فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

بررسی سامانهٔ پرخوران دوطبقه با هدف جبران گشتاور دور کند

هادی نظری کیان[۱] ، ابوالفضل محمدابراهیم[۲*]، سید مصطفی آقا میرسلیم[۳]

[۱] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، hadi.nazari.kian@gmail.com

[۲] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، m.ebrahim@arakut.ac.ir

[۳] دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، mirsalim@csr.ir

[*] نویسندهٔ مسئول

چکیده

پرخورانی در موتورهای احتراق داخلی بسیار مورد توجه است. مزیت اصلی پرخورانی ایجاد توان بیشتر در حجم ثابت موتور است که همین امر پرخورانی را برای کوچک سازی موتورها مناسب می سازد. سامانهٔ پرخوران حرارتی با مشکل عمده تأخیر و کمبود گشتاور دور کند مواجه است. برای رفع این مشکلات سامانه های پرخورانی جدیدی پیشنهاد می شوند که یکی از آنها سامانهٔ پرخوران دوطبقه است. در سامانهٔ پرخوران دوطبقه دو پرخوران حرارتی به صورت ردیفی بهم متصل اند و پرخورانی در دو مرحله انجام می شود. در این تحقیق سامانهٔ پرخوران معمولی و پرخوران دوطبقه شبیه سازی و با هم مقایسه شدند. نتایج نشان می دهد که فشار پرخورانی موتور در پرخوران دوطبقه در همهٔ دورها افزایش می یابد، یعنی خروجی موتور نسبت به پرخوران معمولی بیشتر است و همین طور افزایش گشتاور در دور کند، زیاد است. همچنین در این سامانهٔ پرخورانی مصرف سوخت خودرویی کاهش می یابد. این نوع پرخورانی در کنار داشتن مزیت های خود باعث افزایش پس فشار در مسیر دود می شود و همین طور پیچیدگی هایی به مجموعهٔ پرخوران و موتور اضافه می کند و پایش آن تلاش جدی می طلبد.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

دریافت: ۱ دی ۱۳۹۶

پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۶

کلیدواژه‌ها:

پرخورانی

پرخوران دوطبقه

گشتاور دور کند

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

۱- مقدمه

پرخورانی باعث ورود جرم هوای بیشتر به درون موتور احتراق داخلی می شود که در حجم و سرعت یکسان با موتور تنفس طبیعی قدرت بیشتری حاصل می‌گردد. پرخوران حرارتی[1] به دلیل استفاده از انرژی دود که باعث افزایش بازده کلی موتور می شود مورد توجه است. پرخورانی به تنهایی باعث کاهش مصرف سوخت نمی شود در صورتی که موتور پرخوران با موتور تنفس طبیعی قدرت یکسانی داشته باشد، موتور پرخوران حجم کمتری دارد و حجم کمتر باعث اصطکاک و اتلاف حرارت کمتر می شود و در نهایت مصرف سوخت کاهش می یابد[۱].

از مهم ترین مشکل پرخوران حرارتی می‌توان دو مورد پاسخ گذرای محدود و کمبود گشتاور دور کند را برشمرد. مهم ترین عامل تأثیرگذار روی پاسخ گذرا لختی محور پرخوران است. با کاهش اندازه گردا[2] و تنجار[3] پرخوران لختی محور کاهش می یابد؛ از طرفی با داشتن پرخوران با اندازهٔ کوچک تر عملکرد آن در جریان کم بهتر می شود و گشتاور دور کند موتور بهبود می یابد اما توان بیشینهٔ موتور محدود می‌شود، از طرف دیگر با داشتن پرخوران با اندازهٔ بزرگ تر عملکرد آن در جریان زیاد بهتر، توان بیشینهٔ موتور بیشتر ولی گشتاور دور کند کم می شود[۲].

برای داشتن مزیت پرخوران حرارتی در افزایش توان موتور و در عین حال داشتن گشتاور دور کند و پاسخ گذرای مطلوب سامانه های پرخورانی ترکیبی توسعه یافته اند. همهٔ این سامانه ها از پرخوران حرارتی با ظرفیت زیاد برای افزایش توان در دور تند استفاده می کنند و برای بهبود عملکرد در دور کند از پرخوران حرارتی دیگری و یا دیگر انواع پرخوران ها استفاده می کنند. معمولا سامانه های ترکیبی این سه دسته اند: سامانهٔ پرخوران مکانیکی با پرخوران حرارتی، سامانهٔ پرخوران برقی با پرخوران حرارتی، سامانهٔ پرخورانی با دو پرخوران حرارتی[۲،۳].

سامانهٔ پرخورانی دوطبقه از دو پرخوران حرارتی استفاده می کند که دوگردا و دو تنجار آن به صورت ردیفی قرار گرفته اند. جریان دود ابتدا از گردای پرخوران کوچک تر که پرخوران پرفشار[4] نامیده می شود عبور می کند، در حالت گذر از دور کند به دور تند موتور به تدریج جریان دود ورودی به گردای پرفشار کم می شود و از مسیری کناری به گردای پرخوران دوم می رود. پرخوران دوم همواره در مدار است و دودِ انبساط یافته در گردای پرفشار وارد گردای دوم می شود. این پرخوران بزرگ تر است و پرخوران کم فشار[5] نامیده می شود. در دور تند گردای پرفشار کاملا از مسیر خارج می شود و همین طور جریان هوا هم از تنجار آن عبور داده نمی شود، این کار با استفاده از دو شیر کنارگذر[6] در دو سمت گردا و تنجار انجام می شود. بدین ترتیب در دور کند پرخوران پرفشار فعال است و پرخوران کم فشار در دور تند به‌تنهایی فشار پرخورانی[7] موردنیاز را ایجاد می کند. در ناحیه ای که باهم کار می کنند دود در دو مرحله انبساط و هوا در دو مرحله تراکم می‌یابد[۴]. در این سامانه برای فشار پرخورانی بیشتر محدویت های پس زنی[8] و خفگی[9] کمتر می شوند. فشار پرخورانی در سامانهٔ دوطبقه از فشار پرخورانی در پرخوران حرارتی معمولی و در گردای هندسه متغیر[10] قوی تر است. گشتاور دور کند، پاسخ گذرا و توان بیشینه در این سامانه بهبود می یابند[۵،۶].

پرخورانی دوطبقه راه حلی برای افزایش گشتاور دور کند و توان ویژه موتور است. این نوع پرخورانی روی موتورهای دیزل اجرا شده است و تجاری شده است اما تا کنون موردی از موتور بنزینی با پرخوران دوطبقه به صورت تولیدی و تجاری یافت نشده است. دلیل آن فشار پرخورانی قوی در این سامانهٔ پرخورانی است که باید از عدم مشکلات احتراقی در موتور مطمئن شد.در این تحقیق سامانهٔ پرخوران دوطبقه روی موتور بنزینی شبیه سازی شده است و نتایج آن با نتایج شبیه سازی پرخوران حرارتی معمولی مقایسه شده است.

۲- مشخصات موتور

موتور پایه انتخاب شده موتوری از شرکت FEV است که سامانهٔ پرخوران دوطبقه روی آن اجرا شده است. این موتور با سامانهٔ پرخوران دوطبقه شبیه سازی و آزمون عملی شده است[۷]. مشخصات موتور در جدول ۱و۲ آمده است.

جدول ۱- مشخصات موتور پایه

تعداد استوانه	۴ استوانه ردیفی
نوع اشتعال	اشتعال جرقه ای
تزریق سوخت	تزریق مستقیم بنزین
حجم موتور	۱/۸ لیتر
قطر سمبه	۸۱ میلی متر
طول پیمایش سمبه	۸۷ میلی متر
نسبت تراکم حجمی	۸/۵

جدول ۲- پرخوران های استفاده شده در موتور پایه

تنجار پرخوران پرفشار	1574

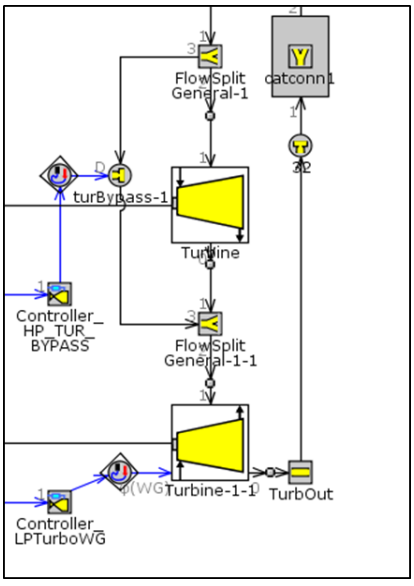
[1] Turbocharger
[2] Turbine
[3] Compressor
[4] High-pressure turbocharger
[5] Low-pressure turbocharger
[6] Bypass valve
[7] Boost pressure
[8] Surge
[9] Choke
[10] Variable geometry turbine

گردای پرخوران پرفشار	KP35-240.82
تنجار پرخوران کم فشار	2283
گردای پرخوران کم فشار	K04-6.88
شرکت سازنده پرخوران ها	BorgWarner

۳- شبیه سازی

شبیه سازی با مشخصات موتور پایه در نرم افزار جی تی-پاور انجام شده است. چون اطلاعاتی از تنفس و احتراق موتور پایه در دسترس نیست، نمونه ای از داخل نرم افزار که مناسب برای موتور پایه باشد انتخاب شد و فقط مشخصاتی که از موتور پایه در اختیار بود تغییر کردند. شرکت FEV ابتدا پرخوران حرارتی معمولی را روی این موتور قرار داده است، بنابراین ابتدا در این تحقیق هم شبیه سازی پرخوران معمولی انجام شد. سعی شد با استفاده از نام و نقشهٔ عملکرد پرخوران قرار گرفته روی موتور که در مرجع [۷] ذکر شده است انطباق موتور و پرخوران انجام شود تا به نتایج خروجی موتور پایه رسیده شود. اما در شبیه سازی موتور با پرخوران حرارتی معمولی با آزمودن تعدای پرخوران همرده با پرخوران موتور پایه به نتایج موتور پایه در دور تند و کند دست یافته نشد.

سپس شبیه سازی سامانهٔ پرخوران دوطبقه انجام شد، دو گردا و دوتنجار به صورت ردیفی قرار داده شدند و دو شیر کنار گذر در سمت تنجار و گردا برای تنظیم پرخوران پرفشار اضافه شدند.



شکل ۱: گرداهای سامانهٔ پرخورانی دوطبقه در نرم افزار

موتور پایه نسبت تراکم حجمی برای موتور پرخوران دوطبقه از ۹/۸ به ۸/۵ کاهش داده است. نقشهٔ عملکرد تنجارها و گرداها در نمونه شبیه‌سازی شده مطابق با نام ذکر شده برای آن ها در موتور پایه جمع‌آوری شد، فقط نقشهٔ عملکرد گردای کم فشار دقیقا بدست نیامد. پس از اجرای شبیه سازی پرخوران کم فشار عملکرد خوبی نداشت بنابراین تعدادی نقشهٔ عملکرد برای پرخوران کم فشار جمع آوری شد و سعی شد تا بهترین انطباق پرخوران ها با موتور انجام شود تا در نهایت بتوان به نتایج خروجی موتور پایه رسید.

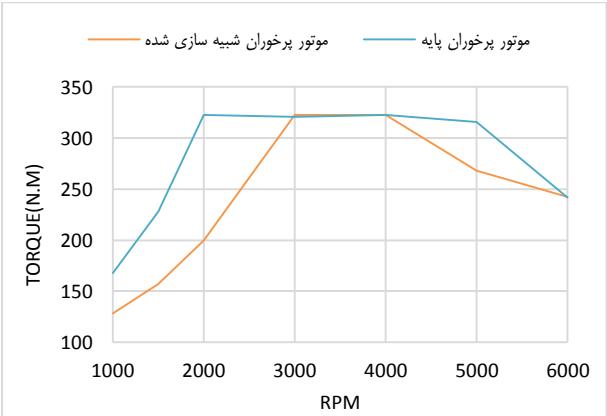
همچنین حالت بار جزئی هم شبیه سازی شده است تا بتوان نقشهٔعملکرد موتور را در هر دو حالت پرخورانی در تمامی بارها بدست آورد. یکی از چالش های عمده در این شبیه سازی تنظیم شیر کنارگذر پرخوران پرفشار و تنظیم دریچه هدر[1] پرخوران کم فشار است. برای تنظیم آن ها دو عدد پایشگر[2] مقدار گشودگی شیرکنارگذر و دریچه هدر را متناسب با خروجی تعیین شده پایش می کنند. برای تعیین خروجی در بار جزئی مقدار خروجی در بار کامل متناسب با زاویه دریچهٔ گاز به قسمت های مساوی تقسیم می شود[۸].

با استفاده از این نتایج شبیه سازی موتور روی خودرو برای تعیین مصرف سوخت خودرویی انجام می شود. در این شبیه سازی نقشهٔ فشار متوسط خروجی بر حسب دور و موقعیت اهرم پایی شتاب[3] و همچنین نقشهٔ مصرف سوخت ویژه بر حسب دور و خروجی موتور تهیه شدند. مشخصات خودرو در شبیه سازی مشخصات خودروی آزمون شرکت FEV است. در شبیه سازی چرخهٔ رانندگی جدید اروپایی روی خودرو آزموده شده است.

٤-بحث بر روی نتایج

مقایسه شبیه سازی و تجربی

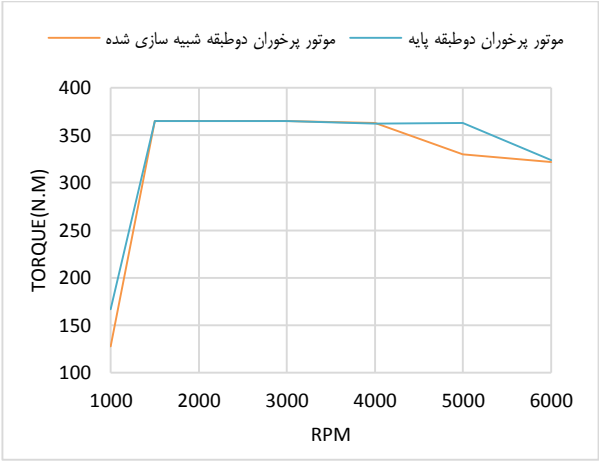
شکل۲ مقدار گشتاور خروجی موتور شبیه سازی شده با پرخوران حرارتی معمولی و موتور پایه با پرخوران حرارتی معمولی را نشان می دهد. همین طور شکل۳ مقدار گشتاور خروجی موتور شبیه سازی شده با سامانهٔ پرخوران دوطبقه و موتور پایه با سامانهٔ پرخوران دوطبقه را نشان می دهد.



[1] Waste-gate
[2] Controller

[3] Accelerator pedal

شکل ۲: مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی در موتور با پرخوران معمولی

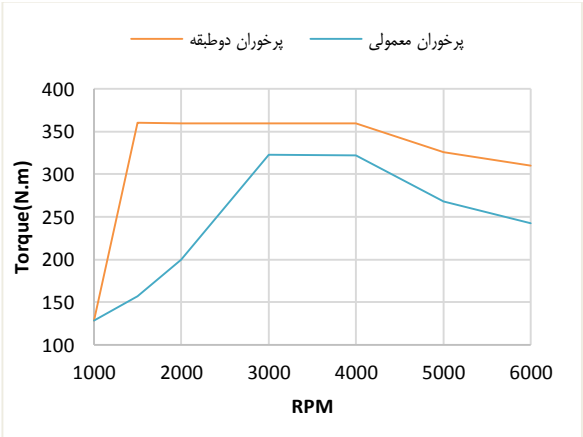


شکل ۳: مقایسه نتایج شبیه سازی و تجربی در موتور با سامانهٔ پرخوران دوطبقه

همانطور که گفته شد در موتور پرخوران حرارتی معمولی دست یابی به نتایج موتور پایه در بعضی نقاط حاصل نشد. اما در مورد شبیه سازی پرخوران دوطبقه با توجه به شکل۳ می توان گفت در اکثر نقاط به خروجی موتور پایه رسیده شده است. فقط در دور تند دست یابی به نتایج تجربی حاصل نشده است که به دلیل در اختیار داشتن تعدادی محدود نقشهٔ عملکرد پرخوران و عدم انطباق عالی موتور و پرخوران کم‌فشار است.

مقایسه پرخوران دوطبقه با پرخوران معمولی

شکل۴ مقایسه گشتاور خروجی موتور شبیه سازی شده با پرخوران حرارتی معمولی و موتور با سامانهٔ پرخوران دوطبقه را نشان می دهد.



شکل ۴: مقایسه گشتاور خروجی موتور شبیه سازی شده در دو حالت پرخورانی

توان ویژه موتور پرخوران حرارتی معمولی ۸۵ کیلووات بر لیتر است این مقدار برای موتور پرخوران دوطبقه ۱۰۷ کیلووات بر لیتر است.

شکل۴ نشان می دهد گشتاور خروجی موتور پرخوران دوطبقه در تمامی دورها بیشتر از موتور پرخوران معمولی است. نکته مهم افزایش قابل توجه گشتاور در دور کند است دقیقا مزیت اصلی سامانهٔ مورد تحقیق همین است که در اینجا مشخص شده است.

شکل۵ سهم هر یک از پرخوران ها را در فشار پرخورانی مشخص می‌کند. پرخوران پرفشار در دور کند فعال است و پرخوران کم فشار همیشه فعال است ولی در دور تند و دور میانی است که سهم اصلی در پرخورانی را دارد.

شکل ۵: نسبت فشارهای ایجاد شده در موتور پرخوران دوطبقه

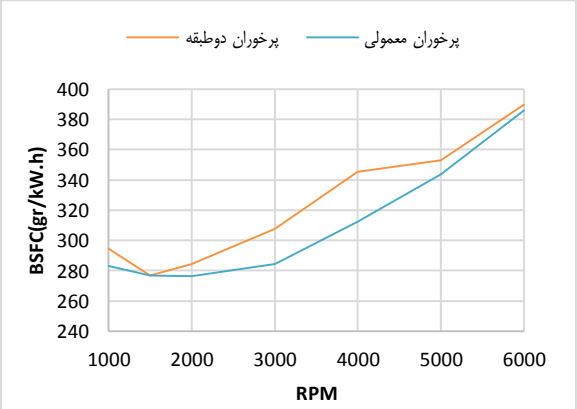
شکل۶ مقایسه فشارهای دو سامانهٔ پرخورانی را نشان می دهد. با توجه به نتایج گشتاور خروجی هم مشخص است فشار هوای ورودی موتور پرخوران دوطبقه همواره قوی تر از موتور پرخوران حرارتی معمولی است. در پرخوران حرارتی معمولی فشار هوا قوی تر از فشار دود است اما در دور تند فشار دود قوی تر می شود زیرا افت فشار در مسیر دود بیشتر است. اما مشاهده می شود در سامانهٔ پرخوران دوطبقه فشار دود همواره قوی تر از فشار هوای ورودی است. در این سامانه دو گردا وجود دارد و افت فشار مسیر دود هم بیشتر است، در ضمن انطباق پرخوران‌ها و موتور عالی نیست وگرنه در بعضی ناحیه ها فشار هوای ورودی می‌توانست قوی تر از فشار دود شود. همچنین مشاهده می شود در ۴۰۰۰دد مقدار فشار دود بسیار زیاد شده است این به دلیل این است که تا این دور پرخوران پرفشار از مسیر خارج نشده است و جریان آن به سمت خفگی رفته و پس فشار[1]آن زیاد شده است. بعد از آن مقدار

[1] Back pressure

فشار دود کاهش زیادی داشته است زیرا در ۵۰۰۰دد پرخوران پرفشار از مسیر خارج شده است و پس فشار آن دیگر وجود ندارد. پرخوران پرفشار به این دلیل تا ۴۰۰۰ د.د.د. فعال باقی مانده است تا قدرت در این دور کاهش نیابد زیرا پرخوران کم فشار به تنهایی نمی تواند فشار پرخورانی مورد نیاز را تأمین کند.

شکل ۶: مقایسه فشارهای هوا و دود در دو حالت پرخورانی

شکل۷ نمودار مصرف سوخت ویژه موتور شبیه سازی شده با دو سامانهٔ پرخورانی را نشان می دهد. با کاهش نسبت تراکم حجمی در موتور پرخوران دوطبقه مصرف سوخت ویژه آن همواره بیش تر از موتور پرخوران معمولی است. همچنین در منحنی مصرف سوخت ویژه موتور پرخوران دوطبقه در ناحیه دور کند و دور تند کاهش مقدار مصرف سوخت ویژه قابل مشاهده است، می توان این طور گفت که پرخوران ها در این ناحیه ها بیشترین بازده را دارند. همچنین در دور میانی مصرف سوخت ویژه مقداری افزایش داشته است این هم به دلیل آن است که پس فشار پرخوران پرفشار باعث کاهش بازده سامانه شده است.



شکل ۷: مقایسه مصرف سوخت ویژه موتور شبیه سازی شده در دو حالت پرخورانی

نتایج مصرف سوخت خودرویی

نتایج مصرف سوخت خودرو در آزمون چرخه جدید رانندگی اروپایی با هر دو سامانهٔ پرخورانی بدین صورت است.

جدول ۳- نتایج مصرف سوخت خودرویی

مصرف سوخت خودرو با پرخوران دوطبقه	۱۵/۱ لیتر بر ۱۰۰کیلومتر
مصرف سوخت خودرو با پرخوران معمولی	۱۶/۰ لیتر بر ۱۰۰کیلومتر

هر چند این نتایج ممکن است با حالت واقعی اختلاف داشته باشد اما فرضیات برای دو سامانهٔ پرخورانی یکسان است. نقاط عملکردی موتور در این چرخهٔ رانندگی در نقاط کم بار موتور هستند و در تمامی نقاط عملکردی موتور با زاویه دریچه گاز یکسان موتور پرخوران دوطبقه مصرف سوخت ویژه بهتری نسبت به موتور پرخوران معمولی ندارد، بنابراین قدرت بیشتر موتور پرخوران دوطبقه باعث می شود درخواست کمتری برای افزایش قدرت باشد. می توان این طور هم تفسیر کرد که افزایش گشتاور دور کند در موتور پرخوران دوطبقه باعث بهبود قابلیت رانندگی خودرو با این موتور شده است و در نتیجه راننده درخواست کمتری برای افزایش بار و دور موتور برای داشتن گشتاور بیشتر دارد که در نهایت مصرف سوخت کاهش می یابد.

نتیجه گیری

سامانهٔ پرخوران دوطبقه فشار پرخورانی قوی تری نسبت به پرخوران حرارتی معمولی و دیگر سامانه های پرخورانی ترکیبی دارد. این ویژگی باعث می شود گشتاور و توان خروجی موتور با این سامانه بیشتر از موتور پرخوران معمولی شود. با داشتن توان بیشتری نسبت به حجم موتور یکسان سامانهٔ پرخوران دوطبقه برای کوچک سازی موتورها مناسب است. در این سامانهٔ پرخورانی فشار هوای ورودی قوی تر می‌شود اما در مقابل فشار دود هم قوی تر می شود پس باید برای موتور ملاحظات مکانیکی در مورد فشار درون استوانه و فشار هوا و دود در چندراهه را لحاظ کرد. همچنین باید از مشکلات احتراق با چنین فشار پرخورانی مخصوصا در موتورهای بنزینی مطمئن شد. سامانهٔ پرخوران دوطبقه به طور قابل توجهی گشتاور دور کند را افزایش می دهد و در همه دورها هم گشتاور افزایش می یابد که این باعث بهبود قابلیت رانندگی خودرو با چنین موتوری می شود، این افزایش گشتاور موتور باعث می شود که در نهایت مصرف سوخت در خودرو کاهش یابد.

مراجع

[1] Ulrich Spicher, *Gasoline Engine with Direct Injection*, 1st edition 2009, Vieweg+Teubner
[2] Dr. Claus Glahn, Dr. Matthias Kluin, Dr. Ingo Hermann, *Requirements to the Boosting System of Future Gasoline Engines*, 25th Aachen Colloquium

Automobile and Engine Technology 2016
[3] B. Lee, Z. Filipi, D. Assanis, *Simulation-based Assessment of Various Dual-Stage Boosting Systems in Terms of Performance and Fuel consumption*, SAE paper 2009-01-1471
[4] Q. Zhang, A. Pennycott and C.J. Brace*, A Review of Parallel and Series Turbocharging for the Diesel Engine*, Powertrain & Vehicle Research Centre University of Bath United Kingdom
[5] P. A. Domelt, S.glück, A.Sehr, *Two-stage Turbocharging – concept for high pressure charging on SI-engines* ,MTZ woridwide 05/2010 volume71
[6] R. Sauersteina, R. Dabrowskib, M. Becker, *Regulated Two-stage turbocharging for gasoline Engines*, BorgWarner Turbo Systems
[7] C. Schernus, D. Oh, *Vehicle demonstrator two-stage turbo SI engine*, GT-SUITE Conferences 2009
[۸] هادی نظری کیان، ابوالفضل محمدابراهیم ،مصطفی آقا میرسلیم، طراحی سامانهٔ پرخوران دوطبقه با هدف جبران گشتاور در دورهای کند، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، آبان ۹۶.

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Study of two-stage turbocharging for compensation of low-end torque

H. N. Kian[1], A. Mohammadebrahim[2*], S. M. Agha Mirsalim[3]

[1]*Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, hadi.nazari.kian@gmail.com*
[2]*Mechanical Engineering Department, Arak University of Technology, Arak, Iran, m.ebrahim@arakut.ac.ir*
[3]*Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, mirsalim@csr.ir*
[*]*Corresponding Author*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 22 December 2017
Accepted: 21 February 2018

Keywords:
Turbocharging
Two-stage turbocharging
Low-end torque

ABSTRACT

Turbocharging is most favorable in internal combustion engines. Advantage of turbocharging is more power than naturally aspirated engine with same engine displacement that comes it ideal for downsizing. The main disadvantage of turbochargers is turbo lag and shortcoming low-end torque. For solve of this problems the new turbocharging systems have been developed that one is two-stage turbocharging. Two-stage turbocharging has two turbochargers in series connection and boosting is taken in two stages. In this investigation ordinary turbocharging and two-stage turbocharging has been simulated and be compared with each other. The result show that in two-stage system boost pressure in all RPMs is more than single turbocharger, it means the engine output with two-stage turbocharger is more and also increase in low-end torque is remarkable. This turbocharging system decreases the vehicle fuel consumption but with its benefits has some problem like increase of back pressure in exhaust and add complexity in boosting system and engine, and control of system is important challenge.

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.