



## شبیه‌سازی سه بعدی عملکرد و آلایندگی احتراق هیدروژن-دیزل در موتور دیزل سنگین در حالت بار کامل

سید محمد حسینی<sup>۱</sup>، روح الله احمدی<sup>۲\*</sup>، مصطفی محبی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- استادیار، تبدیل انرژی، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

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

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

### چکیده

با توجه به اثرات مخرب محیط‌زیستی مصرف سوخت‌های فسیلی، تحقیقات بسیاری برای انتخاب سوخت جایگزین با آلایندگی کمتر و منابع پایدار انجام شده است. در این بین هیدروژن یکی از برجهسته‌ترین سوخت‌های جایگزین به شمار می‌رود زیرا مشخصه‌های احتراقی آن شبیه سوخت‌های فسیلی است و از طرف دیگر در دسته‌ی سوخت‌های پاک و تجدیدپذیر قرار گرفته است. در این مقاله به شبیه‌سازی احتراق دیزل - هیدروژن در موتور دیزل سنگین در حالت بار کامل و در سرعت 1600rpm پرداخته شده است. تمام مشخصه‌های موتور نظیر سرعت، زاویه پاشش، مدت پاشش و انرژی ورودی در شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است. پارامتر متغیر، نسبت جرم یا انرژی هیدروژن به دیزل می‌باشد. هیدروژن به نسبت انرژی ورودی دیزل از ۰٪ (دیزل خالص) تا ۷۰٪ (۷۰٪ انرژی ورودی هیدروژن و ۳۰٪ انرژی از سوخت دیزل تأمین می‌شود) تعییر داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان دهنده آن است که در بهترین حالت جایگزینی هیدروژن به جای دیزل، الاینده‌های اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسیدکربن، هیدروکربن نسخته، دوده و مونواکسیدکربن به ترتیب به میزان ۸٪، ۱۴٪، ۵۴٪، ۱۴٪، ۷۰٪ کاهش خواهد یاف. تأثیر این جایگزینی بر عملکرد موتور نیز کاهش ۲.۸٪ راندمان انديکاتوری است. جایگزینی هیدروژن به جای دیزل منجر به تأخیر در شروع احتراق و دش نزخ افزایش فشار و افزایش حرارت آزاد شده خواهد شد، ولی این افزایش فشار منجر به پدیده کوشش تخواهد گردید.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۳ دی ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۸ بهمن ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۴ اسفند ۱۳۹۵

کلید واژگان:

احتراق موتور دیزل

هیدروژن

آلایندگی

شبیه‌سازی

عملکرد موتور

سوخت جایگزین

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

Seyed Mohammad Hosseini<sup>1</sup>, Rouhollah Ahmadi<sup>1\*</sup>, Mostafa Mohebi<sup>2</sup>

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.

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 آن‌ها متوقف شود. کشور دانمارک نیز می‌خواهد کپنه‌اگ را اولین شهر

عاری از دی‌اکسیدکربن در سال 2025 تبدیل کند. در حال حاضر تعداد

امروزه کنترل و کاهش آلودگی هوا جزو بزرگترین معضلات کشورهای صنعتی

و در حال توسعه می‌باشد. شرکت‌های خودروساز هر روز با محدودیت‌های

آلایندگی شدیدتری مواجه می‌شوند تا جایی که کشورهایی مثل نروژ و هلند

و شهرهای بزرگی مانند پاریس، مکزیکو سیتی، مادرید و آتن از سال 2025

### - مقدمه

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

جدول ۱ مقایسه‌ی ویژگی‌های سوخت دیزل و هیدروژن

شماره	خواص	دیزل	هیدروژن
1	فرمول	n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	H <sub>2</sub>
2	دما خود اشتعالی (K)	530	858
3	کمترین انرژی برای اشتعال (MJ)	-	0.02
4	محدهود اشتعال پذیری (درصد حجمی در هو)	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	محدهود اشتعال پذیری (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 هو ( $\frac{cm^2}{s}$ )	-	0.63
13	عدد اکتان	30	130
14	عدد ستان	40-55	-
15	دما جوشش (K)	436-672	20-27
16	ویسکوزیته در دمای 15.5°C (سانتی پوز)	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 مونوکسیدکربن، هیدروکربن نسوخته بررسی کرده و دلیل کاهش این آلاینده‌ها را حالت گازی شکل بودن هیدروژن بیان کرده که منجر به کاهش پدیده خیسی دیواره می‌شود. این در حالیست که ساراوانان دلیل کاهش مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته را نبود کربن در مولکول هیدروژن بر روی توان خروجی پرداخته است. گات [7] نیز بر روند کاهشی مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته در حضور هیدروژن تاکید کرده است. چوی [8] در مقاله خود بیان داشته که مخلوط فقیر < 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 (1 << φ) شود این آلاینده افزایش پیدا خواهد نمود. الکید و شوبرگ [10] نیز به این نکته که، کاهش دما موجب کاهش بازدهی و کاهش واکنش‌پذیری مخلوط داخل سیلندر شده و تبدیل مونوکسیدکربن به دی‌اسکیدکربن را کاهش می‌دهد، تاکید داشته‌اند. ریتر [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 مونوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته بسیار تأثیر گذار است. نکته حائز اهمیت این است که، دمای پایین این منطقه اجازه احتراق کامل را نخواهد داد [12]. ساراوانان و هایرویدین [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 وسائل نقلیه یکی از بزرگ‌ترین عضلات شهر محسوب می‌شود. عدم استفاده از سوخت منجر به افزایش مرگ و میر ناشی از آلاینده‌گی و رشد سلطان 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 کاوش منابع تولید کننده آلاینده‌هاز مبدأ 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 ۷۰٪ سطح زمین از آب، این سوخت در دسته‌ی سوخت‌های تجدیدپذیر و پاک قرار دارد. در جدول ۱ مشخصات سوخت هیدروژن در قیاس با سوخت دیزل آورده شده است. اگر چه امروزه ۹۵٪ هیدروژن تولیدی از رفمنینگ گاز طبیعی و تنها ۵٪ 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 ساعت‌های باری است. احتراق هیدروژن و هوا تنها موجب تولید آلاینده اکسیدهای ازت خواهد شد و خبری از هیدروکربن‌های نسوخته، دوده، مونوکسیدکربن و دی‌اسکیدکربن نمی‌باشد. ولی به دلیل مشکلات ذخیره‌سازی این سوخت، هزینه بالای استحصال، انرژی کم مورد نیاز برای احتراق (تمایل به پدیده کوبش)، 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 ۵ تا ۱۰٪ 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 ۱۴٪ بیشتر از حالت دیزل خالص است. وی همچنین نشان داده است که اضافه کردن ۵-۱۰٪ هیدروژن و افزایش نسبت هوا به سوخت تا 20، بالاترین راندمان حرارتی را بدون وقوع کوبش در حالت بار کامل می‌دهد. در مقاله مسعود و همکاران [2] به بررسی تأثیر 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 ۱۹٪ بازدهی موتور خواهد شد و دلیل این نتیجه را اختلاط بهتر هیدروژن و هوا دانسته‌اند. در مقالات ای و ساراوانان [3] به بررسی تأثیر استفاده از شیر سلونوئیدی برای تزریق هیدروژن به منیفولد ورودی پرداخته و به این نتیجه رسیده است که عملکرد موتور ۹٪ افزایش در قیاس با حالت نرمال داشته است. مقاله اسواجا [4] نیز به این نکته اشاره کرده است که اضافه کردن ۵٪ هیدروژن باعث کاهش مدت زمان احتراق و اضافه کردن بیش از ۱۵٪ هیدروژن منجر به بروز پدیده کوبش خواهد شد. در مقاله مدهوچیت [5] که به صورت تجربی اثر جایگزینی هیدروژن به جای

کاهش هزینه محاسباتی و به دلیل تقارن هندسه، ۱/۶ هندسه ترسیم و مطابق شکل ۱ مشبندی شده است. برای سرعت بخشیدن به عمل محاسبات گزینه چند منطقه‌ای فعال گردیده است. مکانیزم مورد استفاده دارای ۵۰ گونه و ۱۸۰ واکنش می‌باشد که این مکانیزم در مقاله نیمان [۱۹] نیز استفاده شده است. ان‌هپتان به جای دیزل با ارزش حرارتی ۴۵.۱ MJ/kg و هیدروژن نیز با ارزش حرارتی ۱۱۹.۹۳ MJ/kg در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی آلایندگی اکسیدهای نیتروژن از طریق ۴ گونه و ۱۲ واکنش، که خود مکانیزم جی‌آرایی‌اکسیدهای 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 آلایندگی دوده از مدل دوده هایپرولاسو-نگل استفاده شده است. محاسبه آلایندگهای مونوакسیدکربن، هیدروکربن نسوخته، دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن از گونه‌های داخل مکانیزم استفاده شده است. مشخصات موتور شبیه‌سازی شده را در جدول ۲ و مدل‌های استفاده شده در شبیه‌سازی را در جدول ۳ مشاهده می‌کنید.

## ۲- صحه 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 پیش [۲۰] و اولودوگان [۲۱] مقایسه گردیده است. شکل ۲ نمودار فشار داخل سیلندر در حالت شبیه‌سازی شده و مرجع را نشان می‌دهد. جدول ۴ نیز میزان آلایندگهای 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 آلایندگهای مونوакسید کربن و هیدروکربن نسوخته، صحت مقادیر این آلایندگها مشخص نیست ولی تغییرات این آلایندگها نیز بررسی شده است.

## ۳- نتایج و بحث

در این مقاله، مقداری هیدروژن به جای کسری از انرژی سوخت دیزل در موتور معرفی شده تزریق می‌شود. در جدول ۵ مقادیر کسر حرموی 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 بازده اندیکاتوری به ترتیب از فرمول (۱) و (۲) استفاده شده است. دک [۲۲] نشان داد که اگر مقادیر این پارامتر زیر  $5 \text{ MW/m}^2$  باشد، موتور در حالت بدون کوبش خواهد بود.

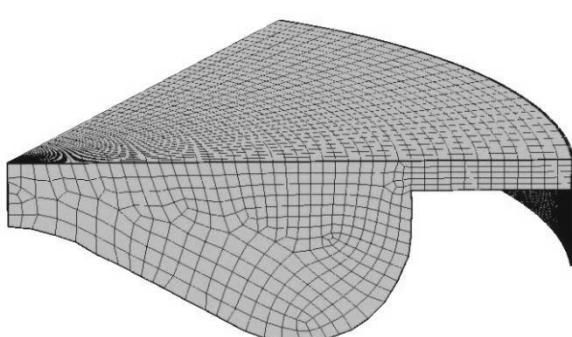


Fig. 1 Piston bowl geometry of the CATERPILLAR engine

شکل ۱ 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 آلایندگه بیشتری را کاهش دهد اشاره داشته است، زیرا مخلوط همگن‌تری تشکیل خواهد شد. هوکسترا و تاناکا [۱۴] افزایش  $\varphi > 0.33$  را عامل افزایش اکسیدهای نیتروژن بیان کرده‌اند. عموماً نسبت تعادلی بالا منجر به افزایش دمای محفظه به بیش از ۱۸۰۰k می‌شود. چوی نشان داد که افزایش نسبت هوا به سوخت به بیش از ۱.۲ منجر به کاهش این آلایندگه خواهد شد ولی در بین بازه  $\varphi < 0.9$  اضافه شدن هیدروژن منجر به افزایش آلایندگه اکسیدهای نیتروژن خواهد شد، به طوری که جایگزینی ۲۰٪ هیدروژن به جای LPG افزایش ۲۰٪ آلایندگه اکسیدهای نیتروژن را در پی خواهد داشت. مییاموتو [۱۵] به این نکته اشاره کرده است که اگر هیدروژن بیش از ۱۰٪ حجمی تزریق شود، احتراق دیزل را با تأخیر مواجه خواهد کرد و همین تأخیر منجر به کاهش دمای احتراق و در نتیجه کاهش آلایندگه اکسیدهای نیتروژن خواهد شد. از راههای دیگر برای کاهش آلایندگه 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 تاثیر 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 [۱۶]. به طور کلی، با مطالعه مقالات هیدروژن - دیزل تفاوت در برخی نتایج ملاحظه می‌شود. به عنوان مثال در تحقیق کاراگز [۱۷] که به بررسی تاثیر بار موتور بر روی عملکرد و آلایندگی موتور در هنگام جایگزین شدن ۳۰٪ از کل انرژی ورودی توسط هیدروژن در بارهای ۴۰، ۷۵، ۶۰، ۵۰ و ۱۰۰٪ پرداخته است به این نتیجه رسیده که در حالت بار کامل آلایندگه اکسیدهای نیتروژن به میزان ۵۰٪ افزایش می‌یابد ولی در حالت بار جزئی این آلایندگه کاهش می‌یابد. در مقاله مدهوچیت و همکاران [۱۸] که بررسی عملکرد، آلایندگی موتور دوگانه‌سوز دیزل-هیدروژن با مقادیر متفاوت هیدروژن از ۰ تا ۰.۴۲٪ انرژی ورودی در حالت ۱۰۰٪ بار پرداخته است، گزارش داده که آلایندگه اکسیدهای نیتروژن به میزان ۴۰۰٪ با جایگزینی ۳۰٪ هیدروژن افزایش می‌یابد. در تحقیق آزمایشگاهی ساراوانان و همکاران [۳]، طی بررسی غنی کردن هوا با هیدروژن و تزریق آن به موتور دیزل در بارهای مختلف از ۰ تا ۱۰۰٪ بیان شد که با اضافه کردن ۹۰٪ هیدروژن (از لحظه انرژی ورودی) در ۰.۷٪ بار موتور میزان اکسیدهای نیتروژن به کمترین مقدار خود به اندازه ۵۷۹ ppm می‌رسد و در بار کامل راندمان حرارتی در حالت ۳۰٪ هیدروژن به میزان ۰.۲۷٪ بدون ایجاد کوبش خواهد رسید. در این حالت میزان اکسیدهای نیتروژن ۲۰٪ 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 ۳۴۰۱ 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 دیzel خالص بررسی شود.

## ۲- معرفی مدل و صحه گذاری

### ۱- مدل محاسباتی

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

جدول ۳ مدل‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی

Table 3 Models used in simulation

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

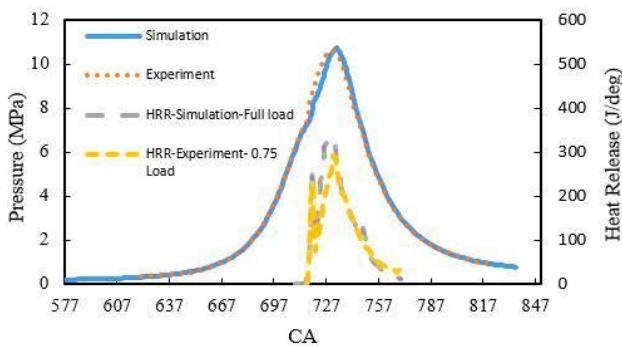


Fig. 2 The validation cases pressure traces and HRR [20,21]

شکل ۲ صحنه‌سننجی آثار فشار و حرارت آزاد شده [21,20]

### ۳-۲- حرارت آزاد شده

همان‌طور که در بخش قبلی ذکر شد، جایگزینی هیدروژن باعث کاهش بازدهی حجمی، و کاهش مقدار سوخت پایلوت منجر به تاخیر در احتراق می‌شود که این امر به دلیل ضعیف‌تر 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 سریع‌تر خواهد داد [23]. تغییرات نرخ حرارت آزاد شده بر حسب زاویه لنگ را در شکل ۴ مشاهده می‌کنید.

### ۳-۳- 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 می‌شود و احتمال بروز پدیده کوبش را زیاد می‌کند [25,24]. ذکر این نکته نیز مهم است که در حالت آزمایشگاهی جایگزینی هیدروژن به مقدار ۵۰ یا ۷۰٪ ارزی 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 مدهوچیت [26] حداقل میزان مجاز اضافه شدن هیدروژن به عنوان کسری از ارزی ورودی را ۴۲٪ عنوان کرده است. اگر زمان

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

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

### ۱-۳- فشار

اضافه شدن هیدروژن به عنوان کسری از ارزی باعث تاخیر در اشتغال و کاهش فشار درون محفظه شده که این امر به دلیل دمای خود اشتعالی بالای هیدروژن (828K) و کاهش مقدار سوخت پایلوت (دیزل) می‌باشد، چرا که ارزی منبع احتراق ضعیفتر 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 ۳ نمودار تغییرات فشار بر حسب زاویه لنگ در مقادیر مختلف جایگزینی هیدروژن مشاهده می‌کنید.

جدول ۲ مشخصات موتور شبیه‌سازی 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 (lit)	0.1651
حجم جابجایی (nm)	2.44
قطر سوراخ انژکتور (mm)	259
تعداد سوراخ انژکتور	6
نسبت چرخش	1
تعداد سوپاپ	4
تعداد سیلندر	1
بسه 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
بروفیل پاشش	مربعی
زمان تزریق سوخت (ATDC)	-9
زاویه راس مخروط پاشش	10
فاصله نوک نازل	-0.0023

جدول ۴ مقایسه نتایج عملکرد و آلیندگی مدل شبیه‌سازی شده با نتایج عددی اولودوگان و بینش [21,20]

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

CO <sub>2</sub> (kg <sub>fuel</sub> )	UHC (kg <sub>fuel</sub> )	CO (kg <sub>fuel</sub> )	soot (kg <sub>fuel</sub> )	NO <sub>x</sub> (kg <sub>fuel</sub> )	PRR (bar deg)	RI (MW m <sup>2</sup> )	بازده اندیکاتوری (%)
*	*	*	0.6	39	4.9	*	*
3066	0.192	5.57	0.607	43.57	4.59	1.38	45

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 مونوکسید کربن خواهد شد. جایگزین شدن هیدروژن بیش از مقدار بهینه منجر به کاهش اکسیژن شده (به دلیل تزریق راهگاهی 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 محظوظه، مقدار این آلاینده و برخی از آلاینده‌های دیگر افزایش پیدا می‌کند. با توجه به اینکه مرجع مورد استفاده برای صحه سنجی نتایج برای دور 1600 rpm این آلاینده را اندازه‌گیری نکرده‌اند، صحت و دقت مقایسه نیست ولی چیزی که اهمیت دارد روند تغییرات این آلاینده بر اساس میزان جایگزینی هیدروژن است. در شکل 8 تاثیر افزایش محتوای انژرژی هیدروژن به جای دیزل را بر آلاینده مونوکسید کربن مشاهده می‌کنید.<sup>[28,27]</sup>

### 6-آلاینده دوده

آلاینده دوده از اختلاف بین تشکیل دوده و اکسیداسیون دوده بوجود می‌آید. تشکیل دوده از پپرولیز سوخت هیدروکربن، یعنی شکست زنجیره هیدروکربن در غیاب اکسیژن و اکسیداسیون میزان آلاینده دوده با اکسیژن در دمای بالا، اختلاف تشکیل و اکسیداسیون دوده نیز یعنی سوختن دوده را تعیین خواهد نمود. مخلوط ناهمگن و انتشار احتراق موجب تشکیل بیشتر دوده خواهد شد. از طرف دیگر با افزایش بر، این آلاینده نیز افزایش پیدا خواهد کرد. حضور هیدروژن در هوای 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<sup>[29]</sup>. 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 موقع 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 سویاپ هوا و مقدار دیزل پاشش شده به داخل محفظه در مقادیر مختلف کسر انژرژی 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

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

پاشش سوخت پایلوت دچار تغییر شود و پاشش زودتر صورت گیرد، امکان وقوع کوشش 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.

### 4-آلاینده دی اکسیدکربن

بکی از دست آوردهای با ارزش اضافه کردن هیدروژن به عنوان سوخت جایگزین به موتورهای احتراق داخلی کاهش قابل توجه آلاینده‌گی دی اکسیدکربن 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 دی اکسید 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 انژرژی ورودی مشاهده می‌کنید.

### 5-آلاینده مونوکسیدکربن

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 محفوظه از سوخت و کمبود اکسیژن این

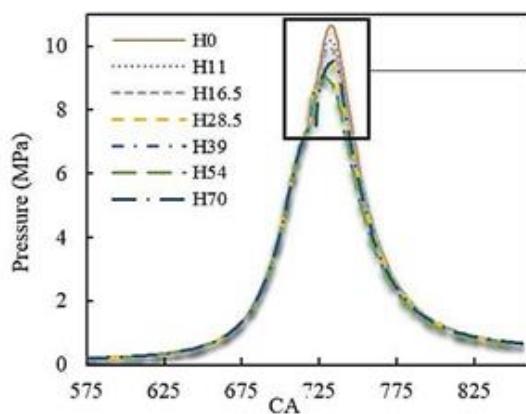
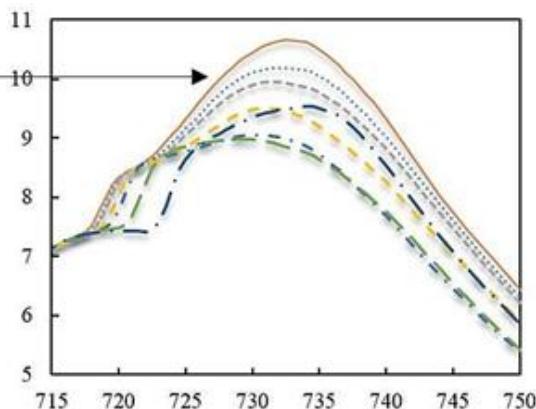
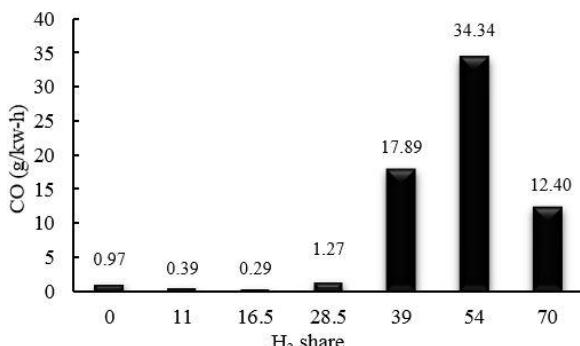


Fig. 3 The graph of hydrogen substitution impact on cylinder pressure



شکل 3 تاثیر جایگزینی هیدروژن بر فشار داخل سیلندر



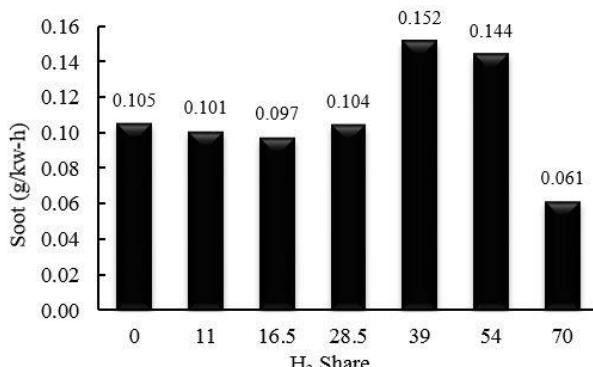
شکل ۸ نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده مونو-اکسید کربن

### ۷-۳-آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته

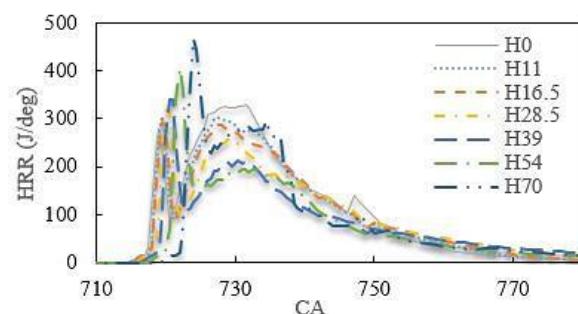
هیدروکربن نسوخته ناشی از احتراق ناقص، دمای پایین محفظه، درزها و شکاف‌های سیلندر و پیستون و حتی وجود لایه نازک روغن روانکار در مرحله احتراق می‌باشد [30]. حضور هیدروژن در محفظه احتراق به دلیل حالت گازی شکل منجر به کاهش پدیده خیسی دیواره و کاهش هیدروکربن نسوخته خواهد شد. دلایلی که برای آلاینده مونو-اکسید کربن 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 ۱۰ اثر اضافه شدن انرژی هیدروژن بر آلاینده هیدروکربن‌های نسوخته را مشاهده می‌کنید. البته توجه شود که مقدار فاصله بین سیلندر و پیستون در مقدار این آلاینده سیار تأثیر گذار است و از آنجایی که مراجع مورد استفاده مقدار این آلاینده را ذکر نکرده‌اند، لذا مرجعی برای مقایسه دقیق 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.

### ۸-۳-آلاینده اکسیدهای نیتروژن

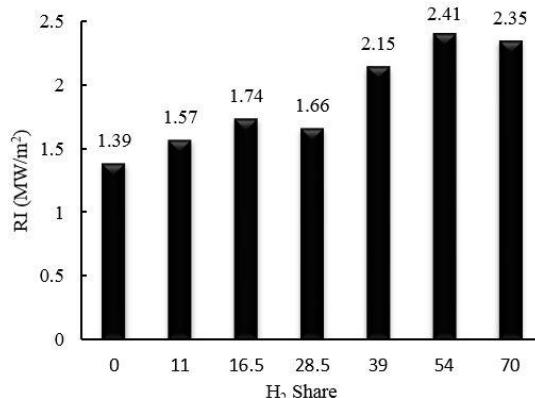
تشکیل اکسیدهای نیتروژن به دمای محلی احتراق، غلظت اکسیژن و مدت زمان افامت نیتروژن در دمای بالای محفظه بستگی دارد [30]. معمولاً بیشترین میزان تشکیل اکسیدهای نیتروژن با بیشینه دمای محفوظه تعیین می‌شود که بیشینه دمایی به عواملی همچون ترکیب سوخت، نسبت تعادلی و دمای اولیه هوا و سوخت بستگی دارد [31]. معمولاً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



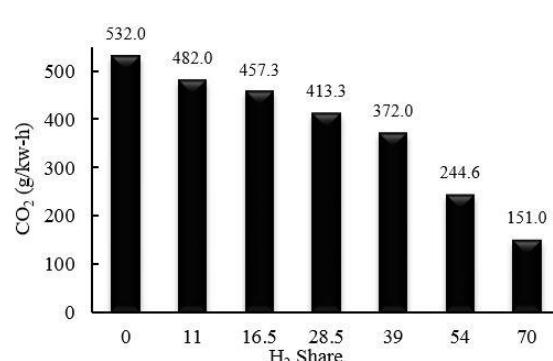
شکل ۹ نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده دوده



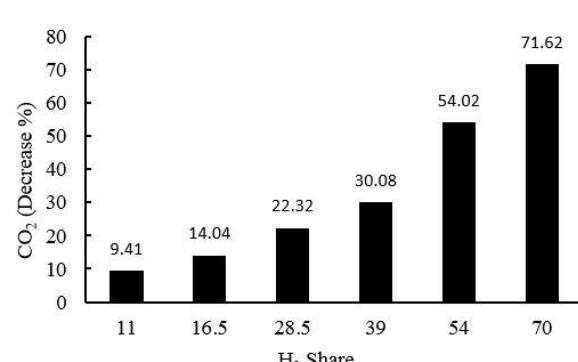
شکل ۴ تأثیر جایگزینی هیدروژن بر حرارت آزاد شده داخل سیلندر



شکل ۵ نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر شدت صدا



شکل ۶ نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلاینده دی اکسید کربن



شکل ۷ نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر میزان درصد کاهش دی اکسید کربن

دیزل کمتر و تنها هیدروژن می‌سوزد، دمای پایین‌تر شعله ادیابتیک 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.

### 9-3- 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

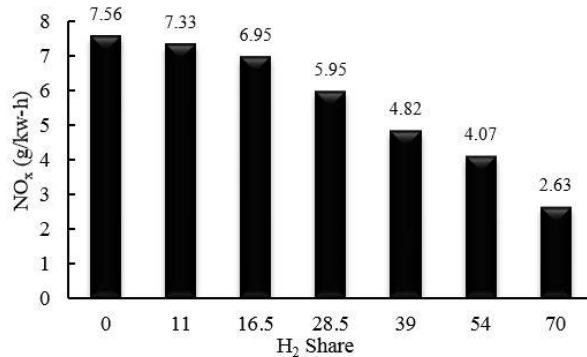
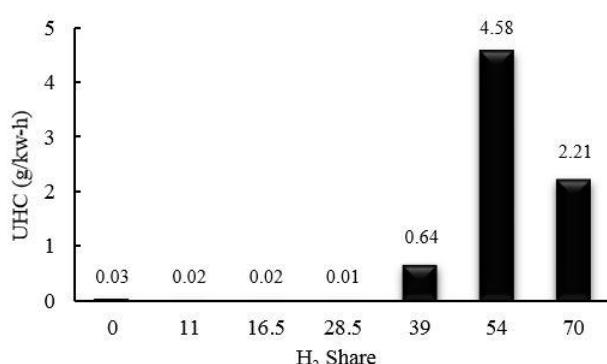


Fig. 11 The graph of hydrogen substitution impact on nitric oxide pollutant

شکل 11 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلیندگی اکسیدهای نیتروژن



شکل 10 نمودار اثر جایگزینی هیدروژن بر آلیندگی هیدروکربن نسخته

(90-95٪) مونو اکسید نیتروژن و (5-10٪) دی اکسید نیتروژن تشکیل می‌شود که مونو اکسید 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 آلیندگی 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

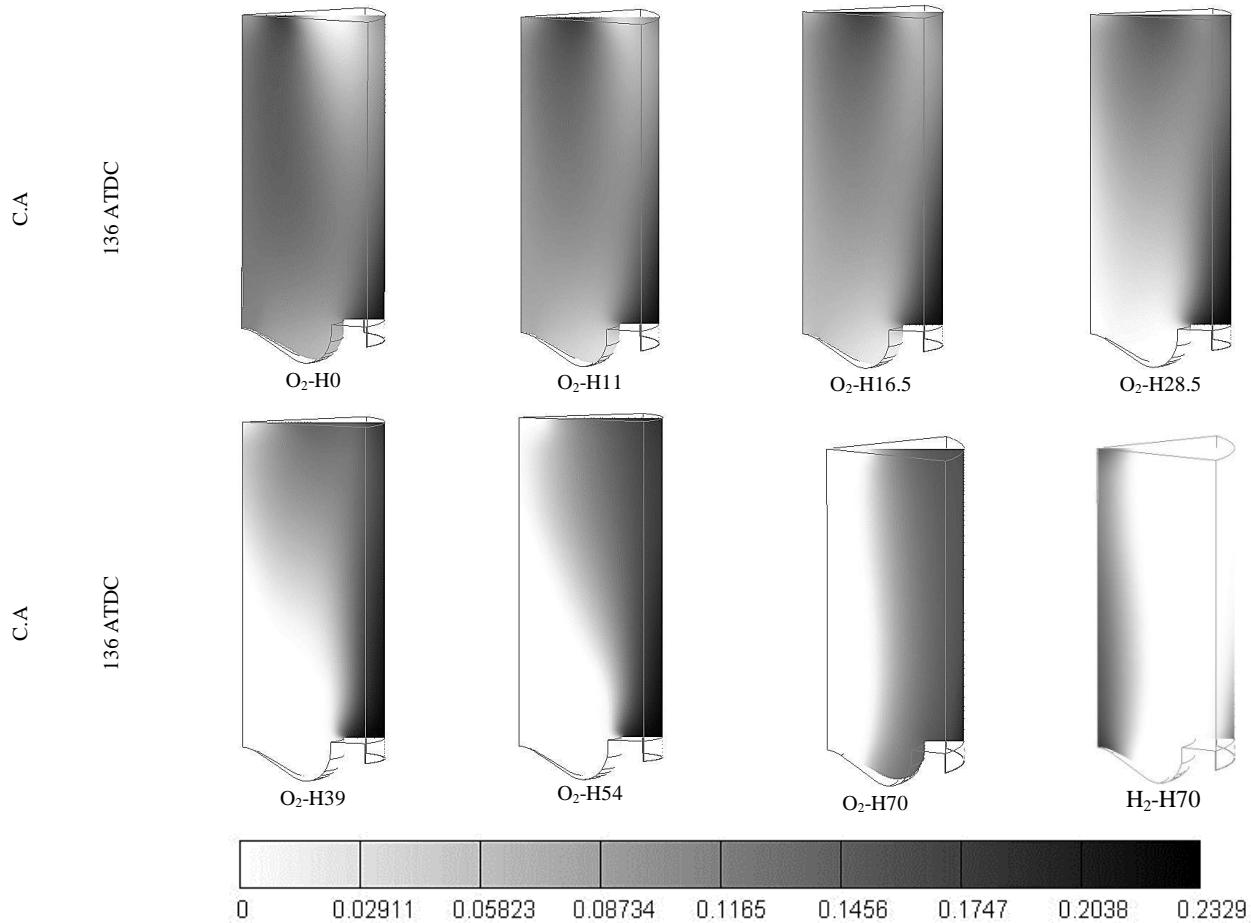


Fig. 12 Changes of the mass fraction of oxygen in various cases of hydrogen substitution at EVO and mass fraction of hydrogen in substitution of 70% of energy by hydrogen

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 ۶، خلاصه عملکرد و آلایندگی موتور دیزل سنگین در جایگزینی هیدروژن نشوده 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 آلایندگاهای خروجی به شدت تاثیرگذار است.
  - جایگزینی هیدروژن نرخ افزایش فشار و حرارت آزاد شده را افزایش ۵ MW/m<sup>2</sup> می‌دهد ولی میزان شدت صدا همچنان زیر عدد بحرانی باقی می‌ماند و پدیده کوبش در صورت طراحی دقیق موتور، رخ نخواهد داد.
  - بهترین مقدار برای جایگزینی هیدروژن با توجه به آلایندگاهای سمی خروجی، مقدار ۱۶.۵٪ انرژی ورودی است که آلایندگاهای مونوکسیدکربن، هیدروکربن نسخته، دوده و اکسیدهای نیتروژن به ترتیب به میزان ۷۰، ۱۴، ۵۴، ۸٪ و گاز گلخانه‌ای دی‌اکسیدکربن ۱۴٪ 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 (جزء گونه‌های شروع کننده احتراق) توسط هیدروژن منجر به تاخیر در احتراق و احتراق ناقص خواهد شد و آلایندگاهای سمی دوده، هیدروکربن‌های نسخته و مونوکسیدکربن افزایش خواهند یافت.

جایگزینی هیدروژن (H70, H54, H39, H28.5)، که اکسیژن به طور کامل مصرف شده، هیدروژن نسخته باقی مانده است (کسر جرمی هیدروژن در ۷۰٪ 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 آلایندگاهای سمی شود. در مقدارهای کم جایگزینی هیدروژن (H16.5, H11)، کمبود اکسیژن احساس نمی‌شود و ساخت هیدروژن به طور کامل مصرف شده و به کاملتر شدن احتراق کمک می‌کند که همین امر موجب کاهش همه آلایندگاهای در این حالت‌ها شده است. در شکل ۱۳ تغییرات دما در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن در لحظه باز شدن سوپاپ دود نشان داده 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 محفوظه به نسبت حالت بدون هیدروژن دیرتر بالا می‌رود و زمان کافی برای تشکیل آلایندگاهای اکسید نیتروژن که خود نیازمند زمان بیشتری برای تشکیل به نسبت دیگر آلایندگاهای است، کمتر خواهد شد.

#### ۴- نتیجه گیری

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

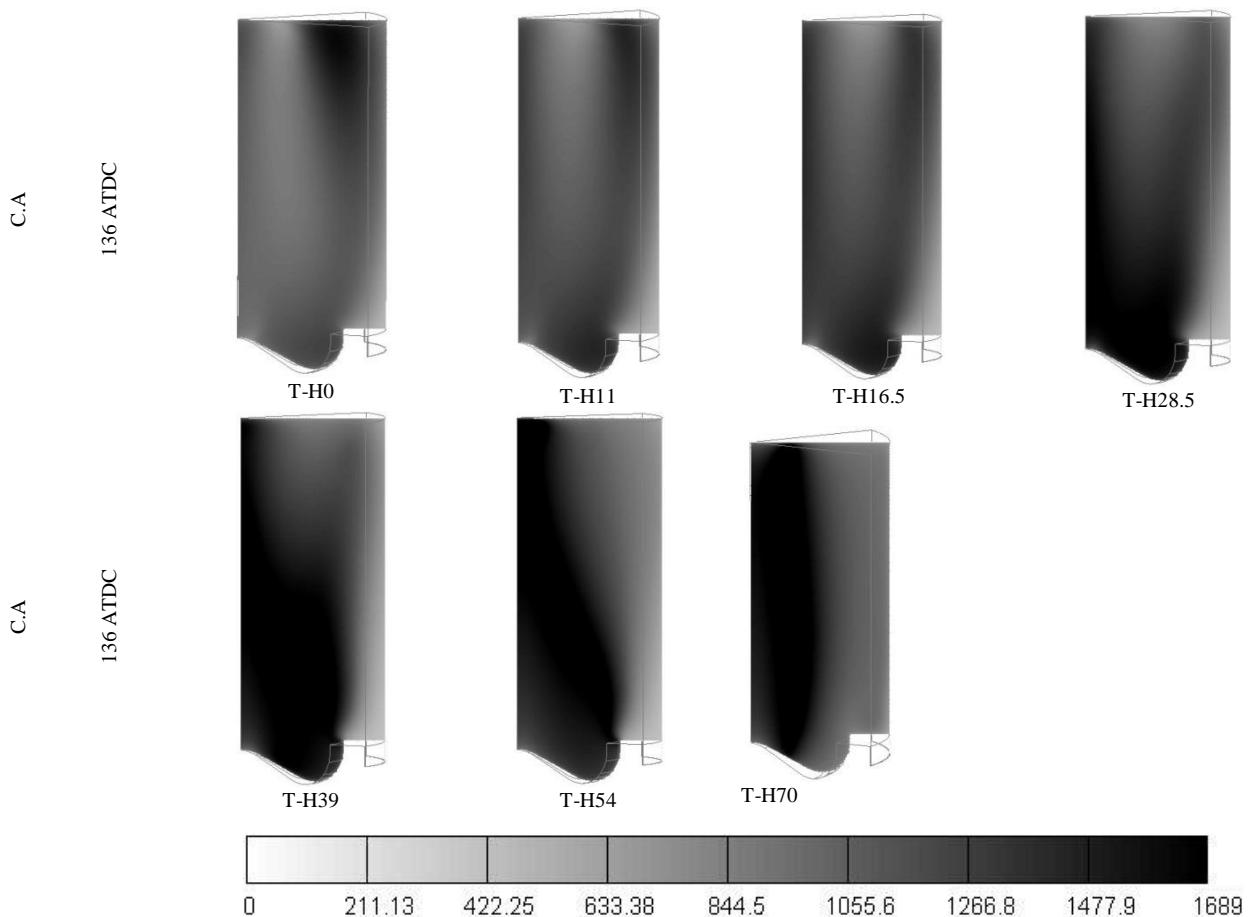


Fig. 13 Changes of the temperature (K) in various cases of hydrogen substitution at EVO

شکل ۱۳ تغییرات دما (کلوین) در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن در لحظه باز شدن سوپاپ دود

جدول ۶ عملکرد و آلایندگی موتور در حالت‌های مختلف جایگزینی هیدروژن به جای دیزل

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

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

## 6- 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, NOx emissions and efficiency of hydrogen, natural gas, and hydrogen/natural gas blended fuels, *SAE Paper 932775*, Vol. 105, No. 4, 1996.

## 5- فهرست عالیم و اختصارات

علائم یونانی	جرم	m
ثابت جهانی گازها	فشار	P
دما	RI	R
حجم	UHC	T
نسبت گرمایی ویژه	NO <sub>x</sub>	V
وزن مخصوص	Soot	
نسبت تعادلی	CO	
اختصارات	CDC	
بعد از نقطه مرگ بالا	CO <sub>2</sub>	ATDC
قبل از نقطه مرگ بالا	EGR	BTDC
زاویه لگ	EVO	C.A
احتراق دیزل معمول	GIE	
مونو اکسید کربن	HHV	
دی اکسید کربن	HRR	
بازخواری گازهای باقیمانده	IVC	
باز شدن سوپاپ خروجی	KH-RT	
بازده اندیکاتوری ناخالص	LHV	
ارزش حرارتی بالا	NO <sub>x</sub>	
نرخ آزاد شدن حرارت	PRR	
بسه شدن سوپاپ ورودی	RI	
کلوین-هملهولتز رایلی-تیلور	RPM	
ارزش حرارتی پایین	SCOTE	
اکسیدهای نپتروژن	TDC	
نرخ افزایش فشار		
شدت صدا		
دور بر دقیقه		
موتور تک سیلندر شبیه‌سازی شده		
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. Kakaei, 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. Karagöz, T. Sandalci, 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. Sandalci, L. Yüksek, A.S. Dalkılıç, Engine