

بررسی راهکارهای افزایش توان موتورهای احتراق داخلی از

دیدگاه نظری و راندمانی

محمد مرادی

مریی دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (علیه السلام)

چکیده

موتورهای احتراق داخلی به عنوان مولد نیرو محرکه و قلب تپنده وسایل نقلیه اهمیت و جایگاه ویژه‌ای در صنعت حمل و نقل دارند. آنچه در سالیان اخیر با توجه به شرایط و قوانین جهانی در مورد الزامات زیست محیطی و مصرف بهینه انرژی، از اولویت‌های شرکت‌های تولیدی و بهینه‌سازی این موتورها می‌باشد، استفاده حداکثری از ظرفیت یک محصول با بهره‌وری بالا و مصرف بهینه سوخت می‌باشد؛ لذا موضوعات توان، گشتاور و مصرف سوخت بیشتر از سایر مؤلفه‌های موتور مورد توجه می‌باشد. برای استفاده حداکثری از ظرفیت یک موتور احتراق داخلی تولید شده و یا ارتقاء آن دو راه حل پیشنهادی متصور است. راه حل اول بررسی و مطالعه مؤلفه‌های هندسی موتور و بازطراحی آن از لحاظ ابعادی است. راه حل دوم بررسی مؤلفه‌های فنی (پارامترهای اصلی) موتور و احصاء راه حل بهینه نمودن آنها می‌باشد که با تغییرات جزئی در برخی از قطعات غیر اصلی موتور این امکان میسر است. در این مقاله به صورت مروری با مطالعه و بررسی مقالات، کتب و منابع مربوط به کارگاه‌های تخصصی همایش‌های ارائه شده در این زمینه، این دو راه حل از دو دیدگاه افزایش توان موتور به صورت نظری و بازده‌های خروجی موتور مورد بحث گذاشته شده است و پس از بررسی هر یک، راه حل و پیشنهادهایی برای افزایش توان این موتورها ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی

موتور احتراق داخلی، توان، گشتاور، راندمان خروجی موتور

Investigating solutions to increase the power of internal combustion engines from a theoretical and efficient Comments

Mohamad moradi

Instructor, Department of Mechanics, college of floating, Imam Khamenei University of Marine Sciences and Technology, Imam Hossain (AS) University of Officers and Guards Training; Mohamad.moradi0932@gmail.com

Abstract

Internal combustion engines have a special importance and place in the transportation industry as generators of propulsion and the beating heart of vehicles. In recent years, according to global conditions and laws on environmental requirements and energy efficiency, is one of the priorities of manufacturing companies and optimization of these engines, Maximum use of the capacity of a product with high productivity and optimal fuel consumption; Therefore, the issues of power, torque and fuel consumption are more important than other engine components. To maximize the capacity of an internal combustion engine produced or upgraded, two proposed solutions are considered. The first solution is to study and study the geometric parameters of the engine and redesign it in terms of dimensions. The second solution is to study the technical components (main parameters) of the engine and calculate the solution to optimize them, which is possible with minor changes in some non-main parts of the engine. In this article, by reviewing and reviewing articles, books and resources related to specialized workshops and conferences presented in this field, These two solutions are discussed theoretically from two perspectives of increasing engine power and engine output efficiencies and after reviewing each, solutions and suggestions to increase the power of these engines are provided.

Keywords

Internal combustion engine, power, torque, engine output efficiency

با مروری بر پیشرفت تکنولوژی در عرصه تولیدات موتورهای احتراق داخلی می‌توان پی به این نکته برد که محصولات این حوزه در جهت هوشمند سازی، مصرف بهینه سوخت و تولید موتور با توان و گشتاور بالا، پیش می‌رود؛ اما گزینه‌ای که اهمیت و جذابیت بیشتری برای کاربران و مصرف‌کنندگان دارد، گزینه توان و گشتاور موتورهای می‌باشد؛ چرا که توان و گشتاور خروجی موتورهای پارامتر مهمی در انتخاب نیرومحرکه برای مصرف‌کننده می‌باشد؛ بنابراین سعی، تلاش و رقابت طراحان و مهندسان در عرصه تولیدات یا بهینه‌سازی موتورهای احتراق داخلی مبتنی بر تولید یا بهینه نمودن با حداکثر بهره‌وری و ظرفیت توان خروجی می‌باشد. در زمینه بهینه‌سازی و ارتقاء موتورهای احتراق داخلی کارهای فراوانی انجام شده و در حال پیگیری است. به‌عنوان مثال در حوزه موتورهای دیزل دریایی می‌توان به سری‌های مختلف موتورهای ایزوتا ۱۲ سیلندر اشاره نمود که با خروجی توان‌های مختلف با حفظ پارامترهای هندسی موتور، توسط شرکت ایزوتا فراسچینی^۱ ارائه شده است [۱]. در موضوع ارتقاء توان می‌توان به موتور سیتک^۲ مدل ۸۲۰ اشاره نمود که نسبت به مدل ۶۲۰ با حفظ مؤلفه‌های هندسی از قبیل تعداد و قطر سیلندر، طول کورس و نسبت تراکم موتور، با بهینه نمودن چرخه تنفسی و کیفیت احتراق حدود ۳۲ درصد افزایش توان داشته است [۲]. موتورهای ملی بنیان ۱، ۲ و ۴ نیز با بهینه‌سازی چرخه تنفسی و افزایش راندمان حجمی، ارتقاء توان داشته‌اند. شرکت ایل‌مور^۳ نیز از جمله تولیدکننده‌های موتورهای دریایی است که از موتورهای پایه زمینی شرکت جی‌ام^۴ استفاده نموده و ضمن تغییر نوع کاربری، توان آن را افزایش داده است. در زمینه توسعه و ارتقاء توان موتورهای مدل ال اس^۵ شرکت شورولت^۶، شرکت ال ام ای^۷ آمریکا نیز فعالیت می‌کند [۳]. در زمینه بهسازی و افزایش قدرت موتور دیزل از جمله بالا بردن نسبت تراکم، پرخورانی موتور، بهینه کردن کیفیت سوخت، بالا بردن راندمان احتراق و در نهایت کاهش تلفات اصطکاکی حسن ندیمی مواردی را از موتور را مورد بررسی قرار داد که از میان تمامی روش‌های فوق، افزایش قدرت موتور در حجم ثابت و به عبارت دیگر افزایش قدرت لیتراژی موتور به کمک پرخورانی

یکی از مؤثرترین و متداول‌ترین روش‌ها مد نظر قرار گرفت. ایشان به‌عنوان نمونه برای افزایش قدرت یک موتور دیزلی با کمترین تغییرات و با قدرت نامی ۵۵۰ کیلووات موفق شدند که توان این موتور را به ۷۴۶ کیلووات ارتقاء دهند [۴]. هدف اصلی در طراحی سیستم هوا رسانی بهینه کردن مقدار هوای ورودی به موتور جهت تولید توان بیشتر است. یکی از پارامترهای مؤثر بر جرم هوای ورودی به موتور فشار ورودی هوا می‌باشد که متأثر از چندین عامل مختلف مانند فشار هوای محیط، افت فشار مسیر هواکش، افت فشار فیلتر هوا و غیره می‌باشد. مجید عرب و همکاران در سال ۱۳۹۵ با مطالعه در مسیر هوا رسانی موتور دیزل سنگین بر این عقیده بودند که مشکل جانمایی قطعاتی از جمله فیلتر هواکش در مسیر هوا رسانی باعث کاهش بازدهی می‌باشد؛ بنابراین ناگزیر نیاز به تغییراتی در سیستم هوا رسانی شدند. لذا با ایجاد تغییراتی در سیستم هوا رسانی موتور هدف نسبت به یک خودروی مبنا استاندارد (خودروی اکسور) این موضوع را بررسی کردند. آن‌ها با مدل‌سازی و تحلیل مدل در نرم افزار فلوینت به بررسی تغییرات ایجاد شده در مسیر هوا رسانی خودروی هدف پرداختند. بعد از تحلیل‌های صورت گرفته و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمون‌های میدانی آنچه از نتایج برمی‌آمد این بود که افت فشار حاصل از تغییرات هندسی ایجاد شده در بازه استاندارد قرار دارد و مشکلی برای تنفس خودرو ایجاد نخواهد کرد [۵]. به‌طور کل بهینه‌سازی موتورهای به‌منظور افزایش توان و گشتاور موتورهای کار دو گروه است. گروه اول موتورسازان بزرگ دنیا می‌باشند که قبل از تولید موتور، پارامترهای موتور را بررسی نموده و موتور را طراحی می‌نمایند. به‌عنوان مثال قطر سیلندر، کورس پیستون، طراحی نوع سوپاپ‌ها، اتاقلک‌های احتراق مختلف و هزاران عواملی که در بهبود توان موتور تأثیر دارد. گروه دوم شرکت‌ها و کارگاه‌های تخصصی به‌اصطلاح تیونینگ^۸ موتور هستند که پس از تولید موتور با مطالعه و بررسی و ایجاد تغییراتی موجب افزایش توان موتور می‌شوند. برخی از این تغییرات برای موتور مفید بوده و برخی از تغییرات دیگر مضرند که در جای خود نیاز به بررسی دارند. در این مقاله، نخست مؤلفه‌هایی که از دیدگاه نظری در توان و گشتاور موتور

^۶ chevrolet

^۷ LME

^۸ Tuning

^۱ Isotta Fraschini

^۲ Seatek

^۳ Ilmoor

^۴ GM

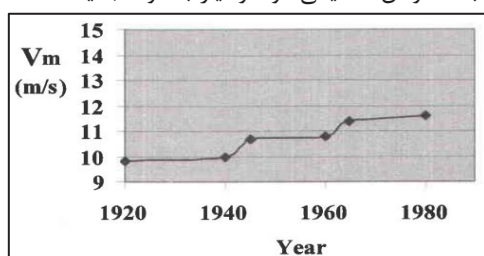
^۵ LS

معیارهای موجود، معیار قدرت به حجم سیلندر بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۲- سرعت متوسط پیستون (Vm)

افزایش سرعت متوسط پیستون یا دوران موتور، ساده‌ترین روش افزایش قدرت یک موتور است اما این روش به دلایل زیر متداول نشده است.

- تلفات اصطکاکی یا در واقع عدم دستیابی به تکنولوژی ساخت سطوح اصطکاکی با قابلیت بازیابی لایه روغن
- افزایش سطح بارهای دینامیکی روی مکانیزه لنگ پیستون
- عمر موتور
- ثبات خواص مکانیکی مواد و نیاز به مواد جدید



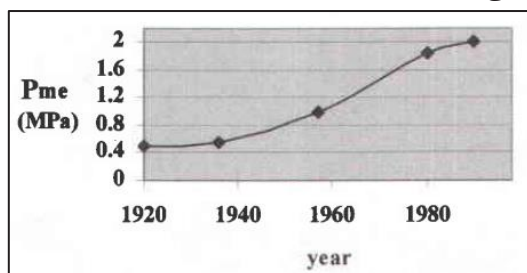
شکل (۱): دیاگرام تغییرات سرعت متوسط پیستون در طول سال‌های گذشته [۶]

۲-۳- تعداد سیلندر (Z)

قطر سیلندر، کورس پیستون و تعداد سیلندر، لیتراژ موتور را مشخص می‌کند اما برای افزایش تعداد سیلندر محدودیت‌های ابعادی وجود دارد. انتخاب سیلندر، منوط به حجم قابل دسترس در محفظه موتور بوده و امروزه تمایل به کاهش S/D به منظور افزایش قابلیت اطمینان شاتون و میل‌لنگ وجود دارد (برای موتورهای تجاری $S/D=1$).

۲-۴- فشار مؤثر متوسط (Pme)

بهترین روش افزایش قدرت موتور، بالا بودن فشار مؤثر متوسط آن است که در طی سال‌های گذشته به بیش از ۳ برابر شده است. قابلیت افزایش این پارامتر برای موتورهای قدیمی وجود دارد.



شکل (۲): دیاگرام تغییرات فشار مؤثر متوسط در طول سال‌های گذشته [۵]

اثر دارند بررسی می‌شوند و در ادامه تأثیر این مؤلفه‌ها از دیدگاه بازدهی موتور مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. پس از بررسی این دو دیدگاه، راهکارهایی که در جلوگیری از افت یا ارتقاء توان خروجی موتورهای احتراق داخلی مؤثر خواهند بود ارائه می‌شود.

۲- بررسی روش‌های نظری افزایش قدرت موتور احتراق داخلی

قدرت مؤثر (Pe) یک موتور پیستونی بر حسب کیلو وات از فرمول محاسباتی زیر به دست می‌آید:

$$p_e = \frac{p_{me} \cdot v_s \cdot z \cdot n}{60} \cdot 10^{-3} (kW) \quad (1)$$

با جایگزینی و تبدیل برخی از پارامترهای فوق به فرمول (۲) می‌رسیم:

$$p_e = 0.392 \frac{p_{pe}}{c} D^2 \cdot z \cdot v_m 10^{-3} (kW) \quad (2)$$

$$p_e \uparrow \rightarrow D \uparrow, v_m \uparrow, p_{me} \uparrow, z \uparrow$$

با تأملی بر فرمول (۱) مشخص می‌شود که برای افزایش قدرت یک موتور پیستونی بایستی تدابیری اتخاذ کرد که منجر به افزایش مقادیر پارامترهای موجود در صورت فرمول فوق شود که در زیر به بررسی این پارامترها پرداخته می‌شود.

۲-۱- افزایش قطر سیلندر (D)

با افزایش قطر سیلندر، قدرت موتور به نسبت مربع قطر، افزایش پیدا می‌کند اما در افزایش قطر محدودیت اندازه و قابلیت اطمینان موتور مطرح است. با افزایش قطر، تنش و بارهای حرارتی وارده بر قطعات گروه پیستون به شدت افزایش می‌یابد که این قطعات مشخص‌کننده قابلیت اطمینان موتور می‌باشند همچنین باید توجه داشت که معیار قدرت به حجم سیلندر نیز بایست مورد بررسی قرار گیرد. برای ارزیابی تنش‌های حرارتی روی پیستون معیارهای زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- معیار قدرت موتور به قطر پیستون
- معیار قدرت به مساحت پیستون
- معیار قدرت به حجم سیلندر
- معیار قدرت به حجم موتور

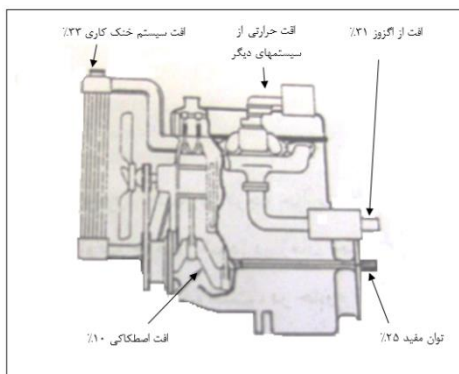
گوناگونی شرایط و فاکتورهایی که روی تنش حرارتی تأثیر می‌گذارند، به دست آوردن یک معیار مناسب خاص ارزیابی تنش حرارتی روی پیستون را مشکل می‌کند. از میان

به‌طور معمول برای موتورهای معمولی این نسبت بین ۶۵ تا ۸۵ درصد است.

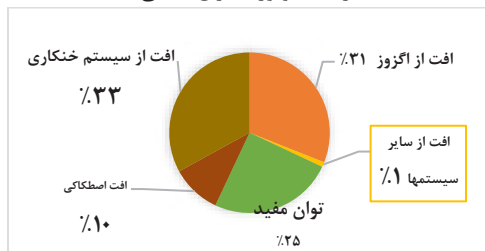
$$(۳) \quad \text{هوای مکش شده به صورت واقعی} = \frac{\text{هوای مورد نیاز به صورت تئوری}}{\text{راندمان حجمی}}$$

۳-۲- راندمان ترمودینامیکی

راندمان ترمودینامیکی موتور، به توانایی یک موتور در تبدیل گرما به کار مکانیکی گفته می‌شود. به‌عبارتی دیگر به توانایی تبدیل انرژی پتانسیل موجود در سوخت به کار مکانیکی، راندمان ترمودینامیکی گفته می‌شود. بدیهی است در یک موتور درون‌سوز پس از احتراق سوخت، انرژی پتانسیل موجود در سوخت تبدیل به گرما می‌شود؛ حال با توجه به نوع موتور درصدی از گرمای ایجادشده به کار مکانیکی تبدیل و بقیه انرژی گرمائی تولیدی به صورت‌های مختلف به هدر می‌روند. تمامی این موارد به شرطی است که موتور به‌صورت استاندارد و کامل کار کرده و توانایی تبدیل کامل سوخت به انرژی گرمائی را داشته باشد و به‌عنوان مثال دچار خام‌سوزی و هدر دادن سوخت به‌صورت نسوخته یا نیم‌سوخته نباشد. شکل زیر درصد‌های تبدیل انرژی پتانسیل موجود در سوخت به انرژی گرمایی را نشان می‌دهد.



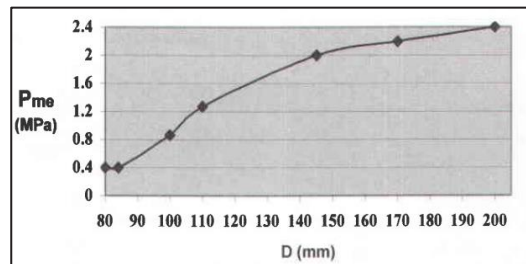
شکل (۴): درصد‌های تبدیل انرژی پتانسیل سوخت به انرژی گرمایی در یک موتور احتراق داخلی



شکل (۵): نمودار توزیع تبدیل انرژی پتانسیل سوخت به انرژی گرمایی در موتور احتراق داخلی

آنچه از شکل مشخص است؛ تنها حدود ۲۵٪ از انرژی پتانسیل سوخت تبدیل به کار مکانیکی می‌شود و مابقی به

محدوده فشار مؤثر متوسط در موتورهای دیزلی چهار زمانه ۰.۷۷ تا ۱.۵۷ مگا پاسکال و در موتورهای دیزلی دو زمانه ۰.۹۵ تا ۱.۷۳ مگا پاسکال می‌باشد. عوامل متعددی از قبیل نسبت تراکم، پرخورانی، ساختار محفظه احتراق، ساختار سیستم سوخت‌رسانی، فرآیند احتراق و تلفات مکانیکی بر فشار مؤثر متوسط تأثیرگذار می‌باشند.



شکل (۳): دیاگرام تغییرات فشار مؤثر متوسط نسبت به قطر سیلندر در موتورهای سنگین دیزلی

۳-۳- بررسی انواع بازده‌های یک موتور احتراق داخلی و تأثیر آن بر توان موتور

به‌طور کلی سه عامل مهم در بازدهی موتور نقش دارند که شامل: بازده حجمی، بازده ترمودینامیکی و بازده مکانیکی می‌باشد. در ادامه هر کدام از این پارامترها به‌طور جداگانه موردبررسی قرار می‌گیرد.

۳-۱- بازده حجمی

بازده حجمی برابر است با توانایی موتور در مکش بیشترین میزان حجم هوای ورودی در حالت تنفس طبیعی. به‌طور مثال یک موتور چهار سیلندر ۲ لیتری به‌صورت تئوری باید توانایی مکش ۲۰۰۰ سی‌سی هوا را در هر دو دور گردش کامل خود در یک موتور چهار زمانه را داشته باشد؛ اما در عمل، وضعیت به‌گونه‌ای دیگر است. مقاومت فیلتر هوا در برابر عبور جریان هوا، مقاومت مانیفولد ورودی به سبب برجستگی‌های سطوح داخلی و یا پیچ‌وخم‌های آن و یا قطر راهگاه ورودی در برابر عبور جریان هوا، مقاومت سوپاپ‌های ورودی در برابر عبور جریان گاز و همچنین خاصیت واماندگی گازها در برابر جابجایی از یک حجم به حجم دیگر همگی موجب می‌شوند که موتور مذکور در هر ۲ دور گردش خود حجم هوایی کمتر از میزان حجم واقعی موتور (۲۰۰۰ سی‌سی) را به داخل سیلندر مکش کند. در واقع به نسبت هوای مکش شده به داخل موتور به‌صورت واقعی به میزان تئوری آن راندمان حجمی موتور گفته می‌شود. البته این نسبت در دورهای متفاوت موتور تغییر پیدا می‌کند ولی

شکل‌های مختلف به هدر می‌رود. البته حدود این درصدها در موتورهای مختلف متفاوت است. راندمان ترمودینامیکی یک موتور به موارد متعددی بستگی دارد که مهم‌ترین آن‌ها ضریب تراکم و دمای کاری موتور، جنس و نوع اتاقک احتراق آن‌ها می‌باشد. راندمان ترمودینامیکی موتورهای بنزینی معمولاً بین ۲۵٪ تا ۳۲٪ و برای یک موتور دیزل بین ۳۶٪ تا ۴۲٪ می‌باشد. دلیل افزایش راندمان ترمودینامیکی در موتورهای دیزل ضریب تراکم بالاتر موتورهای دیزلی نسبت به موتورهای بنزینی می‌باشد و این موضوع به اشتعال تراکمی بودن موتورهای دیزل برمی‌گردد.

۳-۳- راندمان مکانیکی

به نسبت تبدیل کار مکانیکی تولیدشده در موتور به کار مؤثر در خروجی موتور، راندمان مکانیکی گفته می‌شود. همان‌طور که بیان شد در یک موتور در کورس مکش مقدار مشخصی هوا به درون موتور مکش می‌شود که این میزان به راندمان حجمی موتور بستگی داشت. هرچه این میزان بیشتر باشد قابلیت موتور بالاتر می‌رود؛ و در قسمت راندمان ترمودینامیکی گفته شد که با محترق شدن مخلوط سوخت و هوا، میزان مشخصی گرما تولید می‌شود که مقداری از این گرما تبدیل به کار مکانیکی خواهد شد. میزان این تبدیل بستگی به راندمان ترمودینامیکی موتور دارد که هرچه قدر بیشتر باشد بهتر است. کلیه این موارد باعث می‌شوند که کار مکانیکی خروجی موتور نسبت به کار مکانیکی تولیدشده در اتاق احتراق کمتر باشد که به این نسبت راندمان مکانیکی گفته می‌شود. البته هرچه اصطکاک قطعات داخلی موتور کمتر بوده و همچنین نیروی موردنیاز جهت حرکت وسایل جانبی موتور کمتر باشد میزان راندمان مکانیکی بالاتر خواهد بود. به‌صورت کلی راندمان کل یک موتور درون سوز پیستونی بنزینی به حدود ۲۰ درصد و در موتورهای دیزل با کمپرس بالا و اصطکاک پایین به حدود ۴۰ درصد می‌رسد. جالب توجه است که این عدد در موتورهای الکتریکی به بالای ۹۰٪ می‌رسد لذا کارشناسان معتقدند که موتورهای درون‌سوز یک فاجعه از نظر راندمان محسوب می‌شوند. برای تقویت یا تغییر نیروی تولیدی در یک موتور درون‌سوز ایجاد تغییرات در هریک یا تمامی عوامل تأثیرگذار در مورد هریک از راندمان‌های سه‌گانه فوق به‌طور مستقیم باعث تغییر راندمان کلی موتور و تغییر در نیرو و گشتاور خروجی از موتور یا تغییر در میزان مصرف ویژه سوخت در آن موتور خواهد شد.

۴- راه‌های جلوگیری از افت توان موتور

۴-۱- افزایش راندمان حجمی

معمول‌ترین راه‌ها جهت افزایش نیروی تولیدی موتور افزایش راندمان حجمی موتور می‌باشد. به کمک افزایش راندمان حجمی بسته به تکنیک مورد استفاده، می‌توان از ۵٪ تا بیش از ۱۰٪ یک موتور را تقویت کرد و یا مشخصه توان و گشتاور موتور را در دوره‌های متفاوت تغییر یا اصلاح کرد. به‌عنوان مثال یک خودروی انژکتوری با نسبت تراکم بالاتر از ۹ به‌صورت استاندارد برای به دست آوردن حداکثر توان تولیدی این موتور باید از بنزین سوپر با اکتان بالا استفاده شود چون در صورت استفاده از بنزین معمولی با اکتان ۹۰ یا ۸۷ موتور در زمان کارکرد در حالت تمام گاز دچار پدیده ضربه زدن^۹ در سیلندر می‌شود چرا که بنزین معمولی در دما و فشار کمتری به حالت خودسوزی دچار می‌شود لذا قبل از جرقه زدن شمع مخلوط سوخت و هوا محترق شده و این امر باعث افت توان موتور و ضربه‌های قوی در محدوده سر سیلندر می‌شود.

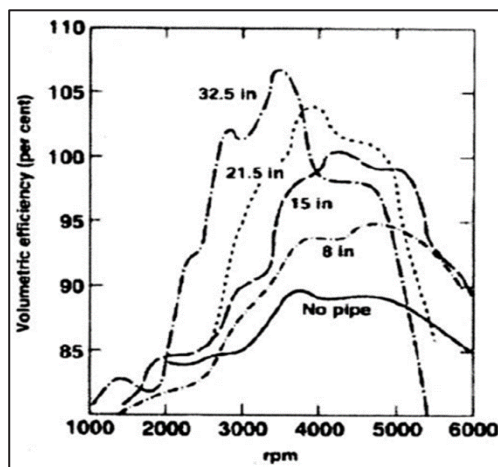
کثیف بودن فیلتر هوا، کثیف یا معیوب بودن شمع و وایر شمع در موتورهای بنزینی، درزهای کوچک در مانیفولد ورودی و یا لوله‌های متصل به آن و مواردی از این دست، موجب شده که عملکرد موتور مختل شود و موتور به‌واسطه کشیدن هوای بی‌مورد به درون سیلندر بسیار ضعیف کار کند. معمول‌ترین و اولین کار جهت افزایش قدرت موتور تغییر در راندمان حجمی آن موتور می‌باشد. یکی از راه‌های افزایش راندمان حجمی موتور اصلاح ساختار سیستم مانیفولد ورودی و خروجی می‌باشد. وقتی از مانیفولد تغییر یافته‌ای که به‌صورت تخصصی جهت عبور حجم یا سرعت عبور گاز بیشتری ساخته‌شده استفاده می‌شود؛ در حقیقت به موتور توانائی مکش بیشتر و سریع‌تر هوا و تخلیه سریع‌تر و کامل‌تر گازهای حاصل از احتراق را می‌دهد که این مورد خود باعث بهبود چشمگیر راندمان حجمی موتور می‌شود. در یک بررسی تأثیر طول راهگاه هوا بر بازده تنفسی مشخص شده است؛ راهگاه‌های هوا با طول بیشتر، در دوره‌های کاری کم، بازده تنفسی بهتری دارند و راهگاه‌های هوا با طول کمتر، در دوره‌های کاری زیاد بازده تنفسی بهتری دارند.

^۹ Knock



شکل (۷): استفاده از سیستم آب پاش در مانیفولد

استفاده از سیستم اغلب در موتورهای با نسبت تراکم بالا می باشد که در حالت تمام بار (موتور دریچه گاز کاملاً باز) سیستم آب پاش وارد مدار می شود و با تزریق مقادیری آب به صورت اسپری شده در داخل مانیفولد ورودی موتور، مخلوط سوخت و هوا را خنک تر (در موتورهای بنزینی) می کند و در نتیجه چگالی مخلوط بالا رفته و راندمان حجمی موتور بهبود می یابد. کاربرد تزریق آب در موتورهای است



شکل (۶): تأثیر طول راهگاه ورودی بر بازده تنفسی موتور [۶]

در آزمایشی دیگر تأثیر پرداخت راهگاه های سر سیلندر بر بازده تنفسی انجام شده است که نتایج آن به شرح جدول زیر می باشد.

جدول [۱]: نتایج آزمون تأثیر پرداخت راهگاه های سر سیلندر بر بازده تنفسی [۶]

Test 1 – standard Chev 350 TP1 manifold base and runners
Test 2 – ported manifold base and runner bore increased 4.5mm
Test 3 – Accel Super-Ram manifold base and runners

در این آزمایش همان طور که در جدول مشخص است در دور ۶۰۰۰ د.د، افزایش ۱۱۹ اسب بخار (۴۴ درصد) توان و ۱۰۵ نیوتن متر (۴۴ درصد) گشتاور به کمک پرداخت راهگاه های ورودی، حاصل شده است.

۴-۲- تزریق آب در مانیفولد ورودی:

یکی از راه های افزایش بازده حجمی موتور خنک کردن هوای ورودی موتور می باشد. با خنک کردن هوای ورودی چگالی آن افزایش پیدا کرده و باعث افزایش جرم هوای ورودی و بهبود احتراق موتور می شود. برای همین منظور در موتورهای از کولر هوا در جهت خنک کردن هوای ورودی استفاده می شود. یکی دیگر از راه هایی که می شود چگالی هوا ورودی را افزایش داد، استفاده از سیستم پاشش آب در مانیفولد ورودی می باشد. این روش موضوعی جدیدی است که امروزه مورد توجه موتورسازان جهت افزایش چگالی هوای ورودی مورد توجه قرار گرفته است.

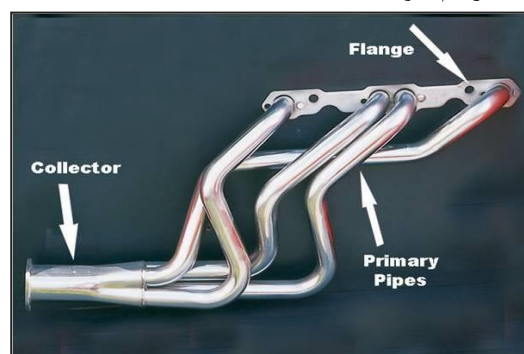
دور موتور (rpm))	آزمون شماره ۱		آزمون شماره ۲		آزمون شماره ۳	
	توان (hp)	گشتاور (N-M)	توان (hp)	گشتاور (N-M)	توان (hp)	گشتاور (N-M)
۲۵۰۰	158	332	161	338	151	317
۳۰۰۰	224	393	228	400	208	365
۳۵۰۰	273	410	296	444	266	400
۴۰۰۰	303	398	351	461	321	421
۴۵۰۰	308	359	360	420	360	419
۵۰۰۰	294	309	356	374	390	410
۵۵۰۰	292	279	372	355	406	388
۶۰۰۰	270	236	376	329	389	341
۶۵۰۰			328	265	356	288

که در آن ها از سیستم پر خوران استفاده شده است چراکه در این سیستم ها با فشرده کردن هوا، دمای آن افزایش و در نتیجه چگالی هوا کاهش می یابد. تزریق آب به طور غیرمستقیم هم چگالی هوا را بالا برده و هم قدرت موتور را افزایش می دهد. این کار در موتور باعث افزایش راندمان حجمی و ورود مقدار جرم بیشتری از هوا به داخل موتور می شود. البته به این نکته نیز باید اشاره نمود که این کار هم باعث مقدار کمی آلودگی و هم آسیب به موتور می شود اما برای افزایش سرعت و شتاب هستند مؤثر است.

۴-۳- افزایش توان با تخلیه آسان تر گازهای خروجی

سامانه تخلیه دود از مهم ترین اجزای موتور است که در طراحی آن عمدتاً متغیر اصلی فشار برگشتی دود در نظر

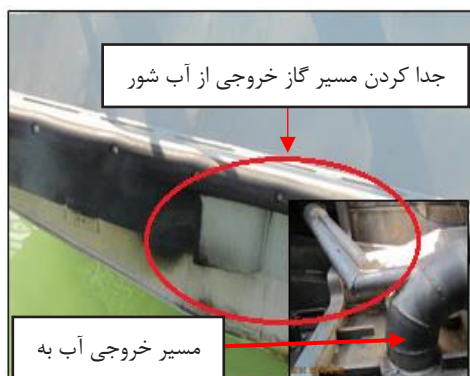
گرفته می‌شود این سامانه می‌بایست طوری طراحی گردد که دود خروجی با فشاری خاص تخلیه گردد و فشار برگشتی آن در اثر مسیری که در سامانه تخلیه دود طراحی می‌گردد، به حداقل برسد. تسهیل در تخلیه گازهای خروجی از موتور در افزایش بازده حجمی موتور مؤثر است. اهمیت این سامانه به این دلیل است که یک سامانه تخلیه دود مناسب می‌تواند با بهبود چرخه تنفسی موتور، بازده حجمی موتور را افزایش داده و در کاهش مصرف سوخت مؤثر باشد. پس از آن که احتراق کامل شد و گازهای فشار قوی در مرحله انبساط برای انتقال کار به میل‌لنگ استفاده شدند، این گازها باید از محفظه احتراق خارج شوند تا فضای خالی برای چرخه بعدی فراهم شود.



شکل (۸): استفاده از هدرز جهت تخلیه آسان‌تر دود از موتور

در زمین طراحی سامانه تخلیه دود عمدتاً دو متغیر اصلی فشار برگشتی و صدا در نظر گرفته می‌شود. فشار برگشتی در اثر تراکم گازهای خروجی به دلیل وجود موانعی از قبیل خم‌های لوله تخلیه دود و انباره ایجاد می‌شود. بهترین حالت برای از بین بردن فشار برگشتی استفاده از یک لوله فرضی بدون هیچ خمیدگی به عنوان مجرای تخلیه دود به فضای آزاد است اما عامل صدای بسیار بلند و گوش‌خراش گازهای خروجی که ناشی از انرژی جنبشی مولکول‌های آن است مانع از انجام این کار می‌شود؛ بنابراین، مصالحه بین تسهیل در تخلیه گازهای خروجی و صدای حاصل از آن موجب شده است که مطالعات زیادی در مورد طراحی و بهینه‌سازی سامانه تخلیه دود انجام گیرد. پانگاوانه^{۱۱} و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی‌های سه بعدی میدان جریان تأثیر تغییر ابعاد لوله سامانه تخلیه دود را بر مقدار فشار برگشتی بررسی کردند. نتایج تحلیل نشان داد که افزایش قطر لوله سامانه تخلیه دود و تخلخل انباره، مقدار فشار برگشتی را تا ۷۰ درصد کاهش دهد [۷].

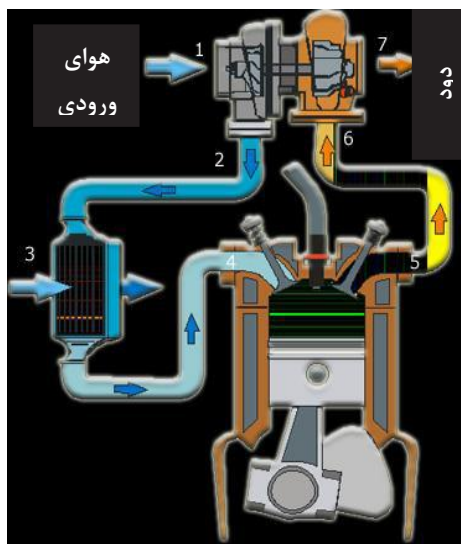
در آزمایش دیگر با محدود کردن گازهای خروجی موتور یک موتور سه سیلندر دیزلی پرخوران با بیشینه توان ۱۷/۵ کیلو وات در چند مرحله و استخراج توان و گشتاور توسط سامانه الکترونیکی و مقایسه منحنی توان و گشتاور موتور در حالت واقعی، اثر محدود کردن جریان خروجی دود در کاهش توان و گشتاور موتور مشاهده شده است. مشکل تخلیه گازهای خروجی و فشار برگشتی در موتورهای دریایی به دلیل محدودیت فضا و از بین بردن صدا در کشتی‌ها، به‌خصوص در قایق‌های تندرو محسوس‌تر است. در این قایق‌ها به‌طور معمول دود خروجی به همراه آب شور خروجی از موتور به زیر آب دریا هدایت و تخلیه می‌شوند و به همین دلیل ایجاد فشار برگشتی می‌نماید. در بعضی از این قایق‌ها با جدا کردن مسیر گازهای خروجی از آب شور در اگزوز خروجی موتور در موتورخانه این‌گونه قایق‌ها، می‌توان با جلوگیری از ایجاد فشار برگشتی، بازده حجمی موتور را افزایش داد [۷].



شکل (۹): جدا کردن مسیر دود از آب شور در قایق

۴-۴- استفاده از سیستم پرخوران

یکی از مطمئن‌ترین راه‌ها برای افزایش توان موتورها، افزایش مقدار هوا و سوختی است که در سیلندر آن‌ها می‌سوزد. برای این منظور افزودن تعداد سیلندرها یا بزرگ کردن هر یک از سیلندرها یکی از روش‌هاست اما در بعضی مواقع امکان این کار وجود ندارد. در موتورهای احتراقی رفت و برگشتی که ورود و خروج هوای ورودی و گاز خروجی با مکانیزم سوپاپ انجام می‌شود در دوره‌های بالای موتور چالش بزرگی وجود دارد. در دوره‌های بالا به طبع با افزایش دور میل‌لنگ، دور میل بادامک بیشتر و به تبع سرعت باز و بست سوپاپ نیز زیاد می‌شود لذا ورود هوا و خروج دود در کسری از ثانیه بایستی انجام شود که این امکان وجود ندارد و این



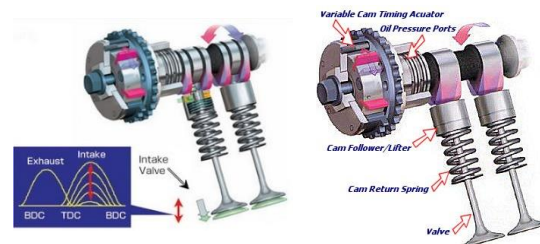
شکل (۱۰): مکانیزم عملکرد توربوشارژر

توربوشارژرهای رایج می‌توانند هوا را به فشار ۴۰ تا ۵۵ کیلو پاسکال بیشتر از هوای محیط برسانند. از آنجایی که فشار هوای سطح دریا ۱۰۰ کیلو پاسکال است، مشخص می‌شود که توربوشارژر تقریباً ۵۰ درصد هوای بیشتر وارد سیلندر می‌کند؛ بنابراین انتظار می‌رود که قدرت هم تا پنجاه درصد افزایش یابد. ولی به دلیل برخی تلفات، این افزایش قدرت بین ۳۰ تا ۴۰ درصد خواهد بود. یکی از دلایل این اتلاف به این موضوع بازمی‌گردد که وقتی گاز خروجی اگزوز توربین را می‌چرخاند، بدان معنی است که مقاومتی در برابر خروج گازها وجود دارد، پس پیستون باید فشار بیشتری اعمال کند تا گاز تخلیه شود و این، بخشی از قدرت موتور را مصرف می‌کند؛ اما چیزی که در موتورهای مجهز به سیستم پرخوران مهم است، این است که چون هوا فشرده می‌شود دمای آن افزایش می‌یابد و همان‌طور که بیان شد چگالی آن کاهش می‌یابد لذا از آنجایی که هدف استفاده از این سیستم ها افزایش میزان چگالی ورودی به موتور (تعداد بیشتری از مولکول‌های هوا) می‌باشد؛ به همین خاطر از کولرهای داخلی استفاده می‌کنند تا هوای فشرده خروجی از کمپرسور را خنک‌ترند تا میزان چگالی هوا افزایش یابد. یکی دیگر از مزایای توربوشارژر، قابلیت بهبود کارکرد موتور در ارتفاعات است. در ارتفاعات، فشار هوا کمتر است و در نتیجه هوای کمتری به سیلندر وارد می‌شود. خودروهای معمولی در چنین ارتفاعاتی با کاهش قدرت مواجه می‌شوند، ولی خودروهای مجهز به توربوشارژر علیرغم آنکه با کاهش قدرت مواجه می‌شوند، ولی مقدار این کاهش به مراتب کمتر است؛ چرا که کار لازم برای فشرده کردن گاز رقیق کمتر است.

عامل، دلیل اصلی افت گشتاور و افزایش مصرف سوخت در دورهای بالا می‌باشد. برای جبران کمبود هوا در دورهای بالا یکی از راه‌ها که ساده و باصرفه می‌باشد، استفاده از سیستم پرخوران به وسیله توربوشارژر یا سوپر شارژر در موتورهای که بدون نیاز به تغییر در حجم و وزن موتور، بازده حجمی موتور افزایش می‌یابد لذا یکی از مزیت‌های اصلی این سیستم بالا بردن نسبت قدرت به وزن در موتورهای خودروهایی که سرعت مسابقه‌ای و سوپر اسپرت و حتی امروزه در خودروهای شخصی برای افزایش توان و گشتاور موتور از این سیستم استفاده می‌شود. توربوشارژر نوعی سیستم دمنده است که هوا را با فشار زیاد به درون سیلندر می‌دمد. هنگامی که پیستون در کورس مکش قرار دارد، مخلوط هوا و سوخت (در موتور دیزلی، هوا) را به درون سیلندر مکش می‌شود. هر چه فشار هوا بیشتر باشد مقدار مولکول‌های هوا بیشتر خواهد بود و بالطبع مخلوط هوا و سوخت بیشتری در سیلندر جای خواهد گرفت. هر چه سوخت بیشتر باشد، قدرت ناشی از احتراق هم بیشتر خواهد بود. بدین ترتیب موتور مجهز به توربوشارژر قدرت بیشتری نسبت به موتور معمولی تولید می‌کند. توربوشارژر به سادگی می‌تواند نسبت قدرت به وزن موتور را نیز بهبود ببخشد. در نوع ابتدایی توربوشارژر (که سوپر شارژر نام دارد)، قدرت موردنیاز از میل‌لنگ گرفته می‌شد، یعنی بخشی از توان تولیدی خودرو صرف فشرده‌سازی هوای ورودی می‌شد. ولی در نوع پیشرفته‌تر که همان توربوشارژر است، از فشار گاز خروجی اگزوز استفاده می‌شود لذا تفاوت این دو سیستم پرخوران در نیرومحرکه آن‌هاست. در توربوشارژرها، گازهای خروجی اگزوز که داغ هستند و انرژی جنبشی، سرعت و فشار بالایی دارند برای چرخاندن یک توربین استفاده می‌شود. این توربین هم یک پمپ هوا را می‌گرداند و در نهایت، پمپ، هوا را فشرده کرده به درون سیلندر می‌فرستد. توربین نصب‌شده در مسیر گازهای خروجی گاه به سرعت ۱۵۰ هزار دور در دقیقه می‌رسد که بیش از ۳۰ بار سریع‌تر از دور موتور اغلب خودروهای امروزی است.

۴-۵- زمان بندی سوپاپ متغیر^{۱۲} موتورهای احتراق داخلی

پس از آنکه فناوری به کارگیری چند سوپاپ بر روی موتورهای به عنوان یک سازوکار استاندارد درآمد، زمان بندی متغیر سوپاپ ها قدم بعدی برای بهبود عملکرد موتورهای مطرح گردید. هدف از ارائه چنین سیستم هایی افزایش بازده موتور در تمام شرایط کارکرد آن اعم از دورهای مختلف موتور و شرایط محیطی متفاوت می باشد. زمان بندی تنفس و تخلیه توسط شکل و زاویه قرارگیری بادامک ها تنظیم می شود. برای اینکه وضع تنفس بهینه باشد، موتور به زمان بندی مختلف سوپاپ در سرعت های مختلف نیاز دارد. وقتی که سرعت موتور افزایش می یابد، زمان لازم برای تنفس و تخلیه کم می شود و بنابراین فرصت کافی برای ورود مخلوط تازه به درون موتور و محفظه احتراق و خروج سریع دود از موتور وجود ندارد؛ بنابراین بهترین راه حل این است که سوپاپ دود دیرتر بسته شده و سوپاپ هوا زودتر باز شود. به عبارت بهتر همپوشانی سوپاپ های دود و هوا باید متناسب با افزایش سرعت بیشتر شود. در واقع وظیفه این سیستم افزایش مقدار هوای ورودی به موتور به کمک تغییر در زمان باز و بست سوپاپ های ورودی موتور می باشد.



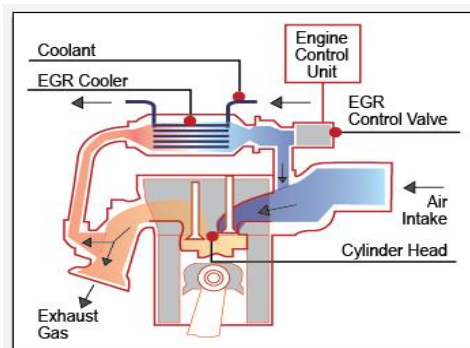
شکل (۱۱): مکانیزم زمان بندی سوپاپ متغیر

نتایج اصلی حاصل از به کارگیری زمان بندی متغیر سوپاپ به شرح زیر است:

- توان بیشینه در سرعت های بالا افزایش می یابد. به عنوان مثال توان خروجی یک نمونه موتور نیسان^{۱۳} مجهز به زمان بندی متغیر سوپاپ در حدود ۲۵ درصد از موتور بدون این مکانیزم بیشتر است.
- افزایش گشتاور بیشینه در سرعت های کمتر که افزایش شتاب خودرو را به دنبال دارد. برای مثال در یک نمونه خودروی فیات، ۹۰ درصد از گشتاور بیشینه در سرعت بین ۲۰۰۰ تا ۶۰۰۰ دور در دقیقه به دست می آید که حاکی از ثابت بودن تقریبی منحنی گشتاور در ناحیه نسبتاً وسیعی از سرعت است.

۴-۶- افزایش راندمان ترمودینامیکی

تبدیل و بازیافت مناسب حرارت اتلافی در خروجی اگزوز موتورهای احتراق داخلی می تواند تأثیر بسزایی در افزایش بازده ترمودینامیکی سیستم داشته باشد. به صورت کلی تقویت موتور اکثراً به صورت تقویت راندمان حجمی صورت می گیرد چرا که از نظر کلی کم هزینه تر. ساده تر و بدون نیاز به دانش خاص و محاسبات پیچیده قابل اجراست. همچنین در هنگام تقویت یک موتور از این طریق تأثیر چشمگیرتری در توان خروجی را شاهد هستیم. در مورد تقویت موتور از طریق تغییر راندمان ترمودینامیکی به صورت کلی این نوع تقویت گذشته از افزایش نیروی تولیدی موتور باعث کاهش مصرف سوخت ویژه موتور نیز می گردد. هنگامی که برای تقویت یک موتور از این طریق اقدام می شود در حقیقت از منابع موجود به صورت بهینه بهره برداری شده است و با گرفتن و تبدیل مقدار بیشتری از گرمای تولیدی موتور و تبدیل آن به کار مکانیکی موجب تقویت موتور می شود. باز خورانی گاز اگزوز به داخل سیلندرها^{۱۴} موتور باعث افزایش راندمان ترمودینامیکی موتور می شود. در این سیستم مقداری از گازهای اگزوز دوباره به سیلندر بازگردانده می شود. این مقدار گاز اگزوز برگشتی همراه با هوا در کورس مکش وارد سیلندر موتور شده و همراه گازهای باقی مانده از چرخه قبل نقش رقیق کنندگی مخلوط را ایفا می کند (کاهش O_2). در نتیجه این اختلاط، سرعت شعله و دمای اوج احتراق کاهش یافته و در نتیجه مقدار NO_x کمتر می شود. وقتی باز خورانی گاز اگزوز که از گونه های اصلی N_2 ، CO_2 و H_2O تشکیل شده، به کار گرفته می شود، اجزاء تشکیل دهنده آن باید از دمای اولیه خودشان تا دمای شعله گرم شوند، بدین جهت ضمن گرم شدن، مقداری از گرمای محفظه احتراق را جذب می کنند.



شکل (۱۲): سازوکار چرخش دود خروجی موتور

^{۱۴} Exhaust gas recirculation (EGR)

^{۱۲} VVT

^{۱۳} Nissan Neo

قطعات صرفاً به منظور کاهش اصطکاک داخلی توجیه اقتصادی نداشته و نتایج حاصل از این تغییرات نیز چندان محسوس نمی‌باشد. جهت کاهش اصطکاک قطعات داخلی و همچنین صرفه‌جویی در نیرویی که جهت کارکرد این قطعات مورد نیاز است معمولاً از این تکنیک‌ها استفاده می‌شود.

- تعویض پیستون‌ها با انواع سبک وزن و اصطکاک پائین
- تعویض بوش‌های سیلندر با انواع صیقلی
- تعویض میل‌لنگ و میل سوپاپ با انواع سبک وزن
- تعویض سوپاپ‌ها با انواع سبک یا سدیمی
- تعویض پمپ روغن با انواع فشار بالا و با دبی پائین تر
- استفاده از روغن‌های صنعتی و مکمل‌های روان‌ساز نظیر فلوپتین

در این دیدگاه که از لحاظ بازدهی عوامل مؤثر در توان موتور مورد بررسی قرار گرفت، مشخص شد که به لحاظ ساختار و هندسی موتور تغییرات چندانی ندارد و قطعات اصلی موتور دچار تغییرات نمی‌شوند؛ لذا از لحاظ اقتصادی به صرفه‌تر می‌باشند.

۵- جمع‌بندی کلی

با توجه به مطالبی که در این نوشتار با بررسی پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه بهینه‌سازی موتورهای احتراق داخلی، بیان شد؛ برای بهینه‌سازی موتور احتراق داخلی به منظور بهره حداکثری از ظرفیت آن، دو راه حل پیشنهاد می‌شود. اول اینکه برخی از قطعات اصلی موتور تولیدشده باز طراحی گردد تا به پارامترهای فنی دلخواه دست پیدا کرد. با بررسی‌هایی که انجام شد این راه حل از لحاظ هزینه و زمان صرفه اقتصادی نداشته و همان‌طور که بیان شد برخی از این تغییرات برای موتور مفید بوده و برخی از تغییرات دیگر مضرند. راه حل دوم اینکه با بررسی و مطالعه‌ی عوامل مؤثر در بازدهی موتور، راه حل‌های ممکن برای ارتقاء توان و گشتاور با ایجاد کمترین تغییرات در قطعات غیر اصلی موتور ارائه گردد. با افزایش دور موتورهای احتراق داخلی از دور آرام، قدرت و گشتاور تولیدشده توسط آن ابتدا به سرعت افزایش یافته و پس از رسیدن به یک دور مشخص گشتاور به حداکثر می‌رسد. از این دور به بعد گشتاور رو به کاهش می‌گذارد. علت اساسی این کاهش پایین آمدن راندمان حجمی موتور است که خود به دلیل کاهش زمان لازم برای پر و خالی شدن سیلندرها، افت فشار در سیستم تغذیه

چون فرآیند تجزیه، یک تحول گرماگیر است، بدین جهت این گازها به هنگام تجزیه نیز مقداری از گرمای محفظه احتراق را جذب کرده و در نتیجه دمای گازهای داخل محفظه کاهش بیشتری می‌یابد. بنابراین، تأثیر اصلی گاز باز خورانی شده در روند تشکیل آلاینده NO، کاهش دمای شعله و گازهای سوخته شده به علت افزایش ظرفیت حرارتی بار داخل سیلندر به ازای واحد جرم سوخت می‌باشد. در هر دو نوع موتور دیزلی و بنزینی، افزایش باز خورانی گاز خروجی، تأثیر زیادی در کاهش مقدار آلاینده NO_x دارد ولی کاهش انتشار NO_x ناشی از باز خورانی گاز خروجی در موتورهای بنزینی شدیدتر است. باز خورانی گاز اگزوز باعث رقیق شدن هوای ورودی می‌شود که اثر اولیه این رقیق شدن روی کاهش دمای گازهای سوخته است. ظرفیت گرمایی CO₂ در دماهای احتراق دیزل حدود دو برابر گاز N₂ است. ظرفیت گرمایی گازهای اگزوز نیز کمی بیشتر از گاز N₂ است. ترکیب گازهای اگزوز در موتور دیزلی با بار روی موتور تغییر می‌کند. در دور آرام، مقدار CO₂ و H₂O کم بوده و تفاوت زیادی بین ترکیب گازهای اگزوز با هوای بیرون وجود ندارد ولی در بارهای زیاد همچنان که غلظت‌های CO₂ و H₂O در گازهای اگزوز زیاد می‌گردد، ظرفیت گرمایی نیز افزایش می‌یابد. افزایش این رقیق‌کننده، دمای اوج شعله را کاهش داده بنابراین مقدار انتشار NO_x نیز کاهش می‌یابد. همچنین افزایش اکسیژن باعث بالا رفتن دماهای شعله و بنابراین افزایش انتشار NO_x می‌گردد. ظرفیت گرمایی رقیق‌کننده از میزان جریان جرمی آن در کاهش مقدار NO اهمیت بیشتری دارد. مقدار گاز باز خورانی شده قابل تحمل برای یک نوع طراحی محفظه احتراق خاص، بستگی به مشخصات احتراق آن، سرعت و بار و نسبت هم ارزی سوخت دارد.

۴-۷- افزایش راندمان مکانیکی

کاهش اصطکاک قطعات داخلی موتور یا افزایش راندمان مکانیکی به سادگی امکان‌پذیر نیست و این امر منوط به اعمال تغییرات در بسیاری از قطعات اصلی موتور نظیر میل سوپاپ، میل‌لنگ، پیستون‌ها و ... بوده و به صورت معمول این تغییرات هنگامی اعمال می‌شود که به عنوان مثال جهت افزایش راندمان ترمودینامیکی تصمیم بر تعویض یک قطعه با گونه‌ای متفاوت گرفته می‌شود و برای جایگزینی قطعه جدید با اصطکاک کمتر انتخاب می‌شود؛ چون تعویض

موتور و مشکلات ناشی از زمان‌بندی سوپاپ‌ها که همه زائده‌ی دور زیاد موتور هستند، ایجاد می‌گردد. معمولاً ماکزیمم گشتاور در دوری به‌دست می‌آید که ماکزیمم راندمان حجمی وجود دارد. از این دور به بعد قدرت تا مدتی باز هم افزایش می‌یابد ولی با شدتی کمتر از قبل؛ علت این موضوع با رابطه‌ی بین قدرت و گشتاور توجیه می‌شود. به این ترتیب که تا دور ماکزیمم گشتاور، هم دور موتور و هم گشتاور در حال افزایش هستند و لذا قدرت هم به‌شدت افزایش می‌یابد. از دور ماکزیمم گشتاور به بعد، گشتاور رو به کاهش می‌گذارد؛ اما باز هم افزایش دور موتور، تا دور مشخصی، بر کاهش گشتاور غالب است و لذا قدرت هنوز افزایش می‌یابد ولی با شدتی کمتر از قبل. از یک دور به بعد، که در آن دور قدرت به ماکزیمم خود رسیده، اثر کاهش گشتاور، بیشتر از افزایش دور موتور می‌شود و از این دور به بعد قدرت هم کم می‌شود. که سه پارامتر اصلی (راندمان حجمی-راندمان مکانیکی-راندمان ترمودینامیکی) بر روی توان موتور تأثیرگذار می‌باشد. هر یک از این موارد که بیان شد در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت و راه‌حلی‌هایی نیز ارائه گردید. این روش به دلیل هزینه کم و دستیابی سریع‌تر به نتایج مورد استقبال مهندسين و شرکت های بهینه‌سازی بوده و به همین لحاظ برای دستیابی به نتایج بهتر راه‌حل دوم پیشنهاد می‌شود.

نمادها:

P_{me}	فشار مؤثر متوسط
S	کورس پیستون
D	قطر پیستون
v_s	حجم سیلندر $(v_s = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot S)$
V_m	سرعت متوسط پیستون
Z	تعداد سیلندر
n	دوران موتور $(n: \frac{30v_m}{s})$

مراجع:

[1] Isotta frachini, manual and operation motors, 1990

[۲] محمد مرادی، مقایسه موتور بهینه‌شده سیتک ۸۲۰ و سیتک ۶۲۰ از منظر فشار هوای ورودی و فشار تزریق سوخت، همایش بهینه‌سازی، دانشکده فناوری حضرت جوادالائمه (علیه‌السلام)، چالوس، ۱۳۹۴

- [۳] کارگاه تخصصی ارتقاء توان موتور، ششمین همایش ملی شناورهای تندرو، زیباکنار، ۱۳۹۸
- [۴] حسن ندیمی، پژوهشکده علوم و فناوری خودرویی
- [۵] مجید عرب و همکاران، تحلیل و بررسی سیستم هوارسانی خودروی دیزل سنگین با استفاده از نرم‌افزار فلوینت، همایش ملی دانش و مهندسی برق، کامپیوتر و مکانیک ایران، ۱۳۹۵
- [۶] مؤلف: ام.کا. ریاذانت‌سف، مترجم: مهندس حسن ندیمی، طراحی و ساختمان موتورهای دیزل سنگین بهینه‌شده با پرخورانی (سوپرشارژینگ)، ۱۳۸۳
- [۷] محمد مرادی، بررسی اثر فشار برگشتی سیستم اگزاست در توان و گشتاور موتور شناورهای تندرو، چهارمین همایش ملی شناورهای تندرو، تهران، ۱۳۹۶
- [۸] مبانی مهندسی موتورهای احتراق داخلی، تألیف: Willard W. Pulkrabek، ترجمه: دکتر سپهر صنایع، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران

