ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir



# $^{4}$ مىابر آزادشىھر كى<sup>1</sup>، وحيد اصفھانيان $^{2^{*}}$ ، على صبلواتىزاده<sup>3</sup>، احمد جواھرى

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

تېران، صندوق پستى 1335-evahid@ut.ac.ir

چکیدہ	اطلاعات مقاله
با توجه به اهمیت آلایندگی موتور و به دلیل هزینهبربودن تستهای آزمایشگاهی، شبیهسازی عددی و پیشبینی آلایندگی 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 آلایندگی آن بررسی شده است. کالیبراسیون موتور یادشده در دور ثابت 2000 دور بر دقیقه و در سه بار مختلف ترمزی (کم، متوسط و دریچه	یادداشت پژوهشی دریافت: 16 آبان 1394 پذیرش: 25 دی 1394 ارائه در سایت: 25 بهمن 1394
کاملا باز) و همچنین در سه نسبت تراکم مختلف (12 ,14, 14) و نسبت هوا به سوخت استوکیومتری انجام شده است. پس از اطمینان از	كليد واژگان:
کالیبراسیون موتور در نسبت هوا به سوخت استوکیومتری، مقادیر عدد لاندا در بازه 0.8-1.25 تغییر کرده و مقادیر آلایندگیهای اکسیدنیتروژن	شبیهسازی عددی
و مونوکسیدکرین محاسبه شده است.	موتور گازسوز تکسیلندر اَلایندگی

# 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	Abstract
Research Note Received 07 November 2015 Accepted 15 January 2016 Available Online 14 February 2016	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
Keywords: Numerical Simulation CNG Engine	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

کارکرد موتور و آلایندگی یک موتور تکسیلندر در چندین نسبت تراکم (يايين و در محدوده 6-9) يرداختند. نتايج نشان داد كه آلايندگي گاز طبيعي (به غير از مونوكسيدنيتروژن<sup>1</sup>) نسبت به دو گاز ديگر كمتر 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 شبیه سازی و پیش بینی کارکرد، آلایندگی 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 یرداختند تا توانایی مدل خود را در پیشبینی کار کرد موتور نشان دهند [4].

از آنجایی که متان اصلیترین محتوای گاز طبیعی است، به دلیل عدد اکتان بالا و گستره وسیع اشتعال، اجازه توسعه موتورها را تا نسبت تراکمهای بالا مىدهد. علاوهبر اين، مخلوط رقيق گاز نسبت به مخلوط استوكيومتريك مقاومت بالاتری در برابر کوبش داشته و بنابراین بازده گرمایی مخلوط رقیق گاز طبیعی میتواند به دلیل بالابودن نسبت گرمایی ویژه، دمای پایین احتراق، نسبت تراکم بالا و کاهش افتهای دریچهها، بیشتر باشد [2,1]. در رابطه با آلایندگی 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 كمتر احتراق مى تواند كاهش يابد [2]. دارادى و همكاران به بررسى تجربى

1- NOx



Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عسگری و همکاران نتایج تجربی و عددی موتورهای گازسوز جرقهای را گزارش دادند. ایشان از مدل صفربعدی و چند ناحیهای احتراق برای پیش بینی اکسید نیتروژن در مدل عددی استفاده کردند. با مقایسه میزان اکسیدنیتروژن با مقادیر تجربی، برتری مدل چند ناحیهای به مدل دوناحیهای اثبات شد [5].

حاجیلوی و همکاران به بررسی تجربی اثر نسبت هوا به سوخت و آوانس کردن زمان جرقه در دورهای متفاوت پرداختند. آنان به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان نسبت هوا به سوخت، میزان اکسیدنیتروژن کاهش و میزان مونوکسیدکربن<sup>1</sup>وهیدروکربنهای نسوخته<sup>2</sup> افزایش یافته است. آوانس کردن زاویه جرقه نیز اکسیدهای نیتروژن را افـزایش داده و بـر مونوکسیدکربن و هیدروکربنهای نسوخته تأثیر چنـدانی نداشته است [6]

با مرور بر منابع مختلف مشخص می شود 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 تکسیلندر 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 14, 12 و همچنین در سه بار مختلف (شامل فشار متوسط ترمزی 2.4 و حالت دریچه کاملا 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 دقیقا بر منحنی تجربی منطبق بوده (بیشینه خطای ۱%) 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 ۱% است) باشد. در پژوهش کنونی نیز مدل عددی به گونهای 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 2.8-1.25 آورده شده است.

## 1-3- نتايج كاليبراسون 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 16, 14, 12 و حالت دریچه کاملا باز موتور آورده شده است.

## 1-1-3- مقادیر دبی جرمی

همان طور که پیشتر هم اشاره شد از مهمترین توابع هدف در کالیبراسون موتور، مقادیر دبی جرمی سوخت و هواست. کالیبراسیون موتور به گونهای انجام شده که مقادیر دبی سوخت و هوای عددی دقیقا 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 می شود. همان طور 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.

#### 3-1-3- 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 ۱، نمودار فشار حاصل از احتراق موتور در بار کامل و در نسبت تراکم ۱۵ را نشان می دهد. با توجه به شکل نتایج احتراق موتور حاصل از مدل عددی با مقادیر تجربی کاملا یکسان بوده و مقادیر بیشینه فشار و زاویه رخداد آن نیز کاملا یکسان است. فقط میزان کمی خطا در زمان باز شدن سوپاپ خروجی موتور وجود دارد که به محدوده زمانی و باز شدن دریچه ورودی موتور اصلاح می شود. مقادیر فشار در این ناچیزی دارد، اما به دلیل اهمیت مقدار جرم داخل سیلندر، باید در لحظه بسته شدن دریچه ورودی این مقدار خطا به میزان صفر کاهش یابد. با توجه به شکل ۱ این مقدار خطا از بین رفته و منحنی تراکم سیلندر حاصل از مدل عددی و مقادیر تجربی کاملا بر هم منطبق است. مقادیر جدول 2 نیز این مطلب را تأیید می کنند.

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 1Numerical and Experimental fuel rate

میزان خطا <b>(</b> درصد)	دبی سوخت تجربی(گرم بر سیکل)	دبی سوخت عددی(گرم بر سیکل)	میزان بار	نسبت تراکم
صفر	0.01	0.01	کم	12
0.7	0.014	0.0141	متوسط	12
0.5	0.0190	0.0189	كامل	12
0.5	0.0182	0.0183	كامل	14
0.5	0.0179	0.0180	كامل	16
لف	سبت تراكم مختا	اندیکاتوری در بار و ن	ادير فشار متوسط	جدول 2 مق

Table 1 The values of Pressure in different loads and CR							
ميزان	فشار متوسط	فشار متوسط	میزان بار	نسبت			
خطا(درصد)	تجربی(بار)	عددی(بار)		تراكم			
1.7	3.53	3.47	كم	12			
2.0	5.20	5.08	متوسط	12			
6.5	7.65	7.18	كامل	12			
5.6	7.52	7.1	كامل	14			

7.1

كامل

16

مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1395، دوره 16، شماره 2

7.52

5.6

DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.2.39.4

<sup>1-</sup> CO

<sup>3-</sup> AVL BOOST



**شکل 2** منحنی تغییراتاکسید 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 کاملا این امر را تأیید کرده و با توجه به شکل مشخص است که مقادیر مونوکسیدکربن در بارهای مختلف یکسان است.

#### 2-3 -2- تأثير نسبت تراكم

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



Fig.1 Pressure curve for CR=16 in WOT state شكل 1 منحنى فشار احتراق موتور در بار كامل و نسبت تراكم 16  $\mathbf{1}$ 

#### 2-3- نتايج آلايندگي

در این قسمت نتایج مربوط به دو آلایندگی 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 واقیعت موجود نزدیک باشد [9].

#### 3-2 -1- تأثير بار موتور

شکل 2 منحنی تغییرات آلایندگی 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 لاندا میزان اکسیژن موجود در درون سیلندر افزایش می یابد، انتظار می رود 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 می کند. با کاهش دما بدیهی است که مقدار اکسیدنیتروژن، در نقطه ای به مقدار بیشینه برسد و پس از آن کم شود. با توجه به شکل 2، نقطه بیشینه عدد لاندای 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 می کند.

بر خلاف اکسیدنیتروژن، میزان مونوکسیدکربن به شدت تابع اکسیژن موجود در سیلندر است؛ بنابراین با افزایش عدد لاندا و در نتیجه اکسیژن موجود، انتظار میرود که مقادیر مونوکسیدکربن کاهشیافته 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 تقریبا 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

کاری که مقادیر آلایندگی کمتر است، مقادیر دما کمتر خواهند بود. برخلاف اکسیدنیتروژن، آن گونه که در شکل 5 مشهود است، نتایج آلایندگی 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-نتيجه گيري

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



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





Fig.5 Variations of CO in three CR for WOT state شکل 5 منحنی تغییرات مونوکسیدکربن در بار کامل و نسبتهای تراکم مختلف

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



#### 6-تقدير و تشكر

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

- 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 فارسی)
- [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.