ISSN: 2476-6909; Modares. Mech. Eng. *;*(*):*-*

Modares Mechanical Engineering

DOI:
journal homepage: mme.modares.ac.ir

Development of an Offline Digital Twin Framework for Engine Preformance Prediction and Turbocharger Selection Under Altitude Conditions

Mehrdad Rasouli Moghadam, Saeid Kheradmand*, Mehrdad Bazaz zadeh

Department of Mechanical Engineering, Malek-e-Ashtar University of Technology, Isfahan, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Article History
Received: **** **, *
Revised: **** **, *
Accepted: *** **, *
ePublished: **** **, *

ABSTRACT

In this study, the performance of a turbocharged aerial reciprocating engine under altitude flight conditions was investigated through experimental data and numerical (0D and 1D) approaches in order to develop an unreal-time digital twin engine model in altitude condition for selection and/or identification of the right and/or proper turbocharger. So, the turbocharger selection process algorithm and the digital twin engine model were created based on available experimental data. After that, the data were gone under data cleaning process with regard to four main criteria, which included "boost pressure", "air-box temperature", "engine fuel consumption", and "engine power". Upon the clean data, the engine map and turbocharger map in aspects of engine performance were derived from sea level ambient conditions up to 23000 feet. Keeping following the algorithm, main engine operational points were determined based on "take-off engine performance" and "continuous engine performance" mission modes. The calculations were done on the dimensionless distance between the points and peak efficiency line (PLE), so that the turbochargers major candidate list was extracted. In continuous, the points were extended over different altitude conditions and the most proper turbocharger was determined from the list by "the unreal-time digital twin engine model" and "strategy of maximum matching between the points with a compressor map."

Keywords: Digital twin, Piston engine, Turbocharger, Engine map

How to cite this article
Rasouli Moghadam M, Kheradmand S, Bazaz zadeh M, Development of an Offline Digital Twin Framework for Engine Preformance Prediction and Turbocharger Selection Under Altitude Conditions. Modares Mechanical Engineering; *(*): ****-****.

*Corresponding author's email: Kheradmand@mut-es.ac.ir
*Corresponding ORCID ID: 0000-0001-6877-6487

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

Pre-Print Version

شاپا: ۷۹۰۹-۲۴۷۶؛ مهندسی مکانیک مدرس. **؛**(*):*_*

مهندسی مکانیک مدرس

DOI:

صفحه اصلی مجله: mme.modares.ac.ir



توسعه یک چارچوب دوقلوی دیجیتال آفلاین برای پیش بینی عملکرد موتور و انتخاب توربوشارژر در شرایط ارتفاع

مهرداد رسولی‌مقدم، سعید خردمند*، مهرداد بزاززاده

مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله
مقاله پژوهشی

تاریخچه مقاله
دریافت: **/**/****
بازنگری: **/**/****
پذیرش: **/**/****
ارائه آنلاین:
//****

چکیده

کار حاضر به منظور مطالعه عملکردی موتور رفت و برگشتی (سیلندر-پیستونی) هواپایه با استفاده از داده های تجربی موجود، مدلسازی یک بعدی موتور و مدلسازی صفربعدی توربوشارژر، با هدف توسعه دوقلوی دیجیتال موتور برای انتخاب توربوشارژر مناسب آن در شرایط محیطی ارتفاع (فشار و دما) انجام شد. بدین منظور ابتدا "الگوریتم فرآیند انتخاب توربوشارژر" تدوین و "مدل دوقلوی دیجیتال موتور" ارائه شد. سپس فرآیند پاکسازی داده‌های تجربی موتور بر اساس معیارهای چهارگانه "فشار بوست"، "دمای محفظه هوا"، "دبی مصرف سوخت" و "توان موتور" انجام شد و "نقشه سازگاری توربوشارژر با موتور" و "نقشه موتور" به ازای دور موتور و تراتل‌های مختلف موتور از شرایط محیطی سطح دریا تا ارتفاع ۲۳۰۰۰ پا استخراج گردید. در ادامه با تعیین نقاط کاری پایه متناظر با مدهای عملیاتی "برخاست" و "کارکرد مداوم" موتور بر اساس داده‌های تجربی و انجام محاسبات مربوط به فاصله بی‌بعد میان نقاط کاری و خط بازده حداکثر نقشه عملکردی کمپرسور، فهرست اصلی توربوشارژهای کاندید برای استفاده در موتور استخراج گردید. در انتها، با گسترش تعداد نقاط کاری موتور در ارتفاع‌های مختلف و انجام تحلیل‌های دقیق‌تر با استفاده از مدل دوقلوی دیجیتال موتور، مناسب‌ترین توربوشارژر موتور با رویکرد "حداکثر انطباق نقشه عملکردی کمپرسور با نقاط کاری موتور"، از میان فهرست اصلی توربوشارژهای کاندید انتخاب شد.

کلیدواژه‌ها: دوقلوی دیجیتال، موتور پیستونی، توربوشارژر، نقشه موتور

نحوه ارجاع به این مقاله

رسولی‌مقدم مهرداد، خردمند سعید، بزاززاده مهرداد، توسعه یک چارچوب دوقلوی دیجیتال آفلاین برای پیش بینی عملکرد موتور و انتخاب توربوشارژر در شرایط ارتفاع، مهندسی مکانیک مدرس. * (*): *****-*****.

*پست الکترونیکی نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Kheradmand@mut-es.ac.ir

*شناسه ارکید نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ۶۴۸۷-۶۸۷۷ – ۰۰۰۱ – ۰۰۰۰

Press, Pre-Proof Version

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

پرواز یک وسیله هوایی در ارتفاع های مختلف به نوع مأموریت آن بستگی دارد. با این وجود؛ صرفنظر از مأموریت، همواره دستیابی به ارتفاع‌های پروازی بالاتر به کارکرد موتور آن در شرایط ارتفاع ارتباط پیدا می کند. با افزایش ارتفاع از سطح دریا؛ فشار و چگالی هوای محیط کاهش می‌یابد که این امر سبب کاهش دبی جرمی هوای ورودی به موتور و به تبع آن، کاهش توان موتور می‌گردد. به عبارتی دیگر؛ بیشترین توان یک موتور تنفس طبیعی (بدون سوپرشارژر / توربوشارژر) معمولاً در شرایط عملکرد آن در سطح دریا محقق می‌شود و با افزایش ارتفاع، این توان تا یک ارتفاع مشخص ثابت مانده و سپس با افزایش بیشتر ارتفاع به طور پیوسته کاهش می‌یابد. به گونه ای که با افزایش بیش از حد ارتفاع؛ مثلث احتراق موتور به دلیل عدم تأمین هوای کافی فرو ریخته و موتور خاموش می‌گردد. بنابراین یک موتور تنفس طبیعی، فقط تا یک ارتفاع مشخص می‌تواند توان خود را حفظ کند. اگرچه روش‌های مختلفی مانند تزریق اکسیژن یا نیتروس اکساید (N_2O) در ورودی هوای موتور برای مقابله با افت توان موتور در شرایط ارتفاع پیشنهاد شده است، اما این روش‌ها به دلیل افزایش دمای محفظه احتراق موتور و به تبع آن نیاز به سیستم خنک‌کاری با راندمان بسیار بالا، برای موتورهای کلاس سبک مناسب نمی‌باشند [۱]. در چنین شرایطی؛ یکی از راهکارها برای جبران کاهش میزان هوای ورودی به موتور، استفاده از توربوشارژر می‌باشد. در این صورت؛ با توجه به ارتفاع پروازی مورد نیاز، فشار و چگالی هوای ورودی به موتور توسط توربوشارژر افزایش داده می‌شود تا دیگر افزایش ارتفاع، تأثیر قابل توجهی بر افت توان موتور نداشته باشد. به نظر می‌رسد که در موتورهای توربوشارژ شده لازم است تا نگاه دقیق‌تری به عملکرد موتور و توربوشارژر در شرایط ارتفاع بالا انجام شود. مقاله حاضر تلاشی در راستای این هدف با استفاده از شبیه سازی موتور و توربوشارژر در این شرایط است.

علویون و همکارانش به مطالعه تجربی انتقال حرارت ناپایای توربوشارژر موتور بنزینی با هدف بررسی توزیع دمای بدنه آن در آزمون رسوخ حرارتی پرداختند[۲]. رسوخ حرارتی مربوط به زمانی است که بعد از کارکرد در شرایط تمام بار، موتور به صورت ناگهانی خاموش شود. در چنین شرایطی حرارت موجود در محفظه توربین به سمت یاتاقان منتقل شده و منجر به افزایش دمای بدنه، یاتاقان‌ها، آب بندها و روغن شده و احتمال خرابی یاتاقان‌ها افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد که به محض خاموش شدن موتور، دمای محفظه یاتاقان ۶۰ درجه سانتیگراد افزایش یافته و بیشینه دمای محفظه یاتاقان در نزدیکی توربین به ۲۲۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. این در حالی است که با اضافه شدن پمپ آب برقی به عنوان سیستم خنک‌کاری توربوشارژر، میزان افزایش دمای محفظه یاتاقان از ۶۰ به ۱۰ درجه سانتیگراد می‌شود. شجاعی فرد و همکارانش به مطالعه عددی آیرودینامیکی و آیرو-آکوستیکی سه روتور توربین توربوشارژر با ضخامت مختلف و ورودی دوگانه، به منظور شناسایی توزیع مناسب ضخامت (تغییر ضخامت لبه ورودی و خروجی، نوک و پایه پره، ضخامت ماکزیمم و محل آن، شکل لبه انتهایی) پرداختند[۳]. وجود حلزونی دوگانه منجر به هم‌پوشانی کمتر پالس‌های شارژ ورودی به توربوشارژر و در نهایت استفاده بهینه از انرژی جنبشی گازهای خروجی از موتور می‌شود. نتایج نشان داد که انحنای سطحی در مقایسه با ضخامت پره و عدد ماخ، تأثیر بیشتری بر ضریب بار فشاری پره دارد. همچنین با افزایش ضخامت پره، راندمان توربین توربوشارژر کاهش می‌یابد. طباطبایی و همکارانش به مطالعه عددی (یک-بعدی و سه‌بعدی) توربین توربوشارژر یک موتور بنزینی ۱/۷ لیتری چهار سیلندر و شانزده سوپاپ، با هدف بررسی اثر جریان-های نوسانی ورودی به توربین بر عملکرد موتور پرداختند[۴]. نتایج نشان داد که اثرات جریان نوسانی که ناشی از طبیعت حرکت رفت و برگشتی پیستون می باشد، بسیار مهم و قابل حذف نمی‌باشد. اگرچه شبیه‌سازی یک‌بعدی روشی سریع و کم‌هزینه می‌باشد، اما اثرات سه‌بعدی جریان در آن لحاظ نشده و وابسته به منحنی مشخصه‌هایی است که توسط سازندگان توربوشارژر در جریان پایا استخراج شده‌اند. بنابراین برای دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر، بررسی جریان سه‌بعدی ناپایا شبیه جریان خروجی از موتور اجتناب ناپذیر است.

فاس و همکارانش به مطالعه اثر استفاده از توربوشارژر دو مرحله-ای در موتور رفت و برگشتی چهارزمانه هواپایه با هدف جبران افت فشار ناشی از افزایش ارتفاع پرداختند [۵]. نتایج نشان داد که چنین توربوشارژری می‌تواند عملکرد موتور را در ارتفاع‌های متوسط بهبود دهد. اما در ارتفاع‌های بالاتر، این توربوشارژر سبب افزایش دمای گازهای خروجی و مشکل تأخیر (Turbo lag) در موتور می‌شود که نیازمند کنترل دقیق توربوشارژر و بهینه‌سازی سیستم هوای ورودی به موتور می‌باشد. میرزالی و همکارانش به بررسی عددی و تجربی عملکرد موتور زمینی خاص مجهز به توربوشارژر در شرایط پروازی ارتفاع بالا پرداختند [۶]. نتایج نشان داد که توان موتور پایه در حالت بدون توربوشارژر، در ارتفاع ۱۸۰۰۰ پا به حدود نصف مقدار اولیه در سطح دریا کاهش می‌یابد. در حالی‌که با به کارگیری توربوشارژر، توان خروجی موتور تا ارتفاع ۳۰۰۰۰ پا تقریباً ثابت باقی مانده و پس از آن به دلیل محدودیت در دور توربوشارژر (حدکثر ۱۳۰۰۰۰ دور بر دقیقه)، دچار افت توان می-شود. منصوری و همکارانش با استفاده از آزمون‌های تجربی و مدلسازی عددی، به مطالعه اثر "دمای پایین"، "فشار جزئی اکسیژن" و "عملکرد توربوشارژر" بر "توان خروجی" و "مصرف سوخت ویژه" موتور هوایی در حین عملیات صعود آن تا ارتفاع ۳۰۰۰۰ پا پرداختند [۷]. نتایج نشان داد که توان موتور تا ارتفاع ۱۸۰۰۰ پا با دور نامی، علیرغم کاهش ۴۳ درصد چگالی هوا حدود

In Press, Pre-Proof Version

۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش ۳۴ درصد چگالی هوا از ارتفاع ۱۸۰۰۰ پا تا ارتفاع ۳۰۰۰۰ پا، توان ترمزی حدود ۴۰ درصد کاهش خواهد یافت که این امر به دلیل عدم توانایی توربوشارژر برای تأمین هوای مورد نیاز موتور در ارتفاع بالاتر از ۱۸۰۰۰ پا می‌باشد. به عبارتی دیگر؛ کمپرسور توربوشارژر در حدود ارتفاع ۱۸۰۰۰ پا با ناحیه خفگی خود می‌رسد. در چنین شرایطی؛ حتی با بستن کامل دریچه گازهای زائد (Waste gas)، هوای بیشتری به موتور تحویل داده نمی‌شود و دبی هوای ورودی به موتور با افزایش بیشتر ارتفاع به شدت کاهش می‌یابد. افت توان و پارامترهای عملکردی موتور دبه دلیل کاهش دبی جریان گازهای خروجی موتور به دلیل خفگی کمپرسور توربوشارژر می‌باشد. بنابراین باید با انتخاب توربوشارژر مناسب برای موتور (نسبت فشار بالاتر و نرخ جریان هوای اصلاح شده مطلوب)، پایداری توان موتور را در ارتفاعات بالاتر از ۱۸۰۰۰ پا افزایش داد. با افزایش ۴۰ درجه سانتیگراد دمای محیط نسبت به شرایط استاندارد ISA، توان در دور نامی موتور حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد که این امر لزوم توجه بیشتر به الزامات پرواز در روزهای گرم را نشان می‌دهد. علاوه بر این؛ تغییرات دمای محیط، تأثیر کمی بر مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور دارد. با افزایش ارتفاع و کاهش دمای محیط، دمای محفظه هوای موتور ابتدا افزایش و سپس در ارتفاع حدود ۱۹۰۰۰ پا کاهش و در ارتفاع ۳۰۰۰ پا تحت شرایط ISA-10 به حدود ۳۸ درجه سانتیگراد می‌رسد. کاربراتورهای موتور نیاز به توجه بیشتر برای جلوگیری از یخ زدگی آنها در ارتفاعات بالا را دارند. به دلیل محدودیت دمای ۸۸ درجه سانتیگراد در محفظه هوای موتور، در هنگام صعود موتور در روزهای گرم سال نیاز به یک خنک کن می‌باشد. در عملیات صعود، مناسب ترین دور موتور که به ازای آن حداکثر توان موتور در ارتفاعات مختلف، بهترین نرخ صعود و حداقل مصرف سوخت ویژه ترمزی موتور فراهم می‌شود، برابر با ۵۵۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد (نقطه بهینه عملکرد کمپرسور).

خداپرست و همکارانش با استفاده از شبیه سازی یک‌بعدی موتور زمینی، داده‌های تجربی موتور و روابط ترمودینامیکی، به ارائه روشی مقدماتی برای ایجاد بستر آزمون ترکیب و چیدمان دو توربوشارژر برای موتور با قابلیت حفظ توان ۹۰ درصد تا ارتفاع بیش از ۱۲/۲ کیلومتر پرداختند [۸]. نتایج نشان داد که میزان کاهش توان در ارتفاع می‌تواند با کنترل دقیق پارامترهای مؤثر موتور مانند نسبت سوخت به هوا، فشار و دمای مانیفولد هوا در تعامل با مدلسازی پیشرفته، به حداقل برسد. روئینی و همکارانش به توسعه و ارائه یک کد نرم افزاری به منظور معرفی بهترین و مناسب‌ترین سیستم پیشرانش شامل ترکیبی از یک موتور احتراق داخلی به همراه مجموعه توربوشارژرهای مناسب (یک تا سه عدد) به همراه تعداد خنک‌کننده‌های مورد نیاز تا ارتفاع ۳۰ کیلومتر پرداختند [۹]. استفاده از این کد، برای تحلیل و طراحی اولیه مجموعه پیشرانش مناسب به منظور کارکرد صحیح آن در طولانی‌ترین رژیم پروازی توصیه شده است. بنابراین در فازهای بعدی فرآیند طراحی باید با استفاده از نقشه‌های عملکردی مجموعه پیشرانش انتخاب شده، تحلیل دقیق‌تری برای سایر نقاط پروازی صورت پذیرد به گونه‌ای که تمامی نقاط کاری خارج از طرح، در محدوده‌های ناپایدار آیرودینامیکی توربوشارژرهای انتخاب شده نظیر محدوده‌های سرج و خفگی قرار نگیرند.

• تعریف دوقلوی دیجیتال آفلاین در این پژوهش

با توسعه فناوری دوقلوی دیجیتال، کاربرد این مفهوم از سامانه‌های پایش برخط فراتر رفته و در سال های اخیر، مدل های مبتنی بر شبیه سازی نیز به عنوان یکی از گونه های دوقلوی دیجیتال مورد توجه قرار گرفته اند. در این دسته از کاربردها، اگرچه مدل دیجیتال به صورت برخط با تجهیز واقعی تبادل داده ندارد، اما با استفاده از "داده های تجربی"، "مدل فیزیکی" و "شبیه سازی عددی" قادر است تا رفتار سامانه واقعی را در شرایط مختلف عملیاتی بازتولید کرده و به عنوان بستری برای تحلیل، ارزیابی و تصمیم گیری مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد در ادبیات پژوهشی با عناوینی نظیر Offline Digital Twin یا Simulation-based Digital Twin شناخته می شود.

در کاربردهای مهندسی، بسته به سطح تعامل با سیستم واقعی، دوقلوهای دیجیتال می‌توانند به صورت بلادرنگ، نیمه‌بلادرنگ یا مبتنی بر شبیه‌سازی توسعه یابند. در این مطالعه، به دلیل هدف انتخاب توربوشارژر در مرحله طراحی و عدم نیاز به پایش لحظه‌ای موتور، از یک دوقلوی دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی (آفلاین) استفاده شده است. با وجود مطالعات متعدد در زمینه عملکرد موتورهای توربوشارژشده در شرایط ارتفاع، یک چارچوب جامع برای انتخاب توربوشارژر موتورهای هواپایه که به طور همزمان داده‌های تجربی موتور، مدل یک‌بعدی موتور، مدل عملکردی توربوشارژر و شرایط محیطی ارتفاع را در نظر بگیرد، ارائه نشده است. در این تحقیق یک چارچوب بر مبنای دوقلوی دیجیتال مبتنی بر شبیه‌سازی (آفلاین) ارائه می‌شود که با استفاده از مدل فیزیکی موتور، مدل عملکردی توربوشارژر و داده‌های تجربی کالیبراسیون شده، نه تنها رفتار موتور را در شرایط مختلف محیطی پیش‌بینی می‌کند، بلکه امکان ارزیابی تعداد زیادی توربوشارژر بدون نیاز به آزمون‌های تجربی گسترده را فراهم می‌نماید. اگرچه این چارچوب فاقد ارتباط برخط و حلقه بازخورد خودکار با موتور واقعی است، اما امکان ارزیابی سریع عملکرد موتور و انتخاب توربوشارژر در شرایط مختلف را بدون انجام آزمون‌های تجربی متعدد فراهم می‌نماید.

• مزیت روش پیشنهادی در این پژوهش

روش پیشنهادی با بهره گیری از یک دوقلوی دیجیتال آفلاین مبتنی بر مدل یک بعدی موتور، داده های تجربی موتور و نقشه‌های عملکردی توربوشارژر، امکان ارزیابی نظام مند گزینه های

In Press, Pre-Proof Version

مختلف توربوشارژر را پیش از انجام آزمون های پرهزینه تجربی فراهم می کند. بر خلاف رویکردهای متداول که عمدتاً بر آزمون و خطا، تجربه طراح یا بررسی تعداد محدودی از گزینه ها متکی هستند، چارچوب ارائه شده قابلیت غربالگری سریع تعداد زیادی از توربوشارژرها را بر اساس معیارهای عملکردی شامل دبی جرمی، نسبت فشار، نواحی مجاز عملکرد کمپرسور و شاخص نزدیکی به PEL فراهم می کند. همچنین استفاده از مدل کالیبره شده با داده های تجربی، این امکان را ایجاد می کند که عملکرد گزینه های مختلف توربوشارژر در شرایط مختلف ارتفاع و دمای محیط بدون نیاز به انجام آزمون های واقعی ارزیابی شود. از این رو؛ روش پیشنهادی می تواند ضمن کاهش زمان و هزینه فرآیند انتخاب توربوشارژر، به عنوان ابزاری کارآمد در مراحل اولیه طراحی، توسعه و بهینه سازی موتور هواپایه، مورد استفاده قرار گیرد. بدیهی است توسعه این چارچوب به یک دوقلوی دیجیتال بلادرنگ از طریق اتصال برخط به داده های موتور، می تواند موضوع تحقیقات آینده باشد. لازم به ذکر است که ابزارهای انتخاب آنلاین توربوشارژر برای موتور که توسط شرکت‌های سازنده توربوشارژر ارائه می‌شوند (روش سنتی انتخاب)، معمولاً برای کاربردهای زمینی و فقط بر مبنای مفاهیم تصحیح شده (Corrected) بوده و سازگاری میان "موتور"، "توربوشارژر" و "شرایط محیطی" (ارتفاع) را در نظر نمی‌گیرند.

• رویکرد پیاده سازی روش پیشنهادی در این پژوهش

در پژوهش حاضر؛ مدل توسعه یافته از یک مدل یک بعدی موتور در محیط نرم افزاری، داده های تجربی استخراج شده از موتور، مدل عملکرد توربوشارژر و شرایط محیط استاندارد (ISA) تشکیل شده است. ابتدا داده های تجربی موتور پس از پاکسازی و تحلیل، برای استخراج مشخصه های عملکردی و تعریف سناریوهای کارکردی مورد استفاده قرار می گیرند. سپس مدل یک بعدی موتور برای پیش بینی رفتار موتور در شرایط مختلف ارتفاع و دور موتور، بر مبنای این داده های تجربی توسعه داده شد. در ادامه، این مدل توسعه یافته امکان ارزیابی عملکرد توربوشارژر–های مختلف و بررسی میزان انطباق نقاط کاری موتور با نقشه عملکردی کمپرسور توربوشارژر را فراهم نمود.

از آنجا که مدل ارائه شده در این پژوهش، در مرحله بهره برداری به صورت برخط با موتور واقعی تبادل داده ندارد و بروزرسانی وضعیت آن به صورت مستمر انجام نمی شود، از اصطلاح دوقلوی دیجیتال آفلاین (Offline Digital Twin) استفاده شده است. هدف اصلی این دوقلوی دیجیتال، بازتولید رفتار موتور در شرایط مختلف محیطی و عملیاتی، کاهش نیاز به آزمون های تجربی پرهزینه و فراهم کردن بستری برای انتخاب توربوشارژر مناسب در مرحله طراحی و توسعه موتور می باشد. بر این اساس؛ فرآیند ارائه شده در این مقاله را می توان به عنوان یک چارچوب دوقلوی دیجیتال آفلاین برای پشتیبانی از تصمیم گیری های مهندسی در انتخاب توربوشارژر معرفی کرد که در آن داده های تجربی، مدل فیزیکی و شبیه سازی عددی به صورت یکپارچه مورد استفاده قرار گرفته اند.

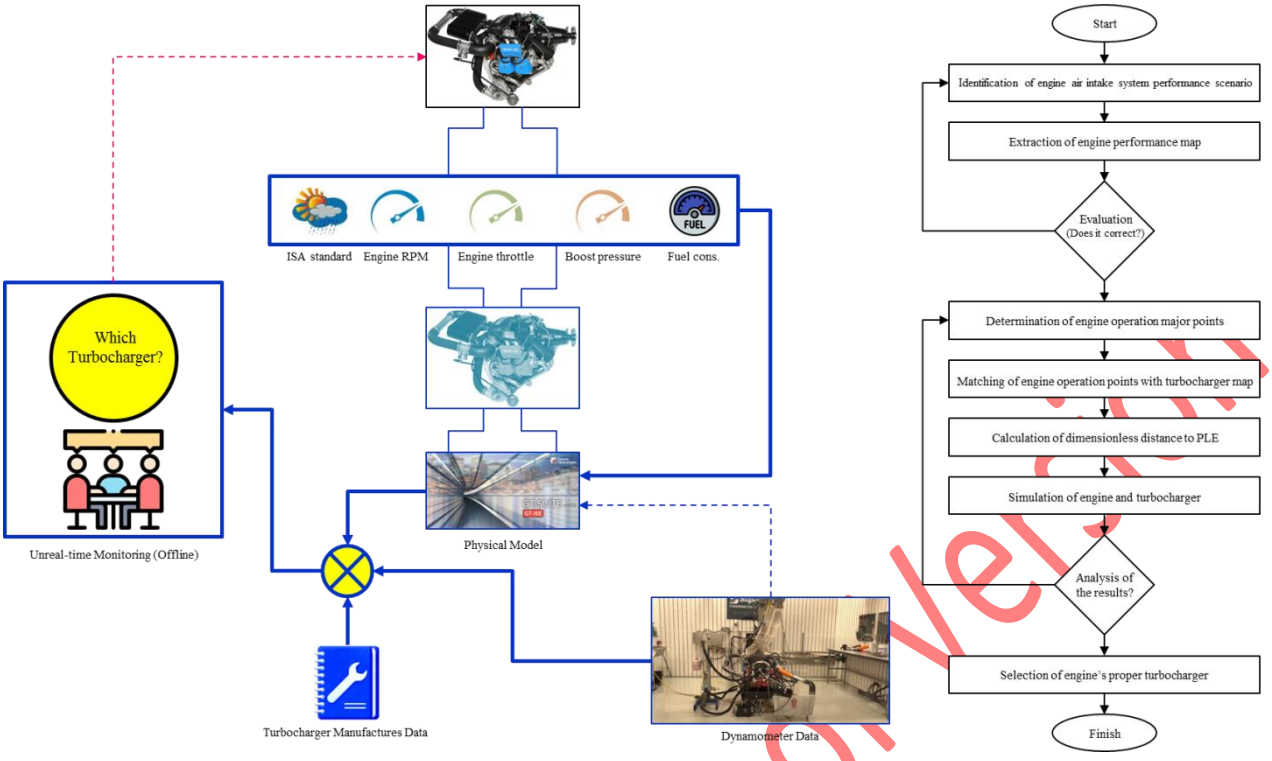
در کار حاضر؛ فرآیند انتخاب توربوشارژر موتور هوایی بر مبنای "داده‌های تجربی موتور" و "توسعه دقلوی دیجیتال موتور در شرایط پروازی (ارتفاع)" بر اساس الگوریتم شکل ۱ که بر روی یک موتور مشخص پیاده‌سازی شده است، انجام شد. توضیح اینکه در فرآیندهای طراحی و توسعه موتور می‌توان با استفاده از این "الگوریتم" و "مدل دوقلوی دیجیتال" و صرفاً با تغییر توربوشارژر موتور، داده‌های مختلفی از آن در شرایط کارکردی، عملکردی و محیطی مختلف متناسب با مشخصه‌های توربوشارژر تولید و بهترین توربوشارژر را انتخاب نمود.

۲- مدلسازی موتور و توربوشارژر (معادلات حاکم و داده‌های تجربی)

موتور هوایی مورد مطالعه (موتور ۱)، یک موتور چهار سیلندر – چهار زمانه بنزینی با پیکربندی تخت می‌باشد که نسخه ارتقاء یافته و بروزرسانی شده موتور هواپایه ۲ می‌باشد (جدول ۱، شکل ۲). در شکل ۲؛ عملکرد پیوسته موتورهای ۱ و ۲ به ازای ارتفاع‌های مختلف از سطح دریا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ میزان افت توان موتور ۲ تا ارتفاع‌های ۱۵۰۰۰ پا و ۲۳۰۰۰ پا نسبت به سطح دریا، به ترتیب برابر با ۷ درصد و ۴۶ درصد می‌باشد. این در حالی است که میزان افت توان در شرایط مشابه برای موتور ۱، به ترتیب ۰/۲ درصد و ۱۵ درصد می‌باشد.

بنابراین همانطور که ملاحضه می‌شود؛ علیرغم شباهت زیرسیستم‌های اصلی موتورهای ۱ و ۲، توربوشارژرهای مورد استفاده در آنها، تفاوت نسبتاً زیادی را در توان تولیدی برای ارتفاع‌های مختلف پروازی ایجاد می‌کنند. از این رو؛ شناسایی مشخصه‌های عملکردی و سازگاری توربوشارژر سیستم هوای ورودی به موتور ۱ (شکل ۳) مهم و ضروری می‌باشد که این امر با استفاده از مدلسازی و شبیه‌سازی یک بعدی موتور و مدلسازی و شبیه‌سازی صفر بعدی توربوشارژر انجام می‌شود.

In Press, Pre-Proof Version



(ب) (الف)

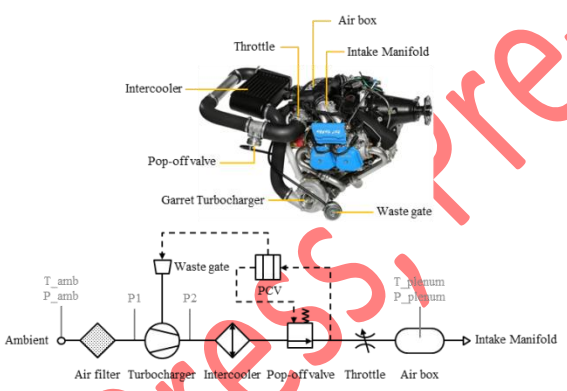
شکل ۱ فرآیند انتخاب توربوشارژر موتور بر مبنای داده‌های تجربی و مدل دوقلوی دیجیتال آفلاین موتور در شرایط پرواز (ارتفاع)، شکل الف) الگوریتم فرآیند انتخاب، شکل ب) بلوک- دیاگرام دوقلوی دیجیتال Unreal-time موتور برای انتخاب / شناسایی توربوشارژر

Fig.1 Engine turbocharger selection process based on experimental data and offline digital twin model in flight (altitude) condition

جدول ۱ مشخصات عمومی موتور

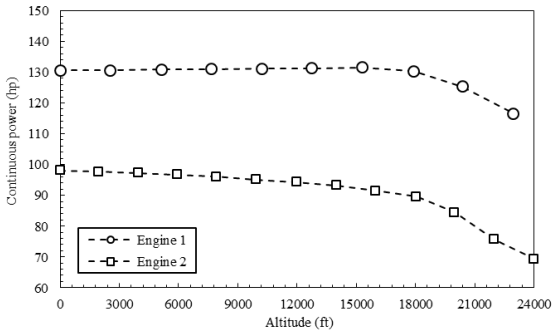
Table 1. General specifications of the engines

Engine Parameters	Engine 1 [10]	Engine 2 [7]
Bore	84 mm	79.5 mm
Stroke	61 mm	61 mm
Displacement	1352 cm³	1200 cm³
Compression ratio	8.2 : 1	9 : 1
Take-off performance at sea level	141 hp @ 5800 rpm	115 hp @ 5800 rpm
Continuous performance at sea level	131 hp @ 5500 rpm	99 hp @ 5500 rpm
Base engine with gearbox	74.23 kg	71.5 kg



شکل ۳ سیستم هوای ورودی به موتور

Fig.3 Engine air intake system



شکل ۲ نمودار تغییرات توان موتور نسبت به ارتفاع

Fig.2 Power vs. Altitude @ ISA

- انتقال حرارت و انتقال موتور

برای مدلسازی مشخصه‌های انتقال حرارت و احتراق موتور به ترتیب از مدل Woschni و تابع Wiebe (معادله ۱) استفاده شده است[۷-۱۱].

$$Combustion(\theta) = (CE)\left[1 - e^{-(WC)(\theta - SOC)^{(E+1)}}\right] \quad (۱)$$

که در آن؛ θ زاویه میل لنگ، E توان نمایی Wiebe که به صورت پیش‌فرض برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود، CE راندمان احتراق، WC ثابت Wiebe و SOC زاویه آغاز احتراق می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شوند[۷].

$$WC = \left[\frac{D}{BEC^{1/(E+1)} - BSC^{1/(E+1)}}\right]^{-(E+1)} \quad (۲)$$

In Press, Pre-Proof Version

$$SOC = AA - \frac{BMC^{1/(E+1)}D}{BEC^{1/(E+1)} - BSC^{1/(E+1)}} \quad (۳)$$

که؛

$$BMS = -\ln(1 - BM) \quad (۴)$$

$$BSC = -\ln(1 - BS) \quad (۵)$$

$$BEC = -\ln(1 - BE) \quad (۶)$$

که D طول احتراق، BSC ثابت آغاز احتراق، BEC ثابت پایان احتراق، AA زاویه میل لنگ، BMC نقطه میانی احتراق، BM درصد سوخت محترق شده در یک زاویه مشخص، BS درصد سوخت محترق شده در آغاز احتراق، BE درصد سوخت محترق شده در پایان احتراق می‌باشد.

• اصطکاک موتور

همچنین؛ اصطکاک موتور به صورت زیر تعریف می‌شود[۷].

$$FMEP = C + (PF * P_{max}) + (MPSF * Speed_{mp}) + (MPSSF * Speed_{mp}^2) \quad (۷)$$

که $FMEP$ فشار مؤثر میانگین اصطکاکی، C بخش ثابت $FMEP$، PF ضریب بیشترین فشار سیلندر، P_{max} بیشتر فشار داخلی سیلندر، $MPSF$ ضریب سرعت متوسط پیستون و $Speed_{mp}$ سرعت متوسط پیستون می‌باشد.

• دبی هوای موتور

توان موتور به طور تقریبی متناسب با مقدار جریان هوای ورودی به آن می‌باشد و می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود[۱۰].

$$Observed\ power \approx -6.3264 + 0.0169 * Airflow \quad (۸)$$

که $Observed\ power$ توان اندازه‌گیری شده موتور بر روی استند تست موتور بر حسب کیلووات و $Airflow$ دبی جرمی هوای مورد نیاز بر حسب گرم بر دقیقه در محدوده دور موتور ۳۰۰۰ الی ۵۸۰۰ دور بر دقیقه می باشد.

• توربوشارژر موتور

نحوه عملکرد "کمپرسور" و" توربین" توربوشارژ با استفاده از نقشه عملکردی آنها که شامل پارامترهای اساسی "دبی جرمی"، "نسبت فشار کمپرسور"، "نسبت فشار توربین"، "راندمان توربین"،" راندمان کمپرسور" و "سرعت چرخش توربوشارژر" می باشد، تعریف و مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که نقشه عملکردی کمپرسور از اهمیت بسیار بیشتری نسبت به نقشه عملکردی توربین برخوردار می‌باشد (شکل ۴). به عبارتی دیگر در دورهای کاری مختلف توربوشارژر؛ کمپرسور عملکرد متفاوتی از خود نشان می‌دهد، در صورتی‌که منحنی‌های عملکردی توربین به ازای دورهای مختلف، تقریباً بر روی یک خط قرار می‌گیرند.

• دبی جرمی و سرعت چرخش تصحیح شده

به منظور از بین بردن وابستگی پارامترهای دبی جرمی و سرعت چرخش کمپرسور / توربین به دما و فشار جریان بالادست ورودی به آنها، از پارامترهای تصحیح شده استفاده می‌شود [۱۲, ۱۳].

$$N_{Corrected} = \frac{N_{Actual}}{\sqrt{T/T_{ref}}} \quad (۹)$$

$$\dot{m}_{Corrected} = \frac{\dot{m}_{Actual}\sqrt{T/T_{ref}}}{(P/P_{ref})} \quad (۱۰)$$

که $N_{Corrected}$ سرعت چرخش اصلاح شده توربوشارژر، N_{Actual} سرعت چرخش واقعی توربوشارژر، T دمای واقعی جریان ورودی به توربوشارژر، P فشار واقعی جریان ورودی به توربوشارژر، T_{ref} و P_{ref} به ترتیب دما و فشار مرجع می‌باشد.

• مدلسازی کمپرسور توربوشارژر

عملکرد کمپرسور بر مبنای نقشه عملکردی ارائه شده توسط سازنده توربوشارژر مدلسازی می شود [۱۴]. برای هر نقطه کاری، دبی جرمی و سرعت دورانی تصحیح شده (معادله ۹ و ۱۰) محاسبه می شود و راندمان آیزنتروپیک کمپرسور از طریق درون یابی دو بعدی از نقشه عملکردی کمپرسور استخراج می شود. توان مصرفی کمپرسور به صورت زیر محاسبه می شود [۱۲, ۱۳]:

$$\dot{W}_C = \dot{m}_C C_{p,c} T_{c,in} \left[\left(\frac{P_{c,out}}{P_{c,in}}\right)^{\gamma-1/\gamma} - 1\right] \Big/ \eta_c \quad (۱۱)$$

که $\dot{W}_C$ توان مصرفی کمپرسور، $\dot{m}_C$ دبی جرمی هوای عبوری از کمپرسور، $C_{p,c}$ ضریب گرمای ویژه هوای ورودی به کمپرسور، $T_{c,in}$ دمای هوای ورودی به کمپرسور، γ نسبت گرمای ویژه، η_c راندمان آیزنتروپیک کمپرسور، $P_{c,in}$ و $P_{c,out}$ به ترتیب فشار هوای ورودی و خروجی کمپرسور می باشد.

• مدلسازی توربین توربوشارژر

عملکرد توربین نیز بر مبنای نقشه عملکردی ارائه شده توسط سازنده توربوشارژر مدلسازی می شود[۱۴]. توان تولیدی توربین به صورت زیر محاسبه می شود [۱۲, ۱۳]:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_t C_{p,t} T_{t,in} \eta_t \left[1 - \left(\frac{P_{t,out}}{P_{t,in}}\right)^{\gamma-1/\gamma}\right] \quad (۱۲)$$

که $\dot{W}_t$ توان تولیدی توربین، $\dot{m}_t$ دبی جرمی گاز خروجی از توربین، $C_{p,t}$ ضریب گرمای ویژه گاز خروجی، $T_{t,in}$ دمای گاز ورودی به توربین، γ نسبت گرمای ویژه، η_t راندمان آیزنتروپیک توربین، $P_{t,in}$ و $P_{t,out}$ به ترتیب فشار گاز ورودی و خروجی توربین می‌باشد.

• موازنه توان شفت توربوشارژر و کوپل شدن کمپرسور و توربین

در حالت پایا، توان تولیدی توربین با مجموع توان مصرفی کمپرسور و تلفات مکانیکی شفت برابر است [۱۳].

$$\dot{W}_t \eta_{mech} = \dot{W}_c + \dot{W}_{loss} \quad (۱۳)$$

که η_{mech} راندمان مکانیکی شفت و $\dot{W}_{loss}$ تلفات مکانیکی شفت (اصطکاک یاتاقان ها) می باشد. این موازنه توان، سرعت چرخش توربوشارژر $(N_{T.C})$ را با استفاده از روش تکرار تعیین می کند.

$$N_{T.C} = f(\dot{W}_t, \dot{W}_c, \eta_{mech}) \quad (۱۴)$$

بدین ترتیب؛ سرعت توربوشارژر به عنوان یک متغیر وابسته و از حل همزمان معادلات توان مصرفی کمپرسور، توان تولیدی توربین و موازنه توان محاسبه می شود. توضیح اینکه کوپل شدن "کمپرسور" و "توربین" از طریق "موازنه توان شفت" و "همزمانی سرعت دورانی" انجام می شود. بدین صورت که در هر گام زمانی

In Press, Pre-Proof Version

مشخص، مدل کمپرسور، دبی و نسبت فشار مورد نیاز موتور را تعیین می کند. سپس مدل توربین با استفاده از دبی و دمای گازهای خروجی از موتور، توان تولیدی را محاسبه می کند و در نهایت با برقراری موازنه توانه (معادله ۱۳)، سرعت دورانی توربوشارژر بروزرسانی می شود. این فرآیند به صورت تکراری تا همگرایی کامل ادامه می یابد.

• مدلسازی Wastegate

عملکرد Wastegate به صورت یک دریچه کنترلی (Control valve) مدلسازی می شود که با بازشدن تدریجی، بخشی از گازهای خروجی موتور را به طور مستقیم به منیفولد دود تخلیه می کند. در این پژوهش، از یک کنترل کننده (Bypass) استفاده شده است که به صورت حلقه کنترل بسته (Closed-loop control) در محیط نرم افزار عمل می کند[۱۲]. منطق فرآیند کنترل بدین صورت است که فشار بوست هدف (Boost pressure target) به عنوان تابعی از توان مورد نیاز موتور در شرایط ارتفاع و دمای محیط تعریف می شود. هنگامی که فشار بوست واقعی به مقدار هدف می رسد، کنترل کننده سیگنال بازشدن Wastegate را صادر می کند تا از افزایش بیش از حد فشار بوست و توان موتور جلوگیری کند (المان PVC در مدل یک بعدی موتور – شکل ۵). دبی جرمی عبوری از Wastegate به صورت زیر محاسبه می شود [۱۳]:

$$\dot{m}_{WG} = C_d A_{WG} \frac{P_{t,in}}{\sqrt{RT_{in}}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}\left[\left(\frac{P_{out}}{P_{t,in}}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P_{out}}{P_{t,in}}\right)^{(\gamma+1)/\gamma}\right]} \quad (۱۵)$$

که $\dot{m}_{WG}$ دبی جرمی عبوری، C_d ضریب تخلیه، A_{WG} سطح مؤثر و P_{out} فشار خروجی می باشد.

• نسبت فشار سیستم هوای ورودی موتور

در کاربردهای هوایی، توربوشارژر با هدف ثابت نگه داشتن فشار محفظه هوای ورودی به موتور در شرایط ارتفاع برابر با فشار هوای محیط در سطح دریا به طوری که موتور افت فشار ناشی از ارتفاع را احساس نکند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین نسبت فشار مورد نیاز که باید توسط کمپرسور توربوشارژر سیستم هوای ورودی به موتور با در نظر گرفتن اثرات افت فشار ناشی از افزایش ارتفاع و همچنین افت فشار ناشی از المان‌های سیستم هوارسانی به موتور شامل فیلتر هوا، خنک کن میانی، شیر Pop-off ، تراتل (دریچه گاز)، کانال هوا، خم‌ها تأمین شود، برابر است با:

$$PR = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{SL}}{P_{Alt.}} \quad (۱۶)$$

که PR نسبت فشار، P_{SL} فشار در سطح دریا، $P_{Alt.}$ فشار در ارتفاع، P_1 و P_2 به ترتیب فشار در بالادست و پایین دست توربوشارژر می‌باشد. با توجه به شکل ۲، برای نسبت فشار سیستم هوای ورودی به موتور می‌توان نوشت :

$$PR = \frac{P_{plenum}}{P_{amb}} \quad (۱۷)$$

که P_{plenum} فشار محفظه هوای موتور و P_{amb} فشار محیط می‌باشد.

• فشار بوست

$$P_{Boost} = MAP - P_{Ambient} \quad (۱۸)$$

که MAP و P_{Boost} به ترتیب فشار مطلق محفظه هوا و فشار بوست می‌باشد. به منظور در نظر گرفتن اثرات "نویز سنسور"، "آفست‌های کالیبراسیون" و "تلفات جزئی ورودی"، "فشار بوست" متناظر با عملکرد مؤثر توربوشارژر را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت.

$$P_{Boost} > P_{loss\ \&\ noise} \quad (۱۹)$$

$P_{loss\ \&\ noise}$ معمولاً در محدوده ۰/۰۲ الی ۰/۰۵ بار می‌باشد. در این پژوهش، مقدار آستانه ۰/۰۲ بار به عنوان معیار حذف داده ها در نظر گرفته شد.

• فاصله بی‌بعد

برای انتخاب توربوشارژر مناسب، نقطه عملکرد موتور باید در مکان مناسبی از نقشه عملکردی کمپرسور قرار داشته باشد. بدین منظور لازم است تا خطی با نام "خط بازده حداکثر (PEL)" معرفی شود (شکل ۴). این خط بیانگر حداکثر بازده کمپرسور در یک دور مشخص می‌باشد. با این تعریف؛ توربوشارژی به عنوان "توربوشارژر مناسب" برای استفاده در موتور انتخاب می‌گردد که نقطه کاری معادل موتور بر روی نقشه عملکردی کمپرسور، در نزدیکترین فاصله نسبت به خط بازده حداکثر قرار داشته باشد. اما از آنجایی که محدوده انتخاب دبی جرمی در توربوشارژهای مختلف بسیار گسترده می‌باشد، این فاصله باید بی‌بعد شود تا امکان مقایسه بهتر میان توربوشارژرها فراهم گردد. فاصله بی‌بعد "نقطه کاری موتور" تا "خط بازده حداکثر" را می توان سه شیوه مختلف تعریف نمود که عبارتند از:

$$\frac{A}{B} = \frac{|\dot{m}_c - \dot{m}_{PEL}|}{\dot{m}_c} \quad (۲۰)$$

که $\dot{m}_c$ و $\dot{m}_{PEL}$ به ترتیب دبی تصحیح شده متناظر با "نقطه کاری موتور" و "خط حداکثر بازده" می‌باشد [۹].

$$\frac{C}{E} = \frac{|PR_c - PR_{PEL}|}{PR_c} \quad (۲۱)$$

که PR_c و PR_{PEL} به ترتیب نسبت فشار متناظر با "نقطه کاری موتور" و "خط حداکثر بازده" می‌باشد.

$$D = \sqrt{\left(\frac{\dot{m}_c - \dot{m}_{PEL}}{\Delta\dot{m}_{c,ref}}\right)^2 + \left(\frac{PR_c - PR_{PEL}}{\Delta PR_{ref}}\right)^2} \quad (۲۲)$$

که $\Delta\dot{m}_{c,ref}$ و $\Delta PR_{c,ref}$ به ترتیب مقیاس مرجع برای بی بعدسازی دبی جرمی و نسبت فشار هستند و به صورت زیر تعریف می شوند.

$$\Delta\dot{m}_{c,ref} = \dot{m}_{c_{max}} - \dot{m}_{c_{min}} \quad (۲۳)$$

$$\Delta PR_{ref} = PR_{max} - PR_{min} \quad (۲۴)$$

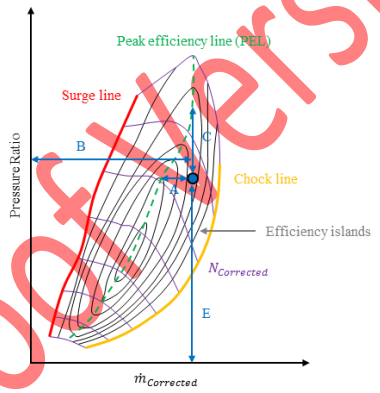
مقیاس های مرجع بر اساس دامنه متناظر پارامترها در نقشه کمپرسور تعیین می شود. لازم به ذکر است که فاصله بی بعد D در هر دو راستای دبی جرمی تصحیح شده و نسبت فشار در نظر

In Press, Pre-Proof Version

گرفته می شود و با ماهیت دوبعدی نقشه کمپرسور سازگارتر می-باشد.

بنابراین هر توربوشارژی که دارای فاصله بی‌بعد کوچکتری نسبت به "خط حداکثر بازده" می‌باشد، به عنوان کاندید "توربوشارژر مناسب برای انتخاب" در نظر گرفته می‌شود. این انتخاب باید در کلیه ارتفاع‌های و دور موتورهای مهم، بهترین عملکرد را ارائه دهد.

توجه به این نکته ضروری است که شاخص های معرفی شده، صرفاً فاصله هندسی نقاط کاری موتور از خط PEL نمی باشد. بلکه یک معیار تصمیم گیری برای غربالگری اولیه توربوشارژرها است و تصمیم گیری نهایی بر اساس مجموعه ای از شاخص ها شامل موقعیت نقاط کاری روی نقشه کمپرسور، بررسی توزیع نقاط نسبت به ناحیه بیشینه راندمان کمپرسور و تحلیل های مهندسی انجام می شود.



شکل ۴ فاصله بی بعد از خط بازده حداکثر [۹, ۱۴]

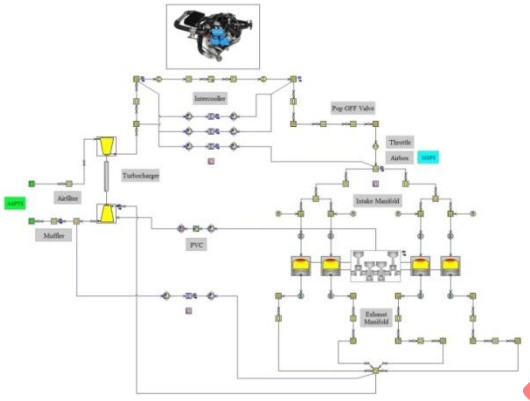
Fig.4 Dimensionless distance from peak efficiency line [9, 14]

- مدل یک‌بعدی موتور

مدل یک‌بعدی موتور در شکل ۵ نشان داده شده است. از این مدل یک‌بعدی، برای انجام مطالعات "سازگاری توربو شارژر با موتور" و انتخاب توربوشارژر مناسب موتور استفاده می‌شود.

- داده‌های تجربی موتور

فرآیند انجام آزمایشات تجربی موتور مطابق با شرایط کارکردی و عملکردی جدول ۲ انجام شده است.



شکل ۵ مدل یک‌بعدی موتور

Fig.5 The one-dimensional model of engine

جدول ۲ پارامترهای اندازه گیری آزمون تجربی موتور [۱۰]

Table 2 Engine experimental measured parameters[10]

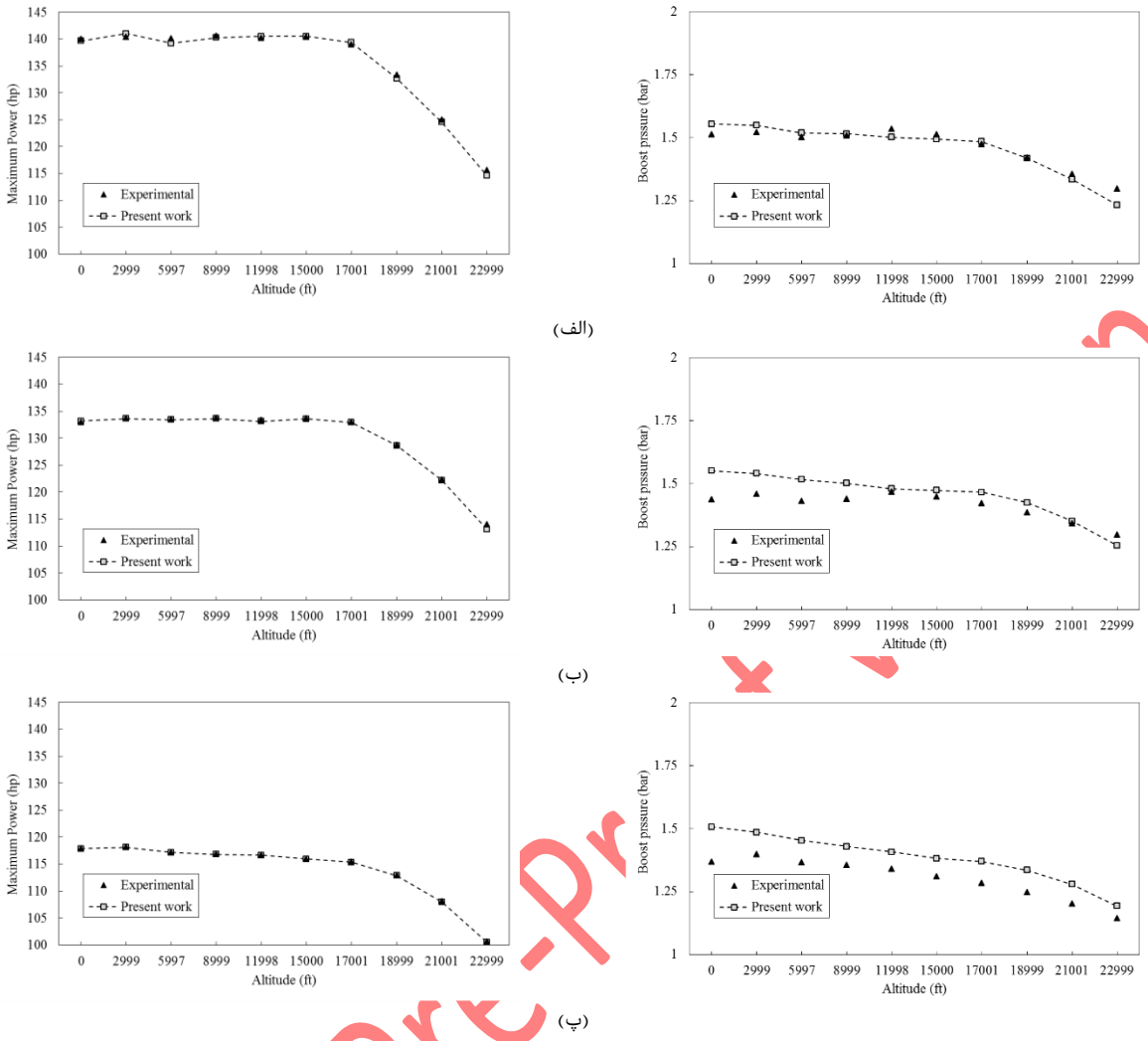
	Measured Parameters	Value Range
Inlet	Altitude	From sea level up to 22999 feet
	Ambient Pressure and Temperature	International standard atmosphere (Fig. 6)
	Engine speed (rpm)	3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 5800
	Engine Throttle	%97.4, %98.8, %99.4, %100
Outlet	Engine power Fuel flow T_plenum (Fig. 3) P_plenum (Fig. 3)	More than 2000 experimental data set

۳- تصدیق و صحه گذاری

فرآیند تصدیق و صحه گذاری مدل ارائه شده در شکل ۵ بر اساس داده های تجربی موتور برای دور موتورهای۵۸۰۰ دور بر دقیقه، ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و در شرایط تراتل ۱۰۰٪ و دمای بحرانی محیط (دما در ارتفاع صفر برابر با ۳۰ درجه سانتیگراد) انجام شد (شکل ۶). توضیح اینکه دور موتورهای کمتر از ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و تراتل های کمتر از ۱۰۰٪ در محدوده مأموریت پروازی موتور قرار نمی گیرند.

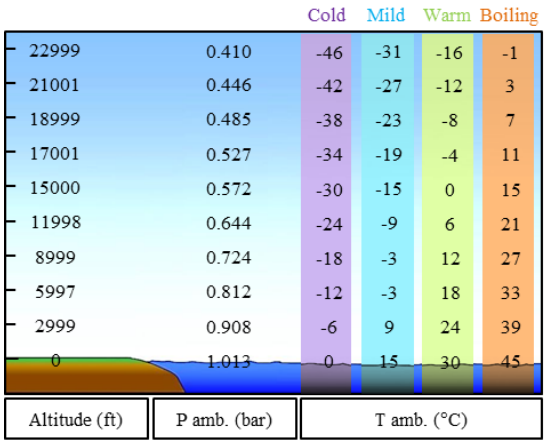
همچنین لازم به ذکر است که مدل ارائه شده در این پژوهش از نوع "مدل‌های فیزیک محور" (Physics-based) مبتنی بر نرم افزار و نه "مدل‌های داده محور" (Data –driven) می باشد. در این نوع مدل‌ها، داده های تجربی برای "آموزش" یا "کالیبراسیون" ضرایب مدل به کار نمی روند، بلکه صرفاً برای "تعیین شرایط مرزی" و "اعتبارسنجی مستقل" مدل استفاده می شوند. بنابراین، مفهوم تفکیک داده های Calibration / Validation به شکلی که در مدل-های یادگیری ماشین مرسوم است، در اینجا مصداق ندارد.

In Press, Pre-Proof Version



شکل ۶ اعتبار سنجی مدل یک بعدی موتور، الف) ۵۸۰۰ دور بر دقیقه، ب) ۵۵۰۰ دور بر دقیقه، پ) ۵۰۰۰ دور بر دقیقه

Fig.6 Validation of the one-dimensional engine model



شکل ۷ تعریف نقاط کارکردی موتور

Fig.7 Definition of the engine operation points

نتایج نشان می دهد که میانگین درصد قدر مطلق خطا (MAPE) بیشترین توان و فشار بوست مدل دوقلوی دیجیتال آفلاین موتور در دور موتورهای ۵۸۰۰، ۵۵۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و در شرایط تراتل ۱۰۰٪ و دمای بحرانی ۳۰ درجه سانتیگراد در ارتفاع صفر (سطح دریا)، به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۱۵، ۰/۰۳ درصد و ۱/۷۱، ۳/۷۵، ۶/۴۶ درصد نسبت به داده های تجربی می باشد.

۴- نتایج

۴-۱- سناریوی عملکرد سیستم هوارسانی موتور

برای شناسایی سناریوهای عملکرد سیستم هوارسانی موتور (توربوشارژر) در تعامل با پارامترهای عملکردی موتور و شرایط محیطی آن (شکل ۷)، از داده‌های تجربی موتور استفاده شد (جدول ۲). در این فرآیند؛ به منظور "پاک‌سازی داده‌ها" با هدف تشخیص اینکه "چه زمانی توربوشارژر در سیستم هوای ورودی موتور به طور مؤثر وارد عمل می‌شود؟ (تقویت فشار)"، به شناسایی اثر اصلی کارکرد توربوشارژر بر "دما" و "فشار" محفظه هوای موتور و همچنین اثرات متقابل توربوشارژ بر "مصرف سوخت" و "توان موتور" پرداخته شد.

- تعیین معیارهای پاک سازی داده‌های تجربی موتور

معیارهای پاک‌سازی داده های تجربی موتور به چهار دسته اصلی به شرح زیر تقسیم بندی می‌شود.

In Press, Pre-Proof

(۱) "فشار بوست"

توربوشارژر با فشرده کردن هوای ورودی به موتور، فشار مطلق "محفظه هوا" را به مقادیر بالاتر از فشار محیط افزایش می‌دهد. بنابراین هنگامی که فشار محفظه هوا از فشار محیط اطراف آن بیشتر می‌شود، نشان دهنده "تقویت مثبت" فشار هوا در نتیجه کارکرد مؤثر توربوشارژر موتور می‌باشد. لازم به ذکر است که فشار محفظه هوای موتور در حالت تنفس طبیعی، به دلیل محدودیت-های دریچه گاز (تلفات ورودی)، همواره در شرایط ایده‌آل می‌تواند در مقادیر فشار نزدیک‌تر اما پایین تر از فشار محیط باشد. برای هر یک از داده‌های تجربی موجود موتور، فشار بوست توسط معادله (۱۸) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که کمترین و بیشترین مقادیر فشار مطلق محفظه هوای موتور به ترتیب برابر با ۰/۰۶ بار و ۱/۷۳ بار می‌باشد که مقدار آن به دمای محیط و دور موتور بستگی دارد. به گونه‌ای که "فشار هدف" در محدوده دمایی ۲۵ الی ۳۷ درجه سانتیگراد در دور موتورهای ۵۵۰۰ و ۵۸۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب برابر با ۱/۵۲ و ۱/۴۵ بار می‌باشد. توجه به این نکته ضروری است که فشار محفظه هوای موتور هیچ‌گاه نباید از فشار ۱/۷۳ بار تجاوز کند. علاوه بر این؛ بیشترین و کمترین فشار بوست موتور به ترتیب برابر با فشار هوای محیط و ۱/۷۳ بار می باشد [۱۰].

(۲) دمای محفظه هوا

فرآیند فشرده‌سازی هوا توسط کمپرسور توربوشارژر سبب افزایش دمای آن می‌گردد. از این رو؛ به منظور کاهش دمای هوای فشرده شده از یک خنک‌کن میانی در سیستم هوای ورودی به موتور استفاده می‌شود. با این وجود؛ دمای هوای فشرده شده هیچ‌گاه تا دمای آن در شرایط محیط (قبل از فشرده شدن) کاهش نمی‌یابد. به عبارتی دیگر؛ در شرایط کارکرد توربوشارژر در سیستم هوای ورودی به موتور، دمای محفظه هوای موتور همرا به میزان ۱۰ الی ۳۰ درجه سانتیگراد بیشتر از دمای محیط می‌باشد.

(۳) دبی مصرف سوخت

موتور به طور متداول از سوخت هوایی LL 100 با چگالی تقریبی ۰/۷۲ کیلوگرم بر لیتر (و یا سوخت بدون سرب ممتاز با چگالی در محدوده ۰/۷۴ الی ۰/۷۶ کیلوگرم بر لیتر) استفاده می‌کند. بررسی-ها نشان می‌دهد که در شرایط پرواز کروز (بدون فشار بوست / توان ۷۵ درصد)، دبی تقریبی مصرف سوخت موتور در محدوده ۱۵ الی ۲۰ لیتر بر ساعت و یا ۱۱ الی ۱۵ کیلوگرم بر ساعت و در شرایط برخاست (بیشترین توان، توربوشارژر فعال) دبی تقریبی مصرف سوخت موتور در محدوده ۳۵ الی ۴۰ لیتر بر ساعت و یا ۲۵ الی ۲۹ کیلوگرم بر ساعت قرار دارد (چگالی سوخت ۰/۷۳ کیلوگرم بر لیتر). بنابراین؛ به نظر می‌رسد در شرایطی که توربوشارژر به طور مؤثر در سیستم هوای ورودی موتور عمل می‌کند، دبی تقریبی مصرف سوخت موتور بیشتر از ۲۰ کیلوگرم بر ساعت باشد.

(۴) توان موتور

در حالت کلی؛ شرایط کاری و محدوده توان تولید شده توسط موتور با توجه به میزان تراتل، شرایط ارتفاع و کارکرد توربوشارژر به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شود که عبارتند از:

(الف) توان (۱۰۵ کیلووات) ۱۴۱ اسب‌بخار در شرایط برخاست (کارکرد حداکثری توربوشارژر)

(ب) توان پیوسته (۱۰۱ کیلووات) ۱۳۵ اسب‌بخار در اثر تقویت فشار معنادار توسط توربوشارژر در شرایط ارتفاع بالا و تراتل زیاد

(پ) توان (۵۲ الی ۵۷ کیلووات) ۷۰ الی ۱۰۰ اسب‌بخار در شرایط ارتفاع پایین و تراتل کم

از این رو؛ می‌توان بیان کرد که توربوشارژ موتور، به طور مؤثر در شرایط "توان بالا" در سیستم هوای ورودی به موتور وارد عمل می‌شود. بنابراین می‌توان نوشت:

- شرایط برخاست / صعود (توربوشارژ فعال): توان بزرگتر و یا مساوی با (۹۰ کیلووات) ۱۲۰ اسب‌بخار، اغلب نزدیک به (۱۰۱ الی ۱۰۵ کیلووات) ۱۳۵ الی ۱۴۱ اسب‌بخار
- شرایط کروز (حداقل / بدون بوست فشار): توان در محدوده (۵۲ الی ۵۷ کیلووات) ۷۰ الی ۱۰۰ اسب‌بخار

با توجه به مطالبی که در بالا بیان شد؛ به نظر می‌رسد در شرایطی که توان خروجی موتور بیشتر از (۸۲ کیلووات) ۱۱۰ اسب‌بخار باشد، توربوشارژر موتور برای ثابت نگه داشتن توان و یا افزایش آن (به ویژه در ارتفاع های بالا)، به طور مؤثر وارد عمل خواهد شد.

- اعمال معیارهای پاک‌سازی داده‌های تجربی موتور

با اعمال همزمان معیارهای چهارگانه پاکسازی فوق بر روی داده-های تجربی موتور، دامنه مجموعه دادگان مطلوب به منظور تشخیص کارکرد مؤثر توربوشارژر سیستم هوای ورودی موتور، از ۲۱۸۳ داده به ۳۲۱ داده مطابق با شرایط محیطی و کارکردی ارائه شده در جدول ۳ محدود گردید که نتایج آن در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به تأکید است که داده های ارائه شده در نمودارهای شکل‌های ۸ و ۹؛ صرفاً بر مبنای داده های تجربی پاکسازی شده تهیه و هیچگونه خروجی شبیه سازی در تولید آنها استفاده نشده است.

از آنجاییکه چهار معیار پاک‌سازی داده‌ها به‌صورت همزمان و با منطق AND بر داده های تجربی موتور اعمال شده‌اند، تغییر آستانه یک معیار به‌تنهایی نمی‌تواند داده‌های جدیدی به مجموعه نهایی داده های پاک سازی شده موتور اضافه کند. زیرا داده‌های حذف‌شده معمولاً به‌دلیل همبستگی فیزیکی بین پارامترهای عملکردی موتور، نمی توانند شروط چهارگانه را به طور همزمان برآورده کنند. در نتیجه، مجموعه داده نهایی ۳۲۱ داده و انتخاب توربوشارژر حاصل از آن، نسبت به تغییرات معقول در آستانه‌های پاک‌سازی پایدار می باشد.

In Press, Pre-Proof Version

در نمودارهای شکل ۸؛ بر روی محور افقی، میانگین عددی توان موتور در دماهای مختلف هر ارتفاع بر حسب کیلووات و بر روی محور عمودی، میانگین عددی نسبت فشار سیستم هوای ورودی به موتور (کمپرسورتوربوشارژر) در شرایط ارتفاع و تراتل‌های مختلف موتور، به ازای یک دور موتور مشخص و به طور مجزا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد و با کاهش دور موتور از ۵۸۰۰ به ۵۵۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، میانگین توان موتور تا ارتفاع ۱۷۰۰۱ پا به ترتیب از ۱۰۴/۴ به ۹۹/۴ و ۸۷ کیلووات کاهش می‌یابد. میانگین توان موتور و دامنه نوسانات آن در شرایط ارتفاع، دور موتور و تراتل‌های مختلف موتور در جدول ۴ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ کمترین و بیشترین دامنه نوسانات توان موتور برای تراتل ۱۰۰ درصد و به ترتیب در ارتفاع‌های کمتر و بیشتر از ۱۷۰۰۱ پا رخ می‌دهد.

۲-۴- نقشه عملکرد موتور

بر مبنای داده‌های تجربی پاک‌سازی شده؛ نقشه عملکرد سیستم هوای ورودی موتور تا ارتفاع ۲۳۰۰۰ پا در نمودارهای شکل ۹ نشان داده شده است.

جدول ۳ شرایط محیطی و کارکردی موتور در فرآیند شناسایی سناریوهای عملکرد توربوشارژر با استفاده از داده‌های تجربی

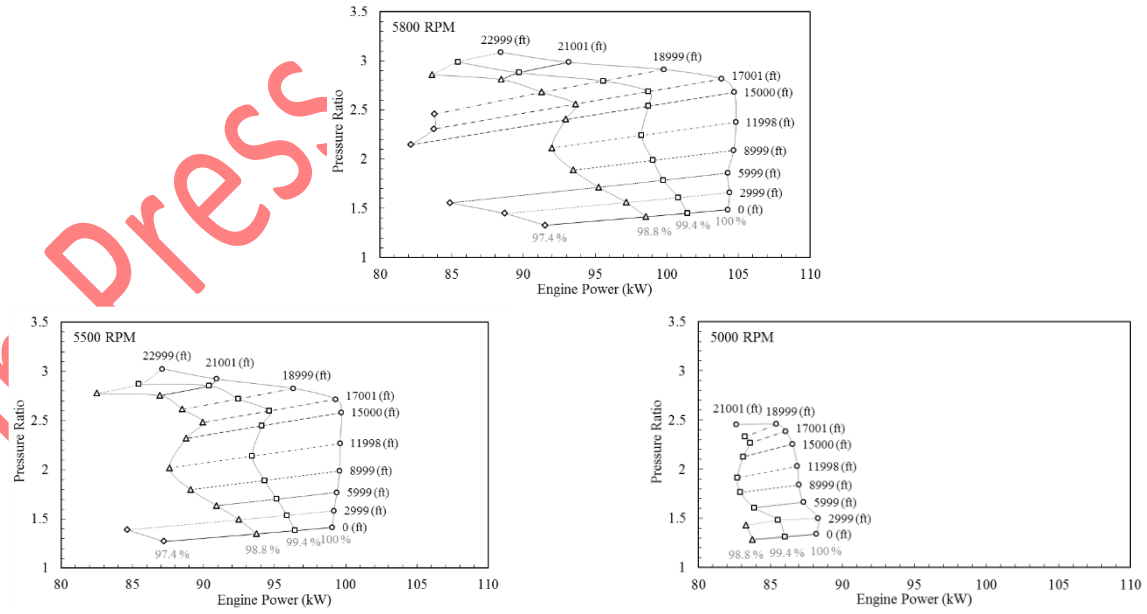
Table 3 Ambient and operational engine conditions

Ambient conditions		**Boost conditions**
Altitude, $P_{Ambient}$, $T_{Ambient}$ According to Fig. 6		P_{Boost} More than 0.02 bar	$T_{Boost} - T_{Ambient}$ More than 10 °C
Engine conditions		
Throttle % 100 % 99.4 % 98.8 % 97.4	Speed 5800 rpm 5500 rpm 5000 rpm	Fuel Consumption More than 20 kg/h

جدول ۴ میانگین توان موتور و دامنه نوسانات آن در شرایط ارتفاع، دور موتور و تراتل‌های مختلف موتور

Table 4 Engine power and its fluctuation relate to engine control main parameters and altitude condition

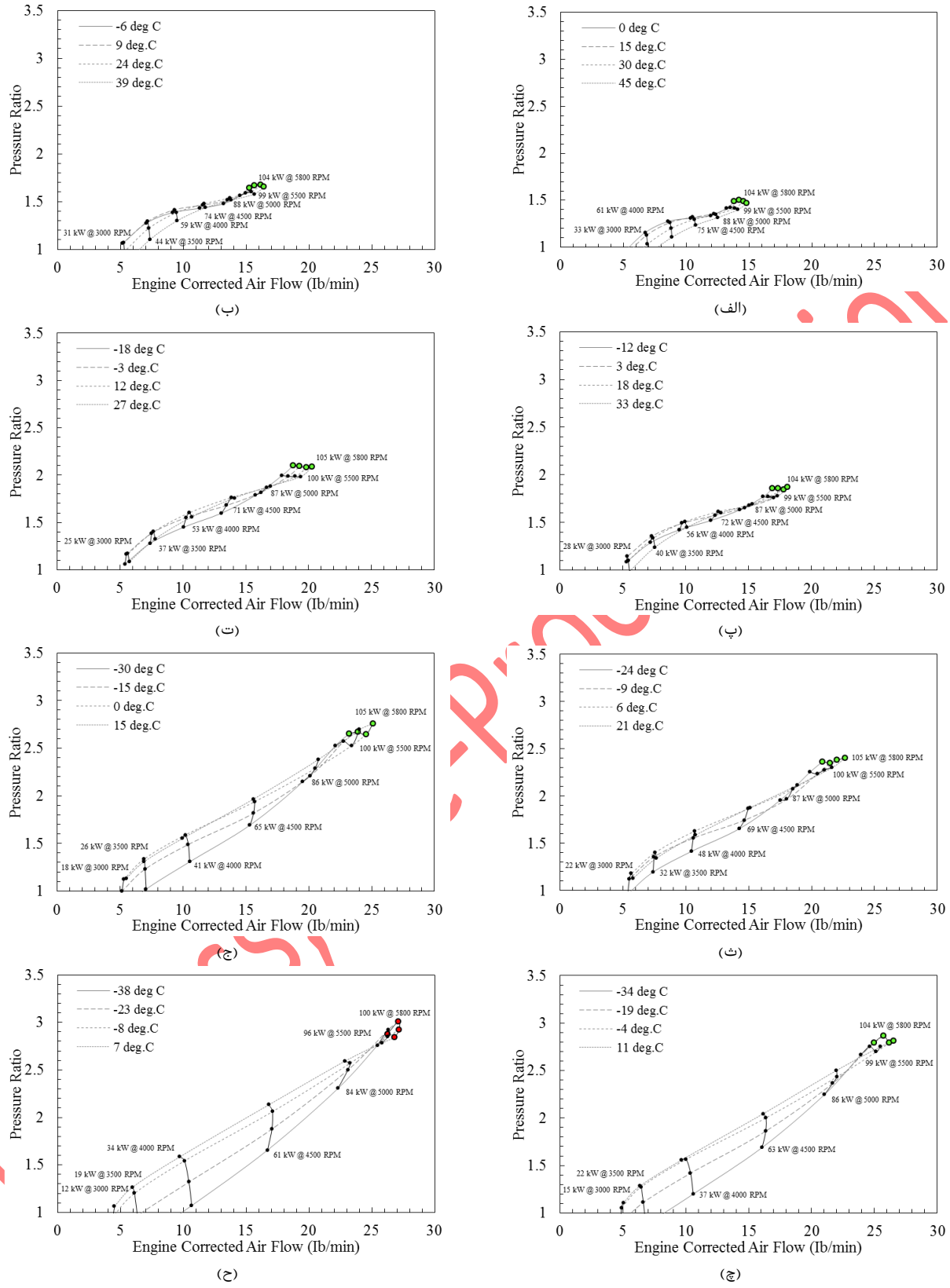
Engine throttle	**Engine speed**	**Altitude**		
		From sea level to 17001 (ft)	**From 17001 to 21001 (ft)**	
100%	5800 rpm	104 ± 0.5 kW	94 ± 5.7 kW	**Engine power**
	5500 rpm	99 ± 0.3 kW	91 ± 4.6 kW	
	5000 rpm	87 ± 1.1 kW	84 ± 1.4 kW	
99.40%	5800 rpm	99 ± 1.6 kW	90 ± 5.1 kW	
	5500 rpm	95 ± 1.5 kW	89 ± 3.5 kW	
	5000 rpm	84 ± 1.6 kW	~ 83 kW	
98.80%	5800 rpm	95 ± 3.3 kW	88 ± 3.8 kW	
	5500 rpm	90 ± 3.1 kW	86 ± 3.0 kW	
	5000 rpm	83 ± 0.2 kW	N/A	
97.40%	5800 rpm	86 ± 4.7 kW	~ 84 kW	
	5500 rpm	8.6 ± 1.3 kW	N/A	
	5000 rpm	N/A	N/A	



شکل ۸ نقشه سازگاری عملکرد توربوشارژر در تعامل با مشخصه های شرایط محیطی و کارکردی موتور

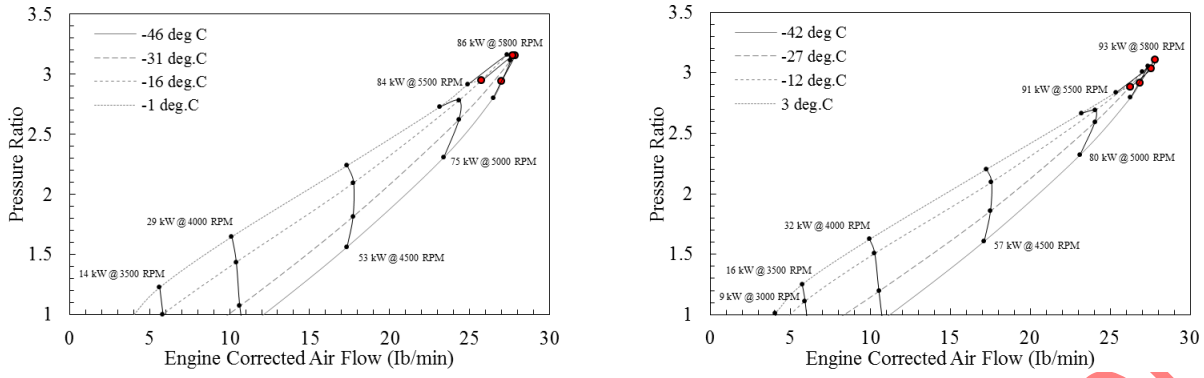
Fig.8 Turbocharger operation map with regard to engine performance and ambient condition

In Press Version



شکل ۹ نقشه عملکرد موتور، الف) سطح دریا (FL0)، ب) ارتفاع ۲۹۹۹ پا (FL30)

Fig.9 The engine map



(خ) (د)

شکل ۹ نقشه عملکرد موتور، پ) ارتفاع ۵۹۹۷ (FL60)، ت) ارتفاع ۸۹۹۹ پا (FL90)، ث) ۱۱۹۹۸ پا (FL120)، ج) ارتفاع ۱۵۰۰۰ پـا (FL150)، چ) ارتفـاع ۱۷۰۰۱ پـا (FL170)، ح) ارتفاع ۱۸۹۹۹ پا (FL190)، خ) ارتفاع ۲۱۰۰۱ پا (FL210)، د) ارتفاع ۲۲۹۹۹ پا (FL230) (ادامه)

Fig.9 The engine map (cont.,)

در نمودارهای شکل ۹؛ بر روی محور افقی، دبی هوای تصحیح شده مورد نیاز موتور بر حسب پوند بر دقیقه و بر روی محور عمودی، نسبت فشار سیستم هوای ورودی به موتور در تراتل ۱۰۰ درصد، به ازای دور موتورهای ۳۰۰۰ الی ۵۸۰۰ دور بر دقیقه و در شرایط ارتفاع نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ در شرایط سطح دریا و با افزایش دمای محیط، میزان دبی هوای ورودی و نسبت فشار نقشه عملکرد موتور برای کلیه توان‌هابه ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. این در حالی است که با افزایش ارتفاع از سطح دریا و در نظر گرفتن اثرات فشار محیط، این رویه دچار تغییر شده و حتی در ارتفاع‌های بیش از ۱۹۰۰۰ پا، معکوس می‌شود.

۳-۴- انتخاب توربوشارژر

• مرحله اول انتخاب : تعیین نقاط کاری موتور

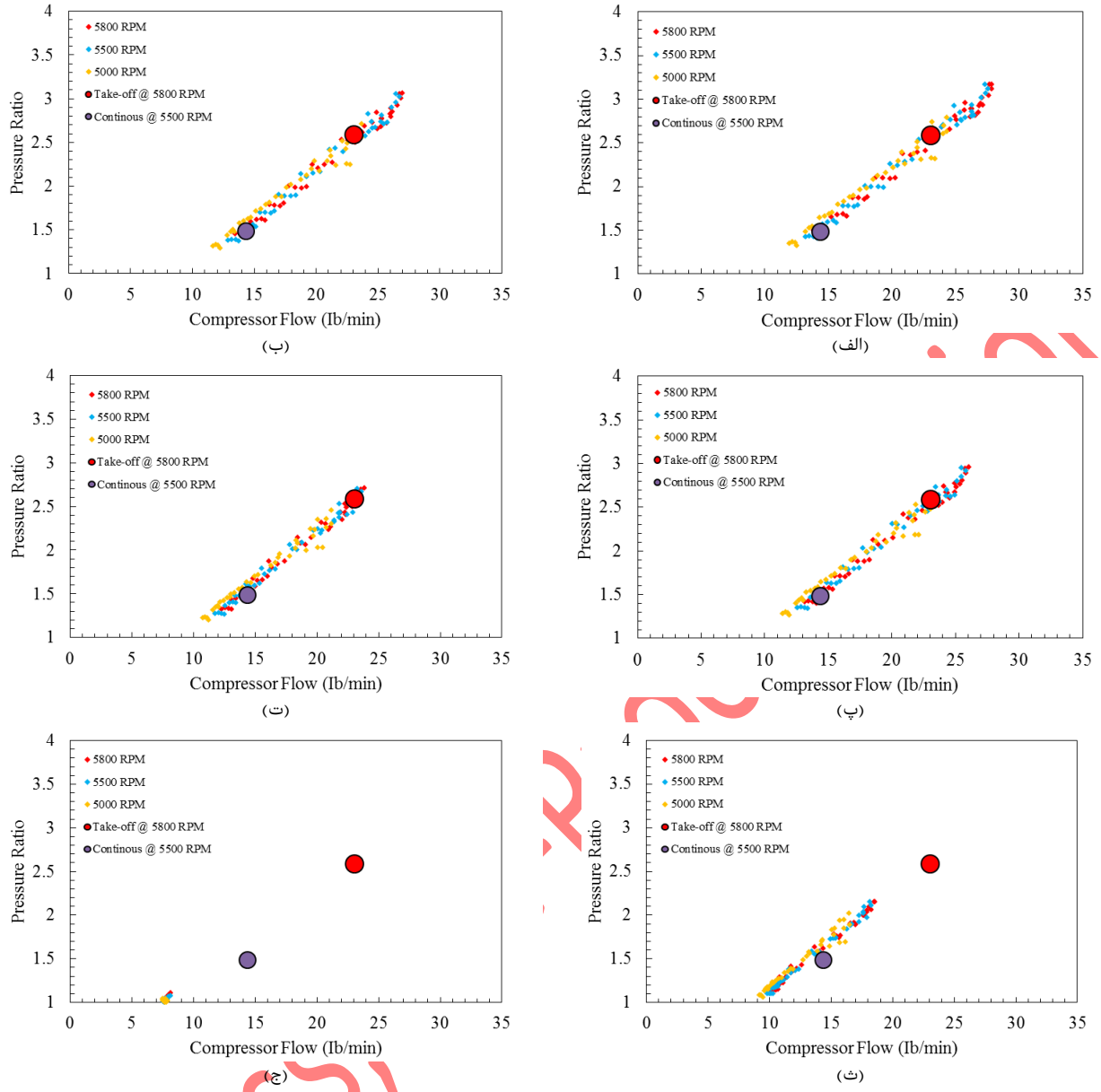
با توجه به ماهیت هوایی موتور و داده‌های ارائه شده در دستورالعمل‌های آن؛ نقاط عملکردی متناظر با مدهای عملیاتی "برخاست" و "کارکرد مداوم" موتور به عنوان دو نقطه اصلی عملکرد آن، بر اساس داده‌های تجربی و مطابق با جدول ۵ تعریف می‌شود. توضیح اینکه در لحظه برخاست، همواره نیاز به حداکثر توان و دور موتور می‌باشد. همچنین برای دستیابی به مداومت پروازی در بالاترین ارتفاع ممکن، موتور باید با حداکثر توان (کروز / پیوسته) و دور موتور متناظر با آن کار کند. از این رو؛ نقاط کاری موتور بر مبنای این شرایط تعریف شده‌اند.

برای اثبات کفایت دو نقطه کاری مرجع انتخاب شده در غربالگری اولیه توربوشارژر(مرحله دوم انتخاب)، نقاط عملکردی موتور بر اساس داده های تجربی و برای شرایط ۵۰۰۰، ۵۵۰۰، ۵۸۰۰ دور بر دقیقه، تراتل های ۱۰۰، ۹۹/۴، ۹۸/۸، ۹۷/۴، ۹۴/۱، ۸۴/۵ درصد و شرایط محیطی مطابق با جدول ۲ در نمودارهای شکل ۱۰ نشان داده شده است.

در نمودارهای شکل ۱۰؛ بر روی محور افقی، دبی هوای تصحیح شده مورد نیاز موتور بر حسب پوند بر دقیقه و بر روی محور عمودی، نسبت فشار سیستم هوای ورودی به موتور نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ سایر نقاط کاری موتور، حوالی خط مستقیم و شیب‌داری قرار می‌گیرند که دو نقطه کاری مرجع را به هم متصل می‌کند. این بدان معناست که اگر یک توربوشارژر در دو نقطه مرجع عملکرد مناسبی داشته باشد، به‌طور قطع در تمامی نقاط میانی نیز عملکرد مناسبی خواهد داشت. این موضوع ناشی از ماهیت یکنواخت و پیوسته نقشه کمپرسور در محدوده بین این دو نقطه است.

علاوه بر این؛ در نقاط کاری پایین تر از نقطه کاری ۱ (افت دور موتور همزمان با کاهش تراتل)، نسبت فشار مورد نیاز موتور به سمت یک و حتی کمتر از آن میل می کند. این رفتار نشان دهنده آن است که در این شرایط، توربوشارژر نقش تعیین کننده ای در عملکرد موتور ندارد و موتور به صورت تنفس طبیعی کار می کند. این در حالی است که در نقاط کاری بالاتر از نقطه کاری ۲ (ارتفاع‌های بیش از ۱۵۰۰۰ پا)، نسبت فشار مورد نیاز موتور افزایش می یابد. در چنین شرایطی اگر توربوشارژر در نقطه کاری ۲ عملکرد مناسبی داشته باشد، به نظر برسد که بتواند با افزایش بیشتر ارتفاع نیز حاشیه ایمنی کافی نسبت به نواحی Surge و Chock را حفظ کند و این نقاط همچنان در محدوده مجاز عملکردی کمپرسور قرار گیرند.

In Press, Pre-Proof Version



شکل ۱۰. مشخصات نقاط عملکرد موتور، الف) تراتل ۱۰۰ درصد، ب) تراتل ۹۹/۴ درصد، پ) تراتل ۹۸/۸ درصد، ت) تراتل ۹۷/۴ درصد، ث) ۹۴/۱ درصد، ج) ۸۴/۵ درصد

Fig.10 The engine operation points

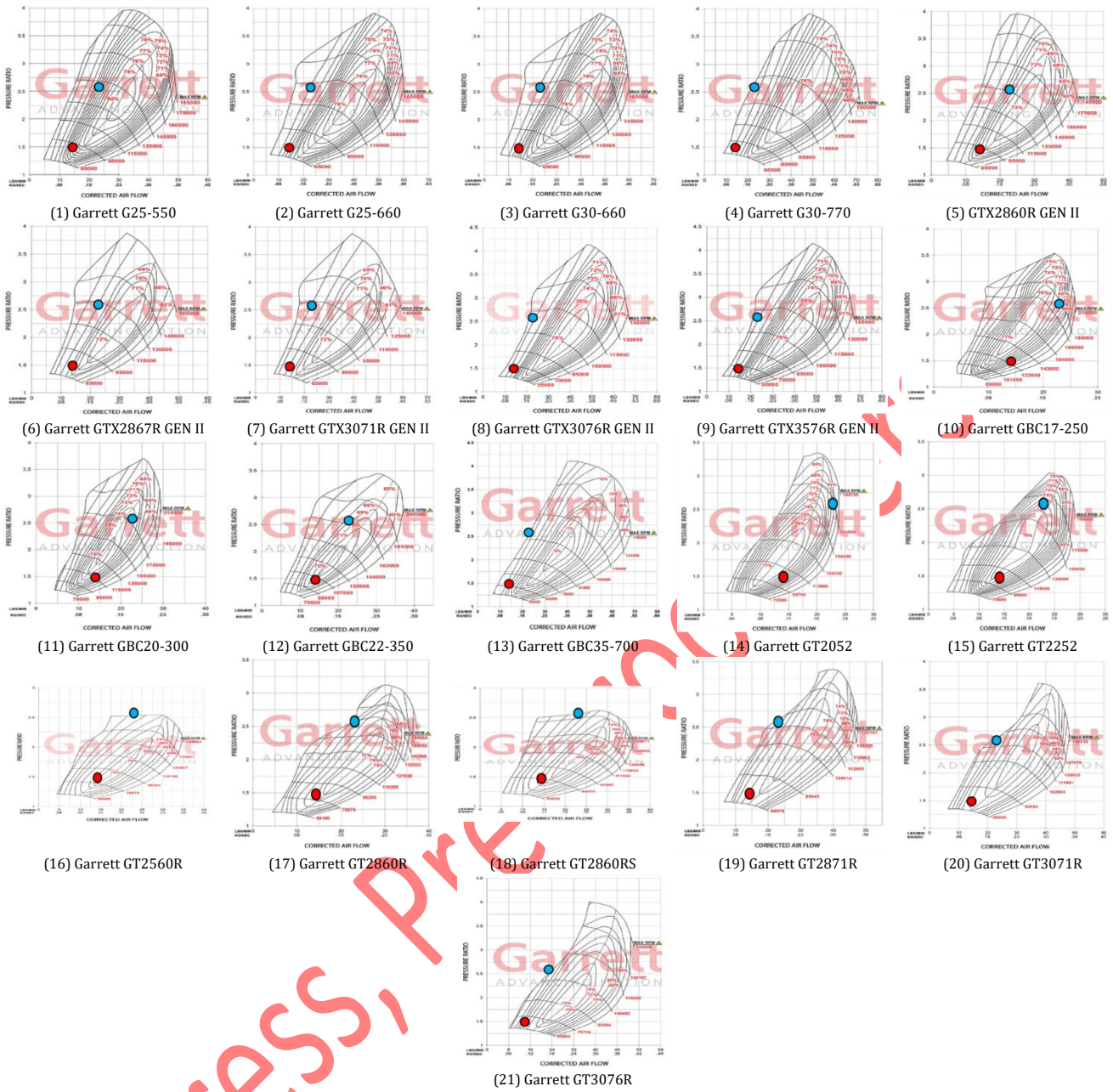
• مرحله دوم انتخاب : انطباق نقاط عملکردی موتور با نقشه عملکردی توربوشارژر

با استفاده از "دبی جرمی تصحیح‌شده جریان هوا" و "نسبت فشار" لازم برای هر نقطه عملکردی (جدول ۵)، می‌توان با مراجعه به نقشه عملکردی توربوشارژرهای مختلف، بهترین گزینه ها را به گونه‌ای انتخاب نمود که نقطه کاری به دست آمده در فواصل نزدیک به خط بازده حداکثر کمپرسور قرار داشته و به اندازه کافی از نواحی خطرناک و کم بازده کمپرسور دور باشد (رویکرد حداکثر انطباق نقشه عملکردی کمپرسور با نقشه عملکرد موتور). از حدود ۵۶ نوع توربوشارژرهای مختلف، ۲۱ مدل توربوشارژر که در برگیرنده نقطه ۱ و نقطه ۲ به طور همزمان بوده و در داخل نقشه عملکردی کمپرسور حد فاصل Surge line و Chock Line قرار می‌گیرند، به عنوان کاندیدای توربوشارژر مناسب موتور در نظر گرفته می‌شوند (شکل ۱۱).

جدول ۵ مشخصات نقاط اصلی عملکرد موتور

Table 5 Engine operation major points specification

Engine Operation	Engine Mode	Altitude	Engine Power @ Speed	Engine Throttle	Pressure Ratio	Corrected Airflow
Point 1	Take-off	Sea level	104 kW @ 5800 rpm	%100	1.487	14.36 Ib/min
Point 2	Continuous	15000 feet	99 kW @ 5500 rpm	%100	2.581	23.10 Ib/min



شکل ۱۱ انطباق نقاط کاری موتور و نقشه عملکردی کمپرسور

Fig.11 Matching of the engine operation points and the compressor map

- مرحله سوم انتخاب : محاسبه فاصله بی‌بعد نقاط کاری موتور با PEL کمپرسور

فواصل بی بعد A/B، C/E و D برای توربوشارژهای شکل ۹ برای هر دو نقطه کاری محاسبه و در جدول ۶ آورده شده است.

در این مرحله؛ توربوشارژرهایی که حداقل در یک نقطه از نقاط کاری حداکثر انطباق با حداکثر انطباق با PEL را داشته باشند، به عنوان گزینه های مناسب برای ورود به مرحله چهارم انتخاب می‌شوند. به عبارتی دیگر؛ هدف از این مرحله، حذف گزینه هایی است که در هر دو نقطه کاری فاصله قابل توجهی از شرایط مطلوب دارند. بنابراین؛ "یک توربوشارژر به عنوان کاندید نهایی پذیرفته می شود، اگر و تنها اگر در هر دو نقطه کاری اصلی موتور (نقطه ۱ : برخاست در سطح دریا و نقطه ۲ : کارکرد مداوم در ارتفاع ۱۵۰۰ پا)، حداقل یکی از سه شاخص A/B، C/E و D کمتر از ۰/۱ باشد".

با توجه به جدول ۶ و انتخاب معیارهای سختگیرانه $A/B < 0.1$، $C/E < 0.1$ و $D < 0.1$ (حداکثر انطباق با PEL)، فهرست کاندیدهای اصلی توربوشارژر مناسب موتور در جدول ۷ آورده شده‌اند.

جدول ۶ فواصل بی‌بعد توربوشارژهای کاندید موتور

Table 6 The dimensionless distances of candidated turbocharger

Turbocharger Model	●			●		
	A/B	C/E	D	A/B	C/E	D
Garrett G25-550	0.25	0.31	1.22	0.43	0.13	0.45
Garrett G25-660	0.57	0.42	2.39	0.86	N/A	N/A
Garrett G30-660	0.53	0.42	2.39	0.86	N/A	N/A
Garrett G30-770	0.81	0.46	3.08	1.12	N/A	N/A
GTX2860R GEN II	0.11	0.27	0.92	0.32	0.07	0.21
Garrett GTX2867R GEN II	0.25	0.35	1.57	0.56	0.10	0.44
Garrett GTX3071R GEN II	0.53	0.40	2.48	0.90	0.17	0.90
Garrett GTX3076R GEN II	0.67	0.44	2.63	0.95	N/A	N/A
Garrett GTX3576R GEN II	0.67	0.44	2.63	0.95	N/A	N/A
Garrett GBC17-250	0.30	0.27	0.64	0.20	1.17	1.67
Garrett GBC20-300	0.22	0.06	0.25	0.09	0.1	0.38
Garrett GBC22-350	0.02	0.17	0.58	0.20	0	0.04
Garrett GBC35-700	0.60	0.42	2.34	0.84	N/A	N/A
Garrett GT2052	0.23	N/A	N/A	0.13	0.23	0.50
Garrett GT2252	0.09	0.13	0.16	0.04	0.03	0.16
Garrett GT2560R	0.15	0.29	0.94	0.32	0.10	0.28
Garrett GT2860R	0.18	0.29	0.84	0.28	0.10	0.33
Garrett GT2860RS	0.18	0.3	0.95	0.32	0.10	0.33
Garrett GT2871R	0.25	0.40	1.51	0.51	0.10	0.44
Garrett GT3071R	0.25	0.34	1.40	0.49	0.12	0.45
Garrett GT3076R	0.57	0.42	1.80	0.62	N/A	N/A

• مرحله چهارم انتخاب : شبیه سازی موتور و توربوشارژر

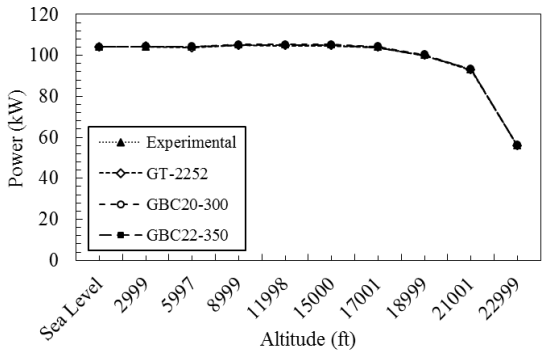
غربالگری اولیه توربوشارژرها بر اساس دو نقطه کاری مرجع و با هدف حذف گزینه های نامناسب انجام شد، در مرحله چهارم انتخاب، عملکرد توربوشارژرهای منتخب (جدول ۷)، در کل محدوده عملکرد موتور و بر اساس ۴۰ نقطه کاری مختلف حاصل از ترکیب شرایط مختلف ارتفاع و دمای محیط، مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این مرحله؛ علاوه بر بررسی موقعیت نقاط کاری بنابراین برای انتخاب مناسب ترین توربوشارژر برای موتور، فرآیند بررسی عددی نقاط کاری موتور در حین انجام مأموریت صعود آن از سطح دریا تا ارتفاع ۲۲۹۹۹ پا به ازای توربوشارژرهای Garrett GT-2252، Garrett GBC20-300 و Garrett GBC22-350، در شرایط محیطی مطابق با استاندارد ISA و با استفاده از مدل دوقلوی دیجیتال آفلاین موتور (شکل ۵) انجام شد.

نسبت به PEL، توزیع آنها در نواحی راندمان، Surge و Choke نیز مورد بررسی قرار گرفته و تصمیم نهایی بر اساس این ارزیابی جامع اتخاذ می شود.

جدول ۷ کاندیدهای اصلی انتخاب توربوشارژر برای موتور

Table 7 Turbochargers major candidate list

Turbocharger Model	●			●		
	A/B	C/E	D	A/B	C/E	D
Garrett GBC20-300	0.22	0.06	0.25	0.09	0.1	0.38
Garrett GBC22-350	0.02	0.17	0.58	0.20	0	0.04
Garrett GT2252	0.09	0.13	0.16	0.04	0.03	0.16



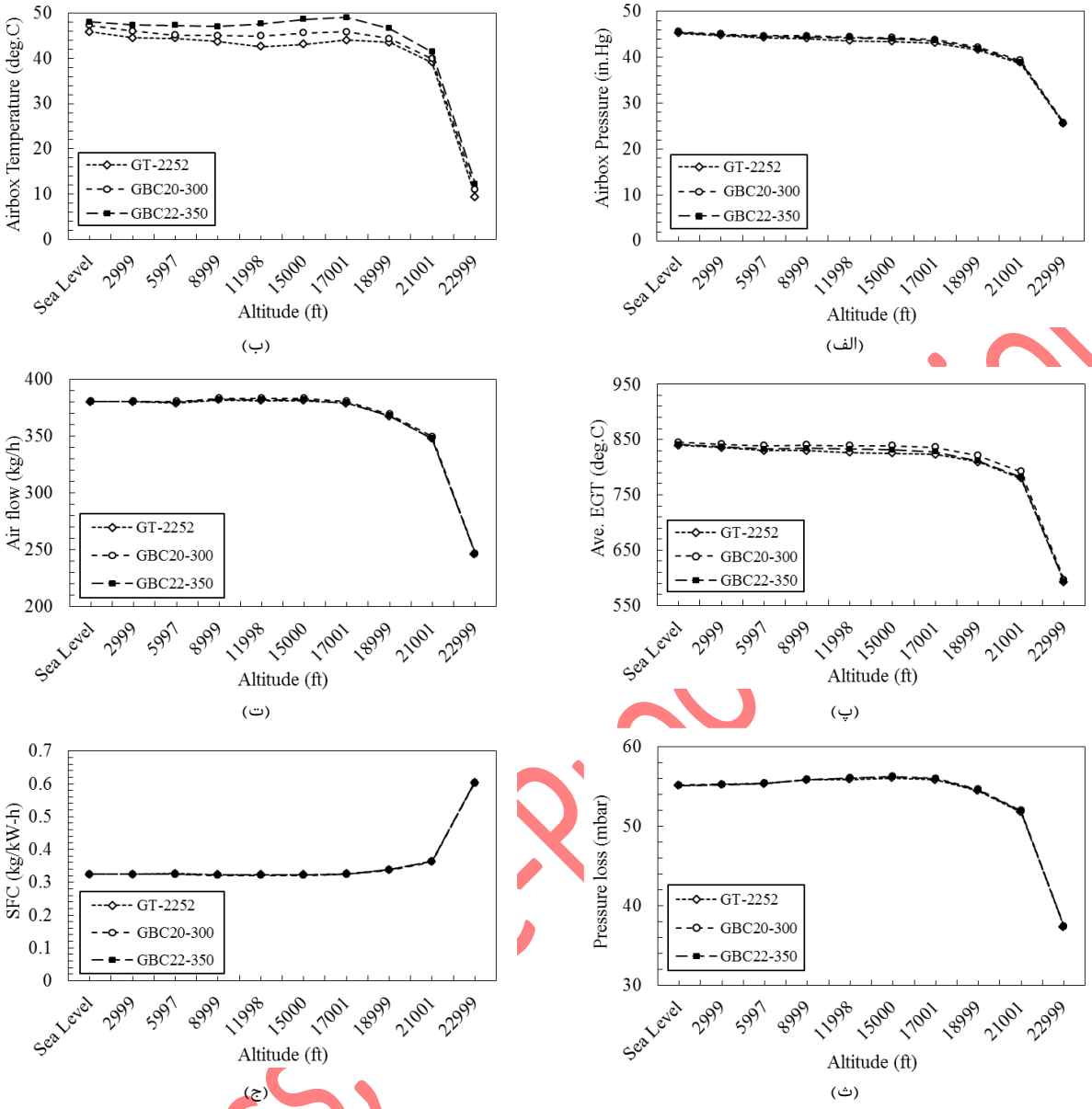
شکل ۱۱ نمودار مقایسه بیشترین توان موتور در شرایط ۵۸۰۰ دور بر دقیقه و تراتل ۱۰۰ درصد نسبت به توربوشارژرهای کاندید در ارتفاع‌های مختلف

Fig.12 Comparison of the engine power diagram at 5800 rpm and WOT throttle relate to the turbochargers major candidate list in altitude conditions

برای انتخاب مناسب‌ترین توربوشارژر موتور از میان سه کاندید اصلی جدول ۷؛ مدلسازی و شبیه سازی یک‌بعدی موتور در ارتفاع‌های مختلف نسبت به شرایط استاندارد سطح دریا (دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و فشار ۱ بار) و صرفاً با تغییر توربوشارژ آن انجام می‌شود (شکل ۱۲).

در نمودار شکل ۱۲؛ بر روی محور عمودی، حداکثر توان موتور بر به ازای توربوشارژرهای مختلف بر حسب کیلووات و بر روی محور افقی، ارتفاع بر حسب پا نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود؛ هر سه توربوشارژ توانایی تأمین هوای مورد نیاز موتور برای دستیابی به توان مورد نظر در ارتفاع‌های مختلف را دارند. همچنین بر اساس دستورالعمل‌های موتور، سایر "مشخصه‌های سازگاری توربوشارژر با موتور" شامل: "بیشترین فشار محفظه هوا: ۵۱ اینچ جیوه"، "بیشترین دمای محفظه هوا: ۵۰ درجه سانتیگراد"، "بیشترین فشار بوست: ۱۷۳۰ هکتوپاسگال"، "بیشترین دمای گازهای خروجی: ۹۵۰ درجه سانتیگراد"، "دبی هوای ورودی در سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه: ۳۸۴ الی ۳۹۶ کیلوگرم بر ساعت"، "افت فشار ورودی در سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه: ۹۰ میلی بار"، "مصرف سوخت ویژه موتور در سطح دریا، سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه، تراتل ۱۰۰ درصد، توان ۱۰۴ کیلووات: ۰/۳۲۵ کیلوگرم بر کیلووات ساعت"، "مصرف سوخت ویژه موتور در ارتفاع ۹۰۰۰ پا، سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه، تراتل ۱۰۰ درصد، توان ۱۰۴ کیلووات: ۰/۳۲۲ کیلوگرم بر کیلووات ساعت" توسط توربوشارژرهای Garrett GT-2252، Garrett GBC20-300 و Garrett GBC22-350 برای موتور ارضاء می‌گردد [۱۰, ۱۵-۱۷] (شکل ۱۳).

In Press, Pre-Proof



شکل ۱۳ نمودار مشخصه‌های سازگاری توربوشارژر با موتور در ارتفاع‌های مختلف و در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد و سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه، الف) فشار محفظه هوا، ب) دمای محفظه هوا، پ) دمای گازهای خروجی، ت) دبی هوای ورودی، ث) افت فشار ورودی، ج) مصرف سوخت ویژه

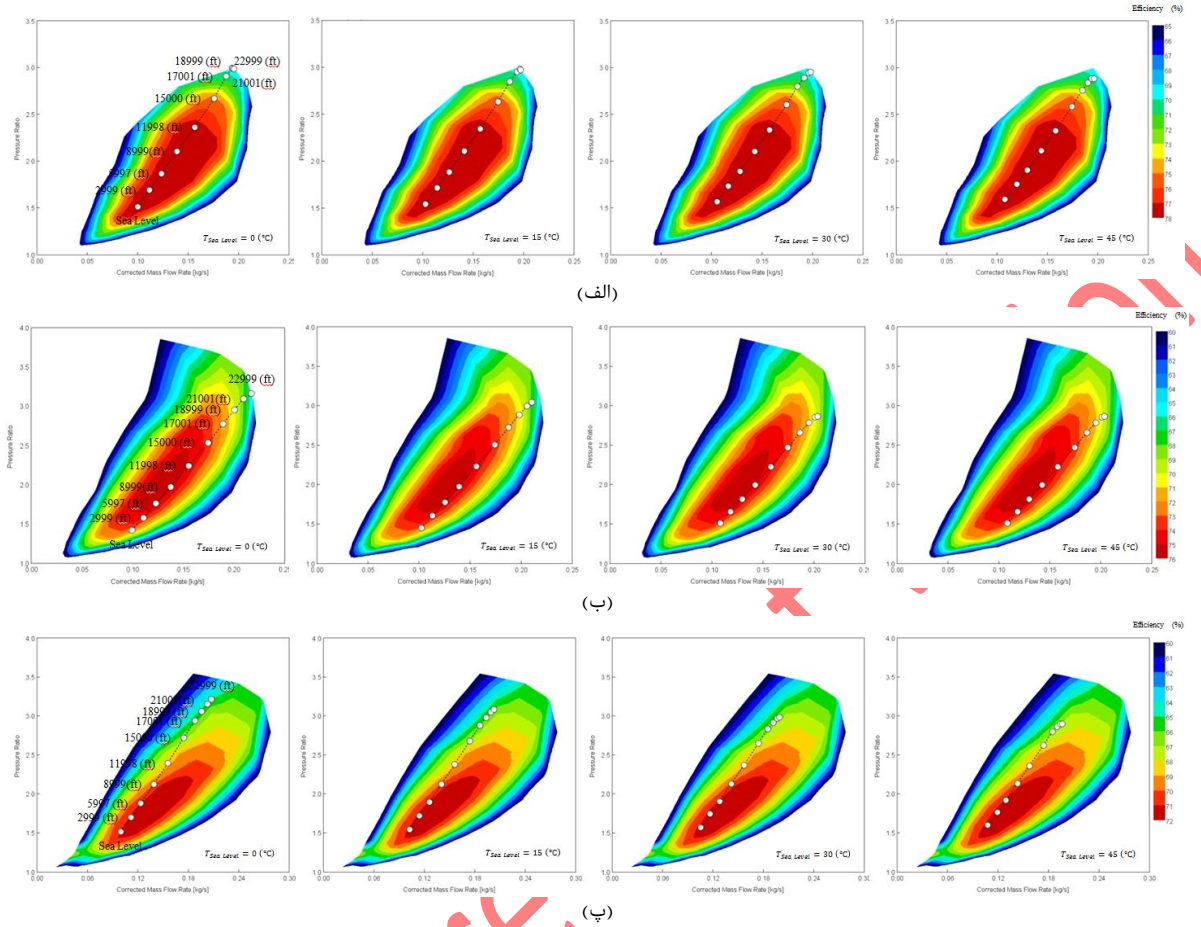
Fig.13 The engine and the turbochargers major candidate interface specification at 5800 rpm and WOT throttle in altitude conditions

بنابراین برای انتخاب مناسب ترین توربوشارژر برای موتور، فرآیند بررسی عددی نقاط کاری موتور در حین انجام مأموریت صعود آن از سطح دریا تا ارتفاع ۲۲۹۹۹ پا به ازای توربوشارژهای Garret GT-2252، Garret GBC20-300 و Garret GBC22-350، در شرایط محیطی مطابق با استاندارد ISA و با استفاده از مدل دوقلوی دیجیتال آفلاین موتور (شکل ۵) انجام شد.

• راندمان کمپرسور توربوشارژر

نمودار انطباق نقاط عملکردی موتور در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد و سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه با نقشه کمپرسور توربوشارژر به ازای ارتفاع و دماهای مختلف (بر مبنای سطح دریا)، در نمودارهای شکل ۱۴ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود؛ ۴×۱۰ نقاط کارکردی موتور در دماهای مختلف (شکل ۷)، علاوه بر این که انطباق بیشتری با PEL نقشه عملکردی کمپرسور توربوشارژر Garret GT-2252 دارد، ۲۰ نقطه از ۴۰ نقطه کاری موتور نیز در محدوده بیشترین راندمان آن (۷۷ الی ۷۸ درصد) قرار می‌گیرد. این در حالی است که تعداد نقاط کاری موتور در محدوده بیشترین راندمان کمپرسورهای Garret GBC20-300 (۷۵ الی ۷۶ درصد) و Garret GBC22-350 (۷۱ الی ۷۲ درصد)، به ترتیب ۱۵ و ۱۲ نقطه می‌باشد.



شکل ۱۴ نقشه کمپرسور توربوشارژرهای کاندید اصلی انتخاب برای موتور در ارتفاع های مختلف و در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد و سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه، الف) GT-2252، ب) GBC20-300، پ) GBC22-350

Fig.14 The turbochargers major candidate map relate to the engine operation points at 5800 rpm and WOT throttle in altitude conditions

جدول ۸ راندمان کمپرسور کاندیدهای اصلی انتخاب توربوشارژر در نقاط کارکردی موتور

Table 8 The candidate major turbochargers compressor efficiency at the engine operating point

Turbocharger Model	T amb. at SL (°C)	Altitude (ft)									
		0	2999	5997	8999	11998	15000	17001	18999	21001	22999
Garrett GBC20-300	0	72.8	74.1	75.0	75.1	74.5	73.6	72.0	70.8	69.5	68.4
	15	73.8	74.9	75.6	75.4	74.9	73.5	72.0	70.6	69.3	68.9
	30	74.4	75.7	75.8	75.7	74.9	73.5	72.3	71.3	70.3	69.8
	45	74.7	75.9	75.9	75.8	74.9	73.6	72.5	72.2	72.2	72.4
Garrett GBC22-350	0	71.3	71.8	71.9	71.6	70.3	69.6	68.2	67.5	67.7	67.6
	15	71.6	71.6	71.5	71.0	69.4	68.7	67.1	67.0	66.7	67.0
	30	71.3	71.3	71.1	70.1	68.8	67.3	66.4	66.1	66.1	66.2
	45	71.0	71.0	70.5	69.3	68.3	66.3	65.5	65.5	66.0	65.5
Garrett GT2252	0	76.9	78.0	78.0	78.0	78.0	76.3	73.9	70.6	68.7	68.8
	15	77.5	78.0	78.0	78.0	78.0	75.9	72.8	69.8	69.4	69.3
	30	77.7	78.0	78.0	78.0	77.6	75.4	71.7	70.1	69.8	69.8
	45	77.9	77.8	77.9	78.0	77.2	75.1	71.0	70.5	71.0	72.1

• فشار ورودی به توربین توربوشارژر

در انتخاب توربوشارژر، توربینی مطلوب تر است که بتواند توان مورد نیاز کمپرسور را با کمترین افت فشار در ورودی توربین تأمین کند. کاهش فشار گازهای خروجی از موتور (اگزوز) در بالادست توربین، به معنای کاهش فشار پشت (Back Pressure) اعمال شده بر موتور می باشد که در نتیجه آن، فرآیند تخلیه گازهای حاصل از احتراق مخلوط سوخت و هوا در موتور با مقاومت کمتری مواجه شده و کار پمپی کاهش می یابد. بنابراین در مقایسه توربین های مختلف؛ انتخاب باید بر مبنای توان قابل تأمین برای کمپرسور در کنار حداقل فشار ورودی مورد نیاز توربین صورت گیرد. به گونه ای که توربین انتخاب شده ضمن تأمین انرژی کافی برای دستیابی به نقطه کاری مطلوب کمپرسور،

کمترین مانع را ر مسیر گازهای خروجی از موتور ایجاد کند. متوسط فشار جریان گاز ورودی به توربین توربوشارژرهای Garret GBC20-300، Garret GBC22-350 و Garret GT-2252 در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد و سرعت ۵۸۰۰ دور بر دقیقه به ازای ارتفاع و دماهای مختلف (بر مبنای سطح دریا)، در جدول ۹ آورده شده است.

جدول ۹ فشار ورودی به توربین کاندیدهای اصلی انتخاب توربوشارژر در نقاط کارکردی موتور

Table 9 The candidate major turbochargers turbine inlet pressure at the engine operating point

Turbocharger Model	T amb. at SL (°C)	From sea level up to 22999 9ft)	Average Inlet Pressure
Garrett GBC20-300	0	1.354 (bar)	1.444 (bar)
	15	1.414 (bar)	
	30	1.474 (bar)	
	45	1.534 (bar)	
Garrett GBC22-350	0	1.310 (bar)	1.360 (bar)
	15	1.314 (bar)	
	30	1.377 (bar)	
	45	1.439 (bar)	
Garrett GT2252	0	1.279 (bar)	1.329 (bar)
	15	1.289 (bar)	
	30	1.345 (bar)	
	45	1.402 (bar)	

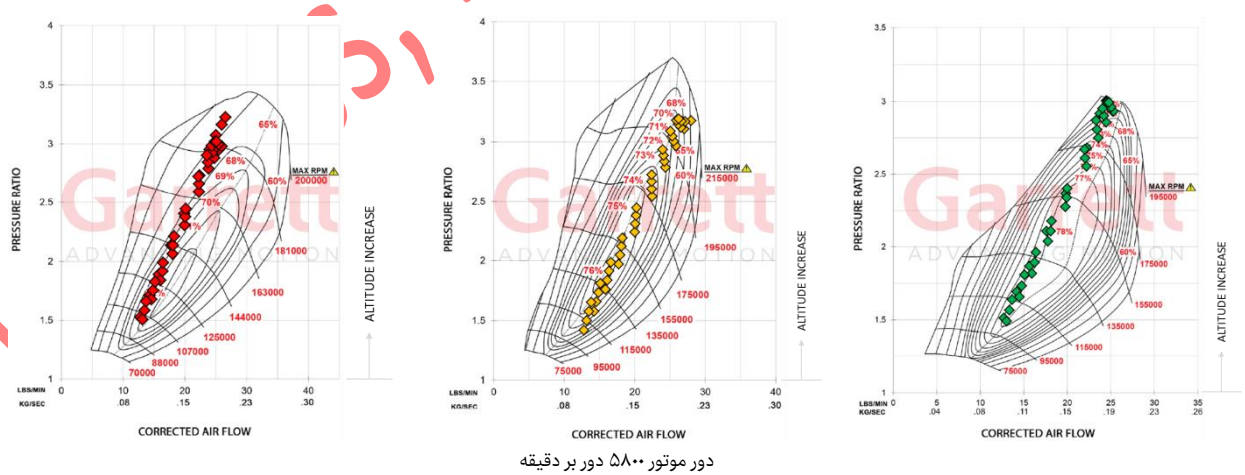
• تطابق توربوشارژر و موتور

انتخاب اندازه مناسب توربوشارژر (Turbocharger Matching) باید بر اساس موقعیت نقاط کاری موتور بر روی نقشه عملکردی کمپرسور انجام شود. به گونه ای که کمپرسور در کل محدود عملکرد موتور، ضمن تأمین نسبت فشار و دبی هوای مورد نیاز، در ناحیه راندمان بالا و با حاشیه ایمنی مناسب نسبت به خطوط سرج (Surge) و چوک (Choke) کار کند. بنابراین الزام انطباق توربوشارژر و موتور دربرگیرنده کمپرسوری است که نقاط کاری موتور را در محدوده راندمان بالا و با حاشیه مناسب نسبت به خطوط سرج و چوک قرار دهد، بدون اینکه توربین برای تأمین توان مورد نیاز کمپرسور، مجبور به ایجاد فشار پشت بیش از حد شود.

نمودار انطباق نقاط عملکردی موتور در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد و دماهای مختلف محیط در شرایط ارتفاع (۴۰ نقطه کاری) با نقشه کمپرسور توربوشارژر برای سرعت های ۵۸۰۰، ۵۵۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه موتور، در نمودارهای شکل ۱۵ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می شود؛ توربوشارژر Garret GBC20-300 برای موتور نسبتاً کوچک است و سبب انتقال نقاط کاری موتور به سمت ناحیه چوک و افت راندمان در دبی های بالا (دور موتور بالا) می شود. به عبارتی دیگر؛ این توربوشارژر برای رسیدن به فشار بوست مورد نیاز، باید دبی زیادی را در فشار بالا (نسبت فشار بین ۳ و ۳/۵) عبور دهد. در نتیجه؛ نقاط کاری موتور به سمت ناحیه چوک میل می کند و انتظار می رود که فشار پشت هم افزایش یابد (جدول ۸). توربوشارژر Garret GBC22-350 برای موتور نسبتاً بزرگ است و در دورموتورهای پایین و بارهای کم موتور، با نزدیک کردن نقاط کاری به ناحیه سرج، کمپرسور را از محدوده مطلوب عملکرد خود خارج می کند.

همچنین این توربوشارژر برای رسیدن به فشار بوست مورد نیاز در دور موتور بالا (نسبت فشار بین ۳ و ۳/۵)، به سمت ناحیه چوک حرکت می کند. این در حالی است که توربوشارژر GT2252 در دورهای پایین، در حاشیه مناسبی از نواحی چوک و سرج کمپرسور قرار داشته و تأمین فشار بوست مورد نیاز موتور در دورهای بالا، نیازمند دستیابی به نسبت فشار کمتری (در محدوده ۲/۵ و ۳) نسبت به دو توربوشارژر دیگر می باشد.

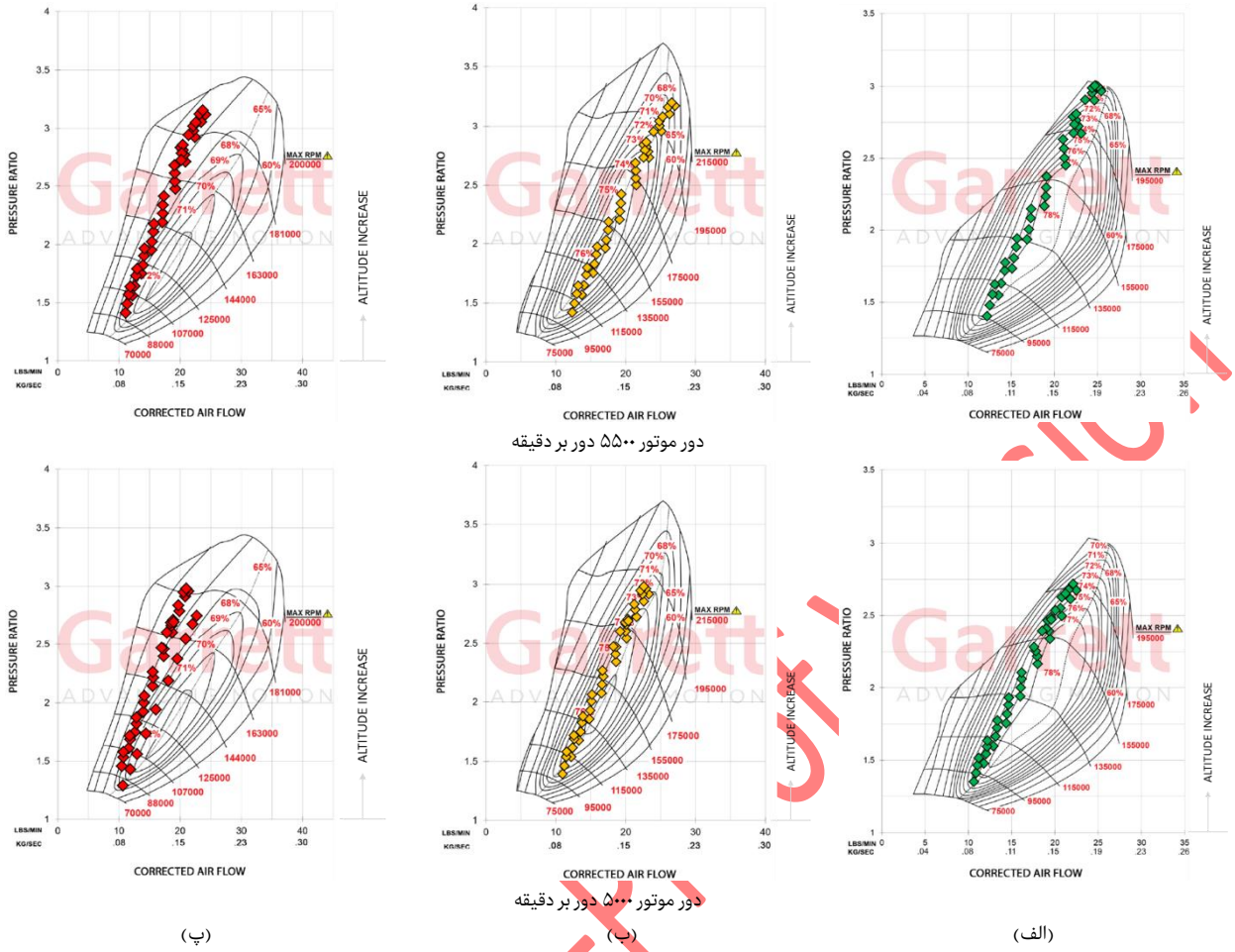


دور موتور ۵۸۰۰ دور بر دقیقه

شکل ۱۵ انطباق نقشه کلیه نقاط کارکردی موتور با نقشه کمپرسور توربوشارژرهای کاندید اصلی انتخاب برای موتور در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد، دماهای مختلف محیط در ارتفاع و سرعت ۵۸۰۰، ۵۵۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، الف) GT-2252، ب) GBC20-300، پ) GBC22-350

Fig.15 The turbochargers major candidate map relate to the engine operation points at 5000, 5500, 5800 rpm, WOT throttle, and various amiant temperature in altitude conditions

Pre-Proof



شکل ۱۵ انطباق نقشه کلیه نقاط کارکردی موتور با نقشه کمپرسور توربوشارژرهای کاندید اصلی انتخاب برای موتور در شرایط تراتل ۱۰۰ درصد، دماهای مختلف محیط در ارتفاع و سرعت ۵۸۰۰، ۵۵۰۰ و ۵۰۰۰ دور بر دقیقه، الف) GT-2252، ب) GBC20-300، پ) GBC22-350 (ادامه)

Fig.15 The turbochargers major candidate map relate to the engine operation points at 5000, 5500, 5800 rpm, WOT throttle, and various amiant temperature in altitude conditions (cont.,)

• مرحله پنجم انتخاب : رتبه بندی و انتخاب توربوشارژر

در این پژوهش؛ برای رتبه بندی و انتخاب نهایی توربوشارژر، از دو رویکرد مکمل شامل "قاعده غلبه همزمان" (Simultaneous Dominance) که یک حالت خاص از "تصمیم گیری چندمعیاره" (Multi-Criteria Decision Making – MCDM) محسوب می شود، و رویکرد تحلیل سلسله مراتبی (AHP) که یک چارچوب جامع برای وزن دهی و رتبه‌دهی فراهم می کند، استفاده شده است [۱۸-۲۰]. بر اساس قاعده غلبه همزمان، اگر یک گزینه در همه معیارهای عملکردی به طور همزمان برتری داشته باشد، نیازی به وزن دهی و اولویت بندی معیارها نیست و انتخاب آن به صورت قطعی و بدون ابهام قابل توجیه است. بنابراین بر اساس این قاعده، توربوشارژری به عنوان مناسب ترین گزینه انتخاب می شود که در همه معیارهای عملکردی مورد مطالعه (راندمان کمپرسور، نسبت فشار غالب کمپرسور، فشار ورودی به توربین)، به طور همزمان برتری داشته باشد. همانطور که در جدول ۱۰ مشاهده می شود، توربوشارژر Garret GT-2252 در هر سه معیار "بیشترین راندمان کمپرسور"، "کمترین نسبت فشار غالب کمپرسور (کاهش بارهای حرارتی و مکانیکی موتور)"، "کمترین فشار ورودی به توربین پایین (کاهش Back Pressure موتور)" به طور همزمان بر توربوشارژرهای Garrett GBC20-300 و Garrett GBC22-350 برتری دارد. بنابراین انتخاب توربوشارژر Garret GT-2252 نه تنها از منظر مهندسی موجه است، بلکه از منظر تصمیم گیری چندمعیاره نیز به عنوان یک راه حل غالب شناخته می‌شود.

برای اطمینان از کمی بودن کامل تصمیم گیری و فراهم کردن چارچوبی قبل تعمیم به توربوشارژرهایی که در آنها هیچ کاندیدی در همه معیارها برتری همزمان ندارد، از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد. بدین منظور؛ سه معیار "راندمان کمپرسور (معیار مطلوب – Benefit)"، "نسبت فشار غالب کمپرسور (معیار نامطلوب – Cost)" و "فشار ورودی به توربین (معیار نامطلوب - Cost)" تعریف و ماتریس مقایسات زوجی معیارها با مقیاس در محدوده ۱ تا ۹ تشکیل و وزن هر معیار به ترتیب برابر با ۰/٦٤٨، ۰/۲۳۰ و ۰/۱۲۲ محاسبه شد. نرخ ناسازگاری CR

In Press, Pre-Proof

ماتریس مقایسات زوجی برابر با ۰/۰۰٤۰۵ می باشد که کمتر از حد مجاز ۰/۱ بوده و سازگاری منطقی قضاوت های مهندسی را تأیید می کند. در ادامه، نرمال سازی مقادیر معیارها با توجه به محدوده مقادیر آنها در جدول ۸ (میانگین راندمان کمپرسور)، نمودارهای شکل ۱۵ (نسبت فشار غالب کمپرسور) و جدول ۱۰ (فشار ورودی به توربین)، در بازه صفر تا ۱ انجام و امتیاز نهایی هر کاندید بر اساس مجموع وزنی و مقادیر نرمالایز شده معیارها محاسبه شد که برای توربوشارژرهای Garret GT-2252، Garrett GBC20-300 و Garrett GBC22-350 به ترتیب ۱ (رتبه اول انتخاب)، ۰/٤۸٤ (رتبه دوم انتخاب) و ۰/۲۹۸ (رتبه سوم انتخاب) می باشد.

جدول ۱۰ مقایسه مشخصات عملکردی کاندیدهای اصلی انتخاب توربوشارژر در نقاط کارکردی موتور

Table 10 The candidate major turbochargers specifications at the engine operating point

Turbocharger Model	Dominate Compressor Efficiency	Dominate Turbine pressure inlet (Back Pressure)	Dominate Compressor Pressure Ratio
Garrett GBC20-300	75 % to 76 %	~ 1.444 (bar)	3 to 3.5
Garrett GBC22-350	71 % to 72 %	~ 1.360 (bar)	3 to 3.5
Garrett GT2252	77 % to 78 %	~ 1.329 (bar)	2.5 to 3

۵- جمع بندی

کار حاضر با هدف شناسایی و انتخاب توربوشارژر مناسب موتور با تدوین "الگوریتم فرآیند انتخاب توربوشارژر" و ارائه "مدل دوقلوی دیجیتال موتور"، بر مبنای شبیه سازی عملکرد موتور در شرایط ارتفاع انجام شد. با این کار، صرفه جویی زیادی در زمان و هزینه فرآیند شناسایی و انتخاب توربوشارژر مناسب حاصل شد و از هزینه های اضافی ناشی از انجام تست های تجربی مختلف جلوگیری گردید. در این فرآیند؛ پس از شناسایی سناریوی عملکرد سیستم هوارسانی موتور (توربوشارژر) در تعامل با پارامترهای عملکردی موتور و شرایطی محیطی آن و استخراج "نقشه سازگاری توربوشارژر با موتور" و "نقشه موتور" تا ارتفاع ۲۳۰۰۰ پا، مناسب‌ترین توربوشارژر موتور با رویکرد حداکثر انطباق نقشه عملکردی کمپرسور با نقشه موتور (نقاط کاری موتور) و ارضای سایر الزامات دستورالعمل‌های موتور، در پنج مرحله مجزا بر مبنای "داده‌های تجربی" و "مدل دوقلوی دیجیتال" موتور انجام شد.

محدودیت ها: در این پژوهش؛ فرآیند انتخاب توربوشارژر صرفاً بر مبنای شاخص های عملکردی موتور و تطابق نقاطی کاری آن با نقشه کمپرسور توربوشارژر انجام شده است. ملاحظات عملی نظیر ابعاد فیزیکی توربوشارژر، محدودیت های نصب بر روی موتور، وزن، هزینه، قابلیت تأمین قطعات و سایر الزامات طراحی محصول در محدوده این مطالعه قرار نداشته است. بررسی همزمان این عوامل در کنار معیارهای عملکردی می تواند در تحقیقات آینده به توسعه یک چارچوب جامع تر برای انتخاب توربوشارژر منجر شود.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیرایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: هیچ تعارض منافعی برای این اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] E. Renaud, M. Johnston, J. Langford, T. Clancy, M. Velazquez, and D. Vos, "Design and initial testing of the perseus a robotic aircraft," Proc. AIAA Aircraft Eng., Technol., Oper. Congr., p. 3902, 1995. doi: 10.2514/6.1995-3902.

[2] S. Alaviyoun and M. Ziabasharhagh, "Experimental thermal investigation of turbocharger in internal combustion engine and considering effect of electrical water pump on heat soak test," Modares Mechanical Engineering, vol. 17, no. 12, pp. 266-274, 2018. dor: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.61.3.

[3] M. H. Shojaeifard, A. Sajedin, and A. Khalkhali, "Effectiveness of Blade Thickness Distribution on the Turbocharger Turbine Aerostatic Performance," Modares Mechanical Engineering, vol. 19, no. 11, pp. 2667-2677, 2019. dor: 20.1001.1.10275940.1398.19.11.3.7.

[4] H. Tabatabaei and M. Boroomand, "Comparing between 1D & 3D Flow Analysis in the On-Engine Small Turbocharger Experimentally and Numerically," Modares Mechanical Engineering, vol. 11, no. 4, pp. 75-88, 2012. dor: 20.1001.1.10275940.1390.11.4.2.6

[5] Y. Fass and L. Tartakovsky, "Limitations of two-Stage turbocharging at high flight altitudes," SAE Int. J. Engines, vol. 11, no. 5, pp. 511-524, 2018. doi: 10.4271/03-11-05-0034.

[6] M. Bazaz zadeh, s. kheradmand, and s. mirzali, "Experimental Investigation of the Performance of a Turbocharged Wankel Engine at High Altitude Along with the Development of a Performance Prediction Model," Modares Mechanical Engineering, vol. 25, no. 6,pp. 387-402, 2025. doi: 10.48311/mme.2025.24039.

[7] H. Mansouri and F. Ommi, "Performance prediction of aircraft gasoline turbocharged engine at high-altitudes," Applied Thermal Engineering, vol. 156, pp. 587-596, 2019. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.116.

[8] M. Aghaseyedmirzabozorg, S. Kheradmand, and M. Khodaparast, "A simplified laboratory set up for testing the behavior of a turbocharged engine in a

In Press Pre-Proof Version

high-altitude air engine using modeling," Aerosp. Knowl. Technol. J., vol. 10, no. 2, pp. 55-69, 2022. dor: 20.1001.1.23221070.1400.10.2.4.1.
[9] M. Agha Seyed Mirzabozorg, S. Kheradmand, and A. Roueini, "A C-programming code for selecting the optimum turbocharged propulsion system for UAVâ€™s," Modares Mechanical Engineering, vol. 18, no. 1, pp. 39-50, 2018. dor: 20.1001.1.10275940.1397.18.1.55.2.
[10] " Operators Manual for Rotax Engine Type 915 i A / C2 ۴Series," ed: BRP-Rotax GmbH & Co KG., 2022.
[11] O. Emmanuel Olufisayo, F. Liswaniso Inambao, and R. Stopforth, "GT-Power for Internal Combustion Engine Simulation: A Review," Journal of Propulsion Technology, vol. 46 No. 1, pp. 1161-1177, 2025.
[12] N .J. Watson, M. S., "Turbocharging the Internal Combustion Engine," 1982.
[13] J. Heywood, "Internal combustion engine fundamentals," 2018.
[14] " Turbochargers, Intercoolers, Valves, Accessories Performance Catalogue," vol. 9, ed: Garrett Motion Inc., 202.3.
[15] " Installation Manual for Rotax Engine Type 915 i A / C24 Series," ed: BRP-Rotax GmbH & Co KG., 2024.
[16] " Maintenance Manual Line for Rotax Engine Type 915 i A / C24 Series," ed: BRP-Rotax GmbH & Co KG., 2025.
[17] " Maintenance Manual Heavy for Rotax Engine Type 915 i A / C24 Series," ed: BRP-Rotax GmbH & Co KG., 2021.
[18] R. de FSM Russo and R. Camanho, "Criteria in AHP: A systematic review of literature," Procedia computer science, vol. 55, pp. 1123-1132, 2015. doi: 10.1016/j.procs.2015.07.081.
[19] A. Tiwari, A. K. Shukla, Q .D. Lohani, and P. K. Muhuri, "Exploring Multi-Criteria Decision Making through Intuitionistic Fuzzy Sets: A Comprehensive Overview," Applied Soft Computing, p. 116492, 2026. doi: 10.1016/j.asoc.2026.116492.
[20] T. L. Saaty, "The analytic hierarchy process," 1980.

In Press, Pre-Proof Version