



انجمن احتراق ایران

FCCI2012-6027

## چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



دانشگاه کاشان

### مروری بر آلاینده های تولیدی و مشخصات احتراقی موتورهای هیتان سوز

سید ابوالفضل قیانی<sup>۱</sup>، عبدالله ایران خواه<sup>۲\*</sup>

کاشان، دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

Email: irankhah@kashanu.ac.ir

#### چکیده

هیدروژن غنی از گاز طبیعی (هیتان) می تواند جایگزین مناسبی برای سوخت های فسیلی در موتورهای درون سوز باشد. در مطالعه حاضر، ارزیابی جامعی از مطالعات انجام شده درباره ی کاربرد هیتان در موتورهای درون سوز به عمل آمده است و تاثیر افزودن هیدروژن بر انتشار آلاینده ها و نیز مشخصات احتراقی موتورهای هیتان سوز بررسی شده است. نتیجه این مطالعات عمدتاً نشان داده که با افزودن هیدروژن سطح آلاینده ها و مصرف ویژه سوخت کاهش می یابد و در کنار افزایش سرعت انتشار شعله، شاخص های احتراق موتور نیز بهبود بخشیده می شود.

واژه های کلیدی: هیتان - گاز طبیعی - هیدروژن - آلاینده - احتراق - مصرف سوخت

#### ۱- مقدمه

رشد بیش از اندازه ی آلاینده ها در کنار افزایش قیمت سوخت و کاهش منابع نفت خام باعث حرکت به سوی سوختی سازگار با محیط زیست شده است. سوخت های مختلفی همچون الکل ها، LPG، CNG، هیدروژن، روغن های گیاهی، بیو گازها و LNG برای جایگزینی سوخت های مرسوم در نظر گرفته شده اند. در این خصوص سال هاست که از گاز طبیعی به عنوان سوختی مناسب برای جایگزینی بنزین و دیگر سوخت های متداول استفاده می شود، زیرا آلاینده گی کمتری دارد و در منابع زیرزمینی فراوان یافت می شود. موتورهایی که از سوخت گاز طبیعی استفاده می کنند، آلاینده های مونوکسیدکربن، هیدروکربن های نسوخته و اکسیدهای نیتروژن کمتری تولید می کنند. ترکیب عمده گاز طبیعی متان است که دارای مشخصات منحصر به فردی مثل ساختار مولکولی چهارضلعی با انرژی پیوند بالا C-H است که دارای دما احتراق زیاد و سرعت انتشار شعله پایین است [۱].

افزون بر مزایای گاز طبیعی، موتورهای CNG سوز امکان حرکت با نسبت تراکم بیشتر و کوبش کمتر نسبت به دیگر سوخت های فسیلی را دارند و دارای بازدهی گرمایی بالایی هستند. با این حال، متان به عنوان گاز گلخانه ای باعث افزایش پدیده گلخانه ای می شود [۲] و نیز سوختی کندسوز است.

روشی موثر برای حل مشکل کندسوزی گاز طبیعی، اختلاط گاز طبیعی با سوختی تندسوزتر است. بر این اساس، هیدروژن به دلیل واکنش پذیری بالا و خوش سوزی، بهترین افزودنی برای اختلاط با گاز طبیعی است که می تواند خصوصیات احتراقی متان را بهبود بخشد و میزان آلاینده های موتور را کاهش دهد [۳].

به مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی فشرده اصطلاحاً هیتان<sup>۳</sup> اطلاق می شود. هیتان، هیدروژن غنی از گاز طبیعی فشرده است و مزایای هیدروژن و متان را به طور همزمان دارد. در سال های اخیر، هیتان توجه محققان را به خود جلب کرده است [۴-۱۲].

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان

۲- استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه کاشان

<sup>3</sup> HCNG

FCCI2012-6027

از اوایل دهه ی ۱۹۹۰ میلادی نظریه ی استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت مکمل در کنار بنزین یا گاز طبیعی مطرح شد و تحقیقاتی نیز در این زمینه در آمریکا، کانادا، هند، چین، ایتالیا و ترکیه انجام شده است. در تحقیقی که فارست و باور در سال ۲۰۰۰ انجام دادند، موتور تحقیقاتی CFR تک سیلندر برای آزمایش به کار رفت. مخلوط سوخت با درصد های حجمی هیدروژن ۲۰٪، ۴۰٪ و ۶۰٪ از مخازن تحت فشار ۱۸ مگاپاسکال به موتور فرستاده شد. هر سوخت در سرعت های ۷۰۰ و ۹۰۰ دور در دقیقه در هر دو حالت بار کامل و بار جزئی آزمایش شد. آزمون نشان داد که افزودن هیدروژن مقدار پیشی جرقه<sup>۱</sup> را برای رسیدن به گشتاور بهینه، کاهش داد و همچنین باعث کاهش توان در اثر کم شدن ارزش حرارتی حجمی شد. در عین حال، آزمون آنها در مورد بازده حرارتی نتیجه ی غیرمعمولی نشان داد: با افزودن هیدروژن بازده حرارتی افت پیدا کرد.

فانهوما و وانگ تحقیقی تجربی با هدف بررسی تأثیر افزودن هیدروژن در موتور تک افشانه ای<sup>۲</sup> شش سیلندر انجام دادند [۱۳]. نتایج نشان داد که هم ضریب تغییرات فشار مؤثر متوسط محاسباتی و هم ضریب تغییرات فشار بیشینه ی داخل سیلندر در اثر افزودن هیدروژن کاهش می یابند. این تأثیر مثبت، زمانی بیشتر آشکار می شود که مخلوط سوخت و هوا رقیق شود. تغییرات مدت زمان احتراق چرخه به چرخه نیز کاهش یافت که نشان دهنده ی پایداری بیشتر شعله است. همچنین نشان داده شد که هیدروژن، افزودنی مناسب برای پایش<sup>۳</sup> آلاینده های اکسید نیتروژن و هیدروکربن های نسوخته است.

جیم والاس و الکساندرا کاتلن در سال ۱۹۹۵ آزمونی تجربی با استفاده از گاز طبیعی و هیتان روی موتور شورلت لومینای شش سیلندر انجام دادند. حجم هیتان استفاده شده ۱۵٪ هیدروژن داشت. در این آزمون برای مقایسه ی گاز طبیعی و هیتان متغیرهایی مانند سرعت موتور، بار موتور، غنا و زمان جرقه یک بار برای گاز طبیعی و یک بار برای هیتان با ۲۰٪ هیدروژن مد نظر قرار گرفته شد. هر دو سوخت در محدوده ی نسبت های تعادلی ۱/۰۰ تا ۱/۰۳ آزمایش شد تا اثر تغییرات غنا بر بازده موتور و آلاینده ها مشاهده شود. نتایج آزمون نشان داد که مصرف ویژه سوخت در استفاده از هیتان کاهش می یابد. آلاینده ی هیدروکربن های نسوخته برای هیتان کمتر از گاز طبیعی بود، ولی در مورد اکسیدهای نیتروژن نتیجه عکس داشت.

ناگلینگام و همکاران [۱۴]، با بررسی روی هیتان، نوشتند که توان موتور به دلیل ارزش حرارتی حجمی پایین تر هیدروژن در مقایسه با متان کاهش یافته است. با این حال، چون سرعت انتشار شعله هیدروژن بیشتر از CNG بود، زمان جرقه کم تری برای رسیدن به بیشترین گشتاور ترمز نیاز بود.

مطالعات آزمایشگاهی روی عملکرد و آلاینده ی خروجی موتورهای هیتان سوز اشتعال جرقه ای در سرعت های متفاوت و نسبت های هوا اضافه مختلف توسط نفیذ قهرمان [۱۵] روی موتور فورد انجام شد. افزایش نسبت هوا اضافه باعث کاهش فشار بیشینه سیلندر شد.

هیتان می تواند به صنعت هیدروژن کمک کند تا در حجم عظیم توسعه پیدا کند و مزایای گاز طبیعی را همراه با چگالی انرژی حجمی بیشتر از هیدروژن داشته باشد [۱۶-۱۷]. نتیجه این مطالعات عمدتاً نشان داده که با افزودن هیدروژن می توان میزان هیدروکربن های نسوخته را کاهش داد و میزان NO<sub>x</sub> را پایش کرد. علاوه بر این، در کنار افزایش قدرت موتور، سطح آلاینده ها و مصرف ویژه سوخت کاهش می یابد. در صورتی که درصد هیدروژن بیشتر از حد خاصی شود، احتراق غیرطبیعی همچون، پیش احتراق، کوبش و انفجار پیش از موقع اتفاق می افتد. هیدروژن افزوده شده فاصله خاموشی کم، سرعت سوختن بالا دارد که دیواره محفظه احتراق را گرمتر می کند. همچنین با افزایش هیدروژن، گشتاور ترمز کاهش می یابد [۱۸]. بنابراین میزان هیدروژن اضافه شده باید بهینه باشد. این مشاهدات بر اساس آخرین پیشرفت ها در تحقیق و توسعه موتورهای هیتان سوز صورت گرفته است. در این مطالعه با مروری بر مشخصات احتراقی هیتان، شایستگی استفاده از این سوخت در موتورهای درون سوز مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>1</sup> Pre-ignition

<sup>2</sup> Throttle Body Injection, TBI

<sup>3</sup> Control

## ۲- هیدروژن غنی از گاز طبیعی (هیتان)

افزودن مقادیر کم هیدروژن به گاز طبیعی (۳۰٪-۵٪ حجمی) به دلیل مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن، مزایای زیادی برای موتورهای درون سوز دارد [۱۳]. ویژگی های سوخت ها هیتان ۵٪، هیدروژن، CNG در جدول ۱ مقایسه شده است و در جدول ۲ ویژگی ها و ارزش حرارت پایین<sup>۱</sup> هیتان با ترکیب درصد های مختلف هیدروژن در مقایسه با CNG نشان داده شده است.

جدول ۱- مقایسه مشخصات هیتان ۵٪، هیدروژن و CNG [۲]

| Properties  | H <sub>2</sub> | HCNG ۵  | CH <sub>4</sub> | Gasoline |
|---|----------------|---------|-----------------|----------|
| Limits of Flammability in air, vol%   | ۴-۷۵           | ۵-۳۵    | ۵-۱۵            | ۱/۰-۷/۶  |
| Stoichiometric composition in air, vol%   | ۲۹/۵۳          | ۲۲/۸    | ۹/۴۸            | ۱/۷۶     |
| Minimum energy for ignition in air, mJ  | ۰/۰۲           | ۰/۲۱    | ۰/۲۹            | ۰/۲۴     |
| Auto ignition Temp, K   | ۸۵۸            | ۸۲۵     | ۸۱۳             | ۵۰۱-۷۴۴  |
| Flame Temperature in air, K   | ۲۳۱۸           | ۲۲۱۰    | ۲۱۴۸            | ۲۴۷۰     |
| Burning Velocity in NTPa air, cms <sup>-۱</sup>   | ۳۲۵            | ۱۱۰     | ۴۵              | ۳۷-۴۳    |
| Quenching gap in NTP air, cm  | ۰/۰۶۴          | ۰/۱۵۲   | ۰/۲۰۳           | ۰/۲      |
| Normalized Flame Emissivity   | ۱/۰            | ۱/۵     | ۱/۷             | ۱/۷      |
| Equivalence ratio flammability limit in NTP air   | ۰/۱-۷/۱        | ۰/۵-۵/۴ | ۰/۷-۴           | ۰/۷-۳/۸  |
| Methane Number  | ۰              | ۷۶      | ۸۰              | -        |
| Composition of CNG: CH <sub>4</sub> - ۹۰/۲%, C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> - ۸/۵%, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> - ۰/۶%, N <sub>2</sub> - ۰/۶%, Butane - ۰/۱% |                |         |                 |          |
| NTP denotes normal temperature (۲۹۳/۱°K) and pressure (1atm)  |                |         |                 |          |

جدول ۲- ویژگی ها CNG و هیتان با ترکیب درصد های مختلف هیدروژن [۱۹]

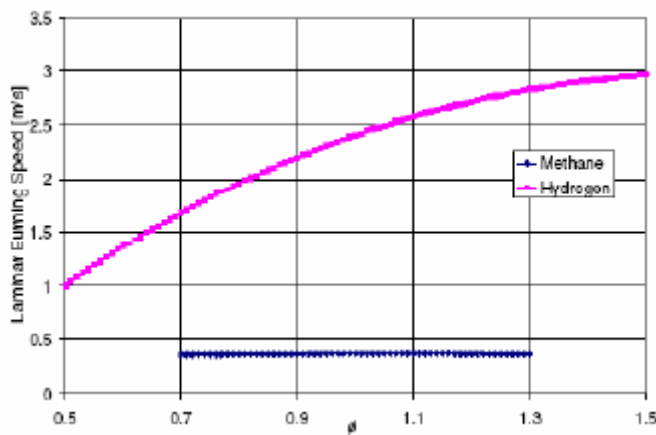
| Properties                                 | CNG   | HCNG ۱۰ | HCNG ۲۰ | HCNG ۳۰ |
|--|-------|---------|---------|---------|
| H <sub>2</sub> [% vol]                     | ۰     | ۱۰      | ۲۰      | ۳۰      |
| H <sub>2</sub> [% mass]                    | ۰     | ۱/۲۱    | ۲/۶۹    | ۴/۵۲    |
| H <sub>2</sub> [% energy]                  | ۰     | ۳/۰۹    | ۶/۶۸    | ۱۰/۹۴   |
| LHV [MJ.kg <sup>-۱</sup> ]                 | ۴۶/۴۸ | ۴۷/۱۷   | ۴۸/۲۶   | ۴۹/۶۱   |
| LHV [MJ.Nm <sup>-۳</sup> ]                 | ۳۷/۱۶ | ۳۴/۵۰   | ۳۱/۸۵   | ۲۹/۲۰   |
| LHV stoich. mixture [MJ.Nm <sup>-۳</sup> ] | ۳/۳۷۶ | ۳/۳۶۸   | ۳/۳۵۹   | ۳/۳۴۹   |

<sup>۱</sup> LHV

FCCI2012-6027

این مشخصه ها به این تاکید دارد که هیتان خواص هیدروژن و CNG را به طور همزمان دارد. از مهمترین خواص منحصر به فرد هیتان به عنوان سوخت مناسب موتور می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- با افزودن هیدروژن، نسبت H/C در سوخت افزایش می یابد. نسبت H/C بالاتر باعث کم تر شدن میزان CO<sub>2</sub> در واحد انرژی تولیدی می شود که خود منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه ای می شود.
- گاز طبیعی سرعت انتشار شعله پایینی دارد در حالی که هیدروژن سرعت انتشار شعله حدود ۸ برابر آن دارد که در شکل ۱ نشان داده شده است. در نسبت هوا اضافه بیشتر از شرایط استوکیومتری، احتراق هیتان پایدارتر از گاز طبیعی است. از مشکلات موتورهای گاز طبیعی سوز، کامل نشدن احتراق قبل از کاهش NO<sub>x</sub> به میزان کافی است که با افزودن هیدروژن، سوخت رقیق تر شده و بهره وری موثر احتراق را حفظ می کند [20].



شکل ۱- مقایسه سرعت اشتعال متان و هیدروژن با افزایش نسبت هوا اضافه

- با افزودن هیدروژن، ارزش حرارت حجمی هیتان به دلیل بودن چگالی انرژی در واحد حجم هیدروژن، کاهش می یابد [16] که در جدول ۲ نشان داده شده است.
- اضافه کردن هیدروژن به CNG باعث بهسوزی آن می شود که باعث کوتاه تر شدن زمان احتراق می شود و میزان NO<sub>x</sub> را در دماهای بالا، افزایش می دهد. با افزایش هیدروژن زمان جرقه زنی به تاخیر می افتد که منجر به کم تر شدن کار تراکم و کاهش دمای احتراق می شود که این خود به کاهش تشکیل NO<sub>x</sub> کمک می کند. تنظیم زمان جرقه زنی مناسب برای بهینه کردن توان و میزان آلاینده‌گی مد نظر، بسیار مهم است [2,21,13,22,23-24].
- هیتان با 15-30% هیدروژن گستره عملیاتی را توسعه و باعث احتراق کامل می شود و میزان انتشار HC و CO را کاهش می دهد [16].
- با افزودن هیدروژن می توان سرعت سوختن هیتان را افزایش داد و این یک سری مزایا از جمله کوتاه تر کردن زمان احتراق، بزرگ تر شدن درجه احتراق حجم ثابت و بهبود بهره وری موثر گرمایی را دارد.
- از ویژگی های مهم هیدروژن به عنوان محرک احتراق، بهبود کیفی سوخت های فسیلی است که امکان کاهش میزان CO<sub>2</sub> را نیز فراهم می کند [25].
- هیتان از لحاظ ایمنی به CNG شباهت دارد و به دلیل انرژی پایین تر که به واسطه وجود هیدروژن دارد، از هیدروژن ایمن تر است.
- تغلیظ هیدروژن در مخلوط سوختی، باعث خاصیت غیر قابل تصور ضد کوبش هیتان شده است.
- قابلیت استفاده از هیتان همانند CNG است و نیاز به تغییرات عمده در سیستم سوختی و موتور نمی باشد.

- هیتان باعث بهبود بازدهی موتور و کاهش مصرف سوخت می شود.

## ۳- مشخصات احتراقی هیتان

همانطور که در مقدمه اشاره شد، هیتان سوختی خوش سوز و شایسته برای موتورهای درون سوز است. مطالعات زیادی در رابطه با مشخصات احتراقی و آلاینده‌گی موتورهای هیتان سوز صورت گرفته که عمدتاً محققان نتایج مشابهی به دست آورده اند [15,26-30]. خصوصیات احتراقی هیتان باعث شده تا از آن به عنوان جایگزین مناسب سوخت های مرسوم در آینده نزدیک یاد شود. در ادامه مهم ترین اثرات استفاده از هیتان در موتورهای درون سوز بررسی می شود.

### ۳-۱- شعله

مطالعات صورت گرفته عمدتاً از افزایش سرعت انتشار شعله هیتان در مقایسه با گاز طبیعی بر اثر افزودن هیدروژن گزارش می دهند. از مهم ترین مطالعات صورت گرفته می توان به تحقیق تجربی فانهواما و وانگ [13] در بررسی اثر افزودن هیدروژن به گاز طبیعی اشاره کرد. آنها مشاهده کردند که با افزایش درصد هیدروژن در مخلوط پایداری شعله به دلیل کاهش تغییرات زمان احتراق، رو به فزونی نهاد.

جینهوا و همکاران [31] با بررسی تاثیر افزودن هیدروژن روی انتشار شعله از بهبود فرآیند احتراق داخلی و افزایش سرعت انتشار شعله خبر دادند. آنها همچنین مشاهده کردند که با افزودن هیدروژن جزء مولی OH و O در شعله بیشتر شد. سیرن [32] در مطالعه تجربی خودش روی آلاینده‌گی و بازدهی هیتان، افزایش سرعت اشتعال به دلیل حضور هیدروژن را نتیجه گرفت. پرائکل میدا، دارک انجل و اولاو هنسن [33] نیز استفاده از هیدروژن در مخلوط سوختی را عاملی بر افزایش سرعت انتشار شعله دانستند.

### ۳-۲- آلاینده‌گی

آلودگی هوا به سرعت در حال رشد است و با افزایش جمعیت به یکی از مشکلات اساسی جهان تبدیل شده است. در این راستا، مطالعات زیادی روی هیتان به عنوان سوخت با آلاینده‌گی کمتر از سوخت های مرسوم به عمل آمده است. جیم والاس و الکساندر کاتلن تحقیقی تجربی روی آلاینده‌گی هیتان در مقایسه با گاز طبیعی روی موتور شورلت لومینای شش سیلندر انجام دادند. نتایج آنها کاهش آلاینده‌گی هیدروکربن های نسوخته برای هیتان در مقایسه با CNG را نشان داد در حالی که با افزایش هیدروژن به مخلوط، انتشار اکسیدهای نیتروژن بیشتر شد.

شودو و همکاران [34] روی احتراق و آلاینده‌گی هیتان در یک موتور چهار زمانه تک سیلندر SI<sup>1</sup> با قطر ۸۵ میلیمتر، کورس ۸۸ میلیمتر و با نسبت تراکم ۱۳ تحقیق کردند. آنها نتیجه گرفتند که آلودگی های NO<sub>x</sub> ناشی از هیدروژن افزایش یافته و هیدروکربن های نسوخته کاهش می یابد. آنها تاثیرات پیشرفت احتراق تحت شرایط رقیق سوزی ناشی از هیدروژن در مخلوط را نیز بررسی کردند که رقیق سوزی باعث کاهش آلودگی های خروجی HC و NO<sub>x</sub> شد.

لارسن و والاس [35] درباره آلودگی یک موتور توربوشارژر شده رقیق سوز شورلت لومینا مدل ۳/۱، شش سیلندر، چهار زمانه، با خنک کننده آب و حجم موتور ۳/۱۳۵ لیتر، قطر سیلندر ۸۹ میلیمتر و با نسبت تراکم ۸/۸ به ۱ تحقیق کردند. آنها در سرعت ها، بارها و نسبت های استوکیومتری مختلف میزان NO<sub>x</sub>، HC، CO، CO<sub>2</sub>، دماهای خروجی و کارایی موتور را اندازه گرفتند و نتایج آنها دستیابی همزمان به سطوح پایین آلودگی های NO<sub>x</sub> و هیدروکربن های نسوخته با اختلاط هیدروژن و متان را نشان داد. مری بیسون [21] با بررسی آلاینده‌گی موتورهای هیتان سوز به این نتیجه رسید که با افزایش نسبت هوا

<sup>1</sup> spark-ignited engine



FCCI2012-6027

## چهارمین کنفرانس سوخت و احتراق ایران

کاشان - دانشگاه کاشان - بهمن ماه ۱۳۹۰



اضافه و هیدروژن انتشار  $NO_x$  کاهش پیدا کرد. جیان ژو و همکاران [22] با تحقیق روی موتورهای هیتان سوز گزارش دادند که با افزایش هوای اضافه و هیدروژن انتشار  $NO_x$  در دماهای بالا افزایش می یابد.

### ۳-۳- کارایی حرارتی

مطالعات انجام شده روی هیتان نشان می دهد که توان موتور به دلیل ارزش حرارت حجمی پایین تر هیدروژن در مقایسه با CNG کاهش می یابد [14] و بازده گرمایی هیتان با افزایش نسبت هوای اضافی بیشتر می شود [21]. در این بین رقیق سوزی ناشی از افزودن هیدروژن به بهبود کارایی حرارتی موتور کمک می کند. سیرن [32] با مطالعه تجربی روی هیتان، بیشترین بازدهی موتور را تحت بار کامل و زمانی که آلاینده کمی کم شد، مشاهده کرد. این بازدهی تحت بارهای متفاوت موتور متنوع بود. پرانکل میدا و اولاو هنسن [33] با بررسی هیتان نتیجه گرفتند که استفاده از هیدروژن فرآیند احتراقی متان را بهبود بخشیده و باعث کارایی حرارتی بهتر در دماهای پایین گازهای خروجی می شود. فرناندو اورتیزی [36] نیز در ایتالیا با تحقیقی تجربی روی توان وسایل نقلیه سبک با سوخت هیتان مشاهده کرد که استفاده از مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی در کنار کاهش آلاینده های خروجی، افزایش بازدهی موتورهای اشتعال جرقه ای را در پی دارد.

از دیگر خصوصیات هیتان به عنوان سوخت مناسب موتورهای درون سوز می توان به کاهش مصرف ویژه سوخت و نیز کاهش کوبش موتور اشاره کرد. با افزودن هیدروژن به مخلوط ضریب تغییرات فشار سیلندر بهبود می یابد که منجر به آزاد شدن گرمای بیشتر می شود [22]. از طرفی چون سرعت انتشار شعله هیدروژن بیشتر از CNG است، زمان جرقه کمتری برای رسیدن به گشتاور بهینه نیاز است [14].

### ۴- نتیجه گیری

افزودن هیدروژن به متان، آلودگی های HC، CO و  $CO_2$  را زمانی که تمایل به افزایش آلودگی های  $NO_x$  در سیستم وجود دارد، کاهش می دهد. اگرچه غنی سازی هیدروژن کارکرد رقیق موتور را در پی دارد؛ اما کارکرد رقیق، کاهش  $NO_x$  را بدون اثر بر خروجی موتور و کارایی حرارتی آن نتیجه می دهد. علاوه بر آن، در اثر سرعت بالای شعله هیدروژن، بدون کاهش کارایی حرارتی، عقب افتادن زمان جرقه نیز امکان پذیر است که این موضوع دمای شعله و در نتیجه سطح  $NO_x$  را کاهش می دهد. بنابراین کاهش آشکار آلودگی های  $NO_x$  از نتایج افزودن هیدروژن است. در کنار کاهش گازهای گلخانه ای و آلاینده های اتمسفر، غنی سازی گاز طبیعی با هیدروژن به شاخص های احتراق موتور نیز کمک می کند. افزودن هیدروژن، نسبت استوکیومتری را در حد رقیق سوزی احتراق گاز طبیعی بدون افزایش زمان احتراق، کاهش می دهد که باعث بازده حرارتی بالاتر و حدود آلودگی های پایین تر می شود. علاوه بر این افزودن هیدروژن ضریب تغییرات فشار بیشینه را بهبود می بخشد. درصد غنی سازی ۲۰-۳۰ درصد گاز طبیعی با هیدروژن، باعث کارکرد مطلوب موتور می شود. افزودن هیدروژن بیش از این مقدار، کاهش شاخص مقاومت در مقابل کوبش گاز طبیعی، قدرت خروجی کمتر از موتور و افزایش قیمت سوخت را در پی خواهد داشت. حجم کمتر از ۲۰ تا ۳۰ درصد هیدروژن در مخلوط، استفاده ناکافی از پتانسیل بهبود عملکرد هیدروژن است. به زودی هیتان به صورت تکنولوژی با صرفه اقتصادی و سوختی سازگار با محیط زیست به دنیا عرضه می شود و این می تواند گامی موثر برای آینده استفاده از هیدروژن باشد.

### مراجع

1- Turns Stephen R, An Introduction to Combustion: Concepts and Applications. 2nd ed Bosten: McGraw Hill ; 2000. pp 158-159.



FCCI2012-6027

- 2- K.P.Kavathekar, S.D.Rairikar and S.S.Thipse., Development of a CNG Injection Engine Compliant to Euro – IV Norms and Development Strategy for HCNG Operation. SAE paper No. 2007-26-029. 2007.
- 3- Akansu SO, Dulger Z, Kahraman N, Veziroglu TN. Internal combustion engines fueled by natural gas–hydrogen mixtures. *Int J Hydrogen Energy* 2004;29(14):1527–39.
- 4- Ma F, Wang Y, Liu H, Li Y, Wang J, Ding S. Effects of hydrogen addition on cycle-by-cycle variations in a lean burn natural gas spark-ignition engine. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33:823–31.
- 5- Huang Z, Wang J, Liu B, Zeng K, Yu J, Jiang D. Combustion characteristics of a direct injection engine fueled with natural gas–hydrogen mixtures. *Energy Fuels* 2006;20(2):540–6.
- 6- Huang Z, Liu B, Zeng K, Huang Y, Jiang D, Wang X, et al. Experimental study on engine performance and emissions for an engine fueled with natural gas–hydrogen mixtures. *Energy Fuels* 2006;20(5):2131–6.
- 7- Bysveen M. Engine characteristics of emissions and performance using mixtures of natural gas and hydrogen. *Energy* 2007;32(4):482–9.
- 8- Ma F, Wang Y, Liu H, Li Y, Wang J, Zhao S. Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine. *Int J Hydrogen Energy* 2007;32(18):5067–75.
- 9- Liu B, Huang Z, Zeng K, Chen H, Wang X, Miao H, et al. Experimental study on emissions of a spark-ignition engine fueled with natural gas–hydrogen blends. *Energy Fuels* 2008; 22(1):273–7.
- 10- Wang J, Chen H, Liu B, Huang Z. Study of cycle-by-cycle variations of a spark ignition engine fueled with natural gas–hydrogen blends. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(18):4876–83.
- 11- Dimopoulos P, Rechsteiner C, Soltic P, Laemmle C, Boulouchos K. Increase of passenger car engine efficiency with low engine-out emissions using hydrogen–natural gas mixtures: a thermodynamic analysis. *Int J Hydrogen Energy* 2007;32:3073–83.
- 12- Ma F, Wang Y. Study on the extension of lean operation limit through hydrogen enrichment in a natural gas spark-ignition engine. *Int J Hydrogen Energy* 2008;33(4):1416–24.
- 13- Fanhuna Ma, Hanquan Liu, Yu Wang, Yong Li, Junjun Wang and Shuli Zhao, Combustion and Emission Characteristic of a Port Injection HCNG Engine Under Various Ignition Timings., *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2008), pp. 816-822.
- 14- Nagalingam B, Duebel F, Schmillen K. Performance study using natural gas, hydrogen-supplemented natural gas and hydrogen in AVL research engine. *Int J Hydrogen Energy* 1983;8(9):715–20.
- 15- Nafiz Kahraman, Bilge Ceper, S. Orhan Akansu, Kadir Aydin., Investigation of Combustion Characteristics And Emissions In A Spark Ignition Engine Fuelled With Natural gas- Hydrogen Blends., *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(2009) ,pp.1026- 1034.
- 16- Bell SR, Gupta M., Extension of a Lean Operating Limit For Natural Gas Fuelling of a Spark Ignition Engine Using Hydrogen Blending., *Combustion Sciences and Technology*, 123(1997), 1-6, pp. 23-48.
- 17- S.R.Munshi, C.Nedelcu and J.Harris et.al., Hydrogen Blended Natural Gas of a Operation of a Heavy Duty Turbocharged Lean Burn Spark Ignition Engine, SAE Paper No.2004-01-2956, 2004.
- 18- Hoekstra, R.L., et.al , NOx Emission and Efficiency of Hydrogen, Natural Gas, Natural Gas/ Hydrogen Blends, SAE Paper No. 961103, 1996.
- 19- Bade Shrestha SO, Karim GA. Hydrogen As An additive to Methane For Spark Ignition Engine Applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 24(1999), 6: pp.577-586.
- 20- Kirk Collier, Neal Mulligan, Dongsung Shin and Steve Brandon. Emission Results from the New Development of A Dedicated Hydrogen –Enriched Natural Gas Heavy Duty Engine, SAE Paper No. 2005 01-0235, 2005.
- 21- Marie Bysveen., Engine Characteristics of Emissions And Performance Using Mixtures Natural Gas And Hydrogen., *Energy*, 32(2007), pp. 482-489.
- 22- Jian Xu, Xin Zhang, Jianhua Liu, Longfei Fan., Experimental Study of a Single Cylinder Engine Fueled with Natural gas- Hydrogen Mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*,35(2010), pp.2909- 2914.
- 23- Fanhua Ma, Junjun Wang, Yu Wang, Yefu Wang, Zhiqiang, Shangfen Ding and Shuli Zhao., An Investigation of Optimum Control of a Spark Ignition Engine Fueled By NG and Hydrogen Mixtures, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2008), pp. 7592-7606.
- 24- Fanhua Ma, Yu Wang, Haiquan Liu, Yong Li, Junjun Wang, Shuli Zhao., Experimental Study On Thermal Efficiency And Emission Characteristics Of A Lean Burn Hydrogen Enriched Natural Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(2007), pp. 5067-5075.
- 25- Fenando Ortenzi, Maria Chesisa, Francesco Conigli., Experimental Tests of Blends of Hydrogen and Natural Gas in Light Duty Vehicles, HYSYDAYS – 2ND World Congress Of Young Scientists On Hydrogen Energy Systems. Turin 2007. pp. 1-11.



FCCI2012-6027

- 26- Nagalim B, Duebel F, Schmillen K. Performance study using natural gas, hydrogen-supplemented natural gas and hydrogen in AVL research engine. *Int J Hydrogen Energy* 1983;9(8): 715–20.
- 27- Karim GA. Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 28:569–77.
- 28- Cheolwoong Park, Changgi Kim, Young Choi, Sangyeon Won, Yasuo Moriyoshi., The Influences of Hydrogen On The Performance And Emission Characteristics of a Heavy Duty Natural Gas Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*, 1(2011), pp.1-7.
- 29- Fanhua Ma, Yu Wang., Study On the Extension of Lean Operation Limit Through Hydrogen Enrichment In a Natural Ga Spark- Ignition Engine, *International Journal of Hydrogen Energy*,33(2008), pp.1416-1424.
- 30- Aagostino Iacobazzi., Maria Chiesa, Antonino Genovese, Ennio Rossi., Use of Blends of Hydrogen And Natural gas In Urban Vehicles In The Transition Towards An Hydrogen Economy, 2WIH2 / 19-21 March 2007 – Ghardaia Algeria.
- 31- Jinhua Wang, Zuohua Huang, Chenglong Tang, Jianjun Zheng., Effect of Hydrogen Addition On Early Flame Growth Of Lean Burn Natural gas – Air Mixture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(2010), pp.7246 -7252.
- 32- R. SIERENS, VARIABLE COMPOSITION HYDROGEN/NATURAL GAS MIXTURES FOR INCREASED ENGINE EFFICIENCY AND DECREASED EMISSIONS, University of Gent, Laboratory of Transporttechnology, Sint-Pietersnieuwstraat B-9000 Gent, Belgium.
- 33- Prankul Middha, Darek Engel and Olav R.Hansen, CAN THE ADDITION OF HYDROGEN TO NATURAL GAS REDUCE THE EXPLOSION RISK?, GexCon AS, P.O.Box 6015, NO-5892 Bergen, Norway.
- 34- Shudo T, Shimamura K, Nakajima Y. Combustion and emissions in a methane DI stratified charge engine with hydrogen pre-mixing. *JSAE Rev*2000; 21:3 –7.
- 35- Larsen JF, Wallace JS. Comparison of emissions and decency of a turbocharged lean-burn natural gas and hythanefueled engine. *J Eng Gas Turbines Power* 1997; 119:218–26.
- 36- Fernando Ortenzi\*, Maria Chiesa, Francesco Conigli, Experimental Tests of Blends of Hydrogen and Natural Gas in Light Duty Vehicles, \*Centre for Transport and Logistics, University “La Sapienza” of Rome, Rome, Italy.