

بررسی آزمایشگاهی اثر سوخت HHO-CNG بر عملکرد موتور پایه بنزین سوز

صمد جعفرمدار^{۱*} و پوریا مجیدی^۲

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، s.jafarmadar@urmia.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، p.majidi@urmia.ac.ir

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۰۵، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۳۹۹/۰۳/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۱)

چکیده: در موتورهای پیستونی با افزایش دور موتور مدت زمان سیکل احتراق کاهش می‌یابد. با کاهش زمان سیکل احتراق موتور فرصت برای احتراق کامل سوخت کم می‌شود. در نتیجه، به منظور تکمیل احتراق سوخت در دوره‌های بالای موتور، شمع باید زودتر جرقه بزند. حال، با توجه به اینکه سرعت شعله گاز طبیعی نسبت به بنزین کمتر است، این مشکل محسوس‌تر می‌شود. در نتیجه مقدار پیش‌انداختن زمان جرقه شمع موتور، در حالت گازسوز، نسبت به حالتی که بنزین می‌سوزاند، باید بیشتر افزایش یابد. این کار منجر به افزایش کار منفی در مرحله تراکم می‌شود که سبب کاهش بازدهی چرخه می‌شود. محققان برای بهبود احتراق گاز طبیعی پیشنهاد اضافه کردن هیدروژن را داده‌اند (HCNG). با اضافه کردن هیدروژن خواص شعله‌وری گاز طبیعی بهبود می‌یابد. در این پژوهش، با استفاده از هیدروژن اکسیژن (HHO) به روش الکترولیز از آب تولید و مصرف می‌شود. گاز HHO تولید شده به همراه گاز CNG با هوای ورودی به موتور ترکیب می‌شود. سپس، تاثیر گاز HHO-CNG بر پارامترهای بازدهی، توان و آلودگی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با اضافه شدن HHO بازده حرارتی افزایش می‌یابد. در این شرایط، میزان CO و UHC کاهش داشته است. این کاهش آلودگی و افزایش بازده به علت کاهش نیاز به آوانس جرقه شمع و احتراق کامل سوخت است.

کلیدواژگان: HHO، CNG، موتور، احتراق، آلودگی

مقدمه

منوکسیدکربن و هیدروکربن نسوخته جزء مهم‌ترین آلاینده‌های تولید شده از موتورهایند. یکی از راهکارهای کاهش این آلودگی‌ها استفاده از گاز طبیعی به جای بنزین است، اما سرعت شعله ناشی از احتراق گاز طبیعی نسبت به بنزین کمتر است. در نتیجه، نیاز به پیش‌انداختن زمان جرقه افزایش می‌یابد. به همین دلیل، در صورت استفاده از گاز طبیعی در موتور پایه بنزین سوز، بازدهی و توان کاهش می‌یابد و آلودگی نیز ممکن است به اندازه کمی کاهش یابد. برای برطرف کردن این مشکل می‌توان به گاز طبیعی هیدروژن اضافه کرد. هیدروژن یک سوخت پاک است که می‌تواند با بازدهی بالا در سیستم‌های تولید توان مورد استفاده قرار گیرد. الکترولیز آب یکی از بهترین روش‌ها برای تولید هیدروژن با خلوص بالاست. هیدروژن به دست آمده از این روش عاری از هرگونه گوگرد و کربن است. در صورتی که الکتریسیته مورد نیاز برای تجزیه آب از منابع تجدیدپذیر تأمین شود، یک سوخت پاک تلقی می‌شود [۱].

هیدروژن دارای پایداری احتراق و سرعت سریع شعله است. بنابراین، با ترکیب هیدروژن در گاز طبیعی می‌توان عیوب گاز طبیعی را برطرف کرد. دانشگاه کلردا، در سال ۱۹۹۲، هیتان (HCNG) را به عنوان مخلوط گاز متان و هیدروژن ثبت اختراع کرد [۲]. اما موانعی بر سر راه عملیاتی شدن این طرح وجود دارد. این موانع شامل نبود زیرساخت‌های تولید، انتقال و توزیع هیدروژن است. در کارهایی که قبلاً توسط دیگر محققان انجام شده، هیدروژن مورد نیاز به صورت ذخیره در کپسول تأمین شده است. با توجه به اینکه هیدروژن درصد خیلی کمتری از سوخت HCNG را تشکیل می‌دهد، این امکان وجود دارد که هیدروژن

مورد نیاز را به صورت همزمان در محل تولید کرد. با این کار چالش‌های انتقال، توزیع و ذخیره هیدروژن رفع می‌شود. تفاوت اساسی این طرح در این است که هیدروژن موجود در سوخت HCNG به روش الکترولیز آب تامین می‌شود (HHO). در نتیجه این سوخت جدید را HHO-CNG می‌نامیم. بدین منظور، دستگاه تولیدکننده هیدروژن (هیدروراکتور) مناسب طراحی و ساخته شده است.

در این پروژه، آزمایش‌ها بر روی یک موتور پایه بنزین سوز انجام شده است. ابتدا این موتور بنزین سوز به موتور گازسوز تبدیل شده و سپس سوخت هیدروژن به گاز طبیعی اضافه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با ثابت ماندن مصرف گاز طبیعی، توان افزایش می‌یابد و این در حالی است که آلودگی هیدروکربن‌های نسوخته و منوکسیدکربن کاهش می‌یابد. استفاده از هیدروراکتور برای تولید گاز HHO در موتورهای گازسوز به‌ویژه در موتورهای که با یک دور و گشتاور ثابت کار می‌کنند، مانند موتور ژنراتور برق و موتور پمپ آب، می‌تواند بسیار کاربردی باشد. در جدول ۱، مشخصه‌های گاز طبیعی و هیدروژن مقایسه شده است [۳].

جدول ۱- مشخصه‌های هیدروژن و گاز طبیعی [۳،۴]

Table 1- Property of hydrogen and CNG [3,4]

Properties	Hydrogen	CNG
Lower heating value (LHV) (MJ/kg)	119.7	46.72
Volumetric LHV (MJ/m ³)	10.22	32.97
LHV of stoichiometric mixture (MJ/m ³)	3.02	3.13
Density at NTP (kg/m ³)	0.08	0.72
Molar mass (kg/mol)	2.02	16.04
Diffusion coefficient (cm ² /s)	0.61	0.189
Flammability limits in air (vol%) (lower-upper)	4-75	5-15
Laminar flame speed at NTP (cm/s)	265-325	38
Auto-ignition temperature in air (K)	858	723
Adiabatic flame temperature in NTP air (K)	2379	2224
Minimum ignition energy (mJ)	0.02	0.28
Quenching distance in NTP air (mm)	0.64	2.03
Research octane number	130	120
Stoichiometric air fuel ratio on mass basis	34.3	14.49
Limits of flammability (equivalence ratio)	0.1-7.1	0.4-1.6

حسین توران و همکاران [۵]، در سال ۲۰۱۶، به صورت آزمایشگاهی، اثر گاز HHO-CNG را بر روی یک موتور دیزلی چهارسیلندر مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، از ترکیب ۲۵ درصد گاز HHO و ۷۵ درصد گاز CNG استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد عملکرد موتور با این سوخت بهبود می‌یابد، ضمن اینکه انتشار گازهای گلخانه‌ای به جز منوکسیدکربن در مقایسه با سوخت دیزل کاهش می‌یابد.

عمار الروسان و همکاران [۶]، در سال ۲۰۱۱، اثر اضافه کردن گاز HHO را در موتور بنزین سوز تک سیلندر ۱۹۷ سی سی مدل هوندا G200 بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که ترکیبی از HHO، هوا و بنزین باعث کاهش غلظت عناصر آلاینده و افزایش بازده موتور می‌شود. تست‌های آلودگی موتور در دوره‌های مختلف انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که اکسیدهای نیتروژن (NOX) با استفاده از مخلوطی از HHO، هوا و سوخت کاهش داشته است. علاوه بر این، غلظت منوکسیدکربن حدود ۲۰٪ کاهش یافته است. همچنین، بین حدود ۲۰ درصد کاهش مصرف سوخت مشاهده شده است.

رامش کومار و همکاران [۷]، در سال ۲۰۱۵، اثر عملکرد سوخت HCNG را بر روی موتور تک سیلندر ۳۰۵ cc با نسبت تراکم ۸:۱ بررسی کردند. در مقایسه عملکرد و میزان انتشار آلودگی موتور در حالت CNG و HCNG مشخص شد میزان انتشار HC، CO و NOX کاهش می‌یابد و مصرف ویژه سوخت در هنگام استفاده از HCNG کاهش می‌یابد. این آزمایش‌ها با اضافه کردن ۴ درصد هیدروژن به گاز طبیعی در دوره‌های ۲۰۰۰ تا ۴۰۰۰ rpm انجام شده است.

اورهان اکانوس و همکاران[۸]، در سال ۲۰۰۷، تحقیقی بر روی اثر مخلوط هیدروژن و متان در موتور چهارسیلندر ۱۷۹۶cc اشتعال جرقه‌ای با نسبت تراکم ۱۰:۱ انجام داده‌اند. مخلوط مورد استفاده از نظر درصد حجم هیدروژن در متان ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ ارائه شده است. آزمایش‌های مختلف با نسبت‌های هم‌ارزی از ۰/۶ تا ۱/۲ انجام شده است. هر سوخت در ۲۰۰۰ دور در دقیقه و شرایط بار ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه نشان می‌دهد که مقادیر انتشار HC، CO و CO₂ کاهش می‌یابد و با افزایش درصد هیدروژن، مقادیر بازده حرارتی ترمز (BTE) افزایش می‌یابد.

پرچایوم و ساراووت[۹]، در سال ۲۰۱۵، رابطه بین میزان اکسیژن موجود در گازهای خروجی و ترکیب اختلاط بین هیدروژن و CNG در HCNG را بررسی کرده‌اند. براساس معادلات تعادل احتراق، از نظر تئوریک، میزان اکسیژن موجود در اگزوز به‌ازای ۵٪ افزودن هیدروژن در شرایط استوکیومتری باید ۷۸٪ افزایش یابد، اما نتایج تجربی نشان داده است مقدار اکسیژن در گازهای اگزوز، به‌ازای افزایش ۵٪ هیدروژن، حدود ۲۳٪ افزایش می‌یابد.

نتایج پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که در اکثر موارد اضافه‌شدن هیدروژن به گاز طبیعی منجر به بهبود عملکرد موتور و کاهش آلودگی می‌شود. در کلیه تحقیقاتی که قبلاً انجام شده، از کپسول آماده استفاده شده است. با توجه به مشکلات زیرساختی سوخت هیدروژن، مانند تولید، ذخیره و توزیع، با وجود اینکه سوخت هیدروژن مزایای زیادی دارد، استفاده از آن در سوخت HCNG فراگیر نشده است. به همین خاطر، در این پژوهش، به‌جای استفاده از کپسول هیدروژن بخشی از توان تولیدشده توسط موتور صرف تولید هیدروژن می‌شود و از همین هیدروژن تولیدشده به‌عنوان مکمل سوخت گاز طبیعی استفاده می‌شود. در این طرح، نرخ تولید هیدروژن توسط دستگاه مولد هیدروژن ثابت است و آزمایش‌های صورت‌گرفته بر روی موتور در حالت حداکثر گشتاور ترمزی انجام شده است. پارامترهای اندازه‌گیری‌شده شامل توان، بازده و آلودگی‌های CO و UHC است. هدف اصلی از این کار پاسخ به این سوال است که آیا افزایش بازده موتور در اثر افزودن هیدروژن در حدی است که بتواند انرژی مصرف‌شده برای تولید هیدروژن را جبران کند؟ در صورتی که نتیجه مثبت باشد، این طرح، به‌دلیل ثابت‌بودن نرخ هیدروژن تولیدی، فقط در موتورهای گازسوزی که با یک دور و گشتاور ثابت کار می‌کنند، مانند موتور ژنراتور برق، مناسب است.

مقدمات آزمون

دستگاه تست موتور مورد استفاده شامل یک موتور بنزینی ساخت شرکت سوپارو ژاپن با مشخصات درج‌شده در جدول ۲ است. طبق اطلاعات کارخانه، نمودار حداکثر گشتاور-دور و حداکثر توان-دور به‌ترتیب در شکل ۱ و ۲ نشان داده شده است [۱۰].

جدول ۲- مشخصات موتور [۱۰]

Table 2- Engine specifications [10]

Make & Model		Subaru & RobinEH36D
Type		Single Cylinder, 4 stroke, air cooled
Fuel		HHO-CNG, CNG and petrol
Compression Ratio		8.3:1
Displacement Volume		404 cm ³
Bore		8.9 cm
Stroke		6.5 cm
Output	Continuous	6.3 kW /3600 r.p.m. / petrol
	Max	8.5 kW /3600 r.p.m. / petrol
Max. Torque		27.4 N.m /2500 r.p.m. / petrol
Ignition System		Flywheel Magneto (Solid State)
Carburetor		Horizontal Draft, Float Type

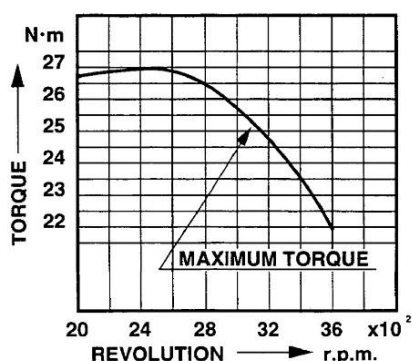


Figure 1-maximum torque per engine speed when using petrol. [10]

شکل ۱- حداکثر گشتاور در هر دور موتور در حالت مصرف سوخت بنزین [۱۰]

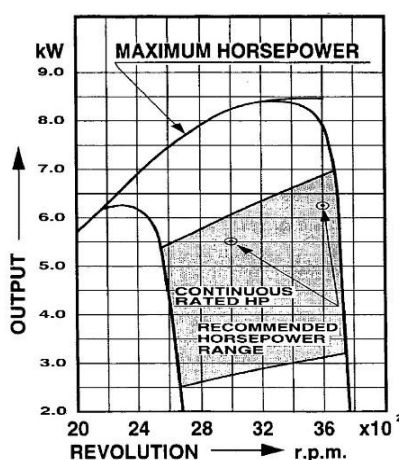


Figure 2- Recommended power range and maximum power when using petrol. [10]

شکل ۲- محدوده کاری مناسب و حداکثر توان خروجی موتور در حالت مصرف سوخت بنزین [۱۰]

در این پژوهش، آزمایش‌های تست آلودگی و توان موتور با سوخت بنزین، سوخت گاز طبیعی و سوخت ترکیبی HHO-CNG انجام شده است. ابتدا موتور پایه بنزین سوز به گازسوز تبدیل شده است. سپس، گاز HHO تولیدشده توسط هیدروراكتور به گاز طبیعی اضافه شده است. برای تبدیل موتور بنزین سوز به گازسوز، از تجهیزات کیت نوع اول CNG استفاده شده است. تجهیزات این کیت شامل رگلاتور، مخلوط‌کننده، مخزن گاز، فشارسنج و غیره است. در مسیر عبور جریان هوا (لوله هوای ورودی به موتور) سوخت گاز طبیعی توسط یک مخلوط‌کننده با هوای ورودی به موتور ترکیب می‌شود. در همین راستا، ابتدا رگلاتور را برای دور آرام (حداقل دور) موتور تنظیم کرده و سپس، با توجه به میزان افت فشار نسبی ایجادشده در مخلوط‌کننده (به دلیل اثر مکش در لوله هوای ورودی موتور) و پیچ تنظیم فشار رگلاتور، میزان ارسال گاز به موتور برای دورهای مختلف تنظیم می‌شود. در این دستگاه، دبی و فشار هوای ورودی به موتور توسط دریچه اوریفیس و مانومتر مورب اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از دبی‌سنج، فشارسنج و رگلاتور CNG (کنترل‌کننده دبی CNG) مقدار سوخت مخلوط‌شده با هوا کنترل و اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن دبی سوخت و دبی هوا و همچنین کاربرد حسگر اکسیژن (لامبدا) نسبت هوا به سوخت تخمین زده می‌شود. نسبت هم‌ارزی به صورت استوکیومتریکی ($\Phi=1$) برای کلیه تست‌های انجام‌شده در نظر گرفته شده است. تجهیزات به کاررفته برای تبدیل موتور بنزین سوز به CNG سوز در شکل ۳ نشان داده شده است. در این پژوهش، تنها تغییری که بر روی ساختار موتور ایجاد شده است تغییر در سیستم سوخت‌رسانی بوده است.

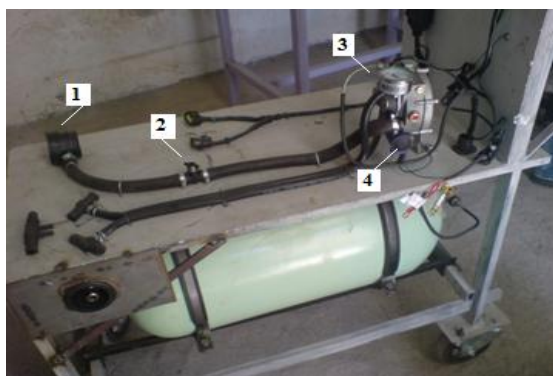


Figure 3- Kite ready CNG. (1- Gas mixer, 2- Adjustable valve, 3- Pressure gauge, 4- pressure and flow regulator)
 شکل ۳- کیت آماده شده CNG (۱- مخلوط کننده گاز، ۲- شیر تنظیم دبی گاز، ۳- گیج فشار گاز و ۴- رگلاتور تنظیم فشار و دبی گاز)

برای اندازه گیری گاز HHO، با توجه به اینکه میزان گاز تولید شده توسط هیدروراکتور ثابت و مقدار آن کم است، یکی از بهترین روش ها برای اندازه گیری حجم گاز تولید شده استفاده از ادیومتر^۱ مطابق شکل ۴ است. با دانستن حجم گاز تولید شده نسبت به زمان در نظر گرفته شده، دبی HHO تولیدی به دست می آید.

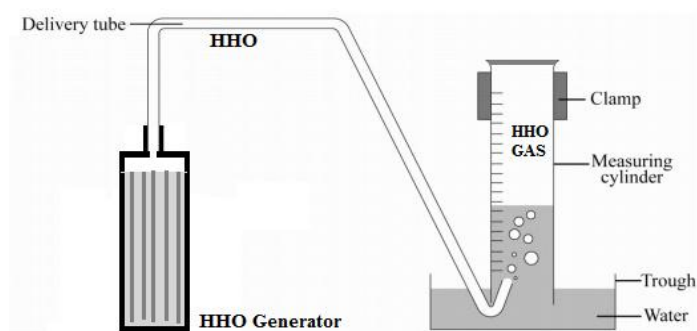


Figure 4- Method of measuring GAS HHO Generator
 شکل ۴- روش اندازه گیری گاز HHO

در شکل ۵، نسبت گاز HHO به گاز CNG برحسب دور موتور مشخص شده است. در تمام آزمون ها، مقدار HHO تولید شده ثابت است و فقط مقدار گاز طبیعی متغیر است. بنابراین، مقدار نسبت گاز HHO به CNG متغیر است. نسبت هیدروژن به اکسیژن موجود در گاز HHO تولید شده از آب به صورت استکیومتری است. حدود ۶۷ درصد این گاز هیدروژن و ۳۳ درصد آن اکسیژن است [۱۴]. ضمن اینکه در تمام تست های انجام شده، نسبت گاز طبیعی به هوا یک در نظر گرفته شده است.

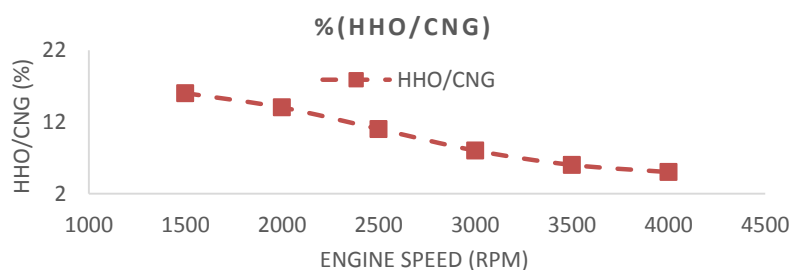


Figure 5- HHO to CNG gas ratio
 شکل ۵- نسبت گاز HHO به گاز CNG

1. Audiometer

در این دستگاه تست موتور، سوخت بنزین از مخزن توسط پمپ وارد یک لوله شفاف مدرج می‌شود. با مشخص شدن حجم سوخت مصرفی بر واحد زمان دبی سوخت مصرفی نیز مشخص می‌شود. برای محاسبه گرمای اتلافی اگزوز از یک مبدل حرارتی پوسته و لوله غیرهمسو استفاده می‌شود. اندازه‌گیری دیجیتالی دماهای مبدل توسط حسگر دما Pt100 در ۴ نقطه ورودی و خروجی دود مبدل و ورودی و خروجی آب مبدل انجام می‌شود. آب درون مبدل قبل از ورود از یک روتامتر تابلویی شیردار عبور می‌کند تا مقدار دبی آب تنظیم و مشخص شود. به منظور اندازه‌گیری دور موتور از حسگر اپتوکوپلر^۱ استفاده شده است. دور موتور اندازه‌گیری شده بر روی پنل به صورت دیجیتالی نمایش داده می‌شود. در هر دو محور خروجی موتور یک عدد دینامومتر الکتریکی برای اندازه‌گیری گشتاور موتور تعبیه شده است. توان خروجی موتور تحت عنوان توان ترمزی به ژنراتور منتقل می‌شود. توان الکتریکی تولیدشده در ژنراتور با روشن شدن مصرف‌کننده (هیترها) مصرف می‌شود. با تغییر توان هیتر، بار بر روی موتور بیشتر شده که باعث تغییر دور و گشتاور موتور می‌شود. میزان بار الکتریکی مصرفی هیتر با استفاده از لودسل کنترل می‌شود. برای تعیین توان مصرفی هیتر، لودسل مجهز به ولوم دیمر^۲ است. با استفاده از دیمر ولتاژ خروجی تنظیم می‌شود. تجهیزات الکتریکی مجهز به ولت‌متر و آمپر‌متر هستند. با دانستن ولتاژ و جریان توان تجهیزات الکتریکی مورد استفاده محاسبه می‌شود. بر روی صفحه نمایش دستگاه تست موتور اطلاعات مربوط به آزمایش از قبیل دور موتور، گشتاور و دماهای آب ورودی و خروجی مبدل، دمای دود ورودی و خروجی مبدل، دمای هوای ورودی به موتور و دبی هوای مصرفی به صورت دیجیتالی قابل مشاهده‌اند.

زمان‌بندی جرقه شمع در تمام تست‌ها، مطابق شکل ۶ در ۲۴ درجه میلنگ قبل از نقطه TDC^۳ ایجاد می‌شود. این زمان‌بندی جرقه به صورت تنظیم کارخانه بوده و در تمام آزمایش‌های انجام‌شده به همین صورت ثابت بوده است. تست‌های انجام‌شده برای دوره‌های مختلف در حالت بار کامل (بیشینه گشتاور) انجام شده است. از ترموکوپل نوع k برای تشخیص دمای کاری موتور استفاده شده است. در زمان داده‌برداری، برای افزایش دقت داده‌ها، مدت زمان مناسبی برای پایدار شدن شرایط دمایی موتور در نظر گرفته می‌شود تا نسبتاً دمای کاری موتور تثبیت شود. دمای آزمایشگاه حدود ۲۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. برای تعیین کیفیت دود خروجی از یک آنالیزور گاز، مدل infraly_tsmart استفاده شده است. این آنالیزور با نمونه‌برداری از مسیر گازهای خروجی موتور، علاوه بر اندازه‌گیری نسبت هوا به سوخت (لامبدا)، میزان منوکسیدکربن، دی‌اکسیدکربن و اکسیژن را برحسب vol% و میزان هیدروکربن‌های نسوخته را برحسب ppm مشخص می‌کند. این مدل از آنالیزور گاز فاقد اندازه‌گیری NO_x است.

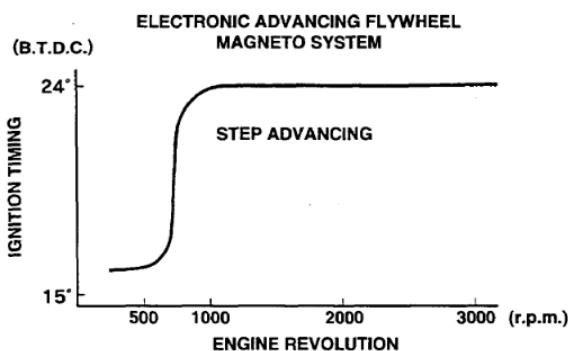


Figure 6- Ignition Timing [10]

شکل ۶- زمان‌بندی جرقه [۱۰]

1. Optocoupler
2. Dimmer Volom
3. Top dead centre

در حال حاضر تعدادی از موتورهای دوگانه‌سوز موجود از نوع تبدیلی‌اند. در این موتورها، به دلیل طراحی اولیه براساس سوخت بنزین، نمی‌توان از سوخت گاز طبیعی به صورت بهینه استفاده کرد. در نتیجه امکان بهره‌گیری از عدد اکتان و ضریب تراکم بالای گاز مقدور نیست. لذا، بدین منظور می‌بایست تغییراتی در ساختار موتور ایجاد شود.

هنگامی که موتور بنزین‌سوز به گازسوز تبدیل می‌شود، توان بیشینه خودرو ممکن است تا ۱۵ درصد کاهش یابد [۱۱]. عوامل مهمی در کاهش این توان نقش دارند. یکی از عوامل کاهش بازده تنفسی موتور چگالی پایین گاز طبیعی نسبت به بنزین است. علاوه بر آن، حذف اثر خنک‌کنندگی تبخیری بنزین در هوای ورودی که باعث کاهش چگالی هوای ورودی به موتور می‌شود نیز منجر به کاهش بازده تنفسی موتور می‌شود. عامل دیگر کاهش توان موتور گازسوز سرعت پایین شعله گاز CNG در محفظه احتراق است که باعث می‌شود در دوره‌های بالای موتور احتراق کاملی صورت نگیرد. به همین علت، باید زمان جرقه را نسبت به حالت بهینه‌ای که برای موتور بنزینی تنظیم شده، پیش انداخت. این پیش‌انداختن زمان جرقه باعث افزایش کار مصرفی در مرحله تراکم می‌شود. در نتیجه، این افزایش آوانس منجر به کاهش بازده موتور می‌شود. مسئله دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد این است که، بنزین معمولاً در موتورهای که نسبت تراکم آن‌ها بین ۸ تا ۱۱ است استفاده می‌شود، اما در موتورهای گازسوز می‌توان این نسبت تراکم را حداکثر تا ۱۳ افزایش داد. این ویژگی گاز طبیعی ناشی از بالابودن عدد اکتان گاز است. از نظر تئوری افزایش نسبت تراکم منجر به افزایش بازده می‌شود، اما در موتورهای پایه بنزین‌سوزی که گازسوز شده‌اند از این خاصیت بالابودن اکتان گاز طبیعی بی‌بهره‌ایم [۱۲، ۱۳].

اساس کار سیستم سوخت‌رسانی این موتور اختلاط سوخت و هوا در یک ونتوری است. جریان سوخت و هوا بر اثر خلاء نسبی منیفولد شکل می‌گیرد. برای سوخت بنزین از ونتوری موجود در کاربراتور و برای سوخت گاز از مخلوط‌کننده استفاده شده است. محل نصب مخلوط‌کننده گاز قبل از کاربراتور است. در مسیر گاز از مخزن تا مخلوط‌کننده مانند بنزین از باک تا کاربراتور، شیر برقی برای قطع و وصل گاز و بنزین تعبیه شده است. در این پژوهش، هیدروژن مکمل گاز طبیعی به روش الکترولیز از آب تولید می‌شود. (HHO) هیدروژن و اکسیژن تولیدشده توسط خلا نسبی، که موتور ایجاد می‌کند، به سیلندر مکش می‌شود. در شکل ۷، مخلوط‌کننده و ورودی‌ها نشان داده شده است.



Figure 7- Mixture Chamber and Engine connections (1- Air inlet, 2- CNG inlet, 3- HHO inlet, 4- Engine air intake valve lever)

شکل ۷- مخلوط‌کننده و اتصال آن به موتور (۱- ورودی هوا، ۲- ورودی CNG و ۳- ورود HHO و ۴- اهرم دریچه هوای ورودی موتور)

در این پروژه، هیدروژن فقط به عنوان مکمل سوخت استفاده می‌شود. بنابراین، مقدار هیدروژن مصرفی به نسبت بسیار کم است. این مقدار کم هیدروژن را می‌توان به روش الکترولیز در خودرو (محل) تولید کرد. با توجه به اینکه هیدروژن تولیدشده در این پروژه از طریق الکترولیز آب به دست می‌آید لازم است که این عمل به بهترین شکل انجام شود. عوامل تاثیرگذار بر بازده شامل، جنس الکترودها، محلول الکترولیت، دما، فشار و هندسه دستگاه مولد هیدروژن (هیدروراکتور) است. با استفاده از روابط

ترمودینامیکی، مشخص شده است که حداقل ولتاژ تئوری برای شروع الکترولیز ۱/۴۸ ولت است، اما در عمل به دلیل مقاومت‌های ناخواسته (ناشی از وجود حباب‌ها در آب، ناخالصی آب و سد تحریک یا انرژی فعال‌سازی) این مقدار پتانسیل افزایش می‌یابد [۱۵،۱۴].

برای بهبود عملکرد تولید هیدروژن به روش الکترولیز اثرات فیزیکی، شیمیایی و الکتریکی سلول بر روی بهره‌وری فرایند الکترولیز مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این کار به منظور به حداقل رساندن اتلاف انرژی الکتریکی انجام شده است. بازده اسمی تولید هیدروژن به روش الکترولیز صنعتی معمول در حدود ۷۰ درصد است. امپدانس الکتریکی یک سلول الکترولیز باعث می‌شود که کسری از انرژی اعمال شده به صورت گرما تلف شود. استفاده از الکترولیت‌های مناسب باعث کمتر شدن مقاومت ظاهری و افزایش طول عمر سلول می‌شود. همچنین، خارج شدن سریع حباب‌ها باعث کاهش مقاومت ظاهری الکترولیت می‌شود. برای سطوح بزرگ افزایش اندک ولتاژ باعث افزایش شدید توان مورد نیاز برای الکترولیز می‌شود. بنابراین، معمولاً ولتاژ سلول را پایین نگه داشته و سطح الکتروود را افزایش می‌دهند [۱۶،۱۴].

در طراحی و ساخت دستگاه هیدروراکتور تأثیر این عوامل لحاظ شده است. برای کاهش مصرف انرژی، سعی بر این بوده که دستگاه ساخته شده دارای بازدهی بالایی باشد و همچنین طراحی این دستگاه به نحوی است که حداقل فضا را اشغال کند. با تغییرات در تعداد صفحات و درصد محلول کاتالیزور هیدروکسید سدیم (NaOH) در آب خالص، عملکرد دستگاه بهبود یافته است. در ادامه، مراحل ساخت دستگاه، هندسه و ابعاد دستگاه، تهیه الکترولیت و نحوه انتقال گاز تولید شده به موتور توضیح داده می‌شود. در این طرح، برق مورد نیاز هیدروراکتور از دینام (آلترناتور) دریافت می‌شود. به همین دلیل در عمل باید دینام یا آلترناتور توانمندتری بر روی موتور نصب شود.

از جمله مواردی که باید مورد توجه قرار گیرد تعداد صفحات، فاصله بین صفحات (الکترودها) و درصد کاتالیزور است، زیرا تلاش بر این بوده که تولید گرمای ناشی از الکترولیز به حداقل برسد. مشخصاً، در این دستگاه، برای انجام الکترولیز به شکل بهینه در هر سلول، به برقی با ولتاژ حدود ۲ ولت نیاز است. اگر ولتاژ اعمالی بیشتر از ۲ ولت باشد، انرژی الکتریکی صرف تولید حرارت می‌شود و به صورت گرما تلف می‌شود. این تولید گرما در نهایت منجر به جوش آمدن آب داخل هیدروراکتور می‌شود. البته، می‌توان با تغییر در رسانایی آب محدوده ولتاژ و جریان عبوری را برای بهبود عملکرد تنظیم کرد [۱۸،۱۷].

دستگاه مولد هیدروژن شکل ۸ ساخته شده از استنلس استیل گرید L-۳۱۶ است. البته، می‌توان از صفحات استیل با آلیاژهای ۳۰۴ یا L-۳۱۶ یا L-۳۱۶ استفاده کرد [۱۹]. خواص آلیاژهای استنلس استیل یاد شده نزدیک به یکدیگرند. در این پژوهش، به دلیل در دسترس بودن و قیمت مناسب‌تر، از آلیاژ L-۳۱۶ استفاده شده است. صفحاتی که قطب مثبت و منفی به آن اتصال داده شده دارای ضخامت ۱/۲ میلی‌متر و صفحات میانی دارای ضخامت ۰/۸ میلی‌متر است. صفحات الکتروود این دستگاه به صورت سری قرار گرفته‌اند و بین الکترودها و اشتر لاستیکی قرار می‌گیرد. تعداد صفحات میانی ۶ عدد است که مجموع ولتاژ اعمال شده به این صفحات دستگاه ۱۲ ولت و جریان عبوری از آن معادل ۸ آمپر است. در این پروژه، از ۴ دستگاه تولید هیدروژن با مشخصات جدول ۳ استفاده شده است. این چهار دستگاه به یک کلکتور متصل‌اند و کلکتور به ونتوری مخلوط‌کننده متصل است. با توجه به مکش موتور در مخلوط‌کننده افت فشار ایجاد می‌شود. در نتیجه هیدروژن تولید شده به داخل مخلوط‌کننده مکش می‌شود. بنابراین، فشار هیدروراکتور از فشار اتمسفر کمتر است و خطر نشت هیدروژن از آن وجود ندارد.

جدول ۳- مشخصات دستگاه مولد HHO

Table 3- Specification of HHO Generator

Width, Height	18 cm, 12 cm
Number of plates	28 - 316 Stainless steel
Number of Stacks	4
Current (A)	8
Voltage (V)	12
Power (W)	384

مجموع توان مصرفی ۴ دستگاه ۳۸۴ وات است که توسط دینام موتور تامین می‌شود. برای سرعت‌بخشیدن به الکترولیز از آب خالص با محلول کاتالیزور هیدروکسید سدیم استفاده شده است. در هر لیتر آب ۱۰ گرم هیدروکسید سدیم حل شده و حجم هر کدام از دستگاه‌ها نیم لیتر است. در مجموع، گنجایش ۲ لیتر آب را دارند. هر دستگاه توان تولید ۰/۰۱۵ لیتر در ثانیه هیدروژن و اکسیژن را دارد. در مجموع، کل تولید هیدروژن و اکسیژن ۰/۰۶ لیتر در ثانیه است.

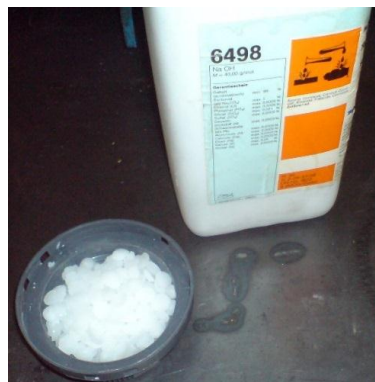


Figure 8- HHO generator
شکل ۸- هیدروژن‌ساز

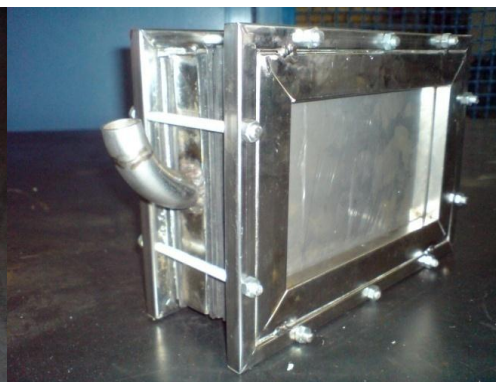


Figure 9- NaOH
شکل ۹- هیدروکسید سدیم

برای تهیه الکترولیت از آب خالص استفاده می‌شود. ماده کاتالیزور مناسب استفاده‌شده هیدروکسید سدیم (NaOH) است، زیرا به نسبت کم‌خطر بوده و خوردگی کمتری دارد (شکل ۹). ۱۰ گرم هیدروکسید سدیم را در یک لیتر آب خالص ریخته (البته می‌توان از هیدروکسید پتاسیم (KOH) نیز استفاده کرد، اما قیمت آن بالاتر است [۱۸]) و برای جلوگیری از یخ‌زدن الکترولیت می‌توان به آن ضدیخ نیز اضافه کرد. طر‌حواره مجموعه تجهیزات و همچنین نحوه ارتباط اجزای به‌کاررفته در این پژوهش در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

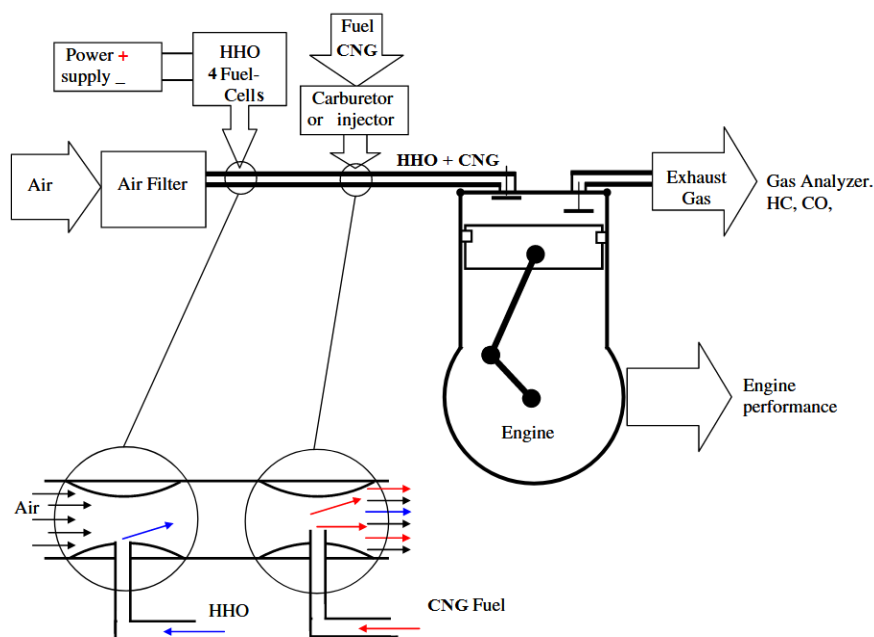


Figure 10- Schematic view of experimental set up
شکل ۱۰- طر‌حواره‌ای از مجموعه اجزای به‌کاررفته

بررسی نتایج

به دلیل اینکه موتور استفاده شده در این آزمایش‌ها پایه بنزین سوز است، شرکت سازنده طراحی موتور را به نحوی انجام داده که بنزین را به صورت بهینه مصرف کند. نسبت تراکم، زمان بندی سوپاپ‌ها، زمان بندی جرقه و دمای کار موتور متناسب با مصرف بنزین طراحی شده است [۱۰]. خواص فیزیکی و شیمیایی گاز طبیعی با بنزین متفاوت است. این تفاوت باعث ضعیف شدن عملکرد موتور با مصرف گاز طبیعی می‌شود [۱۱]. از نظر تئوری در شرایط آرمانی با فرض آبی بودن احتراق جرقه شمع در نقطه TDC انتهای مرحله تراکم ایجاد می‌شود، اما در عمل، به علت زمان بر بودن احتراق، جرقه باید زودتر ایجاد شود (BTDC). با آغاز احتراق، فشار در سیکل تراکم افزایش می‌یابد. این فشار مضاعف یک نیروی مقاوم در مرحله تراکم، مخالف حرکت پیستون ایجاد می‌کند [۲۱، ۲۰]. با توجه به سرعت احتراق پایین گاز طبیعی نسبت به بنزین، برای احتراق کامل سوخت نیاز به افزایش آوانس جرقه در موتور پیدا می‌شود. افزایش آوانس باعث کاهش بازده می‌شود [۲۲]، اما با اضافه شدن HHO خواص احتراق گاز طبیعی بهبود می‌یابد [۲۳]. در نتیجه نیاز به آوانس جرقه کاهش یافته و افزایش توان تولیدی موتور را در پی خواهد داشت [۴]. در شکل ۱۱، تاثیر این تغییرات قابل مشاهده است. دلیل دیگر این افزایش سوخته شدن کامل سوخت به علت افزایش گستره احتراق پذیری سوخت و کمتر شدن فاصله خاموشی شعله است [۷، ۴]، اما با وجود این افزایش بازهم توان موتور نسبت به حالت مصرف بنزین کاهش داشته است. زیرا، هیدروژن و گاز طبیعی چگالی پایینی دارند، در نتیجه جایگزین بخشی از هوای ورودی به داخل سیلندر می‌شوند و بازده تنفسی را کاهش می‌دهند. به عبارتی، با مصرف سوخت گاز هیدروژن و گاز طبیعی، به علت پایین بودن ارزش حرارتی سوخت در واحد حجم، فضای بیشتری از حجم سیلندر را اشغال می‌کنند و این موضوع باعث کاهش بازده تنفسی موتور نسبت به حالت مصرف بنزین می‌شود [۲۴، ۴].

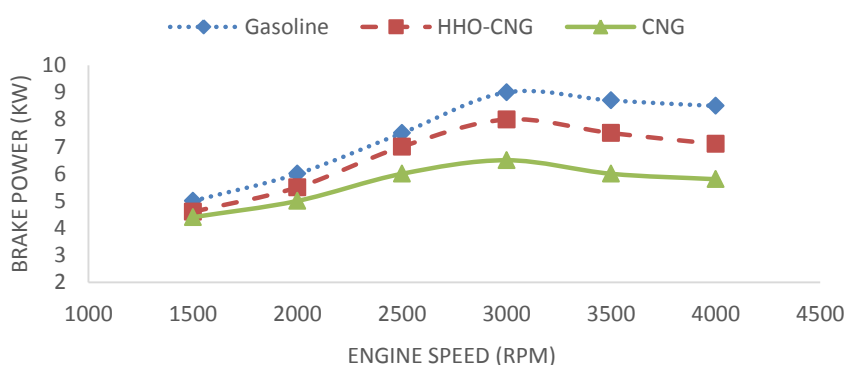


Figure 11- Brake power versus engine speed.

شکل ۱۱- تغییرات توان موتور برای سوخت‌های استفاده شده

با توجه به شکل ۱۲ نتیجه آزمایش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از سوخت گاز طبیعی در این موتور پایه بنزین سوز باعث پایین آمدن بازده می‌شود. یکی از دلایل افت بازده این است که برای احتراق کامل گاز طبیعی نیاز است زمان جرقه بیش از پیش آوانس شود [۲۴]، اما در این پژوهش زمان ایجاد جرقه ثابت در نظر گرفته شده است، چراکه هدف این است با اضافه کردن گاز HHO این نیاز به افزایش آوانس برطرف شود. زیرا، این پیش‌انداختن جرقه از نظر تئوری منجر به افزایش کار منفی چرخه در مرحله تراکم می‌شود [۲۰]. با توجه به نمودارها مشخص شده که با اضافه کردن HHO به هوای ورودی بازده حرارتی بهبود یافته است، اما بازهم این مقدار بهبود نتوانست بازدهی را به حالتی برساند که سوخت موتور بنزین است. به سه دلیل بازده حرارتی HHO-CNG نسبت به CNG افزایش داشته است:

- احتراق کامل سوخت قبل از باز شدن سوپاپ خروجی، به علت افزایش سرعت شعله، افزایش گستره احتراق پذیری و کمتر شدن فاصله خاموشی. در واقع، نفوذ شعله در داخل حجم سیلندر به علت وجود هیدروژن افزایش می یابد [۲۷،۴].
- کاهش نیاز به آوانس (پیش انداختن) جرقه در حالت سوخت HHO-CNG نسبت به سوخت CNG به علت سرعت بیشتر شعله، به دلیل وجود هیدروژن و تاثیر مثبت آن بر سینتیک احتراق است [۴].
- حضور اکسیژن ناشی از الکترولیز. واضح است افزایش درصد اکسیژن هوای ورودی موتور به بهبود فرایند احتراق کمک می کند [۲۵].

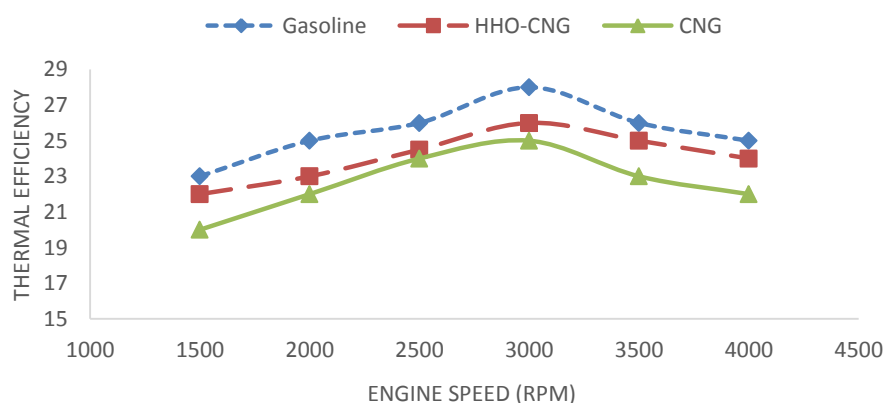


Figure 12- Thermal Efficiency
شکل ۱۲- بازده حرارتی بر حسب سرعت

علاوه بر اینکه گاز هیدروژن موجود در HHO باعث افزایش سرعت احتراق و افزایش گستره احتراق پذیری می شود، مزیت دیگر الکترولیز تولید اکسیژن است، زیرا اکسیژن باعث افزایش بازده تنفسی موتور می شود [۱۷،۱۶]. این تغییرات در سنتیک احتراق منجر به تکمیل احتراق و کاهش منوکسید کربن می شود. زیرا، مولکول های کربن و منوکسید کربن با این شرایط سینتیکی یاد شده شانس بیشتری دارند که با مولکول اکسیژن و یا اتم اکسیژن واکنش داشته باشند [۱۷]. اثر مثبت اضافه شدن هیدروژن و اکسیژن (HHO) در CNG بر کاهش منوکسید کربن ناشی از احتراق در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. به طور منطقی کربن موجود در سوخت CNG در انتهای احتراق با احتمال بیشتری به دی اکسید کربن تبدیل می شود و شرایط برای ایجاد منوکسید کربن کاهش می یابد. همچنین، فرایند واکنش منوکسید کربن با اکسیژن و تبدیل آن به دی اکسید کربن با آزاد سازی انرژی حرارتی همراه است [۲۵].

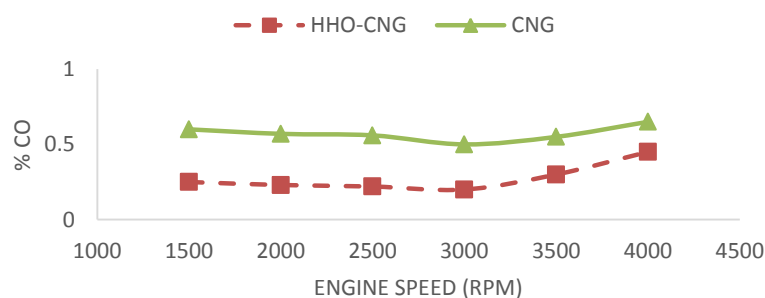


Figure 13- Percentag volume Variation of carbon monoxide (CO) emissions with engine speed
شکل ۱۳- تغییرات آلاینده منواکسید کربن بر حسب درصد حجمی به دور موتور

با توجه به اینکه یکی از اهداف این پژوهش حذف افزایش آوانس جرقه موتور در حالت گازسوز نسبت به حالت بنزین سوز بوده است، زمان بندی جرقه شمع در حالت گازسوز همان زمان بندی جرقه در حالت مصرف سوخت بنزین در نظر گرفته شده است. با این کار، به دلیل اینکه زمان بندی جرقه مناسب مصرف سوخت گاز طبیعی نبوده است، عملکرد موتور ضعیف می شود. در این حالت میزان کاهش توان و بازده به نسبت زیاد بوده و اثر مصرف گاز طبیعی بر کاهش میزان آلودگی در حد انتظار نبوده است، اما با افزودن هیدروژن مشکلات ناشی از عدم افزایش آوانس برطرف شده است. به عبارتی، با افزودن هیدروژن می توان ضعف های ناشی از عدم افزایش آوانس برای سوخت گاز طبیعی را برطرف کرد.

مشخص شده که با اضافه شدن هیدروژن و اکسیژن تولید شده توسط الکترولیز سرعت و دمای شعله داخل محفظه احتراق افزایش می یابد. در نتیجه شعله در دورهای بالای موتور به سرعت در کل محفظه احتراق گسترش می یابد. با این اتفاق احتمال اینکه هیدروکربن نسوخته از موتور خارج شود کمتر می شود. با توجه به اینکه HHO-CNG فاصله خاموشی کوچکتری دارد، با کمتر شدن فاصله خاموشی شعله، شعله می تواند به دیواره های سیلندر، پیستون و سرسیلندر بیشتر از پیش نزدیک تر شود و این موضوع باعث نفوذ بیشتر شعله در کل حجم داخل سیلندر می شود. ضمن اینکه هیدروژن باعث افزایش گستره احتراق پذیری سوخت می شود و این یعنی احتمال خاموشی شعله کمتر می شود. در نتیجه منوکسیدکربن و هیدروکربن های نسوخته دود خروجی کاهش می یابد و احتراق کاملتری ایجاد می شود [۹،۷،۴]. از مقایسه نمودارهای شکل ۱۴ این موضوع قابل درک است. به واسطه همین احتراق کامل سوخت است که توان و بازده افزایش می یابد و مصرف سوخت نیز کاهش می یابد.

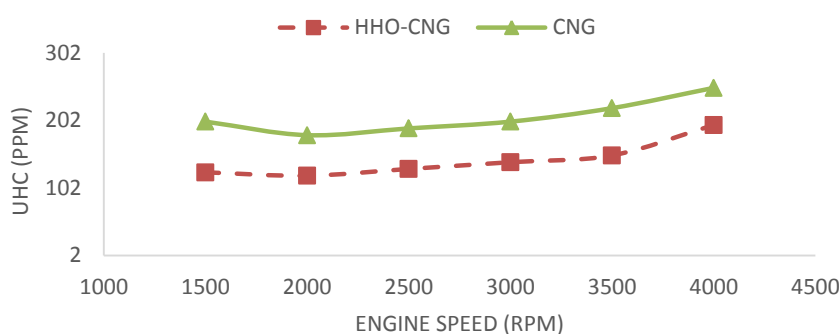


Figure 14- Variation of hydrocarbon (UHC) emissions with engine speed

شکل ۱۴- تغییرات آلاینده هیدروکربن های نسوخته بر حسب دور موتور

برتری استفاده از الکترولیز برای تامین هیدروژن نسبت به ذخیره شده این است که نیاز به مخزن و سیستم سوخت رسانی مخصوص به هیدروژن برطرف می شود. مزیت استفاده از الکترولیز آب تولید هم زمان اکسیژن است که به افزایش بازده تنفسی موتور کمک می کند. برتری دیگر این سیستم این است که تمام هیدروژن تولید شده توسط موتور مصرف می شود. به عبارتی، هیدروژن فوراً از تولید به مصرف می رسد (On Board). این نوع فرایند تولید و مصرف باعث بالا رفتن ایمنی سیستم می شود [۲۶].

با توجه به اینکه در حالت مصرف سوخت CNG حداکثر گشتاور ترمزی دریافتی از موتور در حالت بار کامل (باز بودن کامل دریچه هوای ورودی به موتور) ۲۳ Nm در دور ۳۰۰۰ rpm شده است، مشخص شد که توان موتور نسبت به حالت مصرف بنزین ۱۲ درصد کاهش یافته است. با ثابت نگه داشتن این بیشینه گشتاور در حالت مصرف سوخت گاز CNG، گاز HHO تولید شده به مقدار ۰/۰۶ لیتر در ثانیه به هوای ورودی موتور اضافه می شود. این مقدار HHO ۵ درصد از کل سوخت را تشکیل می دهد. در این شرایط دور موتور به ۳۳۰۰ rpm رسید. توان الکتریکی مصرف شده برای تولید گاز HHO توسط هیدروراکتور ۳۸۴ وات است که منجر به افزایش توان موتور از ۷/۳ کیلووات در حالت مصرف CNG به ۷/۹ کیلووات در حالت مصرف HHO-CNG شد. یعنی توان موتور در حالت بیشینه گشتاور، با اضافه شدن گاز هیدروژن و اکسیژن، ۶۰۰ وات افزایش یافته که

۳۸۴ وات آن صرف تولید هیدروژن و اکسیژن می‌شود. در نتیجه توان موتور در حالت مصرف سوخت (HHO-CNG) نسبت به حالت مصرف CNG ۸ درصد افزایش داشته است که ۵ درصد از این مقدار صرف تولید گاز HHO شده و تنها ۳ درصد به توان خالص خروجی افزوده شده است. در این شرایط کاری موتور، بازده حرارتی از ۲۲ درصد به ۲۵ درصد رسید. به عبارتی ۳ درصد افزایش بازده حرارتی ایجاد شده است. در این وضعیت آلودگی منوکسید کربن ۴۰ درصد کاهش داشته است و همچنین مقدار هیدروکربن‌های نسوخته نیز ۳۰ درصد کاهش یافته است. این تغییرات در جدول ۴ قابل مشاهده است. مقدار کاهش آلودگی بزرگ به نظر می‌رسد. این تغییرات چشمگیر به علت عدم افزایش آوانس موتور در حالت مصرف گاز طبیعی به وجود آمده است. واضح است که مقدار آلودگی‌ها در چنین شرایطی (عدم افزایش آوانس) بیشتر از حالتی است که زمان‌بندی جرقه شمع بهینه شده است. بنابراین، افزودن گاز HHO در چنین شرایطی بهبود قابل توجهی را به همراه خواهد داشت. در نتیجه استفاده از گاز HHO به عنوان مکمل سوخت گاز طبیعی می‌تواند جایگزین افزایش آوانس زمان جرقه شمع باشد.

جدول ۴- اثر سوخت HHO-CNG بر عملکرد موتور در گشتاور ۲۳ Nm
Table 4- The effect (HHO-CNG) fuel on engine performance at 23Nm torque

Fuel	Engine speed	Output power	Thermal efficiency	UHC	CO
CNG	3000rpm	7.3 KW	%22	200 ppm	%5
HHO + CNG	3300rpm	7.9 KW	%25	140 ppm	%3

نتیجه‌گیری

استفاده از سوخت گاز طبیعی در یک موتور پایه بنزین‌سوز منجر به افت توان موتور می‌شود. برای برطرف کردن این افت توان، به هوای ورودی موتور هیدروژن و اکسیژن اضافه شده است. این هیدروژن و اکسیژن، که از طریق الکترولیز آب به دست آمده، به عنوان مکمل سوخت گاز طبیعی استفاده شده است. اثر این سوخت ترکیبی بر عملکرد موتور مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمده است:

- با مصرف سوخت CNG حداکثر توان دریافتی از موتور در حالت بار کامل (بازبودن کامل دریچه هوای ورودی به موتور) نسبت به حالت مصرف بنزین ۱۲ درصد کاهش یافته است. در این شرایط کاری موتور، با اضافه شدن گاز HHO به میزان ۵ درصد از سوخت HHO-CNG توان ۸ درصد نسبت به حالت فقط CNG افزایش داشته است. ۵ درصد از این ۸ درصد افزایش توان موتور صرف تولید گاز هیدروژن و اکسیژن شده است و در نهایت ۳ درصد افزایش توان خالص خروجی را ایجاد کرده است. در این حالت، میزان CO ۴۰ درصد کاهش داشته و مقدار UHC نیز ۳۰ درصد کاهش یافته است و همچنین بازده حرارتی موتور به میزان ۳ درصد افزایش داشته است.
- در این تحقیق مشخص شد مزایای سوخت HHO-CNG، که شامل افزایش سرعت شعله، افزایش گستره احتراق پذیری، کاهش فاصله خاموشی و کاهش حداقل انرژی مورد نیاز برای ایجاد احتراق در هوا است، نیاز به افزایش آوانس جرقه را رفع می‌کند و کاهش میزان CO و UHC دود خروجی را نیز در پی خواهد داشت. کاهش این دو به معنی احتراق کامل است. لذا، انرژی بیشتری از سوخت دریافت می‌شود و به افزایش بازده احتراق می‌انجامد.
- در نهایت مشخص شد که مقدار افزایش بازده موتور در حدی است که می‌تواند صرف شده برای تولید گاز HHO را جبران کند. بنابراین، ساخت دستگاه هیدروراکتور برای موتورهای گازسوز به‌ویژه موتورهای که با یک دور و گشتاور ثابت کار می‌کنند، مانند موتور ژنراتور برق، مناسب است.

منابع

1. M. Zhiani, J. Rezaei and S. Kamali, "Preparation and evaluation of hydrogen electrode based on nickel nanoparticles on the graphene in water electrolysis," *Scientific Research Journal of Fuel and Combustion*, 11, 3, 2018, pp. 19-28. (in Persian)

2. F. Ma and R. Kumar Mehra, "Study of Quasi-Dimensional Combustion Model of Hydrogen-Enriched Compressed Natural Gas (HCNG) Engines," *Sustainable Energy-Technological Issues, Applications and Case Studies*, World's largest Science, Technology & Medicine Open Access book publisher, December 2016.
3. F. Yan, L. Xu and Y. Wang, "Application of hydrogen enriched natural gas in spark ignition IC engines: from fundamental fuel properties to engine performances and emissions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, Part 1, 2018, pp. 1457-1488.
4. M. R. Dahake, S. D. Patil and S. E. Patil, "Effect of Hydroxy Gas Addition on Performance and Emissions of Diesel Engine," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 3, Issue 1, 2016, pp. 756-760.
5. H. Turan, M. Kaan and K. Aydin, "Effect of using Hydroxy – CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel," *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, No. 19, 2016, pp. 8354-8363.
6. S. A. Musmar and A. A. Al-Rousan, "Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines," *Fuel*, 90, Issue 10, 2011, pp. 3066-3070.
7. A. Sonthalia, C. Rameshkumar, U. Sharma, A. Punganur and S. Abbas, "Combustion and performance characteristics of a small spark ignition engine fuelled with HCNG," *Journal of Engineering Science and Technology*, 10, No. 4, 2015, pp. 404-419.
8. S. Orhan Akansu, N. Kahraman and B. Çeper, "Experimental study on a spark ignition engine fueled by methane–hydrogen mixtures," *International Journal of Hydrogen Energy*, 32, 2007, pp. 4279-4284.
9. P. Yaom and S. Watechagit, "Relationship between the variations of hydrogen in HCNG fuel and the oxygen in exhausted gas," *KKU Engineering Journal*, 42, No. 3, 2015, pp. 263-268.
10. Subaru/Robin, Model Eh36, Parts Catalog Website, <http://www.subarupower-global.com>, Accessed 2020.4.30.
11. M. Gupta, S. R. Bell and S. T. Tillman, "An Investigation of Lean Combustion in a Natural Gas-Fueled Spark Ignited Engine," *Journal of Energy Resource Technology*, 118, 1996, pp. 145-165.
12. S. Orhan Akansu, Z. Dulger, N. Kahraman and T. Nejat Veziroglu, "Internal combustion engines fueled by natural gas hydrogen mixtures" *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 2004, pp. 1527-1539.
13. G. T. Chala, Abd R. Abd Aziz and F. Y. Hagos, "Natural Gas Engine Technologies: Challenges and Energy Sustainability Issue," *Energies*, 11, 2934, 2018, doi: 10.3390/en11112934.
14. Tamer Nabil, "Efficient Use of Oxy-hydrogen Gas (HHO) in Vehicle Engines," *International Information and Engineering Technology Association*, 1, 2019, pp. 87-96.
15. S. Shingane, C. H. Dorababu, P. Santosh Kumar, P. L. N. Naidu, K. R. V. Subramanian And T. Nageswara Rao, "The electrolysis of water to generate hydrogen (hho) and a study of the effect of addition of hho to gasoline as an engine," *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 8, Special Issue 8, 2018, pp. 181-186.
16. B. Sudarmanta, S. Darsopuspito and D. Sungkono, "Application of dry cell hho gas generator with pulse width modulation on sinjai spark ignition engine performance," *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*, 5, Issue 2, 2016, pp. 105-112.
17. S. Pamford Kojo Essuman, A. Nyamful, V. Yao Agbodemetegbe and S. Kofi Debrah, "Effect of hho gas as fuel additive on the exhaust emissions of internal combustion engine," *International Journal of Advanced Scientific Research and Development*, 6, Issue 3, Version I, 2019, pp. 01–12.
18. Basori, "Experimental investigation on dry cell hho generator with catalyst variation for reducing the emissions," *Journal of Mechanical Engineering and Vocational Education (JoMEVE)*, 1, No. 1, 2018, pp. 105-112.
19. Sa'ed A. Musmar and Ammar A. Al-Rousan, "Effect of HHO gas on combustion emissions in gasoline engines," *Fuel*, 90, No. 10, 2011, pp. 3066-3070.
20. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals," Chapter 5, Tata McGraw-Hill Education, 2011.
21. H. H. Geok, T. I. Mohamad, S. Abdullah, Y. Ali and A. Shamsudeen, "Experimental Investigation of Performance and Emissions of a Sequential Port Injection Compressed Natural Gas Converted Engine," *European Journal of Scientific Research*, 30, No. 2, 2009, pp. 204-214.
22. M. A. Kalam and H. H. Masjuki, "An experimental investigation of high performance natural gas engine with direct injection," *Energy*, 36, 2011, pp. 3563-3571.
23. R. Kenanoğlu, M. Kaan Baltacıoğlu and E. Baltacıoğlu, "Numerical Comparison of HHO and HHOCNG Fuel Performance Analysis with Pilot Diesel Injection," *Advanced Engineering Forum*, 18, 2016, pp. 58-65.
24. R. Ebrahimi and S. Besharati, "An Experimental Comparison of Spark Ignition Engine with Gasoline and Natural Gas Fuels," *Scientific Research Journal of Fuel and Combustion*, 3, No. 1, 2010, pp. 75-85. (in Persian)
25. D. E. Winterbone, A. Turan, "Advanced Thermodynamics for Engineers," Butterworth-Heinemann, edition 2, 2015.
26. P. Polverino, F. D'Aniello, I. Arsie and C. Pianese, "Investigation of the energy requirements for the on-board generation of oxy-hydrogen on vehicles," *Energy Procedia*, 148, 2018, pp. 962-96.
27. S. Lee, C. Kim, Y. Choi, G. Lim and Ch. Park, "Emissions and fuel consumption characteristics of an HCNG-fueled heavy-duty engine at idle," *international journal of hydrogen energy*, 39, 2014, pp. 8078-8086.

English Abstract

Experimental Investigation of Fuel Effects (HHO-CNG) on Gasoline-Based Engine Performance

Samad Jafarmadar^{1*}, Poria majidi²

1- Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, s.jafarmadar@urmia.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, p.majidi@urmia.ac.ir

*Corresponding author

(Received: 2020.04.24, Received in revised form: 2020.05.26, Accepted: 2020.06.21)

In piston engines, as the engine speed increases, the combustion cycle time decreases. Reducing the engine combustion cycle time, the opportunity for complete fuel combustion is reduced. As a result, in order to complete the fuel combustion, at high engine speeds, the spark plug must ignite sooner. Now that the natural gas flame is slower than gasoline, this problem is becoming more noticeable. As a result, the spark ignition timing should be increased further in CNG fuel mode than in the case of gasoline combustion. This leads to an increase in negative work during the compression phase, resulting in reduced cycle efficiency. Researchers have suggested adding hydrogen to improve natural gas combustion (HCNG). By adding hydrogen, the flammability properties of natural gas are improved. In this study, using Hydrogen generator, hydrogen and oxygen (HHO) gas is produced and consumed water by electrolysis method. The gas (HHO) produced together with the gas (CNG) is combined with the air entering the engine. Then the effect of gas (HHO-CNG) on the parameters of efficiency, power and pollution has been investigated. The results show that the thermal efficiency increases with the addition of HHO. Under these conditions, CO and UHC levels have decreased. This reduces contamination and increases efficiency due to reduced need for spark plug advance and complete fuel combustion.

Keywords: CNG, HHO, compression, engine, contamination