

موتورهای احتراق داخلی تغذیه شده با مخلوط‌های گاز طبیعی هیدروژن

پویان ادیبی*

چکیده: در مطالعه حاضر، ارزیابی جامعی از مقالات تحقیقی درباره کاربرد مخلوط‌های گاز طبیعی هیدروژن در موتورهای درون‌سوز انجام شده است. به‌طور کلی با افزودن H_2 ، آلودگی‌های CO و HC ، CO_2 کاهش، ولی آلودگی NO_x افزایش می‌یابد. اگر یک مبدل کاتالیستی به کار برده شود، آلاینده NO_x به شدت کاهش خواهد یافت. در نتیجه وسایل نقلیه با آلودگی معادل صفر EZEV^۱ استاندارد، ممکن است به دست آیند. راندمان به درصد H_2 ، زمان جرقه، نسبت تراکم، نسبت هم‌ارزی و غیره وابسته است. تحت شرایط معین می‌توان، راندمان را افزایش داد. جهت بهبود BSFC^۲، آلودگی و BTE^۳ استفاده از یک مخلوط با درصد هیدروژن پایین مناسب است.

واژه‌های کلیدی: CNG، هیدروژن، مخلوط، موتور

۱۸۲۰ مطرح کرد. بورسانتی و ماتیوچی^۵ در ایتالیا در سال ۱۸۵۴ موتور هیدروژنه تک سیلندر را بهبود بخشیدند. ردلف ارن^۶ مطالعات را بر موتور هیدروژنی در آلمان در سال ۱۹۲۰ پیگیری کرد. ریکاردو^۷ با به‌کارگیری هیدروژن در یک موتور در سال ۱۹۲۴ به راندمان بالا دست یافت. ارن و همکاران^۸. مطالعاتی را در رابطه با استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت و آلودگی هوا در دهه ۱۹۳۰ انجام دادند. [۴] ادت و سواين^۹ کارایی و میزان آلودگی یک موتور چند سیلندر که در حالت بار جزئی^{۱۰} با هیدروژن و متانول کار می‌کرد را تست کردند. [۵] آن‌ها فهمیدند که BTE یک موتور تغذیه شده با هیدروژن بالاتر از یک موتور تغذیه شده با متانول است و خروجی NO_x موتور هیدروژنی پایین‌تر از موتور متانولی است. تیانشن و همکاران^{۱۱} مخلوط متانول و هیدروژن را به عنوان سوخت موتورهای SI به منظور بهبود خواص احتراقی آن بررسی کردند. [۶] آن‌ها یافتند که افزودن مقدار کمی هیدروژن به مخلوط هوا متانول باعث افزایش سرعت انتشار شعله، کاهش زمان تاخیر جرقه، کاهش تلفات مدت احتراق و بهبود بازده

۱. مقدمه

اکثر انرژی‌های مورد استفاده در دنیا، سوخت‌های فسیلی هستند. سوختن این سوخت‌ها ضایعاتی نظیر خاکستر و یا کلینکر برجای می‌گذارد که این ضایعات اثرات خطرناکی بر محیط زیست خواهند داشت. [۱] نه تنها استفاده پیوسته از مقادیر زیاد سوخت‌های فسیلی، یک خطر جدی برای محیط زیست به حساب می‌آید بلکه مقادیر این سوخت‌ها نیز محدود است. مساله دیگر در رابطه با نفت، آلودگی‌های به جا مانده نظیر CO ، NO_x ، CO_2 و هیدروکربن‌ها HC است. گاز طبیعی NG مخلوطی از گازهای مختلف است. یک بخش از NG متان است که به نوعی تا ۹۹ درصد حجم کلی گاز را در بر می‌گیرد. [۲] دیگر اجزای تشکیل دهنده NG هیدروکربن‌های غیرمتانی نظیر اتان، پروپان، بوتان و در بعضی موارد هیدروکربن‌های سنگین‌تر و نیز گازهای H_2 ، CO_2 ، He، N_2 و گاهی اوقات آب می‌باشد. [۲،۳] پاک‌ترین سوخت فسیلی NG است و حمل و نقل و ذخیره آن آسان است. در بسیاری از نقاط جهان سوخت ارزان و در دسترس است. دارای عدد اکتان بالا و بنابراین مناسب برای موتورهای با نسبت تراکم بالا است که باعث بهبود در قدرت خروجی موتور و بازده می‌شود. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با کاربرد هیدروژن به عنوان یک سوخت در موتورهای احتراق داخلی انجام شده است. ابتدا ریورند سیسیل^۴ در انگلیس استفاده از هیدروژن را به عنوان سوخت در سال

^۱Equivalence Zero Emission Vehicles

^۲Break Specific Fuel Consumption

^۳Break Thermal Efficiency

^۴Reverend Cecil

^۵Bursanti & Matteucci

^۶Rudolf Erren

^۷Ricardo

^۸Erren et al

^۹Adt & Swain

^{۱۰}Part load

^{۱۱}Tianshen et al

* کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک

آدرس پست الکترونیک: adibi_p@yahoo.com

حرارتی خواهد شد.

از دیدگاه قابلیت تطبیق پذیری موتورهای احتراق داخلی، هیدروژن به دفعات به عنوان سوخت جایگزین استفاده شده است و به این علت کاندید اصلی به کارگیری به عنوان سوخت جایگزین سوخت های فسیلی است. هیدروژن مشکلات عملی سوخت های مایع نظیر محبوس شدن بخار، سخت شدن دیواره سرد، تبخیر ناکافی، مخلوط رقیق و غیره را ندارد. هیدروژن مشخصات سوخت تمیز را دارد. وقتی هیدروژن سوخته می شود محصولات سمی نظیر هیدروکربن ها، مونواکسید کربن، اکسید سولفور، اسیدهای ارگانیک و دی اکسید کربن تولید نمی شوند و به عوض آن محصول اصلی آب است. در دنیای امروزی جایی که تأثیرات گرم شدن کره زمین یک مساله جدی است فایده اصلی سوخت هیدروژن این است که گاز گلخانه ای دی اکسید کربن را اصلاً تولید نمی کند.

سوخت های جایگزین فعلی (NG و هیدروژن) مورد مطالعه قرار گرفته اند و طبق تحقیقات ثابت شده اند که ایمن، اقتصادی و دارای مزایای علمی و مفید در چرخه حیات هستند. [۵،۸] آدامسون و پیرسون^{۱۲} هیدروژن و متان را از لحاظ ایمنی، هزینه، کارایی و خروجی مقایسه کردند. آنها نتیجه گرفتند که مزایای کلی برتر و مشخصی در ارتباط با این دوسوخت وجود ندارد. [۷]

۲. به کارگیری مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن

در موتورهای احتراق داخلی

با افزودن هیدروژن به گاز طبیعی، آلودگی های خروجی شامل مقادیر بسیار کم CO، CO₂، HC، NO_x خواهند بود. ترکیب هیدروژن و گاز طبیعی هیتان^{۱۳} نامیده می شود. موتورهای هیدروژن گاز طبیعی با به کارگیری درصدهای مختلف ترکیب گاز طبیعی و هیدروژن مطالعه شده اند. بسیاری از این مطالعات در مقدمه به آنها اشاره شد. [۹،۳۱] ناگالینگام و همکاران^{۱۴}، موضوع را با یک موتور احتراق جرقه ای AVL بررسی کردند. مدل ۵۲۳،۰۰۱، سرعت ۱۲۰۰ دور در دقیقه پر شده با مخلوط های NG/H₂: 0/100، 50/50، 80/20، 100/0، تک سیلندر، چهار زمانه، عمودی، دو سوپاپ ورودی و دو سوپاپ خروجی، قطر سیلندر ۱۲۵ میلی متر، کورس ۱۳۰ میلی متر و نسبت تراکم ۱۱،۷۳ [۹]. آنها دریافتند که کاهش ماکزیم قدرت موتور با کاربرد هیدروژن حدود ۲۳ درصد و ماکزیم درصد کاهش در بازده حرارتی معین حدود ۱۲ درصد در دور ۱۲۰۰ در دقیقه است. بزرگ کردن موتور با سوخت هیدروژن برای کاربردهای ثابت می تواند کاهش قدرت را تصحیح کند. زمان جرقه بهینه تا ۲۰ BTDC برای ترکیبات خالص هیدروژن کاهش می یابد که مشخص کننده افزایش سرعت شعله است. آلودگی های NO_x با هیدروژن خالص به دلیل دمای احتراق بالاتر هیدروکربن های نسوخته افزایش می یابد و آلودگی مونواکسید کربن کاهش می یابد. هیدروکربن های نسوخته و آلودگی های مونواکسید کربن به دلیل جابه جایی مستقیم یک سوخت کربنی با هیدروژن، کاهش می یابد. اثبات شده است که عملکرد موتور گاز طبیعی با مکمل هیدروژن در نسبت های هم ارزی ۰،۸-۰،۹، بین عملکردهای موتور هیدروژنی و گاز

طبیعی سوز و وابسته به مقدار هیدروژن تکمیلی است. یوسف^{۱۵} در پایان نامه کارشناسی ارشد خود از ۹۹ درصد متان و مخلوط CH₄/H₂: 80.08/19.92 استفاده کرد. [۱۰] او موتور یک نیسان مدل ۵۱۰ چهار سیلندر، ۱۹۵۲CC، حداکثر توان ۹۲ اسب بخار، حداکثر سرعت ۵۲۰۰ دور در دقیقه، قطر سیلندر ۸۵ میلی متر، کورس ۸۶،۰ میلی متر و نسبت تراکم ۸،۵:۱ استفاده کرد. او نرخ رشد پیشانی شعله FFGR^{۱۶} و زمان SI در نسبت های هم ارزی مختلف را تحلیل کرد و نتیجه گرفت که از نسبت هم ارزی ۰،۵۳۵، به دلیل رقیق سوزی متان بایستی اجتناب کرد.

دالگر^{۱۷} ترکیب ۸۰ درصد CNG و ۲۰ درصد H₂ را برای موتور SI از روش عددی، مورد بررسی قرار داد. [۱۱] سواين و همکاران^{۱۸} [۱۲] و یوسف [۱۳] مخلوط مشابه با یک موتور دیگر آزمایش کردند. یوسف یک موتور تویوتا مدل 2TC چهار سیلندر محصول ۱۹۷۶، ۱۵۸۸CC، حداکثر توان ۸۸ اسب بخار، حداکثر دور ۶۰۰۰ در دقیقه، قطر سیلندر ۸۵،۰ میلی متر، کورس ۷۰ میلی متر و با نسبت تراکم ۹،۰:۱ را به کار برد. او موتور را بهبود بخشید و تصمیم گرفت که تک سیلندر را به جای چهار سیلندر به کار گیرد. او غلظت های BSHC، BSCO و BSNO_x، پیشرفت شعله و تغییرات کارایی حرارتی در نسبت هم ارزی های متفاوت را محاسبه کرد. بهترین کارایی پیشرفت شعله و شرایط بار سبک در تست ۱۰۰۰ دور در دقیقه به دست آمد. وقتی ترکیب متان هیدروژن با عملکرد متان خالص در نسبت های هم ارزی مشابه مقایسه می شود؛ ترکیب متان و هیدروژن آلودگی BTE و NO_x را افزایش می دهند در حالی که کارایی جرقه، هیدروکربن های نسوخته و CO کاهش می یابند. علاوه بر این حد رقیق سوزی گاز طبیعی از ۰،۶۱ به ۰،۵۴ کاسته می شود. حد رقیق سوزی احتراق طوری تعریف شده است که حداقل ۳۸ درصد سیکل ها شرایط احتراق کامل را ندارند. با اضافه کردن هیدروژن، نسبت های هم ارزی می توانند حدود ۱۵ درصد کاهش یابند بدون این که مدت زمان احتراق و تاخیر در جرقه افزایش یابد.

والاس و کاتلان^{۱۹} در زمینه ترکیبات گاز طبیعی و هیدروژن در یک موتور احتراق داخلی به صورت تجربی مطالعه کردند. همچنین آزمایشاتی در زمینه آلودگی های خروجی از یک موتور تغذیه شده با ترکیب NG و تقریباً ۱۵ درصد حجمی هیدروژن را نیز انجام دادند. [۱۴] آن ها یک موتور شورلت لومینا مدل ۳،۲ شش سیلندر، چهارزمانه، با سیال خنک کننده آب، قطر سیلندر ۸۹ میلی متر، کورس ۸۴ میلی متر و نسبت تراکم ۸،۸:۱ به کار بردند. در نتیجه این مطالعه، BSFC نسبت مخلوط CNG/H₂: 85/15 کمتر از مقدار

¹² Adamson & Pearson

¹³ HYPHANE

¹⁴ Nagalingam et al

¹⁵ Yusuf

¹⁶ Flame Front Growth Rate

¹⁷ Dulger

¹⁸ Swain et al

¹⁹ Wallace & Cattelan

متوسط، مدت زمان احتراق متوسط CA^{24} ، فشار متوسط ماکزیمم سیلندر، نواحی کوبش در درصدهای مختلف متان و هیدروژن، نسبت هم‌ارزی مختلف و BTDCهای مختلف (۲۰، ۱۰، ۳۰ درجه) انجام شد. در ۱۰ و ۲۰ درجه با افزایش غلظت هیدروژن در موتور، قدرت خروجی افزایش می‌یابد. ولی در ۳۰ درجه، با افزایش غلظت هیدروژن در موتور، قدرت خروجی کاهش می‌یابد. ماکزیمم قدرت خروجی در BTDC ۲۰ درجه نشان داده شده است.

لارسن و والاس^{۲۵} درباره آلودگی و کارایی یک موتور توربوشارژر شده رقیق‌سوز (با سوخت مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن) تحقیق کردند. [۲۲] آلودگی و کارایی مخلوط گاز طبیعی فشرده و هیدروژن (نسبت حجمی ۸۵ به ۱۵) با آلودگی و کارایی گاز طبیعی خالص که توربوشارژر استفاده کرده‌اند؛ در یک موتور SI شش سیلندر، چهار زمانه، ۳،۱ لیتری، مقایسه شده‌اند. آنها در سرعت‌ها، بارها و نسبت‌های هم‌ارزی مختلف میزان CO ، CO_2 ، NO_x ، $BSHC$ ، CO ، دماهای خروجی و کارایی موتور را اندازه گرفته‌اند. با مخلوط نمودن سوخت هیدروژن و متان، دستیابی همزمان به سطوح پایین آلودگی‌های NO_x و هیدروکربن‌های نسوخته، به دست خواهد آمد. آزمایشات برای اندازه‌گیری آلودگی‌های یک موتور پرشده با مخلوط گاز طبیعی و تقریباً ۱۵ درصد حجمی هیدروژن طرح‌ریزی شده‌اند. مشخصات موتور مذکور عبارتست از: موتور 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،۸:۱.

بلاریگان و کلر^{۲۶} با درصدهای متان به هیدروژن برابر ۱۰۰ به صفر، ۷۰ به ۳۰ و ۰ به ۱۰۰ تحقیق کردند. [۲۳] آنها مطالعه تجربی و عددی با استفاده از کد CFD سه بعدی انجام دادند. ناکس، بازده حرارتی، BTDC و تغییرات نرخ‌های هم‌ارزی برای درصدهای مختلف متان و هیدروژن مقایسه شده‌اند. آنها گزارش کرده‌اند که ممکن است یک بازده بالا و آلودگی تقریباً صفر، با قدرت یکسان برای وسائط هیبریدی پرشده توسط هیدروژن یا ترکیب ۳۰ درصد هیدروژن و ۷۰ درصد گاز طبیعی به دست آید.

ونگ و کریم^{۲۷} تاثیرات جنبشی مخلوط سوخت‌های گازی با هیدروژن و احتراق پیش از موعد آنها در موتورها را مطالعه کردند. [۲۴] شرس‌تا و کریم^{۲۸} درصد نسبت‌های متان به هیدروژن ۱۰۰ به صفر، ۹۰ به ۱۰، ۸۰ به ۲۰، ۷۰ به ۳۰، ۲۰ به ۱۰ و ۱۰ به ۹۰ در نسبت‌های تراکم مختلف، توسط تغییر نرخ‌های هم‌ارزی را مورد بررسی قرار دادند. [۲۵] آنها بیان کردند که افزودن مقداری هیدروژن به متان

مشابه در گاز طبیعی به دست آمد. برای هر دو حالت NG و مخلوط CNG/H_2 : 85/15 وقتی که زمان جرقه BTDC افزایش می‌یابد؛ مقادیر BSFC کاهش می‌یابند. مقدار BSHC گاز طبیعی فشرده بیشتر از مخلوط مذکور است. برخلاف آلودگی $BSNO_x$ مخلوط CNG/H_2 : 85/15، که بیشتر از CNG است. اگر یک مبدل کاتالیستی به کار برده شود مقادیر $BSNO_x$ به شدت کاهش می‌یابند. گزارش رامان و همکاران^{۲۰} هیدروژن را یک افزودنی مفید برای گاز طبیعی می‌داند که قادر است عملکرد رقیق‌تری تحت شرایط بار جزئی را نتیجه دهد و BMEP در حالت گلوبی Throttle کاملاً باز، نزدیک به شرایط رقیق‌سوزی خواهد بود. علاوه بر آن، اگر آلودگی‌های هیدروکربنی یا مصرف سوخت با گاز طبیعی مقایسه شوند، مقادیر NO_x کاهش می‌یابند. [۱۵]

هوکسترا و همکاران^{۲۱} در درصد ترکیبات CNG/H_2 برابر با ۰/۱۰۰، ۱۱/۸۹، ۲۰/۸۰، ۲۸/۷۲ و ۳۶/۶۴ در یک موتور SI با توان ۱۷ اسب بخار و دور ۱۷۰۰ در دقیقه با تغییرات نسبت‌های هم‌ارزی، NO_x و هیدروکربن‌ها را اندازه‌گیری کردند. آنها دریافتند که با افزایش نسبت هم‌ارزی، NO_x افزایش و HC کاهش می‌یابد. همچنین کمترین حد NO_x در $\phi=0.625$ و با ۳۶ درصد هیدروژن در ترکیب به دست می‌آید [۱۶، ۱۷].

لیو و کریم^{۲۲} مشخصه کوبش در نسبت‌های متان به هیدروژن برابر ۰/۱۰۰، ۱۰/۹۰، ۳۰/۷۰، ۵۰/۵۰، ۷۰/۳۰ و ۱۰۰/۰ را مورد بررسی قرار دادند. [۱۸] آنها مدل‌ها را شبیه‌سازی کرده و داده‌های آن را با مقادیر موجود تجربی مشخصه کوبش مقایسه کردند. لیو و کریم بیان کردند که اگر دمای ورودی هیدروژن و متان بالا باشد؛ نواحی کوبش، حدود مقادیر تجربی خواهند بود. بنابراین هیدروژن با دمای ورودی کم، خطای زیادی را نسبت به داده تجربی خواهد داشت به این علت که آزاد شدن انرژی زیاد در نتیجه انتشار سریع شعله احتراق هیدروژن است.

داس^{۲۳} کاربرد مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی در موتور احتراق داخلی را بازمینی کرد. [۱۹] او به صورت شفاف بیان کرد که هیدروژن با گاز طبیعی فشرده ترکیب و باعث رقیق‌سوزی تحت شرایط بار جزئی می‌شود و باعث بهبود در BMEP خواهد شد. همچنین اختلاط کم هیدروژن با گاز طبیعی فشرده مزیت محیط زیستی را در پی خواهد داشت.

کریم درباره حد کوبش مخلوط‌های مختلف از هیدروژن و متان که در نسبت‌های هم‌ارزی و دماهای ورودی مختلفی هستند؛ تحقیق کرد. [۲۰] او بیان کرد که وقتی هیدروژن و متان با نسبت مقادیر کوچک ترکیب شوند؛ کیفیت مقاومت در مقابل کوبش بسیار عالی متان، کم نخواهد شد.

کریم و همکاران با نسبت‌های CH_4 به H_2 برابر ۰/۱۰۰، ۱۰/۹۰، ۲۰/۸۰، ۳۰/۷۰، ۴۰/۶۰، ۵۰/۵۰، ۶۰/۴۰، ۷۰/۳۰ و ۸۰/۲۰ و با تغییر نسبت‌های هم‌ارزی تست آزمایشگاهی انجام دادند. [۲۱] تحقیق آن‌ها پیرامون سرعت شروع شعله آشکار (برحسب متر بر ثانیه)، تفاوت قدرت خروجی، بازده خروجی متوسط تعیین شده، تاخیر در جرقه

²⁰ Raman et al

²¹ Hoekstra et al

²² Liu & Karim

²³ Das

²⁴ Average Combustion Duration

²⁵ Larsen & Wallace

²⁶ Blarigan & Keller

²⁷ Wong & Karim

²⁸ Shrestha and Karim

۳۰ درصد (برای نسبت حجمی ۴۰ درصد) را نتیجه می‌دهد. [۲۹] بوئر و فرست نتایج را با به کارگیری داده‌های [۲۹] برای سیکل احتراق موتور به طور همزمان با [۳۰] ارائه کردند.

کریم هیدروژن را به عنوان سوخت موتور SI به کار برد. او بیان کرد که دورنمای بسیار عالی برای دست‌یابی رضایت بخش به موتور SI با سوخت هیدروژن، وجود دارد. البته این مطلب به این موضوع بستگی دارد که آیا می‌توان هیدروژن را به میزان زیاد و البته اقتصادی تولید کرد که بایستی این سوال بطور مطمئن پاسخ داده شود [۳۱].

این نتایج ثابت می‌کنند که افزودن هیدروژن به متان، آلودگی‌های HC، CO و CO₂ را زمانی که تمایل به افزایش آلودگی‌های NO_x در سیستم وجود دارد کاهش می‌دهد. اگرچه غنی‌سازی هیدروژن کارکرد رقیق موتور را در پی دارد؛ اما کارکرد رقیق، کاهش NO_x را بدون اثر بر خروجی موتور^{۳۳} و کارایی حرارتی آن نتیجه می‌دهد. 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 می‌دهد. بنابراین کاهش آشکار آلودگی‌های NO_x از نتایج افزودن هیدروژن است.

در کنار کاهش گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های اتمسفر، غنی‌سازی گاز طبیعی با هیدروژن به شاخص‌های احتراق موتور نیز کمک می‌کند. افزودن هیدروژن، نسبت هم‌ارزی را در حد رقیق‌سوزی احتراق گاز طبیعی بدون افزایش زمان احتراق، کاهش می‌دهد که باعث بازده‌های حرارتی بالاتر و حدود آلودگی‌های پایینتر را نتیجه خواهد داد. علاوه بر این افزودن هیدروژن مقداری بهبود در BMEP را نشان می‌دهد.

آزمایشات نشان می‌دهند که درصد غنی‌سازی ۲۰ درصد-۳۰ درصد گاز طبیعی با هیدروژن، باعث کارکرد مطلوب موتور می‌شود. 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.

۳. مقایسه مخلوط‌های متان هیدروژن

در این بخش به بررسی مزایا و معایب سوخت‌هایی نظیر متان، هیدروژن و مخلوط‌های آنها از نظر آلودگی، کارکرد، کارایی و قابلیت استفاده پرداخته شده است. در مقایسه‌ها پارامترهای مؤثر زیادی نظیر نسبت تراکم، نسبت هم‌ارزی، سرعت موتور، حجم موتور، دما، فشار، قدرت، بار و زمان جرقه وجود دارند. همچنین در هر تحقیق وسایل مختلف اندازه‌گیری به کار گرفته شده‌اند.

در یک موتور SI، عملکرد را به‌ویژه زمانی که بر مبنای مخلوط‌های با نسبت هم‌ارزی نسبتاً پایین باشد؛ بهبود می‌بخشد. غلظت بهینه هیدروژن در مخلوط برای تولید قدرت مناسب و جلوگیری از کوبش ظاهری، حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد حجمی در محدوده شرایط مطرح شده می‌باشد.

سایرنس و راسل^{۲۹} درصدهای مخلوط گاز هیدروژن برابر ۱۰/۰، ۱۰/۱۰، ۲۰/۸۰ را بررسی کردند. آنها یک موتور احتراقی V8 کروسا در ۲۰۰۰ RPM، در سرعت ویژه ۳۸۰۰ دور در دقیقه و با نسبت تراکم ۸،۵:۱ تست کردند. آن‌ها موتور را با قطعه‌ای که مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن را در نسبت‌های مختلف فراهم می‌کند؛ مجهز کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که برای مخلوط متان و هیدروژن با درصد هیدروژن پایین (۲۰ درصد) بهبود محدودی در آلودگی‌ها به دست خواهد آمد چرا که هیدروکربن‌ها، NO_x کمی تولید می‌کنند.

در نهایت دستیابی به آلودگی‌های پایین بدون ایجاد تغییرات در خروجی ممکن نیست؛ برای کاستن آلودگی‌های هیدروکربنی، بایستی λ کمتر از ۱/۳ و بزرگتر از ۰/۷۷ باشد. به‌منظور تولید کم NO_x، بایستی λ نهایتاً مساوی ۱/۵ باشد [۲۶].

داس و همکاران راجع به کارایی حرارتی و BSFC سوخت گاز طبیعی فشرده و هیدروژن در موتور احتراق داخلی تحقیق کردند. آنها مشاهده کردند که BSFC کاهش و BTE بهبود می‌یابد. اضافه کردن هیدروژن به سیستم باعث افزایش BTE به اندازه ۳۱/۱۹ درصد در مقایسه با ۲۷/۵۹ درصد سوخت CNG می‌شود. [۲۷]

شودو و همکاران^{۳۱} درباره احتراق و آلودگی‌های ناشی از به کارگیری متان و هیدروژن تحقیق کردند؛ آنها یک موتور چهار زمانه تک سیلندر SI با قطر ۸۵ میلی‌متر، کورس ۸۸ میلی‌متر و با نسبت تراکم ۱۳ تست کردند و نتیجه گرفتند که کارایی حرارتی و آلودگی‌های NO_x ناشی از هیدروژن افزایش و هیدروکربن سوخته کاهش می‌یابد. این افزایش می‌تواند در مقدار کمتری با عقب انداختن زمان جرقه و بدون بدتر شدن کارایی حرارتی، برقرار شود. آنها تاثیرات پیشرفت احتراق به خصوص تحت شرایط رقیق‌سوزی ناشی از هیدروژن در مخلوط را به دست آوردند. رقیق‌سوزی باعث بهبود همزمان کارایی حرارتی و کاهش آلودگی‌های خروجی HC و NO_x می‌شود [۲۸].

بوئر و فورست^{۳۲} درباره تاثیر افزودن هیدروژن به عملکرد وسائط نقلیه با سوخت متان مطالعه کردند. آنها یک موتور تحقیقاتی تک سیلندر با نسبت تراکم ۸،۵:۱ را به کار بردند و قدرت ترمزی، ITE، BSNO، BTDC، BSFC، BSCO₂، BSCO، BSHC به هیدروژن ۱۰/۰، ۲۰/۸۰، ۴۰/۶۰، ۶۰/۴۰ و با تغییر نسبت‌های هم‌ارزی و سرعت (۷۰۰ دور در دقیقه و ۹۰۰ دور در دقیقه) تحلیل کردند.

افزودن هیدروژن تا ۶۰ درصد حجمی، افزایشی در قدرت ترمزی تا ۸ درصد (در $\lambda=1$) و کاهش BSFC تا ۱۴ درصد (از $\lambda=0.58$ تا 1) و همچنین کاهش در BSCO₂ تا ۲۶ درصد (از $\lambda=0.58$ تا $\lambda=1$) را نتیجه می‌دهد. BSCO تا ۴۰٪ (در $\lambda>0.95$) و BSHC تا ۶۰ درصد (از $\lambda=0.58$ تا 1) کاهش و پیک BSNO در $\lambda=0.83$ افزایشی تقریباً

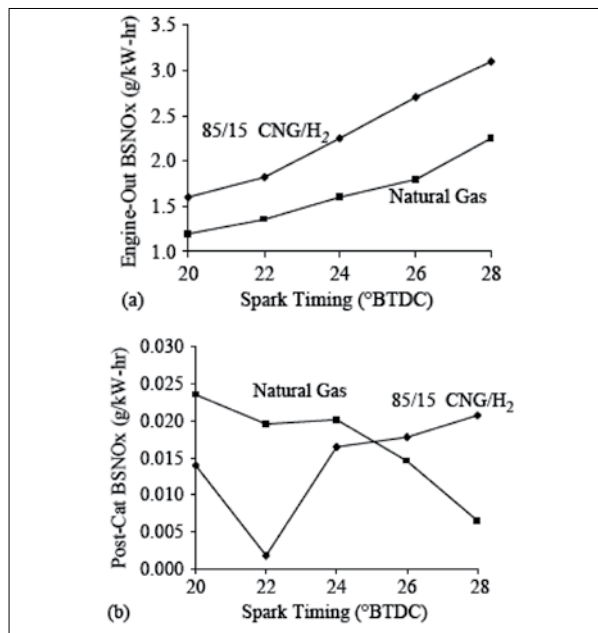
²⁹ Sierens and Rosseel

³⁰ Crusader

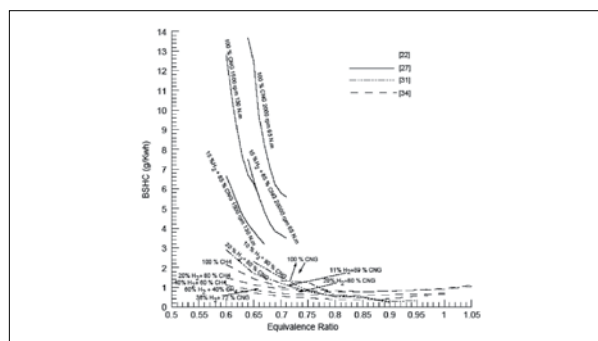
³¹ Shudo et al

³² Bauer and Forest

³³ sacrificing



شکل ۲. مقادیر BSNO_x (g/KWh) بر حسب زمان بندی جرقه (a) (BTDC^o) خروجی موتور (b) بعد از مبدل کاتالیستی



شکل ۳. مقادیر هیدروکربن های ویژه ترمزی BSHC (g/KWh) در مطالعات مختلف

مطالعات زیادی درباره کاهش NO_x ناشی از استفاده هیدروژن در یک موتور احتراق داخلی صورت گرفته است. بطور کلی شناخته شده ترین روش های کاهش NO_x سیستم بازگرداندن گاز خروجی EGR^{۳۷} و نسبت هوای اضافی (مخلوط هوا هیدروژن رقیق) می باشند. یوراچ و همکاران^{۳۸} آزمایشاتی را در $\phi \geq 0.5$ بر روی موتور کامیون تغذیه شده با هیدروژن انجام دادند و یافتند که آلودگی های NO_x خروجی تنها ۱۰ درصد حد آلودگی آن در اروپاست. [۳۲] آلنبای و همکاران^{۳۹} آزمایش هایی را بر

۱-۳. مقایسه زیست محیطی

این قسمت به سه بخش تقسیم شده است:

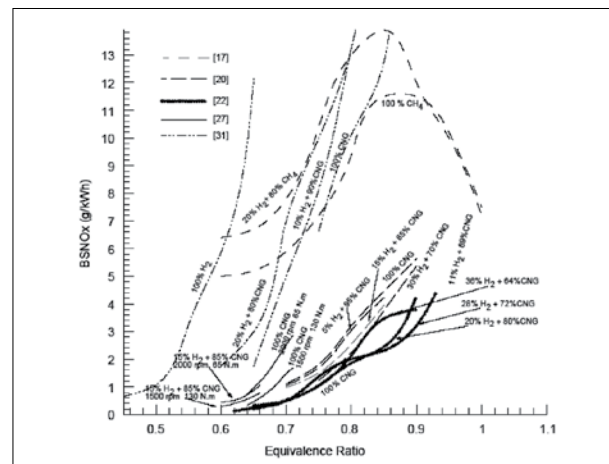
۱. مقایسه عبارات آلودگی NO_x

۲. مقایسه عبارات آلودگی هیدروکربن ها

۳. مقایسه عبارات آلودگی CO و CO₂

۱-۱-۳. مقایسه عبارات آلودگی NO_x

اکسیدهای نیتروژن به یک مخلوط دو جزئی اشاره می کنند. مونواکسید نیتروژن و دی اکسید نیتروژن. مونواکسید نیتروژن یک گاز بی رنگ است در حالی که دی اکسید نیتروژن نور خورشید را در طول موج های کوتاه به شدت جذب می کند (آبی و سبز به نظر می رسد).



شکل ۱. مقادیر BSNO_x (g/KWh) بر حسب نسبت های هم آری در مطالعات مختلف

شکل ۱ مقادیر BSNO_x (g/kWh) در مقابل نسبت های هم آری مطالعات مختلف را نشان می دهد [۱۲، ۱۵، ۱۷، ۲۲، ۲۶]. همان طور که در این شکل دیده می شود؛ بر طبق مطالعات، با افزایش درصد هیدروژن مقادیر BSNO_x افزایش یا کاهش می یابند. بر طبق مراجع [۱۲، ۱۶، ۲۲، ۲۶] و بوئر و فرست [۲۹] (هیچ مقدار داده ای روی شکل نیست) با افزایش درصد هیدروژن، مقادیر BSNO_x افزایش می یابند. ملاحظه می شود مقادیر BSNO_x که توسط سواين و همکاران، سیرنس^{۳۴} و روسیل^{۳۵} به دست آمده است؛ بالا است [۱۲، ۲۶، ۲۹]. بوئر و فرست حدود (g/kWh) ۱۶، ۱۹، ۲۱ به ترتیب برای مخلوط های 100%CH₄، 20%H₂+80%CH₄، 40%H₂+60%CH₄، 60%H₂+40%CH₄، 80%H₂+20%CH₄، 100% H₂ اما در آزمایشات انجام شده توسط رامان و همکاران [۱۵]، با افزایش درصد هیدروژن، مقادیر BSNO_x کاهش می یابند. علاوه بر این اگر نسبت های هم آری کاهش یابند مقادیر BSNO_x نیز به مقادیر پایین خواهند رسید. جالب است که توجه کنیم که هوکسترا و همکاران [۱۷] به خوبی لارسن و والاس [۲۲] آلودگی به شدت پایین NO_x را به دست آوردند. علاوه بر این، بلاریگان و کلر^{۳۶} با مدل سازی سه بعدی CFD [۲۳] به حدود آلودگی صفر EZEV LIMITS دست یافتند.

³⁴ Sierens

³⁵ Rosseel

³⁶ Blarigan & Keller

³⁷ Exhaust Gas Recirculation

³⁸ Jorach et al

³⁹ Allenby et al

او دریافت که استفاده از EGR یک روش موثر برای کاستن آلودگی های NO_x به کمتر از ۱ در میلیون و افزایش گشتاور و خروجی موتور است. علاوه بر این، استفاده از یک مبدل کاتالیستی، NO_x را به مقادیر بسیار پایینی کاهش می دهد.

شکل ۲ مقادیر $BSNO_x$ (g/KWh) را در برابر زمان جرقه BTDC^۰ نشان می دهد. مقادیر بعد از (a) خروجی از موتور و (b) مبدل کاتالیستی پیشرفته به دست آمده اند. [۱۴] در شکل 2a در زمان جرقه BTDC 20 در مخلوط CNG/H_2 برابر $15/85$ ، مقدار $BSNO_x$ کمترین است.

مقادیر $BSNO_x$ در شکل 2b خیلی پایین هستند. در حالی که مقادیر $BSNO_x$ گاز طبیعی بزرگتر از مقادیر مخلوط گاز هیدروژن ($15/85$) در شکل 2a هستند. مقادیر $BSNO_x$ مخلوط $85/15$ CNG/H_2 بین ۲۰ و ۲۵ درجه BTDC، در شکل 2b کمتر از مقدار آن در سوخت گاز طبیعی فشرده است. این مقادیر خیلی کوچک هستند. بنابراین ممکن است مقادیر خیلی کم NO_x با تنظیم بهینه پیشروی شعله و استفاده از مبدل کاتالیستی پیشرفته به دست آید.

۳-۱-۲. مقایسه عبارات آلودگی هیدروکربن ها

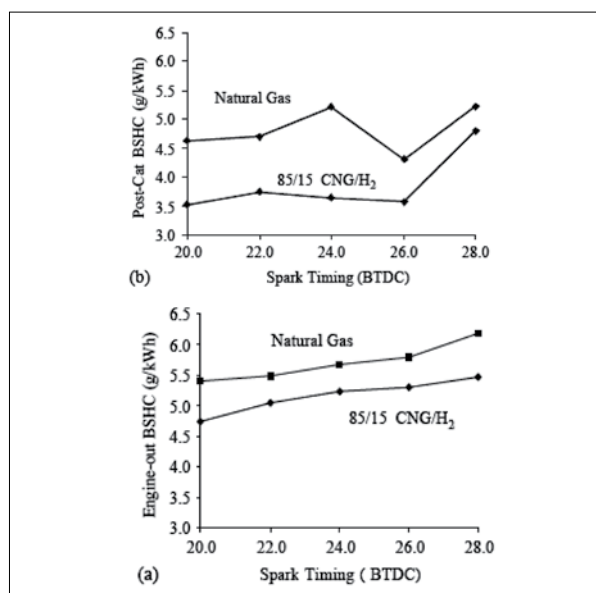
شکل ۳ مقادیر $BSHC$ (g/KWh) را در تحقیقات مختلف نشان می دهد [۱۷، ۲۲، ۲۶، ۲۹]. همان طور که در این شکل دیده می شود؛ با افزایش درصد هیدروژن و نسبت هم آری، مقادیر $BSHC$ کاهش می یابند. اگر ۱۰۰ درصد سوخت، هیدروژن باشد؛ مقدار $BSHC$ صفر خواهد شد. می توان گفت با افزایش هیدروژن مقادیر $BSHC$ کاهش می یابند. سواين و همکاران با افزایش نسبت های هم آری، بیشترین مقادیر $BSHC$ را به دست آوردند. در این مطالعات بیشترین مقدار حدود 64 g/KWh برای مخلوط ۲۰ درصد هیدروژن و ۸۰ درصد متان با $\phi=0.60$ به دست آمد. بنابراین آلودگی های هیدروکربنی مخلوط ۲۰ درصد هیدروژن و ۸۰ درصد متان کمتر از متان خالص است. [۱۲] در این شکل، مقادیر $BSHC$ مرجع [۲۲] در بالاترین مقدار خود است. مقادیر $BSHC$ با افزایش بار موتور، افزایش پیدا می کند.

در شکل ۴ مقادیر $BSHC$ (g/KWh) بر حسب زمان جرقه BTDC درجه نشان داده است. اندازه گیری ها بعد از (a) خروجی موتور (b) مبدل کاتالیستی پیشرفته به دست آمده است. [۱۴] در شکل 4a مناسب ترین زمان جرقه در ۲۰ درجه BTDC است. بعد از مبدل کاتالیستی مقادیر $BSHC$ به ترتیب در حدود ۱۵ درصد و ۲۰ درصد برای گاز طبیعی و مخلوط گاز طبیعی هیدروژن ($15/85$) کاهش می یابد. با استفاده از مبدل کاتالیستی، کاهش هیدروکربن ها در مخلوط مذکور بیشتر از گاز طبیعی است.

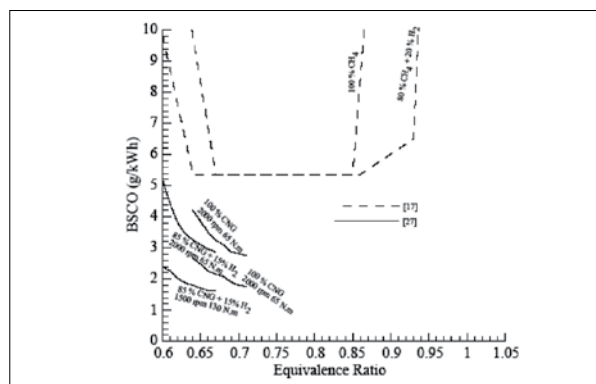
۳-۱-۳. مقایسه بر مبنای آلودگی های CO و CO_2

لارسن و والاس مقادیر CO در $\phi=0.65$ ، 1500Rpm استفاده از یک مخلوط ۸۵ به ۱۵ گاز طبیعی و هیدروژن و خالص گاز را به ترتیب 1.65 g/KWh و 2.41 g/KWh به دست آوردند. [۲۲] یوسف ترکیبات

سیستم EGR موتورهای NG غنی از هیدروژن انجام دادند. [۳۳] سیستم EGR با غلظت های هیدروژن برابر ۰، ۱۰، ۱۱، ۱۶، ۱۶/۵ و ۲۲ آزمایش شد. از آنجایی که درصد های EGR افزایش داده شده است؛ مقدار هیدروژن نیز افزایش می یابد. آنها با افزایش درصد EGR آلودگی های NO_x را کاهش دادند. اما آلودگی های HC با افزایش درصد EGR اندازه زیادی را نشان دادند. یعنی با کاهش دما نرخ اکسیداسیون کمتر و هیدروکربن های خروجی از موتور بیشتر شدند. داس یک موتور CFR تغذیه شده با هیدروژن در نسبت های تراکم مختلف و در محدوده $0.3-1.3$ ϕ آزمایش کرد. [۳۴] در حدود نسبت های $0.95-1.05$ ϕ مقادیر NO_x به ماکزیمم مقدار خود می رسند. در حالت مخلوط های هوا- هیدروژن رقیق، مقادیر NO_x در اندازه های پایینی به دست می آیند. هفل^{۴۰} آلودگی NO_x و داده های عملکرد یک موتور احتراق داخلی EGR با سوخت هیدروژن را در ۱۵۰۰ دور در دقیقه و ۳۰۰۰ دور در دقیقه تحقیق کرد. [۳۵، ۳۶]



شکل ۴. مقادیر $BSHC$ (g/KWh) بر حسب زمان بندی جرقه (a) (BTDC^۰) خروجی موتور (b) بعد از مبدل کاتالیستی



شکل ۵. مقادیر $BSCO$ (g/KWh) بر حسب نسبت های هم آری در مطالعات مختلف

سرعت تا ۹۰۰ دور در دقیقه تقریباً ۲۵g/KWh (۳ درصد) BSCO₂ را افزایش می‌دهد. [۲۹] مقادیر BSCO₂ در ۷۰۰Rpm کمتر از ۹۰۰ دور در دقیقه است.

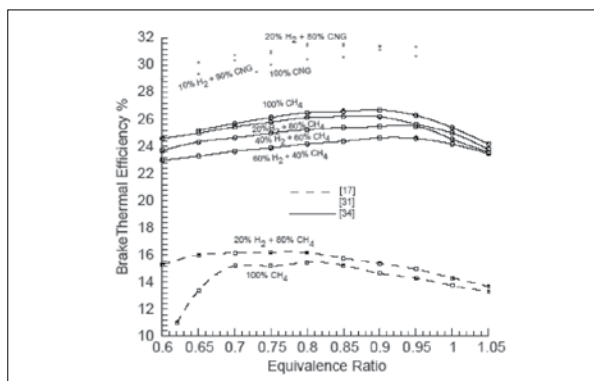
۳-۲. مقایسه فنی

این بخش می‌تواند به چهار قسمت مناسب تقسیم شود که به اختصار عبارتند از:

- مقایسه بر مبنای BTE
- مقایسه بر مبنای ITE
- مقایسه بر مبنای مشخصه‌های کوبش
- مقایسه بر مبنای BSFC

۳-۲-۱. مقایسه بر مبنای BTE

شکل ۷ BTE را در مقابل نسبت هم‌ارزی [۱۲،۲۶،۲۹] نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود BTE مخلوط ۲۰% H₂+80% درصد متان است. [۱۲] از آنجایی که موتور تک سیلندر در تست استفاده شده است؛ انتظار می‌رود که کارایی در مقایسه با تستی که یک موتور ۴ سیلندر به کار برده شده است کمتر باشد. برطبق آزمایشات در [۲۹]، مقادیر BTE با افزایش درصد هیدروژن کاهش می‌یابند. بیشترین مقدار کارایی در محدوده نسبت‌های هم‌ارزی بین ۰.۷ و ۰.۹ هستند. بر طبق [۲۹] بیشترین بازده در حدود $\phi=0.75-0.8$ است. همچنین کارایی موثر در حدود $\phi=0.75-0.80$ نسبت هم‌ارزی است. [۱۲،۲۶،۲۹]



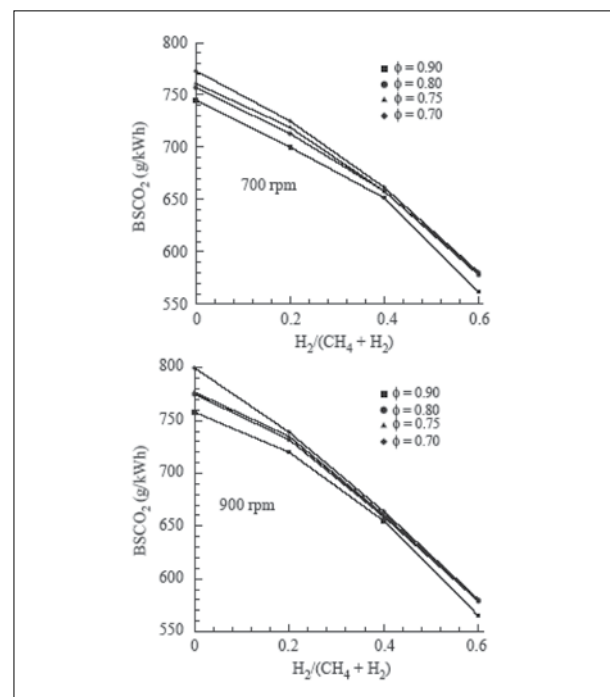
شکل ۷. راندمان حرارتی ترمزی بر حسب نسبت هم‌ارزی

۳-۲-۲. مقایسه بر مبنای ITE

در بررسی کریم و همکاران، متوسط کارایی خروجی معین (ITE میانگین) بر حسب نسبت هم‌ارزی و درصد هیدروژن، به میانگین ITE بر حسب درصد هیدروژن و نسبت هم‌ارزی تبدیل می‌شود. شکل ۸ بازده حرارتی معین بر حسب مخلوط‌های هیدروژن و متان را نشان می‌دهد. شکل 8a متوسط ITE در ۱۰ درجه BTDC را نشان می‌دهد. بیشترین بازده خروجی معین متوسط، برابر ۴۰ درصد بوده که از مخلوط ۷۰ درصد متان و ۳۰ درصد هیدروژن به دست می‌آید. بر اساس این شکل‌ها (a، b و c) میانگین ماکزیمم ITE حدود ۵۰

مختلف سوخت موتور به علاوه CH₄/H₂:80/20 را اندازه گرفت و به کاهشی کوچک اما مهم در خروجی BSCO دست یافت. [۱۲،۱۳] آزمایشات بوئر و فرست تاکید می‌کند که تولید CO بسیار وابسته به احتراق استوکیومتری و کمتر وابسته به موتور است. آنها کاهش کلی در BSCO با افزودن H₂ به علت کاهش کربن در سوخت را بدست آوردند. آنها با افزودن ۶۰٪ حجمی هیدروژن، یافتند که BSCO به (60/40 CH₄/H₂) 20g/KWh در $\phi=1.0$ کاهش می‌یابد. در ناحیه خیلی رقیق ($\phi < 0.4$)، افزایش در BSCO همراه با افت قدرت ناشی از احتراق ناقص قابل توجه است. [۲۹]

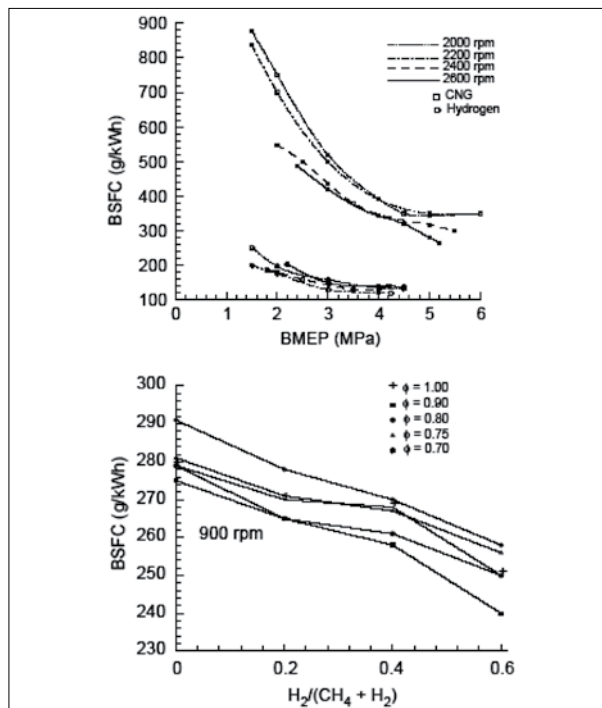
شکل ۵ مقادیر آلودگی BSCO حاصل از تحقیقات بیشتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود؛ در مقدار ϕ بین ۰.۶۵ و ۰.۸، مقادیر BSCO به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد.



شکل ۶. مقادیر دی‌اکسیدکربن ویژه ترمزی BSCO₂ (g/KWh) بر حسب نسبت هم‌ارزی در Rpm 900 و Rpm 700

شکل ۶ مقادیر BSCO₂ ناشی از درصد هیدروژن اضافی در دور موتور ۷۰۰ دور در دقیقه و ۹۰۰ دور در دقیقه نشان می‌دهد. [۲۹] همان‌طور که در شکل دیده می‌شود با افزایش درصد هیدروژن مقادیر آلودگی BSCO₂ کاهش می‌یابند. آنها یافتند که BSCO₂ در نسبت‌های هم‌ارزی رقیق، افزایش می‌یابد همان‌گونه که کاهش قدرت از کاهش غلظت دی‌اکسیدکربن در خروجی، نسبتاً بیشتر است.

افزودن هیدروژن تا ۶۰ درصد، تقریباً ۲۵۰ g/KWh (۲۶ درصد) BSCO₂ را در نسبت‌های هم‌ارزی یکسان کاهش می‌دهد. افزایش در



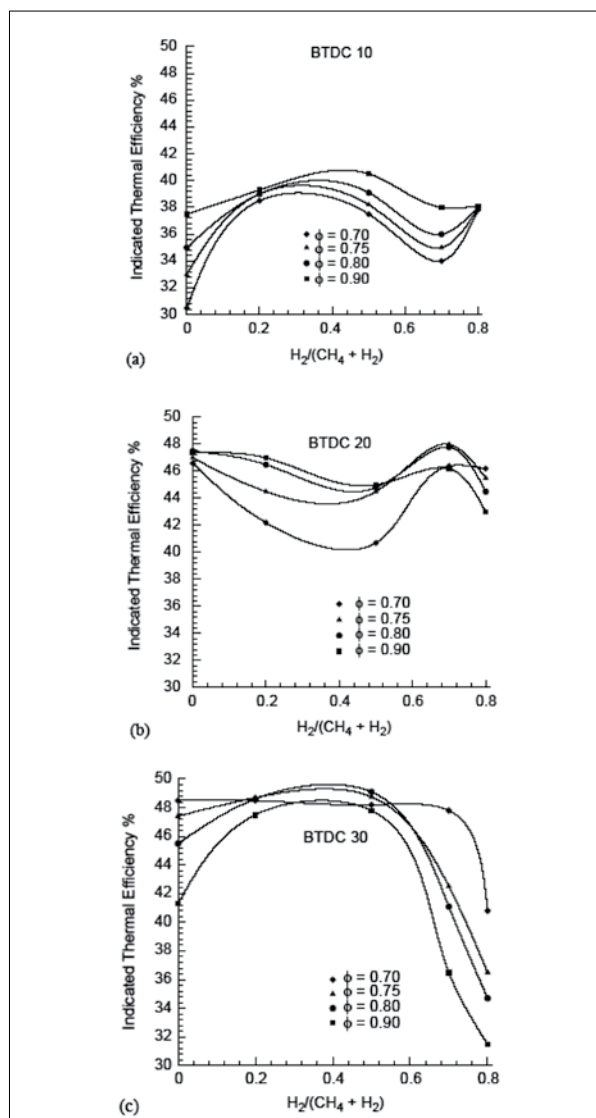
شکل ۹. مقادیر مصرف سوخت ویژه ترمزی (BSFC (g/KWh) بر حسب نسبت‌های هم‌ارزی در 900 Rpm و بر حسب BMEP (mpa)

۳-۲-۴. مقایسه بر مبنای BSFC

شکل ۹ مقادیر BSFC (g/KWh) را بر حسب نسبت هم‌ارزی در دور ۹۰۰ دور در دقیقه نشان می‌دهد [۲۹] (a) بر طبق BMEP (mpa) [۲۷] و (b) بر طبق [۲۹] تفاوت در مقادیر BSFC (g/KWh) در ۹۰۰ و ۷۰۰ دور در دقیقه تقریباً مساوی هستند. زمانی که درصد هیدروژن در مخلوط افزایش یابد BSFC کاهش خواهد یافت. در همان زمان و در نسبت هم‌ارزی حدود ۰/۹، مقادیر BSFC به مینیمم می‌رسند. در شکل 9b مقادیر BSFC گاز طبیعی در مقایسه با هیدروژن به اندازه کافی بزرگ‌ترند. وقتی سوخت هیدروژن به کار می‌رود در ۲۲۰۰ دور در دقیقه، BSFC در مینیمم مقدار است. ولی وقتی گاز طبیعی به عنوان سوخت به کار می‌رود، BSFC در ۲۶۰۰ دور در دقیقه مینیمم می‌شود.

بر طبق شکل 9a، در مخلوط $CH_4/H_2 : 80/20$ مقادیر BSFC حدود ۵ درصد پایین‌تر از مقادیر BSFC 100% CH_4 است [۲۹]. بر طبق شکل 9b، در مخلوط ۱۰۰ درصد هیدروژن مقادیر BSFC، تقریباً ۳،۵ برابر پایینتر از ۱۰۰ درصد متان است. [۳۷] به این دلیل که وزن هیدروژن نسبت به متان سبک‌تر است. ارزانترین روش تولید هیدروژن، تبدیل بخار و گران‌ترین روش، الکترولیز است. یک مخلوط گاز طبیعی فشرده و هیدروژن با درصد کمتر هیدروژن قیمت بسیار معقول‌تری دارد. علاوه بر این در مخلوط $CH_4/H_2 : 80/20$ کارایی حدود ۱۰ درصد بالاتر از مخلوط با ۶۰ درصد گاز طبیعی فشرده است که این کارایی وابسته به ϕ و زمان جرعه است. اگر هم ملاحظه کارایی و

درصد است. در شکل ۹ با افزایش BTDC میانگین ITE نیز افزایش می‌یابد. بهترین زمان جرعه 30 BTDC است. بهترین نسبت هم‌ارزی $\phi = 0.7-0.8$ و بالاترین مقدار کارایی در حدود ۲۰ درصد هیدروژن دیده شده است. [۲۰، ۲۱]



شکل ۸. راندمان حرارتی تعیین شده بر حسب مخلوط‌های H_2 و CH_4 (a, b, c) به ترتیب در ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه BTDC

۳-۲-۳. مقایسه بر مبنای مشخصه‌های کوبش

مشخصه‌های کوبش مخلوط‌های گاز طبیعی و هیدروژن مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۸، ۲۰، ۲۱، ۳۱]. مشخصه‌های مقاومت کوبش گاز طبیعی بسیار عالی است. اگر غلظت هیدروژن به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد؛ کوبش زودتر اتفاق می‌افتد و بر خلاف افزایش دامنه کارکرد موتور، ناحیه کوبش وسیع‌تر خواهد شد. [۲۰، ۲۱] بنابراین در درصدهای نسبتاً پایین هیدروژن، مشخصه‌های ضد کوبش متان را تعیین می‌کنیم.

ance, emissions, fuel storage, safety, cost and transitions. University of California, Davis, CA, USA, SAE paper 881656.

[4] Aslan E, Ergeneman M, Sorusbay C. Use of hydrogen in internal combustion engine as fuel. Istanbul Technical University: Istanbul; 1991.

[5] Adt RR, Swain MR. The hydrogen/methanol-air breathing automobile engine. The Hydrogen Economy Miami Energy Conference, 18-20 March, Miami Beach, USA, 1974. p.S10-38-48.

[6] Tiashen D, Jingding L, Yingqing L. Combustion-supporting fuel for methanol engines: hydrogen. The International Symposium on Hydrogen Systems, Beijing, China, 7-11 May, 1985. p. 105-13

[7] Adamson KA, Pearson P. Hydrogen and methanol: a comparison of safety, economics, efficiency and emissions. J Power Source 2000; 86:548-55.

[8] Ogden JM, Williams RH, Larson ED. Societal lifecycle costs of cars with alternative fuels/engines. Energy Policy 2004; 32: 7-27.

[9] 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.

[10] Yusuf MJ. In cylinder Oame front growth rate measurement of methane and hydrogen enriched methane fuel in a spark ignited internal combustion engine. Master thesis, University of Miami, 1990.

[11] Dulger Z. Numerical modeling of heat release and Oame propagation for methane fueled internal combustion engines with hydrogen addition. PhD thesis, University of Miami, 1991.

[12] Swain MR, Yusuf MJ, Dulger Z, Swain MN. The eDects of hydrogen addition on natural gas engine operation. SAE paper 932775, 1993.

[13] Yusuf MJ. Lean Burn natural gas fueled engines: engine modification versus hydrogen blending. PhD thesis, University of Miami, 1993.

[14] Wallace JS, Cattelan AI. Hythane and CNG fueled engine exhaust emission comparison. Proceedings 10th World hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, USA, June 20-24, 1994. p. 1761-70.

[15] Raman V, Hansel J, Fulton J, Brudery D. Hythane—an ultraclean transport fuel. Proceedings, 10th World hydrogen

هم ملاحظه ارزاترین روش تولید هیدروژن شود قیمت‌های مخلوط ۲۰/۸۰، CNG/H₂: 90/10 به ترتیب حدود ۱۵ درصد و ۸ درصد بالاتر از گاز طبیعی با $\phi=0.8$ است.

۴. نتیجه گیری

با توجه به مطالعات صورت گرفته در این تحقیق می‌توان بیان نمود که با افزایش حجم هیدروژن، مقادیر آلودگی NO_x به‌طور کلی افزایش می‌یابند. اگرچه با به‌کارگیری یک مبدل کاتالیستی، یک سیستم EGR یا تکنیک رقیق‌سوزی، مقادیر آلودگی NO_x می‌توانند به حداقل مقادیر کاهش یابند.

• با افزایش درصد هیدروژن، مقادیر آلودگی CO₂، HC و CO کاهش می‌یابند.

• تحت شرایط معلوم (۳۰ BTDC و حدود ۲۰ درصد هیدروژن) مقدار کارایی می‌تواند افزایش یابد.

• گاز طبیعی تقریباً مشخصه‌های ضدکوبش کاملی دارد و این مشخصه‌ها به‌طور آشکاری با افزودن مقدار کمی هیدروژن تغییر نمی‌کنند.

• با افزایش هیدروژن، مقادیر BSFC کاهش می‌یابند.

• قیمت مخلوط‌های CNG/H₂ برابر ۲۰/۸۰ و ۱۰/۹۰ حدوداً به ترتیب ۱۵ درصد و ۸ درصد بیشتر از گاز طبیعی است.

در نتیجه از دیدگاه زیست محیطی، اقتصادی و فنی، مخلوط گاز طبیعی با مقادیر نسبتاً کم هیدروژن می‌تواند به‌طور قابل توجهی مشخصه‌های آلودگی موتورهای احتراق داخلی را بهبود بخشد. اگرچه استفاده گسترده از تکنولوژی سوخت هیدروژن مسائلی را در ارتباط با تولید، حمل و نقل، ذخیره و قیمت پدید می‌آورد؛ به‌دلیل این‌که هیدروژن خیلی گران‌تر از سوخت‌های فسیلی است؛ استفاده از آن به‌عنوان سوخت وسیله نقلیه بر مبنای اقتصادی تعیین خواهد شد. به‌منظور نفوذ گسترده و قابل رقابت در بازار سوخت، قیمت‌ها تعیین‌کننده خواهند بود. اما پتانسیل غیرقابل بحث هیدروژن در کاستن گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌های اتمسفر و نیز فرصت دستیابی به یک سوخت تولید شده از منابع تجدیدپذیر مختلف، هیدروژن را به‌عنوان کاندید اصلی برآوردن تقاضای انرژی جهانی همواره نگه خواهد داشت.

منابع

- [1] Cripp H. Energy and the Environment. http://eco.gn.apc.org/pubs/energy_and_environment.html 1538 S.O. Akansu et al. / International Journal of Hydrogen Energy 29 (2004) 1527 – 1539
- [2] Weaver CS. Natural gas vehicles—a part of the state of art sierra research inc. Sacramento, CA, USA, SAE paper 892133,1989.
- [3] DeLuchi MA, Johnston RA, Sperling D. Methanol vs. natural gas vehicles: a comparison of resource supply, perform-

[29] Bauer CG, Forest TW. Effect of hydrogen addition on performance of methane-fueled vehicles. Part I: effect on S.I. engine performance. *Int J Hydrogen Energy* 2001; 26:55–70.

[30] Bauer CG, Forest TW. Effect of hydrogen addition on performance of methane-fueled vehicles. Part II: driving cycle simulation. *Int J Hydrogen Energy* 2001;26:71–90.

[31] Karim GA. Hydrogen as a spark ignition engine fuel. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 28:569–77.

[32] Jorach R, Enderle C, Decker R. Development of a low-NOx truck hydrogen engine with high specific power output. *Int J Hydrogen Energy* 1997; 22:423–7.

[33] Allenby S, Chang W-C, Megaritis A, Wyszynski ML. Hydrogen enrichment: a way to maintain combustion stability in a natural gas fueled engine with exhaust gas recirculation the potential of fuel reforming. *Proc Instr Mech Eng Part D* 2001; 215:405–18.

[34] Das LM. Hydrogen engine: research and development (R&D) programmes in Indian Institute of Technology (IIT), Delhi. *Int J Hydrogen Energy* 2002; 27:953–65.

[35] HeDel JW. NOx emission and performance data for a hydrogen fueled internal combustion engine at 1500 rpm using exhaust gas recirculation. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 28:901–8.

[36] HeDel JW. NOx Emission reduction in a hydrogen fueled internal combustion engine at 3000 rpm using exhaust gas recirculation. *Int J Hydrogen Energy* 2003; 28: 1285–92.

[37] Bailey PS, Assessment of potential future markets for the production of hydrogen from water in Canada. International Energy Agency Report, 1980.

[38] <http://www.energy.gov.ab.ca/cmnn/images/FactGasRebate.pdf>.

پیوست: فهرست علائم و اختصارات

φ: نسبت هم‌آزری

BMEP: فشار موثر متوسط ترمزی

BSCO: تولید ویژه مونواکسید کربن ترمزی، g/KWh

BSCO₂: تولید ویژه دی‌اکسید کربن ترمزی، g/KWh

BSFC: مصرف سوخت ویژه ترمزی

BSHC: تولید ویژه هیدروکربن‌های نسوخته ترمزی، g/KWh

BSNOX: تولید ویژه اکسیدهای نیتروژن ترمزی، g/KWh

BTDC: پیش از نقطه مرگ بالا

BTE: راندمان حرارتی ترمزی

ITE: راندمان حرارتی تعیین شده

SI: احتراق جرقه‌ای

Energy Conference, Cocoa Beach, USA, June 20–24, 1994.

p. 1797–806.

[16] Hoekstra RL, Collier K, Mulligan N, Demonstration of hydrogen mixed gas vehicles, 10th World hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, USA, June 20–24, 1994.

[17] Hoekstra RL, Collier K, Mulligan N, Chew L. Experimental study of clean burning vehicle fuel. *Int J Hydrogen Energy* 1995; 20:737–45.

[18] Liu Z, Karim GA. Knock characteristics of dual-fuel engines fueled with hydrogen fuel. *Int J Hydrogen Energy* 1995; 20: 919–24.

[19] Das LM. Utilization of hydrogen-cng blends in internal combustion engine, 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Germany, and June 23–28, 1996. p. 1513–35.

[20] Karim GA. Hydrogen as an additive to methane for engine applications. 11th World Hydrogen Energy Conference, Stuttgart, Germany, June 23–28, 1996. p. 1921–526.

[21] Karim GA, Wierzba I, Al-Lousi Y. Methane–hydrogen mixtures as fuels. *Int J Hydrogen Energy* 1996; 20:625–31.

[22] Larsen JF, Wallace JS. Comparison of emissions and efficiency of a turbocharged lean-burn natural gas and hydrogen-fueled engine. *J Eng Gas Turbines Power* 1997; 119:218–26.

[23] Blarigan PV, Keller JO. Hydrogen fueled internal combustion engine designed for single speed/power operation. *Int J Hydrogen Energy* 1998; 23:603–9.

[24] Wong YK, Karim GA. A kinetic examination of the effects of the presence of some gaseous fuels and preignition reaction products with hydrogen in engines. *Int J Hydrogen Energy* 1999; 24:473–8.

[25] Shrestha SO, Karim GA. hydrogen as an additive to methane for spark ignition engine applications. *Int J Hydrogen Energy* 1999; 24:577–86.

[26] Sierens R, Rosseel E. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. *J Eng Gas Turbines Power* 2000; 122:135–40.

[27] Das LM, Gulati R, Gupta PK. A comparative evaluation of the performance characteristics of a spark ignition engine using hydrogen and compressed natural gas as alternative fuels.

Int J Hydrogen Energy 2000; 25:783–93.

[28] 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.