

تأثیرات نسبت هوا به سوخت، زمانبندی سوپاپ و جرقه بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور هیدروژن سوز

فرهاد سلیمی^۱، امیرحسین شامخی^۲، علی محمد پورخصالیان^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ دانشکده مکانیک؛ salimi84@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ دانشکده مکانیک؛ shamekhi@kntu.ac.ir

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ دانشکده مکانیک؛ pourkhesalian@yahoo.com

چکیده

سوخت، زمان جرقه‌زنی و زمانبندی سوپاپها بر روی پارامترهای عملکردی و میزان آلاینده‌های موتور مدل‌سازی شده بررسی و نمودارهای مربوطه ارائه شده است. همچنین در مورد دلایل رفتار موتور و میزان حساسیت آن به تغییرات پارامترهای مزبور به تفصیل بحث شده است.

مدل موتور

در این مقاله از مدل دوناچه‌ای شبه‌بعدی برای مدل‌سازی موتور استفاده شده است. مدل مربوطه معادلات دیفرانسیل اساسی برای مراحل مکش، تراکم، احتراق، انبساط و تخلیه را حل می‌نماید.

در این مدل محفظه احتراق به دو ناحیه سوخته و نسوخته تقسیم می‌شود. مرز بین این دو ناحیه توسط پیشانی شعله تعیین می‌شود. فرض می‌گردد که شعله به شکل یک نیمکره در طول محفظه احتراق حرکت کند، همچنین تشکیل NOx حرارتی در ناحیه سوخته اتفاق می‌افتد.

همچنین در این مدل انتقال حرارت با استفاده از روش وشنی [۵]، تشکیل NOx با استفاده از مدل توسعه‌یافته زلدویچ [۶]، سرعت شعله آرام با استفاده از روش ایلجیما [۷]، سرعت شعله آشفته با به‌کارگیری روش دمکوهلر [۸] و مدل اصطکاک با بهره‌گیری از متد فرگوسن [۹] محاسبه شده است. با توجه به اهمیت سرعت شعله بر عملکرد موتور، نحوه محاسبه‌ی سرعت شعله در مدل موتور هیدروژن سوز در ادامه شرح داده می‌شود.

سرعت شعله آرام

تقریباً در تمامی مدل‌ها سرعت شعله آشفته تابعی از سرعت شعله آرام می‌باشد، پس استفاده از روشی دقیق برای محاسبه سرعت شعله آرام لازم می‌باشد. روش‌های مختلفی برای محاسبه سرعت شعله آرام وجود دارد، ولی روش ارائه شده توسط ایلجیما [۷] یکی از معدود روشهایی است که تابع سه پارامتر دما، فشار و نسبت هوا به سوخت به صورت همزمان می‌باشد. دلیل انتخاب این روش برای مدل‌سازی، جامعیت و در عین حال سادگی روش مذکور است. رابطه ارائه شده توسط ایلجیما [۷] عبارتست از:

$$u_1 = u_{10} \left(\frac{T_u}{T_0} \right)^{\alpha_T} \left[1 + \beta_p \log \frac{P}{P_0} \right] \quad (1)$$

که در آن P فشار، T_u دمای نسوخته، $T_0=291(k)$ و $P_0=101325(Pa)$

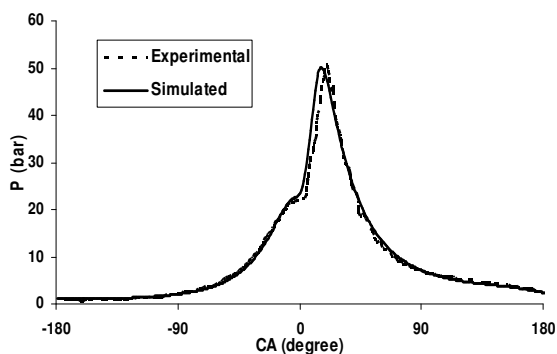
استفاده از هیدروژن به عنوان سوخت جایگزین در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در کاهش آلاینده‌ها بگذارد زیرا به جز مقداری جزئی آلاینده‌های کربنی ناشی از روغنهای روانکاری، NOx تنها آلاینده ایجاد شده در این نوع از موتورها است. در این مقاله مدل ترمودینامیکی احتراقی شبه بعدی دوناچه‌ای برای شبیه‌سازی موتورهای هیدروژنی اشتعال جرقه‌ای توسعه و با استفاده از اطلاعات تجربی صحت‌گذاری شده است. سپس تأثیرات نسبت هوا به سوخت، زمان جرقه‌زنی و زمانبندی سوپاپها بر روی پارامترهای عملکردی و میزان آلاینده‌های موتور، مدل و مورد بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: هیدروژن، سوخت جایگزین، موتورهای اشتعال جرقه‌ای، نسبت هوا به سوخت، زمان جرقه‌زنی، زمانبندی سوپاپ.

مقدمه

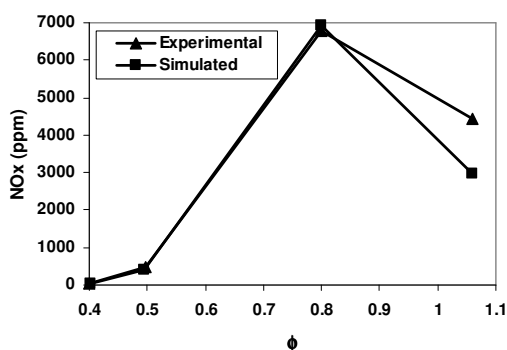
امروزه به علت افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و مشکلات به‌وجود آمده ناشی از آلاینده‌گی خودروها، هیدروژن به یکی از مورد توجه‌ترین سوخت‌های جایگزین تبدیل شده است. هیدروژن سوختی تجدیدپذیر و دارای مزایای بسیاری است که یکی از عملی‌ترین مزایای آن امکان به‌کارگیری آن در موتورهای دوگانه‌سوز می‌باشد. هیدروژن دارای خواص ویژه‌ای است که این امر سبب می‌شود تا رفتار احتراقی هیدروژن از بنزین بسیار متفاوت باشد. موتورهای احتراق داخلی هیدروژنی دارای راندمان بالایی می‌باشند. تحقیقات در زمینه مدل‌سازی موتورهای اشتعال جرقه‌ای در گذشته صورت گرفته [۱]. همچنین تحقیقاتی در مورد مشخصات موتور هیدروژنی و طراحی آن در گذشته صورت گرفته است و بالا بودن راندمان، پاک‌ی و ارزانی آن در مقایسه با پیل‌های سوختی نتیجه‌گیری شده است [۲]. در گذشته مقالات محدودی به شبیه‌سازی موتور هیدروژنی پرداخته‌اند. در مقاله‌ای [۳] از قانون وایب در مدلی صفربعدی استفاده و برای نسبت‌های تراکم و زمان‌های جرقه‌ی متفاوت قطر بهینه سیلندر برای مخلوط با غلظت ثابت محاسبه شده است. در مقاله‌ای دیگر [۴] مدل دوناچه‌ای به دلیل سرعت اجرای بالاتر و دقت مناسب به مدل چندانچه‌ای ترجیح داده شده است. در این مقاله در ابتدا روشی مناسب برای محاسبه سرعت شعله آرام و سپس سرعت شعله آشفته انتخاب شده است. همچنین با به‌کارگیری روش انتخاب شده مدل ترمودینامیکی احتراقی شبه‌بعدی دوناچه‌ای توسعه و با استفاده از اطلاعات تجربی صحت‌گذاری شده است. سپس تأثیرات نسبت هوا به

می‌کند. که این خود تاییدی بر صحت روشهای به کار گرفته شده در مدل است.



شکل ۱- مقایسه فشار به دست آمده از مدل و آزمایش نسبت به زاویه میل‌لنگ در دور ۲۸۳۰ (rpm) و نسبت هم‌آرزی سوخت به هوای ۱/۰۸

در شکل (۲) میزان آلاینده‌ی NOx حاصل از نتایج مدلسازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند، و تنها در مخلوط غنی تفاوتی بین نتایج مدلسازی و تجربی دیده می‌شود که این ناحیه برای موتور هیدروژن‌سوز چندان کاربردی نیست.



شکل ۲- مقایسه میزان آلاینده‌ی NOx به دست آمده از مدل و آزمایش در دور ۲۸۳۰ (rpm)

در شکل (۳) میزان فشار متوسط ترمزی به دست آمده از مدل و آزمایش در دور ۲۸۳۰ (rpm) حاصل از نتایج مدلسازی و تجربی با یکدیگر مقایسه شده‌اند و نزدیکی قابل ملاحظه‌ای بین آن دو وجود دارد.

شکل (۳) نشان دهنده‌ی کارکرد مناسب مدل در مدلسازی میزان اصطکاک موتور و تخمین میزان فشار متوسط ترمزی موتور است، و نزدیکی بین نتایج مدلسازی و تجربی در بازه‌ی گسترده‌ای از نسبت هم‌آرزی سوخت به هوا می‌باشد و این مساله دقت مدل اصطکاک فرگوسن [۹] و به طور کلی مدل توسعه یافته را تایید می‌کند.

و α_T و β_P این گونه تعریف می‌گردد:

$$\alpha_T = 1.54 + 0.026 (\phi - 1) \quad (2)$$

$$\beta_P = 0.43 + 0.003 (\phi - 1)$$

u_{10} سرعت شعله آرام در ۲۹۱ کلوین و ۱ اتمسفر است اینگونه

تعریف می‌گردد:

$$u_{10} = 2.98 - (\phi - 1)^2 + 0.32(\phi - 1.70)^3 \quad (3)$$

سرعت شعله آشفته

روشهای گوناگونی برای محاسبه شعله آشفته در موتور ارایه شده که در این مقاله از روش دمکوهلر [۸] استفاده گردیده است که در ادامه آورده شده است.

$$u_t = u' + u_l \quad (4)$$

که u' عبارتست از:

$$u' = u'_{TDC} \left(1 - 0.5 \frac{\theta - 360}{45}\right) \quad (5)$$

$$u'_{TDC} = 0.75 \bar{U}_P$$

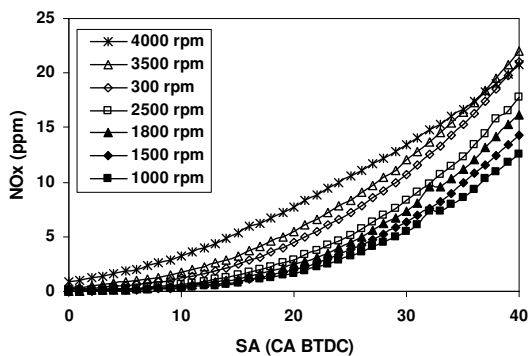
صحه‌گذاری

با استفاده از روشهای ذکر شده، مدل موتور توسعه یافته و به منظور صحه‌گذاری از اطلاعات موجود در یک مطالعه‌ی تجربی [۱۰] استفاده شده است. موتور مورد استفاده در این مطالعه، موتوری اشتعال جرقه‌ای است که با اعمال تغییراتی تبدیل به موتور اختصاصی هیدروژن سوز شده است. مشخصات موتور مربوطه در جدول ۱ دیده می‌شود.

جدول ۱: مشخصات موتور

۴۳۰/۸	حجم سیلندر (cc)
۸۶/۰	قطر داخلی سیلندر (mm)
۷۴/۲	کورس پیستون (mm)
۹/۷	نسبت تراکم
۳۶/۰	قطر سوپاپ هوا (mm)
۲۵/۴	قطر سوپاپ دود (mm)
۸/۴	خیز سوپاپ هوا (mm)
۵/۷	خیز سوپاپ دود (mm)

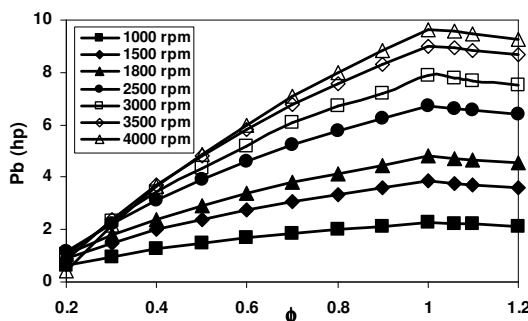
مقایسه نتایج مدلسازی و تجربی فشار داخل سیلندر نسبت به زاویه میل‌لنگ در شکل (۱) دیده می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۱) دیده می‌شود، مدل ایجاد شده نتایج را با دقت بسیار بالا محاسبه



شکل ۵- مقایسه تغییرات غلظت NOx نسبت به تغییرات زمان جرقه‌زنی

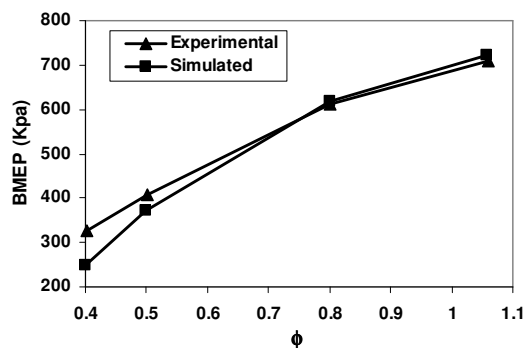
نسبت هوا به سوخت

دیگر پارامتر موثر بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور نسبت هوا به سوخت است، ویژگی‌های احتراقی هیدروژن و بنزین بسیار متفاوتند، به عنوان مثال سرعت شعله‌ی آرام هیدروژن در شرایط استوکیومتریکی تقریباً ۱۰ برابر بنزین می‌باشد. گستردگی محدوده‌ی قابل اشتعال هیدروژن امکان استفاده از مخلوط بسیار ضعیف را مهیا می‌سازد که این امر سبب کاهش چشمگیر در میزان آلاینده‌ی NOx می‌گردد. در شکل (۶) میزان توان موتور به نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا ترسیم شده است.



شکل ۶- مقایسه تغییرات توان موتور به تغییرات نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا

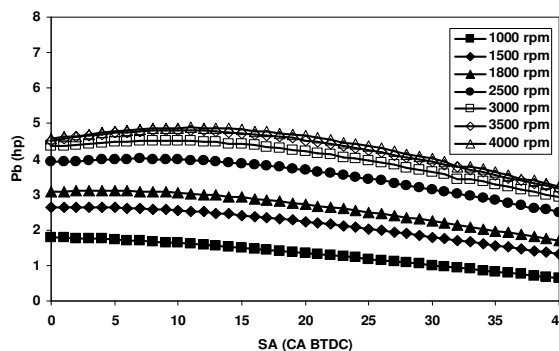
همان‌گونه که در شکل (۶) می‌بینید میزان توان موتور بین ۱ تا ۱۰ اسب بخار متغیر است و حداکثر میزان آن در نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای در حدود یک، شرایط استوکیومتریکی، اتفاق می‌افتد و این مساله در دوره‌های مختلف از موتور تکرار می‌شود. نسبت هوا به سوخت تاثیر چشمگیری بر میزان آلاینده‌ی NOx دارد که این مساله در شکل (۷) نمایش داده شده است. نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای مختلف میزان آلاینده‌ی NOx از حدود صفر تا حدود ۱۶۰۰۰ (ppm) متغیر است، که این مساله اهمیت این پارامتر را نشان می‌دهد. حداکثر میزان آلاینده‌ی NOx برای تمامی دوره‌ها در نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای در حدود ۰/۸ اتفاق می‌افتد، و با غنی



شکل ۳- مقایسه میزان فشار متوسط ترمزی به دست آمده از مدل و آزمایش در دور ۲۸۳۰ (rpm)

زمان جرقه‌زنی

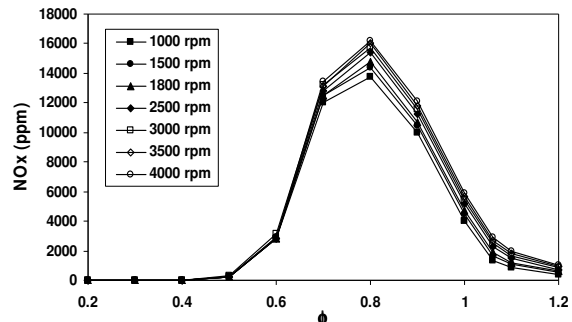
پارامتر زمان جرقه‌زنی تاثیر به‌سزایی در عملکرد و آلاینده‌های موتورهای احتراق داخلی دارد. تاثیر این پارامتر در موتور هیدروژنی مدل شده بررسی گردیده است. در شکل (۴) توان موتور نسبت به میزان آوانس جرقه، برای دوره‌های گوناگون ترسیم شده است. همان‌گونه که در شکل می‌بینید در دور ۱۰۰۰ (rpm) حداکثر میزان توان در آوانس جرقه‌ی در حدود صفر اتفاق می‌افتد و با افزایش دور میزان حداکثر توان در جرقه آوانس‌تر اتفاق می‌افتد و این میزان در دور ۴۰۰۰ (rpm) به حدود ۲۰ درجه می‌رسد.



شکل ۴- مقایسه تغییرات قدرت نسبت به تغییرات زمان جرقه‌زنی در دوره‌های مختلف

در شکل (۵) میزان آلاینده‌ی NOx نسبت به میزان آوانس جرقه، برای دوره‌های گوناگون ترسیم شده است. همان‌گونه که می‌بینید با افزایش میزان آوانس جرقه، میزان آلاینده NOx نیز افزایش می‌یابد. آوانس کردن جرقه سبب وقوع زودتر احتراق و در پی آن افزایش ماکزیمم فشار و در نتیجه افزایش دمای گازهای سوخته و در آخر سبب افزایش نرخ تشکیل NOx می‌گردد [۶]. همان‌گونه که در شکل (۵) دیده می‌شود آوانس جرقه تاثیر به‌سزایی بر میزان آلاینده‌ی NOx دارد و این مساله به روشنی اهمیت این پارامتر را نشان می‌دهد.

و یا ضعیف شدن مخلوط میزان آلاینده‌ی NOx به شدت کاهش می‌یابد.



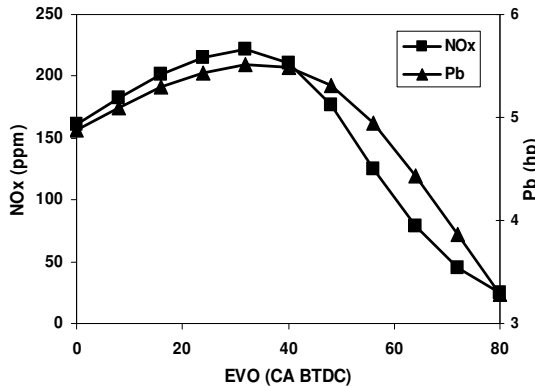
شکل ۷- مقایسه تغییرات غلظت NOx نسبت به تغییرات نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا

زمانبندی سوپاپ

در موتورهای احتراق داخلی زمان‌بندی سوپاپ تاثیر به‌سزایی بر عملکرد و آلاینده‌های موتور دارد و یکی از پارامترهای موثر و مهم است.

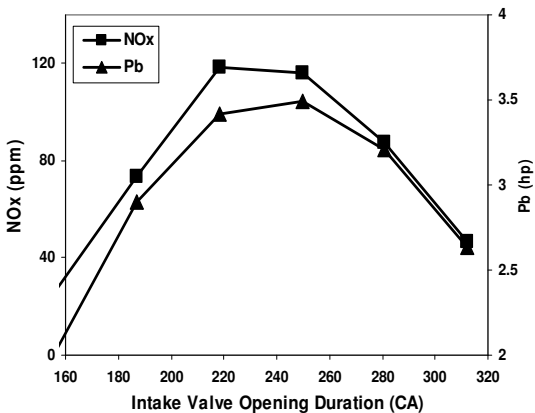
تاثیر زمان باز شدن سوپاپ دود و هوا بر روی آلاینده‌ها و عملکرد موتور هیدروژن‌سوز در شکل‌های (۸) و (۹) نمایش داده شده است. با زودتر باز شدن سوپاپ هوا میزان راندمان حجمی افزایش می‌یابد و به طبع آن دمای داخل سیلندر افزایش می‌یابد و این مساله سبب افزایش نرخ تشکیل NOx و افزایش توان موتور می‌گردد. ولی این مساله تا جایی ادامه می‌یابد که راندمان حجمی به حداکثر میزان خود برسد و پس از این مرحله پارامتر همپوشانی سوپاپ‌ها خود را نشان می‌دهد با افزایش پارامتر همپوشانی سوپاپ‌ها، میزان گازهای باقی‌مانده‌ی داخل سیلندر افزایش می‌یابد. این مساله سبب کاهش ظرفیت حرارتی مخلوط و در نتیجه کاهش توان و دمای داخل سیلندر که این امر سبب کاهش میزان آلاینده‌ی NOx می‌شود. روند رفتار موتور که در بالا گفته شد را می‌توان در شکل (۸) مشاهده کرد.

هر چه سوپاپ دود زودتر باز شود، زمان باز شدن سوپاپ در فشار بیشتر داخل سیلندر رخ می‌دهد و در نتیجه مقدار گاز سوخته‌ی بیشتری سیلندر را ترک می‌کند و گازهای باقی‌مانده‌ی کمتری در سیلندر می‌ماند پس ظرفیت حرارتی مخلوط بالا می‌رود و این مساله همان‌گونه که در شکل (۹) می‌بینید، سبب افزایش میزان آلاینده‌ی NOx و توان موتور می‌شود. ولی با افزایش میزان زود باز شدن سوپاپ دود تاثیر پارامتر همپوشانی سوپاپ‌ها بیشتر می‌شود و این باعث کم شدن توان و آلاینده‌ی NOx می‌شود، که در شکل (۹) نمایش داده شده است.

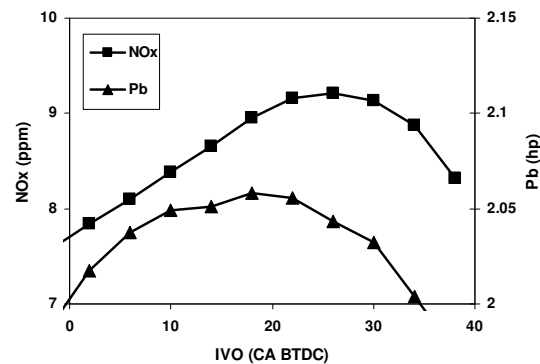


شکل ۹- مقایسه تغییرات غلظت NOx و توان موتور نسبت به تغییرات زمان باز شدن سوپاپ دود برای دور (rpm) ۲۵۰۰

از دیگر پارامترهای موثر بر عملکرد و آلاینده‌ی موتور مدت زمان باز بودن سوپاپ دود و هوا است. با افزایش مدت زمان باز بودن سوپاپ هوا راندمان حجمی افزایش می‌یابد و این مساله سبب افزایش دمای داخل سیلندر و در نتیجه افزایش آلاینده‌ی NOx و توان موتور می‌گردد ولی با افزایش هر چه بیشتر مدت زمان باز بودن سوپاپ هوا پارامتر همپوشانی سوپاپ‌ها افزایش می‌یابد و این امر باعث افزایش گازهای باقی‌مانده و در نتیجه کاهش توان و آلاینده‌ی NOx می‌شود. این مساله در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- مقایسه تغییرات غلظت NOx و توان موتور نسبت به تغییرات مدت زمان باز بودن سوپاپ هوا برای دور (rpm) ۱۵۰۰



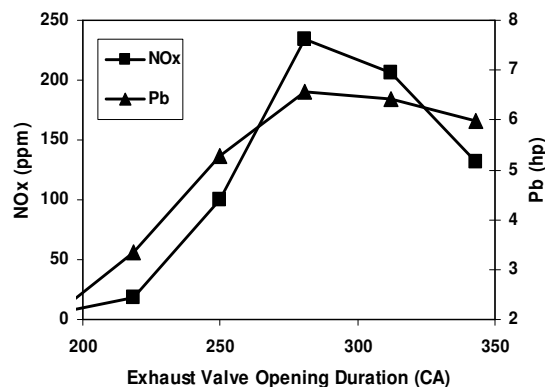
شکل ۸- مقایسه تغییرات غلظت NOx و توان موتور نسبت به تغییرات زمان باز شدن سوپاپ هوا برای دور (rpm) ۱۰۰۰

SA	آوانس جرقه، (درجه)
u	سرعت شعله
u'	سرعت متوسط شعله آشفته
\bar{U}_P	سرعت متوسط پیستون
α_T	ضریب نمایی دما
β_p	ضریب نمایی فشار
ϕ	نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا

مراجع

- [1]- Shamekhi, A. H., and Ghaffari, A., 2004, "An Improved Model for SI Engines". ASME, ICEF-2004-818.
- [2]- Sebastian Verhelst, Roger Sierens and Stefaan Verstraeten. "A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines", SAE paper, 2006-01-0430.
- [3]- Ma J., Su Y., Zhou Y. and Zhang Z. "Simulation and Prediction on the performance of a vehicle's hydrogen engine", International Journal of Hydrogen Energy, 28 pp77-83, 2003.
- [4]- Verhelst S., Verstraeten S., Sierens R "Development of a simulation code for hydrogen fuelled SI engines". Proceedings ASME Spring Technical Conference, Aachen, May 8-10 2006 ICES2006-1317
- [5]- Woschni, G., "A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine", SAE paper, 670931.
- [6]- J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, 1988.
- [7]- Iljima T, and Takeno T, "Effects of temperature and pressure on burning velocity". Combustion and Flame, 65:35-43, 1986.
- [8]- Verhelst S. "A study of the combustion in hydrogen-fuelled internal combustion engines". PhD thesis, Gent University, Gent, Belgium, 2005.
- [9]- Colin R. Ferguson and Allan T. Kirkpatrick, "Internal Combustion Engines: Applied Thermoscience", 2nd ed, John Wiley & Sons, Inc, 2001.
- [10]- Michael R. Swain, Gregory J. Schade and Matthew N. Swain, "Design and Testing of a Dedicated Hydrogen-Fueled Engine", SAE paper, 961077.

با افزایش مدت زمان باز بودن سوپاپ دود گازهای سوخته‌ی بیشتری سیلندر را ترک می‌کند و میزان گازهای باقی‌مانده در سیلندر افزایش می‌یابد و این امر سبب افزایش ظرفیت حرارتی مخلوط درون سیلندر و در نتیجه افزایش توان موتور و دمای داخل سیلندر می‌شود که این افزایش حرارت سبب افزایش میزان آلاینده‌ی NOx می‌شود. ولی با هر چه بیشتر شدن مدت زمان باز بودن سوپاپ دود بر اثر افزایش همپوشانی سوپاپ‌ها گازهای باقیمانده افزایش می‌یابد و این امر سبب کاهش توان و آلاینده‌ی NOx می‌شود. این رفتار موتور در شکل (۱۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات غلظت NOx و توان موتور نسبت به تغییرات مدت زمان باز بودن سوپاپ دود برای دور ۳۰۰۰ (rpm)

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله، در ابتدا مدلی از موتور هیدروژنی توسعه و صحت‌گذاری شده است و سپس تاثیر پارامترهای زمان جرقه‌زنی، نسبت هوا به سوخت و زمانبندی سوپاپ بر روی عملکرد و آلاینده‌های موتور مورد بررسی قرار گرفته است.

در این مقاله نشان داده شد که بیشترین میزان آلاینده‌ی NOx در نسبت هم‌ارزی سوخت به هوای در حدود ۰/۸ اتفاق می‌افتد. تاثیرات زمان باز شدن سوپاپ دود و هوا و همچنین مدت زمان باز ماندن سوپاپ‌ها بر آلاینده‌ها و عملکرد موتور هیدروژن‌سوز بررسی شد. این مطالعه همچنین دید روشنی از نوع رفتار موتور هیدروژنی ارائه می‌نماید که از آن می‌توان در طراحی موتور و کنترل آن بهره برد.

فهرست علائم

BTDC	قبل از نقطه مرگ بالا
CA, θ	زاویه میل‌لنگ (درجه)
NOx	اکسیدهای نیتروژن
P	فشار، (bar)
Pb	توان ترمزی، (hp)
ppm	یک در یک میلیون ذره
rpm	دور بر دقیقه