ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2024;24(12):677-686.

Effect of Water-Methanol Mixture Injection in Intake Manifold on Performance and Emission of a Turbocharged SI Engine

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Sadeghi Ahangar A.[1*],
Shamekhi A.H [1]

How to cite this article
Sadeghi Ahangar A, Shamekhi A.H, Effect of Water-Methanol Mixture Injection in Intake Manifold on Performance and Emission of a Turbocharged SI Engine. Modares Mechanical Engineering; *2024;24(12):677-686.*

ABSTRACT

This study investigates the effects of water-methanol mixture injection on the performance and emissions of the EF7 TC engine. Using GT Power software, the engine was first simulated and validated with gasoline fuel. Subsequently, a nozzle was used to introduce the water-methanol mixture, simulated in three different ratios: 50% water-50% methanol, 25% water-75% methanol, and 75% water-25% methanol. The novelty of this research lies in the simulation of this injection process to enhance combustion quality. Results indicate significant temperature reductions at various points, alongside notable changes in knock characteristics and emissions, including nitrogen oxides (NOx), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2), and nitrogen monoxide (NO).

Keywords Water-Methanol Mixture, Emission, Performance, EF7, TC Engine, GT Power.

[1] Automotive Engineering Group, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Automotive Engineering Group, Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

ashkan.sadeghiahangar@email.kntu.ac.ir

Article History
Received: June 23, 2024
Accepted: January 21, 2025
ePublished: February 1, 2025

CITATION LINKS

1- The knock study of high compression ratio SI engine fueled with methanol in combination with different EGR rates. 2- Effect of water-methanol blends on engine performance at borderline knock conditions in gasoline direct injection engines. 3- Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine. 4- Effect of methanol/water mixed fuel compound injection on engine combustion and emissions. 5- Effect of Water Injection on SI Engine Performance and Emissions. 6- Water injection for higher engine performance and lower emissions. 7- Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions. 8- Literature survey of water injection benefits on boosted spark ignited engines. 9- A numerical investigation on the potentials of water injection as a fuel efficiency enhancer in highly downsized GDI engines. 10- Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions. 11- Water recovery from gasoline engine exhaust for water injection. 12- Comparison of EF7.TC engine performance in two modes of CNG fuel and petrol using piston and combustion chamber thermal simulation. 13- Combustion engine fundamentals. 14- Performance and emission analysis of hydrogen fueled compression ignition engine with variable water injection timing. 15- IKCO_EF7_TC_Engine_ServiceManual.

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

بررسی تاثیر پاشش مستقیم مخلوط آب - متانول در چندراهه ورودی بر عملکرد و آلایندگی موتور اشتعال جرقه‌ای توربوشارژ

اشکان صادقی آهنگر[1*] ، امیرحسین شامخی[1]
[1] گروه مهندسی خودرو، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله، به بررسی تاثیر افزودن مخلوط آب و متانول به سوخت و تاثیر آن بر عملکرد و آلایندگی موتور EF7 توربوشارژ (TC) پرداخته شده‌است. به این منظور، ابتدا با استفاده از GT Power موتور مورد نظر شبیه‌سازی و پس از اعتبارسنجی با سوخت بنزین، مخلوط آب و متانول با نازل وارد مدار شده و سپس نتایج، مورد بررسی قرار گرفته‌است. در این مقاله پس از شبیه‌سازی موتور به شبیه‌سازی نازل پاشش مخلوط آب و متانول پرداخته شده‌است که این مخلوط در سه حالت ۵۰٪ آب ۵۰٪ متانول، ۲۵ ٪آب ۷۵٪ متانول و ۷۵٪ آب و ۲۵٪ متانول شبیه‌سازی شده‌است. اصلی ترین نوآوری این تحقیق شبیه سازی پاشش مخلوط آب و متانول به منظور بهبود کیفیت احتراق است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد، دما به میزان قابل‌توجهی در نقاط مختلف کاهش پیداکرده‌است. همچنین در این مدل به بررسی کوبش(knock) ،آلایندگی‌های اکسیدهای نیتروژن (NOx) ، مونوکسیدکربن (CO)، دی اکسیدکربن (CO2)، نیتروژن مونوکسید(NO) و پارامترهای عملکردی مشابه که با اضافه شدن آب و متانول تغییر داشته‌اند، پرداخته شده‌است.

کلیدواژه‌ها: مخلوط آب و متانول، آلایندگی، عملکرد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۲
*نویسنده مسئول: ashkan.sadeghiahangar@email.kntu.ac.ir

۱- مقدمه

علی‌رغم پیشرفت‌های روز افزون در فناوری‌های بکار رفته در صنعت خودرو و قوای محرکه خودروها، آلایندگی همچنان از معضلات اصلی خودروهای احتراقی بشمار می‌رود. گازهای خروجی خودروهای احتراقی نظیر مونوکسیدکربن،اکسیدهای گوگرد (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق (PM) همچنان عامل اصلی آلودگی هوای کلانشهرها است.

در این پژوهش به بررسی تاثیر افزودن مخلوط آب و متانول به همراه سوخت بنزین بر عملکرد و آلایندگی EF7 TC پرداخته شده‌است. در ادامه نیز به برخی از کارهای انجام شده در رابطه با این موضوع اشاره شده‌است.

۲- پیشینه پژوهش

لی و همکاران در سال ۲۰۱۹، با اضافه کردن متانول به سوخت در حالات مختلف EGR به بررسی کوبش پرداختند. بالا بودن عدد اکتان متانول یکی از بهترین گزینه‌ها برای استفاده به عنوان سوخت در موتورهایی با نسبت تراکم بالا است. منابع تامین متانول در طبیعت فراوان است مانند: مواد بازیافتی، ذغال‌سنگ، سوخت‌های زیستی، گاز طبیعی، چوب و غیره.

نسبت تراکم در موتورهای اشتعال جرقه‌ای مهترین پارامتر برای سنجش بازدهی است که افزایش آن باعث افزایش قدرت موتور خواهد شد[1].

میگاناکالو و همکاران در سال ۲۰۲۰، تاثیر افزودن مخلوط آب و متانول را در یک موتور بنزینی بررسی کردند. یکی از موانع افزایش نسبت تراکم موتورها پدیده کوبش است. با توجه به اینکه آب و متانول گرمای تبخیر بیشتری نسبت به بنزین دارند هنگامی‌که داخل چندراهه اسپری می‌شوند باعث خنک‌کاری سیلندر می‌شوند که در نتیجه آن زمانبندی احتراق پیش افتاده و از کوبش جلوگیری می‌شود. با اضافه شدن آب و مخلوط آن با متانول دمای گازهای خروجی نیز کاهش پیدا می‌کند[2].

در سال ۲۰۲۰ لی و ژنگ، اثر پاشش آب در یک موتور بنزینی پاشش مستقیم را بر روی احتراق و آلایندگی بررسی کردند. آنها مشکل اصلی موتورهای توربوشارژردار را وجود کوبش میدانند، از این رو با پاشش آب در محفظه احتراق سعی بر کنترل گرمای داخل سیلندر دارند که خود باعث کاهش استهلاک قطعات نیز می‌شود، بنابر این سه روش اصلی را برای پاشش آب در محفظه احتراق بررسی کردند:

- پاشش آب داخل چندراهه
- پاشش آب داخل محفظه احتراق
- ترکیب آن با سوخت و پاشش توسط نازل

این مقاله نشان می‌دهد که با کاهش دمای محفظه احتراق، تولید اکسیدهای نیتروژن نیز کاهش پیدا می‌کند[3].

چو و همکاران در سال ۲۰۲۱، اثر ترکیب آب، متانول و سوخت را بر روی احتراق و میزان آلاینده‌ها در یک موتور دیزل بررسی کردند. آنها برای افزایش بازدهی سوخت و کاهش آلاینده‌ها از ترکیب آب و متانول به همراه سوخت در قبل از خنک‌کن میانی استفاده کردند که سبب کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC) و افزایش بازدهی گرمایی ویژه و همچنین تقویت احتراق شد. درصدهای مختلف ترکیب آب و متانول در این مقاله به وسیله نرم‌افزار کمکین (Chemkin) مقایسه شده تا به بهترین بازدهی و کمترین آلایندگی دست پیدا کنند. با اضافه شدن مخلوط آب و متانول، مونوکسید کربن و آلاینده‌های نیتروژن مونوکسید کاهش پیدا می‌کند که در زمان اضافه شدن ۶۰ درصد متانول و ۴۰ درصد آب مشاهده شد. گرمای نهان تبخیر آب بیشتر از متانول است و پس از مخلوط شدن دو سوخت، تشکیل دوده و فشار داخل سیلندر را نیز در طی فرآیند احتراق کاهش داد اما نرخ تولید گرما نیز افزایش یافت[4].

در نگاه کلی تر، تمامی مقالات به تاثیرگذاری مخلوط آب و متانول بر روی دما و کیفیت اشتعال اشاره داشته‌اند و تفاوت عمده آنها در نوع روش بررسی تاثیر مخلوط آب و متانول می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

۳- روش حل

۳-۱- سیستم‌های پاشش آب و متانول

روش استفاده از آب در موتورهای اشتعال جرقه‌ای روشی تاثیرگذار به منظور کاهش آلاینده‌ها است، زیرا آب به دلیل داشتن گرمای تبخیر بالا قابلیت جذب گرمای داخل سیلندر را دارد و این باعث کاهش دمای محفظه احتراق می‌شود. به سبب کاهش دما در کل سیستم، طبیعتا کاهش دما در قطعات نیز اتفاق می‌افتد که باعث افزایش عمر مفید قطعات موتور و همچنین جلوگیری از کوبش می‌شود[5].

تحقیقات زیادی در زمینه تولید اکسیدهای نیتروژن انجام شده که نشان می‌دهد با افزایش نسبت تراکم در موتورها، تولید اکسیدهای نیتروژن نیز افزایش پیدا می‌کند. زیرا که در پی افزایش نسبت تراکم به همان مقدار دمای محفظه احتراق نیز افزایش پیدا می‌کند. استفاده از آب با توجه به اینکه گرمای نهان تبخیر بالایی دارد علاوه بر کاهش دمای محفظه احتراق می‌تواند به تولید اکسیژن برای احتراق کامل سوخت نیز کمک کند[6].

تشکیل نیتروژن مونوکسید در محفظه احتراق موتور با معادله زلدوویچ (Zeldovich) بررسی می‌شود، واکنش اکسیداسیون نیتروژن با مخلوط سوخت و هوا در حالت شبه استوکیومتری به شرح زیر است:

$$O + N_2 = \mathrm{NO} + \mathrm{N} \qquad (۱)$$

$$N + O_2 = NO + O \qquad (۲)$$

$$N + OH = NO + H \qquad (۳)$$

باتوجه به روابط بالا و شبیه‌سازی انجام شده در نرم‌افزار AVL Fire مشخص شده‌است که افزودن آب به محفظه احتراق سبب کاهش تولید نیتروژن مونوکسید می‌شود.

مینگرو و همکاران[6]، دمای داخل سیلندر را در دور موتور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه و در زوایای مختلف میل‌لنگ بررسی کردند.

موتور استفاده‌شده در مقاله مینگرو و همکاران، یک موتور بنزینی با نسبت تراکم ۱۳ است که با استفاده از تزریق آب به مقدار ۵ تا ۲۵ درصد جرمی سوخت نیز خنک‌کاری می‌شود.

آنها نشان دادند که روند افزایشی دما در هر دو شبیه‌سازی یکسان می‌باشد که این خود نشان دهنده آن است که شبیه‌سازی در این پژوهش نیز به‌درستی انجام شده‌است. پس از بررسی دقیق‌تر نتایج مشخص است که تاثیر استفاده از آب و متانول در کاهش دمای داخل سیلندر به مراتب بیشتر از استفاده از آب به تنهایی است.

یکی دیگر از روش‌های مرسوم که معمولاً آن را با پاشش آب مقایسه می‌کنند روش استفاده از خنک‌کن میانی است. در جدول زیر می‌توان چند مورد از تفاوت‌ها و شباهت‌های آنها را مشاهده کرد:

جدول ۱) مقایسه روش خنک‌کاری با خنک‌کن میانی و آب[7].

نوع مایع	روش خنک‌کاری		
	بدون خنک‌کاری	پاشش آب ($3\frac{kg}{h}$)	خنک‌کن میانی
فشار خروجی (mbar)	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۱۸۰۰
دمای خروجی (°C)	91	60	60
اکسیدهای نیتروژن(gr/kg fuel)	27/1	17/8	24/6
ذرات معلق (gr/kg fuel)	0/28	0/35	0/26
کاهش نسبی اکسیدهای نیتروژن	-	%34	%9
کاهش نسبی ذرات معلق	-	%26	%-8
نسبت هوا به سوخت	1/78	1/82	1/86

جدول ۲) گرمای نهان تبخیر و میزان تغییر دما برای حداکثر ظرفیت خنک‌کنندگی آب و الکل[14].

نوع مایع	گرمای نهان تبخیر	نسبت به آب	میزان تغییر دما (K°)
بنزین	۳۰۵	%۱۵	۲۵
بنزین و ۱۰٪ اتانول	۴۰۰	%۱۸	۲۸
اتانول	۹۰۰	%۴۰	۶۳
متانول	۱۱۰۰	%۴۹	۷۷
۵۰% آب و ۵۰٪ متانول	۱۶۸۰	%۷۴	۱۱۸
آب	۲۲۶۰	%۱۰۰	۱۵۸

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌کنید، با استفاده از یکی از روش خنک‌کاری دمای خروجی در حدود ۳۰ درجه کاهش پیدا کرده است. همچنین برخی از آلاینده‌های موتور مانند اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق نیز کاهش یافته‌است.

لازم به ذکر است که بخار آب موجود در سیلندر ممکن است بر مقاومت در برابر خوردگی و خواص روانکاری روغن موتور تاثیر نامطلوب بگذارد. بنابراین در این نوع موتورها و با این‌گونه سیستم خنک‌کاری به وسیله آب لازم است که سیستم روغن‌کاری موتور تحت فشار بالا کار کند و شرایط خاصی برای آن در نظر گرفته شود. البته این مشکل را می‌توان با استفاده از مخلوط آب و الکل و با مقدار کمی‌روغن محلول در آب حل کرد زیرا که آب تزریق شده می‌تواند سیلندر را خنک کند و خود الکل که قابل اشتعال است به عنوان یک ماده ضد یخ زدگی عمل می‌کند و روغن هم به مقاومت در برابر خوردگی سیلندر کمک می‌کند.

۳-۲- ویژگی‌ها

متانول نیز خواص مشابه با آب دارد و به مانند آن باعث کاهش دمای سیلندر می‌شود. بدین ترتیب می‌توان زمان جرقه موتور را جلو انداخت بدون آنکه در موتور کوبش ایجاد شود. چون دمای هوای ورودی کاهش داشته است. در جدول ۲ گرمای نهان تبخیر آب و الکل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

همچنین متانول با عدد اکتان بالایی که دارد یکی از بهترین گزینه‌ها برای استفاده به عنوان سوخت در موتورهای با نسبت تراکم بالاست. دو عامل مهم برای جلوگیری از کوبش در موتورها، عدد اکتان و دمای خوداشتعالی است که برای متانول این دو عدد مقدار بالایی دارند که نمایانگر این است که متانول می‌تواند در کنار بنزین سوخت مناسبی برای موتورها باشد.

۳-۳- انواع روش های اضافه کردن آب و متانول

اصلی‌ترین هدف از پاشش آب و متانول خنک کردن نقاط داغ محفظه احتراق با استفاده از ویژگی خنک‌کنندگی آب و متانول است. در این روش باید مقدار آب حداقل باشد. نقاط مختلفی برای پاشش آب و متانول می‌توان درنظر گرفت:

- تک نقطه بالادست یا پایین دست کمپرسور و یا بعد از خنک‌کن میانی
- چند نقطه در مسیر ورودی هوا
- پاشش مستقیم در سیلندر با نازل جدا یا نازل سوخت

آب بعد از پاشش در داخل سیلندر ابتدا با هوا مخلوط شده و سپس شروع به بخار شدن می‌کند که این اتفاق ابتدا در مرحله تراکم و سپس در احتراق کمک شایانی می‌کند. فرایند تبخیر آب نه تنها به شرایط عملکردی موتور بلکه به نسبت سوخت و هوا نیز مرتبط است[7].

لازم به ذکر است که جلو انداختن احتراق در موتور تاثیر چشمگیری در وقوع کوبش دارد. زیرا که جلو انداختن احتراق باعث افزایش فشار و دما می‌شود و درنتیجه به نقطه مرگ بالا نزدیک می‌شود. در تحقیقات متعددی آمده است که با افزایش یک واحد اکتان می‌توان حدودا احتراق را یک درجه به جلو انداخت، پس می‌توان نتیجه گرفت که در موتورهای تقویت شده که بخاطر افزایش فشار دمای بالاتری نیز دارند و حدود ۱۰ تا ۶۰ کلوین گرم‌تر هستند، باید از سوخت با عدد اکتان به مراتب بالاتری استفاده نمود[8].

کیفیت روش پاشش آب و متانول به طراحی نازل و فشار تزریق نیز بستگی دارد و محل قرارگیری و هدف‌گیری نازل آب نیز در این روش بسیار مهم است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با نصب نازل آب و متانول در نزدیکی سوپاپ‌های ورودی به مانند پاشش مستقیم عمل می‌کنند و باعث خنک‌کاری و تبخیر زودرس می‌شود. در شبیه‌سازی دیگری تبخیر سوخت مایع و آب موجود در محفظه احتراق در سرعت‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفته‌اند، نتایج نشان می‌دهد به دلیل گرمای نهان تبخیر بالاتر، آب بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد و در شرایط سرعت کم تا متوسط بیش از ۵۰ درصد آب تبخیر نمی‌شود[9]. لذا بررسی دقیق میزان تبخیر آب اهمیت زیادی در طراحی و بهینه‌سازی این سیستم‌ها داشته و همچنین برای محاسبه دقیق میزان انتشار گرما نیز حائز اهمیت است. در واقع باید از تبخیر کامل آب مطمئن شد زیرا که این امر می‌تواند باعث ایجاد مشکلاتی مانند خوردگی سیلندرها و یا آلودگی روغن روانکار شود و تشخیص این اتفاق با حسگرها چندان میسر نیست و بهتر است با محاسبات و اندازه‌گیری دمای کاری سیلندر تخمین زده شود[10]. دمای پایین داخل سیلندر در پایان مرحله تراکم به دلیل تبخیر آب است که ممکن است بر تاخیر احتراق و سرعت آن نیز تاثیر بگذارد. همچنین سایر پارامترهای موتور باید به طور همزمان تنظیم شود تا بتوان عملکرد موتور را در انتشار آلاینده‌ها بررسی نمود. بنابراین نتایج متناقض عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای تعجب آور نیست زیرا که شرایط و عملکرد موتورها با یکدیگر مختلف متفاوت است.

به مانند قبل تاثیر پاشش آب بر روی اکسیدهای نیتروژن را می‌توان از سه جنبه بررسی کرد: تاثیر بر روی غلظت، حرارت و ترکیب شیمیایی آن. عوامل مختلفی از جمله نسبت هوا به سوخت برای بهینه‌سازی بازدهی احتراق تاثیر دارد به طورکلی انتشار اکسیدهای نیتروژن از موتورهای بنزینی به سه عامل حداکثر دمای بدست آمده در طی احتراق، غلظت اکسیژن و زمان در دسترس برای واکنش‌ها بستگی دارد. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که تزریق آب در چندراهه ورودی با نسبت سوخت به آب ۵۰ درصد می‌تواند تولید اکسیدهای نیتروژن را تا ۲۵ درصد در سرعت‌های پایین کاهش دهد[11].

۴- مدلسازی و شبیه‌سازی

۴-۱- مشخصات کلی

در جدول ٤ مشخصات عمومی موتور مورد تست ارائه شده‌است.

لیست تمامی تغییرات در جدول۵ قابل مشاهده‌است.

یکی از اصلی‌ترین تفاوت‌ها در این موتور نسبت به حالت عادی و بدون توربوشارژر، تغییر در شکل و نحوه اتصال چندراهه خروجی است. این تغییرات نیز در راستای اضافه شدن توربوشارژ و نحوه اتصال توربوشارژ است، همچنین مسیرهای طراحی شده در چندراهه جدید نیز متفاوت با حالت اولیه آن است که به بازدهی این سیستم کمک شایانی می‌کند.

یکی از چشمگیرترین اثرات این تغییرات که با اضافه شدن توربوشارژ پدید آمد، افزایش توان وگشتاور موتور بوده‌است، بطوری که توان موتور از ۱۱۳ به ۱۵۰ اسب بخار و گشتاور آن نیز از ۱۵۵ به ۲۱۵ نیوتن‌متر رسیده است.

۴-۲- فرآیند شبیه‌سازی

در این بخش ابتدا فرآیند مدلسازی موتور و هم چنین پاشش آب و متانول بررسی می‌شود. پس از مدلسازی موتور و اعتبارسنجی آن با استفاده از نتایج تجربی به استخراج داده‌ها و بررسی نتایج پرداخته خواهد شد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

جدول ۴) مشخصات عمومی‌موتور ای-اف-سون-تی-سی

عناوین	مقادیر
حجم موتور	1700 cc
وزن موتور	158 kg
بیشینه گشتاور موتور بر حسب نیوتن متر	215 N.M @3500-4500 rpm
نوع بنزین	بنزین بدون سرب با اکتان ۹۵
ترتیب شماره سیلندرها از سمت تایمینگ	1-2-3-4
نوع روغن موتور	SJ 10W40
حداکثر مصرف روغن	۰/۲ لیتر در هر ۱۰۰۰ کیلومتر
نسبت کورس پیستون به قطر داخلی سیلندر	1/08
اندازه فاصله مرکز سوراخ گژن پین تا تاج پیستون	29/5 mm
نسبت تراکم	9/6
فاصله مرکز سیلندرها از همدیگر	84 mm
طول هر شاتون (از مرکز به مرکز)	134/5 mm
وزن شاتون‌ها بدون یاتاقان (گرم)	545-565 gr
نسبت شعاع میل لنگ به طول شاتون	0/25

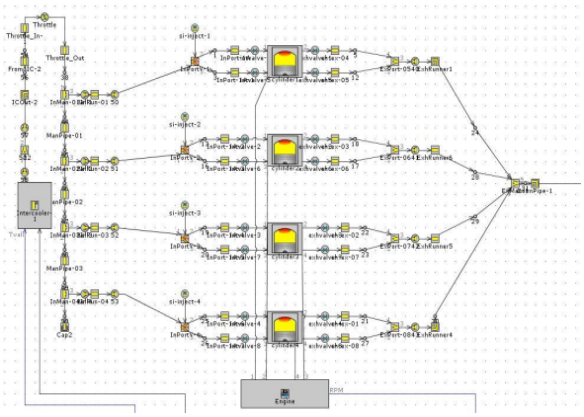
جدول۵) لیست تمامی تغییرات موتور ساده نسبت به حالت توربوشارژر

لیست تغییرات	
جابجایی محل دریچه گاز	تغییر طراحی واشر چندراهه دود
محل نصب ریل بنزین	اضافه شدن تغذیه روغن توربوشارژر
مجل نصب پایه نگهدارنده دسته سیم کویل و انژکتورها	اضافه شدن برگشت روغن توربوشارژر
محل نصب کانکتور سنسور ضربه	تغییر در تاج پیستون
محل نصب اینتر کانکتور کویل	کم شدن ضخامت پله فلایویل
محل نصب اینتر کانکتور انژکتورها	تغییر طراحی چرخ‌تسمه میل‌بادامک هوا
تغییر طراحی چندراهه دود	زمان‌بندی میل‌بادامک هوا
اضافه‌شدن مدار آب توربوشارژر	تغییر محل نشستن پوشش موتور
اضافه‌شدن مدار برگشت آب توربوشارژر	تغییر در مشخصه حسگر میل‌بادامک
افزایش طول پیچ دوسر رزوه چندراهه دود	پر شدن ساق سوپاپ دود با سدیم

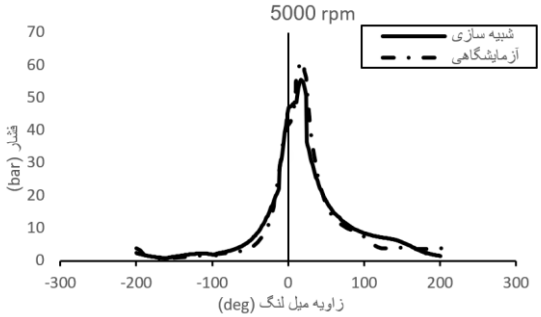
۴-۲-۱- مشخصات موتور

در بخش‌های قبل به طور مفصل درباره ویژگی‌های عمومی‌موتور بحث شد، ابتدا در نرم‌افزار این مشخصات وارد گردید و پس از هر مرحله تست و صحت‌سنجی آن نیز انجام می‌شود. ورودی اطلاعات این بخش شامل دو قسمت کلی موتور و سیلندرها می‌شود. بخش شبیه‌سازی موتور دارای سه منوی اصلی، هندسه سیلندرها و ترتیب احتراق است. در شکل زیر بخشی از اطلاعاتی که برای شکل هندسی سیلندرها مورد نیاز است را مشاهده می‌کنید.

در بخش مدلسازی سیلندرها نیز با دو بخش اصلی و پیشرفته روبرو هستیم، که در آن مشخصاتی مرتبط با جریان هوا و گرمای اطراف سیلندر از ما می‌خواهد. دیگر بخش‌ها نیز مرتبط با دریچه‌گاز، مجاری ورودی و خروجی هوا، مجموعه توربوشارژر و ... می‌باشد که آنها را نیز براساس مدل واقعی موتور شبیه‌سازی شده‌است. نمای کلی مدلسازی بخش موتوری مطابق شکل1 است.



شکل ۱) نمای طرحواره مدلسازی موتور در نرم‌افزار



شکل ۲) مقایسه فشار داخل سیلندر در دور موتور ۵۰۰۰rpm بین دو حالت مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی[12]

۴-۲-۲- مدل توربوشارژر

مدل توربوشارژر موتور EF7TC را در نرم‌افزار GT Power طراحی شده‌است. در این مدل سه بخش اصلی وجود دارد: کمپرسور، توربین و اینترکولر. در بخش توربین اطلاعات متفاوتی مورد نیاز است مانند فشار ورودی و خروجی و همچنین قطر دریچه‌ها.

۴-۲-۳- اعتبار سنجی

پس از راه‌اندازی مدل نتایجی بدست می‌آید که برای اعتبارسنجی آن نیاز به مقایسه این اطلاعات با نتایج آزمایشگاهی است. یکی از بهترین روش‌ها برای اعتبارسنجی مدل آن است که نمودارها و داده‌های حاصل از شبیه‌سازی نرم‌افزاری با نمودارها و داده‌های واقعی و آزمایشگاهی مقایسه شود در این بین یکی از داده‌هایی که می‌توان بین مدل نرم‌افزاری و نتایج آزمایشگاهی موتور مقایسه کرد، نمودار فشار داخل سیلندر بر حسب زاویه میل‌لنگ در دور موتورهای متفاوت است. در شکل ۲ فشار داخل سیلندر برحسب زاویه میل‌لنگ در دور موتور۵۰۰۰ دور بر دقیقه در دو حالت مورد مقایسه قرار گرفته است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌کنید، تطابق دو نمودار باتوجه به عدم دسترسی کامل مدلسازی به اتفاقات و شرایط واقعی موتور، قابل قبول می‌باشد و بدین ترتیب نشان می‌دهد که مدلسازی موتور ای-اف-سون با درصد خطای بسیار خوبی انجام شده‌است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

پس بدین ترتیب می‌توان ادامه مدلسازی را با همین مدل تایید شده پیش رفت تا به نتایج مورد نظر دست پیدا کرد. البته باید در نظر داشت که عملکرد دو موتور در شرایط یکسان نیز با هم تفاوت‌هایی دارند، زیرا که نمودار فشار به عوامل بسیار زیادی وابسته‌است. در این مقاله نیز که یک مدل نرم‌افزاری با یک موتور واقعی، قارلقی و همکاران، مقایسه شده‌است این مقدار اختلاف را می‌توان صرف نظر کرد. حال به منظور اطمینان بیشتر از شبیه‌سازی در ادامه مقایسه‌ای بین نمودار قدرت و گشتاور در دو حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی انجام شده‌است.

این موتور می‌تواند ۱۵۰ اسب بخار و ۲۱۵ نیوتن متر گشتاور تولید کند که با توجه به نمودار قدرت و گشتاور بدست آمده از نرم‌افزار می‌توان به صحت اطلاعات در دست پی برد . بیشترین گشتاور بدست آمده از این شبیه‌سازی برای موتور مقدار ۲۱۰ نیوتن متر می‌باشد که در دور موتور ۴۰۰۰ اتفاق افتاده‌است و این روند تقریبا به صورت خطی تا دور موتور ۶۰۰۰ ادامه پیدا کرده‌است. میانگین درصد اختلاف این دو نمودار نیز در حدود ۴/۵ درصد می‌باشد. بیشترین توان موتور طبق شبیه‌سازی مقدار ۱۵۲ اسب بخار می‌باشد که انطباق خوبی با عدد توان در واقعیت دارد. با بررسی همه نمودارهای ارائه شده این نتیجه حاصل می‌شود که شبیه‌سازی موتور با دقت قابل قبولی در حدود کمتر از ۹ درصد اختلاف انجام شده‌است.

تنظیمات اصلی مربوط به احتراق در بخش سیلندر نرم‌افزار قابل ویرایش است. برای انتقال حرارت و احتراق در سیلندر از دو تابع وشنی وایب استفاده می‌شود. ضریب انتقال حرارت براساس رابطه وشنی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$h_c\left(\frac{w}{m^2.k}\right) = 3/26\, B(m)^{-0/2} p(kPa)^{0/8} T(K)^{-0/55} w \left(\frac{m}{s}\right)^{0/8} \quad (٤)$$

$$w = \left[c_1 \bar{s}_p + \frac{c_2 V_d T_r}{P_r V_r}(p - p_m)\right] \quad (٥)$$

که در آن B قطر سیلندر، p فشار آنی سیلندر، V_d حجم جاروب شده، P_r،T_r،V_r حجم، دما و فشار سیال عامل در زمان خاص (برای مثال شروع فرآیند احتراق)، p_m فشار موتورینگ سیلندر در یک زاویه میل لنگ با p، T دمای آنی سیلندر، $\bar{s}_p$ سرعت میانگین پیستون و همچنین ضرایب c_1 و c_2 برای مراحل مختلف تخلیه، تراکم، احتراق و انبساط تعیین می‌شود.

در موتورهای اشتعال جرقه ای تابع وایب میزان سوختن مخلوط هوا و سوخت را در فرایند احتراق مشخص می‌کند ، برای شبیه‌سازی احتراق در نرم‌افزار از مدل ترمودینامیکی دوناحیه‌ای استفاده شده‌است. در واقع سیلندر به دو ناحیه سوخته و نسوخته تقسیم می‌شود سپس بر اساس همین روش جرم ناحیه سوخته شده محاسبه می‌شود و با کم کردن از جرم کل، جرم ناحیه نسوخته نیز به دست می‌آید. روابط آن نیز مطابق زیر است:

$$m = p \times \eta_{vol} \times \frac{v}{R_u \times T_u} \quad (٦)$$

$$m_b = X_b \times m \quad (٧)$$

$$X_b = 1 - exp - a \times \left(\frac{\theta - \theta_s}{\theta_d}\right)^n \quad (٨)$$

که در آن X_b کسر جرم سوخته به جرم کلی مخلوط در سیلندر است که از تابع وایب بدست آمده و در زمانی که احتراق آغاز نشده برابر صفر و زمانی که احتراق خاتمه می‌یابد برابر یک (حدودا ۰/۹۷) درنظر گرفته‌می‌شود، که θ زاویه میل لنگ، a و n ثابت، θ_s زاویه شروع احتراق و θ_d مدت زمان احتراق است[13].

۴-۲-۴- پاشش آب و متانول

در این بخش به نحوه پاشش آب و متانول پرداخته شده‌است که برای این‌کار نیاز به یک نازل است که بتواند وظیفه پاشش آب و متانول را بر عهده بگیرد. در نرم‌افزار جی-تی-پاور ابزارهای مختلفی برای پاشش سوخت و موارد مشابه وجود دارد ولی هرکدام صرفا در نقطه‌های خاصی مورد استفاده قرار می‌گیرند و بعضی نیز توانایی پاشش مخلوط را ندارند. به همین منظور پس از بررسی‌های مختلف نتیجه آن شده که با استفاده از رابط InjRateConn می‌توان مخلوط آب و متانول را به موتور اضافه کرد. این نازل از دو بخش اصلی تشکیل شده‌است که بخش اول شامل میزان جریان جرمی‌ورودی، دمای مخلوط و نوع می‌باشد و در بخش دیگر اطلاعات مربوط به خود نازل پاشش را می‌خواهد. دبی سیال‌درنظر گرفته شده پیشنهادی برای این مخلوط $8/33\frac{g}{s}$ درنظر گرفته شد که با دمای ۲۳ درجه سانتی گراد وارد مجرای ورودی هوا می‌شود. در این پروژه صرفا پاشش مخلوط آب و متانول در مجرای ورودی هوا بررسی می‌شود و درباره دیگر روش‌های پاشش مخلوط آب و متانول بحثی نخواهد شد. در بخش Fluid object درصد جرمی‌مختلف مخلوط آب و متانول بررسی می‌شود. در این بخش قصد آن است که درصدهای مختلف مخلوط آب و متانول بررسی و مزایا و معایب هرکدام را مشخص شود و پس از آن بهینه‌ترین حالت انتخاب شود.

برای مشخص کردن یکسری از داده‌های اولیه پاشش آب و متانول نیاز به یک مرجع برای تامین مقادیر اولیه است. به همین منظور پس از بررسی دستورالعمل نصب و راه اندازی این لوازم‌ها اطلاعات مفیدی بدست آمد. از سه نازل مختلف که به ترتیب توانایی پاشش با جریان‌های ۲۵۰ و ۵۰۰ و ۱۰۰۰ سی سی بر دقیقه را دارند استفاده شده‌است که برای موتورهای قدرت پایین می‌توان از یکی از نازل‌های ۲۵۰ و یا نهایتا ۵۰۰ سی سی بر دقیقه استفاده نمود. که شبیه‌سازی فرض بر نازل ۵۰۰ سی سی بر دقیقه است زیرا تغییرات را به صورت واضح‌تر بیان می‌کند.

سه تا از اصلی‌ترین مزیت‌های استفاده از این تجهیزات که توسط خود سازنده مطرح شده‌است به شرح زیر است:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

- به دلیل وجود متانول در این مخلوط، طبق ادعای سازنده اگر مخلوط به ازای ۵۰ درصد آب و ۵۰ درصد متانول به ورودی هوا پاشش شود می‌تواند ۷ تا ۱۰ واحد اکتان سوخت را بهبود دهد.
- اضافه کردن آب و متانول امکان پیش افتادن جرقه در موتور را فراهم می‌سازد.
- مخلوط آب و متانول به تنهایی قابلیت افزایش قدرت در موتور را ندارد ولی با استفاده از آب و متانول می‌توان با خیال آسوده بوست توربوشارژر را افزایش داد و درنتیجه قدرت موتور نیز افزایش می‌یابد بدون آن که نگرانی‌ای بابت ایجاد کوبش در موتور باشد.

در واقع با استفاده از آب و متانول می‌توان نسبت هوا به سوخت را حداقل یک واحد بیشتر درنظر گرفت که خود باعث افزایش قدرت در موتور می‌شود. این بدین منظور است که برای بالابردن نسبت هوا به سوخت یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌ها ایجاد کوبش در موتور است که بخاطر دمای بسیار زیاد داخل سیلندر اتفاق می‌افتد، پس با استفاده از پاشش این مخلوط می‌توان جلوی افزایش بیش از حد دمای سیلندرها را گرفت و درنتیجه مانع ایجاد کوبش در موتور شد. حال که با افزایش دما، کوبش در موتور رخ نمی‌دهد، پس می‌توان نسبت هوا به سوخت را افزایش داد و این کار نیز موجب افزایش قدرت موتور خواهدشد.

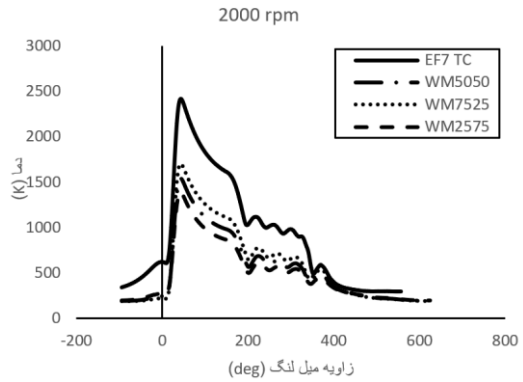
حال برای بررسی تاثیر استفاده از مخلوط آب و متانول سه حالت ۵۰٪ آب ۵۰٪ متانول، ۲۵٪ آب ۷۵٪ متانول و ۷۵٪ آب ۲۵% متانول که به ترتیب با علائم اختصاری WM۵۰۵۰، WM۲۵۷۵ و WM۷۵۲۵ مشخص شده‌اند، با یکدیگرمقایسه می‌شوند. هدف از این مقایسه آن است که یکی از بهینه‌ترین درصدها از این مخلوط مشخص شود.

۵- بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی

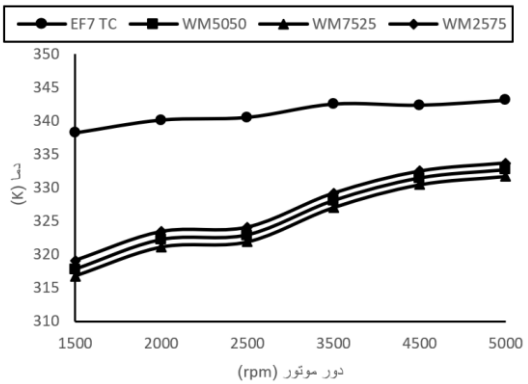
همانطور که در فصل قبل مشاهده شد، تاثیر افزودن یک نازل در محل مناسب برای پاشش مخلوط آب و متانول در مدل مشخص شد، در نیز نتایج به دست آمده از این موتور با و بدون پاشش مخلوط آب و متانول بررسی می‌شود. همانطور که قبلا گفته شد در این بررسی از سه درصد مختلف برای مخلوط استفاده می‌شود، ۵۰% آب ۵۰٪ متانول، ۲۵٪ آب ۷۵٪ متانول و ۷۵% آب ۲۵٪ متانول که تاثیر تغییرات این درصدها با حالت اولیه بررسی می‌شود.

۵-۱- دما

دما یکی از اصلی‌ترین فاکتورها برای مشاهده تاثیرگذاری مخلوط آب و متانول است، زیرا همانطور که قبلا نیز اشاره شد، آب به تنهایی بخاطر داشتن گرمای نهان بالاتر نسبت به مخلوط هوا و سوخت عمل خنک‌کاری را انجام می‌دهد ضمن اینکه الکل نیز



شکل۳) مقایسه دمای داخل سیلندر در حالت‌های مختلف پاشش آب و متانول در دور۲۰۰۰



شکل٤) مقایسه میانگین دمای داخل چندراهه ورودی هوا

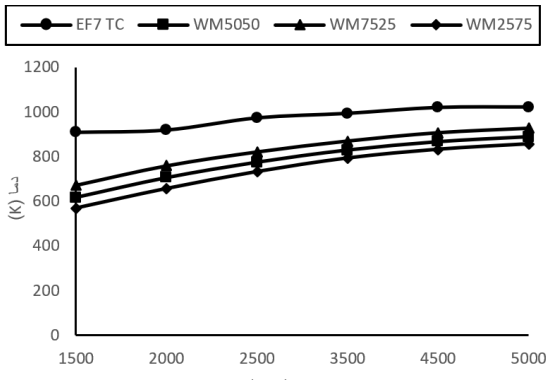
خاصیت خنک‌کنندگی دارد. پس طبق شواهد موجود باید دما در سیلندرها کاهش یابد.

از نتایج بدست آمده در شکل ۳ مشخص است که با افزایش آب و متانول به هوای ورودی دمای داخل سیلندرها کاهش چشمگیری پیدا می‌کند بطوریکه در دور ۲۰۰۰دور بر دقیقه دما بیش از ۶۰۰ کلوین کاهش داشته‌است و این اتفاق در دور ۳۵۰۰ دور بر دقیقه نیز حدودا ۴۰۰ کلوین کاهش داشته‌است. در بین درصدهای مختلف مخلوط نیز در هردو دور موتور، WM۲۵۷۵ بیشترین کاهش دما را داشته‌است. در ادامه دمای چندراهه ورودی نیز در دور موتورهای مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شود.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در این بخش نیز دما در چندراهه ورودی حدودا ۲۰ درجه کاهش پیدا کرد. این بدین علت است که فرآیند خنک‌کاری از همان ابتدا و با ورود هوا به داخل چندراهه شروع می‌شود و این کاهش دما تا بعد از خروج دود از سوپاپ‌های خروجی ادامه دارد.

باتوجه به شکل ۵ ، دما در خروجی نیز به مانند ورودی هوا کاهش یافته‌است. این مقدار در حدود ٤۰۰ کلوین است که میزان قابل‌توجهی می‌باشد.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]



شکل ۵) مقایسه میانگین دمای داخل چندراهه خروجی هوا

۵-۲- آلاینده

فرمول تشکیل اکسیدهای نیتروژن در برابر سوختن بنزین از رابطه زلدویچ بدست می‌آید.

$$4C_8H_{17} + 49O_2 \rightarrow 32CO_2 + 34H_2O \qquad (۹)$$

زمانی که متانول به ترکیب اضافه می‌شود:

$$2CH_3OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O \qquad (۱۰)$$

با اضافه شدن آب به مخلوط فوق نیز داریم:

$$2CH_3OH + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2CO_2 + 6H_2O \qquad (۱۱)$$

معادلات زلدویچ به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$2N_2 + O_2 \rightarrow 2N + 2NO \qquad (۱۲)$$

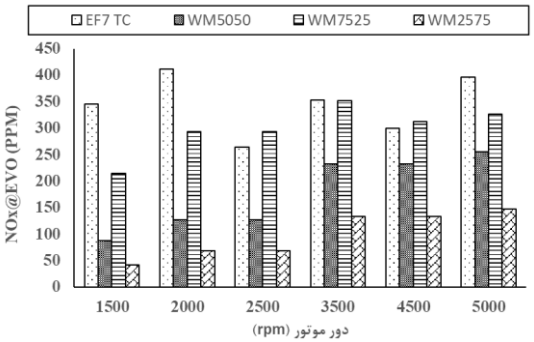
$$N_2 + 2O_2 \rightarrow 2O + 2NO \qquad (۱۳)$$

$$N_2 + 2OH \rightarrow 2H + 2NO \qquad (۱٤)$$

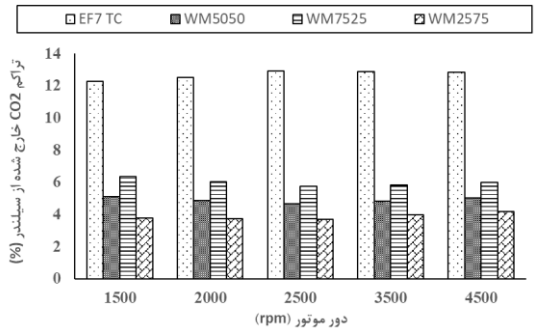
در ادامه مقدار اکسیدهای نیتروژن در دور موتورهای مختلف با و بدون پاشش آب و متانول با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هماهنطور که مشخص است پس از اضافه کردن مخلوط و به علت اضافه شدن اکسیژن، مقدار اکسیدهای نیتروژن کاهش زیادی خواهد داشت. مقدار اکسیدهای نیتروژن در این روش حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ واحد کاهش داشته‌است.

همانطور که از شکل۶ مشخص است، تغییرات اکسیدهای نیتروژن به میزانی است که از حدود ۴۰۰ قسمت در میلیون تا مقدار حدودا ۵۰۰ قسمت در میلیون در بیشترین مقدار پاشش آب، کاهش پیدا کرده‌است که این مقدار قابل توجه بخاطر حضور مخلوط آب و متانول در مخلوط می‌باشد.

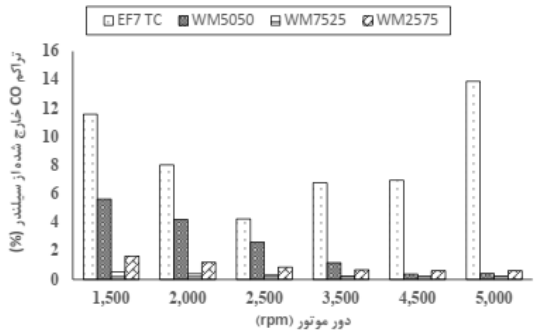
شکل ۷ میزان تغییرات دی اکسید کربن را در دورهای مختلف با مقادیر مختلف مخلوط آب و متانول نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود.



شکل ۶) مقایسه انتشار آلاینده اکسیدهای نیتروژن خارج شده از اگزوز در دور موتورهای مختلف[14]



شکل ۷) نمودار مقایسه میزان دی اکسید کربن در دور موتورهای مختلف



شکل ۸) نمودار مقایسه میزان آلاینده مونوکسید کربن در دور موتورهای مختلف

آلاینده مونوکسید کربن نیز از جمله آلاینده‌های خارج شده از موتور است که مقادیر آن را در دورهای مختلف و با مقدار پاشش‌های متفاوت مشاهده می‌کنید. (شکل ۸)

باتوجه به مقادیر شکل ۸ مشخص می‌شود که کاهش مقدار مونوکسید کربن با اضافه شدن مخلوط آب و متانول بدست می‌آید و مقادیر آن نیز یکنواخت‌تر خواهند شد. هردو نمودار تغییرات دی اکسید کربن و مونوکسید کربن به دلیل کامل‌تر شدن فرآیند سوختن، تولید این گازها نیز کاهش پیدا می‌کند، زیرا یکی از اصلی‌ترین دلایل کاهش این دو گاز، سوختن کامل مخلوط هوا و سوخت است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

۵-۳- گشتاور و توان

در انتها به تاثیر پاشش مخلوط آب و متانول بر گشتاور و توان خروجی پرداخته شده‌است. در این بخش نیز همانطور که انتظار می‌رود پاشش آب و متانول به تنهایی تاثیر چشمگیری در توان و گشتاور نمی‌توانند داشته‌باشند. در شکل ۹ و ۱۰ تغییرات گشتاور و توان را ملاحظه می‌کنید.

همانطور که گفته شد با استفاده از این روش می‌توان اصلی ترین محدودیت های تقویت موتور را کنار زد و با تقویت توربوشارژر و یا تقویت مکانیکی موتور مانند اضافه کردن هدرز و کیت مکش و غیره به توان و گشتاور بالاتر نیز رسید.

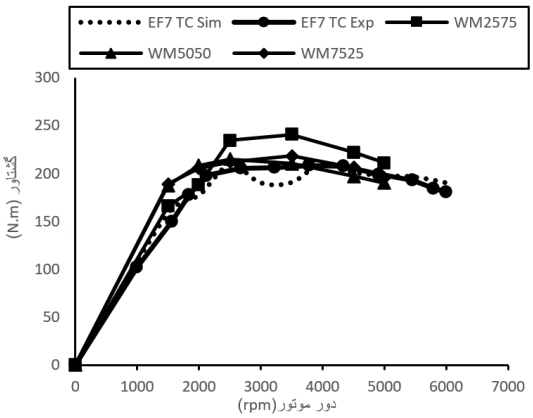
۶- نتیجه گیری

با بررسی نمودارهای بدست آمده از شبیه‌سازی نتایج زیر بدست خواهند آمد که به صورت خلاصه در ادامه به آنها پرداخته می‌شود:

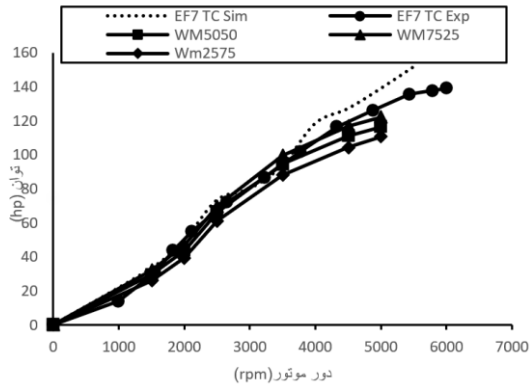
- روش استفاده از مخلوط آب و متانول یک روش نسبتا جدیدی است که کمتر توجهی به آن شده‌است درحالی که همانطور که ذکر شد می‌تواند با هزینه کم بسیار موثر و مفید واقع شود. در ایران بخاطر کیفیت پایین بنزین و افزایش خودروهایی با موتورهای دارای توربوشارژر، استفاده از این روش می‌تواند در جهت جلوگیری از کوبش،کاهش استهلاک قطعات موتور و کاهش دما بسیار موثر باشد و این به افزایش عمر مفید موتور کمک شایانی می‌کند.
- همچنین از نمودار آلاینده‌ها نیز می‌توان پی برد که این روش در کاهش آلاینده‌هایی نظیر اکسیدهای نیتروژن، مونوکسید کربن نیز بسیار خوب عمل کرده و می‌توان از این روش در شهرهای شلوغ به منظور کاهش آلاینده‌ها استفاده نمود.
- افزودن آب و متانول به خودی خود باعث افزایش قدرت و توان در موتور نمی‌شود، البته بخاطر وجود متانول و افزایش عدد اکتان فرآیند احتراق بهتر انجام نمی‌شود، ولی در ادامه می‌توان با تقویت توربوشارژر به گشتاور و توان بالاتری نیز رسید زیرا که یکی از اصلی‌ترین محدودیت‌های تقویت توربوشارژر ایجاد کوبش در موتور است که با این روش می‌توان از آن جلوگیری کرد.
- عمده تفاوت این مقاله با مقاله‌های دیگر در استفاده همزمان از آب و متانول است، زیرا اکثر کارهای انجام شده به بررسی تاثیر آب به تنهایی یا مخلوط آب و اتانول پرداخته‌اند.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.



شکل ۹) منحنی گشتاور در حالات مختلف



شکل ۱۰) منحنی توان در حالات مختلف

منابع

1- Li X, Zhen X, Wang Y, Liu D, Tian Z. The knock study of high compression ratio SI engine fueled with methanol in combination with different EGR rates. Fuel. 2019 Dec 1;257:116098.

2- Miganakallu N, Yang Z, Rogóż R, Kapusta ŁJ, Christensen C, Barros S, Naber J. Effect of water-methanol blends on engine performance at borderline knock conditions in gasoline direct injection engines. Applied Energy. 2020 Apr 15;264:114750.

3- Li A, Zheng Z, Peng T. Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine. Fuel. 2020 May 15;268:117376.

4- Xu C, Cho H. Effect of methanol/water mixed fuel compound injection on engine combustion and emissions. Energies. 2021 Jul 25;14(15):4491.

5- Ghazal OH, Borowski G. Effect of Water Injection on SI Engine Performance and Emissions. InThe Ninth Jordanian International Mechanical Engineering Conference (JIMEC 2018) 2018.

6- Mingrui W, Sa NT, Turkson RF, Jinping L, Guanlun G. Water injection for higher engine performance and lower emissions. Journal of the Energy Institute. 2017 Apr 1;90(2):285-99.

7- Hoppe F, Thewes M, Baumgarten H, Dohmen J. Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions. International Journal of Engine Research. 2016 Jan;17(1):86-96.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]

پیوست

ویژگی‌های متانول

متانول نیز خواص مشابه با آب دارد و به مانند آن باعث کاهش دمای سیلندر می‌شود. بدین ترتیب می‌توانیم زمان جرقه موتور را جلو بیاندازیم بدون آنکه در موتور شاهد وقوع کوبش باشیم. چون دمای هوای ورودی کاهش داشته است. در جدول ۱ پیوست گرمای نهان تبخیر آب و الکل مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

جدول ۱ پیوست) گرمای نهان تبخیر و میزان تغییر دما برای حداکثر ظرفیت خنک‌کنندگی آب و الکل.

نوع مایع	گرمای نهان تبخیر	نسبت به آب	میزان تغییر دما (K)
بنزین	۳۰۵	%۱۵	۲۵
بنزین و ۱۰٪ اتانول	۴۰۰	%۱۸	۲۸
اتانول	۹۰۰	%۴۰	۶۳
متانول	۱۱۰۰	%۴۹	۷۷
۵۰% آب و ۵۰٪ متانول	۱۶۸۰	%۷۴	۱۱۸
آب	۲۲۶۰	%۱۰۰	۱۵۸

8- Rohit A, Satpathy S, Choi J, Hoard J, Surnilla G, Hakeem M. Literature survey of water injection benefits on boosted spark ignited engines.
9- d'Adamo A, Berni F, Breda S, Lugli M, Fontanesi S, Cantore G. A numerical investigation on the potentials of water injection as a fuel efficiency enhancer in highly downsized GDI engines. SAE Technical Paper; 2015 Apr 14.
10- Kim J, Park H, Bae C, Choi M, Kwak Y. Effects of water direct injection on the torque enhancement and fuel consumption reduction of a gasoline engine under high-load conditions. International Journal of Engine Research. 2016 Sep;17(7):795-808.
11- Sun Y, Fischer M, Bradford M, Kotrba A, Randolph E. Water recovery from gasoline engine exhaust for water injection. SAE Technical Paper; 2018 Apr 3.
12- Gharloghy J, KAKAEE A, FOROOGHIFAR A. COMPARISON OF EF7. TC ENGINE PERFORMANCE IN TWO MODES OF CNG FUEL AND PETROL USING PISTON AND COMBUSTION CHAMBER THERMAL SIMULATION.
13- Heywood JB. Combustion engine fundamentals. 1ª Edição. Estados Unidos. 1988;25:1117-28.
14- Adnan R, Masjuki HH, Mahlia TM. Performance and emission analysis of hydrogen fueled compression ignition engine with variable water injection timing. Energy. 2012 Jul 1;43(1):416-26.
15- IKCO_EF7_TC_Engine_ServiceManual.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-02-19]