مطالعات ارتقاء عملکرد یک موتور دیزلی توربوشارژری

پوریا جعفری مقدم[۱*]، علی حاجیلوی بنیسی[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، رشته‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران pooria.76a.97@gmail.com
۲- استاد دانشگاه صنعتی شریف، تهران hajilouy@sharif.edu
*نویسنده مخاطب

چکیده

از راهکارهای موجود جهت افزایش توان موتور احتراق داخلی معین، افزودن توربوشارژر به آن می‌باشد که نتیجه‌ی آن ارتقاء عملکرد موتور تنفس طبیعی می‌باشد. میزان ارتقاء تابع میزان افزایش فشار و چگالی هوای ورودی به موتور می‌باشد. توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی در موتورهای احتراق داخلی دو پارامتر بسیار مهم از عملکرد موتور می‌باشند که در حالت توربوشارژری نسبت به حالت تنفس طبیعی، توان ترمزی زیاد و مصرف سوخت ویژه کم می‌شود. در این پژوهش مطالعات ارتقاء عملکرد موتور دیزلی توربوشارژری او ام ۳۵۵ ای (OM355A) ساخت شرکت ایدم تبریز، به کمک نرم‌افزار ای وی ال (AVL) ماژول تقویت (Boost) و مدل سازی رفتار آن انجام گرفت و نتایج شبیه سازی با داده‌های سازنده موتور مقایسه شد و مشخص گردید که بیشینه اختلاف توان ترمزی ۲/۹ درصد می‌باشد و نتایج شبیه سازی قابل قبول است. سپس مطالعات ارتقاء عملکرد موتور با افزایش ۲۰ درصد توان ترمزی انجام و پارامترهای رفتاری حالت ارتقاء یافته موتور استخراج گردید. برای انتخاب توربوشارژر مناسب، با مطالعات آزمایشگاهی، منحنی‌های مشخصات رفتاری کمپرسور توربوشارژر جی تی ۴۰۸۲ (GT4082) جهت انطباق با حالت ارتقاء یافته‌ی موتور طی آزمون‌های سرد و گرم توربوشارژر استخراج گردید. با بررسی‌ها مشخص گردید این توربوشارژر مناسب شرایط ارتقاء یافته موتور است و گزینه‌ی مطلوبی برای این منظور می‌باشد.

واژه های کلیدی: ارتقاء موتور دیزلی توربوشارژری- نرم‌افزار ای وی ال- آزمایش سرد و گرم توربوشارژر- رسم منحنی مشخصه توربوشارژر- تطابق موتور و توربوشارژر

۱- مقدمه

هدف این پژوهش افزایش توان و ارتقاء عملکرد موتور دیزلی توربوشارژری می‌باشد. افزایش توان بیش از پنجاه درصد موتور نسبت به حالت تنفس طبیعی به کمک توربوشارژر، نیاز به تغییرات در سامانه‌های موتور می‌باشد. از این رو سازندگان موتور افزایش توان را به زیر پنجاه درصد محدود می‌کنند تا نیاز به تغییرات در سامانه‌های موتور نباشد[۱]. روش‌های متفاوتی جهت ارتقاء عملکرد موتور احتراق داخلی وجود دارد. یکی از آنها کنترل دمای ورودی به موتور می‌باشد. فرزام [۲] توانست با کاهش بیست درجه ای دمای هوا در منیفولد ورودی، توان ترمزی یک موتور بنزینی توربوشارژری را حدود نه درصد ارتقاء دهد. از کارهای دیگر جهت ارتقاء موتور توربوشارژری جایگزینی سیستم‌های توربوشارژر هندسه متغیر، هیبریدی و یا افزودن سوپرشارژر به جای توربوشارژر می‌باشد. چئونگ و همکاران [۳] با افزودن یک توربوشارژر هندسه متغیر به جای توربوشارژر با دریچه فرار، افزایش ۴۰ درصدی گشتاور در سرعت‌های پایین را بدست آوردند. راجیوان و همکاران [۴] با جایگزینی توربوشارژ هیبریدی به جای توربوشارژ معمولی، توان ترمزی را به میزان ۵۰ درصد و گشتاور را به میزان ۴۰ درصد در دورهای کم نسبت به حالت توربوشارژ معمولی ارتقاء دادند. پلاتینکو و همکاران [۵] با جایگزینی دو توربوشارژر کوچک ای بی بی به جای یک توربوشارژر بر روی یک موتور هشت سیلندر، توان را ۵/۷ درصد ارتقاء دادند.

۲- موضوع پژوهش

در این پژوهش مطالعات افزایش توان موتور دیزلی توربوشارژری او ام ۳۵۵ ای انجام شد. این موتور ساخت شرکت ایدم تبریز می‌باشد و جهت بکار گیری بر روی کامیون، و ماشین‌های راه‌سازی مناسب می‌باشد [۶]. مشخصات فنی این موتور در جدول (۱) می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات فنی موتور [۶]

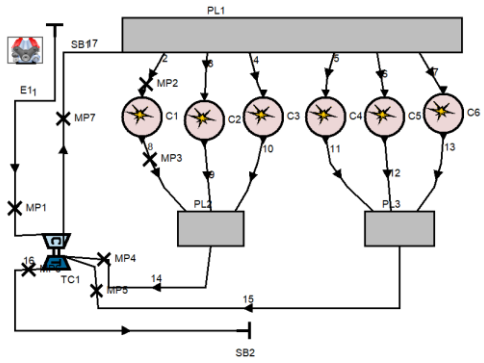
نوع سیلندر	خطی/عمودی
تعداد سیلندر	۶
قطر سیلندر	۱۲۸ mm
کورس پیستون	۱۵۰ mm
حجم موتور(لیتر)	۱۱/۵۸ Lit
نسبت تراکم	۱۵:۱
حداکثر قدرت خروجی(کیلو وات)	۲۱۰ kW @ ۲۲۰۰ rpm
حداکثر گشتاور(نیوتن*متر)	۱۰۵۹ N.m @ ۱۲۰۰ rpm
وزن خشک(کیلوگرم)	۹۰۰ kg

در این پژوهش از طریق مدل سازی رفتار موتور در وضعیت کنونی مشخص گردید و با استفاده از داده‌های سازنده، ارزیابی گردید. سپس رفتار موتور در شرایط ارتقاء یافته بدست آمد. برای تعیین توربوشارژر مناسب، مشخصات مشخصات رفتاری کمپرسور توربوشارژر جی‌تی۴۰۸۲ در آزمون‌های سرد و گرم استخراج گردید و برای مراحل انطباق در نظر گرفته شد.

۳- مدل سازی موتور

جهت مدلسازی موتور از نرم‌افزار ای وی ال ماژول تقویت استفاده گردید. مدل سازی در این نرم‌افزار در سه مرحله تکمیل شد. در مرحله‌ی اول اجزای مورد نیاز جهت مدل سازی به محیط نرم‌افزار فراخوان گردید. در مرحله‌ی دوم با اتصال اجزا به هم نحوه‌ی عبور جریان از مجراها و مسیر جریان مشخص شد. در مرحله‌ی آخر با تکمیل اطلاعات هر جزء مدل

سازی کامل گردید. از این طریق مشخصات رفتاری موتور در شرایط فعلی بدست آمد و با نتایج آزمونهای سازنده مقایسه گردید. طرح واره مدل سازی موتور در این نرم افزار در شکل ۱ است.

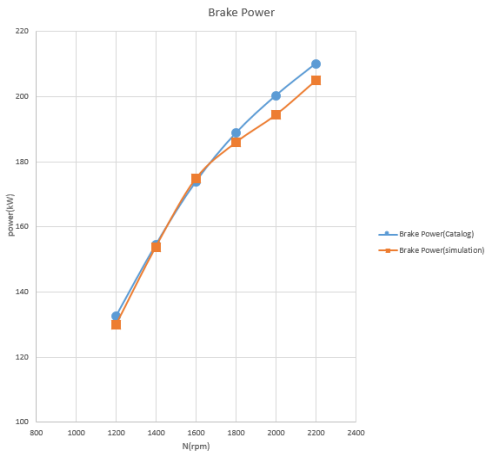


شکل ۱- طرح واره مدل سازی موتور دیزلی توربوشارژری

۴- صحت سنجی نتایج مدل سازی موتور

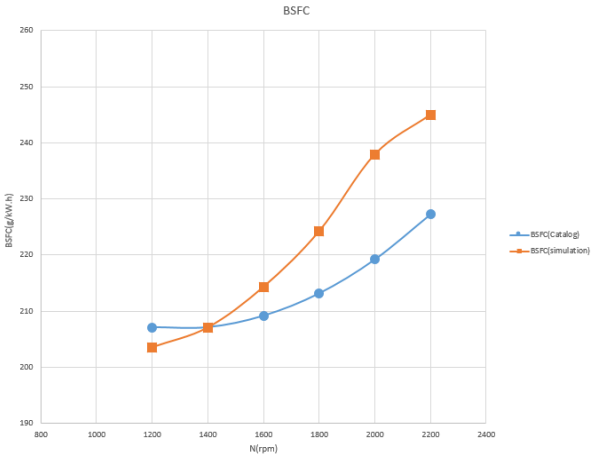
مدل سازی در سرعت‌های ۱۲۰۰ تا ۲۲۰۰ دور در دقیقه با پله‌های ۲۰۰ تائی اجرا و نتایج استخراج گردید. پارامترهای توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه ترمزی از نتایج شبیه سازی استخراج و با نتایج کاتالوگ شرکت سازنده مقایسه گردید. این نتایج در شکل‌های ۱ و ۲ است.

در شکل ۲ نتایج توان ترمزی مشاهده می‌شود. دو منحنی در دورهای کم کاملا منطبق هستند. بیشینه اختلاف ۲/۹۲ درصد می‌باشد که مقدار قابل قبولی می‌باشد و دقت شبیه سازی مناسب است.



شکل ۲- مقایسه‌ی نتایج توان ترمزی شبیه سازی با داده‌های کاتالوگ در دورهای مختلف

در شکل ۳ مقایسه نتایج مصرف سوخت ویژه ترمزی مشاهده می‌شود. در سرعت ۲۰۰۰ دور در دقیقه بیشترین اختلاف برابر با ۸/۵ درصد می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه‌ی نتایج مصرف سوخت ویژه ترمزی شبیه سازی با داده‌های کاتالوگ در دورهای مختلف

۵- فرآیند ارتقاء عملکرد موتور

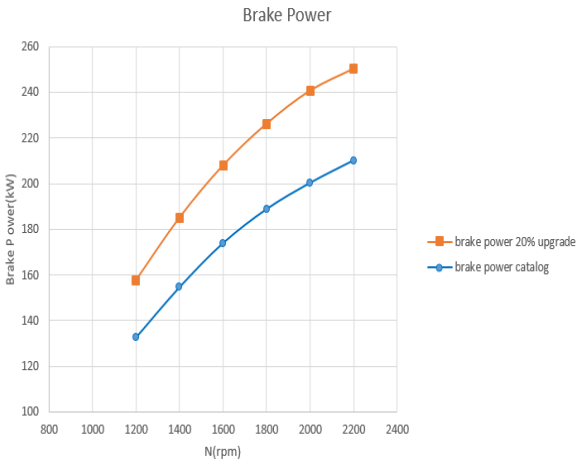
نظر به اینکه مدل سازی انجام شده برای موتور با نتایج سازنده تایید گردید، برای فرآیند ارتقاء از همان مدل سازی جهت پیشبینی رفتار شرایط جدید استفاده می‌شود و منحنی‌های عملکردی بعد از ارتقاء استخراج می‌گردد. موتور او ام ۳۵۵ ای موتور توربوشارژری موتور تنفس طبیعی او ام ۳۵۵ (OM355) می‌باشد. با توجه اینکه با ارتقاء عملکرد موتور تا ۵۰ درصد، تغییر سامانه‌های آن ضرورت پیدا نمی کند [۱]، در این مطالعه ارتقاء عملکرد این موتور به میزانی در نظر گرفته شد تا به مرز ارتقاء ۵۰ درصدی برسد. در جدول ۲ میزان افزایش توان موتور توربوشارژری او ام ۳۵۵ ای نسبت به موتور تنفس طبیعی او ام ۳۵۵ در دورهای مختلف مشاهده می‌شود که بیشترین ارتقاء توان ترمزی آن حدود ۳۳/۴ درصد می‌باشد.

جدول۲- میزان افزایش توان ترمزی موتور توربوشارژری او ام ۳۵۵ ای[۶] نسبت به موتور تنفس طبیعی او ام ۳۵۵ [۷] در دورهای مختلف

سرعت (rpm)	توان ترمزی تنفس طبیعی (kW)	توان ترمزی موتور توربوشارژری (kW)	درصد ارتقاء
۱۲۰۰	۹۹/۳۵	۱۳۲/۵۴	۳۳/۴
۱۴۰۰	۱۲۰	۱۵۴/۵۸	۲۸/۸۱
۱۶۰۰	۱۳۶/۷۷	۱۷۳/۹	۲۷/۱۴
۱۸۰۰	۱۵۰/۳۲	۱۸۸/۸۱	۲۵/۶۱
۲۰۰۰	۱۵۶/۱۳	۲۰۰/۳۴	۲۸/۳۲
۲۲۰۰	۱۶۳/۲۳	۲۱۰/۱۷	۲۸/۷۶

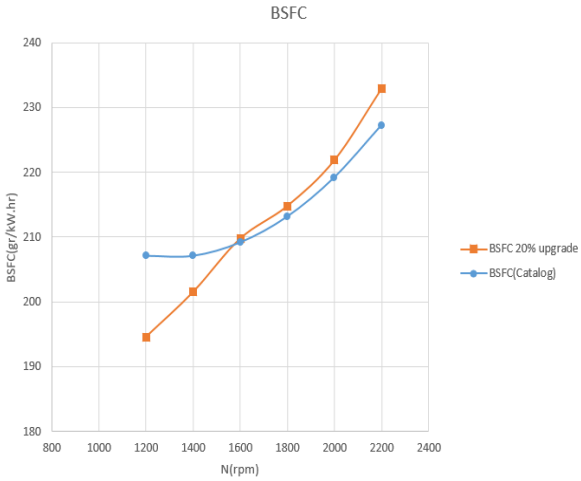
بنابراین برای ارتقاء توان موتور، افزایش ۲۰ درصدی توان ترمزی اعمال می‌شود. در زیر نتایج توان ترمزی و مصرف سوخت ویژه‌ی ترمزی برای حالت ارتقاء یافته و حالت اولیه آورده شده است.

در شکل ۴ توان ترمزی موتور توربوشارژری قبل و بعد از ارتقاء مقایسه می‌شود.



شکل ۴- مقایسه توان ترمزی موتور قبل و بعد از ارتقاء آن

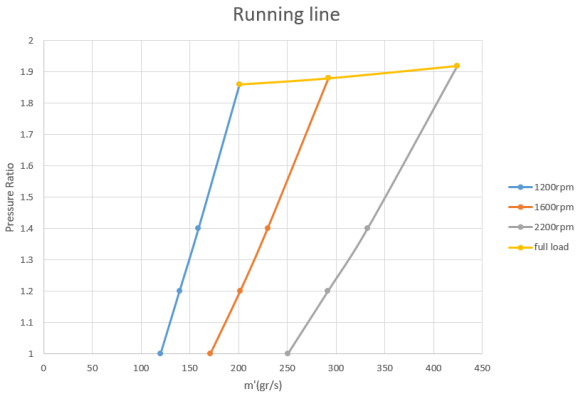
نتایج مصرف سوخت ویژه موتور قبل و بعد از ارتقاء آن، در شکل ۵ مقایسه می‌گردد.



شکل ۵- مقایسه‌ی مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور قبل و بعد از ارتقاء آن

بعد از ارتقاء عملکرد موتور، توان ترمزی به میزان متوسط ۵۲ درصد نسبت به حالت تنفس طبیعی بیشتر شد.

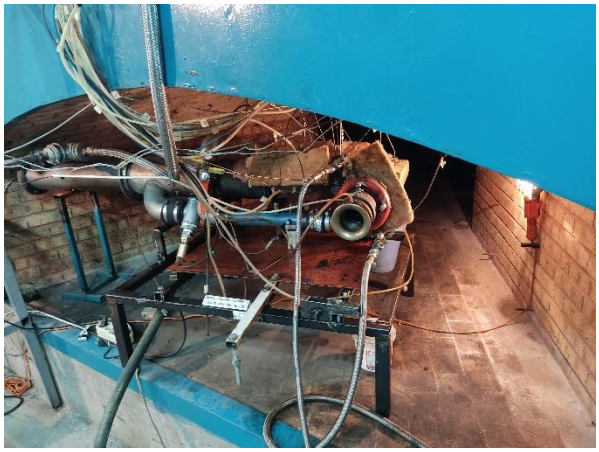
با استفاده از مدل سازی موتور، برای حالت ارتقاء یافته، چهار ضلعی عملکرد موتور شامل شرایط دور ثابت ۱۲۰۰، ۱۶۰۰، ۲۲۰۰ دور در دقیقه و نیز بار کامل استخراج گردید که در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۶- چهار ضلعی عملکردی موتور

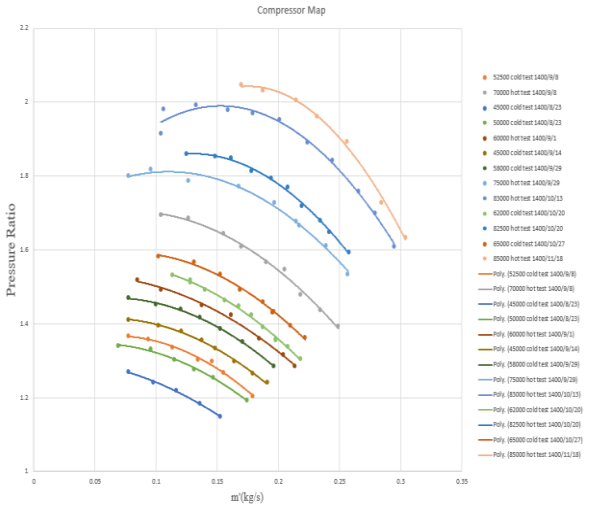
۶- مطالعات تجربی توربوشارژر جی تی ۴۰۸۲

در تداوم فرآیند ارتقاء عملکرد موتور، مطالعات تجربی توربوشارژر جی تی ۴۰۸۲ جهت انجام تطابق با موتور ارتقاء یافته انجام گرفت.. این آزمایش‌ها در مجموعه آزمایشگاهی توربوشارژر دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. در شکل ۷ نمای کلی بستر آزمون توربوشارژر این آزمایشگاه مشاهده می‌شود.



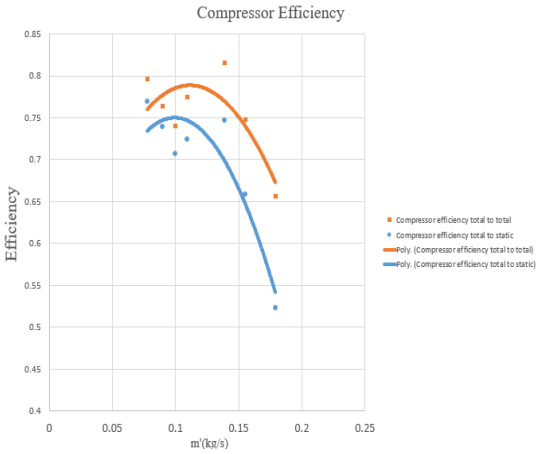
شکل ۷- بستر آزمون توربوشارژر دانشگاه صنعتی شریف

جهت رسم نمودار مشخصه توربوشارژر از آزمون‌های سرد و گرم توربوشارژر استفاده شد. در آزمون سرد و گرم توربوشارژر، ابتدا سرعت ثابتی برای توربین تعیین می‌شود. پس از تثبیت دور، دما و فشار استاتیک و کل در نقاط مختلف مدار آزمایش قرائت می‌شود. پس از آن با تغییر تدریجی دبی کمپرسور، آزمون برای شرایط جدید دور ثابت تکرار می‌شود. این کار به تعداد ۷ الی ۱۰ بار برای هر دور انجام می‌گردد که حاصل آن منحنی‌های دور ثابت می‌باشد. این آزمون‌ها در ۱۴ نوبت و برای سرعت‌های ۴۵۰۰۰، ۵۲۵۰۰، ۵۴۰۰۰، ۵۸۰۰۰، ۶۰۰۰۰، ۶۲۰۰۰، ۶۵۰۰۰، ۷۰۰۰۰، ۷۵۰۰۰، ۸۰۰۰۰، ۸۲۵۰۰، ۸۳۰۰۰ و ۸۵۰۰۰ دور در دقیقه بطور کامل برگزار شد. با فرآوری نتایج حاصل از این آزمون‌ها منحنی‌های مشخصات رفتاری کمپرسور ترسیم می‌گردد. شکل ۸ تغییرات نسبت فشار بر حسب دبی جرمی در دورهای ثابت را نشان می‌دهد.



نمودار ۸- نمودار نسبت فشار بر حسب دبی جرمی کمپرسور

همچنین نمودار بازده کل به کل و کل به استاتیک کمپرسور بر حسب دبی جرمی در شکل ۹ آورده شده است. به دلیل شباهت زیاد این نمودار در سرعت‌های مختلف، تنها نتایج در سرعت ۵۴۰۰۰ دور در دقیقه تست سرد در زیر آورده شده است.

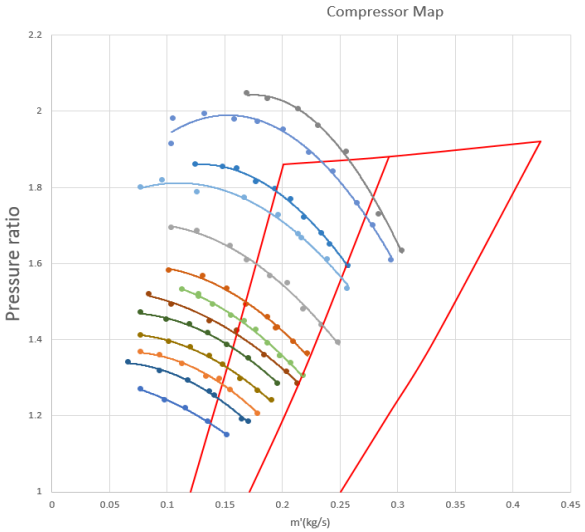


شکل ۹- نمودار بازده کل به کل و کل به استاتیک بر حسب دبی جرمی کمپرسور در سرعت ۵۴۰۰۰ دور در دقیقه تست سرد

با بررسی‌های انجام شده از تحلیل داده‌ها برای حداکثر و حداقل بازده کل به کل کمپرسور مشخص گردید که حداکثر بازده ۸۴ درصد و حداقل بازده ۵۸ درصد می‌باشد.

۷- مراحل تطابق موتور و توربوشارژر

با استخراج منحنی عملکردی موتور ارتقاء یافته در بخش ۵ و منحنی مشخصه‌ی کمپرسور توربوشارژر جی تی ۴۰۸۲ در بخش ۶، با برهم نهی این دو نمودار فرآیند آنطباق صورت می‌گیرد که مطابق شکل ۱۰ است.



شکل ۱۰- انطباق چهار ضلعی موتور ارتقاء یافته با توربوشارژر جی‌تی۴۰۸۲

در فرآیند انطباق این نکات رعایت می‌شود.

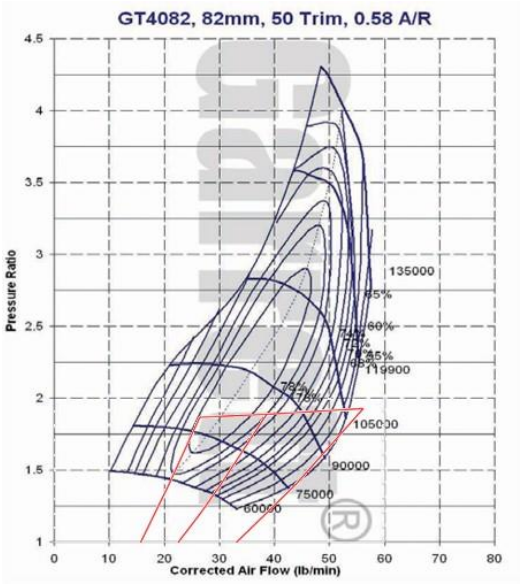
۱. چهار ضلعی عملکردی موتور در ناحیه‌ی پر بازده عملکردی کمپرسور قرار گیرد.

۲. این چهار ضلعی با فاصله مناسب از خط سرج کمپرسور قرار گیرد. این فاصله تحت عنوان حاشیه سرج تعریف میگردد که برای موتور با تعداد زیاد سیلندر، به میزان ده درصد حداقل نرخ جریان جرم است. برای موتور با تعداد کم سیلندر این فاصله به ۲۰ درصد می‌رسد[۱].

۳. این چهار ضلعی با فاصله از ناحیه‌ی خفگی کمپرسور قرار گیرد.

حاشیه سرج در این انطباق برابر ۳۷ درصد می‌باشد که نشان از تطابق خوب برای این ارتقاء می‌باشد. همچنین بدلیل اینکه توربین با توجه به کمپرسور قبلا توسط سازنده انتخاب شده است، مراحل تطابق برای آن نیازی نیست.

مطابق شکل ۱۰ لازم است آزمون‌های توربوشارژر به نواحی دبی بیشتر (سمت راست) و دور زیاد تر (سمت بالا) توسعه یابد. برای اطمینان از آن، نمودار ارائه شده توسط سازنده نیز در شکل ۱۱ بررسی می‌گردد.



شکل ۱۱- انطباق چهار ضلعی موتور ارتقاء یافته با منحنی سازنده توربوشارژر جی تی ۴۰۸۲

بنابراین توربوشارژر ۴۰۸۲ گرت برای شرایط ارتقاء یافته موتور او ام ۳۵۵ ای مناسب است.

۸- نتیجه گیری

در توربوشارژری کردن یک موتور دیزلی تنفس طبیعی با هدف افزایش توان موتور، سطوح متفاوتی از ارتقاء موتور می‌تواند هدف گذاری گردد. در موتورهای کوچک و متوسط معمولا سقف ۵۰ درصد افزایش توان منظور می‌شود تا تغییرات اساسی در سامانه‌های اصلی موتور ضرورت پیدا نکند و شرایط کار موتور نیز از لحاظ تنش‌های حرارتی و مکانیکی مناسب باشد. در این پژوهش، موتور توربوشارژری او ام ۳۵۵ ای ایدم مورد مطالعه قرار گرفت و امکان افزایش توان به میزان ۲۰ درصد نسبت به مقدار فعلی موتور بررسی شد. برای این منظور مدلسازی رفتار موتور با استفاده از نرم افزار ای وی ال انجام گرفت و پس از مراحل ارزیابی و تایید نتایج شبیه سازی، شرایط جدید عملکردی موتور پیشبینی گردید. سپس مطالعات آزمایشگاهی توربوشارژر جی تی ۴۰۸۲ برای ارتقاء عملکرد موتور انجام شد و پس از تهیه منحنی‌های مشخصات رفتاری کمپرسور، فرآیند تطابق موتور و کمپرسور توربوشارژر، نشان داد که این توربوشارژر می‌تواند انتخاب مناسبی برای ارتقاء عملکرد موتور مورد نظر باشد.

برخی از شرایط حدی موتور در وضعیت ارتقاء یافته در مقایسه با وضعیت فعلی عبارت اند از:

۱. فشار بیشینه درون سیلندر از ۸۴/۲۸ بار در حالت فعلی به ۹۹/۲۸ بار در حالت ارتقاء یافته می‌رسد.
۲. توان ترمزی در سرعت ۲۲۰۰ دور در دقیقه در بیشترین مقدار خود از حدود ۲۱۰ کیلووات در حالت توربوشارژری اولیه به مقدار ۲۴۵ کیلووات در حالت ارتقاء یافته می‌رسد.
۳. بیشینه فشار تقویت در موتور فعلی ۱/۶ بار و در حالت ارتقاء یافته به ۱/۹۲ بار می‌رسد.
۴. دمای ورودی به موتور به ۳۷۱ کلوین می‌رسد. کاهش این دما با افزودن خنک کن میانی به این مجموعه میسر می‌باشد. این کار ضمن کاهش تنش‌های حرارتی، افزایش توان و ارتقاء عملکرد بیشتر را ممکن می‌سازد.

۹- مراجع

[1] Watson, N., and M. S. Janota., “Turbocharging the Internal Combustion Engine”, Macmillan Education UK, London, 1982

[۲] فرزام. رضا، «مطالعات تئوری و تجربی افزایش توان و کاهش کوبش موتور بنزینی توربوچارجری از طریق کنترل دمای هوای ورودی موتور. »، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۸

[3] Cheong Jaehoon, Sunghwan Cho, and Changho Kim, “Effect of Variable Geometry Turbocharger on HSDI Diesel Engine” Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, Seoul, Korea, 2000

[4] Rajeevan Jinsha, M. H. Hans, Antonio Joseph, T. S. Kiran, and Gireesh Kumaran Thampi, “ Hybrid Turbocharged SI Engine with Cooled Exhaust Gas Recirculation for Improved Performance.” Procedia Technology, International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology 2016

[5] Plotnikov L., Kochev N. and. Osipov. L, “Integrated Modernization of the Gas-and-Air System of a Turbocharged Diesel Engine (21/21)”, In E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020

[6] “OM355A catalog” IDEM, ED , ed. Tabriz,Iran,1390

[7] “OM355 catalog” IDEM, ED , ed. Tabriz,Iran,1390