مقاله

بررسی عملکرد موتورهای درونسوز با تکیه بر مطالعهٔ روش‌های ترکیبی استفاده از هیدروژن با گاز طبیعی و تأثیر آن بر کارکرد موتور

سیاوش گرمسیری‌نژاد، کارشناس مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان
sgarmsiry@gmail.com

نیما غیاثی طبری، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دشتستان
ghiasi@diau.ac.ir

چکیده

در این مقاله پژوهش‌هایی که تاکنون دربارهٔ ترکیب هیدروژن و گاز طبیعی انجام شده است به‌طور جامع بازبینی می‌شود. یک روش مؤثر برای جبران نواقص سوختی و کند سوختن گاز طبیعی، مخلوط‌کردن آن با سوخت‌های دیگر است؛ سوخت‌هایی که دارای حد اشتعال‌پذیری بالایی باشند. به‌نظر می‌رسد که هیدروژن به‌دلیل اشتعال‌پذیری بالا و سرعت زیاد سوختن، بهترین گزینهٔ گازی است. ترکیب گاز طبیعی با هیدروژن، نسبت هوای اضافی مخلوط سوخت را افزایش می‌دهد و سبب کاهش فشار مؤثر متوسط ترمزی می‌شود. همچنین با توجه به قابلیت اشتعال‌پذیری زیاد هیدروژن، افزودن آن به گاز طبیعی می‌تواند سرعت سوختن مخلوط را افزایش دهد. به‌طور کلی، افزودن هیدروژن به گاز طبیعی سبب کاهش آلاینده‌های منوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود، از طرفی میزان اکسیدهای نیتروژن را نیز افزایش می‌دهد. از جمله دلائل افزایش اکسیدهای نیتروژن می‌تواند ناکارآمدی کاتالیزور باشد که اگر یک مبدل کاتالیستی سه‌راهه در شرایط کاری خوب؛ یعنی در دمای کاملاً گرم ۴۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد یا بیشتر، کار کند، می‌تواند ۹۸ تا ۹۹ درصد از مونوکسید کربن، ۹۵ درصد از اکسیدهای نیتروژن و بیش از ۹۵ درصد از هیدروکربن‌ها را ازآلاینده‌های گاز خروجی برطرف کند.

واژگان کلیدی: هایتن[1]، گاز طبیعی فشرده، هیدروژن، موتور درونسوز، آلاینده

مقدمه

امروزه تغییرات نامطلوب آب‌وهوا پیچیده‌ترین مسئلهٔ پیش روی بشر است. انتشار دی‌اکسید کربن ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی، از عوامل مهم گرم‌شدن کرهٔ زمین شناخته می‌شود. انتشار این آلایندهٔ زیست محیطی از ۲۰/۷ میلیارد تن در سال ۱۹۹۰ به ۳۲/۵ میلیارد تن در سال

۲۰۰۶ رسیده و به‌تازگی نیز ۳۵ درصد سریع‌تر از آنچه انتظار می‌رفته، رشد داشته است [۱]. امروزه بیشتر انرژی‌های مورد استفاده سوخت‌های فسیلی‌اند. سوختن این سوخت‌ها ضایعاتی چون خاکستر را برجای می‌گذارند که این ضایعات آثار زیان‌بار بر محیط زیست خواهند داشت. استفادهٔ پیوسته از مقادیر زیاد سوخت فسیلی خطری جدی برای محیط زیست به‌حساب می‌آید و این در حالی است که منابع سوخت‌های فسیلی محدود است. موضوع مهم دیگر در رابطه با نفت، آلودگی‌های برجای مانده نظیر مونوکسید کربن، اکسیدهای نیتروژن، دی‌اکسید کربن و هیدروکربن‌هاست [۲]. امروزه با توجه به قیمت زیاد بنزین و آلایندگی بالای خودروهای بنزین‌سوز داخل کشور، همچنین حجم بالای واردات بنزین از خارج، در ایران نیاز مبرمی به استفاده از یک سوخت جایگزین احساس می‌شود. سوخت‌های جایگزین غالباً ارزان‌تر از بنزین‌اند، از منابع تجدیدپذیر به‌دست می‌آیند و آلایندگی کمتری نسبت به بنزین دارند. استفاده از سوخت‌های جایگزین، و در رأس آن هیدروژن، روشی مؤثر در کاهش آلایندهٔ سوخت‌های فسیلی است. اما چالش‌های پیش روی این سوخت از قبیل فناوری تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن در خودرو سبب شده است تاکنون تعداد محدودی از شرکت‌های خودروساز به‌سمت استفاده از هیدروژن خالص در خودرو گام بردارند.

نخستین موتور هیدروژنی، در سال ۱۸۲۰ م، توسط رورند سیسل جیمز[۲] ساخته شد. این موتور مشابه موتور بخار کار می‌کرد، با این تفاوت که در آن از هیدروژن برای راندن پیستون استفاده می‌شود. اگرچه موتور جیمز به‌طور رضایت‌بخش با سرعت ۶۰ دور بر دقیقه کار می‌کرد، اما کارکرد آن سروصدای زیادی داشت [۳].

یکی از منابع انرژی برای مصرف در وسائل نقلیه استفاده از گاز طبیعی فشرده است و با توجه به اینکه این سوخت در منابع زیرزمینی ایران به‌وفور یافت می‌شود، این رویکرد در کشور ما مورد توجه قرار گرفته است. مادهٔ اصلی تشکیل‌دهندهٔ گاز طبیعی، متان (از ۸۰ تا ۹۵ درصد حجم کل گاز) است که سبک‌ترین و ساده‌ترین هیدروکربن موجود در طبیعت می‌باشد. علاوه بر متان، گاز طبیعی شامل گازهایی چون اتان (۲ تا ۸ درصد)، پروپان (۱ تا ۲ درصد) بوتان و هیدروکربن‌های سنگین (صفر تا ۴ درصد) و گازهایی مانند دی‌اکسید کربن، نیتروژن، آب و سولفید هیدروژن نیز است. اما با توجه به اینکه مسافت طی‌شده توسط خودروهایی که از گاز طبیعی استفاده می‌کنند، نسبت دیگر سوخت‌ها کمتر است، شاید یکی از دلائل عدم اقبال همگانی از این سوخت پاک باشد. با مصرف سوخت ترکیبی هیدروژن و گاز طبیعی می‌توان میزان آلاینده‌های اگزوز خودرو را به صفر نزدیک کرد و مسافت پیموده‌شدهٔ خودرو را نیز نسبت به سوخت گاز طبیعی افزایش داد. کمبود سوخت‌های فسیلی و پیش‌بینی اتمام ذخایر آن در آینده‌ای نزدیک خطری است که نسل موتورهای احتراقی را تهدید می‌کند و در صورتی‌که علاقه‌ای به بقای این موتورها باشد، متخصصان عرصهٔ انرژی و موتور باید با صرف وقت و هزینهٔ بیشتری در جستجوی سوخت‌های جایگزین و پاک باشند [۴].

استفاده از هایتن در موتورهای درونسوز

هیدروژن می‌تواند در موتورهای درونسوز به‌عنوان یک افزاینده به سوخت هیدروکربنی مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، هیدروژن به‌طور متداول با گاز طبیعی پرفشار مخلوط می‌شود. استفاده از مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن در موتور به سال ۱۹۸۳ م بازمی‌گردد که توسط ناگالینگام[۳] روی موتور شرکت AVL انجام شد. برای این منظور از ترکیب درصدی ۰/۱۰۰، ۸۰/۲۰، ۵۰/۵۰، ۱۰۰/۰ سوخت استفاده شد. در سال ۱۹۸۹ شرکت HCL در دانشگاه کلرودا ترکیب‌های متنوعی از هیدروژن و گاز طبیعی را در موتور به‌کار برد. در سال ۱۹۹۲، این دانشگاه هایتن را به‌عنوان مخلوط گاز طبیعی و هیدروژن ثبت اختراع کرد. این اختراع تقریباً شامل ۱۵ درصد هیدروژن به‌صورت مخلوط در گاز طبیعی بود که بدون تغییر

ساختاری در موتور مورد استفاده قرار می‌گرفت [۵]. ژنگ و همکارانش [۶] این موضوع را با یک موتور تک‌سیلندر، به‌قطر سیلندر ۱۰۰ میلی‌متر، طول پیمایش پیستون ۱۱۵ میلی‌متر، و نسبت تراکم ۱۲ بررسی کردند. مخلوط هیدروژن و گاز طبیعی با درصدهای حجمی (صفر،۳۰،۲۰ و ۴۰ درصد) از قبل در مخازن فراهم و از طریق شیرهای تنظیم فشار، برای افشانه سوخت[۴] ارسال می‌شد. آزمایش‌ها در شش زمان‌بندی تزریق سوخت ثابت (۸۰، ۲۱۰، ۲۴۰، ۲۷۰ و ۳۰۰ درجه، قبل از نقطهٔ مرگ بالا[۵]) و سرعت موتور ۱۲۰۰ دور بر دقیه انجام شد. این گروه دریافتند که نسبت کل هوای اضافی با افزایش مقدار هیدروژن افزایش و در مقابل فشار مؤثر متوسط ترمزی کاهش می‌یابد.

امی و همکارانش [۷] نیز ترکیب گاز طبیعی و هیدروژن در موتورهای درونسوز را به‌صورت تجربی مطالعه کرده‌اند. برای این منظور، یک موتور ملی[۶] سمند چهارسیلندر خطی تنفس طبیعی، قطر سیلندر ۷۸/۶ میلی‌متر، طول پیمایش پیستون ۸۵ میلی‌متر، حجم موتور ۱۵۷۸ سانتی‌متر مکعب، نسبت تراکم ۱۰/۸ (که هر سیلندر دارای دو سوپاپ ورودی و دو سوپاپ خروجی بود) را به‌کار بردند. آزمون‌ها برای سه نوع سوخت شامل گاز طبیعی خالص، هایتن با ۱۵ درصد هیدروژن و هایتن با ۳۰ درصد هیدروژن و در دو حالت بار کامل و جزئی انجام شد. آنان دریافتند که هرچه درصد هیدروژن در مخلوط بیشتر شود، گشتاور و به‌دنبال آن توان موتور افت می‌کند. این پدیده را می‌توان چنین توجیه کرد که معمولاً سوخت‌های گازی به‌علت چگالی ضعیف و حالت گازی‌شکل خود، جایگزین بخشی از هوای ورودی به‌داخل سیلندر می‌شوند و بازدهٔ تنفسی را کاهش می‌دهند. می‌توان عامل دیگر کاهش توان و گشتاور موتور برای بار کامل را کم‌بودن ارزش حرارتی هیدروژن در واحد حجم دانست.

پتیل و همکارانش [۸] نیز با درصدهای متان به هیدروژن برابر ۱۰۰ به صفر و ۹۵ به ۵ تحقیق کردند. آنها یک موتور چهارسیلندر خطی، ۲۹۵۵ سی‌سی، سرعت ۳۲۰۰ دور بر دقیقه، قطر سیلندر ۹۷ میلی‌متر، طول پیمایش پیستون ۱۰۰ میلی‌متر، تنفس طبیعی، سیستم خنک‌کنندهٔ آب، نسبت تراکم ۱۱/۲:۱ را استفاده و دریافتند که با افزایش ۵ درصد هیدروژن به گاز طبیعی، توان با افزایش دور موتور افزایش پیدا می‌کند و در مقابل گشتاور موتور، که در سرعت ۱۷۵۰ دور بر دقیقه به حداکثر مقدار خود رسیده، با افزایش دور موتور کاهش می‌یابد.

لارسن و والیس [۹ – ۱۰] آلودگی مصرف سوخت هایتن، شامل ۱۵ درصد حجمی هیدروژن و ۸۵ درصد حجمی گاز طبیعی و مصرف گاز طبیعی خالص را در یک موتور اشتعال جرقه‌ای پرخوران[۷] شده بررسی کردند. آنها از یک موتور شورلت لومینا[۸]، شش‌سیلندر، چهار زمانه، با خنک‌کنندهٔ آب، حجم موتور ۳/۱ لیتر، قطر سیلندر ۸۹ میلی‌متر و نسبت تراکم ۸/۸:۱ استفاده کردند. نتایج نشان داد تنظیم شرایط کارکرد موتور برای مصرف هایتن می‌تواند سبب کاهش آلاینده‌های اکسید نیتروژن و هیدروکربن‌های نسوخته در مقایسه با مصرف گاز طبیعی شود.

دان و جیمز [۱۱] نیز در سال ۲۰۰۲ از ترکیب هیدروژن به متان ۳۰ به ۷۰ برای یک مطالعهٔ تجربی استفاده کردند. آنها یک خودروی فورد اف ۱۵۰[۹] با توان ۲۶۰ اسب بخار، که نسبت به خودروی پایه یک سری تغییرات از جمله خنک‌کنندهٔ گازهای خروجی[۱۰]، پرخوران[۱۱]، سیستم بازخورانی گازهای خروجی[۱۲] و تغییر سیستم جرقه‌زنی داده شده بود، را استفاده کردند. سوخت هایتن از قبل در سه کپسول ساخته‌شده توسط شرکت کوانتوم تکنولوژی با فشار ۳۶۰۰ پوند بر اینچ مربع ذخیره و روی خودرو نصب گردید. نتایج نشان داد که خروجی‌های اکسید نیتروژن با تغییرات اعمال‌شده نسبت به خودروی پایه و در صورت استفاده در سوخت هایتن می‌تواند به صفر نزدیک شود.

فانهووا و همکارانش [۱۲]، از دانشگاه چینگهو[۱۳] در چین، پژوهشی تجربی در این زمینه انجام دادند. آنان از یک موتور اتوبوس شهری مدل EQDN180N-130 چهارزمانه، شش‌سیلندر، که دارای سیستم خنک‌کنندهٔ آب، پرخوران، خنک‌کنندهٔ هوای ورودی و سیستم کنترل

الکترونیکی بود استفاده کردند. در این آزمایش ترکیب ۱۰۰/۰، ۹۰/۱۰، ۷۰/۳۰ و ۵۰/۵۰ بررسی شد و نتایج نشان داد که با کاهش مقدار هیدروژن، مدت زمان احتراق کوتاه می‌شود. همچنین محققان دریافتند که افزایش هیدروژن به گاز طبیعی می‌تواند سرعت انتشار شعله را افزایش دهد. هایتن نیز آلاینده‌های مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته را کاهش می‌دهد.

شودو و همکارانش [۱۳] نیز دربارهٔ آلودگی‌های ناشی از کاربرد هایتن تحقیق کردند. این پژوهشگران از یک موتور تک‌سیلندر چهارزمانهٔ، اشتعال جرقه‌ای، قطر سیلندر ۸۵ میلی‌متر، کورس ۸۸ میلی‌متر و نسبت تراکم ۱۳ استفاده کردند. نتایج کار آنها نیز نشان داد که آلودگی‌های اکسید نیتروژن ناشی از افزایش هیدروژن، افزایش و هیدروکربن نسوخته کاهش می‌یابد. آنان همچنین در زمینهٔ رقیق‌سوزی تحقیق کردند و به این نتیجه رسیدند که رقیق‌سوزی سبب بهبود همزمان کارایی حرارتی و کاهش آلودگی‌های خروجی هیدروکربن و اکسیدهای نیتروژن می‌شود.

آگوستینو و همکارانش [۱۴] تحقیق خود را بر آلاینده‌ترین وسائل حمل‌ونقل شهری؛ یعنی کامیون‌های حمل زباله و اتوبوس‌های عمومی، متمرکز کردند و دریافتند که با افزودن مقداری هیدروژن به گاز طبیعی می‌توان خروجی‌هایی نظیر دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن را به میزان قابل توجهی کاهش داد. اوهان و همکارانش [۱۵] نیز در تحقیق خود دریافتند که سیستم EGR ابزاری مؤثر برای کاهش خروجی‌های اکسید نیتروژن به‌میزان کمتر از ۱ ذره در میلیون[۱۴] می‌باشد. همچنین به این نتیجه رسیدند که این سیستم سبب افزایش گشتاور می‌شود. آزمایشات نشان می‌دهد که افزایش هیدروژن به گاز طبیعی در محدودهٔ ۲۰ تا ۳۰ درصد سبب کاهش هیدروکربن‌های نسوختهٔ خروجی از اگزوز می‌شود، علت این پدیده نیز آن است که با احتراق تند هیدروژن هیدروکربن‌های نسوخته فرصت کمی برای اکسیدشدن دارند. اما اگر درصد هیدروژن از مقادیر مذکور بیشتر شود، به‌دلیل افزایش دمای محفظهٔ احتراق، اکسیدهای نیتروژن افزایش پیدا می‌کند و افزایش قیمت سوخت را درپی خواهد داشت و، همان‌طور که در مقدمه ذکر شد، با استفاده از یک کاتالیزور می‌توان اکسیدهای نیتروژن را نیز کاهش داد.

مقایسهٔ خواص گاز طبیعی با هیدروژن

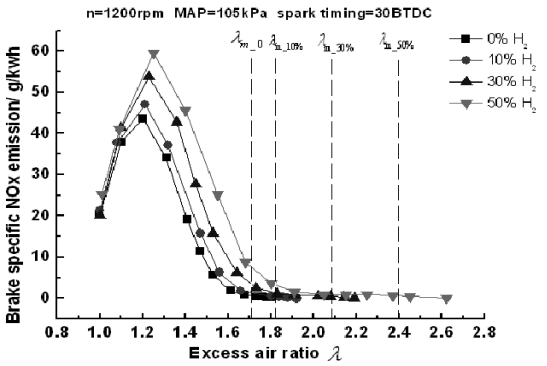
در این بخش مزایا، معایب و مقایسهٔ سوخت‌هایی همچون گاز طبیعی و هایتن را بررسی می‌کنیم و در ادامه، هایتن را از منظر آلودگی زیست محیطی واکاوی می‌کنیم. برای ورود به بحث باید دربارهٔ خواص هیدروژن و گاز طبیعی نکاتی بیان شود.

۱. هیدروژن دارای قابلیت اشتعال بالاست (۶ برابر گاز طبیعی)؛ این امر سبب می‌شود هیدروژن بتواند روی مخلوط رقیق پخش شود.
۲. ضخامت کم لایهٔ خاموش هیدروژن نسبت به گاز طبیعی سبب می‌شود شعله بتواند از دریچهٔ مسدود عبور کند.
۳. دمای خودسوزی هیدروژن نسبت به گاز طبیعی بیشتر است.
۴. انرژی احتراق هیدروژن نسبت به گاز طبیعی کمتر است.
۵. چگالی هیدروژن نسبت به گاز طبیعی کمتر است.

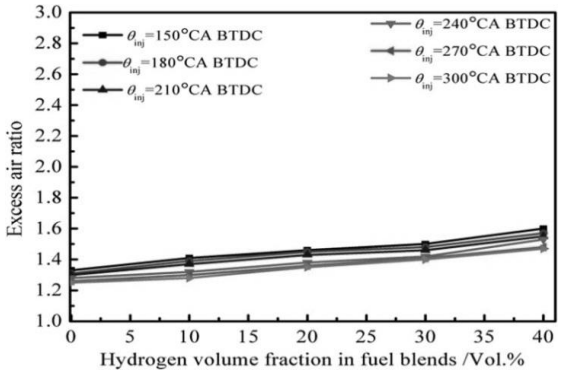
افزایش هیدروژن به گاز طبیعی، نسبت هیدروژن به کربن را در سوخت افزایش می‌دهد که این افزایش منجر به کاهش نشر گاز دی‌اکسید کربن بر واحد انرژی شده و اثر مثبتی بر کاهش گازهای گلخانه‌ای دارد.

هیدروژن با سرعت احتراق سریع، محدودهٔ احتراق وسیع و انرژی اشتعال کم می‌تواند انتشار گازهای خروجی از سوخت را کاهش دهد. مطابق شکل ۱، مقادیر اکسیدهای نیتروژن در مقابل نسبت هوای اضافی برحسب گرم بر کیلووات ساعت مشخص است [۱۲]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، حتی با افزایش مقادیر بالای هیدروژن به گاز طبیعی، به‌دلیل وجود نسبت هوای اضافی، مقادیر اکسید

نیتروژن نیز کاهش می‌یابد. به‌یقین، یکی از روش‌های کاهش اکسید نیتروژن نسبت هوای اضافی است. ژنگ و همکاران [۶] در تحقیق خود این موضوع را نیز اثبات کردند که با افزایش هیدروژن در زمان تزریق گوناگون نسبت هوای اضافی نیز افزایش پیدا می‌کند (شکل۲).



شکل ۱. مقادیر BSNOx برحسب نسبت هوای اضافی [۱۲]

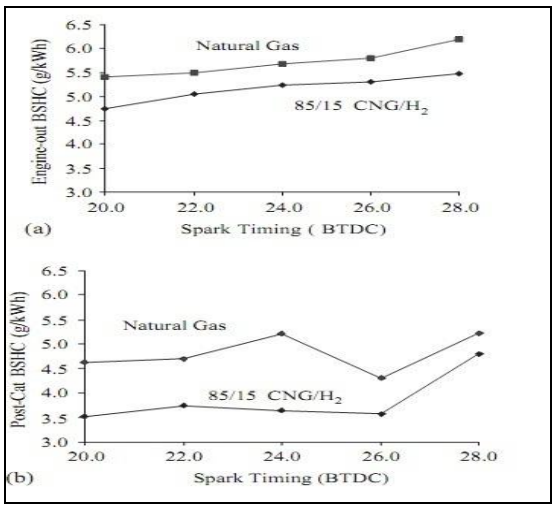


شکل ۲. نسبت کل هوای اضافی مخلوط‌ها در مقابل هیدروژن [٦]

اما مؤثرترین و شناخته‌شده‌ترین روش برای کاهش اکسیدهای نیتروژن، سیستم بازگرداندن گازهای خروجی است. الن‌بی و همکارانش [۱۶] در زمینهٔ بازگرداندن گازهای خروجی بر روی موتورهایی با سوخت هایتن تحقیق کرده و دریافتند که با افزایش درصد، بازگرداندن گازهای خروجی آلودگی‌های اکسید نیتروژن کاهش می‌یابد اما در مقابل خروجی هیدروکربن افزایش پیدا می‌کند. راه دیگر کاهش هیدروکربن‌ها استفاده از مبدل کاتالیزوری است. در شکل ۳ این موضوع به‌وضوح نمایش داده شده است.

مقایسه‌ای از منظر قدرت خروجی

مشیری و همکارانش [۷] در حالت بار کامل، گشتاور و توان موتور را بررسی کرده‌اند. با توجه به شکل ۴، نمودارها نشان می‌دهند که برای سرعت‌های گوناگون افزودن هیدروژن تا ۳۰ درصد، توان و گشتاور را به‌طور متوسط تا ۶/۵ درصد کاهش می‌دهد، در حالی‌که هایتن با ۱۵ درصد هیدروژن، این دو متغیر را به‌طور متوسط تنها ۴/۲ درصد کاهش می‌دهد. در بررسی پتیل و همکاران [۸]، که در مرکز تحقیقات خودرو هند انجام شد، از هایتن ۵ درصد غنی‌شده با هیدروژن استفاده شد. تغییر در خروجی گشتاور و توان موتور در شکل ۵ نمایش داده شده است.



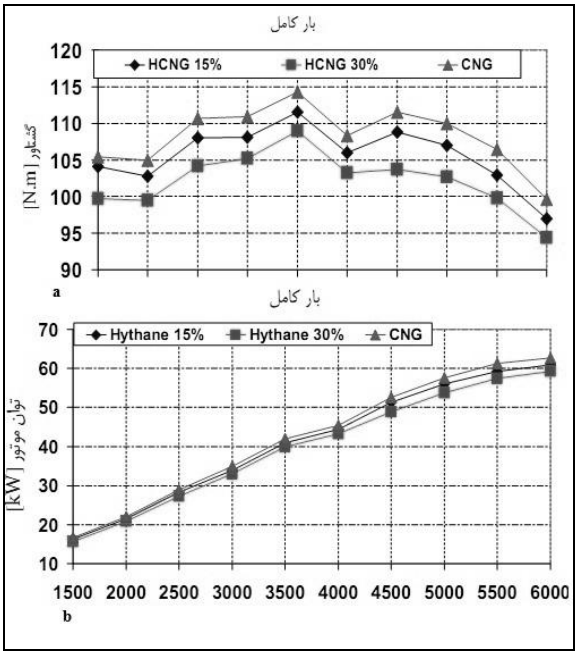
شکل ۳. مقادیر خروجی هیدروکربن‌ها

الف) قبل، ب) بعد از استفاده از مبدل کاتالیزوری [۱۵]

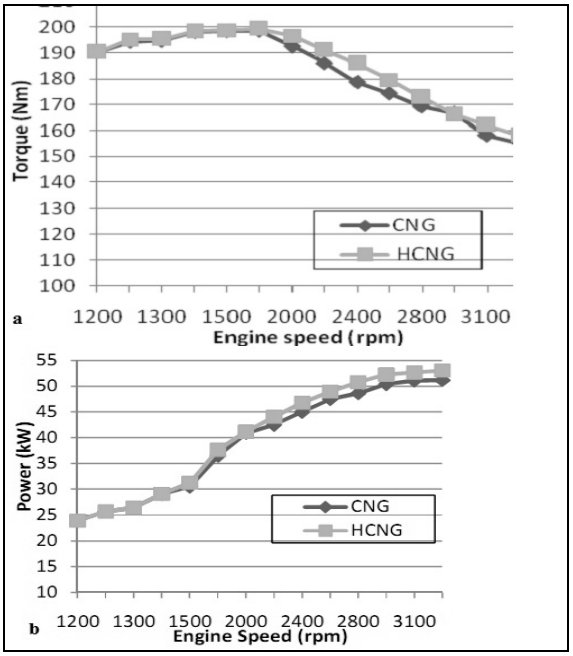
چالش‌های پیش‌رو درکاربرد هایتن

از جمله چالش‌های موجود در زمینهٔ کاربرد هایتن عبارت است از:

۱. ذخیرهٔ هایتن و ایستگاه‌های لازم برای عرضهٔ آن.
۲. بالابودن حجم انتشار اکسید نیتروژن، در صورت استفاده از هیدروژن با درصدهای بالا.
۳. بالابودن قیمت هایتن با ترکیب درصدهای ۸۰ به ۲۰.



شکل ٤. تغییر الف) گشتاور، ب) توان
برای سوخت‌های استفاده‌شده [۷]



شکل ۵. تغییر الف) گشتاور، ب) توان
برای سوخت‌های استفاده‌شده [۸]

جمع‌بندی

۱. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده می‌توان بیان نمود که با افزایش درصد بالای هیدروژن به گاز طبیعی، آلودگی‌های اکسید نیتروژن افزایش می‌یابد.

۲. سرعت احتراق بیشتر هیدروژن سبب می‌شود قسمت بیشتر احتراق در شرایط نزدیک به حالت تعادلی رخ دهد و قسمت کمتری از اشتعال در شرایط سنیتیکی باشد. در حالی‌که به‌دلیل کند سوختن گاز طبیعی مقدار بیشتری از احتراق در حالت سینتیکی رخ می‌دهد. در نتیجه استفاده از هیدروژن سبب می‌شود مونوکسید کربن کمتری تولید شود.

۳. افزایش هیدروژن به گاز طبیعی، افزایش سرعت سوختن را درپی دارد که منجر به کاهش طول مدت احتراق و افزایش راندمان حرارتی ترمزی می‌شود.

۴. ترکیب گاز طبیعی با هیدروژن انتقال گرما را نسبت به جدارهٔ سیلندر افزایش می‌دهد. چون مدت اطفاء احتراق هیدروژن کوتاه‌تر از مدت اطفاء گاز طبیعی است.

۵. با استفاده از روش رقیق‌سوزی، بازگرداندن گازهای خروجی و همچنین استفاده از کاتالیزور، آلایندهٔ اکسید نیتروژن به‌شدت کاهش خواهش یافت؛ در نتیجه وسائل نقلیه با آلودگی معادل صفر استاندارد[۱۵] ممکن است به‌دست آیند.

تولید هایتن توجیه اقتصادی ندارد، اما از لحاظ کالاهای غیربازاری، زیست محیطی و کاهش هزینهٔ ناشی از خسارت‌های اجتماعی و از لحاظ سیاست‌های کلان کشور بسیار تأثیرگذار است. بزرگ‌ترین مشکل زیست محیطی کلان‌شهرها (به‌ویژه تهران) آلودگی هواست که البته عوامل طبیعی و انسانی نیز در این امر دخالت دارند. غلظت آلاینده‌های اتمسفری تهران در بسیاری از موارد چندین برابر حد مجاز است که آثار سوء کوتاه‌مدت و درازمدتی بر سلامت شهروندان خواهد داشت. استفاده از هایتن می‌تواند کاهش قابل توجه آلودگی را ممکن کند. ضمناً این فناوری می‌تواند پلی به‌سمت معرفی وسائل نقلیه با سوخت

هیدروژن خالص در بازار باشد و زیرساخت‌های سوخت هیدروژن را قبل از توزیع وسائل نقلیهٔ هیدروژنی نشان دهد.

مآخذ

[۱] پذیرایی، زهرا. "چالش‌ها و راهکارهای جهانی ذخیرهٔ هیدروژن"، *هیدروژن و پیل سوختی*، س. ۶، ش. ۶۲، اسفند ۱۳۹۰.

[۲] ادیبی، پویان. "موتورهای احتراق داخلی تغذیه‌شده با مخلوطهای گاز طبیعی هیدروژن"، *مهندسی خودرو و صنایع وابسته*، س. ۱، ش. ۸، تیر ۱۳۸۸، ص. ۳۹–۴۸.

[3] Miscellaneous "History of Hydrogen Fuel Cars1807–1986", http://www.hydrogencarsnow.com

[۴] قندی، مرتضی. "بررسی سوخت ترکیبی گاز طبیعی - هیدروژن"، سومین کنفرانس ملی CNG، ۱۳۸۹.

[۵] میرزایی، عبدالله. "مقدمه‌ای بر مطالعهٔ امکان‌سنجی استفاده از سوخت ترکیبی هیدروژن و گاز طبیعی در موتور احتراق درونی"، مهر ۱۳۹۰.

[6] Zheng Jianjun, Wang Jinhua "Combustion And Emission characteristics Of Spray Direct Injection Spark Ignition Engine Fueled With natural Gas-Hydrogen blend" International Journal Of Hydrogen energy, 2011, pp. 36 11155-11163.

[۷] امی، فتح‌الله، مشیری آزاد، احمد شفیعی ثابت. "بررسی تجربی اثر تغییرات نسبت هوای اضافی برای دستیابی به عملکرد بهینه در موتور اشتعال جرقه‌ای از سوخت هایتن"، *تحقیقات موتور*، س. ۵، ش. ۱۵، ۱۳۸۸، ص. ۲۹–۳۵.

[8] Patil KR, Khanwalkar P. M, Thipse S. S,"Development of HCNG Blended Fuel Engine with Control of NOx Emissions" *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications (IJCISIM)*, Vol. 2, 2010. pp. 87-95.

[۹] ابراهیمی، رحیم، بشارتی شاهین. "مقایسه تجربی موتور اشتعال جرقه‌ای با سوخت‌های بنزین و گاز طبیعی"، *سوخت و احتراق*، س. ۳، ش. ۱، ۱۳۸۹، ص. ۷۵–۸۵.

[10] Larsen JF, Wallace JS, "comparison of emissions and decency of turbocharged lean-burn natural gas and hythane fueled engine" Eng Gas turbines power 119 ; 1997 pp218-226

[11] Karner Don, Francfort James "High-Percentage Hydrogen/CNG Blend Ford F-150 Operations Summary" January 2003 U.S. Department of Energy

[12] Fanhua Ma, Mingyue Wang, Xihao Li, "Research and Development of HCNG Internal combustion Engine" Tsinghua University

[13] Shudo T, Shimamura K, Nakajima Y, "Combustion and emission in a methane DI startied charge engine with hydrogen per-mixing" JSAE Rev; 21 :3-7

[14] Lacobazzi A, Chiesa M, Genovese A, " Use of blends of hydrogen and natural gas in urban vehicles in the transition towards and hydrogen economy" 2WIH2 March 2007 1-10

[15] Orhan Akansu S, Dulger Z, Kahraman N, "Internal combustion engines fueled by natural gas hydrogen mixtures" *International Journal of Hydrogen Energy*, 29, 2004. pp .1527-1539.

[16] Allenby S, Cahng W-C, Megaritis A, "a way to maintain combustion stability in a natural gas fueled engine with exhaust gas recirculation the potential of fuel reforming" hydrogen enrichment Wyszynski- ML, 2001, pp. 405-18.

پی‌نوشت

1. Hythane, HCNG, the mixture of CNG and Hydrogen that is named Hythane
2. Reverend W. Cecil James
3. Nagalingam
4. Injector
5. top dead center
6. EF7
7. Supercharger
8. Chevrolet Lumina
9. Ford F-150
10. Exhaust Intercooler
11. Turbocharger
12. Exhaust gas recirculation (EGR)
13. Tsinghua University
14. part per million (PPM)
15. Equivalence Zero Emission Vehicles