بررسی تجربی اثر تغییرات نسبت هوای اضافی برای دستیابی به عملکرد بهینه در موتور اشتعال - جرقه‌ای با سوخت هایتن[1]

فتح ا... امی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس
f_ommi@modares.ac.ir

آزاد مشیری
کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس
moshiri.azad@gmail.com

احمد شفیعی ثابت
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو
a_shafiei@ip-co.com

*نویسندهٔ مسوول/ پذیرش اولیهٔ مقاله: ۱۳۸۷/۱۲/۱٤ پذیرش نهایی مقاله:۱۳۸۸/۱۰/۰۵
شمارهٔ مقاله: ۸۷۱۲۹

چکیده

این پژوهش با هدف مقایسهٔ عملکرد گاز طبیعی فشرده و ترکیب این گاز با هیدروژن (هایتن[2]) در موتور احتراق داخلی اشتعال جرقه‌ای انجام شده است. در این تحقیق سه نوع سوخت مختلف شامل گاز طبیعی فشردهٔ خالص، هایتن با ۱۵٪ هیدروژن و هایتن با ۳۰٪ هیدروژن استفاده شده است. آزمون‌ها در دو حالت بار کامل و بار جزیی انجام شد. آزمون بار کامل در سرعت‌های مختلف موتور و آزمون بار جزیی تنها در سرعت‌های ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه و از ۲ بار تا تمام بار با گام ۱ انجام شد. در هر آزمون زمان‌بندی جرقه با توجه به بیشترین فشار متوسط مؤثر اندیکاتوری[3] تعیین شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که با افزایش میزان هیدروژن در هایتن، بازده تنفسی، توان و گشتاور موتور کاهش می‌یابد و وجود هیدروژن در مخلوط، باعث کاهش آلاینده‌های منوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود، ولی میزان اکسیدهای نیتروژن افزایش‌می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: هایتن، هیدروژن، گاز طبیعی فشرده، آلاینده‌ها، مصرف سوخت، فشار مؤثر متوسط داخلی (اندیکاتوری)

۱- مقدمه

■ در سال‌های اخیر موضوع مصرف سوخت و کاهش آلاینده‌ها بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است. از طرفی سوخت‌های سنگواره‌ای روزی به پایان می‌رسند و از طرف دیگر استفاده از بنزین، آلایندگی بسیار در پی دارد. با هدف یافتن منابع انرژی جایگزین برای بنزین در موتورهای احتراق داخلی، در کنار استفاده از فناوری‌هایی مانند قوه سوختی و موتورهای دورگه ، تحقیقاتی نیز در زمینهٔ بهینه کردن مصرف سوخت‌های سنگواره‌ای انجام می‌شود.

سال‌هاست که از گاز طبیعی به عنوان سوختی مناسب برای جایگزینی بنزین و دیگر سوخت‌های متداول، استفاده می‌شود، زیرا آلایندگی کمتری دارد و در منابع زیرزمینی فراوان یافت می‌شود. موتورهایی که از سوخت گاز طبیعی استفاده می‌کنند، آلاینده‌های مونوکسیدکربن، هیدروکربن‌های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن کمتری تولید می‌کنند [۱]. مادهٔ اصلی تشکیل‌دهندهٔ گاز طبیعی، گاز متان (از ۸۰٪ تا ۹۵٪ حجم کل) است که سبک‌ترین و ساده‌ترین هیدروکربن در طبیعت است. علاوه بر متان، گاز طبیعی شامل گازهایی مانند اتان (۲٪ تا ۸٪)، پروپان (۱٪ تا ۲٪) بوتان و هیدروکربن‌های سنگین (۰٪تا ۴٪) و گازهایی مانند دی‌اکسیدکربن، نیتروژن، آب و سولفید هیدروژن نیز است [۲].

هیدروژن به‌تنهایی منبع انرژی مناسبی است، ولی به دلایلی مانند مشکلات تهیه، حمل و نقل و نیاز به مخزن سوخت بزرگ سوار بر وسیلهٔ نقلیه، تاکنون به عنوان سوخت خالص از آن استفاده نشده است. مقایسهٔ خواص گاز طبیعی با هیدروژن، نشان می‌دهد که:

۱. چگالی هیدروژن نسبت به گاز طبیعی کمتر است.

1- Hythane
2- Hythane - HCNG, the mixture of CNG and Hydrogen that is named Hythane.
3- Indicated Mean Effective Pressure, IMEP
4- Hybrid

۲. هیدروژن فاصلهٔ خاموشی[1] بسیار کمتری نسبت به گاز طبیعی دارد. این ویژگی به حدی است که ممکن است شعله از فاصلهٔ بین دریچه و بستار[2] و یا از بین حلقه‌های سمبه[3] نیز عبورکند.

۳. هیدروژن محدودهٔ اشتعال بسیار گسترده‌تری نسبت به متان (حدود ۶ برابر آن) دارد. این ویژگی به هیدروژن امکان می‌دهد که هم در مخلوط‌های بسیار غنی و هم در مخلوط‌های بسیار رقیق بسوزد.

۴. انرژی شعله‌وری هیدروژن بسیار کمتر از متان و در حدود ۲۰ برابر کمتر از آن است.

۵. دمای اشتعال خودبه‌خودی هیدروژن نسبت به گاز طبیعی بسیار گرمتر است.

۶. هیدروژن بسیار سریع‌تر از سوخت‌های دیگر و در حدود ۸ برابر سریع‌تر از متان می‌سوزد.

۷. ارزش حرارتی پایین[4] هیدروژن در واحد جرم kJ/kg ۱۱۹۹۳۰ است که حدود ۳ برابر متان و بنزین است، ولی مقدار آن در واحد حجم از متان و بنزین کمتر است. در جدول ۱، مقادیر مشخصه‌های مهم این دو با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۱ مشخصات گاز طبیعی و هیدروژن [۲]

	هیدروژن	گاز طبیعی
ارزش حرارتی پایین جرمی (kJ/kg)	۱۱۹۹۳۰	۵۰۰۲۰
چگالی گاز در دما و فشار استاندارد (kg/m^3)	۰/۰۸۳۷۶۴	۰/۶۵۱۱۹
ارزش حرارتی پایین حجمی (kJ/m^3)	۱۰۰۴۶	۳۲۵۷۳
نسبت هوا به سوخت درست (استوکیومتریک)	۳۴/۲۰	۱۷/۱۹
سرعت احتراق در شرایط هوای عادی (cm/s)	۳۲۵-۲۶۵	۴۵-۳۷
انرژی حرارتی که از شعله به محیط می‌تابد (٪)	۲۵-۱۷	۳۳-۲۳
فاصلهٔ خاموشی در شرایط هوای عادی (cm)	۰/۰۶۴	۰/۲۰۳
دمای شعله در هوا (K)	۲۳۱۸	۲۱۴۸

از اوایل دههٔ ۱۹۹۰ میلادی نظریهٔ استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت مکمل در کنار بنزین یا گاز طبیعی مطرح شد و تحقیقاتی نیز در این زمینه در آمریکا، کانادا، چین، ایتالیا و ترکیه انجام شده است. به مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی فشرده اصطلاحاً هایتن اتلاق می‌شود.

در تحقیقی که فارست[5] و باور[6] در سال ۲۰۰۰ انجام دادند، موتور تحقیقاتی CFR تک‌استوانه‌ای[7] برای آزمایش به کار رفت [۱]. مخلوط سوخت با درصدهای حجمی هیدروژن ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ از مخازن تحت فشار ۱۸ مگاپاسکال به موتور فرستاده شد. هر سوخت در سرعت‌های ۷۰۰ و ۹۰۰ دور در دقیقه در هر دو حالت بار کامل و بار جزیی آزمایش شد. آزمون نشان داد که افزودن هیدروژن مقدار پیشی[8] جرقه را برای رسیدن به گشتاور بهینه، کاهش داد. همچنین باعث کاهش توان در اثر کم شدن ارزش حرارتی حجمی شد. در عین حال، آزمون آن‌ها در مورد بازده حرارتی نتیجهٔ غیرمعمولی نشان داد: با افزودن هیدروژن بازده حرارتی افت پیداکرد.

فانهوا[9] و وانگ[10] تحقیقی تجربی با هدف بررسی تأثیر افزودن هیدروژن بر تغییرات چرخه به چرخه در موتور تک‌افشانه‌ای[11] شش استوانه‌ای انجام دادند [۳]. نتایج نشان‌داد که هم ضریب تغییرات فشار مؤثر متوسط محاسباتی و هم ضریب تغییرات فشار بیشینهٔ داخل استوانه در اثر افزودن هیدروژن کاهش می‌یابند. این تأثیر مثبت، زمانی بیشتر آشکار می‌شود که مخلوط سوخت و هوا رقیق شود. تغییرات مدت زمان احتراق چرخه به چرخه نیز کاهش یافت که نشان‌دهندهٔ پایداری بیشتر شعله است. همچنین نشان داده شد که هیدروژن، افزونه‌ای مناسب برای پایش[12] آلاینده‌های اکسید نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته است.

جیم والاس[13] و الکساندرا کاتلن[14] در سال ۱۹۹۵ آزمونی تجربی با استفاده از گاز طبیعی و هایتن روی موتور شورولت لومینای شش استوانه انجام دادند [۴]. حجم مخلوط هایتن استفاده شده ۱۵٪ هیدروژن داشت. در این آزمون برای مقایسهٔ گاز طبیعی و هایتن متغیرهایی مانند سرعت موتور، بار موتور، غنا و زمان جرقه یک بار برای گاز طبیعی و یک بار برای هایتن با ۲۰٪ هیدروژن در مد نظر قرار گرفتند. هر دو سوخت در محدودهٔ نسبت‌های تعادلی ۱/۰۰ تا ۱/۰۳ آزمایش شد تا اثر تغییرات غنا بر بازدهٔ موتور و آلاینده‌ها مشاهده شود. نتایج آزمون نشان داد که مصرف ویژه سوخت در استفاده از هایتن کاهش می‌یابد. آلایندهٔ هیدروکربن‌های نسوخته برای سوخت گاز طبیعی کمتر از هایتن بود، ولی در مورد اکسیدهای نیتروژن نتیجهٔ عکس داشت.

در آزمایشی که در سال ۲۰۰۷ در دانشگاه تیسینگهووا[15] فانهوواما و هایکووان لیمو[16] در چین انجام دادند، از موتور ۶ استوانه‌ای پاشش مستقیم دیزلی به‌کار رفته در اتوبوس شهری استفاده شد [۵]. در این آزمایش برای تهیهٔ مخلوط هیدروژن و متان به شیوه‌ای متفاوت با تحقیقات دیگر عمل شد، یعنی به جای استفاده از مخلوط از پیش آماده‌شدهٔ هایتن، گاز طبیعی و هیدروژن در مرحلهٔ پاشش و پیش از ورود به محفظهٔ احتراق با هم مخلوط می‌شدند. استفاده از این شیوه، تغییر درصد اختلاط دو سوخت را آسان‌تر می‌کند. نتایج نشان داد حد رقیق‌شدن سوخت با هیدروژن گسترش می‌یابد که به دلیل قابلیت رقیق‌سوزی هیدروژن است. اختلاط ۱۰٪، ۳۰٪ و ۵۰٪ هیدروژن، نسبت هوای اضافی را به ترتیب تا ۱/۸۲، ۲/۰۹ و ۲/۴ گسترش داد درحالی‌که این مقدار برای گاز طبیعی خالص ۱/۷۱ بود. همچنین در این آزمایش تأثیرات افزودن هیدروژن بر پیشی[17] جرقه بررسی شد. در این تحقیق تأثیرات رقیق‌سوزی و تأخیر در جرقه‌زنی حاصل از افزودن هیدروژن بر روی بازده حرارتی، آلاینده‌ها و مصرف سوخت مطالعه شد که نشان می‌دهد استفاده از هایتن آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته را کاهش می‌دهد.

تفاوت و اهمیتی که این تحقیق با تحقیقات مشابه دارد این است که در این تحقیق تمام سرعت‌ها در بار کامل و تمام بارهای موتور در دو سرعتی که متداول‌ترند، آزمایش شده‌اند تا الگویی کامل از تأثیر هیدروژن به دست آید. در تحقیقات گذشته معمولاً موتور در دور یا بار خاص آزمایش می‌شد.

۲- مقدمات آزمون

آزمون‌ها برای سه نوع سوخت شامل گاز طبیعی خالص، مخلوط هایتن[18] با ۱۵٪ هیدروژن و هایتن با ۳۰٪ هیدروژن در نظر گرفته شد. این درصدها حجمی است. از یک مخزن ۲۸۰ لیتری با فشار بیشینهٔ ۱۵۰ بار برای تأمین مخلوط استفاده شد که برای تهیهٔ دقیق مخلوط مورد نظر، محاسبات ترمودینامیکی گاز کامل و الگوی دالتون [۷] مخلوط گازها استفاده شد.

فشار جزیی هر یک از مؤلفه‌ها برای مخلوط‌ها با ۱۵٪ هیدروژن و ۳۰٪ هیدروژن بدین ترتیب است:

1- Quenching Distance
2- Cylinder Head
3- Piston
4- Low Heating Value
5- T. W. Forest
6- C. G. Bauer
7- Single Cylinder
8- Advance
9- Fanhua Ma
10- Wang
11- Throttle Body Injection, TBI
12- Control
13- Jim Wallace
14- Alexandra Cattelan
15- Tsinghua
16- H. Limu
17- Advance
18- HCNG

$$P_{CNG} = 127.5\ \text{bar} \quad \text{و} \quad P_H = 22.5\ \text{bar}$$

$$P_{CNG} = 105\ \text{bar} \quad \text{و} \quad P_H = 45\ \text{bar}$$

برای آزمایش از موتور ملی[1] با مشخصات جدول ۲ و تجهیزاتی که در جدول ۳ آمده است، استفاده شد:

لگام ترمز[2] استفاده‌شده در آزمون، از نوع «ادی‌کارنت» و ساخت شرکت شنک[3] است. توان، گشتاور و دور بیشینهٔ آن بترتیب ۲۳۰ کیلووات، ۸۰۰ نیوتن‌متر و ۸۵۰۰ دور در دقیقه است. حسگرهای فشار داخل استوانه از نوع پیزوالکتریک و ساخت شرکت ای‌وی‌ال[4] اتریش است. این حسگرها در کنار شمع نصب می‌شود و نیازی به سوراخ‌کردن بستار برای جای‌گذاری آنها نیست.

جدول ۲ مشخصات موتور ملی EF۷

نوع موتور	۴ استوانه‌ای خطی تنفس طبیعی
قطر استوانه	۷۸/۶ میلی‌متر
طول پیمایش سمبه	۸۵ میلی‌متر
حجم موتور	۱۵۸۷ سانتی‌متر مکعب
نسبت تراکم	۱۰/۸

جدول ۳ تجهیزات استفاده‌شده در آزمون

تجهیزات	اندازه‌گیری
لگام ترمز شنک ۲۳۰kW	دور و گشتاور موتور
حسگر لامبدا هوریبا[5]	نسبت هوا به سوخت
حسگر اندازه‌گیر فشار داخل استوانه (از نوع شمعی)	فشار داخل استوانه
دماسنج نوع J[6]	دمای هوای چندراههٔ ورودی
دماسنج نوع K	دمای گازهای چندراههٔ خروجی
تحلیل‌گر گاز پیربورگ[7]	اندازه‌گیری آلاینده‌ها

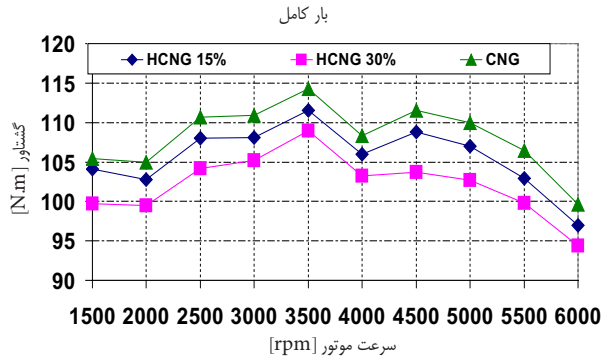
برای اندازه‌گیری دمای چندراهه‌ها در این آزمون، برای چندراههٔ خروجی از دماسنج نوع K و برای چندراههٔ ورودی از نوع J استفاده شد. این دماسنج‌ها ساخت شرکت جومو[8] آلمان هستند. محدودهٔ دمایی دماسنج‌های چند راههٔ ورودی، ۴۰- تا ۷۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد و محدودهٔ دمایی دماسنج‌های چندراههٔ خروجی، ۲۰۰- تا ۱۳۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد است. با هدف اندازه‌گیری متغیرهای وابسته به موقعیت میل‌لنگ، مانند فشار داخل استوانه، زمان جرقه‌زنی و مدت زمان احتراق، از حسگر رمزگذار زاویه[9] ساخت شرکت ای وی ال استفاده شد. این حسگر بر سر میل‌لنگ نصب می شود و این امکان را فراهم می‌آورد تا فشار داخل استوانه نسبت به موقعیت زاویه‌ای میل‌لنگ نمایش داده شود. برای پایش[10]، تنظیم و نمایش داده‌ها از نرم‌افزارهای مدیریت موتور و خوانش فشار استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار پایش موتور، می‌توان متغیرهای مختلفی مانند نسبت هوای اضافی و زمان جرقه‌زنی را پایش و تنظیم کرد. نرم‌افزار خوانش فشار برای نمایش و ثبت متغیرهایی مانند فشار داخل استوانه، فشار مؤثر متوسط نظری و مدت زمان احتراق به‌کارمی‌رود. برای ثبت آلاینده‌ها، از دستگاه سنجش نوع و میزان آلاینده‌های پیربورگ استفاده شد.

۳- روش آزمون

آزمایش‌ها در دو حالت بار کامل و بار جزیی انجام شد. در حالت بار کامل برای دورهای ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه با فواصل ۵۰۰ دور در دقیقه داده‌برداری انجام شد. به‌توسط نرم‌افزار تنظیم[11] و پایش موتور، زمان‌جرقه‌زنی و نسبت هوای اضافی (λ) در سامانهٔ پایش موتور[12] قابل برنامه‌ریزی، تنظیم گردید تا بیشترین فشار مؤثر متوسط داخلی به‌دست‌آید. پس از تنظیم بیشترین فشار مؤثر متوسط داخلی، ثبت داده‌ها که شامل ثبت فشار داخل استوانه، توان، گشتاور، مصرف سوخت، آلاینده‌ها و دمای قسمت‌های مختلف است، انجام شد. داده‌برداری در هر دور، در ۱۰۰ چرخه انجام و متوسط آن ثبت شد. حالت بار جزیی، فقط برای دو سرعت ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه انجام شد که در آن پس از تنظیم دور موتور، از بارهای جزیی کم مانند ۲ بار تا بار کامل با فواصل ۱ بار مانند حالت بار کامل داده‌برداری در ۱۰۰ چرخه انجام و نتایج ثبت شد.

۴- نتایج

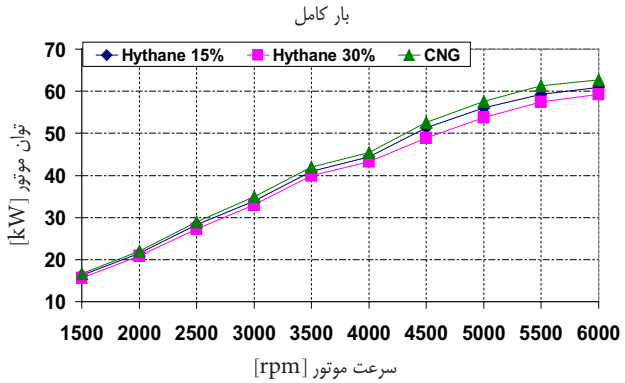
نتایج آزمون بار کامل: با توجه به شکل‌های (۱-۲) مشاهده می‌شود که هر چه درصد هیدروژن در مخلوط بیشتر شود، گشتاور و به دنبال آن توان موتور افت می‌کند. این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد که معمولاً سوخت‌های گازی به علت چگالی ضعیف و حالت گازی شکل خود، جایگزین بخشی از هوای ورودی به داخل استوانه می‌شوند و بازده تنفسی را کاهش می‌دهند. وجود هیدروژن در سوخت گاز طبیعی، اثر این پدیده را بیشتر می‌کند و بازده تنفسی موتور و در نتیجه گشتاور را کاهش می‌دهد. عامل دیگر در کاهش توان و گشتاور موتور برای بار کامل در اثر افزودن هیدروژن، کمتر بودن ارزش حرارتی هیدروژن در واحد حجم است.



شکل ۱ تغییرات گشتاور برای سه نوع سوخت استفاده شده

1- EF7
2- Dynamometer
3- Schenck
4- AVL
5- Horiba
6- Thermo couple

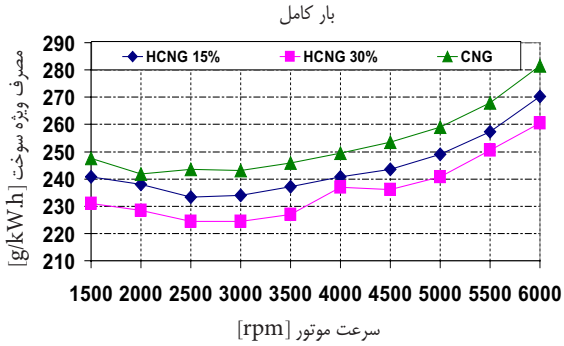
7 -Pierburg
8- Jumo
9- Angle Encoder
10- Control
11- Calibration
12- Engine Control Unit, ECU



شکل ۲ تغییرات توان موتور برای سوخت‌های استفاده‌شده

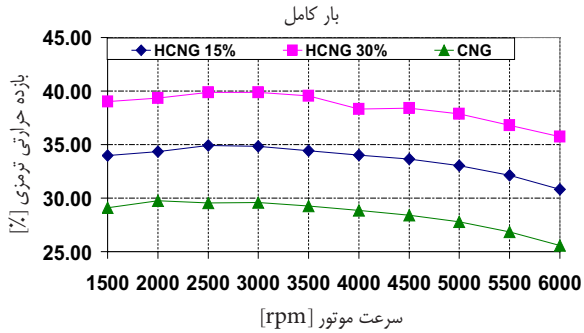
نمودارها نشان می‌دهند که برای سرعت‌های مختلف افزودن هیدروژن تا ۳۰٪، توان و گشتاور را به طور متوسط تا ۶/۵٪ کاهش‌می‌دهد، درحالی‌که هایتن با ۱۵٪ هیدروژن، این دو متغیر را به طور متوسط تنها ۴/۲٪ کاهش می‌دهد.

با توجه به نتایج شکل ۳، با افزودن هیدروژن به سوخت گاز طبیعی فشرده، مصرف سوخت ویژهٔ موتور در بار کامل کاهش می‌یابد. با متوسط‌گیری از میزان مصرف سوخت در سرعت‌های مختلف، برای مخلوط با ۱۵٪ هیدروژن ۵/۳٪ کاهش و برای مخلوط با ۳۰٪ هیدروژن، ۸/۶٪ کاهش در متغیر مصرف ویژه سوخت رخ داد. علت این امر به انرژی بیشتر هیدروژن در واحد جرم نسبت به گاز طبیعی فشرده باز می‌گردد. علت دوم این است که سرعت احتراق هیدروژن بیشتر از گاز طبیعی است که نتیجهٔ آن افزایش بازده حرارتی موتور است.



شکل ۳ مصرف ویژه سوخت و تاثیر افزودن هیدروژن بر آن

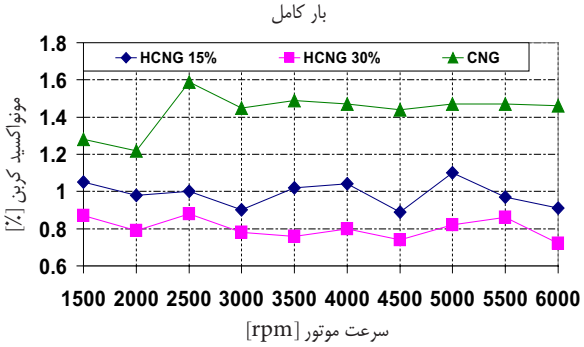
بازده حرارتی با مصرف ویژه سوخت نسبت عکس دارد [۸] و هر چه بازده حرارتی بیشتر شود، مصرف ویژه سوخت کاهش خواهد یافت. چنانکه معمولاً در شرایط کاری که بازده حرارتی بیشترین مقدار را داشته باشد، مصرف ویژه سوخت، کمترین مقدار را خواهد داشت. شایان ذکر است که هرچه دور موتور بیشتر می‌شود، مصرف ویژه سوخت افزایش‌می‌یابد زیرا به طور نسبی توان اصطکاکی[1] موتور بیشتر می شود که باعث افزایش مصرف سوخت می‌شود. افزایش توان اصطکاکی باعث افت بازده حرارتی نیز می‌شود. زیرا انرژی بیشتری از احتراق باید صرف جبران توان اصطکاکی موتور شود. نتایج بررسی بازده حرارتی بر حسب سرعت موتور و تأثیر هیدروژن بر آن در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴ بازده حرارتی بر حسب سرعت موتور و تأثیر هیدروژن بر آن

عامل اصلی در پایش آلایندهٔ مونوکسیدکربن نسبت هوای اضافی است. در آزمون‌های بار کامل و بار جزیی که انجام شد، در نسبت هوای اضافی تغییری اعمال نمی‌شد. برای توجیه کاهش آلایندهٔ مونوکسیدکربن در اثر افزودن هیدروژن به گاز طبیعی شکل ۵، می‌توان سه عامل را بیان کرد. عامل اول کم شدن تعداد اتم‌های کربن سوخت به علت استفاده از هیدروژن است که باعث کاهش مولکول‌های مونوکسیدکربن و دی‌اکسیدکربن می‌شود.

عامل دوم به نرخ سوزش شدیدتر هیدروژن باز می‌گردد. در وضعیت فشار و دمای بیشینهٔ داخل استوانه، ساز و کار تولید مونوکسیدکربن به شرایط تعادلی نزدیک است، ولی از موقعیت ۶۰ درجه پس از نقطهٔ مکث بالا، در شرایط جنبشی[2] انجام می‌شود. در شرایط تعادلی میزان تشکیل مونوکسیدکربن کمتر از شرایط جنبشی است. هیدروژن باعث افزایش فشار بیشینهٔ داخل استوانه می‌شود و از طرفی سرعت اشتعال را افزایش می‌دهد.

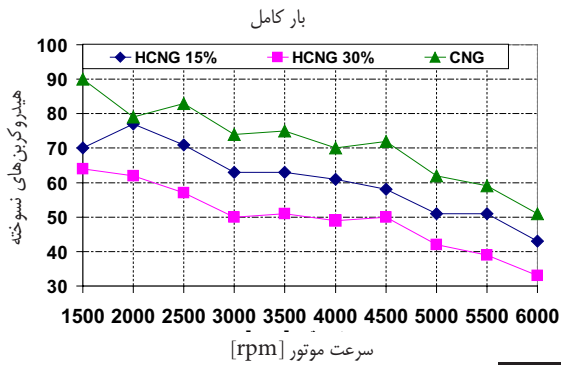


شکل ۵ تغییرات آلایندهٔ مونوکسید برحسب دور برای سوخت‌های استفاده شده

سرعت سوزش بیشتر هیدروژن باعث می‌شود قسمت بیشتر احتراق در شرایط نزدیک به حالت تعادلی رخ دهد و قسمت کمتری از اشتعال سوخت در شرایط سینتیکی انجام شود، درحالی‌که به علت سرعت اشتعال کند گاز طبیعی مقدار بیشتری از سوزش در شرایط سینتیکی رخ می‌دهد. نتیجه آن که با استفاده از هیدروژن، مقدار کمتری مونوکسیدکربن تولید می‌شود.

با توجه به شکل ۶ ، مشاهده می‌شود که با افزودن هیدروژن به گاز طبیعی در بار کامل، مقدار هیدروکربن‌های نسوخته به میزان چشمگیری کاهش می‌یابد.

1- Friction Power
2- Kinetic



شکل ۶ تغییرات آلایندهٔ هیدروکربن برحسب دور موتور در وضعیت بار کامل برای سوخت‌های استفاده شده

علت‌های کاهش عبارتند از:

۱- افزایش دمای محفظهٔ احتراق، که این افزایش باعث به تأخیر افتادن خاموشی شعله در هنگام رسیدن به دیوارهٔ استوانه می‌شود.

۲- افزایش دمای گازهای حاصل از احتراق و اکسیژن موجود در گازهای خروجی، که باعث به وجود آمدن پس واکنش[1] در گازهای خروجی می‌شود و در دماهای گرم، این هیدروکربن‌ها اکسید می‌شوند.

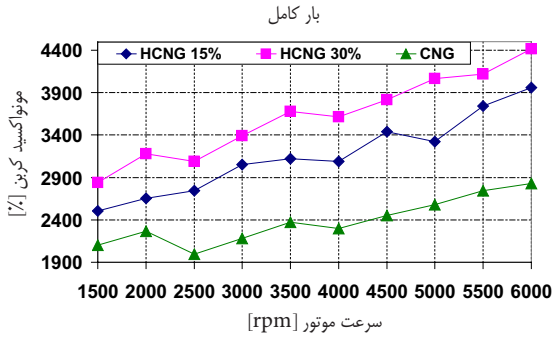
نتایج حاصل از آزمون نشان داد که دمای گازهای خروجی از استوانه در هنگام استفاده از هایتن بیش از حالتی است که از گاز طبیعی خالص استفاده شده است. البته افزایش اکسیژن در گازهای خروجی، به هنگام استفاده از مخلوط هایتن با ۳۰٪ هیدروژن بسیار بیشتر از وقتی است که از مخلوط هایتن ۱۵٪ استفاده شده است. تأخیر در زمان جرقه‌زنی نیز به نوبهٔ خود باعث کاهش این آلاینده می‌شود. زمان جرقه‌زنی بهینه برای هایتن نسبت به گاز طبیعی دیرتر انجام می‌شود، پس باعث کاهش هیدروکربن‌ها خواهد شد.

نکتهٔ دیگر در نتیجهٔ آزمون بار کامل، کاهش مقدار هیدروکربن‌ها در اثر افزایش دور موتور است. چون با افزایش سرعت موتور فرصت انتقال حرارت از موتور کاهش‌می‌یابد، بنابراین دمای دیوارهٔ محفظهٔ احتراق افزایش می‌یابد و در نتیجه ضخامت لایهٔ خاموشی کم می‌شود که نتیجهٔ آن سوختن کامل‌تر هیدروکربن‌هاست.

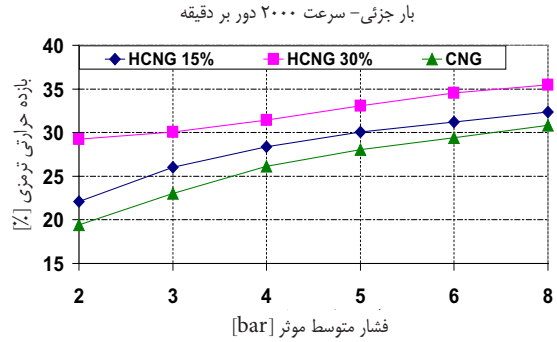
اکسید نیتروژن با افزودن هیدروژن به گاز طبیعی بیشتر می‌شود شکل ۷. دما و فراوانی اکسیژن اصلی را در تولید این آلاینده‌ها بر عهده دارند.

فشار داخل استوانه در هنگام استفاده از مخلوط هایتن افزایش می‌یابد که خود باعث افزایش دمای احتراق می‌شود که نتیجهٔ افزایش دما، تشکیل بیشتر آلایندهٔ اکسید نیتروژن است. عامل دیگر، بیشتر بودن تعداد هوای مخلوط است، زیرا نسبت هوا به سوخت درست[2] برای هایتن بیشتر از گاز طبیعی است [۱]. علاوه بر این، دمای اشتعال هیدروژن گرمتر از متان است [۲] و باعث گرمتر شدن دمای احتراق هایتن می‌شود.

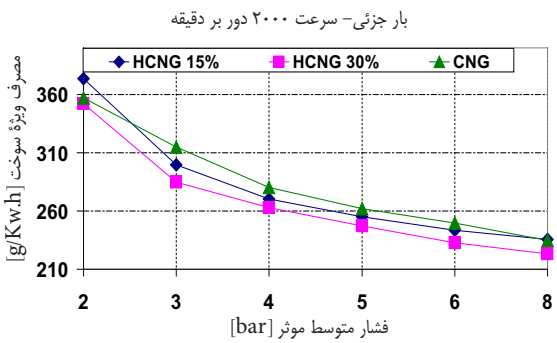
نتایج بار جزیی: برای دستیابی به الگوی کامل از کارکرد موتور و آلاینده‌ها برای سوخت‌های مختلف، آزمون‌های بار جزیی در دورهای ۲۰۰۰ و ۳۰۰۰ دور در دقیقه انجام شد. این دو سرعت خاص به این علت انتخاب شد که بویژه در چرخه‌های شهری، سرعت‌های متداولی هستند. هنگامی که موتور در وضعیت بار جزیی کارمی‌کند، دریچهٔ گاز به‌طور کامل باز نیست و در مسیر عبور هوا محدودیت ایجاد می‌کند که باعث افت فشار و شار سوخت و در نهایت کاهش توان می‌شود. بسته شدن دریچهٔ گاز در بار جزیی، باعث افزایش افت تلمبه‌ای[3] می‌شود که نتیجهٔ آن کاهش بازده حرارتی و افزایش مصرف ویژهٔ سوخت موتور است. این امر در شکل‌های ۸-۱۰ مشاهده می‌شود که مصرف ویژه سوخت و بازده حرارتی با افزایش بار در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه و فشارهای مختلف، به طور متوسط بترتیب در حدود ۳۳٪ کاهش و ۳۱٪ افزایش می‌یابند.



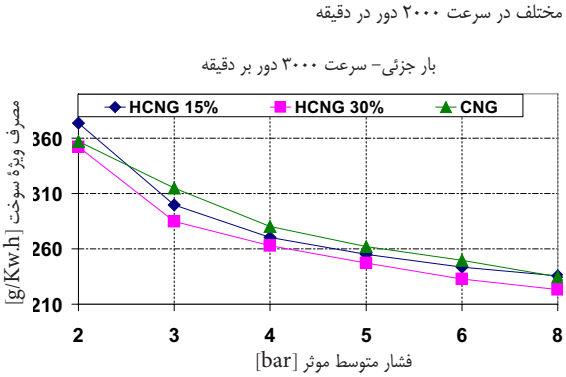
شکل ۷ تغییرات آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن در وضعیت بار کامل برای سوخت‌های مختلف



شکل ۸ بازده حرارتی در وضعیت بار جزیی برای فشارهای مؤثر متوسط (BMEP) مختلف در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه



شکل ۹ بازده حرارتی در وضعیت بار جزیی برای فشارهای مؤثر متوسط (BMEP) مختلف در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه

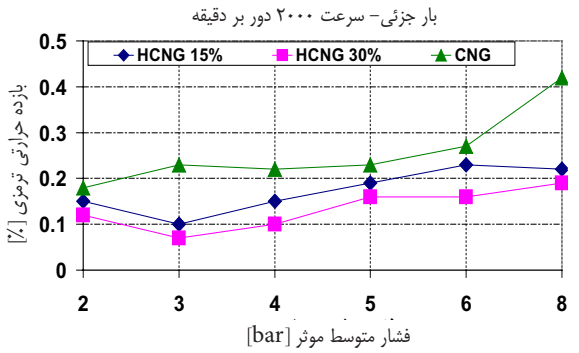


شکل ۱۰ تغییرات مصرف ویژهٔ سوخت موتور نسبت به تغییر فشار مؤثر متوسط واقعی در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه برای سوخت‌های مختلف

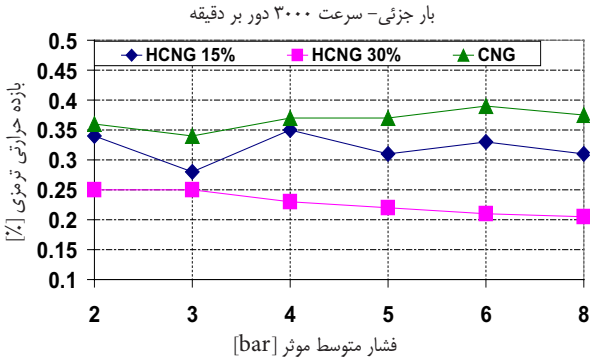
1- Post Reaction
2- Stoichiomerty
3- Pumping Loss

همچنین از این شکل‌ها برمی‌آید که افزودن هیدروژن در هر بار، باعث افت مصرف ویژه سوخت و بیشتر شدن بازده حرارتی موتور می‌شود که علت آن به سرعت احتراق تند هیدروژن باز می‌گردد. هر چه فشار مؤثر متوسط بیشتر می‌شود، بازده حرارتی بیشتر می‌شود و مصرف سوخت که نسبتی عکس با این مؤلفه دارد، کاهش می‌یابد. با افزایش فشار مؤثر متوسط، تأثیر افزودن هیدروژن بر میزان افزایش بازده حرارتی کم می‌شود. این پدیده می‌توان بدین صورت توجیه کرد که در فشارهای ضعف که دمای محفظهٔ احتراق نسبتاً خنک‌تر است، افزودن هیدروژن تأثیر بیشتری بر افزایش دمای موتور و انتقال حرارت دارد و بازده حرارتی را افزایش می‌دهد. شایان ذکر است که در داده برداری برای سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه و فشار، ۲ بار خطا رخ داده که میزان مصرف سوخت را بیش از مقدار صحیح نشان‌می‌دهد.

شکل‌های ۱۱و ۱۲ میزان تولید آلایندهٔ مونوکسیدکربن را بر حسب فشار مؤثر متوسط نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در تمام بارها، افزودن هیدروژن باعث کاهش این آلاینده می‌شود. برای این رفتار، می‌توان سه عامل را عنوان کرد. در بارهای کم، سرعت انتشار شعله در هنگام احتراق، باعث ثابت ماندن غلظت زیاد مونوکسیدکربن می‌شود، زیرا که فرصت اکسید شدن را پیدا نمی‌کند.



شکل ۱۱ تغییرات آلایندهٔ مونوکسیدکربن نسبت به تغییر فشار مؤثر متوسط واقعی در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه برای سوخت‌های مختلف



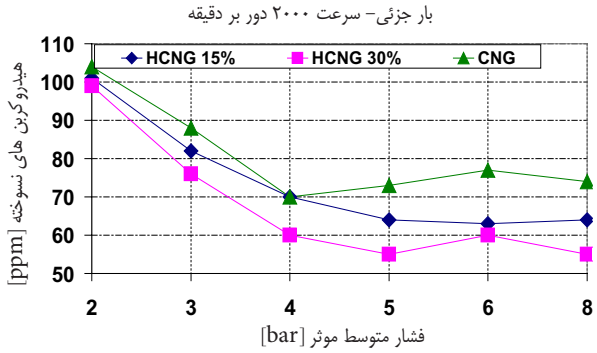
شکل ۱۲ تغییرات آلایندهٔ مونوکسید کربن نسبت به تغییر فشار مؤثر متوسط واقعی در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه برای سوخت های مختلف

وجود هیدروژن باعث افزایش سرعت شعله می‌شود و این پدیده را کاهش‌می‌دهد. همچنین به علت کوتاه بودن مدت زمان پس‌واکنش (به علت سرعت احتراق تند)، هیدروکربن‌های نسوخته فرصت کمی برای اکسید شدن دارند که در نتیجه مقدار این آلاینده کاهش خواهد یافت.

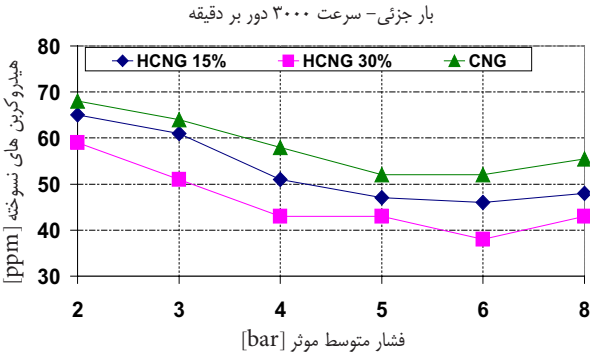
در بارهای کم، مقدار هیدروکربن‌های نسوخته بیشتر است. علت این امر کاهش دمای محفظهٔ احتراق و درنتیجه کاهش اکسیدشدن در نزدیکی دیوارهٔ محفظه و شیارهای داخل آن است. همان‌طور که در بررسی نتایج حالت بار کامل گفته شد، دمای احتراق گرمتر هیدروژن و افزایش دمای گازهای حاصل از احتراق هیدروژن باعث کاهش هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود.

عامل دیگری نیز در کاهش هیدروکربن‌ها مؤثر است و آن خاموشی در شیارها و فضاهای بسیار باریک موجود در داخل استوانه است. گاز طبیعی دارای فاصلهٔ خاموشی بزرگتری است و وقتی شعلهٔ آن به این فضاهای باریک می‌رسد به سرعت خاموش می‌شود. در حالی که فاصلهٔ خاموشی هیدروژن بسیار کوتاهتر است. به همین علت وقتی هیدروژن به گاز طبیعی افزوده می‌شود، شعله در هنگام رسیدن به این شیارها خاموش نمی‌شود و یا دست‌کم دیرتر خاموش می‌شود که نتیجهٔ آن کاهش هیدروکربن‌های نسوخته خواهد بود.

در وضعیت بار جزیی نیز اکسیدهای نیتروژن، رفتاری مغایر با آلاینده‌های دیگر دارند. هرچقدر بار موتور کاهش می‌یابد، مقدار این آلاینده افت می‌کند زیرا بسته شدن هرچه بیشتر دریچهٔ گاز باعث کاهش دمای بیشینهٔ داخل استوانه می‌شود و از طرفی کسر گازهای باقی‌مانده از چرخهٔ پیشین را بیشتر می‌کند.



شکل ۱۳ تغییرات آلایندهٔ هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به تغییر فشار مؤثر

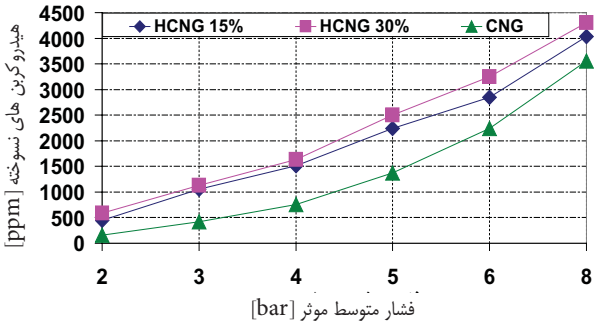


شکل ۱۴ تغییرات آلایندهٔ هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به تغییر فشار مؤثر متوسط واقعی در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه برای سوخت های مختلف

کاهش دما باعث کاهش اکسیدهای نیتروژن می‌شود و گازهای باقی‌مانده نیز تأثیر رقیق‌کننده دارند که موجب کاهش هر چه بیشتر تولید این آلاینده می‌شوند.

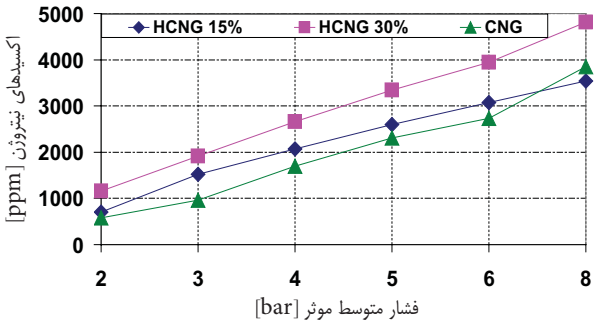
دمای گرمتر محفظهٔ احتراق به هنگام استفاده از هایتن، باعث می‌شود که اکسیدهای نیتروژن حتی در مرحلهٔ انبساط و افت دما تا پیش از باز شدن دریچهٔ دود، فرصت کمتری برای تجزیه شدن داشته باشند. یکی از عوامل بسیار مؤثر بر میزان آلاینده‌ها، رقیق‌کردن مخلوط سوخت و هواست. بدین معنی که به جای کار در وضعیت درست، موتور با نسبت هوای اضافی بزرگتر کارکند.

بار جزئی- سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۱۵ تغییرات آلایندهٔ هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به تغییر فشار مؤثر متوسط واقعی در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه برای سوخت‌های مختلف

بار جزئی- سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۱۶ تغییرات آلایندهٔ هیدروکربن‌های نسوخته نسبت به تغییر فشار مؤثر متوسط واقعی در سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه برای سوخت‌های مختلف

برای کاهش این آلاینده و کم‌کردن هرچه بیشتر آلاینده‌های دیگر می‌توان از خاصیت رقیق‌سوزی هیدروژن استفاده‌کرد.

افزایش درصد هیدروژن مخلوط باعث افزایش فشار بیشینهٔ داخل استوانه می‌شود. علت این امر همان سرعت احتراق تندتر هیدروژن است. که باعث می‌شود فشار استوانه سریع‌تر به فشار بیشینه برسد و موقعیت آن به نقطهٔ مکث بالا نزدیک‌تر باشد که در نهایت باعث بیشتر شدن فشار بیشینه می‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مورد آلاینده‌ها و بویژه اکسیدهای نیتروژن، بهتر است موتوری با سوخت هایتن در شرایطی رقیق‌تر از حالت درست (استوکیومتریک) کارکند تا میزان اکسیدهای نیتروژن کاهش یابد.

۵- نتیجه‌گیری

افزودن هیدروژن در وضعیت کاری بار کامل باعث کاهش بازده تنفسی، گشتاور و توان موتور می‌شود. به نظر می‌رسد درصد افزودن هیدروژن، بهتر است از حدود ۲۰٪ تجاوز نکند؛ زیرا برای بیش از این مقدار، افت گشتاور و توان به قدری است که مزیت‌های آن را خنثی می‌کند.

استفاده از مخلوط هایتن از طرفی مصرف سوخت را کاهش و از طرف دیگر بازده حرارتی را افزایش‌می‌دهد. البته هرچه از بار کامل دور شویم و دریچهٔ گاز بسته‌تر شود، این دو متغیر افت پیدا می‌کنند. آلاینده‌های مونوکسیدکربن و هیدروکربن‌های نسوخته چه در بار کامل و چه در بار جزیی، در اثر افزودن هیدروژن، کاهش می‌یابند. ولی هیدروژن بر آلایندهٔ اکسیدهای نیتروژن تأثیر عکس دارد و آن را افزایش می‌دهد. علت این افزایش بیشتر بودن دمای احتراق هیدروژن است.

۶- سپاسگزاری

از مرکز تحقیقات موتور ایران‌خودرو برای دراختیارگذاشتن امکانات آزمون‌های این تحقیق، سپاسگزارم.

References:

1. Bauer C. G. and Forest T. W. "Effect of Hydrogen Addition on the Performance of Methane-Fueled Vehicles. Part I: Effect on S.I. Engine Performance." International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001): 55-70.

2. Fanhua, Ma, Wang Yu, Haiquan, Liu Yong Li, Wang Junjun and Ding Shangfen. "Effects of Hydrogen Additionon Cycle-by-Cycle Variations in a Lean Burn Natural Gas Spark-Ignition Engine." International Journal of Hydrogen Energy 33 (2008): 823–831.

3. Bechtold, Richard L., Alternative Fuels Guide Book: Properties, Storage, Dispensing and Vehicle Facility Modifications, SAE International, Washington D. C., 1997.

4. Cattelan, Alexandra and Wallace, Jim. "Exhaust Emission and Energy Consumption Effects from Hydrogen Supplementation of Natural Gas." SAE Technical Paper, No. 952497.

5. Ma, Fanhua, Wang, Yu, Liu Haiquan, Li Yong, Wang Junjun and Zhao, Shuli. "Experimental Study on Thermal Efficiency and Emission Characteristicsof a Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Gas Engine." International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007): 5067 – 5075.

6. Van Wylen Gordon J., Sonntag Richard E.. Fundamentals of Classical Thermodynamics Wiley. 2003.

7. Heywood, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill Inc, ۱۹۸۸.

Experimental Study on the Effect of Hydrogen Addition to Compressed Natural Gas (CNG) on Engine Operation and Emission Reduction

F. Ommi
Professor
School of Aerospace Engineering
Tarbiat Modared University
f_ommi@modares.ac.ir

A. Moshiri*
MSc. Student
School of Aerospace Engineering
Tarbiat Modared University
moshiri.azad@gmail.com

A. Shafiei Sabet
MSc
Irankhodro Powertrain Co. (IPCO)
a_shafiei@ip-co.com

***Corresponding Author**
Received: Apr. 09, 2009
Accepted in Revised Form: Dec. 26, 2009
Article No. 87129

Abstract

In this study, effects on a spark ignition engine of pure compressed natural gas (CNG) and mixtures of CNG and hydrogen (Hythane) have been experimentally considered. In this study, three types of fuel including pure CNG, Hythane with 15% hydrogen and Hythane with 30% hydrogen in volume are used. Tests were performed in both of full load and part load conditions. Full load tests contain engine speeds from 1500 rpm up to 6000 rpm with step of 500 rpm. Part load tests were performed in engine speed of 2000 rpm and 3000 rpm. In each test, spark timing was set to reach the maximum indicated mean effective pressure. The results showed that volumetric efficiency, power and torque decreased with increase of Hydrogen fraction at full loads but thermal efficiency increased. Increase of Hydrogen Fraction in Hythane mixture cause CO and HC decrease but NOx increases.

Keywords: Hythane, Hydrogen, CNG, Polluters, Fuel Consumption, IMEP