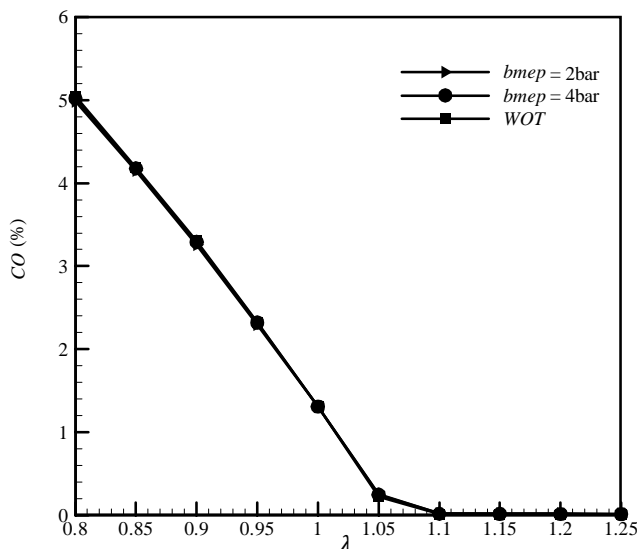


Fig.3 Variations of CO in three loads for CR=12

شکل 3 منحنی تغییرات مونوکسید کربن در بارهای مختلف و نسبت تراکم 12

مونوکسیدکربن نداشته باشد. شکل 3 کاملاً این امر را تأیید کرده و با توجه به شکل مشخص است که مقادیر مونوکسیدکربن در بارهای مختلف یکسان است.

### 2-2-3- تأثیر نسبت تراکم

با توجه به شکل 4 مشخص می‌شود که اثر نسبت تراکم به اندازه بار موتور بر آلاینده‌ی نیست. با توجه به نمودارها اعداد بسیار نزدیک به یکدیگر بوده و در منطقه غنی سوخت، مقادیر آلاینده‌ی در نسبت تراکم 12 به مقدار کمی بیشتر بوده و در ناحیه رقیق سوخت، مقادیر آلاینده‌ی در نسبت تراکم 16 بیشتر می‌شود. در نسبت تراکم‌های بالاتر مقادیر سوخت و هوا کمتر بوده و سرانجام فشار و دمای درون سیلندر تقریباً یکسان است. از آنجایی که در اعداد لاندای یکسان، مقدار آلاینده‌ی تابع دمای واکنش‌دهنده‌هاست؛ بنابراین از روی مقادیر آلاینده‌ی می‌توان دریافت که در نقاط کاری یادشده، مقادیر دما چگونه است. در نقاط کاری با مقدار آلاینده‌ی بیشتر، دما بالاتر و در نقاط

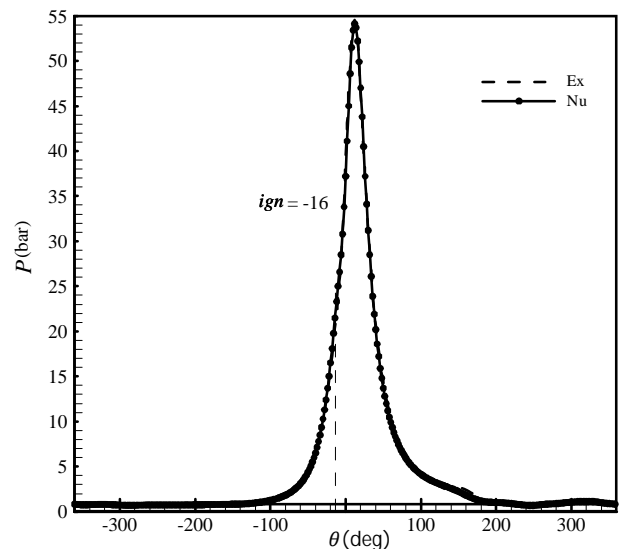


Fig.1 Pressure curve for CR=16 in WOT state

شکل 1 منحنی فشار احتراق موتور در بار کامل و نسبت تراکم 16

### 3-2- نتایج آلاینده‌ی

در این قسمت نتایج مربوط به دو آلاینده‌ی مهم مونوکسیدکربن، همچنین اکسید نیتروژن آورده شده و اثر بار موتور و نسبت تراکم نیز بررسی شده است. با توجه به دقیق بودن پروفیل فشار و مقدار جرم داخل سیلندر، انتظار می‌رود دمای داخل سیلندر نیز با مقادیر تجربی هم‌خوانی داشته و مقادیر آلاینده‌های به‌دست‌آمده به واقعیت موجود نزدیک باشد [9].

### 3-2-1- تأثیر بار موتور

شکل 2 منحنی تغییرات آلاینده‌ی اکسیدنیتروژن را در بارهای مختلف موتور نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص است که با افزایش بار موتور میزان این آلاینده حتی تا دو برابر هم می‌شود. میزان این آلاینده تابع دو متغیر اکسیژن موجود و دمای درون سیلندر است. از آنجایی که با افزایش عدد لاندای میزان اکسیژن موجود در درون سیلندر افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود که مقدار اکسیدنیتروژن هم پیوسته زیاد شود، اما به دلیل احتراق مناسب موتور، مقادیر فشار و دمای درون سیلندر در اعداد حدود لاندای 1، به یک نقطه بیشینه رسیده و پس از آن آغاز به کاهش می‌کند. با کاهش دما بدیهی است که مقدار اکسیدنیتروژن، در نقطه‌ای به مقدار بیشینه برسد و پس از آن کم شود. با توجه به شکل 2، نقطه بیشینه عدد لاندای 1.1 بوده و با نتایج تجربی نیز مطابقت دارد [9].

با توجه به مطالب گفته شده، انتظار می‌رود که با افزایش بار موتور و دمای درون سیلندر مقادیر اکسیدنیتروژن نیز افزایش یابد که نتایج شکل 2 نیز این امر را تأیید می‌کند.

بر خلاف اکسیدنیتروژن، میزان مونوکسیدکربن به شدت تابع اکسیژن موجود در سیلندر است؛ بنابراین با افزایش عدد لاندای و در نتیجه اکسیژن موجود، انتظار می‌رود که مقادیر مونوکسیدکربن کاهش یافته و به دی‌اکسید کربن تبدیل شوند. شکل 3 نیز مؤید این مطلب است. با توجه به شکل، پس از مخلوط استوکیومتری مقادیر مونوکسیدکربن به شدت افت کرده تا تقریباً به صفر برسد.

از آنجایی که با افزایش بار موتور، مقدار اکسیژن موجود (نسبت به حالت استوکیومتری) تغییر نمی‌کند، باید افزایش بار موتور تأثیری بر میزان

میزان مونوکسیدکربن تقریباً ثابت است. برخلاف بار موتور، با افزایش نسبت تراکم تغییر محسوسی در مقادیر اکسیدنیترژن مشاهده نشده و مقادیر مونوکسیدکربن نیز به میزان اندکی تغییر می‌کند. در رابطه با عدد لاند، نتایج حل عددی نشان می‌دهد که بیشترین آلاینده‌ی اکسیدنیترژن در تمام بارها و نسبت تراکم‌ها، در نزدیکی لاندای 1.1 رخ می‌دهد که با نتایج تجربی نیز هم‌خوانی دارد. با افزایش عدد لاند مقدار مونوکسیدکربن پیوسته کاهش یافته تا به نزدیک صفر برسد. روند کاهشی مونوکسیدکربن نیز با نتایج تجربی مطابق است.

#### 5- فهرست علائم

نسبت تراکم	CR
نتایج تجربی	Ex
زمان آغاز جرقه	ign
نتایج عددی	Nu
فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )	P
حالت دریچه کاملاً باز	WOT
علائم یونانی	
عدد لاند	$\lambda$
زاویه میل لنگ (درجه)	$\theta$

#### 6- تقدیر و تشکر

نگارندگان این مقاله، از مجموعه پژوهشکده خودر، سوخت و محیط‌زیست دانشگاه تهران که بستر مناسبی را جهت انجام پژوهش حاضر به وجود آوردند، کمال تشکر و قدردانی می‌کند.

#### 7- مراجع

- [1] P. Corbo, M. Gambino, S. Iannaccone, A. Unich, Comparison between lean-burn and stoichiometric technologies for CNG heavy-duty engines, *SAE Technical Paper*, No.950057, 1995.
- [2] A. Manivannan, P. T. Porai, S. Chandrasekaran, R. Ramprabhu, Lean Burn Natural Gas Spark Ignition Engine- An Overview, *SAE Technical Paper*, No. 2003-01-0638, 2003.
- [3] P. M. Darade, R. S. Dalu, Investigation of performance and emissions of CNG fuelled VCR engine, *Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol.3, No. 1, pp. 77-83, 2013.
- [4] D. Mehrnoosh, H. A. Asghar, M. A. Asghar, Thermodynamic model for prediction of performance and emission characteristics of SI engine fuelled by gasoline and natural gas with experimental verification, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2213-2225, 2012.
- [5] O. Asgari, S. K. Hannani, R. Ebrahimi, Improvement and experimental validation of a multi-zone model for combustion and NO emissions in CNG fueled spark ignition engine, *Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 4, pp. 1205-1212, 2012.
- [6] A. Hajiloi, The experimental effect of air-fuel ratio and ignition timing on emission, *15<sup>th</sup> Annual International Mechanical Engineering Conference*, Tehran, Iran, 2006. (in Persian)
- [7] A. H. Kakaee, A. Paykani, Research and development of natural-gas fueled engines in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 26, No. 1, pp. 805-821, 2013.
- [8] T. Korakianitis, A. M. Namasivayam, R. J. Crookes, Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 89-112, 2011.
- [9] G. P. Merker, C. Schwarz, *Combustion Engines Development*, pp. 193-196, Berlin: Springer, 2012.

کاری که مقادیر آلاینده‌ی کمتر است، مقادیر دما کمتر خواهند بود. برخلاف اکسیدنیترژن، آن‌گونه که در شکل 5 مشهود است، نتایج آلاینده‌ی مونوکسیدکربن مشابه حالت پیشین است. در واقع از آنجایی که این آلاینده تابع میزان اکسیژن موجود در محفظه احتراق است، با تغییر نسبت تراکم نیز (مشابه تغییر بار موتور) تغییر محسوسی در مقادیر مونوکسیدکربن مشاهده نشده و تغییرات بسیار اندک است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل یک موتور تک‌سیلندر آزمایشگاهی گازسوز شبیه‌سازی و کالیبره شده و به بررسی اثر نسبت تراکم و بار موتور بر آلاینده‌ی موتور در نسبت‌های مختلف هوا به سوخت و در دور ثابت پرداخته شد. نتایج نشان داد که با افزایش بار موتور، میزان آلاینده‌ی اکسیدنیترژن افزایش یافته، اما

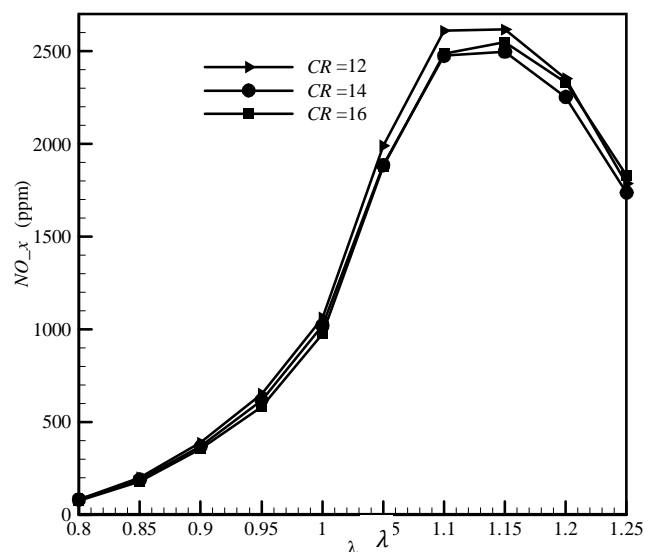


Fig.4 Variations of NOx in three CR for WOT state

شکل 4 منحنی تغییرات اکسیدنیترژن در نسبت تراکم‌های مختلف و بار کامل

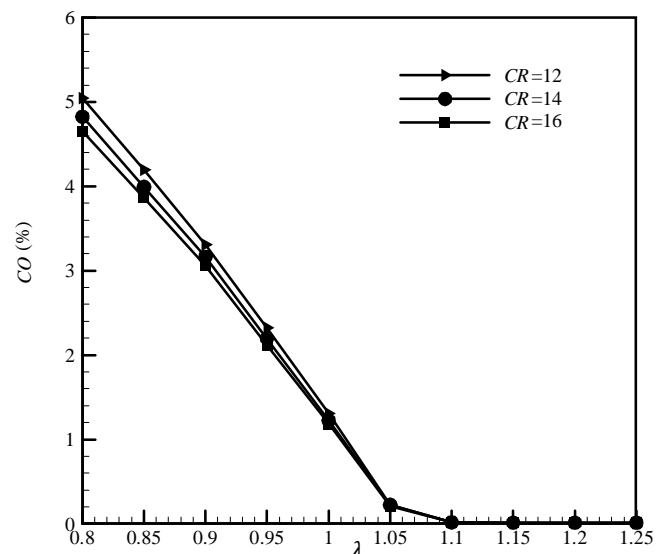


Fig.5 Variations of CO in three CR for WOT state

شکل 5 منحنی تغییرات مونوکسیدکربن در بار کامل و نسبت‌های تراکم مختلف