



بررسی عددی تاثیر پاشش آمونیاک بر عملکرد موتور EF7 با سوخت CNG

علی قدسی¹، فرهاد سالک²، سید وحید حسینی^{3*}، میثم بابائی⁴

Alighodsi89@gmail.com

mirfarhadsalek@gmail.com

v_hosseini@shahroodut.ac.ir

m.babaie@salford.ac.uk

¹ دانشجوی کارشناسی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود

² استاد مدعو دپارتمان مهندسی مکانیک دانشکده منتظری دانشگاه فنی و حرفه ای استان خراسان رضوی

^{3*} عضو هیات علمی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود

³ عضو هیات علمی دانشکده علوم، مهندسی و محیط زیست دانشگاه سالفورد انگلستان

چکیده

سوخت گاز طبیعی، به عنوان یک سوخت پاک شناخته میشود که استفاده از آن در خودروها به عنوان سوخت پایه، باعث کاهش آلاینده‌گی و گازهای گلخانه‌ای خواهد شد. از طرفی دیگر، آمونیاک نیز به عنوان یک سوخت حامل هیدروژن تلقی شده که ترکیب آن با گاز طبیعی در احتراق، باعث افزایش راندمان احتراق خواهد شد. در این مقاله، بررسی عددی تاثیر پاشش آمونیاک بر میزان تولیدی آلاینده‌ها و عملکرد موتور EF7 با سوخت پایه CNG انجام گرفته است. در ابتدا موتور EF7 گازسوز در نرم افزار AVL BOOST مدل‌سازی شده و به منظور استحصال پارامترهای اصلی موتور در سرعت 6000 دور بر دقیقه و به صورت تمام بار، حل شده و سپس با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌گذاری شده است. پس از آن آمونیاک با درصد‌های پاشش 5 درصد و 10 درصد در موتور با سوخت پایه CNG به صورت مجزا برای هر سیلندر توسط چهار انژکتور نصب شده بر روی منیفولد هوای موتور، تزریق شده و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزودن آمونیاک مقدار توان و فشار موثر متوسط تولیدی توسط موتور تغییرات محسوسی نداشته است. اما پاشش آمونیاک باعث افزایش دمای احتراق در داخل سیلندر ها شده که در نتیجه آن CO و HC به ترتیب تا حداکثر 27 درصد و 7.5 درصد، کاهش یافته است. از طرفی دیگر، افزایش دمای سیلندر موجب افزایش NOx گردیده به طوری که برای 5 درصد پاشش آمونیاک 43.4 درصد و برای 10 درصد پاشش آمونیاک 118.7 درصد افزایش اکسیدهای نیتروژن ثبت گردیده است.

کلید واژه: سوخت های زیستی، گاز طبیعی، کربنمونواکسید، اکسید نیتروژن، آمونیاک



Numerical investigation of the impacts of ammonia injection on the performance of EF7 engine with CNG fuel

Ali Ghodsi¹, Farhad Salek², Seyyed Vahid Hosseini³, Meisam Babaie⁴

¹ BSc Student, Faculty of Mechanical and Mechatronic Engineering, Shahrood University of Technology.

Alighodsi89@gmail.com

² Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Montazeri, Khorasan Razavi Branch, Technical and Vocational University

mirfarhadsalek@gmail.com

³ Assistance Professor, Faculty of Mechanical and Mechatronic Engineering, Shahrood University of Technology.

v_hosseini@shahroodut.ac.ir

⁴ Lecturer, School of Science, Engineering and Environment, University of Salford

m.babaie@salford.ac.uk

Abstract

Natural gas is known as one of the clean fuels the employment of which in vehicles results in decrease of emissions and greenhouse gases. In addition, the ammonia is known as one of the hydrogen carrier fuels the co-burning of which with natural gas leads to increment of combustion efficiency. In this paper, numerical investigation performed on the impacts of ammonia injection on the emission production and performance of a CNG fueled EF7 engine. At first, the gaseous fueled EF7 engine has been modelled in AVL BOOST software and the main parameters of engine at 6000 RPM and full load condition has been extracted and compared with experimental data for validation purpose. Then, the ammonia has been injected by 5% and 10% injection ratio by 4 injectors mounted on the air manifold into the engine and the results of its injection into the engine is studied. By injection of ammonia, the engine power and brake mean effective pressure has been changed minimally. However, the in-cylinder temperature increased resulted in decrement of CO and HC emissions up to 27% and 7.5%. On the other hand, the increase of in-cylinder temperature also led to increase of NOx production which increased up to 43.4% for 5% ammonia injection and 118.7% for 10% ammonia injection.

Keywords: Biofuel, nitrogen oxide, ethanol, auxiliary fuel, ammonia



مقدمه

یکی از بزرگترین مشکلات جوامع امروزی، پدیده گرم شده کره زمین بوده که نقشه بسیاری در سلامت زمین و انسانها دارا می-باشد. یکی از منابع تولید کننده گازهای گلخانه-ای، خودروهای موجود در سیستمهای حمل و نقل میباشند. مصرف سوختهای فسیلی نظیر بنزین و دیزل توسط خودروها، باعث تولید گاز CO_2 میگردد (1-3). از طرفی دیگر، استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوختی با تولید آلودگی کمتر نسبت به بنزین، گازوئیل و پروپان بهصورت روز افزون در سطح دنیا در حال افزایش است (4، 5). دلایل اصلی استفاده از این سوخت در بعضی کشورها هزینه کمتر، تولید آلاینده کمتر و افزایش ایمنی به همراه اطمینان از دائمی بودن مصرف و تامین آنهاست.

گاز طبیعی یکی از پاک ترین سوخت های مورد مصرف در جهان میباشد که در رده سوخت های سبز قرار گرفته است. خوشبختانه این سوخت در کشور ما به وفور یافت میشود به طوری که از حجم کل ذخایر گازی جهان که حدود 190 تریلیون متر مکعب است، حدود 35 تریلیون متر مکعب آن در ایران است. بدین معنا که کشور ما با داشتن 18.4 درصد ذخایر گازی، بعد از روسیه بزرگترین دارنده منابع گازی در جهان شناخته میشود (6-8).

استفاده از گاز طبیعی فشرده که به اختصار سوخت CNG مینامند، به جای بنزین در موتور های اشتعال جرقه ای باعث کاهش چشمگیر آلایندهها میشود که یکی از مزیت های مهم این سوخت میباشد (9، 10). از این سوخت به عنوان سوخت جایگزین در کشورهایی نظیر چین، ایران و هند در بخش حمل و نقل جهت کنترل آلودگی هوا استفاده میشود. با توجه به فراوانی این گاز در کشور، از دیگر مزایای استفاده از سوخت CNG ، نسبت به بنزین می-توان به ارزان تر بودن آن اشاره کرد.

از مشکلات استفاده از سوخت CNG به جای بنزین می توان به کاهش توان و گشتاور اشاره کرد. به طوری که حدود 10 درصد کاهش در توان و گشتاور نسبت به بنزین گزارش شده است (11-13).

اخیرا جهت کاهش کربندیاکسید در اثر سوختن CNG در موتور های اشتعال جرقه ای، در حدود 5-10 درصد هیدروژن به این سوخت اضافه میکنند. سوخت CNG حاوی هیدروژن را $HCNG$ مینامند (14، 15). اما تکنولوژی تولید هیدروژن در مقیاس بالا و هزینههای مربوط به

آن باعث شده که این سوخت همچنان در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به این که آمونیاک یکی از سوخت های بر پایه هیدروژن است، میتوان از آن در جهت کاهش هیدروکربن های نسوخته و افزایش راندمان احتراق در موتور های احتراق داخلی استفاده کرد (16-19). احتراق همزمان گاز متان (که جزء اصلی سوخت CNG میباشد) همراه با آمونیاک، باعث افزایش راندمان احتراق و در نتیجه دستیابی به نرخ آزادسازی انرژی بیشتر در احتراق، خواهد شد (20، 21). تاثیر پاشش آمونیاک با بهرهگیری از سیستم پاشش چند نقطهای در موتور اشتعال جرقهای با سوخت پایه CNG در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا آزمایشات تجربی بر روی موتور $EF7$ گازسوز انجام گرفته و پارامترهای اصلی موتور اندازهگیری شده است. سپس موتور در نرم افزار $AVL BOOST$ شبیهسازی شده و پارامترهای خروجی مدل، با دادههای خروجی آزمایشگاهی موتور مقایسه گردیده است. آمونیاک نیز با نسبت 5 و 10 درصد جرمی از کل سوخت، توسط چهار انژکتور نصب شده بر روی موتور، در آن پاشش شده و نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است.

آزمایشات تجربی موتور

به منظور استحصال پارامترهای اصلی موتور در سرعت 6000 دور بر دقیقه، موتور $EF7$ گازسوز در اتاق تست نصب گردیده و پارامترهای خروجی مورد نظر در حالت پایا اندازهگیری و ثبت گردیده اند (22). پارامترهای اصلی موتور شامل مصرف سوخت ویژه ترمزی، تولید توان و فشار منیفولد گاز بوده که در آزمایشات ثبت گردیده اند. آزمایشات در یکی از اتاق تستهای شرکت دیناموتور واقع در تهران انجام گرفته است. مشخصات فنی موتور $EF7$ گازسوز در جدول 1 ارائه گردیده است.



شبیهسازی موتور

در این مقاله، به منظور شبیهسازی عددی موتور EF7 گازسوز، از نرم افزار AVL BOOST استفاده گردیده است. این نرم افزار دارای ماژولها و مدل‌های دقیق برای شبیهسازی احتراق و انتقال حرارت در موتور را دارا می‌باشد. یکی از دقیقترین مدل‌های موجود در نرم افزار جهت شبیهسازی احتراق، مدل Vibe two zone میباشد (23). در این مدل احتراق به دو منطقه حاوی گازهای سوخته شده و نسوخته تبدیل شده و روابط ترمودینامیکی احتراق برای این دو منطقه بصورت جداگانه حل می‌گردد. بدین ترتیب، از این مدل احتراقی در شبیهسازی احتراق در موتور EF7 گازسوز در این مقاله مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از مدل انتقال حرارت Woschni 1978 جهت محاسبه نرخ اتلاف حرارت در درون سیلندر بهره‌گیری شده است (23).

شماتیک بلوک دیاگرام موتور مدلسازی شده در نرم افزار، در شکل 2 نشان داده شده است. همانطور که قبلاً ذکر شد، در این موتور آمونیاک توسط 4 انژکتور جداگانه در موتور تزریق میگردد که در شکل 2 با شکل 2: مدل موتور EF7 مجهز به سیستم پاشش چند نقطه‌ای آمونیاک در نرم افزار AVL BOOST

نامهای 17، 16، 15 و 18 نشان داده شده اند. انژکتورهای 11، 12، 13 و 14 مخصوص پاشش گاز CNG میباشند.

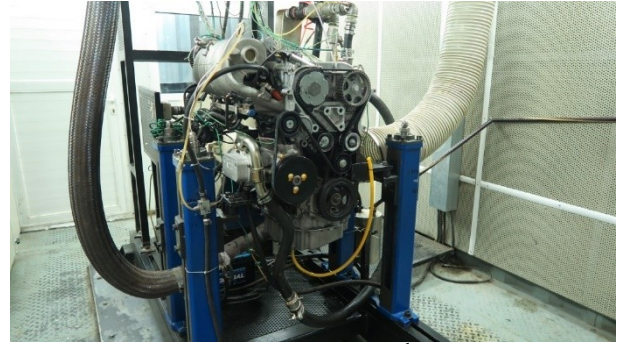
در نرم افزار AVL BOOST، برای محاسبه میزان تولید گاز NOx توسط موتور، از رابطه ارائه گردیده توسط پاتاس و هافتر و ترکیب آن با مکانیزم زلدوویچ، بهره‌گیری شده است (24):

$$r_{NO} = C_{PPM} C_{KM} (2,0) (1 - a_{NO}^2) \left[\frac{r_1}{1 + a_{NO} A K_2} + \frac{r_4}{1 + A} \right] \quad (1)$$

$$a_{NO} = \frac{C_{NO.act}}{C_{NO.equ}} \frac{1}{C_{KM}} \quad (2)$$

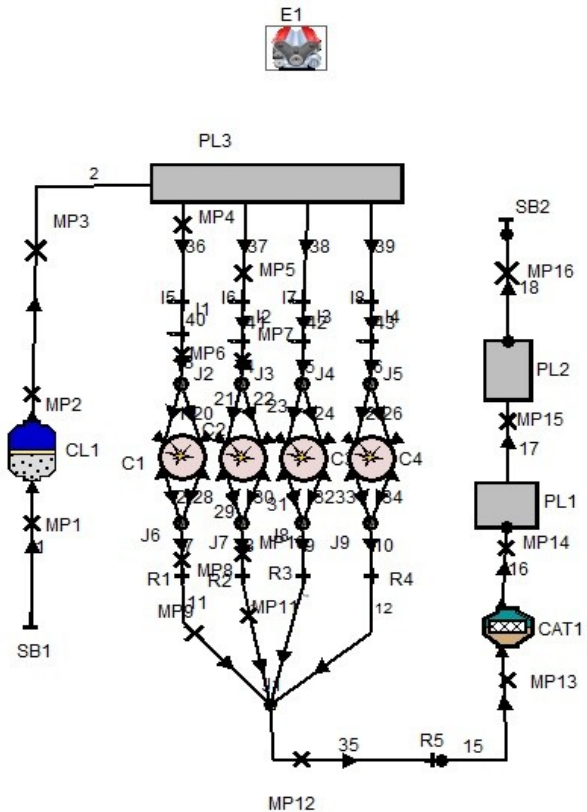
$$A K_2 = \frac{r_1}{r_2 + r_3} \quad (3)$$

$$A K_4 = \frac{r_4}{r_5 + r_6} \quad (4)$$



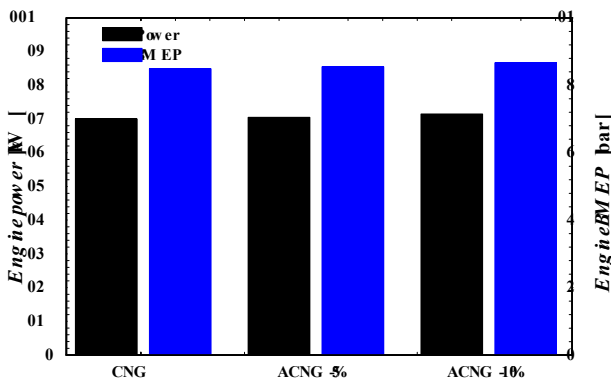
شکل 1: موتور گازسوز EF7 نصب شده در اتاق تست شرکت دیناموتور (22)

جدول 1: مشخصات فنی موتور



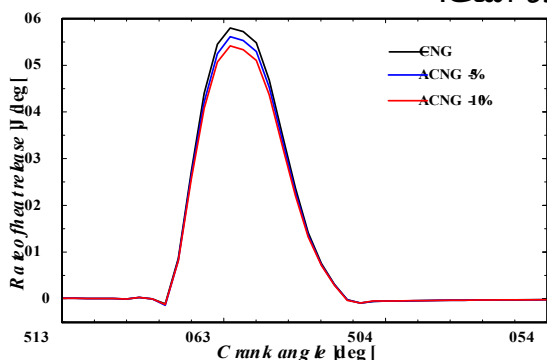
مقدار	واحد	پارامتر
78.6	mm	شعاع داخلی سیلندر
85	mm	کورس پیستون
134.5	mm	طول شاتون
4	-	تعداد سیلندرها
6000	RPM	حداکثر دور موتور
11	-	نسبت تراکم

10 درصد کسر جرمی، تغییرات محسوسی نداشته است.



شکل 3: توان و فشار موثر متوسط ترمزی تولیدی توسط موتور با ترکیبات سوختی متفاوت

در شکل 4، تغییرات نرخ آزادسازی انرژی سوخت بر حسب زاویه میلنگ مشاهده می-شود. اگرچه بر اساس داده های ارائه شده در شکل 3، توان موتور با افزودن آمونیاک افزایش غیر محسوسی داشته است، ولی براساس منحنیهای موجود در شکل 4، انرژی آزاد شده در داخل سیلندر با افزایش کسر جرمی آمونیاک در سوخت، کاهش خواهد یافت که به دلیل ارزش حرارتی کمتر آمونیاک نسبت به سوخت پایه CNG میباشد. اما وجود گاز هیدروژن در ترکیب آمونیاک، باعث افزایش راندمان احتراق شده که در نتیجه فشار موثر متوسط ترمزی و توان موتور ثابت نگه داشته شده است.



شکل 4: نرخ آزادسازی انرژی سوخت ورودی به موتور بر حسب زاویه میلنگ با ترکیبات سوختی متفاوت

شکل 5، نمایانگر نمودار دمای مخلوط هوا و سوخت داخل سیلندرها موتور بر حسب زاویه میلنگ میباشد. با توجه به داده های

C_i ، C_{KM} ، C_{PPM} و r_{NO} به ترتیب ضریب پس پردازش¹، ضریب جنبشی² کسر مولی و نرخ واکنش گاز اکسید نیتروژن میباشد. همچنین از رابطه ارائه شده توسط اونوراتی و همکارانش (24) برای محاسبه میزان تولید گاز مونوکسید کربن در فرایند احتراق استفاده گردیده است:

$$r_{CO} = C_{cte} (r_1 - r_2) [1 - a_{CO}] \quad (5)$$

$$a_{CO} = \frac{C_{CO.act}}{C_{CO.equ}} \quad (6)$$

در معادلات 5 و 6، پارامترهای r_{CO} و C_i نمایانگر نرخ واکنش مونوکسید کربن و کسر مولی آن میباشد.

صحهگذاری مدل موتور

برای صحهگذاری شبیهسازی انجام گرفته در نرم افزار AVL BOOST، دادههای اصلی خروجی موتور با دادههای تجربی اتاق تست موتور، مقایسه گردید. پارامترهای توان، فشار موثر متوسط ترمزی، مصرف سوخت ویژه ترمزی و فشار منیفولد هوا پارامترهایی هستند که در صحهگذاری مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول 2 ارائه گردید است.

پارامتر	AVL	تجربی	خطا (%)
توان (kW)	70.02	74.52	6.04
فشار موثر متوسط ترمزی (bar)	8.49	9.03	5.98
مصرف سوخت ویژه ترمزی (g/kWh)	287.5	269.7	6.59
فشار منیفولد گاز (kPa)	97.47	98.26	0.8

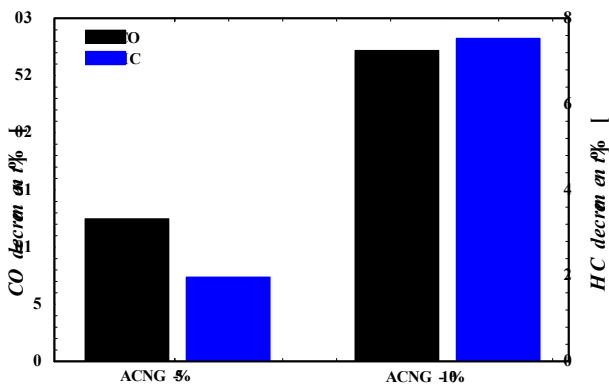
جدول 2: مقایسه پارامترهای محاسبه شده توسط مدل عددی و آزمایشگاهی

تحلیل نتایج

بدین ترتیب مدل مورد نظر در نرم افزار با سه سوخت مختلف حل گردیده و نتایج در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 3، نشان دهنده میزان توان و فشار موثر متوسط تولیدی توسط موتور با مصرف سوخت-های مختلف میباشد. براساس دادههای ارائه شده در این شکل، توان و فشار موثر متوسط ترمزی موتور با افزودن آمونیاک به سوخت تا

¹ Post processing multiplier

² Kinetic multiplier



شکل 7: کاهش تولید CO و HC در موتور نسبت به حالت پایه CNG با ترکیبات سوختی متفاوت

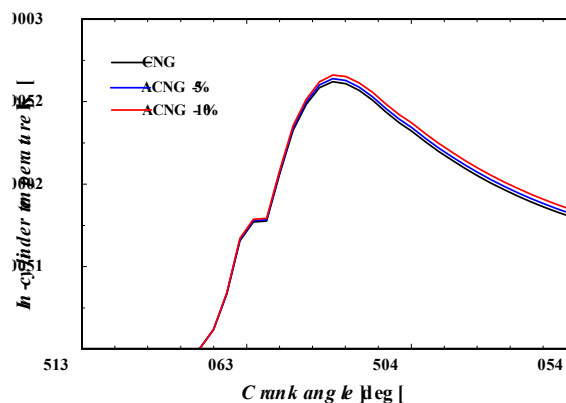
نتیجه‌گیری

در این مقاله، اثرات پاشش آمونیاک در موتور پایه گازسوز EF7 با کسرهای جرمی 5 درصد و 10 درصد مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، موتور در نرم افزار EF7 مدل‌سازی گردیده است و برخی داده‌های خروجی موتور با داده‌های آزمایشگاهی صحه‌گذاری گردیده است. سپس پارامترهای مختلف خروجی موتور در سه حالت سوختی مختلف، مقایسه گردیده است. براساس نتایج بدست آمده، با پاشش آمونیاک با نسبت پاشش 5 و 10 درصد، نرخ آزاد سازی انرژی سوخت نسبت به حالت پایه گازسوز، در موتور کاهش خواهد یافت که بدلیل جایگزینی کسری از سوخت پایه CNG با سوخت کمکی دارای ارزش حرارتی کمتر (آمونیاک) میباشد. ولی وجود هیدروژن در ترکیب سوخت آمونیاک، باعث جبران کاهش راندمان موتور گردیده و بدین ترتیب، توان تولید و فشار موثر متوسط تولیدی توسط موتور با افزایش نسبت پاشش آمونیاک، تقریباً ثابت بوده است. میزان تولید گاز اکسید نیتروژن بدلیل افزایش دمای احتراق با افزایش نسبت پاشش سوخت آمونیاک، نیز افزایش یافته. میزان تولید گاز مونوکسید کربن و هیدروکربنهای نسوخته با پاشش آمونیاک تا 10% نسبت به حالت تک سوخته، بیش از 25 درصد کاهش یافته است.

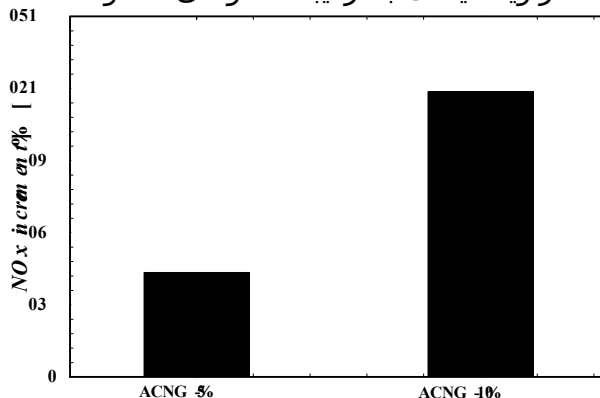
مراجع

- Liu J, Yang F, Wang H, Ouyang M, Hao S. Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a CNG/diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing. *Applied Energy*. 2013;110:201-6
- Aslam M, Masjuki H, Kalam M, Abdesselam H, Mahlia T, Amalina M. An experimental investigation of CNG as an

ارائه شده در این شکل، با اضافه کردن آمونیاک تا 10 درصد کسر جرمی به سوخت پایه (CNG) دمای داخلی سیلندر افزایش داشته است که مستقیم بر تولیدات HC و NOx اثر گذار میباشد. شکل 6، افزایش تولید NOx نسبت به حالت پایه CNG را نشان میدهد که باتوجه به آنچه که در توضیحات شکل 5 گفته شد، افزایش دمای سیلندر باعث افزایش تولید NOx در آن میشود که بر اساس داده های ارائه شده این میزان در ACNG-10% با افزایش چشمگیر 120 درصدی مواجه هستیم. در شکل 7، میتوان کاهش تولید CO و HC نسبت به حالت پایه CNG بر حسب مصرف سوخت های مختلف مشاهده کرد. با توجه به افزایش دما در سیلندر (شکل 5) میزان تولیدات هیدروکربن های نسوخته و کربنمونواکسید کاهش داشته به طوری که در سوخت با ترکیب 10 درصد کسر جرمی آمونیاک، بیش از 25 درصد کاهش در CO و تا 7% کاهش در تولید HC ایجاد گردیده است.



شکل 5: منحنی افزایش دمای سیلندر 1 بر حسب زاویه میلنگ با ترکیبات سوختی متفاوت



شکل 6: افزایش تولید NOx در موتور نسبت به حالت پایه CNG با ترکیبات سوختی متفاوت



- Kahraman N, Ceper B, Akansu SO, Aydin K. Investigation of combustion characteristics and emissions in a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(2):1026-34
- Nanthagopal K, Subbarao R, Elango T, Baskar P, Annamalai K. Hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG): A futuristic fuel for internal combustion engines. *Thermal Science*. 2011;15(4):1145-54
- Amrouche F, Benzaoui A, Erickson P, Mahmah B, Herouadi F, Belhamel M. Toward hydrogen enriched natural gas "HCNG" fuel on the Algerian road. *International journal of hydrogen energy*. 2011;36(6):4094-102
- Zamfirescu C, Dincer I. Using ammonia as a sustainable fuel. *Journal of Power Sources*. 2008;185(1):459-65
- Gray Jr JT, Dimitroff E, Meckel NT, Quillian Jr R. Ammonia fuel—engine compatibility and combustion. *SAE Transactions*. 1967:785-807
- Dimitriou P, Javaid R. A review of ammonia as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(11):7098-118
- Yapicioglu A, Dincer I. A review on clean ammonia as a potential fuel for power generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019;103:96-108
- Okafor EC, Somarathne KKA, Ratthanan R, Hayakawa A, Kudo T, Kurata O, et al. Control of NO_x and other emissions in micro gas turbine combustors fuelled with mixtures of methane and ammonia. *Combustion and Flame*. 2020;211:406-16
- Honzawa T, Kai R, Okada A, Valera-Medina A, Bowen PJ, Kurose R. Predictions of NO and CO emissions in ammonia/methane/air combustion by LES using a non-adiabatic flamelet generated manifold. *Energy*. 2019;186:115771
- Dinamotors Company [Available from: www.dinamotors.com
- Salek F, Babaie M, Redel-Macias MD, Ghodsi A, Hosseini SV, Nourian A, et al. The effects of port water injection on spark ignition alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle. *Fuel*. 2006;85(5-6):717-24
- Khan MI, Yasmin T, Shakoor A. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;51:785-97
- Jalihal SA, Reddy T. CNG: An alternative fuel for public transport. 2006
- Ravindra K, Wauters E, Tyagi SK, Mor S, Van Grieken R. Assessment of air quality after the implementation of compressed natural gas (CNG) as fuel in public transport in Delhi, India. *Environmental monitoring and assessment*. 2006;115(1-3):405-17
- Kakaee A-H, Paykani A. Research and development of natural-gas fueled engines in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:805-21
- Sadeghi M, Hosseini HM. Integrated energy planning for transportation sector—A case study for Iran with techno-economic approach. *Energy policy*. 2008;36(2):850-66
- Hazrati S, Rostami R, Fazlzadeh M, Pourfarzi F. Benzene, toluene, ethylbenzene and xylene concentrations in atmospheric ambient air of gasoline and CNG refueling stations. *Air Quality, Atmosphere & Health*. 2016;9(4):403-9
- Alrazen HA, Ahmad K. HCNG fueled spark-ignition (SI) engine with its effects on performance and emissions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;82:324-42
- Korakianitis T, Namasivayam A, Crookes R. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. *Progress in energy and combustion science*. 2011;37(1):89-112
- Jahirul MI, Masjuki HH, Saidur R, Kalam M, Jayed M, Wazed M. Comparative engine performance and emission analysis of CNG and gasoline in a retrofitted car engine. *Applied Thermal Engineering*. 2010;30(14-15):2219-26
- Cho HM, He B-Q. Spark ignition natural gas engines—A review. *Energy conversion and management*. 2007;48(2):608-18



engine performance and emissions fueled by pure gasoline, E5 and E10. Processes. 2020;8(10):1214

Iliev S. A comparison of ethanol and 24 methanol blending with gasoline using a 1-D engine model. Procedia Engineering. 2015;100:1013-22