



شبیه سازی سه بعدی عملکرد و آلاینده های احتراق هیدروژن-دیزل در موتور دیزل سنگین در حالت بار کامل

سید محمد حسینی¹، روح اله احمدی^{2*}، مصطفی محبی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- استادیار، تبدیل انرژی، دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- دانشجوی دکتری، تبدیل انرژی، دانشگاه شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 16765-163، iust.ac.ir, ahmadi@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 13 دی 1395

پذیرش: 18 بهمن 1395

ارائه در سایت: 14 اسفند 1395

کلید واژگان:

احتراق موتور دیزل

هیدروژن

آلاینده های

شبیه سازی

عملکرد موتور

سوخت جایگزین

چکیده

با توجه به اثرات مخرب محیط زیستی مصرف سوخت های فسیلی، تحقیقات بسیاری برای انتخاب سوخت جایگزین با آلاینده های کمتر و منابع پایدار انجام شده است. در این بین هیدروژن یکی از برجسته ترین سوخت های جایگزین به شمار می رود زیرا مشخصه های احتراقی آن شبیه سوخت های فسیلی است و از طرف دیگر در دسته ی سوخت های پاک و تجدید پذیر قرار گرفته است. در این مقاله به شبیه سازی احتراق دیزل - هیدروژن در موتور دیزل سنگین در حالت بار کامل و در سرعت 1600rpm پرداخته شده است. تمام مشخصه های موتور نظیر سرعت، زاویه پاشش، مدت پاشش و انرژی ورودی در شبیه سازی ثابت در نظر گرفته شده است. پارامتر متغیر، نسبت جرم یا انرژی هیدروژن به دیزل می باشد. هیدروژن به نسبت انرژی ورودی دیزل از 0٪ (دیزل خالص) تا 70٪ (70٪ انرژی ورودی هیدروژن و 30٪ انرژی از سوخت دیزل تامین می شود) تغییر داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان دهنده آن است که در بهترین حالت جایگزینی هیدروژن به جای دیزل، آلاینده های اکسیدهای نیتروژن، دی اکسیدکربن، هیدروکربن نسوخته، دوده و مونواکسیدکربن به ترتیب به میزان 8٪، 14٪، 54٪، 14٪، 70٪ کاهش خواهند یافت. تاثیر این جایگزینی بر عملکرد موتور نیز کاهش 2.8٪ راندمان اندیکاتوری است. جایگزینی هیدروژن به جای دیزل منجر به تاخیر در شروع احتراق و رشد نرخ افزایش فشار و افزایش حرارت آزاد شده خواهد شد، ولی این افزایش فشار منجر به پدیده کوبش نخواهد گردید.

3D Simulation of Performance and Pollution of Hydrogen-Diesel Combustion in Heavy Duty Engine

Seyed Mohammad Hosseini¹, Rouhollah Ahmadi^{1*}, Mostafa Mohebi²

1- School of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University, Tehran, Iran

* P.O.B. 16765-163, Tehran, Iran, ahmadi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 January 2017
Accepted 06 February 2017
Available Online 04 March 2017

Keywords:

Combustion in diesel engine
Hydrogen
Emission
Simulation
Engine performance
Alternative fuel

ABSTRACT

Concerning the adverse environmental impacts of fossil fuel consumption, many investigations have been performed on choosing more environmentally friendly fuel alternatives and sustainable resources. In this regard, hydrogen is considered to be one of the promising alternative fuels as its combustion features are the most similar to fossil fuels and it also falls into the category of renewable and clean fuels. This article studies the simulation of hydrogen-diesel combustion in heavy duty engine at full load and speed of 1600 rpm. All engine features including speed, spray angle, spray duration and input power are held fixed in the simulation. Variable parameter is the ratio of mass or hydrogen energy to diesel. Depending on input power of diesel, hydrogen is changed from 0% (pure diesel) to 70% (i.e. 70% is supplied from the input power of hydrogen and the remaining 30% from diesel fuel). The results of simulation show that hydrogen substitution with diesel at the best state leads to reduction of pollutants such as nitric oxides, carbon dioxide, unburned hydrocarbon, soot and carbon monoxide to 8%, 14%, 54%, 14% and 70%, respectively. This substitution, however, causes the reduction of indicated efficiency to 2.8%. Hydrogen substitution with diesel can also postpone the combustion, and results in an increase in PRR and HRR; but, this pressure enhancement does not lead to knocking.

1- مقدمه

کلیه وسایل نقلیه دیزلی را از چرخه حمل و نقل خود حذف خواهند کرد. شورای فدرال کشور آلمان نیز اخیراً تصمیم گرفته که از سال 2030 به بعد صدور مجوز برای تردد خودروهای بنزینی و دیزلی صادر نشود و شماره گذاری آن ها متوقف شود. کشور دانمارک نیز می خواهد کپنهاگ را اولین شهر عاری از دی اکسیدکربن در سال 2025 تبدیل کند. در حال حاضر تعداد

امروزه کنترل و کاهش آلودگی هوا جزو بزرگترین معضلات کشورهای صنعتی و در حال توسعه می باشد. شرکت های خودروساز هر روز با محدودیت های آلاینده های شدیدتری مواجه می شوند تا جایی که کشورهای مثل نروژ و هلند و شهرهای بزرگی مانند پاریس، مکزیکوسیتی، مادرید و آتن از سال 2025

Please cite this article using:

S. M. Hosseini, R. Ahmadi, M. Mohebi, 3D Simulation of Performance and Pollution of Hydrogen-Diesel Combustion in Heavy Duty Engine, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 177-186, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جدول 1 مقایسه‌ی ویژگی‌های سوخت دیزل و هیدروژن

شماره	خواص	دیزل	هیدروژن
1	فرمول	n-C ₇ H ₁₆	H ₂
2	دمای خود اشتعالی (K)	530	858
3	کمترین انرژی برای اشتعال (MJ)	-	0.02
4	محدوده اشتعال‌پذیری (درصد حجمی در هوا)	0.7-5	4-75
5	نسبت هوا به سوخت استوکیومتری بر حسب جرم	14.5	34.3
6	وزن مولکولی ($\frac{g}{mole}$)	100	2
7	محدوده اشتعال‌پذیری (نسبت تعادل)	-	0.1-7.1
8	چگالی در دمای 16°C و فشار 1 bar ($\frac{kg}{m^3}$)	833-881	0.0838
9	ارزش پایین حرارتی خالص ($\frac{MJ}{kg}$)	42.5	119.93
10	سرعت شعله ($\frac{cm}{s}$)	30	265-325
11	فاصله خاموشی در شرایط استاندارد هوا (cm)	-	0.064
12	پخش در هوا ($\frac{cm^2}{s}$)	-	0.63
13	عدد اکتان	30	130
14	عدد ستان	40-55	-
15	دمای جوشش (K)	436-672	20-27
16	ویسکوزیته در دمای 15.5°C (سانتی‌پوز)	2.6-4.1	-
17	وزن مخصوص	0.83	0.091

کسری از انرژی دیزل را در سه مدت زمان مختلف تزریق هیدروژن در بارهای متفاوت موتور بررسی نموده به این نتیجه رسیده است که اضافه شدن هیدروژن به جای دیزل منجر به تاخیر در اشتعال و کاهش فشار درون سیلندر خواهد شد. در مقاله چو [6] تاثیر اضافه شدن هیدروژن را بر آلاینده‌های مونواکسیدکربن، هیدروکربن نسوخته بررسی کرده و دلیل کاهش این آلاینده‌ها را حالت گازی شکل بودن هیدروژن بیان کرده که منجر به کاهش پدیده خیس دیواره می‌شود. این در حالیست که ساراوانان دلیل کاهش مونواکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته را نبود کربن در مولکول هیدروژن دانسته است. گات [7] نیز بر روند کاهشی مونواکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته در حضور هیدروژن تاکید کرده است. چوی [8] در مقاله خود بیان داشته که مخلوط فقیر $\phi < 1$ می‌تواند موجب کاهش مجموع هیدروکربن‌ها شود، البته وی به این نکته اشاره کرده است که در صورتی که مخلوط سوخت نسبت به هوا خیلی فقیر ($\phi \ll 1$) شود این آلاینده افزایش پیدا خواهد نمود. الکید و شوهرگ [10,9] نیز به این نکته که، کاهش دما موجب کاهش بازدهی و کاهش واکنش‌پذیری مخلوط داخل سیلندر شده و تبدیل مونواکسیدکربن به دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهد، تاکید داشته‌اند. ریتز [11] در مقاله خود نشان داده است که شکاف بین سیلندر و پیستون باید به دقت مدل شود زیرا این منطقه به دلیل دمای پایین خود بر روی آلاینده‌های مونواکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته بسیار تاثیر گذار است. نکته حائز اهمیت این است که، دمای پایین این منطقه اجازه احتراق کامل را نخواهد داد [12]. ساراوانان و هاپرویدین [13] دلیل کاهش آلاینده دوده با اضافه شدن هیدروژن را تولید آب طی احتراق هیدروژن دانسته‌اند. مسعود

دوچرخه در این شهر از تعداد افراد ساکن در این شهر بیشتر است. در شهرهای بزرگ ایران نیز مسئله آلودگی وسایل نقلیه یکی از بزرگ‌ترین معضلات شهر محسوب می‌شود. عدم استفاده از سوخت مناسب، فیلتر دوده و نبود التزام به معاینه فنی خودروهای دیزل منجر به افزایش مرگ و میر ناشی از آلاینده‌گی و رشد سرطان ریه در این شهر شده است. تمامی این موارد نشان‌دهنده این موضوع است که سوخت‌های فسیلی علی‌رغم قیمت استحصال پایین، هزینه‌های زیادی را بر سلامت جامعه و محیط زیست وارد می‌کند. راه حل غلبه بر این بحران کاهش منابع تولید کننده آلاینده‌ها از مبدا تولید این آلاینده‌ها می‌باشد. استفاده از سوخت پاک یکی از این راه حل‌ها می‌باشد. هیدروژن اگر از منابع بالا دستی پاک بدست آید می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشد زیرا مشخصه‌های احتراقی هیدروژن شبیه سوخت‌های فسیلی است و مهم‌تر از آن به دلیل پوشیده شدن 70٪ سطح زمین از آب، این سوخت در دسته‌ی سوخت‌های تجدیدپذیر و پاک قرار دارد. در جدول 1 مشخصات سوخت هیدروژن در قیاس با سوخت دیزل آورده شده است. اگر چه امروزه 95٪ هیدروژن تولیدی از رفرمینگ گاز طبیعی و تنها 5٪ هیدروژن تولیدی از الکترولیز آب بدست می‌آید، ولی با توجه به افزایش نصب و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان انتظار داشت که این سوخت از منابع بالا دستی پاک به دست آید. روش دیگری که امروزه برای دستیابی به این سوخت استفاده می‌شود، روش تبدیل قدرت به گاز با استفاده از برق تولیدی مازاد نیروگاه‌ها در ساعات کم باری است. احتراق هیدروژن و هوا تنها موجب تولید آلاینده اکسیدهای ازت خواهد شد و خبری از هیدروکربن‌های نسوخته، دوده، مونواکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن نمی‌باشد. ولی به دلیل مشکلات ذخیره‌سازی این سوخت، هزینه بالای استحصال، انرژی کم مورد نیاز برای احتراق (تمایل به پدیده کویش)، در حال حاضر این سوخت نتوانسته به عنوان سوخت اصلی مورد توجه قرار بگیرد ولی می‌توان این سوخت را در مقدارهای کم به عنوان سوخت ثانویه و مکمل استفاده نمود. تحقیقات و آزمایشاتی نیز در این زمینه صورت گرفته است. در مقاله اوساما [1] به بررسی اثر نسبت هوا به سوخت، سرعت موتور و غلظت هیدروژن بر روی توان خروجی پرداخته است. وی با شبیه‌سازی با کد لوتوس نشان داده است که برای 15 < سوخت/هوا اضافه کردن 5 تا 10٪ هیدروژن موجب بهبود عملکرد موتور خواهد شد و برای 15 > سوخت/هوا اضافه شدن بیش از 30٪ هیدروژن موجب بهبود عملکرد موتور خواهد شد. این افزایش توان در حدود 14٪ بیشتر از حالت دیزل خالص است. وی همچنین نشان داده است که اضافه کردن 10-5٪ هیدروژن و افزایش نسبت هوا به سوخت تا 20، بالاترین راندمان حرارتی را بدون وقوع کویش در حالت بار کامل می‌دهد. در مقاله مسعود و همکاران [2] به بررسی تاثیر نوع تزریق سوخت هیدروژن بر روی عملکرد موتور پرداخته است؛ آنها به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن هیدروژن به منیفولد ورودی نسبت به تزریق مستقیم هیدروژن، موجب افزایش 19٪ بازدهی موتور خواهد شد و دلیل این نتیجه را اختلاط بهتر هیدروژن و هوا دانسته‌اند. در مقالات لی و ساراوانان [3] به بررسی تاثیر استفاده از شیر سلونوئیدی برای تزریق هیدروژن به منیفولد ورودی پرداخته و به این نتیجه رسیده است که عملکرد موتور 9٪ افزایش در قیاس با حالت نرمال داشته است. مقاله اسواجا [4] نیز به این نکته اشاره کرده است که اضافه کردن 5٪ هیدروژن باعث کاهش مدت زمان احتراق و اضافه کردن بیش از 15٪ هیدروژن منجر به بروز پدیده کویش خواهد شد. در مقاله مدهوجیت [5] که به صورت تجربی اثر جایگزینی هیدروژن به جای

کاهش هزینه محاسباتی و به دلیل تقارن هندسه، 1/6 هندسه ترسیم و مطابق شکل 1 مش‌بندی شده است. برای سرعت بخشیدن به عمل محاسبات گزینه چند منطقه‌ای فعال گردیده است. مکانیزم مورد استفاده دارای 50 گونه و 180 واکنش می‌باشد که این مکانیزم در مقاله نیمان [19] نیز استفاده شده است. ان‌هپتان به جای دیزل با ارزش حرارتی 45.1 MJ/kg و هیدروژن نیز با ارزش حرارتی 119.93 MJ/kg در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی آلاینده اکسیدهای نیتروژن از طریق 4 گونه و 12 واکنش، که خود مکانیزم جی‌آرآی-اکسیدهای نیتروژن کاهش یافته است، استفاده شده است.

هیدروژن به صورت درگاهی اضافه شده و فرض بر آن است که در لحظه بسته شدن سوپاپ هوا، هیدروژن درون محفظه به صورت همگن با هوا در درون محفظه قرار دارد. برای مدل کردن آلاینده دوده از مدل دوده هاپروایسو- نگل استفاده شده است. محاسبه آلاینده‌های مونواکسیدکربن، هیدروکربن نسوخته، دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن از گونه‌های داخل مکانیزم استفاده شده است. مشخصات موتور شبیه‌سازی شده را در جدول 2 و مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی را در جدول 3 مشاهده می‌کنید.

2-2- صحنه سنجی مدل

مدل احتراقی سیکل بسته (از لحظه بسته شدن سوپاپ هوا تا باز شدن سوپاپ دود) شبیه‌سازی شده و با نتایج آزمایشگاهی استفاده شده در مقالات بینش [20] و اولودوگان [21] مقایسه گردیده است. شکل 2 نمودار فشار داخل سیلندر در حالت شبیه‌سازی شده و مرجع را نشان می‌دهد. جدول 4 نیز میزان آلاینده‌های پیش‌بینی شده و مرجع را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی شده در قیاس با مقادیر گزارش شده در مراجع از دقت خوبی برخوردار است. به دلیل ذکر نشدن آلاینده‌های مونواکسید کربن و هیدروکربن نسوخته، صحت مقادیر این آلاینده‌ها مشخص نیست ولی تغییرات این آلاینده‌ها نیز بررسی شده است.

3- نتایج و بحث

در این مقاله، مقداری هیدروژن به جای کسری از انرژی سوخت دیزل در موتور معرفی شده تریق می‌شود. در جدول 5 مقادیر کسر جرمی هیدروژن- هوا و مقدار دیزل پاشش شده، در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن به جای کسری از سوخت دیزل درج شده است. به علت اینکه یک ششم سیلندر مدل شده است، مقدار سوخت دیزل پاشش شده نیز یک ششم کل سوخت است. برای محاسبه شدت صدا و بازه اندیکاتوری به ترتیب از فرمول (1) و (2) استفاده شده است. دک [22] نشان داد که اگر مقادیر این پارامتر زیر 5 MW/m^2 باشد، موتور در حالت بدون کوبش خواهد بود.

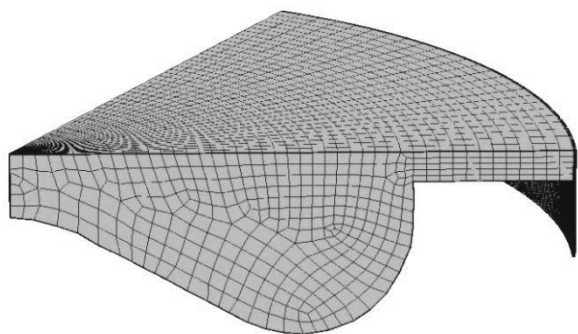


Fig. 1 Piston bowl geometry of the CATERPILAR engine

شکل 1 هندسه کاسه پیستون موتور کاترپیلار

نیز در مقاله خود به این نکته که، اگر هیدروژن به صورت درگاهی تزریق شود به نسبت تزریق مستقیم می‌تواند آلاینده بیشتری را کاهش دهد اشاره داشته است، زیرا مخلوط همگن‌تری تشکیل خواهد شد. هوکسترا و تاناکا [14] افزایش ($\phi > 0.33$) را عامل افزایش اکسیدهای نیتروژن بیان کرده‌اند. عموماً نسبت تعادلی بالا منجر به افزایش دمای محفظه به بیش از 1800k می‌شود. چوی نشان داد که افزایش نسبت هوا به سوخت به بیش از 1.2 منجر به کاهش این آلاینده خواهد شد ولی در بین بازه ($0.9 < \phi < 1.15$) اضافه شدن هیدروژن منجر به افزایش آلاینده اکسیدهای نیتروژن خواهد شد، به طوری که جایگزینی 20٪ هیدروژن به جای LPG افزایش 20٪ آلاینده اکسیدهای نیتروژن را در پی خواهد داشت. میاموتو [15] به این نکته اشاره کرده است که اگر هیدروژن بیش از 10٪ حجمی تزریق شود، احتراق دیزل را با تاخیر مواجه خواهد کرد و همین تاخیر منجر به کاهش دمای احتراق و در نتیجه کاهش آلاینده اکسیدهای نیتروژن خواهد شد. از راه‌های دیگر برای کاهش آلاینده اکسیدهای نیتروژن می‌توان به مواردی همچون تعداد پاشش بیشتر، استفاده از تکنولوژی بازخورانی گازهای خروجی، تزریق آب، استفاده از پس‌پالایش و یا کاتالیست‌های سه راهه اشاره کرد. اگر چه تزریق آب یک راه حل مناسب به شمار می‌آید و تأثیر کمی بر کاهش بازدهی موتور دارد، ولی زمانی کاربردی خواهد شد که آب از طریقی مثل تهیه آب از بخار آب خروجی از خروجی موتور تأمین شود [16]. به طور کلی، با مطالعه مقالات هیدروژن - دیزل تفاوت در برخی نتایج ملاحظه می‌شود. به عنوان مثال در تحقیق کاراگز [17] که به بررسی تأثیر بار موتور بر روی عملکرد و آلاینده‌گی موتور در هنگام جایگزین شدن 30٪ از کل انرژی ورودی توسط هیدروژن در بارهای 40، 60، 75 و 100٪ پرداخته است به این نتیجه رسیده که در حالت بار کامل آلاینده اکسیدهای نیتروژن به میزان 50٪ افزایش می‌یابد ولی در حالت بار جزئی این آلاینده کاهش می‌یابد. در مقاله مدهوجیت و همکاران [18] که بررسی عملکرد، آلاینده‌گی موتور دوگانه‌سوز دیزل- هیدروژن با مقادیر متفاوت هیدروژن از 0 تا 42٪ انرژی ورودی در حالت 100٪ بار پرداخته است، گزارش داده که آلاینده اکسیدهای نیتروژن به میزان 400٪ با جایگزینی 30٪ هیدروژن افزایش می‌یابد. در تحقیق آزمایشگاهی ساراوانان و همکاران [3]، طی بررسی غنی کردن هوا با هیدروژن و تزریق آن به موتور دیزل در بارهای مختلف از 0 تا 100٪ بیان شد که با اضافه کردن 90٪ هیدروژن (از لحاظ انرژی ورودی) در 70٪ بار موتور میزان اکسیدهای نیتروژن به کمترین مقدار خود به اندازه 579 ppm می‌رسد و در بار کامل راندمان حرارتی در حالت 30٪ هیدروژن به میزان 27.9٪ بدون ایجاد کوبش خواهد رسید. در این حالت میزان اکسیدهای نیتروژن 20٪ نسبت به حالت دیزل خالص، کاهش پیدا خواهد کرد. تفاوت در نتایج مقالات ذکر شده و عدم ذکر دقیق شرایط ورودی و هندسه پیستون موجب عدم حصول نتیجه یکسان می‌شود. در این مقاله سعی بر این شده است که موتور دیزل سنگین کاترپیلار 3401 را تحت مقادیر مختلف هیدروژن، جایگزین دیزل کرده و شبیه‌سازی احتراق صورت گیرد و با استفاده از کانتورهای مختلف اثر جایگزینی هیدروژن به جای دیزل، تفاوت آن با حالت دیزل خالص بررسی شود.

2- معرفی مدل و صحنه گذاری

1-2- مدل محاسباتی

برای شبیه‌سازی احتراق دیزل - هیدروژن از نرم افزار فایر استفاده شده است. جهت شبکه‌بندی پیستون از ماژول ای‌اس‌ای دیزل استفاده شده است، برای

جدول 3 مدل های مورد استفاده در شبیه سازی

Table 3 Models used in simulation

نام پدیده	نام مدل
آشفتگی جریان	استاندارد $k-\varepsilon$
مدل تبخیر قطرات	داکوویکز
اثر دیواره	جت دیواره
مدل احتراق	فایر - کمکین
انتقال حرارت دیواره	تابع استاندارد دیواره
مدل فروپاشی قطرات	کلوین هلمهولتز - رایلی تیلور

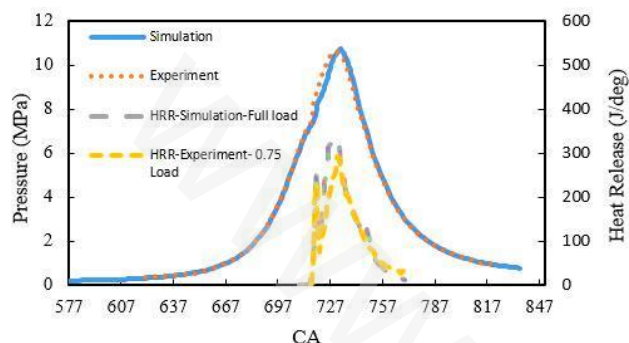


Fig. 2 The validation cases pressure traces and HRR [20,21]

شکل 2 صحنه سنجی آثار فشار و حرارت آزاد شده [21,20]

3-2- حرارت آزاد شده

همان طور که در بخش قبلی ذکر شد، جایگزینی هیدروژن باعث کاهش بازدهی حجمی، و کاهش مقدار سوخت پایلوت منجر به تاخیر در احتراق می شود که این امر به دلیل ضعیف تر شدن منبع احتراق است. اما، بعد از شروع احتراق به دلیل حضور هیدروژن و سرعت بالای شعله آن، احتراق مشابه احتراق در حجم ثابت صورت گرفته و حرارت آزاد شده افزایش خواهد یافت و احتراق نیز سریع تر رخ خواهد داد [23]. تغییرات نرخ حرارت آزاد شده بر حسب زاویه لنگ را در شکل 4 مشاهده می کنید.

3-3- شدت صدا

جایگزین شدن هیدروژن که دارای سرعت بالای شعله است منجر به افزایش نرخ افزایش فشار و حرارت خواهد شد که این امر منجر به افزایش صدا در موتور می شود و احتمال بروز پدیده کوبش را زیاد می کند [25,24]. ذکر این نکته نیز مهم است که در حالت آزمایشگاهی جایگزینی هیدروژن به مقدار 50 یا 70٪ انرژی ورودی نیازمند طراحی دقیق موتور است. زیرا در موتورهای دیزل معمول، به دلیل وجود نقاط داغ در داخل موتور، اضافه کردن هیدروژن در مقادیر بالا امکان پذیر نیست و پدیده کوبش و یا پس شعله ایجاد خواهد شد. به عنوان مثال در مقاله مدهوجیت [26] حداکثر میزان مجاز اضافه شدن هیدروژن به عنوان کسری از انرژی ورودی را 42٪ عنوان کرده است. اگر زمان

$$RI = \frac{1}{2} \frac{(0.05 \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max})^2}{P_{\max}} \sqrt{\gamma R T_{\max}} \quad (1)$$

$$GIE = \frac{\int_{-180}^{180} P dV}{m_{\text{fuel}} LHV_{\text{fuel}}} \quad (2)$$

3-1- فشار

اضافه شدن هیدروژن به عنوان کسری از انرژی باعث تاخیر در اشتعال و کاهش فشار درون محفظه شده که این امر به دلیل دمای خود اشتعالی بالای هیدروژن (828K) و کاهش مقدار سوخت پایلوت (دیزل) می باشد، چرا که انرژی منبع احتراق ضعیف تر شده است. دیر شروع شدن احتراق (بعد از نقطه مرگ بالا) باعث کند شدن افزایش فشار و دمای محفظه خواهد شد و همواره پیک نمودار فشار کمتر از حالت دیزل خالص است. در شکل 3 نمودار تغییرات فشار بر حسب زاویه لنگ در مقادیر مختلف جایگزینی هیدروژن مشاهده می کنید.

جدول 2 مشخصات موتور شبیه سازی شده [20]

Table 2 Comparison of hydrogen and diesel fuel features [20]

نوع موتور	کاترپیلار 3401
طول شاتون (m)	0.2616
قطر (m)	0.1372
فاصله جابجایی	0.1651
حجم جابجایی (lit)	2.44
قطر سوراخ انژکتور (mm)	259
تعداد سوراخ انژکتور	6
نسبت چرخش	1
تعداد سوپاپ	4
تعداد سیلندر	1
بسته شدن سوپاپ ورودی (ATDC)	-147
باز شدن سوپاپ خروجی (ATDC)	136
نسبت تراکم	15.1
زاویه اسپری سوخت	125
سرعت (rpm)	1600
میزان سوخت دیزل (mg)	162.2
مدت پاشش سوخت	21.5
فشار پاشش سوخت (bar)	900
فشار ورودی هوا (bar)	1.84
دمای ورودی هوا (°C)	37
نسبت تعادلی	0.48
پروپیل پاشش	مربعی
زمان تزریق سوخت (ATDC)	-9
زاویه راس مخروط پاشش	10
فاصله نوک نازل	-0.0023

جدول 4 مقایسه نتایج عملکرد و آلاینده گی مدل شبیه سازی شده با نتایج عددی اولدوگان و بینش [21,20]

Table 4 Comparison of performance and emission results between simulation and experimental study of Binesh and Uludogan [20,21]

CO ₂ ($\frac{g}{kg_{\text{fuel}}}$)	UHC ($\frac{g}{kg_{\text{fuel}}}$)	CO ($\frac{g}{kg_{\text{fuel}}}$)	soot ($\frac{g}{kg_{\text{fuel}}}$)	NO _x ($\frac{g}{kg_{\text{fuel}}}$)	PRR ($\frac{bar}{deg}$)	RI ($\frac{MW}{m^2}$)	بازده اندیکاتور (%)	
*	*	*	0.6	39	4.9	*	*	آزمایشگاهی
3066	0.192	5.57	0.607	43.57	4.59	1.38	45	شبیه سازی

آلاینده افزایش پیدا خواهد نمود. در موتورهای دیزل معمول به دلیل وجود هوای اضافی این آلاینده کم است. اضافه کردن هیدروژن در صورتی که هوا به اندازه کافی وجود داشته باشد منجر به کاهش این آلاینده خواهد شد، زیرا هیدروکسید افزایش پیدا کرده و همین امر منجر به افزایش اکسیداسیون مونواکسیدکربن خواهد شد. جایگزین شدن هیدروژن بیش از مقدار بهینه منجر به کاهش اکسیژن شده (به دلیل تزریق راهگامی و کاهش بازدهی حجمی موتور) و به دلیل جایگزین شدن هیدروژن جای دیزل، مقدار دیزل کاهش یافته و نفوذ این سوخت کمتر می‌شود و احتراق در نزدیکی انژکتور رخ خواهد داد. بنابراین، به دلیل نداشتن زمان کافی برای اختلاط بهتر دیزل با هوای موجود در محفظه، مقدار این آلاینده و برخی از آلاینده‌های دیگر افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه مرجع مورد استفاده برای صحنه سنجی نتایج برای دور 1600 rpm این آلاینده را اندازه‌گیری نکرده‌اند، صحت و دقت قابل مقایسه نیست ولی چیزی که اهمیت دارد روند تغییرات این آلاینده بر اساس میزان جایگزینی هیدروژن است. در شکل 8 تاثیر افزایش محتوای انرژی هیدروژن به جای دیزل را بر آلاینده مونوکسید کربن مشاهده می‌کنید [28,27].

3-6- آلاینده دوده

آلاینده دوده از اختلاف بین تشکیل دوده و اکسیداسیون دوده بوجود می‌آید. تشکیل دوده از پیرولیز سوخت هیدروکربن، یعنی شکست زنجیره هیدروکربن در غیاب اکسیژن و اکسیداسیون دوده نیز یعنی سوختن دوده با اکسیژن در دمای بالا، اختلاف تشکیل و اکسیداسیون میزان آلاینده دوده را تعیین خواهد نمود. مخلوط ناهمگن و انتشار احتراق موجب تشکیل بیشتر دوده خواهد شد. از طرف دیگر با افزایش بار، این آلاینده نیز افزایش پیدا خواهد کرد. حضور هیدروژن در هوا، مخلوط پیش‌آمیخته را افزایش خواهد داد و بیشتر سوخت پایلوت پاشش شده در محیطی همگن می‌سوزد و فاز انتشار احتراق کمتر خواهد شد. از آنجایی که هیدروژن فاقد کربن است جایگزینی هیدروژن به جای دیزل از مقدار کربن داخل محفظه می‌کاهد و همین امر در کاهش مقدار این آلاینده تاثیر گذار است [29]. البته با توجه به شکل 9 میزان تغییرات آلاینده دوده بسیار کم بوده و تاثیر هیدروژن قابل صرف‌نظر کردن است. در حالت جایگزینی 39٪ و 54٪ هیدروژن به جای دیزل به دلیل کاهش دمای محفظه و وقوع احتراق ناقص، اکسیداسیون دوده به خوبی صورت نگرفته و مقدار این آلاینده افزایش پیدا کرده است.

جدول 5 کسر جرمی هیدروژن و هوا در لحظه بسته شدن سوپاپ هوا و مقدار دیزل پاشش شده به داخل محفظه در مقادیر مختلف کسر انرژی هیدروژن

Table 5 Mass fraction of hydrogen and air at IVC and the amount of diesel injected into the chamber in different amounts of hydrogen energy fraction

دیزل (میلی گرم)	هیدروژن	نیتروژن	اکسیژن	هیدروژن (انرژی %)
27.03333	0	0.76708	0.23292	0
25.68167	0.00060	0.76662	0.23278	5
24.05967	0.00132	0.76607	0.23261	11
22.43767	0.00204	0.76552	0.23244	16.5
18.92333	0.00360	0.76432	0.23208	28.5
15.67933	0.00503	0.76322	0.23175	39
10.81333	0.00717	0.76158	0.23125	54
5.406670	0.00954	0.75977	0.23070	70

پاشش سوخت پایلوت دچار تغییر شود و پاشش زودتر صورت گیرد، امکان وقوع کوبش در مقادیر بالای جایگزینی هیدروژن وجود خواهد داشت، ولی در این مقاله زمان و مدت پاشش در هیچ کدام از حالت‌ها تغییری داده نشده است. تغییرات شدت صدا بر حسب هیدروژن جایگزین شده را در شکل 5 مشاهده می‌کنید.

3-4- آلاینده دی‌اکسیدکربن

یکی از دست آوردهای با ارزش اضافه کردن هیدروژن به عنوان سوخت جایگزین به موتورهای احتراق داخلی کاهش قابل توجه آلاینده‌گی دی‌اکسیدکربن می‌باشد. دلیل این امر افزایش نسبت هیدروژن به کربن و کاهش مقدار سوخت دیزل می‌باشد. اگر هیدروژن از منابع بالادستی پاک بدست آید، در مجموع می‌توان گفت که اضافه کردن هیدروژن منجر به کاهش تولید کربن دی‌اکسید حاصل از احتراق خواهد شد. در شکل 6 و شکل 7 مقدار آلاینده و درصد کاهش این آلاینده را با اضافه کردن هیدروژن به عنوان کسری از انرژی ورودی مشاهده می‌کنید.

3-5- آلاینده مونواکسیدکربن

کاهش دمای محفظه احتراق باعث احتراق ناقص و یا کاهش اکسیداسیون کربن و تولید مونوکسیدکربن خواهد شد (کاهش هیدروکسید تولیدی). همچنین در صورت غنی بودن محفظه از سوخت و کمبود اکسیژن این

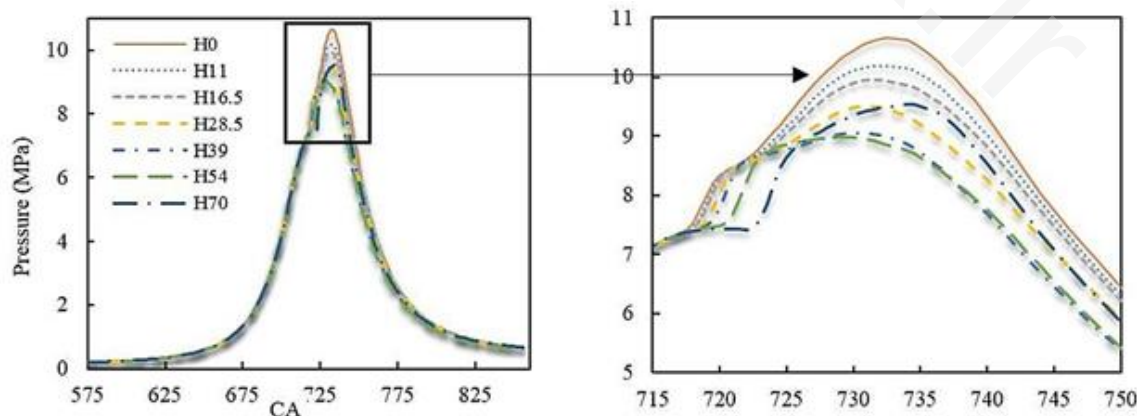


Fig. 3 The graph of hydrogen substitution impact on cylinder pressure

شکل 3 تاثیر جایگزینی هیدروژن بر فشار داخل سیلندر

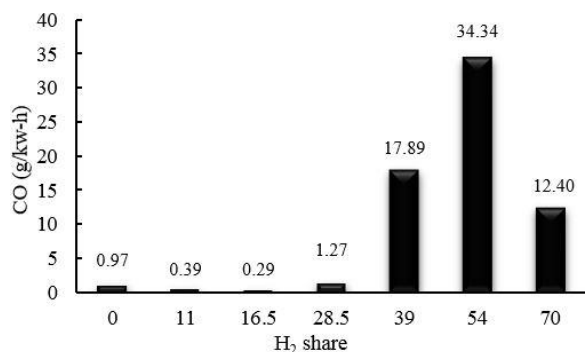


Fig. 8 The graph of hydrogen substitution impact on carbon monoxide pollutant

شکل 8 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده مونواکسیدکربن

3-7- آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته

هیدروکربن نسوخته ناشی از احتراق ناقص، دمای پایین محفظه، درزها و شکاف‌های سیلندر و پیستون و حتی وجود لایه نازک روغن روانکار در مرحله احتراق می‌باشد [30]. حضور هیدروژن در محفظه احتراق به دلیل حالت گازی شکل منجر به کاهش پدیده خیس دیواره و کاهش هیدروکربن نسوخته خواهد شد. دلایلی که برای آلاینده مونواکسیدکربن ذکر شد، برای این آلاینده نیز صادق است. کاهش بیش از اندازه سوخت پایلوت موجب وقوع احتراق در نزدیکی نازل انژکتور شده و عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا و عدم حضور اکسیژن کافی، منجر به احتراق ناقص و افزایش این آلاینده خواهد شد. در شکل 10 اثر اضافه شدن انرژی هیدروژن بر آلاینده‌گی هیدروکربن‌های نسوخته را مشاهده می‌کنید. البته توجه شود که مقدار فاصله بین سیلندر و پیستون در مقدار این آلاینده بسیار تاثیر گذار است و از آنجایی که مراجع مورد استفاده مقدار این آلاینده را ذکر نکرده‌اند، لذا مرجعی برای مقایسه دقت و صحت این نتایج وجود نداشت، ولی چیزی که مهم است روند تغییرات این آلاینده در مقدارهای مختلف دو سوخت دیزل و هیدروژن است که با توضیحات فوق سازگار است.

3-8- آلاینده اکسیدهای نیتروژن

تشکیل اکسیدهای نیتروژن به دمای محلی احتراق، غلظت اکسیژن و مدت زمان اقامت نیتروژن در دمای بالای محفظه بستگی دارد [30]. معمولاً بیشترین میزان تشکیل اکسیدهای نیتروژن با بیشینه دمای محفظه تعیین می‌شود که بیشینه دمایی به عواملی همچون ترکیب سوخت، نسبت تعادلی و دمای اولیه هوا و سوخت بستگی دارد [31]. معمولاً اکسیدهای نیتروژن از

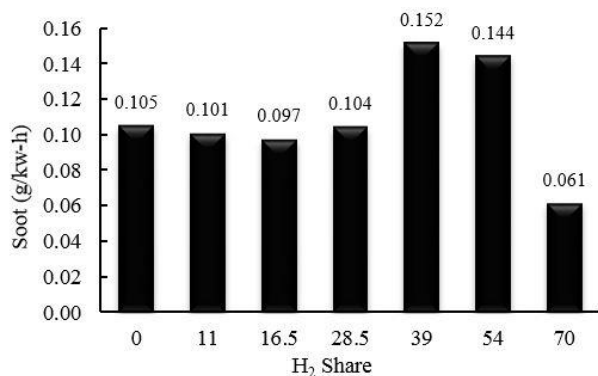


Fig. 9 The graph of hydrogen substitution impact on soot pollutant

شکل 9 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده دوده

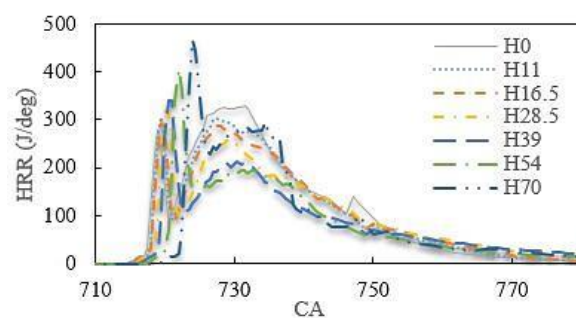


Fig. 4 The graph of hydrogen substitution impact on cylinder HRR

شکل 4 تاثیر جایگزینی هیدروژن بر حرارت آزاد شده داخل سیلندر

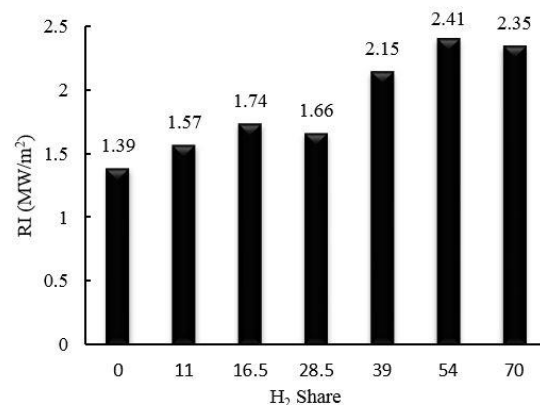


Fig. 5 The graph of hydrogen substitution impact on the change in sound intensity

شکل 5 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر شدت صدا

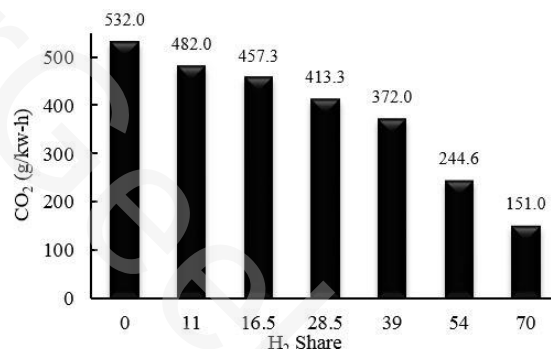


Fig. 6 The graph of hydrogen substitution impact on carbon dioxide pollutant

شکل 6 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده دی‌اکسیدکربن

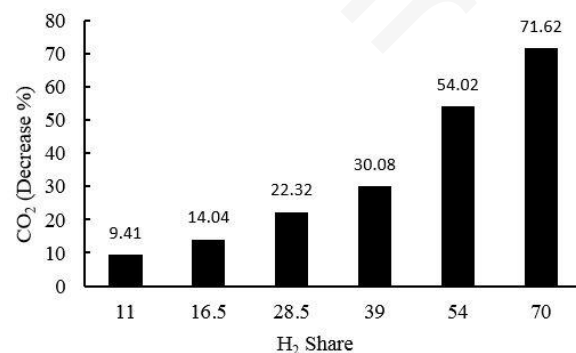


Fig. 7 The graph of hydrogen substitution impact on percentage reduction of carbon dioxide

شکل 7 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر میزان درصد کاهش دی‌اکسیدکربن

دیزل کمتر و تنها هیدروژن می‌سوزد، دمای پایین‌تر شعله ادیپاتیک هیدروژن به نسبت دیزل و تشکیل آب، موجب کاهش دما در این نواحی نسبت به جایی است که هم سوخت پایلوت و هم هیدروژن حضور دارد.

3-9- تحلیل کانتورها

در شکل 12 تغییرات کسر جرمی اکسیژن را در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن در لحظه باز شدن سوپاپ دود مشاهده می‌کنید. در مقادیر بالای

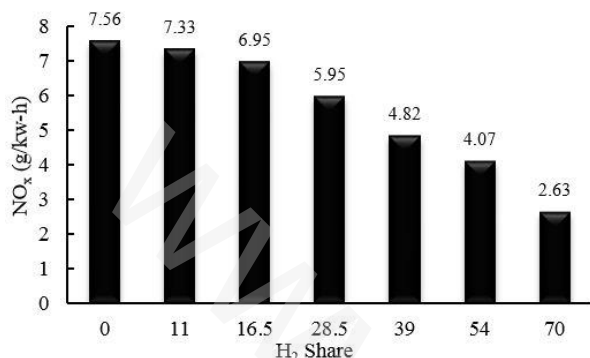


Fig. 11 The graph of hydrogen substitution impact on nitric oxide pollutant

شکل 11 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده اکسیدهای نیتروژن

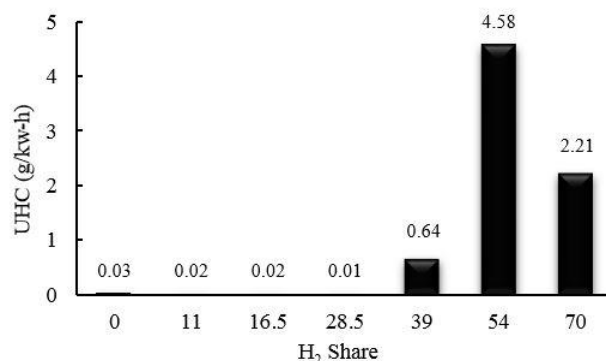


Fig. 10 The graph of hydrogen substitution impact on unburned hydrocarbons pollutant

شکل 10 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده هیدروکربن نسوخته

95-99٪) مونواکسید نیتروژن و 5-10٪ دی‌اکسید نیتروژن تشکیل می‌شود که مونواکسید نیتروژن معمولاً با دمای محفظه احتراق و دسترسی اکسیژن کنترل می‌شود. البته در موتورهای دوگانه سوز مقدار آن عمدتاً به سوخت پایلوت بستگی دارد [27]. در شکل 11 نمودار تغییرات آلاینده اکسیدهای نیتروژن را بر حسب مقادیر مختلف جایگزینی هیدروژن به جای دیزل را مشاهده می‌کنید. لازم به ذکر است که دمای شعله هیدروژن در حدود 100°C کمتر از دمای شعله دیزل است. در برخی از نواحی که غلظت سوخت

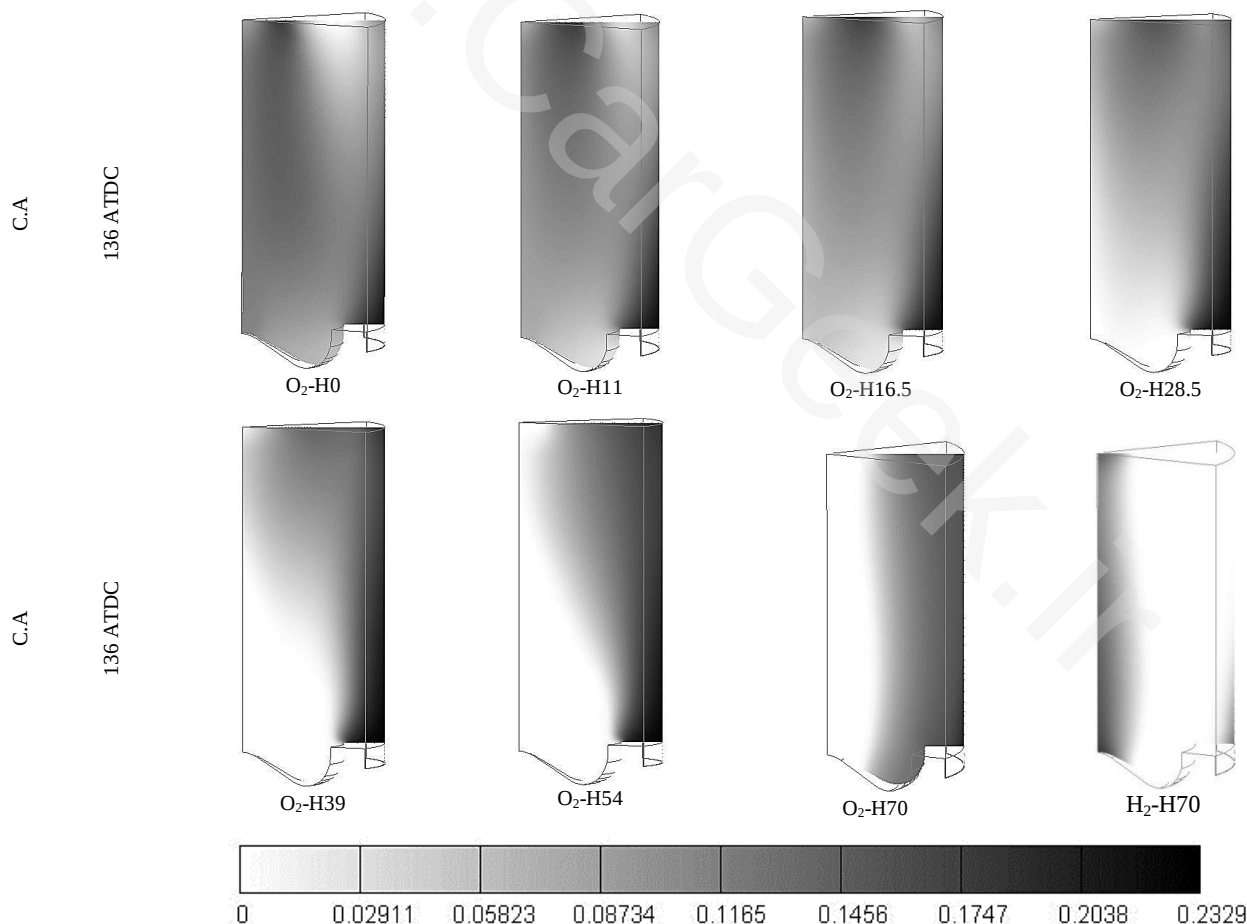


Fig. 12 Changes of the mass fraction of oxygen in various cases of hydrogen substitution at EVO and mass fraction of hydrogen in substitution of 70% of energy by hydrogen

شکل 12 تغییرات کسر جرمی اکسیژن در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن در لحظه باز شدن سوپاپ دود و کسر جرمی هیدروژن در حالت جایگزینی 70٪ هیدروژن

- در جدول 6، خلاصه عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل سنگین شبیه‌سازی شده ارائه شده است.
- جایگزینی هیدروژن موجب تاخیر در شروع احتراق شده و بیشتر شدن هیدروژن منجر به افزایش تاخیر در احتراق خواهد شد و این موضوع بر دمای داخل محفظه و آلاینده‌های خروجی به شدت تاثیرگذار است.
- جایگزینی هیدروژن نرخ افزایش فشار و حرارت آزاد شده را افزایش می‌دهد ولی میزان شدت صدا همچنان زیر عدد بحرانی 5 MW/m^2 باقی می‌ماند و پدیده کوبش در صورت طراحی دقیق موتور، رخ نخواهد داد.
- بهترین مقدار برای جایگزینی هیدروژن با توجه به آلاینده‌های سمی خروجی، مقدار 16.5٪ انرژی ورودی است که آلاینده‌های، مونواکسیدکربن، هیدروکربن نسوخته، دوده و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب به میزان 70، 54، 14، 8٪ و گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن 14٪ کاهش یافته است. اضافه کردن هیدروژن بیش از این مقدار به دلیل کاهش مقدار اکسیژن موجود در محفظه (کاهش بازدهی حجمی) و مصرف بیشتر رادیکال هیدروکسیل (جزو گونه‌های شروع کننده احتراق) توسط هیدروژن منجر به تاخیر در احتراق و احتراق ناقص خواهد شد و آلاینده‌های سمی دوده، هیدروکربن‌های نسوخته و مونواکسیدکربن افزایش خواهند یافت.
- جایگزینی هیدروژن (H28.5، H39، H54، H70)، که اکسیژن به طور کامل مصرف شده، هیدروژن نسوخته باقی مانده است (کسر جرمی هیدروژن در 70٪ جایگزینی هیدروژن به عنوان نمونه آورده شده است). این وضعیت، کمبود اکسیژن در محفظه احتراق را نشان می‌دهد. همین عامل موجب احتراق ناقص و افزایش برخی آلاینده‌ها می‌شود. در مقدارهای کم جایگزینی هیدروژن (H11، H16.5)، کمبود اکسیژن احساس نمی‌شود و سوخت هیدروژن به طور کامل مصرف شده و به کامل‌تر شدن احتراق کمک می‌کند که همین امر موجب کاهش همه آلاینده‌ها در این حالت‌ها شده است. در شکل 13 تغییرات دما در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن در لحظه باز شدن سوپاپ دود نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هرچه میزان هیدروژن در محفظه بیشتر می‌شود، دما در لحظه باز شدن سوپاپ دود بالاتر می‌رود. دلیل این امر دیر شروع شدن احتراق است که دمای محفظه به نسبت حالت بدون هیدروژن دیرتر بالا می‌رود و زمان کافی برای تشکیل آلاینده‌های اکسید نیتروژن که خود نیازمند زمان بیشتری برای تشکیل به نسبت دیگر آلاینده‌ها است، کمتر خواهد شد.

4- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر جایگزینی مقادیر مختلف هیدروژن به جای دیزل بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل سنگین کاترپیلار 3401 شبیه‌سازی و بررسی گردید و نتایج زیر حاصل شد:

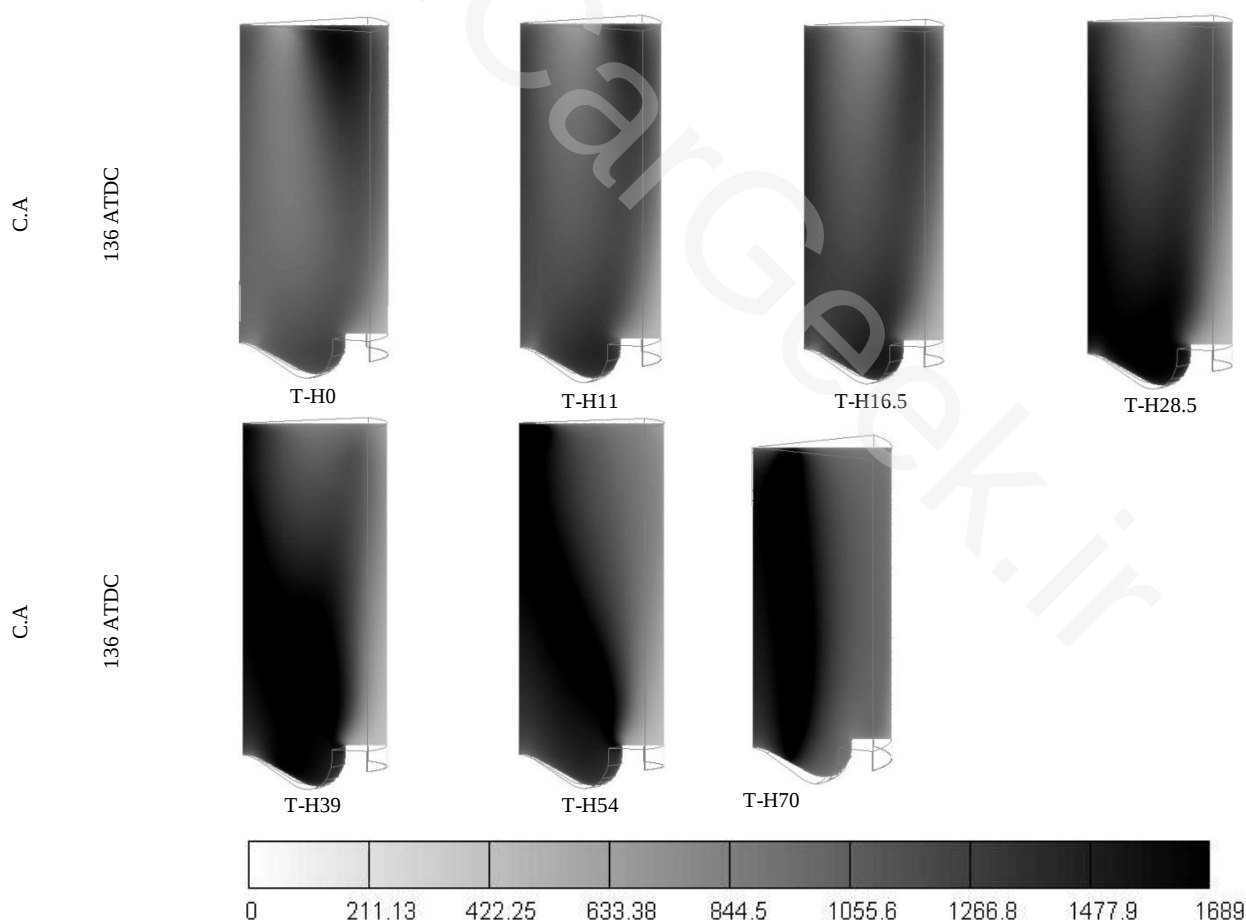


Fig. 13 Changes of the temperature (K) in various cases of hydrogen substitution at EVO

شکل 13 تغییرات دما (کلوین) در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن در لحظه باز شدن سوپاپ دود

جدول 6 عملکرد و آلاینده‌گی موتور در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن به جای دیزل

Table 6 Engine performance and emissions in different states of substitution of diesel by hydrogen

بازده اندیکاتور (%)	کار (J)	دما (K)	RI ($\frac{Mw}{m^2}$)	PRR ($\frac{bar}{deg}$)	فشار ماکزیمم (bar)	NO _x ($\frac{g}{Kwh}$)	UHC ($\frac{g}{Kwh}$)	Soot ($\frac{g}{Kwh}$)	CO ($\frac{g}{Kwh}$)	CO ₂ ($\frac{g}{Kwh}$)	درصد انرژی هیدروژن
45	3291	1686	1.38	4.5	106	7.5	0.03	0.1	0.96	532	0
44.31	3241	1667	1.56	4.8	102	7.3	0.02	0.1	0.39	481	11
43.7	3196	1650	1.73	5	100	6.9	0.015	0.09	0.29	457	16.5
41.17	3011	1581	1.66	4.8	95	5.9	0.012	0.1	1.27	413	28.5
36.07	2638	1454	2.14	5.4	90	4.8	0.064	0.15	17.8	372	39
35	2560	1487	2.4	5.7	89	4	4.57	0.14	34.3	244	54
40.24	2966	1647	2.34	5.6	95	2.6	2.2	0.06	12.4	151	70

5- فهرست علائم و اختصارات

مراجع

- [1] O. Ghazal, Performance and combustion characteristic of CI engine fueled with hydrogen enriched diesel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 35, pp. 15469–15476, 2013.
- [2] M. Masood, M.M. Ishrat, Computer simulation of hydrogen–diesel dual fuel exhaust gas emissions with experimental verification, *Fuel*, Vol. 87, No. 7, pp. 1372–1378, 2007.
- [3] N. Saravanan, G. Nagarajan, An experimental investigation of hydrogen-enriched air induction in a diesel engine system, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 6, pp. 1769-1775, 2008.
- [4] G.R. K. Szwaja S, Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, No. 10, pp. 4413–4421, 2009.
- [5] M. Deb, A. Paul, D. Debroy, An experimental investigation of performance-emission trade off characteristics of a CI engine using hydrogen as dual fuel, *Energy*, Vol. 85, pp. 569-585, 2015.
- [6] H. M. Cho, B. Q. He, Spark ignition natural gas engines - A review, *Energy*, Vol. 48, No. 2, pp. 608-618, 2006.
- [7] T. Gatts, S. Liu, C. Liew, An experimental investigation of incomplete combustion of gaseous fuels of a heavy-duty diesel engine supplemented with hydrogen and natural gas, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 9, pp. 7848-7859, 2012.
- [8] G. H. Choi, Y. J. Chung, S. B. Han, Performance and emissions characteristics of a hydrogen enriched LPG internal combustion engine at 1400 rpm, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 30, No. 1, pp. 77-82, 2005.
- [9] M. Sjöberg, J. E. Dec, An investigation into lowest acceptable combustion temperatures for hydrocarbon fuels in HCCI engines., *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 30, No. 2, pp. 2719-2726, 2005.
- [10] A. C. Alkidas, Combustion advancements in gasoline engines, in *19th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, pp. 2751-2761, 2007.
- [11] S. C. Kong, R. D. Reitz, Numerical study of premixed HCCI engine combustion and its sensitivity to computational mesh and model uncertainties, *Combustion Theory and Modelling*, Vol. 7, No. 2, pp. 417-433, 2003.
- [12] A. Aziz Hairuddin, T. Yusaf, A. P. Wandel, A review of hydrogen and natural gas addition in diesel HCCI engines, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 739-761, 2014.
- [13] M. Masood, M.M. Ishrat, A.S. Reddy, Computational combustion and emission analysis of hydrogen–diesel blends with experimental verification, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, No. 13, pp. 2539-2547, 2006.
- [14] R.L. Hoekstra, P. Van Blarigan, N. Mulligan, NO_x emissions and efficiency of hydrogen, natural gas, and hydrogen/natural gas blended fuels, *SAE Paper 932775*, Vol. 105, No. 4, 1996.
- m* جرم
- P* فشار
- R* ثابت جهانی گازها
- T* دما
- V* حجم
- علائم یونانی
- γ نسبت گرمایی ویژه
- Υ وزن مخصوص
- ϕ نسبت تعادلی
- اختصارات
- ATDC بعد از نقطه مرگ بالا
- BTDC قبل از نقطه مرگ بالا
- C.A زاویه لنگ
- CDC احتراق دیزل معمول
- CO مونواکسید کربن
- CO₂ دی‌اکسید کربن
- EGR بازخورانی گازهای باقیمانده
- EVO باز شدن سوپاپ خروجی
- GIE بازده اندیکاتور ناخالص
- HHV ارزش حرارتی بالا
- HRR نرخ آزاد شدن حرارت
- IVC بسته شدن سوپاپ ورودی
- KH-RT کلون-هلمهولتز رایلی-تیلور
- LHV ارزش حرارتی پایین
- NO_x اکسیدهای نیتروژن
- PRR نرخ افزایش فشار
- RI شدت صدا
- RPM دور بر دقیقه
- SCOTE موتور تک سیلندر شبیه‌سازی شده
- TDC نقطه مرگ بالا

- performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads, *international journal of hydrogen energy*, Vol. 40, No. 20, pp. 6702-6713, 2015.
- [24] P. C. Negurescu, D. Soare, Aspects Regarding the Combustion of Hydrogen in Spark Ignition Engine, SAE Paper 2006-01-0651, 2006.
- [25] V. Subramanian, J. Mallikarjuna, A. Ramesh, Performance, Emission and Combustion Characteristics of a Hydrogen Fueled SI engine - An Experimental Study, SAE Paper 2005-26-349, 2005.
- [26] M. Deb, G.R.K. Sastry, P.K. Bose, R. Banerjee, An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 27, pp. 8586-8598, 2015.
- [27] A.E. Dhole, R.B. Yarasu, D.B. Lata, S.S. Baraskar, Mathematical modeling for the performance and emission parameters of dual fuel diesel engine using hydrogen as secondary fuel, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 39, No. 24, pp. 12991-13001, 2014.
- [28] H. A. Alrazen, A.R. Abu Talib, R. Adnan, K.A. Ahmad, A review of the effect of hydrogen addition on the performance and emissions of the compression - Ignition engine, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54, pp. 785-796, 2016.
- [29] D.B. Lata, A. Misra, S. Medhekar, Effect of hydrogen and LPG addition on the efficiency and emissions of a dual fuel diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 7, pp. 6084-6096, 2011.
- [30] A. Paykani, A.H. Kakaee, P. R., R. D. Reitz, Effects of diesel injection strategy on natural gas/diesel reactivity controlled compression ignition combustion, *Energy*, Vol. 90, No. 1, pp. 814-826, 2015.
- [31] K. Kuan, Y. Kuo, *Principles of Combustion*, pp. 282-297, New York: John Wiley & Sons Inc, 1986.
- [15] T. Miyamoto, H. Hasegawa, M. Mikami, N. Kojima, H. Kabashima, Y. Urata, Effect of hydrogen addition to intake gas on combustion and exhaust emission characteristics of a diesel engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 20, pp. 13138-13149, 2011.
- [16] H. Rottengruber, M. Berckmueller, G. Elsaesser, N. Brehm, Schwarz C, Direct-Injection Hydrogen SI-Engine - Operation Strategy and Power Density Potentials, SAE Paper 2004-01-2927, Vol. 113, No. 4, 2004.
- [17] Y. Karag, T. Sandalcı, L. Yüksek, A.S. Dalkılıç, Engine performance and emission effects of diesel burns enriched by hydrogen on different engine loads, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 20, pp. 6702-6713, 2015.
- [18] M. Deb, G.R.K. Sastry, P.K. Bose, R. Banerjee, An experimental study on combustion performance and emission analysis of a single cylinder ,4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 27, pp. 8586-8598, 2015.
- [19] D. E. Nieman, A. B. Dempsey, R. D. Reitz, Heavy-Duty RCCI Operation Using Natural Gas and Diesel, SAE Paper 2012-01-0379, Vol. 5, No. 2, 2012.
- [20] A. R. Binesh, S. Hossainpour, Three Dimensional Modeling of Mixture Formation and Combustion in a Direct Injection Heavy-Duty Diesel Engine, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 5, pp. 615-620, 2008.
- [21] A. Uludogan, J. Xin, R. Reitz, Exploring the Use of Multiple Injectors and Split Injection to Reduce DI Diesel Engine Emissions, SAE Paper 962058, Vol. 105, No. 3, 1996.
- [22] John . Dec, Yi Yang, Boosted HCCI for High Power without Engine Knock and with Ultra-Low NOx Emissions - using Conventional Gasoline, SAE, Vol. 119, No. 3, pp. 750-767, 2010.
- [23] Y. Karagöz, T. Sandalcı, L. Yüksek, A.S. Dalkılıç, Engine