



## بررسی عددی عملکرد و احتراق موتور 16RK215 با مخلوط سوخت هیدروژن و دیزل به روش اشتعال تراکمی کنترل واکنشی

میثاق خادم فینی<sup>۱</sup>، حسین قماش<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، معاون مهندسی گروه مینا

### چکیده:

با هدف بهبود عملکرد و آلاینده‌گی موتور دیزل سنگین 16RK215، شبیه‌سازی عددی احتراق هیدروژن - دیزل با روش نوین اشتعال تراکمی کنترل واکنشی روی این موتور انجام شد. در فاز اول شبیه‌سازی احتراق با 100% سوخت دیزلی انجام می‌شود و پس از صحت‌سنجی، در فاز دوم، شبیه‌سازی احتراق دو سوخته انجام می‌شود. با هدف استفاده حداکثری از گاز هیدروژن شبیه‌سازی احتراق دو سوخته اشتعال تراکمی کنترل واکنشی (RCCI) با بکارگیری 70% گاز هیدروژن با نسبت هم‌ارزی 0/۳۵ و سوخت دیزل با 30% از سهم کل سوخت ورودی صورت می‌گیرد. سپس در هر مرحله مقدار هیدروژن 10% کاهش و مقدار سوخت دیزل 10% افزایش می‌یابد. با افزایش مقدار هیدروژن نتایج نشان می‌دهند که فشار ماکزیمم احتراق کاهش می‌یابد و منجر به افزایش حدود ۵ درصد توان می‌شود. مقدار کوبش تا مرحله 30% هیدروژن افزایش و تا مرحله 80% هیدروژن کاهش می‌یابد و مهم‌ترین نتیجه این است که مقدار آلاینده‌های NOx, CO, SOOT به دلیل فقیر بودن یا به اصطلاح lean بودن مخلوط سوخت و هوای ورودی، کاهش می‌یابد. در فاز سوم با ثابت نگه داشتن مقدار سوخت دیزل، تاثیر مقدار متغیر هیدروژن بررسی می‌شود که در شرایط پاشش ثابت ۴۰ درصد دیزل، فشار ماکزیمم احتراق و دمای داخل محفظه افزایش می‌یابد. در شرایط ۸۰ درصد هیدروژن نسبت به ۲۰ درصد هیدروژن مقدار آلاینده‌های NOx ۹۰ درصد افزایش، CO ۶۱٪ و UHC ۴۹٪ کاهش یافته‌اند.

واژه‌های کلیدی: احتراق موتور، دوگانه سوز، کاربرد ریلی و دریایی

### ۱- مقدمه

افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی، مستلزم انجام تحقیقات فوری برای کاهش اثرات زیست‌محیطی است و امروزه از موتور دیزل در صنایع بسیاری از جمله صنایع هوابرد، کشتیرانی و حمل و نقل ریلی و جاده‌ای استفاده می‌شود که این تحقیق به موضوع مخلوط سوخت هیدروژن با

دیزل در جهت بهبود آلاینده‌گی و عملکرد موتور 16RK215، ۱۶ سیلندر ۴ زمانه اشتعال تراکمی که نقش مهمی در صنعت حمل و نقل بخصوص صنعت ریلی دارد؛ میپردازد. به سبب دستیابی به کمترین میزان آلاینده‌گی و بیشترین راندمان حرارتی نسبت به احتراق مرسوم روش‌های احتراق دما پایین اولین بار اواخر دهه 1970 در سال 1979 توسط انیسی و همکاران اولین گزارش در مورد موتوری دو زمانه که بدون جرقه زدن و فقط با استفاده از تراکم مخلوط سوخت و هوا مشتعل می‌شود انتشار یافت [1,2]. در سال 1983 نجت و همکاران و پس از آن ترینگ، با بکارگیری این روش در موتورهای چهار زمانه نشان دادند که حالت احتراقی اشتعال تراکمی شارژ همگن به وسیله سینتیک شیمیایی کنترل می‌شود [3,4]. بطور کلی موتورهای با احتراق دما پایین با کاهش دمای احتراق، آلودگیهای ناشی از احتراق دما بالا را کاهش میدهد [5]. موتور با استفاده از دو سوخت اولیه و ثانویه با واکنش پذیری‌های متفاوت مانند روش اشتعال تراکمی شارژ پیش مخلوط کار می‌کند. پس این امکان وجود دارد تا بتوان از طیف وسیعی از سوخت‌های جایگزین بجای سوخت‌های هیدروکربنی متداول استفاده شود. درصد سوخت ثانویه می‌تواند تا 50% یا بیشتر از کل سوخت مصرفی برسد که در این پژوهش عملکرد و میزان آلاینده‌ها در درصد‌های مختلف هیدروژن هم در شرایط ثابت بودن مقدار دیزل و هم در شرایط پاشش درصد‌های مختلف دیزل بررسی میشود. ویژگی متمایز هیدروژن این است که آلاینده‌های عمده ای مانند هیدروکربن HC، مونو اکسید کربن CO، دی اکسید گوگرد SO<sub>2</sub>، سرب و دود به میزان کم تولید می‌کند و این به دلیل عدم وجود کربن و گوگرد در هیدروژن است. موراری و همکارانش [6] در سال ۲۰۱۰ مطالعه تجربی بر روی عملکرد موتور و انتشار گازهای گلخانه‌ای یک موتور سوپرشارژ هیدروژن دیزل در حالت دوگانه سوز انجام دادند و براین باور بودند که عملکرد نرم و بدون ضربه موتور ناشی از استفاده هیدروژن در یک موتور دوگانه سوز سوپرشارژ با نسبت هم ارزی کم و حفظ بازده حرارتی بالا است. حداکثر imep حدود ۹۰۸ کیلوپاسکال و بازده حرارتی حدود ۴۲ درصد با بالاترین نسبت هم ارزی ۰/۳ تولید کرد و انتشار HC، CO به ترتیب ۱۵ و ۵ PPM بود ولی با این حال انتشار NOx با توجه به مقررات آلاینده بالا بود. لیو و جی [7] تاثیر افزودن گاز هیدروژن به دی متیل اتر و متان در احتراق RCCI را به طور عددی در نرم افزار KIVA بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند: ۱- با افزودن گاز هیدروژن زمانبندی احتراق ادونس شده و فشار بیشینه احتراق افزایش می‌یابد. ۲- افزودن گاز هیدروژن در شروع احتراق نسبت به مراحل بعدی احتراق تاثیر گذارتر می‌باشد. ۳- افزودن گاز هیدروژن موجب کاهش CO و افزایش NOx می‌گردد. یانگ و لین [8] عملکرد، احتراق و ویژگی‌های انتشار یک احتراق بیودیزل به کمک هیدروژن و شبیه‌سازی‌های عددی سه بعدی در یک موتور دیزلی با سوخت بیودیزل را با القای هیدروژن با درصد حجمی ۰.۵، ۱.۰، ۲.۰، ۳.۰ درصد بررسی کردند و نتیجه گرفتند که: ۱- با احتراق بیودیزل به کمک هیدروژن، به دلیل سرعت سوزاندن بالا و سرعت انتشار سریع شعله هیدروژن، فشار حداکثر و سرعت انتشار گرما در ۵۰ و ۱۰۰ درصد بارهای موتور افزایش می‌یابد. ۲- به دلیل ماهیت بدون کربن هیدروژن و سرعت سوزاندن بالا و سرعت انتشار سریع شعله یک روند کاهش کلی برای انتشار CO و دوده در تمام سرعت‌ها و بارهای موتور مشاهده می‌شود. ۳- با توجه به احتراق افزایش یافته که در شرایط بار ۵۰ و ۱۰۰ درصد مشاهده می‌شود؛ انتشار NOx با افزایش القای هیدروژن افزایش می‌یابد. دریامان و همکاران [9] در

سال ۲۰۱۹ به صورت عددی تاثیر احتراق گاز سنتزی تولید شده از گازسازی زیست توده بر موتور دوسوخته دیزل-گاز سنتزی را بررسی کردند و نتیجه گرفتند با افزایش نسبت جرم هیدروژن به جرم سایر گونه های قابل احتراق در سوخت سنتزی، فشاربیشینه، نرخ افزایش فشار، دمای متوسط و بیشینه دمای محلی افزایش می یابند.

نوآوری و هدف اصلی تحقیق حاضر در فاز اول شبیه سازی عددی احتراق موتور 16RK215 با سوخت 100% دیزل انجام میشود و پس از صحت سنجی، با ادوانس زمانبندی پاشش، افزایش یا کاهش توان و آلاینده ها بررسی می شود. در فاز دوم، شبیه سازی احتراق دو سوخته انجام می شود. با هدف استفاده حداکثری از گاز هیدروژن شبیه سازی احتراق دو سوخته اشتعال تراکمی کنترل واکنشی (RCCI) با بکار گیری 80% گاز هیدروژن با نسبت هم ارزی ۰/۳۵ و سوخت دیزل با 20% از سهم کل سوخت ورودی صورت میگیرد سپس در هر مرحله مقدار هیدروژن 10% کاهش و مقدار سوخت دیزل 10% افزایش می یابد و در فاز سوم با ثابت نگاه داشتن مقدار پاشش سوخت دیزل، تاثیر گاز هیدروژن در درصدهای مختلف بررسی میشود.

## ۲- مشخصات و شرایط کاری موتور:

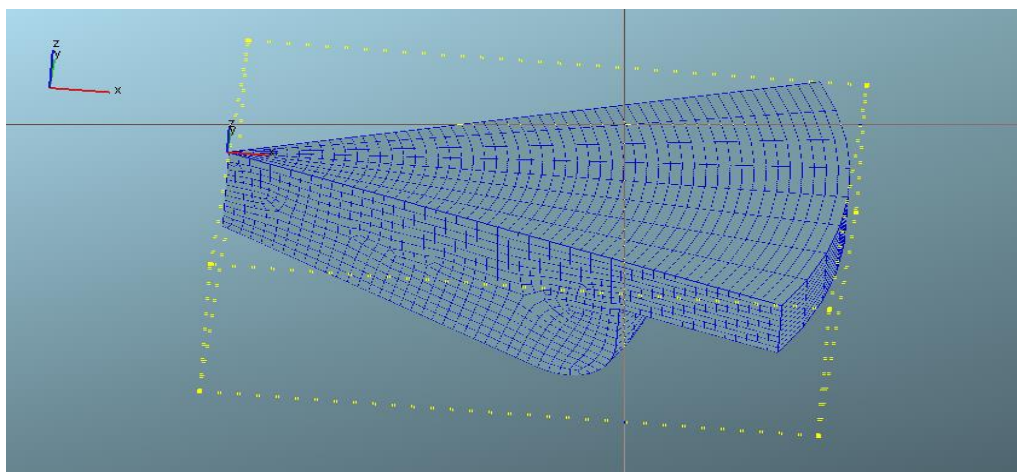
سری موتور RK توسط شرکت RUSTON ساخته شده است. این شرکت اکنون یکی از زیرمجموعه های SIEMENS [11] است اما اجازه تولید آن به شرکت M.A.N [12] فروخته شد. در سال ۱۹۹۰ موتور شش سیلندر خطی RK215 که دارای وزن کمتر و توان معادل ۱۹۸ KW به ازای هر سیلندر بوده است عرضه گردید و سپس مدل های ۸،۱۲،۱۶ سیلندر آن تولید گردید. نسخه ۱۲ سیلندر میتوان به لوکوموتیو LDE 3200 آلتوم برای سوریه و M9 برای سریلانکا اشاره نمود و از نسخه ۱۶ سیلندر میتوان به AD43C برای ایران و همچنین KTM CLASS 29 برای مالزی اشاره کرد. لوکوموتیو AD43C مجهز به موتور ۱۶RK215 با قدرت بیشتر از ۳۰۰۰ اسب بخار است و کاربرد این مدل در راه آهن ایران برای حمل بار میباشد [10].

مشخصات موتور 16RK215		
قطر سیلندر = mm 215	زاویه بسته شدن سوپاپ هوا = -146.5	زاویه شروع پاشش = -20 درجه
گورس پیستون = mm 275	زاویه باز شدن سوپاپ دود = 121.5	دور نامی = rpm 1000
طول شافتون = mm 502	زاویه باز شدن سوپاپ هوا = 303.5	آرایش موتور = V
نسبت تراکم = 13.5: 1	زاویه بسته شدن سوپاپ دود = 405.5	توان نامی = kw 2840
نوع سوخت: دیزل	مدت زمان پاشش = 30 درجه	جرم سوخت دیزل در هر سیکل = mg 1226
قطر سوراخ انژکتور = 0.36mm	تعداد سوراخ انژکتور = 8	فشار شارژ ورودی = bar 2.5
دمای ورودی = k 320		

جدول ۱ - مشخصات موتور 16RK215 و شرایط عملکردی با استفاده از سوخت دیزل [13]

## ۳- مدل‌سازی عددی:

در این مطالعه جهت اجرای فرایند شبیه سازی احتراق، از نرم افزار تجاری دینامیک سیالات محاسباتی AVL FIRE [14] استفاده شده است. با اطلاعات موجود در جدول ۱، شبیه سازی مطابق شکل ۱ با دامنه حل با قطاعی ۴۰ درجه ای از کاسه پیستون و محفظه احتراق با تعداد شبکه ۲۵۷۰۰ عدد، مورد استفاده قرار می گیرد.



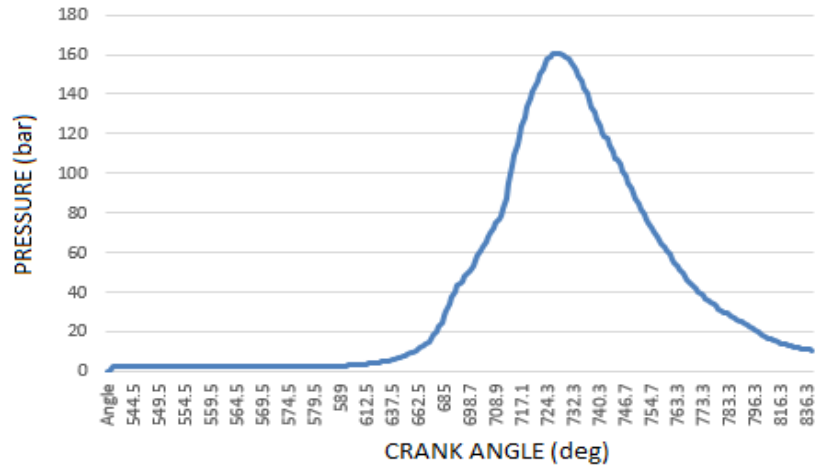
شکل ۱ - پیستون طراحی شده با تعداد ۲۵۷۰۰ مش

## ۴- صحت سنجی نتایج و استقلال حل از شبکه:

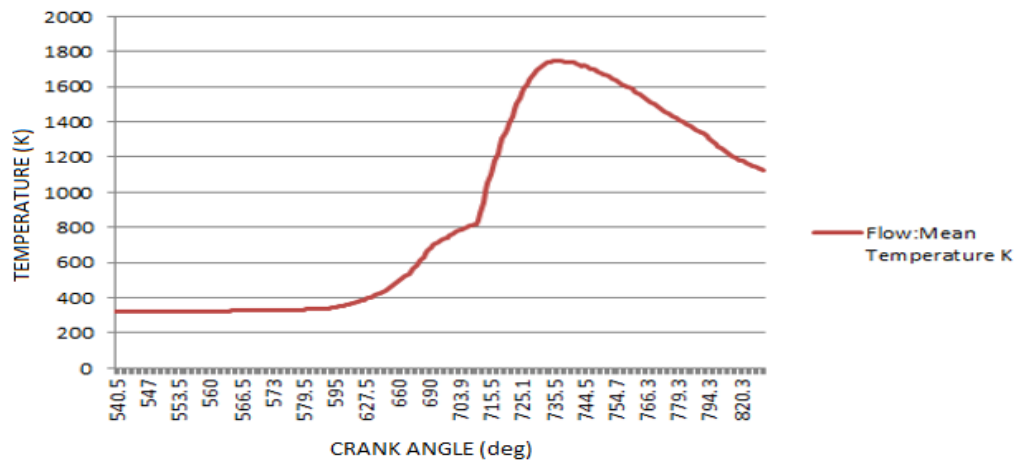
به منظور مطالعه و اعمال تغییرات در شرایط کار موتور باید از دقت نرم افزار اطمینان حاصل شود. ابتدا حالت تک سوخته دیزل در دور موتور ۱۰۰۰ rpm پردازش شده است و با نتایج تجربی و آزمایشگاهی موجود در مقالات کشاورز و چشم آرا و عیسی جان [1, 15, 16] در شکل های ۲، ۳، ۴ و ۵ مقایسه شده اند. توان حاصله نیز از این شبیه سازی ۲۴۰۸ کیلووات طبق معادله ۱ بدست آمده که با توان کاری موتور موجود در جدول ۱، ۱۵٪ خطا حاصل شده است. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت مدل پایه ایی ساخته شده؛ دقت و صحت کافی جهت ادامه تحقیق را دارا می باشد.

$$P = \text{imep} \cdot dv \cdot (N/2) \cdot 1/60$$

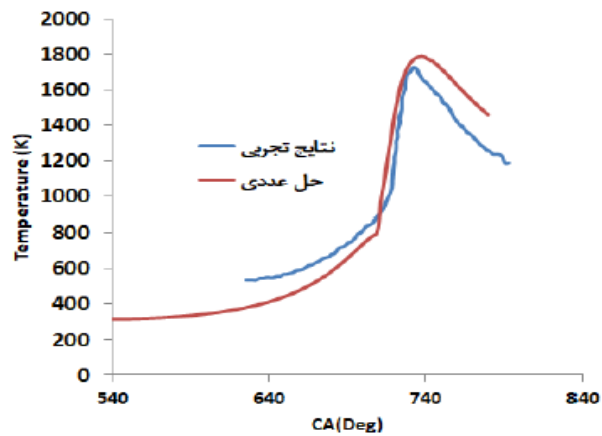
$$P = 1810000 \cdot 16 \cdot 3.14 \cdot (0.215)^2 \cdot 0.275 \cdot 1000/480 = 2408222 \text{ [W]} = 2408 \text{ [KW]} \quad (\text{معادله } ۱)$$



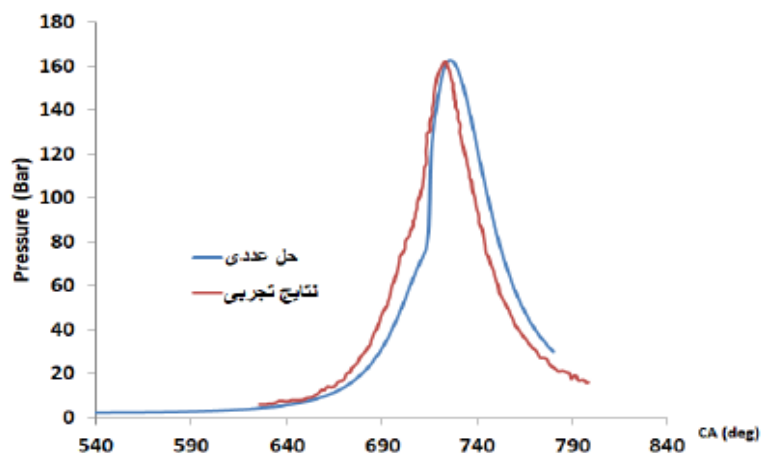
شکل ۲- فشار متوسط در ۱۰۰۰ دور بر دقیقه (محاسبه عددی)



شکل ۳- دمای متوسط گاز درون سیلندر در ۱۰۰۰ دور بر دقیقه (محاسبه عددی)



شکل ۴- مقایسه نتایج حل عددی عیسی جان [1] و نتایج تجربی کشاورز و چشم آرا [16 , 15]



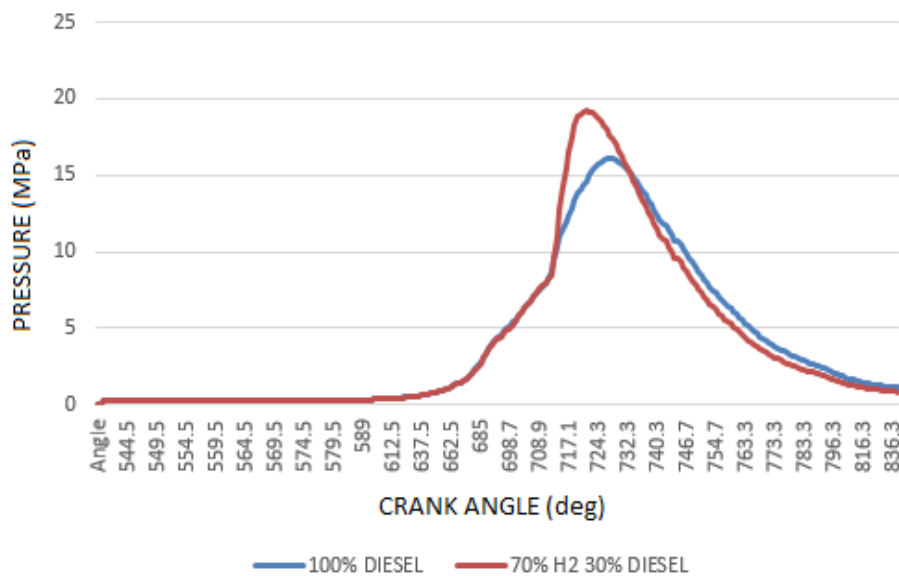
شکل ۵- مقایسه نتایج حل عددی عیسی جان [۱] و نتایج تجربی کشاورز و چشم آرا [۱۵ , ۱۶]

#### ۵- حل دوسوخته با روش اشتعال تراکمی کنترل واکنشی

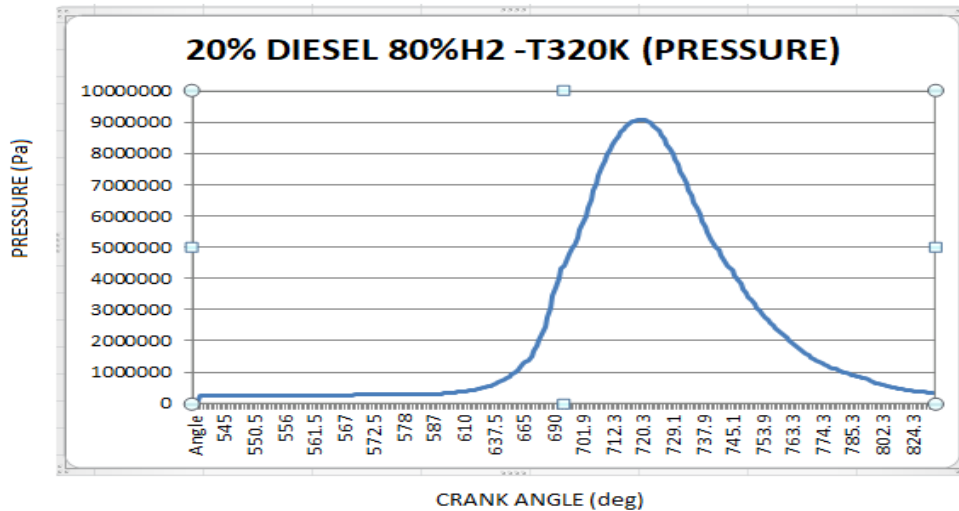
جهت مدلسازی احتراق اشتعال تراکمی کنترل واکنشی از حلگر شیمیایی کمکین (CHEMKIN) کوپل شده با نرم افزار FIRE استفاده می شود. سوخت هیدروژن با ارزش حرارتی پایین 119.96 MJ/Kg با واکنش پذیری پایین به صورت پیش مخلوط و از

هیپتان نرمال با ارزش حرارتی پایین  $44.56 \text{ MJ/Kg}$  با واکنش پذیری بالا بصورت پاشش مستقیم استفاده شده است. شرایط اولیه مدل پایه شبیه سازی دوسوخته این موتور طبق جدول ۱ است؛ با این تفاوت که  $70\%$  از کل سوخت ورودی گاز هیدروژن با نسبت هم ارزی  $0.35$ ، به مقدار جرمی  $21.53$  میلیگرم بصورت پیش مخلوط و همگن وارد استوانه می شود و مابقی  $30\%$  سوخت، هیپتان نرمال می باشد که به مقدار  $24.83$  میلیگرم مستقیماً تزریق می شود. نتایج نشان میدهند که توان  $32\%$  درصد کاهش یافته و مقدار آن  $1929$  کیلووات میباشد. با افزایش مقدار هیدروژن آلاینده  $\text{CO}$  کاهش می یابد. اگر احتراق ناقص باشد باعث میشود که مقدار آلاینده  $\text{CO}$  با افزایش هیدروژن افزایش یابد، اما نتایج نشان میدهند که احتراق به صورت کامل رخ داده است که مقدار آلاینده  $\text{CO}$  تقریباً  $90\%$  درصد کاهش یافته است، اما در مقابل اکسیدهای ازت تا  $10$  برابر افزایش داشته اند. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود طول دوره احتراق و تاخیر در اشتعال در حالت تمام دیزل و دوسوخته ( $70\%$  درصد هیدروژن و  $30\%$  درصد دیزل) مقایسه شده اند و طول دوره احتراق و تاخیر در اشتعال افزایش یافته است که این مورد کندی احتراق را نشان میدهد. هیدروکربن های نسوخته نیز افزایش چشمگیری پیدا کرده اند زیرا به علت مقادیر پایین سوخت دیزل با واکنش پذیری بالا احتراق موضعی تشکیل شده، توان و فرصت سوزاندن کل مخلوط را نداشته و باعث افزایش هیدروکربن های نسوخته شده است. از طرف دیگر، دوده بسیار ناچیزی تولید شده است.

ابتدا روش کار در شرایط  $80\%$  درصد هیدروژن و  $20\%$  درصد دیزل در دمای  $320$  کلوین انجام شده است که با توجه به عدم احتراق در شکل ۷، دما به  $340$  کلوین می رسد و نتایج بررسی میشود. عدم احتراق به این علت است که در نزدیکی نقطه مرگ بالای پیستون جهش فشار وجود ندارد و به این دلیل که شرایط مرزی است برای مقایسه آلاینده ها و عملکرد موتور از درصد متغیر  $70\%$  درصدی هیدروژن الی  $10\%$  درصد هیدروژن استفاده میشود.



شکل ۶- مقایسه نمودار فشار بر حسب زاویه لنگ در احتراق دوسوخته و تک سوخته دیزل



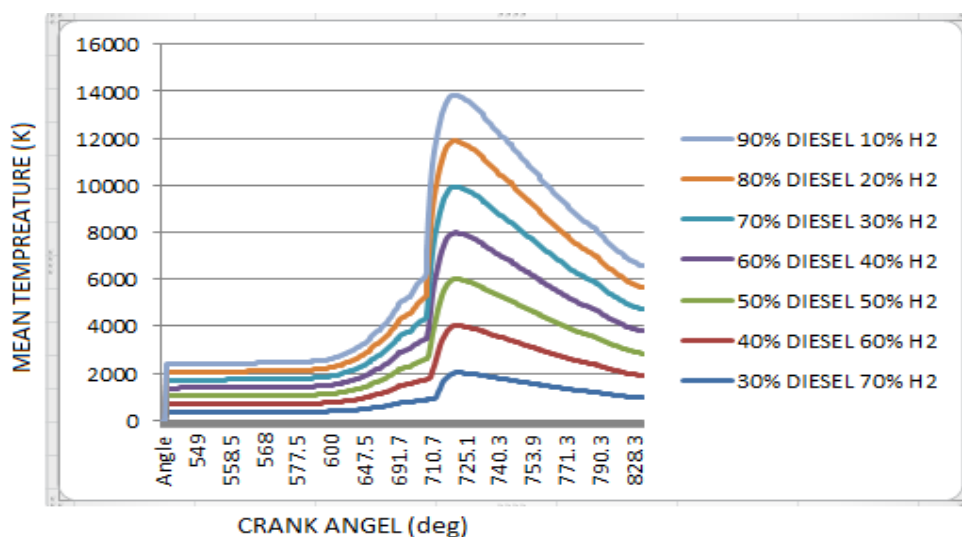
شکل ۷ - نمودار فشار در دمای ۳۲۰ کلوین

۶- نسبت متغیر هیدروژن به دیزل:

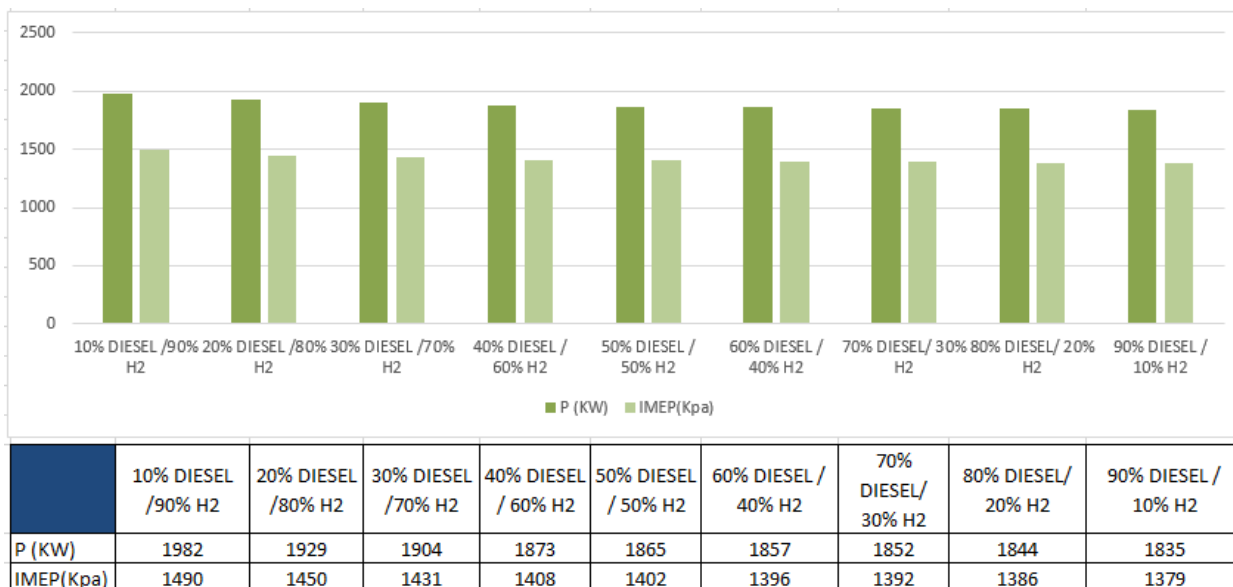
با کاهش نسبت سوخت هیدروژن به دیزل، افزایش بیشینه فشار، طول دوره احتراق و دمای بیشینه احتراق حاصل گشته. با هر مرحله افزایش درصد سوخت دیزل با اشتعال پذیری بالاتر، احتراق کاملتری صورت گرفته و سهم حرارت آزاد شده در فاز پیش مخلوط



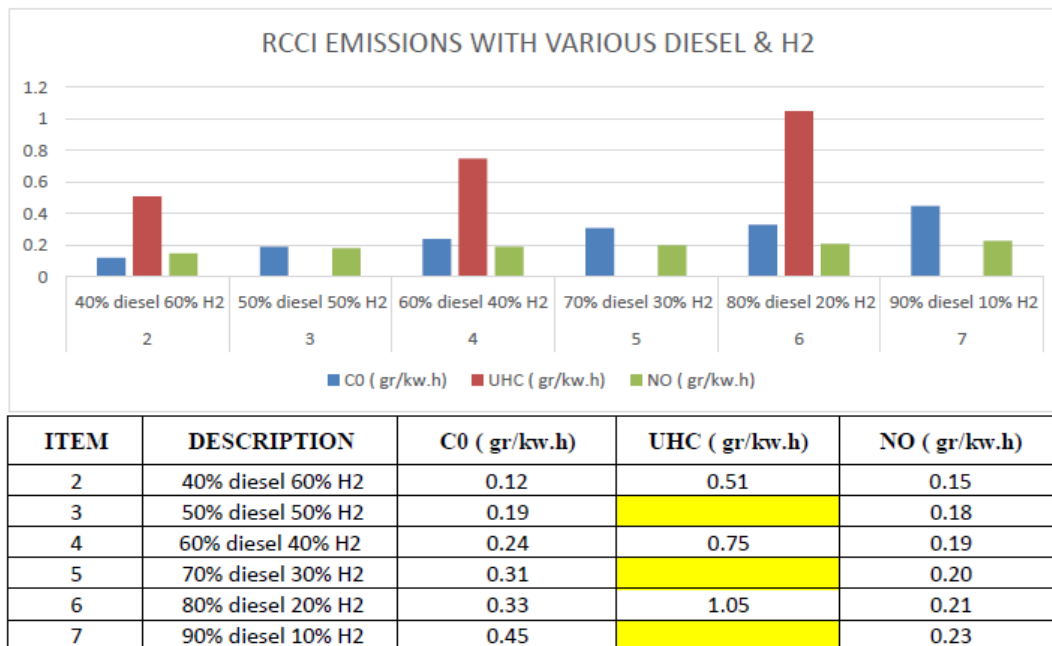
احتراق نیز تقویت گشته و احتراق روندی به سمت احتراق پیش مخلوط کامل طی کرده به همین علت دمای بیشینه احتراق افزایش یافته (طبق شکل ۸) و اکسید های ازت روندی صعودی با نرخ بسیار بالا داشته اند و در مقابل با افزایش هیدروژن و کاهش پاشش دیزل به دلیل کاهش کربن در محفظه احتراق آلاینده هیدروکربن های نسوخته و دوده کاهش می یابد. شکل ۹ نتایج عملکردی این بخش را نشان میدهد که طبق این شکل با افزایش مقدار هیدروژن مقدار imep و توان (P) افزایش می یابد که بسیار نتیجه مطلوبی است، اما علت افزایش توان این است که هرچه سوخت دیزل بیشتر باشد؛ احتراق زودتر رخ میدهد و زمانیکه پیستون بالا برود و در فاز تراکم باشد (قبل از آنکه به TDC برسد) اگر احتراق زیاد باشد و فشار زیاد شود؛ نشان میدهد که کار منفی وجود دارد و باعث افت توان میشود، اما زمانیکه مقدار هیدروژن زیاد میشود؛ احتراق دیرتر شروع شده که باعث میشود کار منفی کمتر بشود و به همین خاطر است که نمودار توان با افزایش هیدروژن صعودی است. وقتی که در فرآیند احتراق مقدار پاشش دیزل بیشتر باشد به علت قابلیت خوداشتعالی بالای آن به صورت موضعی دمای آن بالاتر است و افزایش دما باعث افزایش آلاینده NOx میشود. هرچه دیزل بیشتر باشد؛ احتراق زودتر شروع میشود که باعث میشود فشار و دما افزایش یابد. با افزایش مقدار هیدروژن آلاینده CO کاهش می یابد. اگر احتراق ناقص باشد باعث میشود که نمودار CO با افزایش هیدروژن افزایش یابد، اما شکل ۱۰ نشان میدهد که احتراق به صورت کامل رخ داده است. با کاهش مقدار سوخت دیزل، مقدار کربن کاهش می یابد، در نتیجه میزان هیدروکربن های نسوخته نیز کاهش می یابد.



شکل ۸ - مقایسه دما های داخل استوانه بر حسب نسبت های مختلف هیدروژن به دیزل در نسبت هم ارزی ۰.۳۵



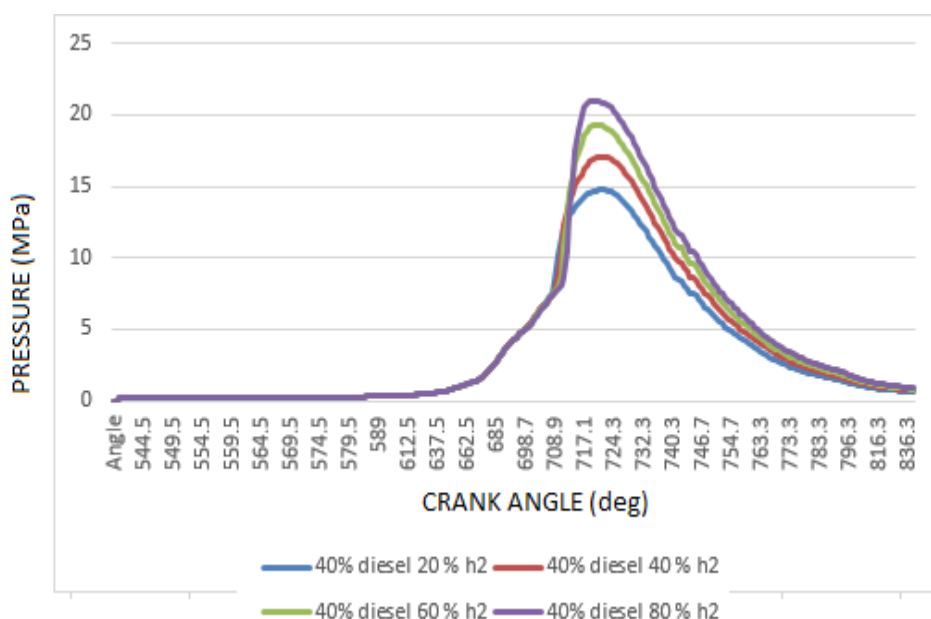
شکل ۹- مقایسه نتایج عملکردی با تغییر نسبت های مختلف هیدروژن به دیزل



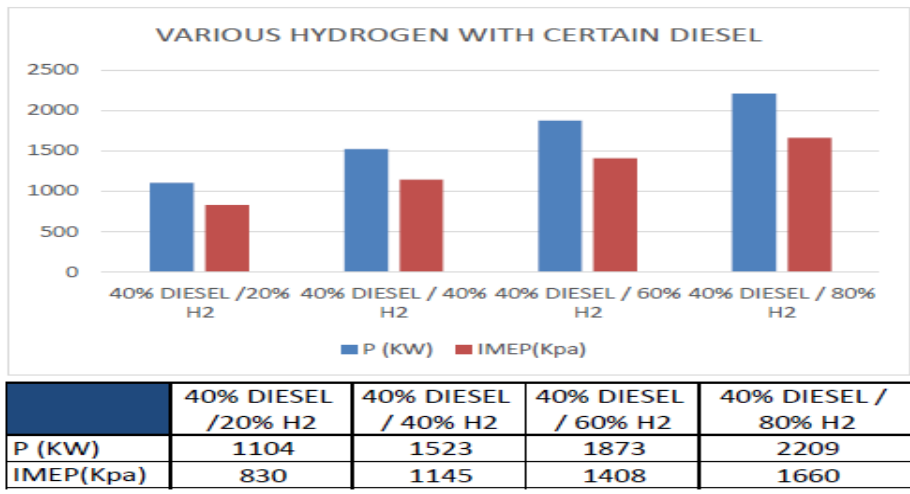
شکل ۱۰- مقایسه آلاینده های تولیدی بر حسب نسبت های مختلف هیدروژن به دیزل

## ۷- نسبت متغیر هیدروژن با در نظر گرفتن مقدار ثابت دیزل:

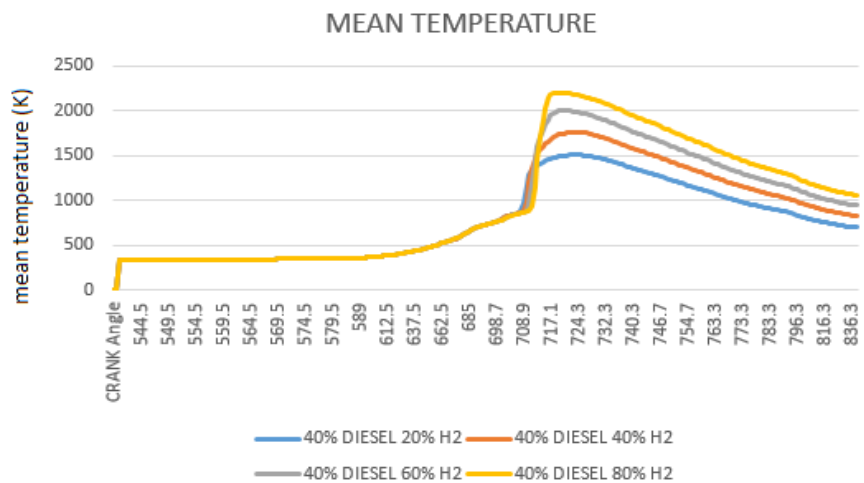
در این بخش نسبت متغیر هیدروژن به نسبت ثابت ۴۰ درصد دیزل بررسی شده است و با توجه به شکل ۱۱ این نتیجه یافت میشود که با افزایش هیدروژن، فشار ماکزیمم احتراق و نرخ آزادسازی انرژی (دمای داخل سیلندر) [طبق شکل‌های ۱۳ و ۱۱] افزایش می‌یابد. احتراق روندی به سمت احتراق پیش مخلوط کامل طی کرده و به همین علت دمای بیشینه احتراق افزایش یافته و اکسیدهای ازت روندی صعودی داشته‌اند و در مقابل احتراق موضعی قویتر مخلوط نسوخته در محفظه را کامل سوزانده، پس آلاینده‌های هیدروکربن‌های نسوخته و مونواکسید کربن نیز کاهش چشمگیری داشته‌اند.



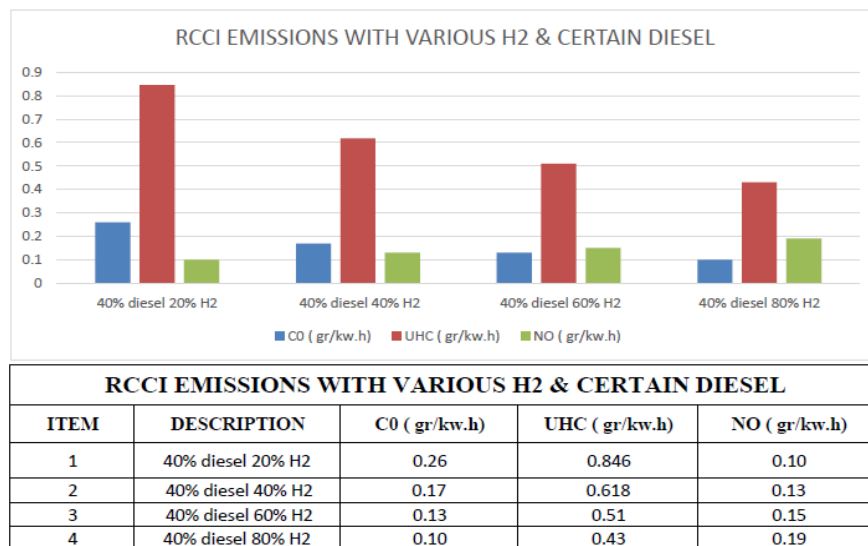
شکل ۱۱- مقایسه نمودار فشار بر حسب زاویه لنگ در احتراق دوسوخته با نسبت متغیر هیدروژن و ثابت دیزل



شکل ۱۲ - مقایسه نتایج عملکردی با تغییر نسبت های مختلف هیدروژن به نسبت ثابت دیزل



شکل ۱۳ - مقایسه دما های داخل استوانه بر حسب نسبت های مختلف هیدروژن به نسبت ثابت دیزل در نسبت هم ارزی ۰.۳۵



شکل ۱۴ - مقایسه آلاینده های تولیدی بر حسب نسبت های مختلف هیدروژن به نسبت ثابت دیزل

#### ۸- بحث و نتیجه گیری:

- در شرایطی که این موتور به صورت دوسوخته (۷۰٪ هیدروژن، ۲۰٪ دیزل) با نسبت هم ارزی ۰/۳۵ کار کند توان آن نسبت به صد درصد دیزل ۲۰٪ کم می شود.
- در روش RCCI حداقل دمایی که در این پژوهش، احتراق رخ میدهد دمای ۳۴۰ کلوین است.
- نسبت هم ارزی ۰/۳۵ فقیر (lean) است و به همین دلیل اگر مقدار دیزل کم شود قابلیت خود اشتعالی کم و انتشار حرارت کاهش می یابد و در نتیجه آلاینده NOx کاهش می یابد و به دلیل عدم وجود کربن در گاز هیدروژن مقدار آلاینده مونواکسید کربن و هیدروکربن های نسوخته کاهش می یابند.
- توان موتور در حالت دو سوخته (هیدروژن و دیزل) نسبت به صد در صد دیزل کاهش می یابد ولی در حالت دو سوخته با افزایش نسبت گاز هیدروژن و کاهش نسبت سوخت دیزل توان افزایش می یابد. برای مثال برای حالت ۸۰ درصد هیدروژن نسبت به ۱۰ درصد هیدروژن در مخلوط (هیدروژن و دیزل) فشار متوسط موثر و توان افزایش می یابد.

- در شرایط پاشش ثابت دیزل و نسبت متغیر هیدروژن، با افزایش هیدروژن توان و فشار ماکزیمم افزایش می یابد و در مقابل آلاینده NOx افزایش چشمگیری دارد، اما آلاینده های هیدروکربن های نسوخته و مونواکسید کربن کاهش می یابند.

### فهرست علائم :

NOx	• اکسید های ازت
CO	• مونواکسید کربن
UHC	• هیدروکربن های نسوخته
CA	• درجه لنگ
P	• توان
IMEP	• فشار متوسط مؤثر شاخص
RCCI	• روش اشتعال تراکمی کنترل واکنشی

## مراجع و منابع :

- [1] H.Ghomashi , V.Issajan , Numerical simulation of performance and combustion of 16RK215 engine with reactivity controlled compression ignition method . (The 12th International conference for Internal combustion engines and oil, Tehran)
- [2] Onishi, S., Jo, S. H., Shoda, K., Jo, P. D., & Kato, S. (1979). Active thermo-atmosphere combustion (ATAC)—a new combustion process for internal combustion engines. SAE Transactions, 1851-1860.
- [3] Najt, P. M., & Foster, D. E. (1983). Compression-ignited homogeneous charge combustion. SAE Transactions, 964-979.
- [4] Thring, R. H. (1989). Homogeneous-charge compression-ignition (HCCI) engines (No. 892068). SAE Technical paper.
- [5] Ghomashi, H., Olley, P., Mason, B., & Ebrahimi, M. K. (2015). Simulating the influence of injection timing, premixed ratio, and inlet temperature on natural gas/diesel dual-fuel HCCI combustion in a diesel engine. International Journal of Powertrains, 4(1), 36-52.
- [6] Murari Mohon roy, Eiji Tomoto, Nobuyuki Kawahara, Yuji Harada, Atsushi Sakane , an experimental investigation on engine performance and emissions of a supercharged H<sub>2</sub>-diesel dual fuel engine
- [7] Liu, Jie, et al., Numerical study of hydrogen addition to DME/CH<sub>4</sub> dual fuel RCCI engine. International journal of hydrogen energy 37.10 (2012):8688-8697.
- [8] H.An, W.M.Yang, A.Maghboul, J.Li, S.K.Chou, K.J.Chua, J.X.Wang, L.Li, ” Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of a hydrogen assisted biodiesel combustion in a diesel engine <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.12.021>
- [9] یاری "تأثیر ترکیب گاز سنتزی تولید شده به روش گازی سازی زیست توده بر عملکرد و آلایندگی های یک موتور RCCI دیزل-گاز سنتزی . " سوخت و احتراق ۱۲.۴ ۹۵-۹۷
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/rk\\_215](http://en.wikipedia.org/wiki/rk_215)
- [11] <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/gas-engines.html>
- [12] <https://www.engines.man.eu/global/en/index.html>
- [13] [https://www.researchgate.net/figure/Specification-of-16RK215-engine\\_tbl1\\_41706247](https://www.researchgate.net/figure/Specification-of-16RK215-engine_tbl1_41706247)
- [14] <https://www.avl.com/>
- [15] Keshavarz, M., Javadirad, G., & Jazayeri, S. A. (2011). Injection Optimization for Heavy Duty Diesel Engine in Order to Find High Efficiency and Low NO<sub>x</sub> Engine Concept by Means of Quasi Dimensional Multi-Zone Spray Modeling. The Journal of Engine Research, 22(22), 29-38.
- [16] Chamehsara, S., Mirsalim, S. M., & Tajdari, M. (2014). Effects of fuel injection discharge curve and injection pressure on upgrading power and combustion parameters in heavy-duty (HD) diesel engine with computational fluid dynamics (CFD) simulation. Journal of Mechanical Engineering Research, 6(2), 9-21.