



## بررسی عددی احتراق بیودیزل به دست آمده از روغن کلزا بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور دیزل

محمد سعیدان<sup>1</sup>، محمدحسن سعیدی<sup>2\*</sup>، حمیدرضا فجرى<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

2- استاده، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد احتراق شرکت تحقیقات موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11155-9567، saman@sharif.edu

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 12 دی 1395

پذیرش: 28 اسفند 1395

ارائه در سایت: 03 اردیبهشت 1396

کلید واژگان:

موتور دیزل

بیودیزل

روغن کلزا

دوده

آلاینده‌های اکسید نیترا

### چکیده

در این مقاله احتراق بیودیزل به دست آمده از روغن کلزا در موتور دیزل ملی به صورت عددی بررسی و با استفاده از مدل صحنه‌گذاری شده، تاثیر زمان بندی بازش، بازگردانی گازهای خروجی و افزایش فشار پرخوران بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور بررسی شد. در این پژوهش از سه سوخت دیزل خالص، بیودیزل خالص و ترکیب 50 درصد بیودیزل و 50 درصد سوخت دیزل استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که افزایش درصد بیودیزل موجب کامل‌تر شدن احتراق شده و در نتیجه بازده حرارتی را افزایش و آلاینده مونوکسید-کربن را کاهش می‌دهد. بیودیزل ارزش حرارتی کمتری نسبت به سوخت دیزل دارد در نتیجه احتراق این سوخت گرمای کمتری نسبت به سوخت دیزل آزاد کرده و توان تولیدی را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر کمتر بودن گرمای آزاد شده دمای هوای درون سیلندر را نیز کاهش داده و موجب کاهش تولید آلاینده نیترات‌اکسید می‌شود. بیودیزل در ساختار خود دارای اتم اکسیژن نیز هست و بنابراین در بعضی حالات که کمبود اکسیژن برای ترکیب شدن با سوخت احساس می‌شود، وجود اکسیژن در ساختار سوخت موجب کامل‌تر شدن احتراق شده و این امر کمتر بودن ارزش حرارتی بیودیزل را جبران کرده و موجب افزایش توان تولیدی و همچنین آلاینده نیترات‌اکسید می‌شود.

## Numerical evaluation of engine performance and emission characteristics of rapeseed oil and its blends in diesel engines

Mohammad saeedan<sup>1</sup>, Mohammad Hassan Saidi<sup>1\*</sup>, Hamid Reza Fajri<sup>2</sup>

1- School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2- Combustion Department, Irankhodro Powertrain Company (IPCO), Tehran, Iran

\*P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, saman@sharif.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 01 January 2017  
Accepted 18 March 2017  
Available Online 23 April 2017

Keywords:  
Diesel engine  
Biofuel  
Rapeseed oil  
Nitrogen oxide

### ABSTRACT

In this study, a numerical investigation of using Rapeseed Oil in National Diesel Engine (EFD) has been developed and validated against the experimental data. By using validated model, the effect of injection timing, exhaust gas recirculation and initial pressure on performance and emissions of this engine with three different range of using diesel and biodiesel fuels have been investigated. The results from simulation showed that the increase in biofuel percentage increase thermal efficiency and decrease monoxide carbon emission. Biofuel has a lower heating value compared to diesel fuel, resulting in a lower combustion heat release and lower power. On the other hand lower heat release reduces the temperature of cylinder contents which tends to reduce nitrogen oxide. In some cases that there is an Oxygen shortage in the cylinder, the existence of Oxygen in the structure of the fuel will complete the combustion process and it may improve the combustion efficiency compared to diesel fuel. The increase in heat release due to higher combustion efficiency of biofuel may compensate for its low heating value and result in increasing the engine power and nitrogen oxide emission.

### 1- مقدمه

موتورهای اشتعال تراکمی (دیزل) جایگزین موتورهای اشتعال جرقه‌ای (بنزینی) شوند. همچنین تجدیدناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی، توجه بسیاری از محققان را به سمت تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر، مانند بیودیزل‌ها جلب کرده است. از آنجایی که بسیاری از سوخت‌های به‌دست آمده از روغن‌های گیاهی، خواص نزدیکی با سوخت دیزل دارند، قابل استفاده در موتورهای اشتعال-تراکمی که با سوخت دیزل کار می‌کنند، می‌باشند.

در زمینه بررسی احتراق بیودیزل در موتورهای دیزل، پژوهش‌های بسیاری به

در جوامع امروزی اهمیت حمل و نقل و استفاده از وسایل نقلیه موتوری بر کسی پوشیده نیست، اما از طرفی بحران انرژی و همچنین آلاینده‌های خروجی این موتورها به‌عنوان دو مشکل اساسی پیش‌روی موتورهای درون‌سوز است و بقای عمر این وسایل را تهدید می‌کند. به همین دلیل موتورهای دیزل به علت بالاتر بودن بازده و مصرف سوخت پایین‌تر توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده‌اند و در بسیاری از جوامع تلاش می‌شود که در وسایل نقلیه به خصوص در خودروهای سواری،

Please cite this article using:

M. saeedan, M. H. Saidi, H. R. Fajri, Numerical evaluation of engine performance and emission characteristics of rapeseed oil and its blends in diesel engines, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 277-284, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.sru.ir

نشده<sup>۳</sup> و نرمال هپتان به‌عنوان سوخت جایگزین برای روغن کلزا استفاده شده است [8]. جدول 2 خواص فیزیکی و شیمیایی این سوخت زیستی را در مقایسه با سوخت دیزل نشان می‌دهد. برای شبیه‌سازی سینتیک احتراق این سه ترکیب از سینتیک احتراق کاهش یافته که توسط آقای ریتز توسعه داده شده است، استفاده شده است [9].

در این مدل برای مدل‌سازی آشفته‌گی از مدل RANS استفاده شده است که خود شامل زیرمدل‌هایی می‌باشد [10]. برای مدل‌سازی احتراق نیز از مدل SAGE [11] و برای مدل‌سازی فروپاشی سوخت، از مدل KH-RT [12] که ترکیبی از دو مدل KH [13] و RT [14] است، استفاده شده است. همچنین در این مدل برای شبیه‌سازی برخورد و انعقاد قطرات از مدل اوروک<sup>۴</sup> [15]، برای تبخیر قطرات از مدل فروسلینگ<sup>۵</sup> [16] و برای برخورد قطرات به دیواره نیز از مدل ریوند<sup>۶</sup> استفاده شده است [17].

جدول 1 مشخصات هندسی و عملکردی موتور دیزل ملی

**Table 1** Geometrical specifications of national diesel engine (EFD)

مقدار	واحد	شرح
1496	cc	حجم جابجایی موتور
4	-	تعداد سیلندرها
76	mm	قطر سیلندر
82.5	mm	طول مسیر پیستون
1.086	-	طول مسیر پیستون قطر استوانه
16.5	-	نسبت تراکم
90	kW	حداکثر قدرت
4000	Rpm	حداکثر قدرت در سرعت
256	Nm	حداکثر گشتاور
1750-2600	Rpm	حداکثر گشتاور در سرعت
122	Hp	حداکثر قدرت
4	-	تعداد دریچه در یک سیلندر
انژکتوری	-	سیستم سوخت‌رسانی
گازوئیل	-	نوع سوخت
1.1	deg ATDC	زاویه شروع پاشش
124	Deg	زاویه پاشش سوخت
1.33	Bar	فشار اولیه

جدول 2 مشخصات فیزیکی و شیمیایی روغن کلزا [17]

**Table 2** Chemical and physical specifications of rapeseed oil

مشخصه سوخت	واحد	روغن کلزا	سوخت دیزل
چگالی در دمای 15 <sup>o</sup> C	kg/m <sup>3</sup>	886-900	817-856
ویسکوزیته سینماتیکی در دمای 20 <sup>o</sup> C	mm <sup>2</sup> /s	6-9	2.9-5.5
ارزش حرارتی	MJ/kg	37.02-37.2	42.7-43.5
عدد ستان	-	45-59	47.1-58.6
درصد کربن	%	76.6-78	86-86.4
درصد هیدروژن	%	12.1	13.4-14
درصد اکسیژن	%	10-11	

<sup>3</sup> Methyl 9-Decenoate

<sup>4</sup> O'Rourke

<sup>5</sup> Frossling

<sup>6</sup> Rebound/slide

صورت آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. تسولاکیس و همکاران [1] در سال 2007 به‌صورت آزمایشگاهی به بررسی تاثیر افزودن روغن کلزا بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل پرداختند. طبق نتایج آن‌ها با افزایش درصد بیودیزل، توان تولیدی و آلایندگی مونوکسیدکربن کاهش و آلایندگی اکسید نیترات افزایش یافت. همچنین با پیش‌اندازی پاشش توان تولیدی و آلایندگی اکسید نیترات کاهش و آلایندگی مونوکسیدکربن افزایش یافت. کن و همکاران [2] در سال 2012 به‌صورت آزمایشگاهی تاثیر افزودن روغن کلزا بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل را بررسی کردند. طبق نتایج حاصل از آزمایش با افزایش درصد بیودیزل آلایندگی اکسیدنیترات افزایش و مونوکسیدکربن و توان تولیدی موتور کاهش یافت. لیکی و همکاران [3] در سال 2012 به‌صورت آزمایشگاهی تاثیر افزودن روغن کلزا را بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها با افزایش درصد بیودیزل، فشار درون سیلندر، آلایندگی مونوکسیدکربن و آلایندگی اکسیدنیترات کاهش یافت. همچنین با افزایش فشار پاشش، فشار درون سیلندر و آلایندگی مونوکسیدکربن کاهش و آلایندگی اکسیدنیترات افزایش یافت. بازگردانی گازهای خروجی نیز تاثیر محسوس بر فشار درون سیلندر نداشت اما موجب افزایش آلایندگی مونوکسیدکربن و کاهش آلایندگی اکسیدنیترات شد. لسنیک و همکاران [4] در سال 2012 به‌صورت عددی تاثیر افزودن بیودیزل را بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل بررسی کردند. طبق نتایج آنها با افزایش درصد بیودیزل، توان تولیدی موتور، آلایندگی مونوکسیدکربن و آلایندگی اکسید نیترات کاهش یافت. یوشاکف و همکاران [5] در سال 2013 به‌صورت آزمایشگاهی تاثیر افزودن روغن ماهی را بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل بررسی کردند. طبق نتایج حاصل از آزمایش آن‌ها با افزایش درصد بیودیزل، توان تولیدی تغییر چندانی نکرد اما آلایندگی اکسید نیترات افزایش و آلایندگی‌های مونوکسیدکربن و سولفورکسیدها کاهش یافت. ارکان و همکاران [6] در سال 2014 تاثیر افزودن روغن کلزا را بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل بررسی کردند. طبق نتایج حاصل از آزمایش، با افزایش درصد بیودیزل توان تولیدی موتور تغییر چندانی نکرد اما در عوض دوره احتراق افزایش و آلایندگی مونوکسیدکربن کاهش پیدا کرد. کگل و همکاران [7] در سال 2015 به‌صورت عددی تاثیر افزودن روغن کلزا را بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور بررسی کردند. طبق نتایج حاصل از شبیه‌سازی با افزایش درصد بیودیزل، توان تولیدی موتور، آلایندگی مونوکسیدکربن و آلایندگی اکسید نیترات کاهش یافت.

در این پژوهش نیز با استفاده از مدل صحنه‌گذاری شده در نرم‌افزار کانورج<sup>۱</sup>، احتراق بیودیزل به‌دست آمده از روغن کلزا در موتور دیزل ملی بررسی شده است و تاثیر زمان‌بندی پاشش، افزایش فشار پرخوران و بازگردانی گازهای خروجی بر عملکرد و آلایندگی‌های خروجی موتور دیزل ملی بررسی شده است.

## 2- شبیه‌سازی عددی

در این پژوهش برای صحنه‌گذاری مدل، از داده‌های تجربی مرکز تحقیقات موتور ایران‌خودرو استفاده شده است. مشخصات هندسی و همچنین مشخصات عملکردی موتور مورد استفاده مطابق جدول 1 می‌باشد. همچنین "شکل 1" نمای از این موتور را نشان می‌دهد.

برای شبیه‌سازی عددی احتراق روغن کلزا در موتور دیزل ملی، از نرم‌افزار کانورج استفاده شده است. این نرم‌افزار احتراق را به‌صورت سیکل بسته و از لحظه باز شدن سوپاپ هوا تا لحظه باز شدن سوپاپ دود، مدل می‌کند. برای مدل کردن سوخت دیزل، این نرم‌افزار از فرمول شیمیایی نرمال هپتان با خواص فیزیکی سوخت دیزل استفاده می‌کند. همچنین در این نرم‌افزار روغن کلزا تعریف نشده است و به همین دلیل در این پژوهش از ترکیب متیل‌استرها یازده کربنه اشباع شده<sup>۲</sup> و اشباع

<sup>1</sup> CONVERGE

<sup>2</sup> Methyl-Decanoate

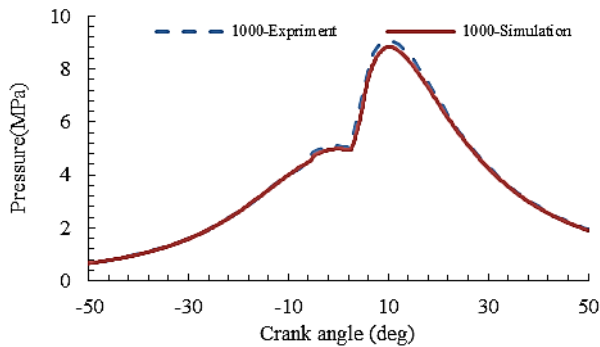


Fig. 3 Comparison of in-cylinder pressure of simulated and experimental data at 1000 rpm

شکل 3 تغییرات فشار درون سیلندر برحسب زاویه لنگ در سرعت 1000 دور بر دقیقه در مقایسه با نمودار تجربی

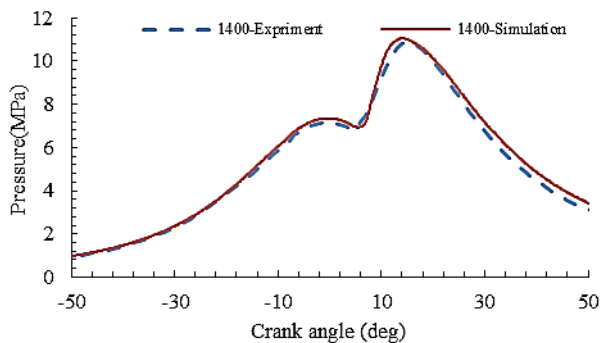


Fig. 4 Comparison of in-cylinder pressure of simulated and experimental data at 1400 rpm

شکل 4 تغییرات فشار درون سیلندر برحسب زاویه لنگ در سرعت 1400 دور بر دقیقه در مقایسه با نمودار تجربی

جدول 3 مقایسه آلاینده اکسیدنیترات خروجی از نرم‌افزار و تجربی در دو سرعت 1000 و 1400 دور بر دقیقه

Table 3 Comparison of nitrogen oxide of simulated and experimental data at 1000rpm and 1400 rpm

سرعت	مقدار اکسیدنیترات تجربی (kg)	مقدار اکسیدنیترات به دست آمده از نرم افزار (kg)
1000 rpm	4.03E-07	4.41E-07
1400 rpm	6.12E-07	5.37E-07

جدول 4 مقایسه آلاینده مونوکسیدکربن خروجی از نرم‌افزار و تجربی در دو سرعت 1000 و 1400 دور بر دقیقه

Table 4 Comparison of carbon monoxide of simulated and experimental data at 1000rpm and 1400 rpm

سرعت	مقدار مونوکسیدکربن تجربی (kg)	مقدار مونوکسیدکربن به دست آمده از نرم افزار (kg)
1000 rpm	2.01E-06	1.55E-05
1400 rpm	6.89E-06	5.45E-06

پیش‌بینی عملکرد موتور در حالات مختلف نشان می‌دهد. در ادامه تاثیر افزایش فشار پرخوران، تغییر زمان‌بندی پاشش و بازگردانی گازهای خروجی بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور بررسی شده است.

### 1-3- بررسی تاثیر افزایش فشار پرخوران

در این بخش تاثیر افزایش فشار پرخوران بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور دیزل ملی بررسی شده است. مطابق جدول 1 فشار اولیه موتور برابر با 1.33 بار است و در سه نوبت به ترتیب به 1.43، 1.53 و 1.63 بار افزایش



Fig. 1 View of National Diesel engine

شکل 1 نمای از موتور دیزل ملی

برای تعیین استقلال از شبکه، نمودار فشار درون سیلندر برحسب زاویه لنگ در سه حالت عملکردی که تعداد سلول‌های مدل 160000، 180000 و 220000 بود، مقایسه شد. همان‌طور که در شکل مشخص است، با تغییر تعداد سلول‌ها از 180000 به 220000 نمودار فشار درون سیلندر تغییر چندانی نکرد. در نتیجه در این مدل از تعداد سلول کمتر یعنی 180000 استفاده شده‌است.

### 3- بحث بر روی نتایج

برای بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور لازم است که ابتدا مدل با داده‌های آزمایشگاهی صحه‌گذاری شود. "شکل 3 و شکل 4" تغییرات نمودار فشار درون سیلندر، در مقایسه با داده‌های تجربی را در دو سرعت 1000 و 1400 دور بر دقیقه نشان می‌دهند.

از آنجایی‌که در این پژوهش آلاینده‌های خروجی از موتور دیزل نیز بررسی شده‌اند، این آلاینده‌ها باید توسط داده‌های تجربی صحه‌گذاری شوند.

جدول 3 و جدول 4 آلاینده اکسید نیترات و مونوکسیدکربن خروجی از نرم‌افزار را در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند.

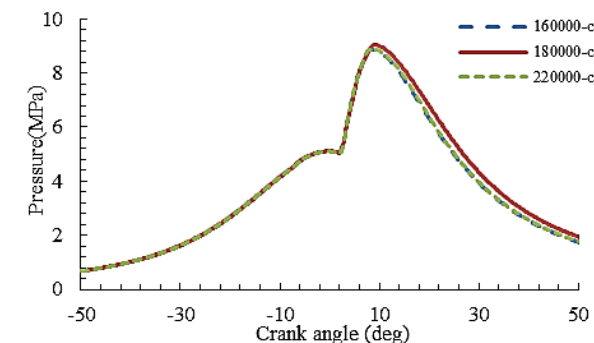


Fig. 2 Mesh independency test

شکل 2 تغییرات فشار درون سیلندر برحسب زاویه لنگ برای تعیین استقلال از شبکه

داده می‌شود. "شکل 5" تغییرات توان و گشتاور تولیدی موتور را در این چهار حالت نشان می‌دهد. همان‌طور که از "شکل 5" مشخص است، با افزایش فشار اولیه توان و گشتاور تولیدی موتور افزایش می‌یابد. با افزایش فشار اولیه هوای ورودی موتور افزایش می‌یابد، در نتیجه فشار موثر موتور نیز افزایش می‌یابد که منجر به افزایش توان تولیدی موتور می‌شود. همچنین افزایش هوای ورودی نسبت تراکم موثر را افزایش می‌دهد که موجب افزایش بازده و توان تولیدی موتور می‌شود. در مدل اولیه نسبت هم‌ارزی بیشتر از یک است و در نتیجه در بعضی از نقاط نسبت هم‌ارزی محلی بالا رفته و کمبود اکسیژن برای ترکیب شدن با سوخت به شدت احساس می‌شود. بنابراین افزایش هوای اولیه می‌تواند اکسیژن کافی را در اختیار سوخت قرار داده و موجب احتراق کامل‌تر درون محفظه احتراق شود. این امر گرمای آزاد شده را افزایش می‌دهد که افزایش گرمای آزاد شده نیز می‌تواند منجر به افزایش کار خروجی موتور شود. همچنین در "شکل 5" مشاهده می‌شود که با افزایش درصد بیودیزل، توان تولیدی موتور کاهش می‌یابد. بیودیزل ارزش حرارتی کمتری نسبت به سوخت دیزل دارد و در نتیجه احتراق این سوخت انرژی کمتری نسبت به سوخت دیزل آزاد می‌کند که موجب کاهش توان و گشتاور تولیدی کمتری می‌شود.

"شکل 5" تغییرات آلاینده اکسید نیترات و مونوکسیدکربن را با افزایش فشار اولیه نشان می‌دهد. با افزایش فشار اولیه هوای ورودی موتور بیشتر می‌شود و در نتیجه احتراق کامل‌تر انجام شده و آلاینده مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد. همچنین بیودیزل در ساختار خود حدود 11 درصد جرمی دارای اتم اکسیژن است و در نتیجه احتراق کامل‌تری نسبت به سوخت دیزل دارد که این امر موجب کاهش آلاینده مونوکسیدکربن با افزایش درصد بیودیزل می‌شود. همان‌طور که در "شکل 5" مشاهده می‌شود با افزایش فشار اولیه آلاینده اکسیدنیترات افزایش می‌یابد. تولید این آلاینده به دو عامل دمای درون سیلندر و اکسیژن و نیتروژن موجود در محفظه برای تبدیل شدن به اکسیدنیترات و غلظت و تراکم هوای موجود در محفظه بستگی دارد. "شکل 7 تا شکل 9" تغییرات دمای درون سیلندر را برای سه سوخت بیودیزل، سوخت دیزل و سوخت ترکیبی دیزل و سوخت بیودیزل در مقایسه با زاویه لنگ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در هر سه سوخت دمای درون سیلندر با تغییر فشار اولیه تغییر چندانی نکرد. در نتیجه عامل دمای درون سیلندر برای هر سه حالت یکسان است. اما از طرف دیگر با افزایش فشار اولیه، تراکم هوای موجود در محفظه افزایش یافته و احتمال

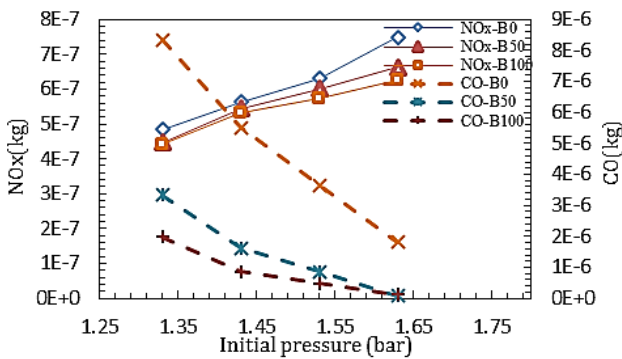


Fig. 6 Effect of initial pressure on nitrogen oxide and carbon dioxide  
شکل 6 تغییرات آلاینده اکسیدنیترات و مونوکسیدکربن را با افزایش فشار اولیه

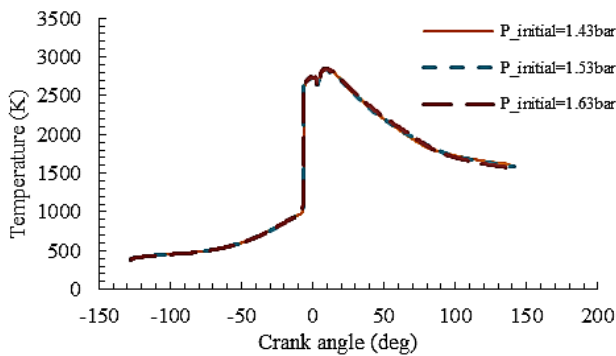


Fig. 7 Effect of initial pressure on in-cylinder temperature for B0  
شکل 7 تغییرات دمای درون سیلندر برحسب زاویه لنگ هنگام استفاده از سوخت دیزل

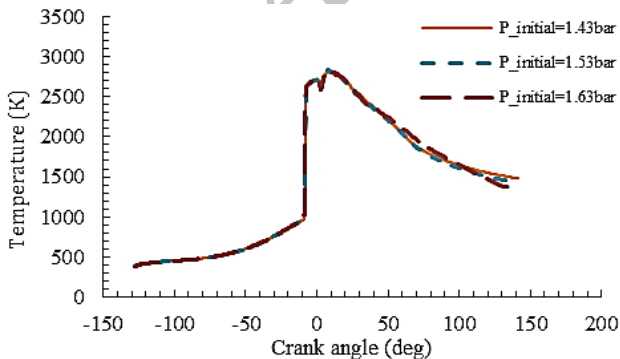


Fig. 8 Effect of initial pressure on in-cylinder temperature for B50  
شکل 8 تغییرات دمای درون سیلندر برحسب زاویه لنگ هنگام استفاده از ترکیب سوخت دیزل و سوخت بیودیزل

"شکل 5" تغییرات آلاینده اکسید نیترات و مونوکسیدکربن را با افزایش فشار اولیه نشان می‌دهد. با افزایش فشار اولیه هوای ورودی موتور بیشتر می‌شود و در نتیجه احتراق کامل‌تر انجام شده و آلاینده مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد. همچنین بیودیزل در ساختار خود حدود 11 درصد جرمی دارای اتم اکسیژن است و در نتیجه احتراق کامل‌تری نسبت به سوخت دیزل دارد که این امر موجب کاهش آلاینده مونوکسیدکربن با افزایش درصد بیودیزل می‌شود. همان‌طور که در "شکل 5" مشاهده می‌شود با افزایش فشار اولیه آلاینده اکسیدنیترات افزایش می‌یابد. تولید این آلاینده به دو عامل دمای درون سیلندر و اکسیژن و نیتروژن موجود در محفظه برای تبدیل شدن به اکسیدنیترات و غلظت و تراکم هوای موجود در محفظه بستگی دارد. "شکل 7 تا شکل 9" تغییرات دمای درون سیلندر را برای سه سوخت بیودیزل، سوخت دیزل و سوخت ترکیبی دیزل و سوخت بیودیزل در مقایسه با زاویه لنگ نشان می‌دهد. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، در هر سه سوخت دمای درون سیلندر با تغییر فشار اولیه تغییر چندانی نکرد. در نتیجه عامل دمای درون سیلندر برای هر سه حالت یکسان است. اما از طرف دیگر با افزایش فشار اولیه، تراکم هوای موجود در محفظه افزایش یافته و احتمال

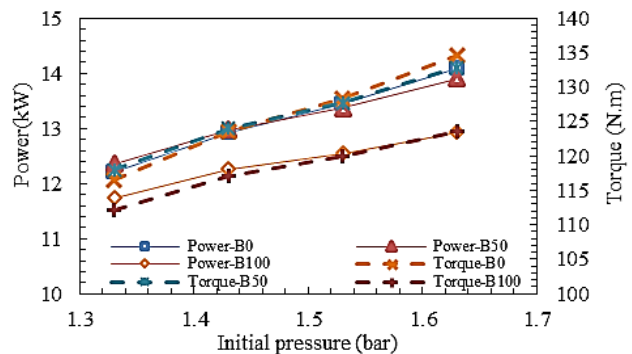


Fig. 5 Effect of initial pressure on indicated power and indicated torque  
شکل 5 تغییرات توان و گشتاور تولیدی با تغییر فشار اولیه محفظه احتراق

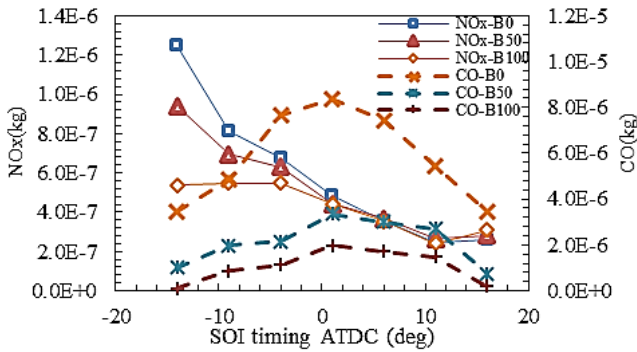


Fig. 11 Effect of start of injection on nitrogen oxide and carbon dioxide  
شکل 11 تغییرات مونوکسیدکربن و اکسید نیترات با تغییر زاویه شروع پاشش

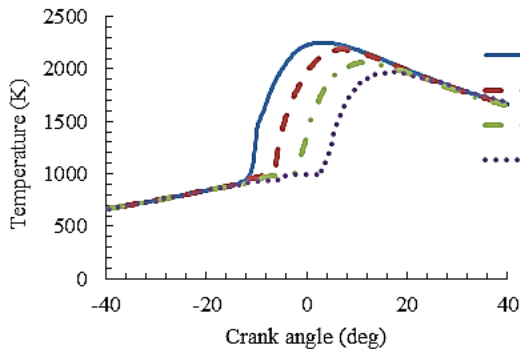


Fig. 12 Effect of start of injection on in-cylinder temperature  
شکل 12 تغییرات دمای درون محفظه سیلندر با پیش‌اندازی پاشش

افزایش یابد.

آلاینده اکسیدنیترات با پس‌اندازی پاشش روند کاهشی دارد. زیرا با پس‌اندازی پاشش آزادسازی حرارت بیشتر به تعویق افتاده و در حجم بیشتری از محفظه احتراق رخ می‌دهد. این عامل در کنار همزمانی فرآیند احتراق و انبساط مانع از افزایش زیاد دمای بیشینه درون سیلندر شده و در نتیجه تولید آلاینده اکسید نیترات کاهش می‌یابد.

با پیش‌اندازی پاشش فرصت بیشتری به سوخت برای مخلوط شدن با هوا داده می‌شود و این امر موجب می‌شود که مخلوط همگن‌تر تولید شده و احتراق به‌صورت کامل‌تر انجام شود. از طرفی بالا رفتن دما نیز به کامل شدن احتراق کمک می‌کند و در نتیجه در پیش‌اندازی پاشش تولید آلاینده مونوکسیدکربن که ناشی از احتراق ناقص است، کاهش می‌یابد. همچنین با پس‌اندازی پاشش نیز، تاخیر احتراق افزایش می‌یابد. در نتیجه سوخت باز هم فرصت بیشتری برای مخلوط شدن با هوا دارد و مخلوط همگن‌تری قبل از احتراق تشکیل می‌شود که این پدیده نیز موجب کاهش تولید آلاینده مونوکسیدکربن می‌شود.

### 3-3- بررسی تاثیر بازگردانی گازهای خروجی

در این بخش ضمن ثابت ماندن مقدار جرم اولیه در محفظه موتور، گازهای خروجی بازگردانی می‌شوند تا 10، 20 و 30 درصد هوای اولیه را تشکیل دهند. همچنین مقدار سوخت پاشیده شده و نیز جرم اولیه موجود در محفظه در همه حالات ثابت در نظر گرفته شده است تا فقط تاثیر بازگردانی گازهای خروجی بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور مشخص شود.

"شکل 13 تغییرات توان و گشتاور تولیدی را با تغییر درصد بازگردانی

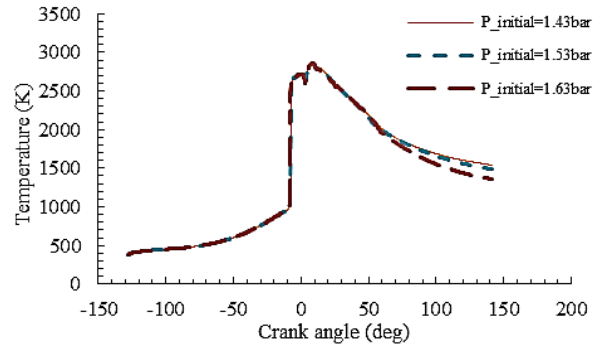


Fig. 9 Effect of initial pressure on in-cylinder temperature for B100

شکل 9 تغییرات دمای درون سیلندر بر حسب زاویه لنگ هنگام استفاده از سوخت بیودیزل

### 2-3- بررسی تاثیر زاویه شروع پاشش

طبق جدول پاشش سوخت در مدل اولیه در زاویه 1.1 درجه بعد از نقطه مرگ بالا انجام می‌شود. در این بخش عملکرد موتور در سه زاویه پاشش سوخت پس‌اندازی شده (6، 11 و 16 درجه) و سه زاویه پاشش پیش‌اندازی شده (4، -9 و -14) بررسی شده است.

"شکل 10" تغییرات توان و گشتاور تولیدی را با تغییر زاویه پاشش سوخت نشان می‌دهد. با پیش‌اندازی پاشش، شروع احتراق قبل از نقطه مرگ بالا رخ می‌دهد که این امر موجب بروز کار منفی تراکم می‌شود و توان تولیدی موتور را کم می‌کند. از طرف دیگر با پس‌اندازی پاشش نیز احتراق ضمن انبساط رخ می‌دهد که این امر موجب عدم تبدیل موثر فشار داخل سیلندر به نیروی رانش پیستون و کاهش نسبت تراکم موثر موتور می‌شود که هر دو موجب کاهش توان تولیدی موتور در پس‌اندازی می‌شوند.

"شکل 11" تغییرات آلاینده‌های مونوکسیدکربن و اکسید نیترات را با تغییر زاویه پاشش سوخت نشان می‌دهد. آلاینده اکسید نیترات با پیش‌اندازی پاشش روند صعودی و با پس‌اندازی پاشش روند نزولی دارد. با پیش‌اندازی پاشش، نقطه دما و فشار بیشینه تنها در چند درجه بعد از نقطه مرگ بالا و در حجم کمتر نسبت به حالت عادی رخ می‌دهد. در نتیجه دمای بیشینه بالا می‌رود که این امر موجب افزایش تولید آلاینده اکسید نیترات با پیش‌اندازی پاشش می‌شود. "شکل 12" تغییرات دمای درون سیلندر را بر حسب زاویه لنگ نشان می‌دهد. با توجه به مطالب گفته شده در بالا، در این شکل نیز دیده می‌شود که با پیش‌اندازی پاشش، نقطه دما و فشار بیشینه افزایش یافته و در مدت زمان بیشتری این دما بر هوای درون محفظه اعمال می‌شود. در نتیجه انتظار می‌رود که با پیش‌اندازی پاشش، تولید آلاینده اکسید نیترات نیز

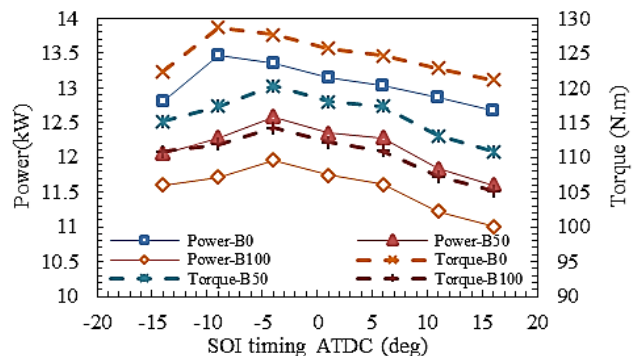


Fig. 10 Effect of start of injection on indicated power and indicated torque

شکل 10 تغییرات توان و گشتاور تولیدی با تغییر زاویه شروع پاشش



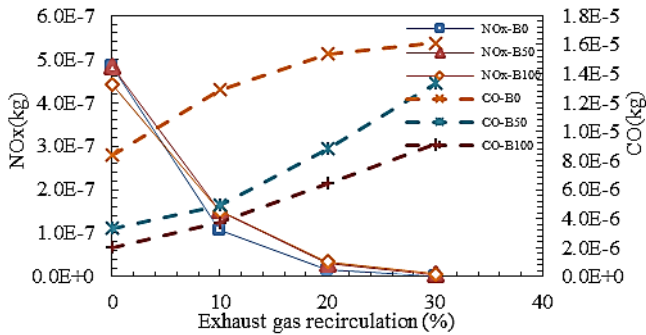


Fig. 14 Effect of exhaust gas recirculation on nitrogen oxide and carbon dioxide

شکل 14 تغییرات مونوکسیدکربن و اکسیدنیترا با تغییر درصد بازگردانی گازهای خروجی

#### 4-3- بررسی تاثیر افزایش درصد بیودیزل

بیودیزل ارزش حرارتی کمتری نسبت به سوخت دیزل دارد، در نتیجه انتظار می‌رود که این سوخت توان و گرمای کمتری نسبت به سوخت دیزل تولید کند. اما از طرفی در این مدل نسبت هم‌ارزی حدود 1 در نظر گرفته شده است. در نتیجه در بعضی حالات کمبود اکسیژن برای ترکیب شدن با سوخت احساس می‌شود که این امر موجب ناقص شدن احتراق می‌شود. در این مواقع وجود اکسیژن در ساختار بیودیزل موجب کامل شدن احتراق شده و در نتیجه گرمای بیشتری آزاد شده و توان تولیدی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر وجود اکسیژن در ساختار بیودیزل و همچنین کم‌تر بودن ارزش حرارتی این سوخت، موجب می‌شوند که افزایش درصد بیودیزل در حالات مختلف تاثیر متفاوتی بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور داشته باشد که این مطلب به وضوح در "شکل 5 تا شکل 14" مشاهده می‌شود. بنابراین برای این که تاثیر افزایش درصد بیودیزل به وضوح بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور مشخص شود، در این بخش ضمن ثابت نگه داشتن جرم هوای اولیه درون محفظه، مقدار سوخت پاشیده شده نصف شده تا هوای کافی در اختیار سوخت قرار گیرد و سپس تاثیر افزایش درصد بیودیزل بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور بررسی شد.

"شکل 15" تغییرات توان و گشتاور تولیدی را با افزایش درصد بیودیزل نشان می‌دهد. بیودیزل ارزش حرارتی کمتری نسبت به سوخت دیزل دارد در نتیجه احتراق این سوخت انرژی کمتری نسبت به سوخت دیزل آزاد می‌کند و توان و گشتاور تولیدی موتور کاهش می‌یابد.

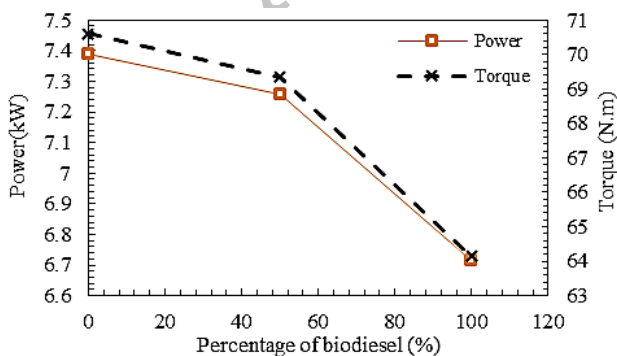


Fig. 15 Effect of mixing ratio of biodiesel on indicated power and indicated torque

شکل 15 تغییرات گشتاور و توان تولیدی با افزایش درصد بیودیزل

گازهای خروجی نشان می‌دهد. با افزایش درصد بازگردانی گازهای خروجی هوای ورودی موتور و در نتیجه اکسیژن وارد شده به موتور کاهش می‌یابد. در نتیجه اکسیژن کمتری در اختیار سوخت قرار می‌گیرد، احتراق به صورت ناقص انجام شده و در نتیجه توان تولیدی موتور کاهش می‌یابد. همچنین افزایش درصد بازگردانی گازهای خروجی مقدار گونه‌های خنثی موجود در موتور را افزایش می‌دهد. این گونه‌های خنثی در واکنش شرکت نمی‌کنند ولی گرمای آزاد شده از واکنش را جذب کرده و مانع از بالا رفتن دمای درون محفظه و کامل شدن احتراق می‌شوند. که این عامل نیز موجب کاهش گشتاور و توان خروجی موتور با افزایش درصد بازگردانی گازهای خروجی موتور می‌شود.

نکته دیگری که از "شکل 13" مشاهده می‌شود، نحوه تغییرات توان و گشتاور تولیدی با تغییر درصد بیودیزل است. به دلیل بالاتر بودن ارزش حرارتی سوخت دیزل نسبت به بیودیزل انتظار می‌رفت که سوخت دیزل در همه حالات توان بیشتری نسبت به بیودیزل تولید کند، اما در "شکل 13" این روند مشاهده نمی‌شود. با بازگردانی گازهای خروجی اکسیژن در دسترس سوخت کمتر می‌شود که این امر توان تولیدی موتور را کاهش می‌دهد. اما بیودیزل در ترکیب خود اکسیژن دارد که می‌تواند نسبت هوا به سوخت موتور و در نتیجه توان تولیدی را افزایش دهد. به عبارت دیگر وجود اکسیژن در بیودیزل می‌تواند در بعضی موارد کم‌تر بودن ارزش حرارتی بیودیزل را جبران کرده و در نتیجه بیودیزل توان بیشتری نسبت به سوخت دیزل تولید کند. که این افزایش توان تولیدی با افزایش درصد بیودیزل، در درصدهای بالای بازگردانی گازهای خروجی که اکسیژن در دسترس سوخت کم می‌شود، ملاحظه می‌شود.

همان‌طور که قبلاً گفته شد با افزایش درصد بازگردانی گازهای خروجی احتراق ناقص انجام شده و در نتیجه گرمای آزاد شده کمتر می‌شود. همچنین گونه‌های خنثی وارد شده به موتور گرمای آزاد شده را جذب می‌کنند و در نتیجه دمای بیشینه درون محفظه موتور کاهش می‌یابد. با کاهش دمای بیشینه میزان تولید آلاینده اکسیدنیترا کاهش می‌یابد. همچنین به دلیل ناقص بودن احتراق و وجود مونوکسیدکربن در هوای اولیه موتور میزان مونوکسیدکربن با افزایش درصد بازگردانی گازهای خروجی افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر، تغییرات آلاینده مونوکسیدکربن با افزایش درصد بیودیزل است. بیودیزل دارای اتم اکسیژن در ساختار خود می‌باشد، بنابراین با افزایش درصد بیودیزل احتراق کامل‌تر انجام شده و میزان تولید مونوکسیدکربن کاهش می‌یابد. که این مطلب به وضوح در "شکل 14" قابل مشاهده است.

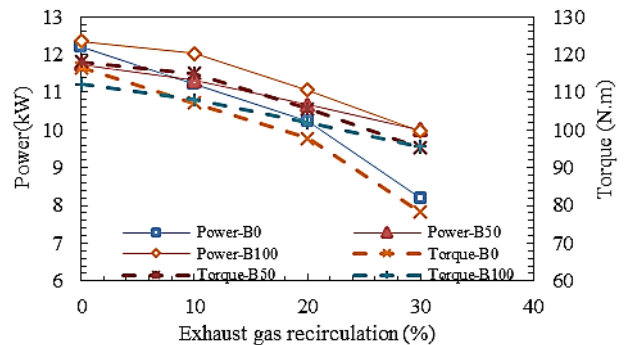


Fig. 13 Effect of exhaust gas recirculation on indicated power and indicated torque

شکل 13 تغییرات توان و گشتاور تولیدی با تغییر درصد بازگردانی گازهای خروجی

شده و مونوکسیدکربن تولیدی موتور را کاهش می‌دهد. با پیش‌اندازی پاشش، نقطه فشار و دمای بیشینه تنها در چند درجه قبل از نقطه مرگ بالا و در حجم کمتر نسبت به حالت عادی رخ می‌دهد. در نتیجه دمای بیشینه بالا رفته که این امر موجب افزایش تولید آلاینده اکسید نیترات می‌شود.

با پس‌اندازی پاشش نیز احتراق ضمن انبساط رخ می‌دهد که این امر موجب عدم تبدیل موثر فشار داخل سیلندر به نیروی رانش پیستون و کاهش نسبت تراکم موثر موتور می‌شود که هر دو موجب کاهش توان تولیدی موتور می‌شوند. با پس‌اندازی پاشش، آزادسازی حرارت بیشتر به تعویق افتاده و در حجم بیشتری از محفظه احتراق رخ داده که این امر موجب کاهش دمای بیشینه و در نتیجه کاهش تولید آلاینده اکسیدنیترات می‌شود. همچنین با پس‌اندازی پاشش، تاخیر احتراق زیاد شده و به سوخت فرصت بیشتری برای مخلوط شدن با هوا داده می‌شود که این امر موجب همگن‌تر شدن مخلوط و کامل‌تر شدن احتراق شده و تولید آلاینده مونوکسیدکربن را کاهش می‌دهد.

#### 5- تشکر و قدردانی

بدین وسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری بخاطر حمایت از این تحقیق قدردانی می‌گردد. همچنین از واحد احتراق مرکز تحقیق موتور ایران خودرو بخاطر در اختیار قرار دادن اطلاعات و امکانات و همچنین همکاری برای انجام این تحقیق قدردانی می‌شود.

#### 6- مراجع

- [1] A. Tsolakis, A. Megaritis, M. Wyszynski, K. Theinnoi, Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation), *Energy*, Vol. 32, No. 11, pp. 2072-2080, 2007.
- [2] Ö. Can, Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture, *Energy Conversion and Management*, Vol. 87, pp. 676-686, 2014.
- [3] L. Labecki, L. Ganippa, Effects of injection parameters and EGR on combustion and emission characteristics of rapeseed oil and its blends in diesel engines, *Fuel*, Vol. 98, pp. 15-28, 2012.
- [4] L. Lešnik, J. Iljaž, A. Hribernik, B. Kegl, Numerical and experimental study of combustion, performance and emission characteristics of a heavy-duty DI diesel engine running on diesel, biodiesel and their blends, *Energy Conversion and Management*, Vol. 81, pp. 534-546, 2014.
- [5] S. Ushakov, H. Valland, V. Æsøy, Combustion and emissions characteristics of fish oil fuel in a heavy-duty diesel engine, *Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 228-238, 2013.
- [6] E. Öztürk, Performance, emissions, combustion and injection characteristics of a diesel engine fuelled with canola oil-hazelnut soapstock biodiesel mixture, *Fuel Processing Technology*, Vol. 129, pp. 183-191, 2015.
- [7] B. Kegl, Influence of biodiesel on engine combustion and emission characteristics, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 5, pp. 1803-1812, 2011.
- [8] S. Som, Z. Wang, W. Liu and D.E. Longman, Comparison of different chemical kinetic models for biodiesel combustion, *ASME 2013 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, American Society of Mechanical Engineers, USA, October 13-16, 2013.
- [9] J. L. Brakora, A comprehensive combustion model for biodiesel-fueled engine simulations, Ph.D. Dissertation, University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [10] C. Speziale, Turbulence modeling for time-dependent RANS and VLES: A review, *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 2, pp. 173-184, 1998.
- [11] P. Senecal, E. Pomraning, K. Richards, T. Briggs, C. Choi, R. McDavid, M. Patterson, Multi-dimensional modeling of direct-injection diesel spray liquid length and flame lift-off length using

"شکل 16" تغییرات آلاینده اکسید نیترات و مونوکسیدکربن را با افزایش درصد بیودیزل نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد با افزایش درصد بیودیزل گرمای آزاد شده از احتراق کمتر شده و در نتیجه دمای درون محفظه کاهش می‌یابد که این امر موجب کاهش تولید آلاینده اکسیدنیترات با افزایش درصد بیودیزل می‌شود. همچنین بیودیزل در ساختار خود اتم اکسیژن دارد که این اتم موجب کامل‌تر شدن احتراق شده و تولید آلاینده مونوکسیدکربن را کاهش می‌دهد.

#### 4- نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش بررسی اثر افزودن بیودیزل به دست آمده از روغن کلزا بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی از موتور می‌باشد. برای نیل به این هدف تاثیر پیش‌اندازی و پس‌اندازی پاشش، بازگردانی گازهای خروجی و افزایش فشار پرخوران بر عملکرد و آلاینده‌های خروجی از موتور که با سوخت دیزل، بیودیزل و ترکیب 50 درصد بیودیزل و 50 درصد سوخت دیزل کار می‌کرد، بررسی شد.

با افزایش فشار اولیه، نسبت تراکم موثر موتور افزایش می‌یابد که منجر به افزایش بازده موتور می‌شود. همچنین با افزایش فشار اولیه، هوای ورودی موتور نیز افزایش می‌یابد که این امر باعث فقیرتر شدن مخلوط شده و تولید آلاینده مونوکسیدکربن را کاهش می‌دهد. علاوه بر این افزایش مقدار نیتروژن و اکسیژن موجود در موتور موجب افزایش تولید آلاینده اکسید نیترات درون موتور می‌شود.

با بازگردانی گازهای خروجی، مخلوط غنی‌تر شده و احتراق ناقص رخ می‌دهد. در نتیجه همه انرژی شیمیایی سوخت آزاد نمی‌شود و گرمای آزاد شده، توان و گشتاور تولیدی موتور کاهش می‌یابد. از طرفی کم شدن گرمای آزاد شده، تولید آلاینده اکسید نیترات را کاهش می‌دهد. همچنین به دلیل غنی بودن مخلوط سوخت و هوا در موتور، احتراق به صورت ناقص انجام شده و تولید آلاینده‌های مونوکسیدکربن با افزایش بازگردانی گازهای خروجی افزایش می‌یابد.

در این پژوهش علاوه بر موارد بالا، تاثیر پیش‌اندازی و پس‌اندازی پاشش نیز بررسی شده است. با پیش‌اندازی پاشش نقطه فشار و دمای بیشینه قبل از نقطه مرگ بالا اتفاق می‌افتد و در نتیجه کار منفی تراکم افزایش یافته که منجر به کاهش گشتاور و توان اندیکاتوری می‌شود. همچنین با پیش‌اندازی پاشش، فرصت بیشتری به سوخت برای ترکیب شدن با هوا داده می‌شود و در نتیجه مخلوط همگن‌تری تولید می‌شود که این امر موجب کامل شدن احتراق

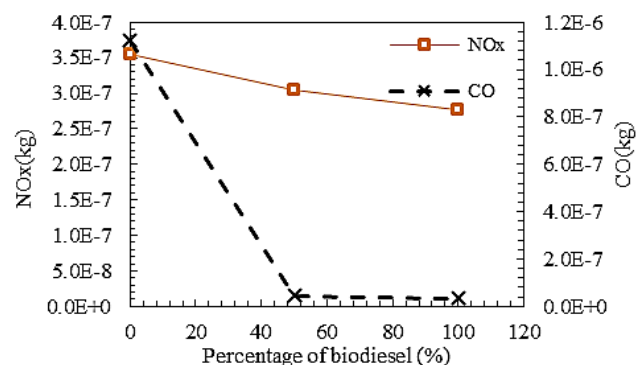


Fig. 16 Effect of mixing ratio of biodiesel on nitrogen oxide and carbon dioxide

شکل 16 تغییرات مونوکسیدکربن و اکسیدنیترات با افزایش درصد بیودیزل

- program for chemically reactive flows with sprays, *Los Alamos National Lab. Report*, LA-11560-MS, UC96, 1989.
- [16] C. Chiang, M. Raju, W. Sirignano, Numerical analysis of convecting, vaporizing fuel droplet with variable properties, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 5, pp. 1307-1324, 1992 .
- [17] J. Naber, R. D. Reitz, Modeling engine spray/wall impingement, *SAE Technical Paper*, No. 880107, 1988 .
- [18] G. Wojciech, A. Żółtowski, A. Bocheńska, Properties of the rapeseed oil methyl esters and comparing them with the diesel oil properties, *Journal of KONES Powertrain and Transport*, Vol.18, No. 4, pp. 121-127, 2011.
- CFD and parallel detailed chemistry, *SAE Technical Paper*, No. 2003-01-1043, 2003 .
- [12] J. C. Beale, Modeling fuel injection using Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid atomization model in KIVA-3V, MSc. Thesis, University of Wisconsin--Madison, 1999 .
- [13] R. D. Reitz, F. V. Bracco, Mechanisms of breakup of round liquid jets, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 3, pp. 233-249, 1986
- [14] P. Senecal, K. Richards, E. Pomraning, T. Yang, et al., A new parallel cut-cell Cartesian CFD code for rapid grid generation applied to in-cylinder diesel engine simulations, *SAE Technical Paper*, No. 2007-01-0159, 2007.
- [15] A. A. Amsden, P. O'Rourke, T. D. Butler, KIVA-II: A computer

Archive of SID