

بازیافت انرژی دود خروجی موتور بنزینی

صیاد نصیری^۱، محمدرضا زارع^۲، مهدی حق^۳، عزیز کوهستانی خانقلی^۴، علی کرد^۵

دانشگاه جامع علمی کاربردی ساپکو-دانشگاه صنعتی شریف

email: (nasiri@sharif.edu)

(صیاد نصیری)

چکیده

در این مقاله ابتدا، امکان تامین انرژی لازم برای آلترناتور از دود اگزوز و تولید انرژی الکتریکی را به طور تجربی بررسی می کند. با استفاده از یک توربوشارژر که در مسیر دود موتور بنزینی قرار گرفته است، انرژی مکانیکی حاصل شده و سپس به کمک یک جعبه دنده، انرژی مکانیکی لازم برای چرخاندن روتور آلترناتور تامین شده و آلترناتور نیز عمل تولید جریان برق را انجام می دهد. در انجام این آزمایش، اثر برخی پارامترهای تاثیر گذار در حصول دریافت انرژی الکتریکی بیشتر از جمله دبی دود، نسبت دنده، سطح مقطع محل عبور دود، دور توربوشارژر، فشار برگشتی به طور تجربی استخراج شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که امکان تولید جریان برق به این روش وجود دارد. سپس مدار پنوماتیکی طراحی شد به طوری که با عبور دادن دود موتور از آن، امکان تولید خلأ بررسی شد. این مقدار خلأ، در فعال سازی بوستر ترمز، ساکشن روغن جعبه دنده و موتور، مفید می باشد. نتیجه این تحقیق نشان می دهد که با طراحی مناسب مجموعه پنوماتیکی و الگوریتم کنترلی مطلوب جهت عبور دادن تمامی یا قسمتی از دود با توجه به شرایط خودرو و موتور می توان نتایج مفیدتری به دست آورد.

کلمات کلیدی: دود خروجی موتور احتراق داخلی بنزینی-توربوشارژر-دستگاه تولید خلأ-انرژی الکتریکی

۱-عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف

۲-کارشناس مهندسی مکانیک، مرکز آموزش علمی کاربردی ساپکو

۳-کارشناس مهندسی مکانیک، مرکز آموزش علمی کاربردی ساپکو

۴-دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

۵-دانشجوی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

با توجه به سختگیرانه شدن قوانین در مورد آلاینده‌های خودروها از یکسو و بحران انرژی در دنیا از سوی دیگر، امروزه تلاش تمام خودرو سازان بر این است که با استفاده از تکنولوژی‌های روز و همچنین با استفاده از نوآوری بتوانند محصولاتی با کمترین مصرف سوخت و کمترین آلاینده‌های تولید کنند. از طرفی نیز تلاشی مجدانه در راستای بازیافت انرژی‌هایی است که در حال هدر رفتن می‌باشند که از جمله می‌توان به انرژی جنبشی دود خروجی موتور، انرژی پتانسیل دود خروجی موتور و انرژی گرمایی موتور و دود خروجی موتور اشاره کرد. یکی از نوآوری‌های امروزی در صنعت خودرو، استفاده از توربوشاشرهای هیبرید است. منظور از توربوشاشر هیبرید، توربوشاشر چندکاره می‌باشد که علاوه بر متراکم کردن هوای مورد نیاز موتور، توانایی تولید برق هم دارد.

در پژوهشی علمی که در شرکت خودرو سازی میتسوبیشی ژاپن در سال ۲۰۰۵ صورت گرفت، ثابت شد که استفاده از توربوشاشر هیبرید، در کارایی موتور و کاهش مصرف سوخت تاثیرگذار است. توربوشاشر ساخته شده توسط این تیم، هنگامی که موتور با دور بالا کار می‌کند، دارای میزان دوری بیش از ۱۰۰۰۰۰ دور در دقیقه بوده و توانایی تولید چندین کیلو وات توان را دارد. استفاده از توربوشاشر هیبرید دارای مزایایی از جمله، تولید انرژی الکتریکی، بالابردن بازده موتور و کوچک شدن حجم موتور به دلیل بالارفتن نسبت تراکم می‌باشد. [5, 6, 7, 8]

تحقیقی دیگر در دسامبر ۲۰۱۰ توسط گروه صنعتی وسنگین میتسوبیشی انجام پذیرفت. در این تحقیق، نمونه اولیه توربوشاشر دوگانه (هیبرید) ساخته شد، سپس آزمایش‌هایی در راستای امکان‌سنجی تولید جریان الکتریکی به وسیله توربوشاشر انجام شد. نتیجه این پژوهش، دستیابی به دور توربوشاشر ۱۴۰۰۰۰ دور بر دقیقه در مدت زمان ۱ ثانیه و اکتساب ۲ کیلو وات توان بود. [1, 2, 3, 4]

در پژوهشی که در ماه ژانویه ۲۰۱۱ در کشور امریکا صورت گرفت، گروهی از پژوهشگران، تاثیر عملکرد توربوشاشر هیبرید را بر عملکرد موتور دیزل مورد بحث و بررسی قرار دادند. از نتایج بارز این تحقیق، دستیابی به این مهم است که می‌توان با استفاده از توربوشاشر هیبرید، نسبت هوا به سوخت را در موتور دیزل در تمام شرایط ثابت نگه داشت. بنابراین می‌توان در دوره‌های کم، توان موتور را افزایش داد و از طرفی با تولید انرژی الکتریکی به وسیله توربوشاشر هیبرید در دوره‌های بالا، بازده موتور را بالا برد. در این پژوهش یک موتور الکتریکی و یک آلترناتور با توربوشاشر یک پارچه شده اند. در دوره‌های کم موتور، به دلیل پایین بودن انرژی و دبی دودهای خروجی، دود انرژی لازم برای چرخاندن پروانه توربوشاشر را ندارد، در نتیجه نسبت هوا به سوخت در دوره‌های پایین موتور تغییر می‌کند. برای رفع این مشکل، موتور الکتریکی توربوشاشر شروع به حرکت کرده و پروانه توربوشاشر را به حرکت درمی‌آورد. با کمپرس شدن هوای ورودی به موتور، نسبت هوا به سوخت به حد نرمال می‌رسد. در دوره‌های بالاتر، دبی و انرژی دودهای خروجی از آگروز به حد لازم می‌رسد. لذا آلترناتور فعال شده و تولید انرژی الکتریکی شروع می‌شود. بنابراین با کنترل نسبت هوا به سوخت در تمامی شرایط عملکردی موتور، ضمن افزایش راندمان موتور، آلاینده‌های موتور نیز کاهش می‌یابد. [9]

در این مقاله با نصب توربوشاشر در مسیر دود خروجی به طوری که محور خروجی این توربوشاشر از طریق یک جفت چرخ دنده به یک آلترناتور تولید جریان برق متصل می‌باشد، توان الکتریکی در حدود ۲۲۰ وات دریافت گردید. با طراحی و ساخت یک مدار پنوماتیکی و قرار دادن یک نازل واگرا-همگرا خلائی در حدود ۰/۲۳ بار تولید شد که با توجه به ایجاد فشار برگشتی زیاد مدار پنوماتیکی که نتیجه معکوس بر عملکرد موتور دارد، لذا استفاده از دستگاه‌هایی که از انرژی جنبشی دود استفاده می‌کنند مانند توربوشاشر توصیه می‌شود.

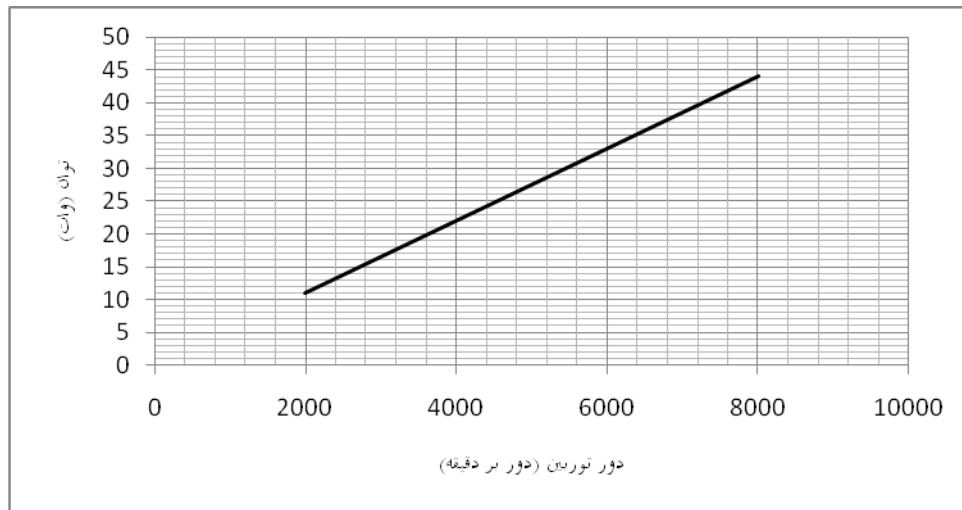
۲- روش اجرا:

باتوجه به شکل ۱، در مسيردود خروجی آگزوز، توربوشارژی نصب گردید که محور خروجی توربوشارژر از طریق یک چرخ دنده به یک آلترناتور وصل می باشد. گشتاور خروجی توربوشارژر به عواملی از جمله سرعت سیال، چگالی سیال، دبی گاز عبوری، هندسه پره ها (زاویه پره)، تعداد پره ها، شعاع پره ی توربین در مکانهای ورودی و خروجی بستگی دارد. در این مقاله تاثیر بعضی از عوامل فوق بر گشتاور تولیدی توربو شارژر و تولید توان الکتریکی توسط آلترناتور متصل به توربو شارژر بررسی شده است.



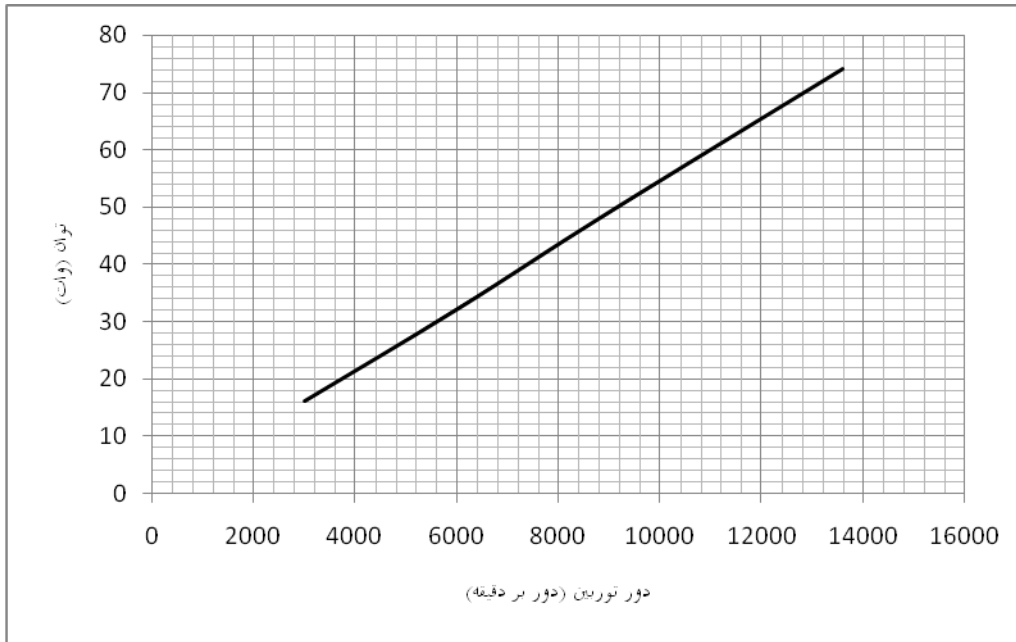
شکل ۱- نحوه نصب و موقعیت قرارگیری توربوشارژر

ابتدا توربوشارژر نصب گردیده و دور خروجی آن با نسبت تبدیل ۲:۱، دو برابر شد و به محور آلترناتور منتقل شد. در این حالت با توجه به شکل ۲، توان خروجی آلترناتور به طور خطی با افزایش دور، افزایش یافته و حداکثر توانی در حدود ۴۴ وات در دور توربین ۸۰۰۰ دور بر دقیقه بدست آمد. شکل ۲-



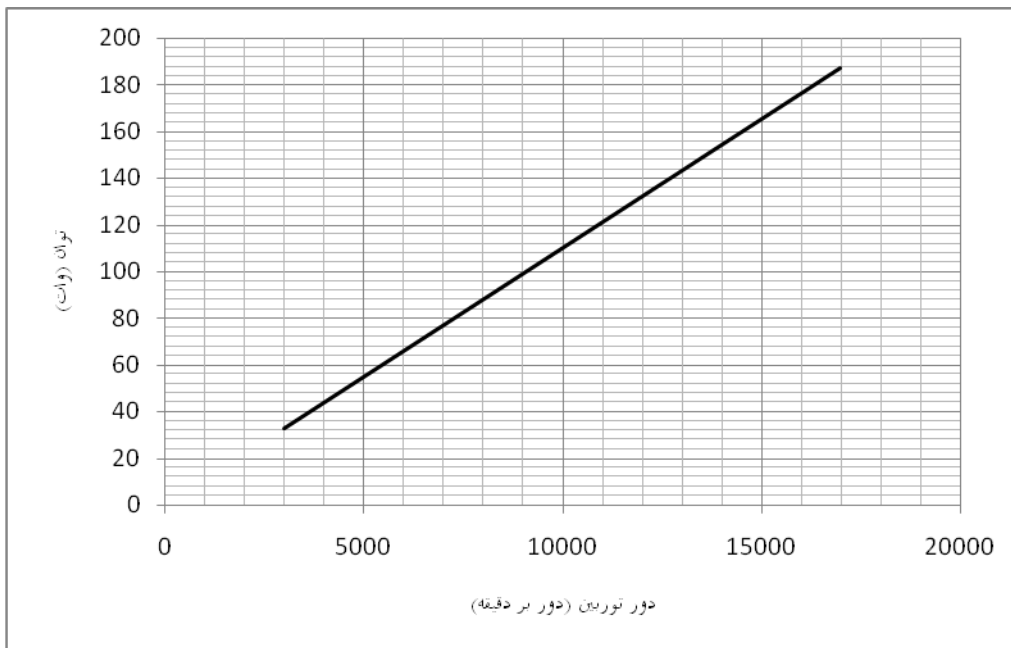
شکل ۲- توان آلترناتور بر حسب دور توربین با نسبت تبدیل ۲:۱

سپس با تغییر سطح مقطع ورودی دود به توربوشارژر و استفاده از نسبت تبدیل ۱ : ۲/۷۲ تاثیر سرعت ورود دودها و افزایش بیشتر دور بر عملکرد توربوشارژر بررسی شد که نتیجه آن بالا رفتن دور توربوشارژر و پایین آمدن گشتاور آن بود. شکل ۳ تغییرات توان تولیدی آلترناتور را نسبت به دور توربین نشان می دهد. شکل ۳-



شکل ۳- توان آلترناتور برحسب دور توربین با نسبت تبدیل ۱:۲/۷۲ و تغییر در سطح مقطع ورود دود

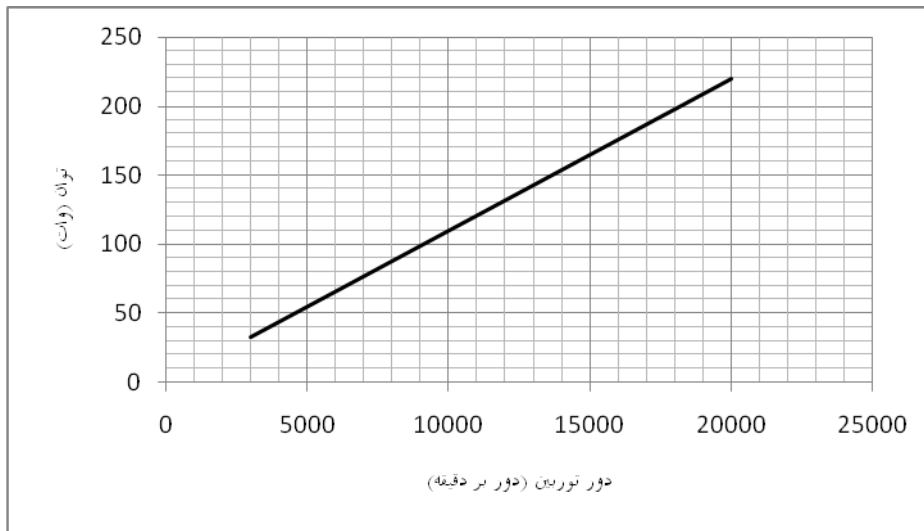
در مرحله بعد، با متصل کردن اگزوز یک موتور بنزینی دیگر به ورودی توربوشارژر، دور توربوشارژر بالاتر رفته، در نتیجه توان بیشتری نیز حاصل شد. نسبت تبدیل در این مرحله ۱:۲ می باشد. شکل ۴ تغییرات توان تولیدی آلترناتور را نسبت به دور توربین در این حالت نشان می دهد. شکل-۴



شکل ۴- توان آلترناتور برحسب دور توربین با نسبت تبدیل ۱:۲ و اعمال دبی دود دو موتور بنزینی به توربوشارژر

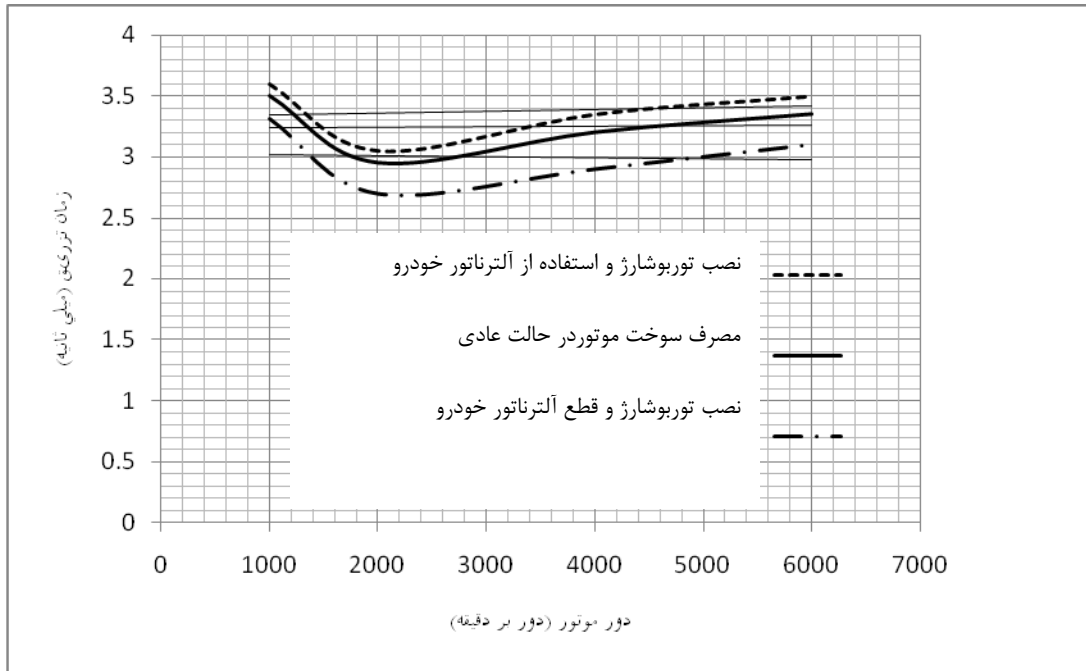
در مرحله آخر، تغییر سطح مقطع ورودی دود به توربوشارژر و اتصال آگزوز یک موتور دیگر جهت افزایش دبی دودها انجام شد. نسبت تبدیل دور در این مرحله نیز ۲:۱ است. شکل ۵ توان تولیدی آلترناتور نسبت به دور توربین را نشان می دهد.

شکل-۵



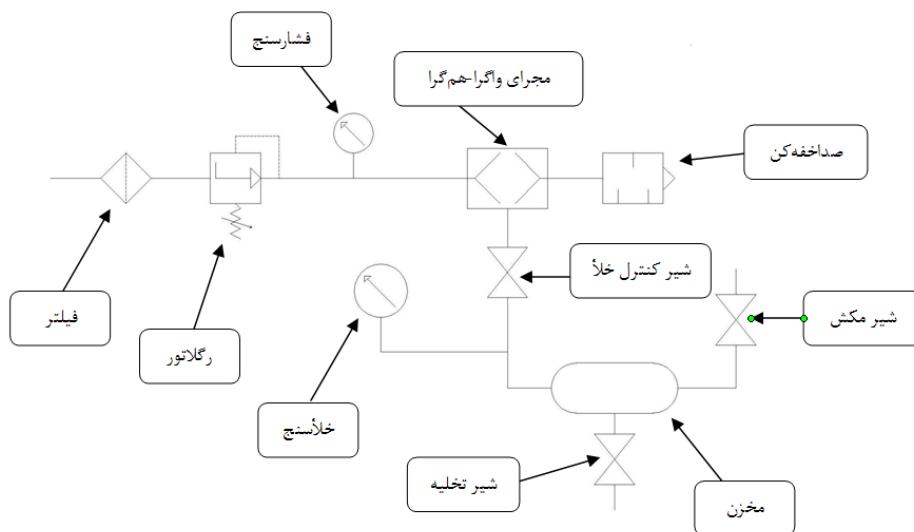
شکل-۵-توان آلترناتور برحسب دور توربین با نسبت تبدیل ۲:۱ و اعمال دبی دود دو موتور به توربوشارژر و تغییر سطح مقطع ورود دود

در راستای تاثیر استفاده از توربوشارژر بر مصرف سوخت و آلودگی، میزان تغییر در مصرف سوخت و فشار برگشتی آگزوز نیز تحلیل شد. شکل ۶ تغییر در میزان زمان باز بودن انژکتورها که منجر به افزایش مصرف سوخت می شود را نشان می دهد. همان گونه که ملاحظه می شود، درحالت اول با نصب توربوشارژر و وجود بار آلترناتور بر روی موتور، مصرف سوخت به دلیل ایجاد مانع در سر راه خروج دودها کمی افزایش می یابد. در ضمن در این تحقیق اثر پرخورانی توربوشارژر در نظر گرفته نشده است. در حالت دوم، مصرف سوخت موتور در حالت عادی نشان داده شده است و در وضعیت آخر هم زمان با نصب توربوشارژر و آلترناتور کوچک تر در مسیر خروج دودها، بار آلترناتور نیز از روی موتور برداشته شده است که نتیجه آن، پایین آمدن مصرف سوخت به دلیل بالا رفتن توان ترمزی موتور می باشد. که البته در این حالت توان مکانیکی که صرف غلبه بر اصطکاک یاتاقان های آلترناتور خودرو و تسمه ها می شود نیز حذف گردیده است. شکل-۶



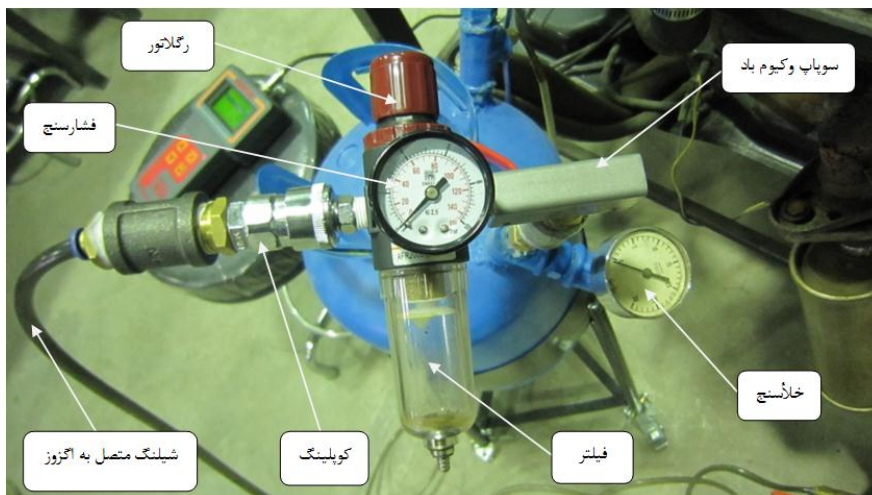
شکل ۶- بررسی اثر توربوشارژر و آلترناتور بر مصرف سوخت

برای بررسی میزان فشار برگشتی، در هر دو حالت با توربوشارژر و بدون توربوشارژر یک فشارسنج روی لوله آگزوز نصب گردیده و میزان تغییرات فشار بررسی گردید که البته تغییر فشار محسوسی ثبت نگردید. در امتداد پژوهش فوق مداری مطابق شکل ۷ طراحی گردید.



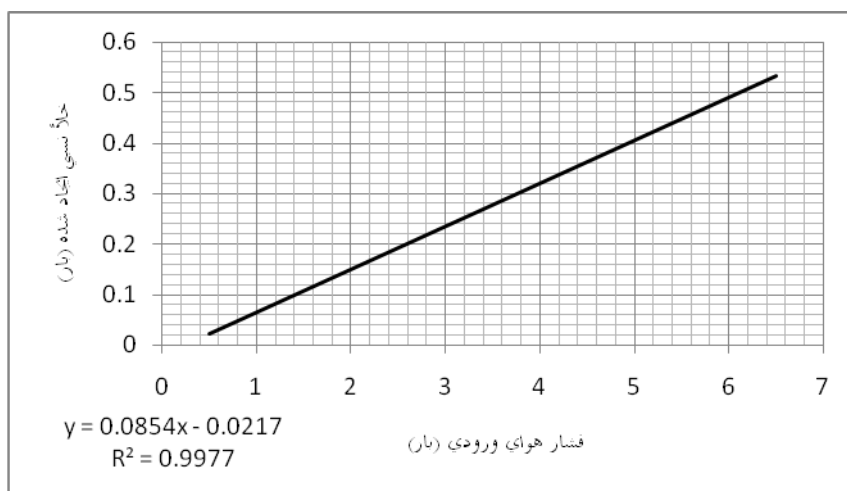
شکل ۷- مدار پنوماتیکی دستگاه تولید خلاء

با توجه به مدار پنوماتیکی، دستگاهی مطابق شکل ۸ طراحی و ساخته شد. دود خروجی از طریق شیلنگی به ورودی این دستگاه وارد می شود. دود پس از عبور از فیلتر و رگولاتور تنظیم و کنترل فشار، وارد نازل واگرا-همگرا شده و سپس از طریق صدا خفه کن با کاهش صدا وارد هوای محیط می شود. وجود صدا خفه کن در مدار اختیاری بوده و مطابق شکل ۸ قابل حذف می باشد.



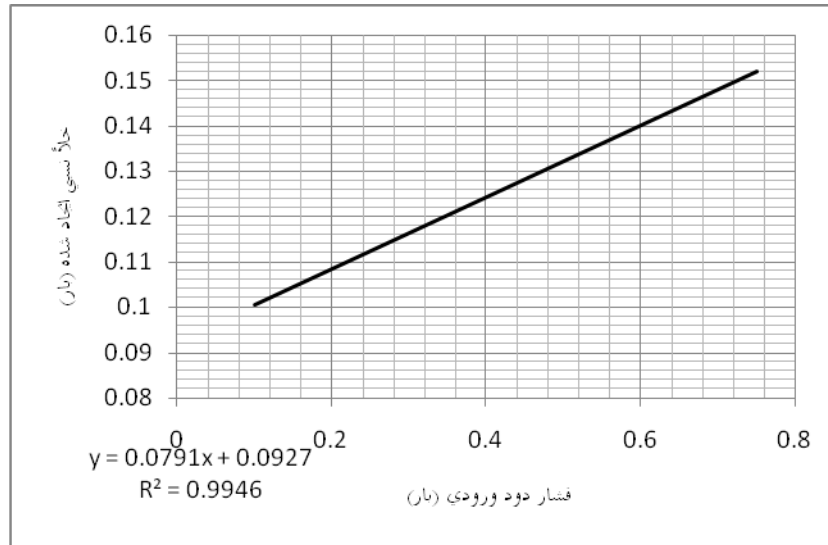
شکل ۸- دستگاه تولید خلاء ساخته شده متصل به موتور و دستگاه دیاگ جهت ثبت اطلاعات عملکردی موتور در حین انجام آزمایش

مشخصات عملکردی نازل واگرا-همگرا که به وسیله هوای فشرده آزمایش شده است در شکل ۹ نشان داده شده است. ملاحظه می گردد که روند تولید خلاء به وسیله این نازل نسبت به تغییر فشار هوای ورودی خطی بوده و دارای شیب تقریبی ۰/۰۸۵ می باشد.

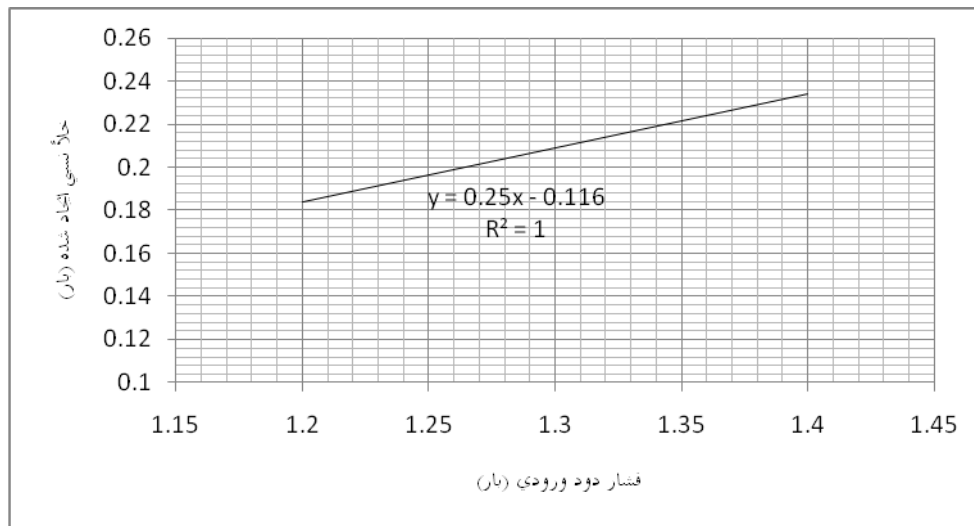


شکل ۹- نمودار خلأ نسبی ایجاد شده بر حسب فشار هوای فشرده ی ورودی

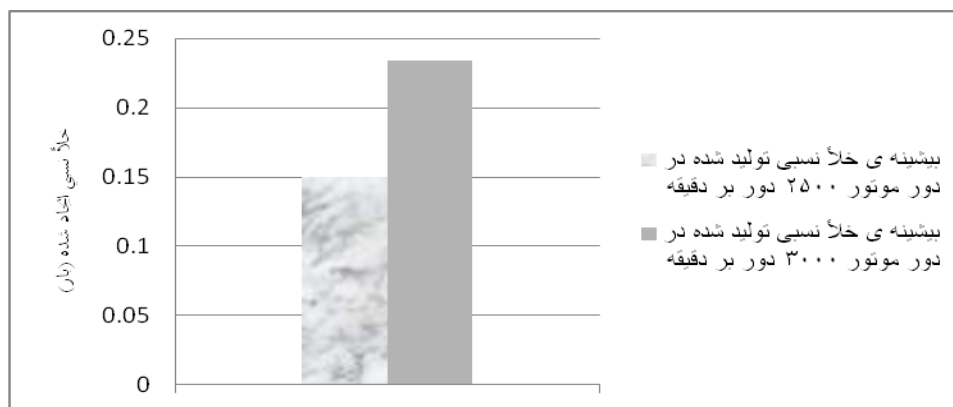
سپس دستگاه ساخته شده، به دود خروجی موتور بنزینی متصل گردید. پس از عبور دود از نازل واگرا-همگرا، مطابق شکل های ۱۰ و ۱۱ هوای درون مخزن را به تدریج تخلیه کرده و با توجه به شکل ۱۲ حداکثر خلای در مخزن و در دورهای ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲۳ بار تولید کرده است.



شکل ۱۰- نمودار خلأ نسبی ایجاد شده بر حسب فشار دود ورودی به دستگاه در دور موتور ۲۵۰۰ دور بر دقیقه

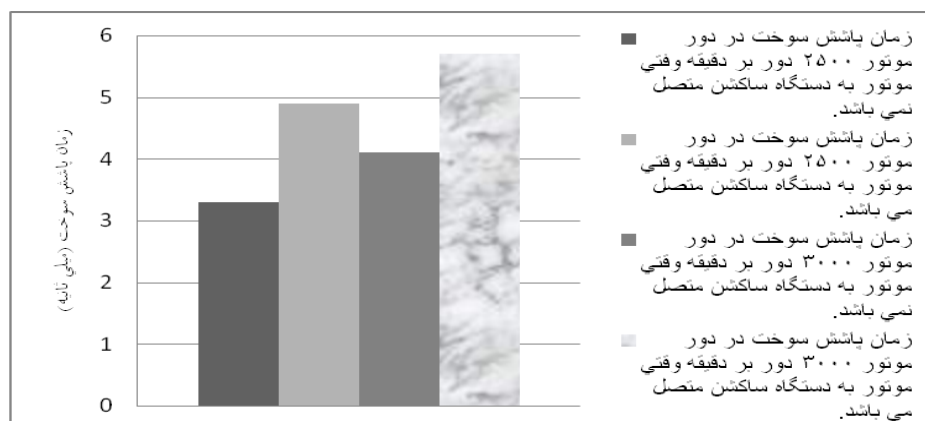


شکل ۱۱- نمودار خلأ نسبی ایجاد شده بر حسب فشار دود ورودی به دستگاه در دور موتور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه



شکل ۱۲- بیشینه ی خلأ تولید شده در دورهای مختلف

همان گونه که از محورهای افقی شکل های ۱۰ و ۱۱ ملاحظه می گردد، وجود نازل واگرا-همگرا در مسیر دود خروجی موتور بنزینی، باعث ایجاد فشار برگشتی در لوله اگزوز می شود، لذا میزان افزایش مصرف سوخت نیز بررسی گردید. شکل ۱۳ میزان تاثیر این دستگاه به خصوص نازل واگرا-همگرا در مسیر دود خروجی را نشان می دهد. همان گونه که مشاهده می گردد، در هر دو دور ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه که آزمایش به طور پیوسته در این دو دور انجام شده است، افزایش مصرف سوخت قابل ملاحظه ای ایجاد شده است.



شکل ۱۳- تأثیر دستگاه تولید خلاء بر مصرف سوخت

از خلأ تولید شده در این دستگاه می توان جهت کاربرد های مختلف از جمله دستگاه ساکشن همراه خودرو، برای تخلیه روغن موتور و جعبه دنده، تامین خلأ برای فعال سازی بوستر و فعال سازی جک های پنوماتیکی استفاده کرد. ولی از آنجایی که اگر این دستگاه به طور دائم در مسیر دود خروجی قرار گیرد، معایبی همچون فشار برگشتی، افزایش مصرف سوخت، افزایش آلاینده گی و کاهش توان موتور را به دنبال خواهد داشت، لذا می توان با طراحی کنترلی مناسب، فقط در شرایط خاص مانند ترمزگیری، حرکت در سراسیمه و مواقع کاهش سرعت، دود اگزوز را از این دستگاه عبور داد و خلأ نسبی مورد نیاز را تأمین کرد.

۳- نتایج:

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق، امکان تولید انرژی الکتریکی به وسیله توربوشارژر به علت داشتن دور بالا وجود دارد. اما بر سر این راه موانع و محدودیت هایی وجود دارد که باید مورد توجه قرار گیرد. دمای بالا در محدوده توربوشارژر، گشتاور پایین توربوشارژر و دوده های برگشتی از جمله موانع پیش روی تولید انرژی الکتریکی به وسیله توربوشارژر می باشند. اما با توجه به تمام این موارد، با بهینه کردن این سیستم می توان از انرژی جنبشی دود خروجی موتورهای بنزینی در جهت تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد. از طرفی با افزودن یک مدار پنوماتیکی مناسب، می توان از فشار دود موتور بنزینی برای تولید خلأ استفاده کرد. کاربرد های خلأ شامل تخلیه روغن موتور و جعبه دنده، فعال سازی عملگرهای پنوماتیکی و نیز فعال سازی بوستر ترمز خودرو می باشد.

از آنجایی که استفاده از نازل واگرا-همگرا در مسیر دود خروجی موتور، ایجاد فشار برگشتی کرده که منجر به افزایش مصرف سوخت، کاهش آلاینده گی و کاهش توان موتور می شود، می توان با طراحی سیستم کنترلی مناسب، فقط در شرایط خاص، دود را از نازل واگرا-همگرا عبور داد و از انرژی دود خروجی موتور بنزینی استفاده کرد. ولی توجه به این نکته حائز اهمیت می باشد که دود خروجی موتور بنزینی، بیشتر حاوی انرژی جنبشی می باشد تا انرژی پتانسیل، لذا استفاده از دستگاه هایی مانند توربوشارژر که از انرژی جنبشی دود بهره می گیرند، مناسب تر است. این موضوع را می توان از مقایسه نمودارهای مصرف سوخت هنگام استفاده از توربوشارژر و یا هنگام استفاده از دستگاه تولید خلأ استخراج کرد.

- 1-Ibaraki, S. et al., Numerical and Experimental Reliability Evaluation of the High Temperature Turbine Wheel for Gasoline Engines, 13th Supercharging Conference, 2008.
- 2-Ibaraki et al., Development of the "hybrid turbo," an electrically assisted turbocharger, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 43 No. 3 (2006)
- 3-Yamashita, Y. et al., Development of Electrically Assisted Turbocharger for Diesel Engine, 8th International Conference on Turbochargers and Turbo charging, IMechE Paper, p.147
- 4-Toshihiko Noguchi, et al., 220,000-r/min, 2-kW permanent Magnet Motor Drive for Turbocharger, International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2005)
- 5-Ibaraki, S. et al., Turbocharger R & D in MHI, Journal of the Gas Turbine Society of Japan, Vol. 33 No. 4 (2005) p.288
- 6-Takahashi, I. et al., A Super High Speed PM Motor Drive System by a Quasi-Current Source Inverter, Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 30 Issue 3 (1994) p. 683
- 7-Takata, Y. et al., 220000 r/min -2 kW PM Motor Drive for Turbocharger (in Japanese), IEEJ Trans. IA. Vol. 125 No. 9
- 8-Yamashita, Y. et al., Development of Electrically Assisted Turbocharger for Diesel Engine, 8th International Conference on Turbochargers and Turbo charging, ImechE Paper, p.147
- 9-United States Patent Application Publication, Pub no: US2011/0022289, Pub date: jan. 27 ,2011
10. SAE: Recovering Energy from the Diesel Engine Exhaust Using Mechanical and Electrical Turbo compounding
D.T. Hountalas, C.O. Katsanos and V.T. Lamaris, April 16-19, 2007
11. Electrically Assisted Turbochargers: their potential for energy recovery, by Jim Bumby and Sue Crossland, School of Engineering, Durham University Jeff Carter Cummins Turbo Technology