Archive of SID

مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی تهویه مطبوع و تاسیسات حرارتی و برودتی
۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۴، ایران، تهران، مرکز همایش‌های صدا و سیما
مجری: انجمن علمی مهندسی حرارتی و برودتی ایران
HVACconf-IRSHRAE-1-028

کاهش آلاینده Nox در مولد مقیاس کوچک تولید همزمان برق و حرارت با درایورهای دوگانه سوز (گازوئیلی و گازسوز) با استفاده از سیستم EGR

علی گودینی،دانشجویی مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال; ali.godini@gmail.com
علی منشاری،دانشجویی مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال Ali.menshari@gmail.com
مصطفی مافی ، استادیار گروه مهندسی مکانیک ، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) ; m.mafi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

امروزه بهره‌گیری از مولد مقیاس کوچک به منظور تامین همزمان برق و حرارت در سطح شهر ها گسترش یافته است که اثرات همچون تولید NOx به دنبال دارد و در آینده استفاده روز افزون از این مولد ها خود مشکل زا خواهد شد. به همین دلیل کاهش زیاد آلاینده NOx برای برآورده کردن استانداردهای آلایندگی و استفاده از مقادیر بالای EGR ضروری می باشد. یکی از مشکلات مرتبط با موتورهای دوگانه سوز عدم دستیابی به مقادیر بالای EGR در موتور می باشد. لذا نیاز به طراحی و ساخت یک سیستم خاص در چندراهه ورودی موتور برای افزایش سطح EGR میباشد. دستیابی به کاهش همزمان خروجی های NOx و HC بدون افت کارایی موتور در بار بخشی تمرکز فعلی پژوهش موتور دوگانه سوز است.

کلمات کلیدی: موتور دوگانه سوز، بازخورانی گاز خروجی اگزوز (EGR)، سیستم ونتوری

مقدمه

در دهه اخیر با افزایش آلایندگی هوا و تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از احتراق سوخت‌های هیدروکربنی ، قوانین آلایندگی سخت‌گیرانه‌ای توسط کشورهای مختلف وضع شده‌اند تا محدودیتی برای آلاینده‌های خروجی تولیدی صنایع و خودرو ها وضع کنند. یکی از آلاینده‌های مضر و مهم آلاینده اکسیدهای نیتروژن (NOx) می‌باشد که روش‌های مختلفی برای کاهش آن وجود دارد. یکی از روش‌های مرسوم استفاده از بازخورانی گازهای خروجی (EGR) به داخل موتور به عنوان درایور در مولدهای کوچک تولید همزمان برق و حرارت می‌باشد.[1] در این مقاله به بررسی این روش در موتور دوگانه سوز که به عنوان یک درایور در مولد قرار دارد می پردازیم در این روش کسری از گازهای خروجی موتور به داخل چند راهه ورودی بازگردانده می‌شوند و با کاهش دمای احتراق باعث کاهش تشکیل آلاینده NOx می‌شوند.[2] در سال‌های اخیر برای کاهش آلاینده‌ها، استفاده از سوخت‌های پاک در موتورهای دوگانه سوز مانند سوخت گاز طبیعی/دیزل پیشنهاد شده است.[3] به منظور مطابقت با استانداردهای آلایندگی، بازخورانی گازهای خروجی بایستی در محدوده گسترده‌تری از عملکرد موتور دوگانه‌سوز استفاده شده در مولد اعمال شود،[4] بنابراین درصدهای بالای بازخورانی گازهای خروجی مورد نیاز می باشد. بدین منظور استفاده از سیستم بهینه بازخورانی گازهای خروجی در چندراهه ورودی ضروری می باشد.[5]

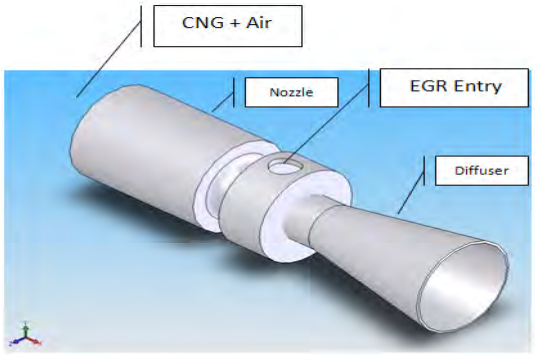
سیستم ونتوری EGR

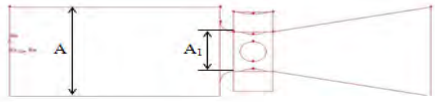
برای طراحی با توجه به هندسه موتور موجود به عنوان درایور یک سیستم مولد همزمان برق و حرارت در مقیاسی کوچک (موتور دوگانه سوز لیستر ۱-۸) طرح اولیه در نرم افزار Solidworks ترسیم شد و سپس بهینه سازی پارامتریک با استفاده از نرم افزارFluent انجام شد. سیستم بهینه بازخورانی گازهای خروجی متشکل از یک ونتوری مانند در مسیر ورودی تعبیه می-شود و از سه بخش تشکیل یافته است : نازل[1] ، بخش ورودی EGR و دیفیوزر[2]. به علت مشخصات ساختاری ونتوری یک کاهش فشار محلی در ناحیه گلویی[3] ونتوری روی می‌دهد. وقتی که فشار کاهش می‌یابد گاز EGR از طریق سوراخ‌هایی که بر روی گلویی در بین نازل و دیفیوزر ایجاد شده است، به داخل هوای ورودی جریان می‌یابد و با هوا مخلوط می شود. شکل ۱ مدل کلی از ونتوری مورد نظر را نشان می‌دهد.

[1] Nozzle
[2] Diffuser
[3] Throat

www.Hvacconf.ir
www.SID.ir

Archive of SID





شکل ۱: مدل کلی از ونتوری مورد نظر

برای شبیه سازی ونتوری مورد نظر از نرم افزار فلوئنت استفاده شد. بدین منظور حالت های مختلف بخش‌های تشکیل دهنده ونتوری برای یافتن مشخصات ونتوری بهینه برای افزایش نرخ EGR با کمترین افت فشار مورد بررسی قرار گرفت. مراحل کاری انجام یافته به صورت زیر می باشند:

- **تعریف شرایط مرزی**

در قسمت ورودی نازل برای مخلوط سوخت – هوا و در قسمت ورودی گلویی برای EGR شرط مرزی جریان جرمی تعریف می شود که در جریان تراکم پذیر برای بیان میزان جریان جرمی در ورودی در نظر گرفته می‌شود. برای سادگی محاسبات سوخت گاز، متان و EGR متشکل از دو گاز CO2 و H2O در نظر گرفته شد. باید اطلاعات زیر را در مرز ورودی جریان جرمی وارد کرد :

- ♦ نرخ جریان جرمی
- ♦ دمای سکون
- ♦ فشار استاتیک
- ♦ جهت جریان
- ♦ پارامترهای اغتشاش

که تمامی این پارامترها از روی مقادیر آزمایشگاهی اندازه گیری شده معلوم می باشند. برای خروجی دیفیوزر از شرط مرزی فشار خروجی استفاده می‌شود که این شرط احتیاج به بیان فشار (نسبی) استاتیک در مرز خروجی دارد. به کارگیری این شرط نسبت به دیگر شرایط خروجی، زمانی که جریان برگشتی رخ می دهد اغلب نتیجه بهتری در همگرایی دارد. باید اطلاعات زیر را برای مرز خروجی فشار وارد کرد :

- ♦ فشار استاتیک
- ♦ دمای سکون برای محاسبات انرژی
- ♦ پارامترهای اغتشاش

که تمامی این پارامترها از روی مقادیر آزمایشگاهی اندازه گیری شده معلوم می باشند.

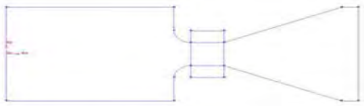
برای جداره های ونتوری از شرط مرزی دیوار (Wall) استفاده می‌شود که برای محدود کردن نواحی سیال به کار می‌رود. در این شرط مرزی از حالت شار گرمایی ثابت استفاده می‌شود که به وسیله صفر قرار دادن مقدار شار گرمایی دیواره آدیاباتیک فرض می‌شود.

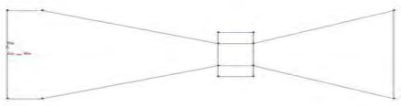
تاثیر هندسه ونتوری

در این قسمت تاثیرات بهینه سازی قسمت های مختلف تشکیل دهنده ونتوری به وسیله نرم افزار فلوئنت مورد بررسی قرار می گیرد. دوازده حالت مختلف برای یافتن مشخصات ونتوری بهینه که قابلیت گسترش سطح EGR با حداقل افت فشار را در شرایط کارکرد در بارهای جزئی موتور را داشته باشد؛ مورد مطالعه قرار گرفتند.

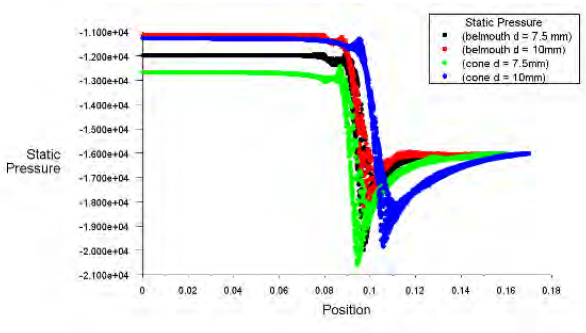
- نازل

به منظور برآورده کردن اهداف فشردگی و کمترین افت فشار شکل نازل ونتوری در دو حالت مورد نظر، Bell-mouth و Cone مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه سازی نشان داد که افت فشار در حالت نازل مخروطی شکل (Cone) در مقایسه با حالت Bell mouth به مقدار جزئی کمتر می باشد ؛ ولی به خاطر طول کمتر نازل Bell mouth و نصب آسان آن بر روی موتور این نوع ونتوری با این شکل نازل انتخاب شد.





شکل ۲: شکل نازل های مختلف ونتوری مورد بررسی



شکل ۳: تاثیر شکل نازل بر روی افت فشار

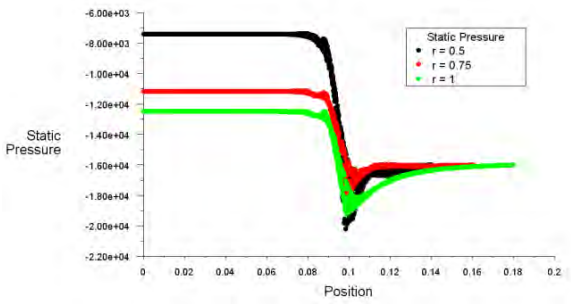
- دیفیوزر

کاملا واضح است که افت فشار به صورت قابل توجهی به زاویه واگرایی دیفیوزر بستگی دارد. با توجه به اینکه با افزایش زاویه واگرایی دیفیوزر فشرده تر می شود و طول آن به طور معکوس متناسب با زاویه واگرایی می باشد، از این رو نسبت طول دیفیوزر به طول نازل ($\frac{L}{L_0}$) مدنظر قرار گرفت.

www.SID.ir

Archive of SID

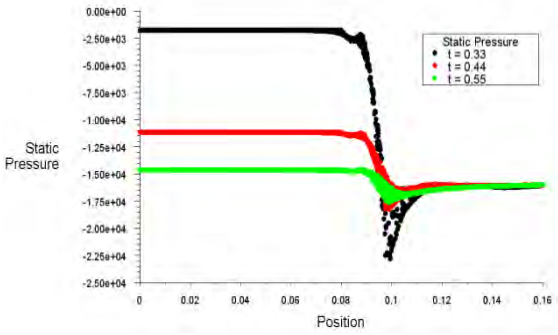
بدین منظور سه حالت مختلف بررسی شد که نتایج آن در نمودار زیر نشان داده شده است ؛ کاملاً مشخص است که با کاهش $\frac{L}{L_0}$ و افزایش زاویه انبساط دیفیوزر افت فشار افزایش می یابد. اگر افزایش مورد انتظار در افت فشار به درستی کنترل شود، دیفیوزر با طول کمتر به طور قابل توجهی اندازه ونتوری را کاهش خواهد داد. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که نسبت $\frac{L}{L_0}=0.75$ مناسب ترین حالت برای دیفیوزر می باشد تا به حد کافی فشرده باشد و در حالیکه قادر باشد افت فشار را تا حد نسبتاً مناسبی کنترل کند.



شکل ۵: تاثیر طول دیفیوزر بر افت فشار

- نسبت انقباض

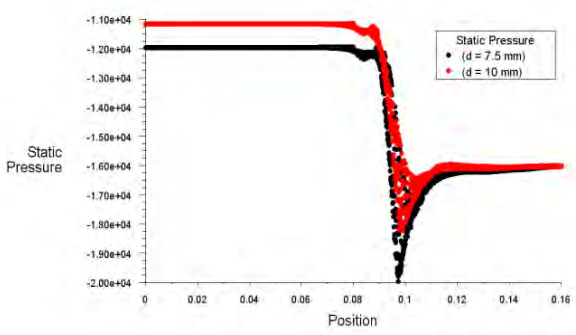
نسبت انقباض به صورت نسبت سطح مقطع گلویی ونتوری به سطح مقطع ورودی نازل تعریف می شود . همانطور که از شکل زیر مشخص می باشد با افزایش نسبت انقباض افت فشار کاهش می یابد در حالیکه اندازه و وزن ونتوری موردنظر افزایش می یابد . با توجه به نتایج شبیه سازی نسبت انقباض $\frac{A}{A_0}=0.44$ مناسب می‌باشد ،همچنین جریان هوای ورودی با این نسبت انقباض به سرعت صوت نمی رسد.



شکل ۶: تاثیر نسبت انقباض بر روی افت فشار

- تاثیر اندازه قطر سوراخ های گلویی ونتوری

در نهایت دو قطر مختلف برای ورودی EGR مورد بررسی قرار گرفت که در شکل زیر نشان داده شده است . کاملا مشخص است که با افزایش قطر سوراخ ها افت فشار به صورت جزئی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که قطر $d=10mm$ ایده آل ترین حالت می-باشد.



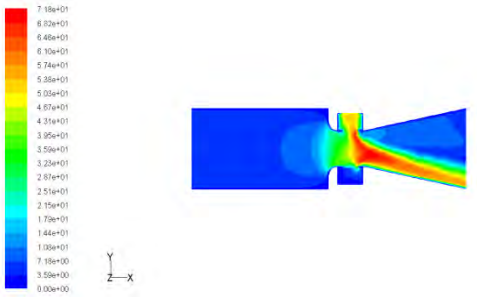
شکل۷: اثیر اندازه قطر سوراخ های گلویی ونتوری

- هندسه نهایی ونتوری بهینه

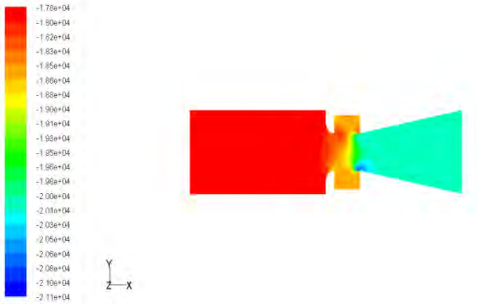
در نهایت مشخصات ونتوری بهینه موردنظر به دست آمد که در جدول ۱ نشان داده شده است. نمونه ای از منحنی افت فشار در طول ونتوری در شکل ۵ نشان داده شده است. در نهایت ونتوری بهینه ساخته شده و بر روی موتور نصب شد. نمایی از ونتوری مورد نظر در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۱۱ محل نصب ونتوری مورد نظر را بر روی چند راهه ورودی موتور دوگانه سوز نشان می دهد.

جدول ۱- هندسه بهینه ونتوری

Contraction Ratio	0.44
Nozzle	Bell-mouth
EGR Entry	d = 10 mm
Diffuser	Expansion Angle α = 11 .85 Overall Length = 160 mm



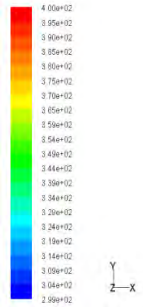
شکل ۸ - کانتور سرعت توزیع در ونتوری بهینه



شکل ۹- کانتور فشار توزیع در ونتوری بهینه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰- کانتور دما توزیع در ونتوری بهینه

آنالیز تجربی سیستم EGR ونتوری

در بخش دوم مقاله، تحقیق تجربی به نرخ EGR بالا برای یک موتور انجام شد ارایه می گردد.ونتوری بهینه تولید برای آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سپس، آن را در دو منیفولد سوخت موتور نصب شده و به منظور بررسی نتایج CFD مورد آزمایش قرار گرفت. همه آزمایش بر روی یک سیلندر، چهار زمانه، خنک شونده با آب ، پاشش غیر مستقیم موتور با سوخت دوگانه (لیستر ۸-۱) در سرعت موتور ثابت ۷۳۰ دور در دقیقه انجام شد. جدول ۲، مشخصات کلی موتور لیستر (۸-۱) را نشان می دهد.

جدول۲- مشخصات کلی لیستر (۸-۱) موتور دوگانه سوز

Item	Specification
Type	Four Stroke
Number of Cylinders	1
Combustion System	IDI
Bore	114.1 mm
Stroke	139.7 mm
Swept Volume	1.43 Lit
Compression Ratio	17.5:1
Max. power hp/rpm	8/850
Injection Pressure	91.7 kg/cm^2
Injection Timing	20^0 BTDC

شکل ۱۱- استفاده از سیستم ونتوری EGR

- سیستم EGR

در سیستم EGR شامل یک موتور شیر کنترل، لوله ها و ونتوری که در شکل ۱۳ نشان داده شده استبرای اندازه گیری مقدار EGR ، نسبت EGR نظر گرفته شد که نصبت به شکل زیر است:

$$\%EGR = \frac{\%CO_2\,(inlet)}{\%CO_2\,(outlet)} \times 100 \qquad (۱)$$

درصد خطاهای گزارش برای نسبت EGR تا ۵٪

- آنالیز گاز خروجی

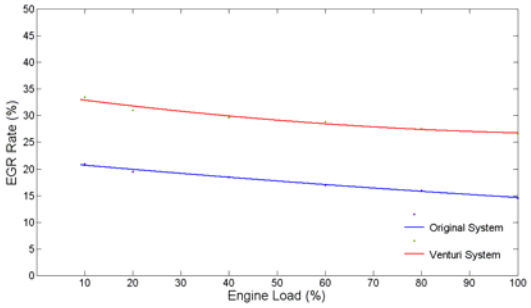
گازهای خروجی اگزوز مانند CO_2 توسط AVL 4000 گاز اگزوز اندازه گیری شد.

- نتایج تجربی

فرآیند احتراق به شدت مقدار سوخت و نسبت هم ارزی سوخت در موتورهای دوگانه سوز وابسته است.با توجه به نتیجه آزمایش عامل های مختلف بر کار موتور تاثیرگذار می باشد. در آزمایش بار های مختلف از ۱۰٪ تا شرایط بار کامل مورد بررسی قرار گرفته است.برای بارها ۱۰٪، ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ مقدار سوخت آزمایشی کاهش می یابد در و NG با آن جایگزین می شود گشتاور موتور در یک سرعت ثابت و نسبت کلی هم ارزی ثابت باقی می ماند. در هر مورد درصد نرخ EGR اندازه گیری شد و با سیستم اصلی بدون EGR مقایسه می شود.شکل ۱۴ مزایای استفاده از سیستم ونتوری با سیستم اصلی و نرخ EGR را نشان می دهد.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۲- مقایسه سیستم ونتوری EGR با سیستم معمولی

نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل CFD همراه با تحقیقات تجربی انجام شده برای پیدا کردن یک سیستم بهینه برای میزان بالایی از EGR ورودی به چند راهه موتور دوگانه سوز است.نتیجه به دست آمده عبارتند از:

• تجزیه و تحلیل CFD از ونتوری که باید بهینه سازی شده باشد برای افزایش نرخ EGR در محدوده اعمال بار با از دست دادن حداقل فشار.

• نتایج تجربی نشان می دهد اندکی افزایش نرخ EGR با کاهش بار موتور همراه است. در عمل مقدار کمتری هوا و NG در موتور وجود دارد، افت فشار شامل سیستم ونتوری در بخش نازل و دیفیوزر می باشد، این امر می تواند مقدار بالاتر از EGR به منیفولد ورودی به همراه داشته باشد.

• استفاده از این سیستم در درایورهای موجود جهت کاهش آلودگی بسیار مناسب بوده و تاثیر چشمگیری کاهش Nox خواهد داشت.

مراجع

[1] R. Scarcelli, “Lean-Burn Operation for Natural Gas/Air Mixtures: The Dual Fuel Engines”, PhD Thesis in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Roma, Italy, 2007.

[2] T. Sato, T. Saito, Y. Daisho, “Combustion and Exhaust Emission Control in a Dual-Fuelled Engine”, JSAE Paper No.9305346, 1993.

[3] CS. Weavar, SH. Turner, “Dual Fuel Natural Gas/Diesel Engines: Technology, Performance and Emissions”, SAE Paper No. 940548, 1994.

[4] M.Y.E. Selim, “Effect of Exhaust Gas Recirculation on Some Combustion Characteristics of Dual Fuel Engine”, Energy Conversion and Management 44,707-721, 2003.

[5] H Yokomura, S. Kohketsu, K. Mori, “EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine; Expansion of EGR Area with Venturi System”, Technical Review, Mitsubishi Motors Corporation, 2003.

[6] K.K Srinvasan, S.R. Krishnan, Y. Qi, C. Midkiff, H. Yang ,“Analysis of Diesel Pilot-Ignited Natural Gas Low-Temperature Combustion with Hot Exhaust Gas Recirculation”. Combustion Sci. and Tech, 179:1737-1776, 2007.

[7] V. Pirouzpanah, R. Khoshbakhti Saray, A. Sohrabi and A. Niaei, “Comparison of thermal and radical effects of EGR gases on combustion process in dual fuel engines at part loads”, Journal of Energy Conversion & Management, Vol.48:1909-1918,2007.

www.SID.ir