

بررسی عددی افزودن هیدروژن به گاز طبیعی در موتور گازسوز بر روی مشخصه‌های

عملکردی موتور

ستایش جوادی راد^۱، محمد حسن سعیدی^{۲*}، نیما عجمی^۳، علی اطلاعات^۴، محسن محسنی‌راد^۵

۱- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، setayesh.javadirad@sharif.edu

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، saman@sharif.edu

۳- کارشناس احتراق، شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، n_ajami@ip-co.com

۴- مدیر طرح موتور گازسوز، شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، a_etelaat@ip-co.com

۵- کارشناس احتراق، شرکت تحقیق طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، m_mohsenirad@ip-co.com

* نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۱۱، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱)

چکیده: برای بهبود عملکرد موتورهای گازسوز، سوخت هیدروژن به دلیل ارزش حرارتی بالاتر، محدوده اشتعال وسیع‌تر، سرعت شعله بیشتر، احتراق سریع‌تر و دمای احتراق کمتر، به عنوان مکمل، به همراه گاز طبیعی، به مخلوط ورودی موتور اضافه شد. یک موتور گازسوز از رده Light Duty، به عنوان موتور پایه، انتخاب شد. فرایند شبیه‌سازی موتور در نرم‌افزار GT-Power انجام شد و با استفاده از نتایج آزمون عملکردی موتور پایه با سوخت گاز، صحت‌گذاری صورت گرفت. درصدهای مختلف ترکیب دو سوخت گاز طبیعی و هیدروژن با اعمال شرایط مختلف پایش احتراقی، بر روی مدل شبیه‌سازی اعمال شده و ضمن بررسی شاخص‌های عملکردی موتور مانند گشتاور، BSFC، بازده حجمی، BMEP، فشار درون سیلندر و NOx، بهترین درصدها برای مخلوط سوخت تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سوخت هیدروژن به گاز طبیعی، باعث بهبود مشخصه‌های عملکردی موتور می‌شود. براساس نتایج به دست آمده، با درصدهای هیدروژن معادل ۱۰٪ تا ۲۰٪ در ترکیب با گاز، شاخص‌های عملکردی بهبود می‌یابند و برای مقادیر هیدروژن بیشتر از ۳۰٪ در ترکیب سوخت، اثر قابل ملاحظه‌ای در بهبود رفتار موتور رخ نخواهد داد.

کلیدواژگان: موتور گازسوز، سوخت هیدروژن، ترکیب سوخت، بهبود عملکرد موتور

مقدمه

علی‌رغم استفاده روز افزون از موتورهای گازسوز در صنایع گوناگون برای کاربردهای ایستگاهی و حمل و نقل، این موتورها به واسطه نوع و خواص سوخت گاز، همچنان دارای کاستی‌هایی می‌باشند. بهبود نقاط ضعف سوخت گاز طبیعی، در ضمن احتراق و عملکرد آن در موتور، می‌تواند این سوخت پاک را به جایگزین مناسبی برای سایر سوخت‌های مورد استفاده در موتورهای احتراق داخلی، مانند بنزین و دیزل تبدیل کند [۱]. مهمترین حوزه توسعه موتورهای گازسوز، پایش و مهار احتراق آنها است. برای دستیابی به احتراق بهینه، نیاز است تا در همه قسمت‌های چرخه کامل تولید توان، اقدام‌های بهینه‌سازی و توسعه انجام شود. یکی از مهمترین حوزه‌ها، حوزه ترکیب و تهیه مخلوط اولیه است. در این حوزه، تمرکز اقدام، بر روی تهیه مخلوط با ترکیب دو یا چند سوخت به جهت افزایش قابلیت‌های احتراقی مخلوط با بهره‌گیری از مشخصات بهینه هر سوخت، نحوه تهیه مخلوط و همگن نمودن مخلوط است. باراتو و همکاران [۲] در این تحقیق به روی ۳ سوخت Biofuel, Natural Gas و Hydrogen کار کرده‌اند. با این توضیحات، یکی از راه‌های ممکن برای بهبود عملکرد موتورهای گازسوز، استفاده از یک افزودنی

به عنوان مکمل به گاز طبیعی است که منجر به بهبود عملکرد موتور شود. افزودنی بهبود دهنده عملکرد گاز در موتور گازسوز، می تواند سوخت دومی باشد که نقاط ضعف گاز را تا حد قابل توجهی رفع نماید. با این حال، یافتن سوخت دوم و درصدهای مناسب اختلاط آن با سوخت گاز، نیازمند بررسی های بیشتری است.

یکی از گزینه های مناسب برای ترکیب با گاز، سوخت هیدروژن است که توجهات زیادی را به علت خواص منحصر بفرد آن، به سوی خود جلب کرده است. یکی از ویژگی های خوب گاز هیدروژن، ساختار تأمین و تهیه آن است که با استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، آن را تبدیل به یک سوخت پایدار نمود [۴،۳]. از طرفی، هیدروژن محدوده اشتعال وسیع تر، سرعت شعله بیشتر و احتراق سریع تری نسبت به سوخت گاز دارد و همین ویژگی ها باعث می شود موتور بتواند با مخلوطی رقیق تر و در نتیجه مصرف سوخت کم تر، کار کند. همچنین هیدروژن به دلیل اینکه سوختی بدون کربن است، به عنوان یک مکمل، ضمن کاهش آلاینده های هیدروکربنی، در راستای کاهش انتشار کربن نیز موثر است. هیدروژن دارای خاصیت انتشار قوی است. این خاصیت باعث تشکیل مخلوط همگن سوخت و هوا می شود. ضمناً برخلاف دیگر افزودنی ها، هیدروژن یک سوخت تجدیدپذیر، با آلاینده گی خیلی کم، غیر سمی و احتراق کامل است. لذا، در میان افزودنی های مختلف، هیدروژن یکی از بهترین افزودنی های است که می تواند عملکرد موتور گازسوز را بهبود ببخشد.

از جمله اقدام های انجام شده در این حوزه، می توان به مراجع [۵-۷] اشاره نمود که اقدام تحلیلی احتراقی توأم با اقدام تجربی دقیق هستند. در این پژوهش ها، اقدام هایی انجام شد که رفتار احتراق متمایز هیدروژن را در موتورهای احتراق داخلی، برجسته می کند در همین راستا، توجه ویژه ای به استفاده از سوخت هیدروژن در بخش موتورهای خودرویی گازسوز نیز شده است. اقدام های زیادی در این زمینه توسط محققین انجام شده است که از آن جمله می توان به مراجع [۸،۹] اشاره نمود که مهمترین نتایج این تحقیقات افزایش بازدهی موتور و کاهش سطح آلاینده هاست. مهمترین چالش در حوزه استفاده از سوخت های ترکیبی، دستیابی به درصد ترکیب مناسب دو سوخت مذکور در موتور گازسوز است [۱۰]. در مرجع مذکور، میزان حساسیت شاخص های عملکردی موتور به درصد های مختلف سوخت هیدروژن نشان داده شده است.

در این مقاله یک موتور SI گازسوز با رده کاربری سبک به عنوان موتور پایه انتخاب شده است تا اثر افزودن سوخت هیدروژن با درصد های مختلف به گاز طبیعی، بر روی مشخصه های عملکردی موتور، مورد بررسی قرار گیرد. مدل سازی و شبیه سازی موتور مذکور با استفاده از نرم افزار GT-Power انجام شده و نتایج با استفاده از داده های آزمون های تجربی موتور اعتبارسنجی شد. پس از انجام شبیه سازی اولیه بر روی موتور پایه و صحه گذاری آن، سوخت هیدروژن گازی با درصد های مختلف به گاز طبیعی اضافه شده و مشخصه های عملکردی موتور مانند گشتاور، مصرف سوخت ویژه ترمزی، بازده حجمی، فشار متوسط موثر ترمزی، فشار داخل سیلندر (ناشی از احتراق) و نرخ و روند تغییرات آلاینده NOx مورد ارزیابی قرار گرفته است. این بررسی ها در مقایسه با موتور با سوخت گاز طبیعی خالص (صفر درصد هیدروژن) انجام شده است. بر اساس نتایج شبیه سازی ها و تحلیل آن ها، بهترین درصد های ترکیب هیدروژن و گاز طبیعی ارائه شده اند.

تمرکز اصلی در این پژوهش، بررسی رفتار شاخص های عملکردی یک موتور مشخص در ازاء بکارگیری هیدروژن در آن، به عنوان سوخت مکمل، است. این پژوهش به عنوان بخشی از اقدام تحقیق و توسعه (R&D) به جهت بومی سازی یکی از فناوری های نوین در حوزه ارتقاء شاخص های عملکردی یک موتور خودرویی مشخص و تطبیق آن با الزامات آتی، صورت گرفته و از نتایج آن برای تدوین راهبرد توسعه و همچنین هدف گذاری طراحی مفهومی ارتقاء موتور استفاده شده است.

معرفی موتور پایه

موتور پایه انتخاب شده، از خانواده موتور EF7، به صورت پایه گازسوز، پرخوران شده و با رده کاربری وظیفه سبک است. برخی از مشخصات فنی موتور پایه در جدول ۱ آمده است. در شکل‌های (۱) و (۲)، به ترتیب نمودار گشتاور و توان موتور پایه بر حسب دور موتور و در شکل (۳)، زمان‌بندی سوپاپ‌های دود و هوای موتور پایه (منحنی سمت چپ برای دود و منحنی سمت راست برای هوا) مشاهده می‌شود. چون طراحی و ساخت موتور مذکور، تحت مالکیت شرکت IPCO بوده و مشخصات عملکردی آن، از طرف طراح موتور، منتشر شده است، لذا، مرجع صدور مشخصات فنی جدول ۱ و منحنی‌های شکل‌های (۱)، (۲) و (۳)، اطلاعات و داده‌های شرکت IPCO است.

جدول ۱- مشخصات فنی موتور پایه

Table 1- Base Engine specifications

| Row | Description | Base Engine |
|-----|--------------------|-------------|
| 1 | No. Cylinder | 6 |
| 2 | Displacement (Lit) | 1.7 |
| 3 | Bore (mm) | 78.6 |
| 4 | Strok (mm) | 85 |
| 5 | Compration Ratio | 12.5 |
| 6 | BSFC (g/kW.hr) | 230 |

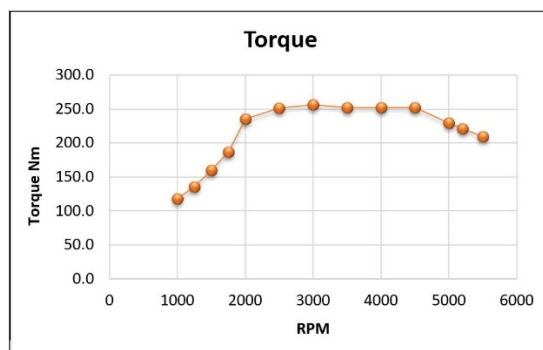


Figure 1- Base Engine Torque - Speed curve

شکل ۱- منحنی گشتاور- دور موتور پایه

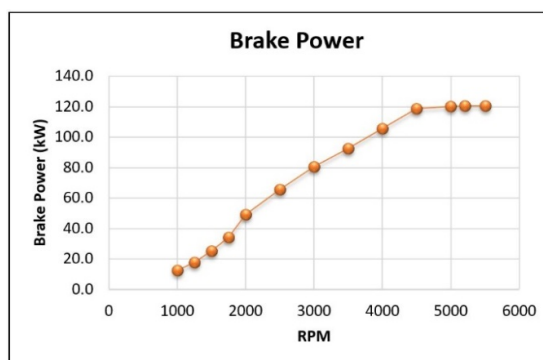


Figure 2- Base Engine Brake Power - Speed curve

شکل ۲- منحنی توان ترمزی- دور موتور پایه

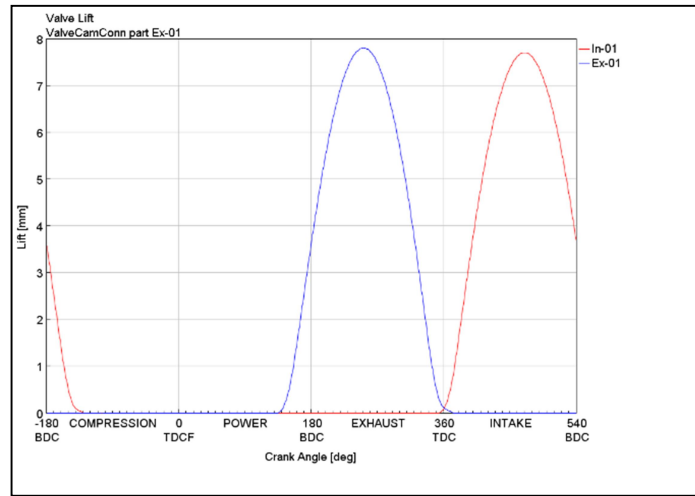


Figure 3- Base Engine Valves Timing Diagram

شکل ۳- زمان بندی باز و بسته شدن سوپاپ دود و هوای موتور پایه

سوخت هیدروژن و مقایسه آن با سوخت گاز طبیعی

برای مقایسه بهتر خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت هیدروژن، نسبت به سوخت گاز طبیعی (سوخت متان به عنوان نماینده سوخت گاز طبیعی در نظر گرفته شد)، برخی از خواص مهم آن‌ها در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲- مقایسه خواص سوخت هیدروژن و گاز متان

Table 2- Comparison of Hydrogen and Methane

| Row | Description | hydrogen | methane |
|-----|--------------------------------------|----------|---------|
| 1 | Flammability limit (%volumetric) | 4-75 | 5.3-15 |
| 2 | Stoichiometric Mixture (%volumetric) | 29.53 | 9.48 |
| 3 | Minimum Energy for Combustion (Mj) | 0.02 | 0.29 |
| 4 | Auto-Ignition Temperature (K°) | 858 | 813 |
| 5 | Combustion Temperature (K°) | 943 | 1493 |
| 6 | Burning Velocity (m/s) | 265-325 | 37-45 |

براساس داده‌های جدول ۲، سوخت هیدروژن دارای محدوده اشتعال پذیری وسیع‌تر، درصد مخلوط هم‌ارزی (استوکیومتریک) بالاتر (امکان رقیق‌سوزی بیشتر)، نیازمند انرژی کم‌تر برای شروع احتراق، دمای خود اشتعالی بالاتر (امکان افزایش نسبت تراکم موتور)، دمای احتراق کمتر (شرایط بهتر برای کاهش آلاینده NOx) و سرعت سوختن بیشتر (امکان احتراق کامل‌تر و دوری بیشتر از وقوع کوبش در موتور) است.

همه خواص مذکور عوامل بهبود احتراق در موتور بوده و باعث می‌شود به‌کارگیری از این سوخت به عنوان ترکیب مخلوط ورودی، شرایط عملکردی موتور را بهبود دهد [۱۱]. البته به غیر از مرجع [۱۱] نتایج تحلیلی فوق در مراجع دیگر مانند [۵] الی [۱۰] نیز مشهود است.

شبیه‌سازی عددی موتور پایه

شبیه‌سازی عددی عملکرد موتور در نرم‌افزار GT SUITE انجام شد. نرم‌افزار GT SUITE متشکل از چندین زیربخش بوده که می‌تواند مسایل موتور را بطور همزمان از منظر مکانیکی و حرکتی، تبدیل انرژی و احتراق، انتقال حرارت، ترمودینامیک سیکل و جریان سیال و حتی تعامل موتور با سیستم‌های کنترل، حل نموده و عملکرد موتور را در همه شرایط تحقق‌پذیر بلحاظ فیزیکی، ارائه نماید. ابزار نرم‌افزاری GT-Power زیرمجموعه GT SUITE است که محیط یکپارچه برای شبیه‌سازی موضوعات مرتبط با قوای محرکه را فراهم می‌کند. نرم‌افزار GT-Power همه اجزای موتور، شامل لوله‌ها و مجراهای عبور جریان و مقسم‌های جریان را مدل می‌کند. قطعات تخصصی‌تر مانند سیلندرها، توربوشارژر و غیره، از طریق مدل‌سازی اختصاصی تعبیه شده در نرم‌افزار، شبیه‌سازی می‌شوند. نرم‌افزار GT-Power در هسته خود یک حل‌گر دارد که معادلات ناویر-استوکس را یک بعدی و کاملاً غیریکنواخت و غیرخطی، حل می‌کند. افزون بر حل معادلات جریان سیال، این نرم‌افزار حلگرهای مربوط به روابط ترمودینامیکی برای لحاظ کردن پدیده‌هایی همچون احتراق، انتقال حرارت و تبخیر را نیز دارد [۱۲].

گام نخست شبیه‌سازی موتور، ساخت و مدل‌سازی موتور پایه در محیط نرم‌افزار است. برای این کار، باید تمامی اجزا و اندازه‌های هندسی قطعات و زیرمجموعه‌های موتور، در نرم‌افزار ایجاد و اعمال شوند. تشکیل المان‌ها و ابعاد آن‌ها مبتنی بر واقعیت موتور است. برای هر کدام از اجزاء، اطلاعات دقیق موتور پایه شامل شاخص‌های هندسی مانند قطر سیلندر، کورس سیلندر، حجم سیلندر، نسبت تراکم، سطح مقطع منیفولدها و مجراها و غیره، شاخص‌های عملکردی مانند فشار، دما، نسبت سوخت و هوا، زاویه تأخیر در احتراق و غیره، شاخص‌های جریانی مانند شارژ هوا، شارژ سوخت و غیره و نهایتاً خروجی‌های موتور مانند توان، گشتاور، مصرف سوخت، میزان نشر آلاینده‌ها و غیره در دسترس قرار داشت. البته لازم به ذکر است که بین شاخص‌های عملکردی موتور، دقت و صحت نتایج نرم‌افزار GT-Power برای آلاینده‌گی کم است و نمی‌تواند به عنوان یک شاخص قطعی در تصمیم‌گیری‌های آتی توسعه و ارتقاء موتور مورد استفاده قرار گیرد. اما نکته مهم در این حوزه این است که روند و نرخ تغییرات آلاینده‌ها بیشتر مورد توجه بوده و از استناد به مقادیر مطلق آن اجتناب می‌شود.

فرایند احتراق که اساساً به آزادسازی نرخ حرارت تعبیر می‌شود در چارچوب مدل‌سازی یک بعدی از طریق رابطه شناخته شده ویبه (Wiebe) انجام می‌گیرد. معادله ریاضی آن مطابق زیر است که در آن θ_{ign} و $\Delta\theta$ به ترتیب زاویه شروع احتراق و طول مدت احتراق برحسب درجه هستند و Y_b بیانگر کسر جرم سوخته از مخلوط سوخت و هوا در هر زاویه لنگ است. برای تعریف احتراق در هر موتور نیاز به دانستن دو ضریب a و m است.

$$Y_b = 1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_{ign}}{\Delta\theta} \right)^{m+1} \right] \quad (1)$$

برای ساخت هندسه مدل موتور و هر کدام از زیرمجموعه‌های آن، از نرم‌افزار GEM-3D (زیرمجموعه‌ای از نرم‌افزار GT-SUITE) استفاده شد. با استفاده از این ابزار، می‌توان مدل سه‌بعدی اجزای مختلف را به مدل یک بعدی، تبدیل نموده و دیگرام یک بعدی آن را شبیه‌سازی کرد. از این دیگرام یک بعدی، به عنوان جزئی از مدل GT-Power استفاده می‌شود [۱۳]. در شکل (۴) نمونه‌ای از خروجی نرم‌افزار GEM-3D برای منیفولد دود موتور پایه نشان داده شده است.

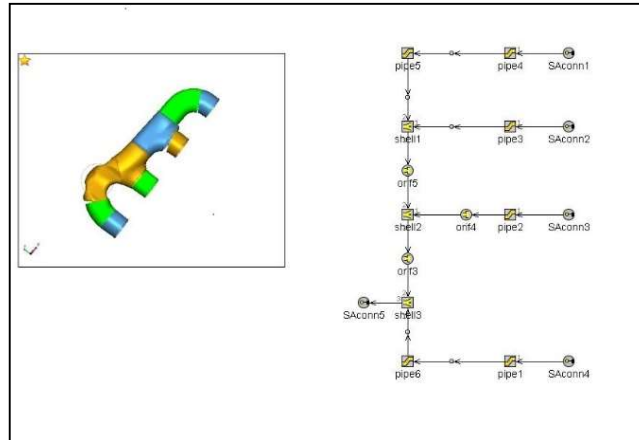


Figure 4- Exhaust Manifold Model (One-dimensional) in GT-Power with GEM-3D

شکل ۴- مدل 1D منیفلد دود در GT-Power با کمک ابزار GEM-3D

ساخت مدل شبیه‌سازی موتور پایه

هر جزء از موتور به صورت یک واحد مستقل مدل‌سازی شده و در نهایت، همه اجزا به یکدیگر متصل می‌شوند. مدل ساخته شده شامل مدل‌های ورودی فیلتر، فیلتر هوا، اتصالات پایین دست کمپرسور، کمپرسور، اینترکولر، دریچه گاز، منیفلد هوا، مجرای ورودی سرسیلندر، سوپاپ‌های ورودی و خروجی، سیلندر، خروجی سیلندر به سیستم خروجی، منیفلد دود، توربین، کاتالیست و لوله خروج دود به محیط است که با اتصال آن‌ها به یکدیگر، مدل کامل موتور شبیه‌سازی می‌شود. در شکل (۵) مدل کامل شبیه‌سازی موتور پایه، نشان داده شده است.

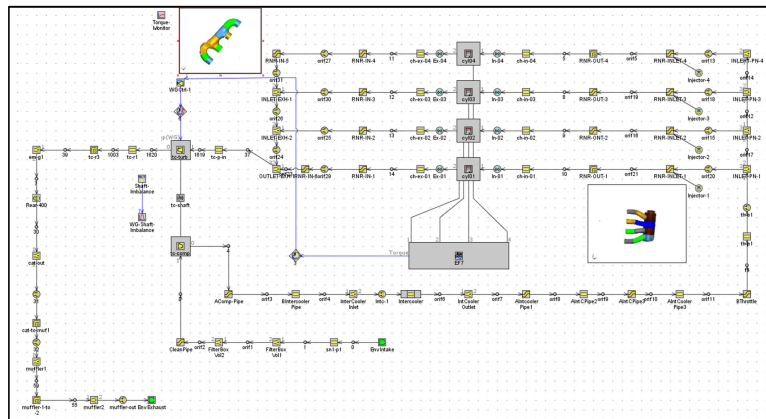


Figure 5- Complete simulation model of the base engine in GT-Power

شکل ۵- مدل شبیه‌سازی کامل موتور پایه در نرم افزار GT-Power

شرط تطبیق خروجی فرایند شبیه‌سازی

در فرایند شبیه‌سازی، قید نهایی برای کنترل تعداد دفعات اجرای مدل و نزدیکی به خواسته نهایی، مقادیر گشتاور موتور است بطوریکه با رسیدن به گشتاور هدف گذاری شده، شبیه‌سازی خاتمه می‌یابد. شکل (۶) نمونه‌ای از آن فرایند را نشان می‌دهد.

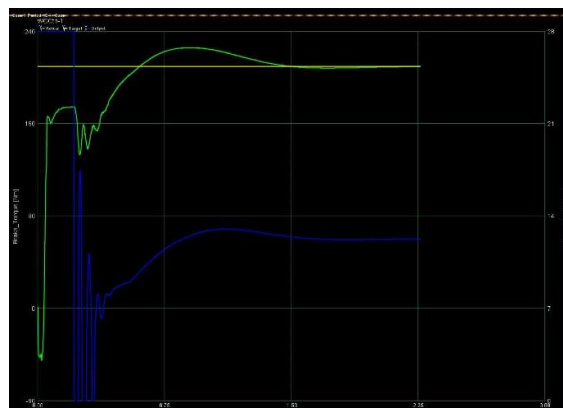


Figure 6- Adapting the Performance of the Simulation Model Based on the Set Target (Torque)

شکل ۶- تطبیق عملکرد مدل شبیه‌سازی بر اساس هدف تعیین شده (گشتاور)

داده‌های عملکردی کمپرسور و توربین توربوشارژر، به دلیل مشخص بودن نوع آن، در دسترس است. با اعمال داده‌های عملکردی به نرم‌افزار GT-Power، منحنی‌های عملکردی کمپرسور و توربین استخراج شد. به عنوان نمونه، شکل (۷) منحنی عملکردی کمپرسور را نشان می‌دهد.

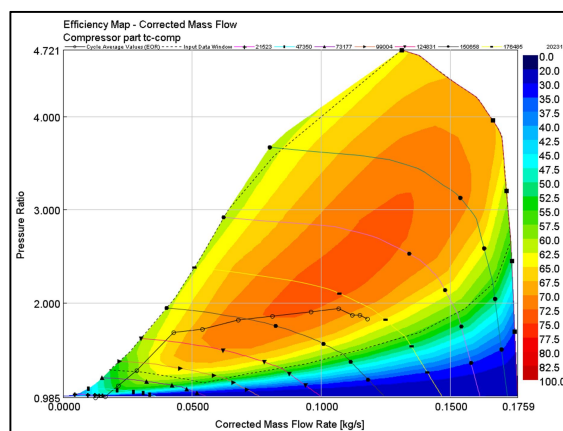


Figure 7- Base engine turbocharger compressor performance curve

شکل ۷- منحنی‌های عملکردی کمپرسور توربوشارژر موتور گازسوز

آزمون موتور پایه

آزمون‌های موتور پایه، در شرکت IPCO و در شرایط پایدار و با استفاده از دینامومتر ویژه (ساخت شرکت AVL) انجام شد. اندازه‌گیری دبی سوخت با استفاده از دبی‌سنج از نوع Coriolis mass flow meter صورت گرفت. خوانش فشار درون سیلندر برحسب درجه زاویه میل‌لنگ، با استفاده از سنسور فشار (مبدل فشار) پیزوالکتریک و ساخت شرکت KISTLER انجام گرفت. البته هر سیکل فشار به عنوان مقدار متوسط ۱۰۰ سیکل متوالی ثبت شد. جمع‌آوری داده‌ها از جمله فشار سیلندر، زاویه میل‌لنگ، دما در نقاط مختلف، سرعت جریان هوا، فشار تقویت توربوشارژر، فشار در نقاط مختلف (خنک‌کاری و روغن‌کاری)، فشار تزریق سوخت، زمانبندی جرقه و دیگر شاخص‌های عملکردی با استفاده از ترکیبی از حسگرهای مختلف و از طریق AVL

Indicom software ثبت شد. ضمناً به دلیل دسترسی به یک ECU قابل برنامه‌ریزی، امکان اعمال تغییرات و همچنین ثبت و ذخیره دیگر داده‌های مورد نیاز برای تحلیل نیز در دسترس بود. آزمون‌ها برای جمع‌آوری یک پایگاه داده بزرگ، طراحی شدند، تمام آنها در شرایط دریاچه گاز باز، برای ۱۵ سرعت دورانی موتور، از ۱۰۰۰ تا ۵۵۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. جدول ۳ برخی از نتایج آزمون موتور پایه را برای ۶ سرعت دورانی مختلف موتور، نشان می‌دهد.

جدول ۳- برخی از نتایج آزمون موتور پایه

Table 3- Some of the Base Engine Test Results

| ENSP (rpm) | Torque (Nm) | Power (kW) | BMEP (bar) | BSFC (g/kW.h) |
|------------|-------------|------------|------------|---------------|
| 1000 | 118.2 | 12.4 | 9 | 247.9 |
| 2000 | 235.24 | 49.2 | 17.91 | 226.5 |
| 3000 | 256.69 | 80.6 | 19.55 | 217.9 |
| 4000 | 252.56 | 105.7 | 19.24 | 221 |
| 5000 | 229.84 | 120.3 | 17.5 | 232.9 |
| 5500 | 209.25 | 120.5 | 15.94 | 240.7 |

کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی

بعد از ساخت مدل شبیه‌سازی، براساس نتایج آزمون موتور پایه، فرایند کالیبراسیون انجام شد. معیارهای تصحیح برای کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی شامل "ضریب تصحیح" (آ): نرخ آزادسازی حرارت، (ب): بازده کمپرسور، (ج): بازده توربین، (د): افت فشار اینترکولر، (ه): دمای قبل و بعد از اینترکولر، (و): افت فشار فیلتر هوا، (ز): افت فشار کاتالیست و (ح): دمای قبل و بعد از کاتالیست است [۱۴]. با لحاظ نمودن موارد مذکور، فرایند کالیبراسیون به شرح زیر انجام شد:

۱) ابتدا "ضریب تصحیح نرخ آزادسازی حرارت"، به روی مدل وارد می‌شود. این ضریب تصحیح تا تطبیق کامل منحنی فشار سیلندر - درجه میل‌لنگ منتج از آزمون عملکردی و منتج از خروجی محاسبات مدل شبیه‌سازی، ادامه می‌یابد. این تطبیق به عنوان معیار اصلی تصمیم‌گیری، خواهد بود.

۲) بعد از صحت‌گذاری بند فوق، بررسی تطبیق مقادیر مدل شبیه‌سازی با مقادیر نتایج آزمون دیگر شاخص‌ها انجام می‌گیرد. شاخص‌های اصلی عبارتند از (آ) توان، (ب): گشتاور، (ج): فشار موثر متوسط ترمزی، (د): مصرف ویژه سوخت ترمزی، (ه): فشار قبل و بعد از کمپرسور، (و): فشار قبل و بعد از اینترکولر، (ز): دمای قبل و بعد از اینترکولر و (ح): دمای ورودی به کاتالیست موتور.

۳) اگر در همین مرحله، برای همه شاخص‌های اشاره شده در بند ۲، بین نتایج محاسبات مدل با نتایج آزمون تطبیق وجود داشته باشد، فرایند کالیبراسیون خاتمه خواهد یافت.

۴) اگر بعد از بررسی بند ۳، مشخص شود که در آن شاخص‌ها، بین نتایج آزمون و شبیه‌سازی، اختلاف وجود دارد، ضریب تصحیح هر کدام از شاخص‌ها، برحسب میزان اختلاف، به روی آن شاخص اعمال تا تصحیح آن انجام شود.

۵) اگر بعد از اقدام بند ۴، تطبیق ردیف ۱، از دست نرود، تطبیق‌های اعمال شده در بند ۳ به روی شاخص‌های بند ۲، ذخیره شده و مدل کالیبره می‌شود.

۶) اگر بعد از اقدام بند ۴، تطبیق مقادیر فشار سیلندر، بر هم بریزد، مجدداً فرایند از بند ۱ آغاز و ضریب تصحیح مجدد به روی نرخ آزادسازی حرارت اعمال خواهد شد. این اقدام آنقدر ادامه خواهد یافت تا نتیجه بند ۵ به‌دست آید.

فرایند کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی موتور پایه، براساس نتایج آزمون، در همه دورهای موتور پایه انجام شد. در شکل‌های

(۸) و (۹)، نتیجه کالیبراسیون، در دو دور 2000 RPM و 5500 RPM به صورت نمونه، نشان داده شده است:

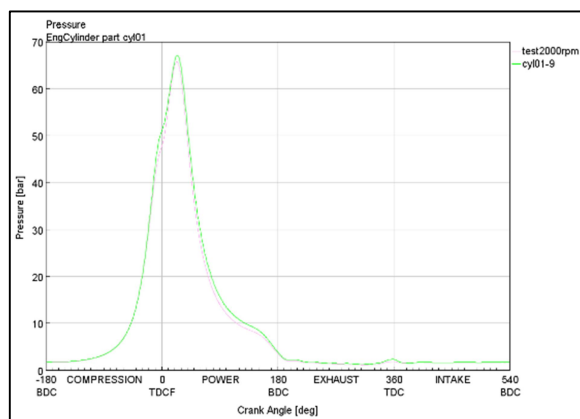


Figure 8- Cylinder Pressure - Crank Angle Degree Curve of Cylinder 1 at 2000 RPM

شکل ۸ - منحنی فشار سیلندر-درجه لنگ سیلندر ۱ در 2000 RPM

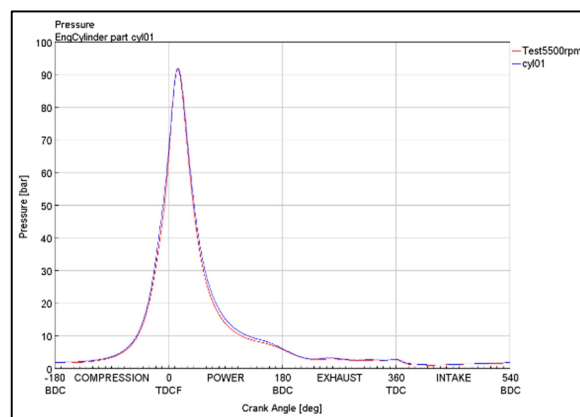


Figure 9- Cylinder Pressure - Crank Angle Degree Curve of Cylinder 1 at 5500 RPM

شکل ۹ - منحنی فشار سیلندر-درجه لنگ سیلندر ۱ در 5500 RPM

همان‌طور که در شکل‌های فوق (به صورت نمونه)، ملاحظه می‌شود، تطبیق دقیقی بین منحنی‌های فشار سیلندر - درجه میل‌لنگ منتج از نتایج آزمون و منتج از محاسبات مدل شبیه‌سازی وجود دارد. براساس آنچه که در فرایند کالیبراسیون ذکر شد، به غیر از تطبیق نرخ آزادسازی حرارت (منحنی فشار سیلندر - درجه میل‌لنگ)، می‌بایست در دیگر شاخص‌ها نیز تطبیق دقیق حاصل شود که این اقدام نیز در حین تحقیق حاضر به صورت کامل انجام شد. در ادامه، در شکل‌های (۱۰) الی (۱۳)، منحنی‌های تطبیق یافته برخی از شاخص‌های دیگر (فهرست شده در بند ۲ فرایند کالیبراسیون)، نشان داده شد. همان‌طور که در شکل‌های (۱۰) الی (۱۳)، ملاحظه می‌شود، برای شاخص‌های اصلی عملکرد موتور مانند توان خروجی، گشتاور، BMEP و BSFC، در همه دوره‌ها، تطبیق بسیار خوبی بین نتایج آزمون و نتایج شبیه‌سازی، وجود دارد. در برخی از موارد، فقط در دورهای پایین، مقدار جزئی انحراف وجود دارد.

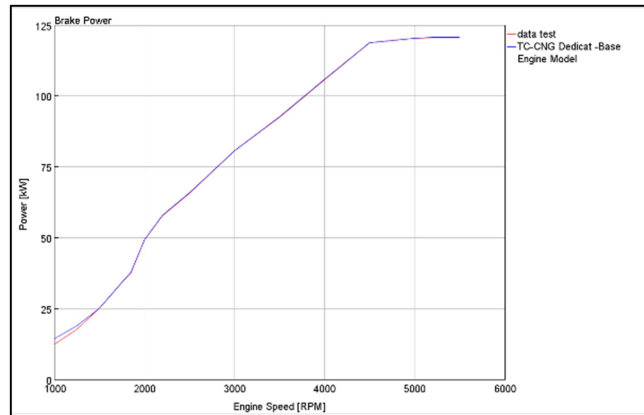


Figure 10- Matching Engine Power Between Test and Simulation Model Results

شکل ۱۰- تطبیق توان موتور بین نتایج آزمون و نتایج مدل شبیه سازی

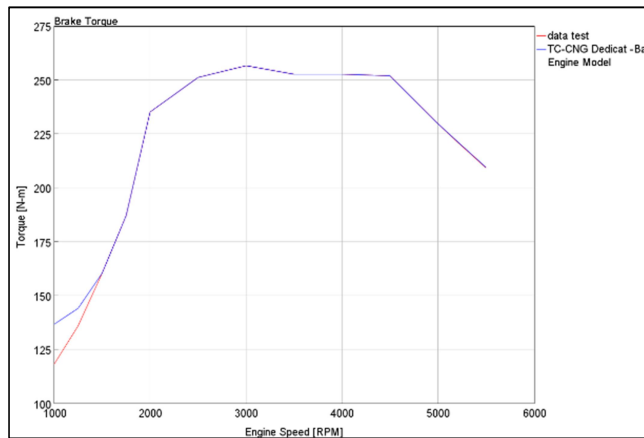


Figure 11- Matching Engine Torque Between Test and Simulation Model Results

شکل ۱۱- تطبیق گشتاور موتور بین نتایج آزمون و نتایج مدل شبیه سازی

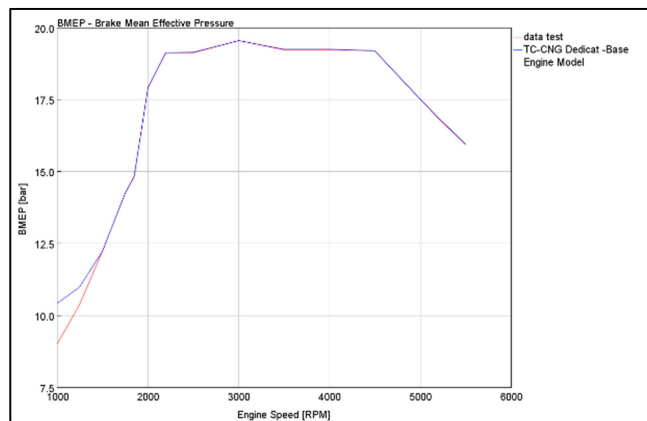


Figure 12- Matching Engine BMEP Between Test and Simulation Model Results

شکل ۱۲- تطبیق BMEP موتور بین نتایج آزمون و نتایج مدل شبیه سازی

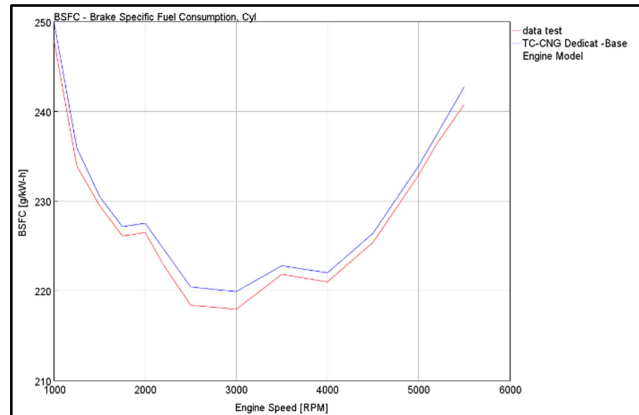


Figure 13- Matching Engine BSFC Between Test and Simulation Model Results

شکل ۱۳- تطبیق BSFC موتور بین نتایج آزمون و نتایج مدل شبیه‌سازی

بکارگیری سوخت هیدروژن در موتور پایه

درصدهای مختلف ترکیب سوخت هیدروژن با سوخت گاز طبیعی به عنوان مخلوط ورودی، به روی مدل شبیه‌سازی اعمال شده و شاخص‌های عملکردی موتور بررسی شد. درصدهای هیدروژن در مخلوط از مقادیر صفر که همان موتور پایه است، شروع شده و تا ۳۰٪ هیدروژن در مخلوط تغییر کرده است. با افزایش مقدار هیدروژن در ترکیب سوخت ورودی (گاز طبیعی و هیدروژن)، تقریباً تا لحظات قبل از جرقه، تفاوت خاصی در رفتار فشار و دمای درون سیلندر دیده نمی‌شود. اما بعد از جرقه و شروع فرایند احتراق، به دلیل افزایش میزان سرعت شعله، نرخ آزاد سازی حرارت افزایش یافته و به تبع آن نیز مقدار فشار بیشینه و دمای بیشینه احتراق نیز افزایش خواهد یافت. این روند با افزایش میزان درصد هیدروژن، شدیدتر خواهد شد. به طوریکه از مقادیر بیشتر از ۳۰٪، سرعت شعله بسیار زیاد، باعث افزایش بیش از حد فشار و دمای بیشینه احتراق خواهد شد، بطوریکه از حالت ۳۰٪ به بیشتر، هم به دلیل مسائل و قیدهای طراحی و ساخت (چون هر موتور برای یک مقدار مشخص فشار بیشینه طراحی و ساخته می‌شود)، هم به دلیل مباحث بازده احتراقی (نرخ سوختن و آزادسازی حرارت) و هم به دلیل مقادیر آلاینده‌گی (NO_x)، اثر مطلوب حضور هیدروژن در مخلوط ورودی، به روی موتور، از دست خواهد رفت.

در بخش تحلیل نتایج، همه حالت‌های بررسی شده، مربوط به میزان هیدروژن کمتر از ۳۰٪ است. برای دست‌یابی به یک روند قابل قبول، تلاش شد تا میزان تغییرات هیدروژن با ضریب ۵ مطالعه شوند به طوری که برای هر موضوع، ۷ حالت برای مقادیر هیدروژن (۰، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۲۵٪ و ۳۰٪) در نظر گرفته شد. از طرفی، چون رفتار احتراقی موتور در دوره‌های مختلف، متفاوت است، بررسی موارد فوق برای ۶ دور موتور مختلف موتور (۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰، ۴۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۵۵۰۰ دور در دقیقه) انجام شد.

نتایج و تحلیل

برای تحلیل، نتایج دور 3000 RPM (دوری که در آن گشتاور، بیشینه مقدار است و محدوده کارکردی موتور نیز در حوالی آن است) و دور 5500 RPM (به عنوان دور بیشینه توان موتور)، در ادامه ارائه شده‌اند. از طرفی مقادیر هیدروژن نیز بین صفر

(حالت موتور پایه) تا ۳۰٪ مدنظر قرار گرفته‌اند [۱۵]. برای ارزیابی وضعیت عملکردی موتور، شاخص‌های BSFC (نماینده بازده احتراق موتور)، BMEP (نماینده توان خروجی موتور)، بازده حجمی موتور (نماینده پرخورانی موتور) و NOx (نماینده سطح آلاینده‌گی)، مطالعه و بررسی شده‌اند.

شکل (۱۴) گشتاور موتور را برای درصدهای مختلف هیدروژن در سرعت دورانی 5500 RPM نشان می‌دهد. همانطور که قبلتر بیان شد، قید فرایند شبیه‌سازی، گشتاور است. این شکل تأیید می‌کند که در همه حالت‌های شبیه‌سازی، قید اعمال شده به درستی رعایت شد و مقدار گشتاور در همه درصدهای هیدروژن، ثابت باقی مانده است. (مقایسه ستون صفر تا ۳۰).

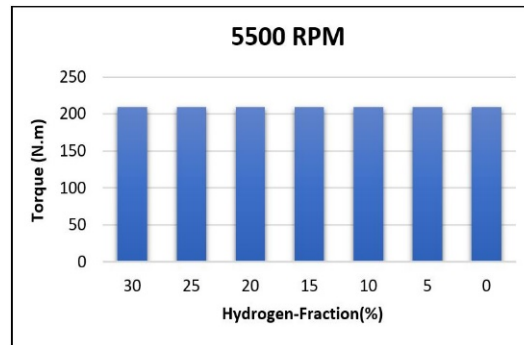


Figure 14- Engine Torque in Different Percentages of Hydrogen at 5500 rpm
شکل ۱۴- گشتاور موتور در درصدهای مختلف هیدروژن در 5500 RPM

شکل (۱۵) مقادیر BSFC را برای درصدهای مختلف هیدروژن در مخلوط سوخت در دور 5500 RPM نشان می‌دهد. با افزایش مقادیر هیدروژن، BSFC کاهش یافته است [۱۶]. سوخت هیدروژن ارزش حرارتی بالاتر و قابلیت اشتعال قوی‌تری نسبت به سوخت گاز طبیعی دارد، لذا احتراق در موتور با اضافه شدن سوخت هیدروژن، بازدهی بیشتری داشته و به تبع آن نیز BSFC کاهش می‌یابد. با افزایش هیدروژن تا حدود ۳۰٪ در مخلوط ورودی، مقدار BSFC حدود ۲۵٪ کاهش خواهد یافت.

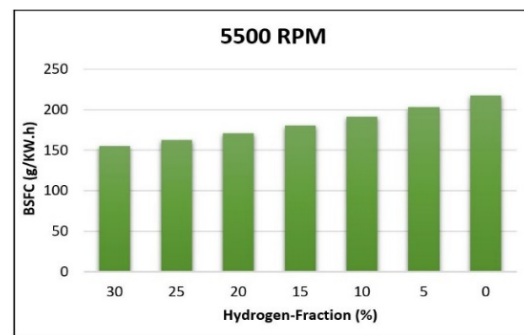


Figure 15- Engine BSFC in Different Percentages of Hydrogen at 5500 rpm
شکل ۱۵- BSFC موتور در درصدهای مختلف هیدروژن در 5500 RPM

شکل (۱۶) بازده حجمی موتور را برای درصدهای مختلف هیدروژن در مخلوط سوخت در دور 5500 RPM نشان می‌دهد. با افزایش مقادیر هیدروژن، بازده حجمی موتور کاهش یافته است [۱۶]. علت این موضوع شرط حفظ گشتاور موتور است. برای

حفظ گشتاور موتور در حالت‌هایی که مقادیر هیدروژن رو به افزایش است، و از طرفی چون چگالی هیدروژن نسبت به سوخت گاز طبیعی کمتر است، برای جبران جرم مورد نیاز هیدروژن به جهت حفظ گشتاور، می‌بایست درصد حجمی بیشتری از هیدروژن وارد موتور شود. حضور درصد حجمی بیشتر هیدروژن، به معنی کاهش درصد حجمی هوای ورودی و به تبع آن نیز کاهش بازده حجمی موتور خواهد شد.

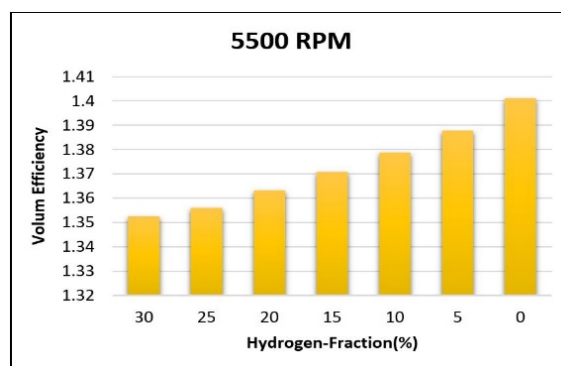


Figure 16- Engine Volumetric Efficiency in Different Percentages of Hydrogen at 5500 rpm

شکل ۱۶- بازده حجمی موتور در درصدهای مختلف هیدروژن در 5500 RPM

شکل (۱۷) مانند شکل (۱۴)، گشتاور موتور را برای درصدهای مختلف هیدروژن در مخلوط ورودی در دور 3000 RPM نشان می‌دهد. مانند آنچه که برای شکل (۱۴) بیان شد، در این شکل نیز مقادیر گشتاور ثابت است. مقادیر مطلق گشتاور موتور در دور 3000 RPM از مقادیر مطلق گشتاور در دور 5500 RPM بیشتر است. نکته مهم آن است که مقادیر مطلق گشتاور دقیقاً منطبق با رفتار گشتاور موتور پایه در شکل (۱) است.

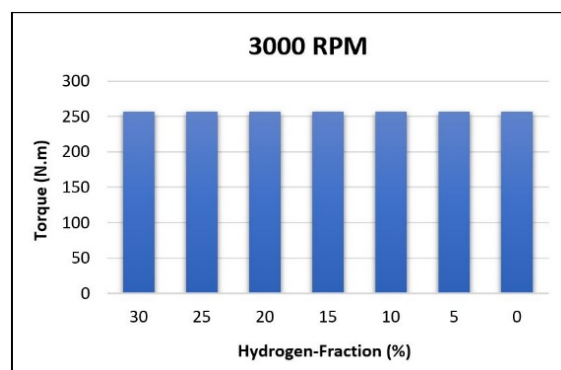


Figure 17- Engine Torque in Different Percentages of Hydrogen at 3000 rpm

شکل ۱۷- گشتاور موتور در درصدهای مختلف هیدروژن در 3000 RPM

شکل (۱۸) مانند شکل (۱۵) مقادیر BSFC موتور را برای درصدهای مختلف هیدروژن در مخلوط ورودی در دور 3000 RPM نشان می‌دهد. مانند آنچه که در توضیحات شکل (۱۵) بیان شد، در این شکل نیز صادق است.

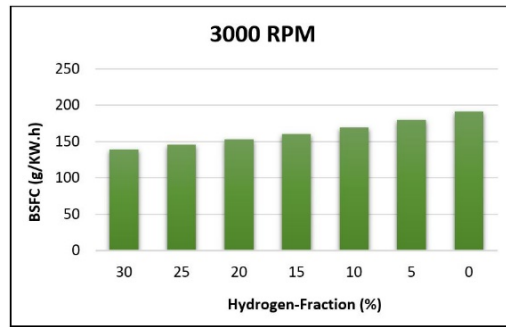


Figure 18- Engine BSFC in Different Percentages of Hydrogen at 3000 rpm

شکل ۱۸- BSFC موتور در درصدهای مختلف هیدروژن در 3000 RPM

شکل (۱۹) مانند شکل (۱۶) مقادیر بازده حجمی موتور را برای درصدهای مختلف هیدروژن در مخلوط ورودی در دور 3000 RPM نشان می‌دهد. رفتار این منحنی تا حدود زیادی مانند شکل (۱۶) است.

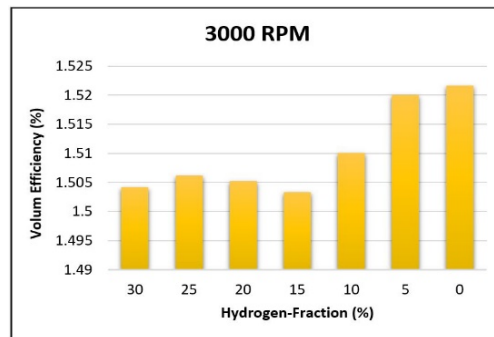


Figure 19- Engine Volumetric Efficiency in Different Percentages of Hydrogen at 3000 rpm

شکل ۱۹- بازده حجمی موتور در درصدهای مختلف هیدروژن در 3000 RPM

شکل‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) مقدار BMEP را برای دورهای مختلف موتور و در سه حالت درصد هیدروژن در مخلوط ورودی (۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) نشان می‌دهد. مقدار BMEP در دور 3000 RPM تا نزدیکی 5000 RPM، بیشینه مقدار است که هم‌رده با روند تغییرات گشتاور موتور است (شکل (۱)). مقادیر BMEP برای درصدهای مختلف هیدروژن، تقریباً ثابت است.

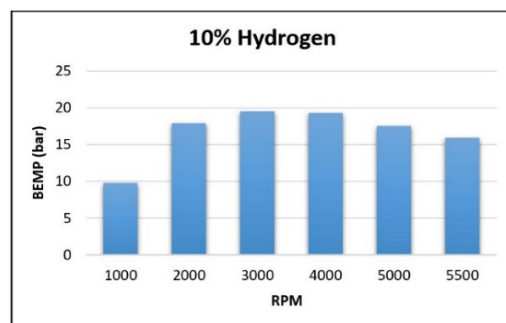


Figure 20- The BMEP of the Engine in Terms of Speed at 10% of Hydrogen

شکل ۲۰ - مقادیر BMEP موتور بر حسب دور و در ۱۰٪ هیدروژن

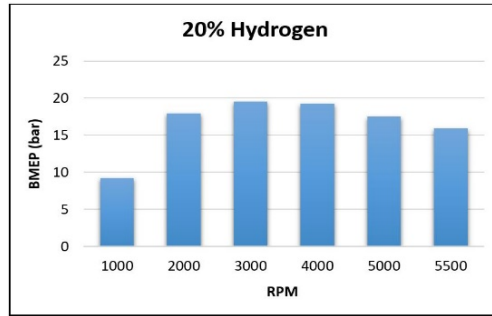


Figure 21- The BMEP of the Engine in Terms of Speed at 20% of Hydrogen

شکل ۲۱ - مقادیر BMEP موتور بر حسب دور و در ۲۰٪ هیدروژن

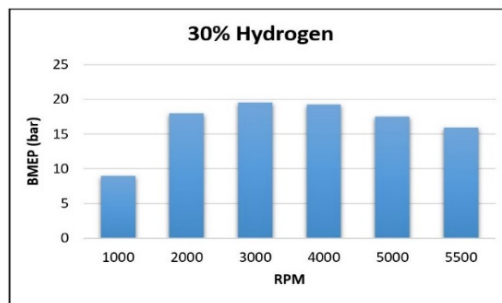


Figure 22- The BMEP of the Engine in Terms of Speed at 30% of Hydrogen

شکل ۲۲ - مقادیر BMEP موتور بر حسب دور و در ۳۰٪ هیدروژن

بررسی رفتار عملکردی موتور در حوزه آلاینده‌ها، قطعاً نیازمند مدل‌سازی دقیق‌تر سینتیک احتراق است. اما در حد مدل‌سازی انجام شده در نرم‌افزار GT Power، در شکل (۲۳) برای دور 3000 RPM، به عنوان یک نمونه از نرخ و روند تغییرات آلاینده NOx، مقادیر آن در درصدهای مختلف هیدروژن نشان داده شد. در حالت‌های مختلف درصد هیدروژن، با کاهش مقادیر بازده حجمی موتور در شکل‌های (۱۹) و (۱۶)، انتظار بر کاهش مقادیر NOx و با افزایش مقادیر دمای بیشینه احتراق به دلیل خواص ذاتی هیدروژن، انتظار بر افزایش مقادیر NOx است. رفتار مشاهده شده در شکل (۲۳) که روندی افزایشی (ولی با شیب بسیار کم) را با افزایش درصد هیدروژن نشان می‌دهد، می‌تواند به دلیل تقابل اثر شاخص‌های متفاوت اشاره شده، باشد. آنچه که در این مرحله از پژوهش می‌توان نتیجه گرفت، افزایش نرخ مقادیر NOx در قبال افزایش حضور هیدروژن است.

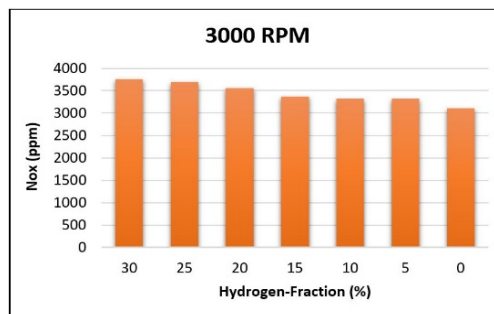


Figure 23- The NOx of the Engine in Different Percentages of Hydrogen at 3000 rpm

شکل ۲۳- نرخ تغییر NOx در درصدهای مختلف هیدروژن در 3000 RPM

جمع بندی

- ۱) سوخت هیدروژن به دلیل داشتن ویژگی‌های مناسب اشتعال پذیری، شرایط خوبی به عنوان سوخت مکمل برای تقویت مخلوط ورودی موتور، به جهت بهبود عملکرد آن دارد.
- ۲) استفاده از ترکیب سوخت هیدروژن و گاز طبیعی در مخلوط ورودی موتور گازسوز، باعث بهبود عملکرد موتور می‌شود.
- ۳) با توجه به مقادیر مختلف درصد هیدروژن و اثرگذاری متفاوت بر روی شاخص‌های عملکردی، این طور به نظر می‌رسد که مقادیر درصد هیدروژن در محدوده‌ی ۱۰٪ الی ۲۰٪ نقطه‌ی بهینه‌ی بهبود رفتار موتور خواهد بود.
- ۴) هرچند که افزایش درصد هیدروژن باعث بهبود شاخص‌های عملکردی موتور می‌شود، اما به دلیل اثر معکوس به روی شاخص‌هایی مانند محدودیت‌هایی که در حوزه طراحی و ساخت مطرح است (عبور فشار بیشینه احتراق از محدوده مجاز طراحی و عمر موتور)، محدود ۳۰٪ هیدروژن در ترکیب ورودی، مرز نهایی بوده و در صورت افزایش مقدار درصد هیدروژن بیش از ۳۰٪، تقریباً همه شاخص‌های عملکردی موتور نسبت به حالت موتور پایه ضعیفتر خواهد شد.
- ۵) تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش از هرگونه تغییر در متغیرهایی همچون زمانبندی جرقه، نسبت سوخت به هوا و نسبت فشار توربوشارژر که اثر چشمگیری بر عملکرد یک موتور SI دارند، صرف نظر کرده است. لذا می‌توان با در نظر گرفتن تغییرات این متغیرها امکان یافتن نقاط کارکردی بهینه‌تری را در پژوهش‌های آتی بررسی نمود.
- ۶) یکی از عوامل مهم و تاثیر گذاری به روی میزان اثربخشی حضور سوخت هیدروژن به عنوان سوخت مکمل مخلوط ورودی، نحوه تهیه مخلوط سوخت هیدروژن با سوخت گاز طبیعی و با هوا است. بدیهی است با استفاده از فناوری‌های جدید مانند پاشش سوخت در سیلندر و یا تهیه مخلوط سوخت هیدروژن به صورت مجزا و سپس مخلوط نمودن آنها با هوا، اثربخشی بیشتری از سوخت هیدروژن را مشاهده کرد.
- ۷) روند تغییرات نرخ NOx نشان می‌دهد که با افزایش درصد هیدروژن در مخلوط ورودی، مقادیر NOx افزایش می‌یابد.
- ۸) برای بررسی دقیق‌تر موضوع و دستیابی به پاسخ‌های بهتر، پیشنهاد می‌شود، ضمن شبیه‌سازی موتور با نرم افزار GT- Power، فرایند احتراق دو سوخت هیدروژن و گاز طبیعی با سینتیک دقیق مخلوط دو سوخت شبیه‌سازی شود.

فهرست علائم اختصاری

BMEP: Brake Mean Effective Pressure
BSFC: Brake-Specific Fuel Consumption
CA: Crank Angle
Cyl: Cylinder
ENSP: Engine Speed
K: Kelvin
kJ: kJoule
M: Metre
PCYL: Cylinder Pressure
RPM: Revolutions Per Minute
S: Second

مراجع

- [1] Semin, R.A. Bakar, "A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines", *American J. of Engineering and Applied Sciences.*, vol. 4, pp. 302-311, 2008.
- [2] M.Baratta, S.d'Ambrosio, D.Iemmolo, D.Misul, "Method for the recognition of the fuel composition in CNG engines fed with natural gas/biofuel/hydrogen blends", *J. of Natural Gas Science and Engineering*, Vol. 40, pp. 312-326, April 2017.
- [3] B. Widera, "Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation, and stationary applications", *Thermal Sci Eng Prog*, vol.16, 2020.
- [4] D.Rohendi, D.R.Rahmah, D.H.Yulianti, I.Amelia, N.F.Sya'baniah, N.Syarif, A. Rachmat, A Review on Production of Hydrogen from Renewable Sources and Applications for Fuel Cell Vehicles, *International J. of Sustainable Transportation Technology*, vol.2, pp.63-68, 2018.
- [5] J.Wang, Z.Huang, Y.Fang, B.Liu, K.Zeng, H.Miao, D.Jiang. "Combustion behaviors of a direct-injection engine operating on various fractions of natural gas-hydrogen blends". *International J. of Hydrogen Energy* vol.32, pp.3555 – 3564, 2007.
- [6] E.Hu, Z.Huang, B.Liu, J.Zheng, X.Gu, B.Huang. "Experimental investigation on performance and emissions of a spark-ignition engine fuelled with natural gas-hydrogen blends combined with". *International J. of hydrogen energy*; vol.34, pp.528–539, 2009.
- [7] Q.Luo, J.Hu, B.Sun, F.Liu, X.Wang, C.Li, L.Bao, "Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine", *International J. of Hydrogen Energy*, 2019; 44(11):5573-5584.
- [8] H.Eichlleder, T.Wallner, R.Freyman, J.Ringler, "The potential of hydrogen internal combustion engines in a future mobility scenario" *SAE Technical Paper*; 2003 (No. 2003-01-2267)
- [9] HH.Braess, W.Strobl, "Hydrogen as a fuel for road transport of the future: possibilities and prerequisites", *Heydrogen Energy Progress*, 1996.
- [10] M.ciniviz, H.kose, "Hydrogen use in internal combustion engine: A Review", *International J. of Automotive Engineering and Technologies*, vol. 1, pp. 1 – 15, 2012.
- [11] KV.Shivaprasad, R.Rajesh, W.AntenehWogasso, B.Nigatu, F.Addisu, "Usage of Hydrogen as a Fuel in Spark Ignition Engine", *IConMMEE, Materials Science and Engineering*, 2018.
- [12] M.Andrist, "GT-Power simulation of a hydrogen-fueled spark-ignited engine with a hybrid combustion system", *International J. of Hydrogen Energy*, vol.33, pp.17505-17519, 2019.
- [13] X. Zhang, Z.Yang, S.Zhong, J.Feng, K.Zhang, & F.Zhu, "Investigation of the flow field in a centrifugal pump with curved blades using GEM-3D". *J. of Mechanical Science and Technology*, vol.5, pp.2059-2069.
- [14] J. B.Heywood, "Internal combustion engine fundamentals", McGraw Hill Book Company, 1989.
- [15] M.Costa1, D.Piazzullo, and A.Dolce, "Hydrogen addition to natural gas in cogeneration engines: Optimization of performances through numerical modeling", *Frontiers in Mechanical Engineering.*, Vol. 7, August 2021. Article 680193.
- [16] V.Pandey, K.H.Shahapurkar, S.Guluwadi, G.A.Mengesha, B.Gadissa, N.R.Banapurmath, C.Vadlamudi, S.Krishnappa, and T.M.Yunus Khan, "Studies on the performance of engines powered with hydrogen-enriched Biogas", *Energies.*, vol.16, pp.43-49. 2023.

English Abstract

Numerical Study of Hydrogen Addition to Natural Gas Turbocharged SI-Engine on Performance Characteristics of the Engine

Setayesh Javadirad¹, Mohammad Hasan Saidi^{2*}, Nima Ajami³, Ali Etelaat⁴, Mohsen Mohsenirad⁵

1-Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, setayesh.javadirad@sharif.edu

2-Professor of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, saman@sharif.edu

3-Combustion Expert, IRANKHODRO POWERTRAIN Company (IPCO), Tehran, Iran, n_ajami@ip-co.com

4-Combustion Expert, IRANKHODRO POWERTRAIN Company (IPCO), Tehran, Iran, a_etelaat@ip-co.com

5-Combustion Expert, IRANKHODRO POWERTRAIN Company (IPCO)Tehran, Iran, m_mohsenirad@ip-co.com

*Corresponding author

(Received: 2023/06/01, Received in revised form: 2024/04/06, Accepted: 2024/05/10)

To improve the performance of gas-burning engines, hydrogen fuel was added to the engine intake mixture as a supplement, along with natural gas, due to its higher calorific value, wider ignition range, higher flame speed, faster combustion, and lower combustion temperature. A gas-burning engine from the light-duty category was chosen as the base engine. The engine simulation process was done in GT-Power software and validation was done using the performance test results of the base engine with gas fuel. Different percentages of the combination of natural gas and hydrogen fuels were applied to the simulation model by applying different combustion monitoring conditions and while checking engine performance indicators such as torque, BSFC, volumetric efficiency, BMEP, in-cylinder pressure, and NOx emission, the best percentages for the fuel mixture is designated. The results show that adding hydrogen fuel to natural gas improves the performance characteristics of the engine. Based on the obtained results, with hydrogen percentages equal to 10% to 20% in combination with gas, the performance indicators are improved, and for hydrogen amounts greater than 30% in the fuel composition, there will be no significant effect on improving engine behavior.

Keywords: Natural Gas Engine, Hydrogen Fuel, Fuel Mixture, Engine Performance Improvement