Archive of SID

طراحی مفهومی موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800

محمّد اخلاقی[1]، شاداب جزایری مقدس[2]، یحیی عزیزی[3]

1- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران – تهران

3- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران – تهران

چکیده

توربین‌های گاز صنعتی به منظور تولید توان در نیروگاه‌های تولید توان و به منظور تقویت فشار در ایستگاه‌های پمپاژ خطوط انتقال نفت و گاز کاربردهای وسیعی دارند. تولید توربین‌های گاز صنعتی هزینه‌ی بالایی را به دنبال دارد. از این رو در سال‌های اخیر تولید توربین‌های گاز صنعتی مشتق‌شده از صنایع هوایی مورد توجه قرار گرفته است. به این منظور، بخش ژنراتور گاز موتور هوایی جدا شده و با اعمال تغییراتی در موتور، آن را به موتور صنعتی تبدیل می‌کنند. یکی از مزایای این کار این است که ژنراتور موتور هوایی دارای بازده‌ی بالاتری است و موجب می‌شود که بازده‌ی سیکل توربین گاز صنعتی نیز بالاتر باشد. در کار حاضر، موتور هوایی Trent 800 مورد مطالعه قرار گرفته و از آن برای طراحی توربین گاز صنعتی استفاده شده است. به منظور مدل‌سازی موتورهای هوایی و صنعتی از نرم‌افزار GasTurb استفاده شده است. در این مطالعه، دو روش مختلف برای تبدیل موتور هوایی به توربین گاز صنعتی بررسی شده و نتایج آن ارائه گردیده است. در یکی از این روش‌ها که از محور فشار ضعیف حذف شده است، توان محوری تولیدی توسط توربین گاز صنعتی 46,97 مگاوات می‌باشد. در روش دیگر که با افزودن طبقات اول کمپرسور به جای فن همراه است، توان محوری تولیدی تا 60,58 مگاوات افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: *موتور هوایی-توربین گاز صنعتی-توربین گاز مشتق‌شده-توربین توان-منحنی عملکرد-عملکرد خارج از طرح*

مقدمه

تمام توربین‌های گاز به جز توربین‌های گاز هوایی و هواپیمایی، به عنوان توربین‌های گاز صنعتی شناخته می‌شوند. توربین گاز صنعتی اساساً یک موتور توربوشفت می‌باشد. توربین‌های گاز در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به عنوان محرک ژنراتور، کمپرسور و پمپ و در نیروگاه‌های حرارتی به عنوان محرک ژنراتور استفاده می‌شوند، [1].

در ابتدا توربین‌های گاز عمدتاً در صنعت هواپیمایی مورد استفاده قرار می‌گرفت. با افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی و لزوم استفاده از ماشین‌هایی با حجم کم، سرمایه‌ی اولیه‌ی پایین و زمان راه‌اندازی کوتاه برای تبدیل انرژی گرمایی به کار مکانیکی، استفاده از توربین‌های گاز در صنعت گسترش پیدا کرد.

توربین‌های گاز صنعتی برخلاف توربین‌های هوایی دارای محدودیت اندازه و وزن نیستند. این موتورها دارای سرعت گاز خروجی تقریباً صفر هستند. بعلاوه، مدت زمان عملکردی این موتورها بین زمان تعمیرات کلی بسیار طولانی و در حدود 100000 ساعت کاری است، [2].

تا کنون کارهای مختلفی در این زمینه انجام شده است. تعدادی از شرکت‌های معتبر تولید توربین گاز، برخی از موتورهای هوایی تولید شده را به موتورهای صنعتی تبدیل کرده‌اند.

شرکت رولزرویس یکی از معتبرترین شرکت‌های سازنده‌ی موتورهای هوایی است. موتورهای هوایی تولید شده توسط این شرکت دارای پیکربندی سه محوره هستند. شرکت رولزرویس موتور توربوفن هوایی Trent 800 را به توربین گاز صنعتی Trent 60 تبدیل کرده است. توربین گاز Trent 60 نیز دارای پیکربندی سه محوره می‌باشد. از آنجایی که این توربین گاز از موتور هوایی مشتق شده است، نسبت به سایر توربین‌های گاز با پایه‌ی صنعتی، زمان آغاز به کار (استارت) و رسیدن به بار کامل کمتری دارد، [3].

شرکت رولزرویس، موتور توربوفن هوایی Trent 800 را در کاربردی دیگر به توربین گاز MT30 تبدیل کرده است. این توربین گاز یک توربین توان با کاربرد دریایی است و در حدود 80 درصد ساختار آن با موتور Trent 800 مشترک است. برای تولید توان از این توربین گاز، یک توربین توان چهار طبقه به آن اضافه شده است. این توربین توان برای کاربردهای مختلف با دورهای 3300 و 3600 دور در دقیقه کار می‌کند. توان محوری تولیدی توسط این موتور، 36 مگاوات می‌باشد، [4].

شرکت جنرال الکتریک نیز یکی از معتبرترین شرکت‌های ساخت موتورهای هوایی است. موتورهای هوایی ساخت این شرکت دارای پیکربندی دو محوره هستند. شرکت جنرال الکتریک، موتور توربوفن هوایی ساخت خود با نام CF6 را به توربین گاز صنعتی تبدیل کرده است. توربین گاز LM6000 یکی از توربین‌های گاز مشتق‌شده از موتور هوایی CF6 است. در این توربین مشتق‌شده، فن موتور هوایی با یک طبقه کمپرسور جایگزین شده است. از مهم‌ترین مزایای این توربین گاز توانایی عملکرد آن با دو نوع سوخت گاز و مایع می‌باشد. توان تولیدی توسط توربین گاز LM6000، حدود 45 مگاوات می‌باشد، [5].

در جای دیگر، شرکت جنرال الکتریک، موتور هوایی CF6 را به توربین گاز صنعتی LM2500 تبدیل کرده است. این توربین گاز دارای پیکربندی یک محوره است و برای تولید توان، توربین توان آزاد به آن افزوده شده است. هفت طبقه از کمپرسور شانزده طبقه‌ی این توربین گاز دارای پره‌های استاتور متغیر می‌باشند. موتور CF6 در بخش کمپرسور پرفشار خود دارای 5 طبقه استاتور متغیر می‌باشد. توربین گاز LM2500 بعد از یک سری تغییرات و بهینه‌سازی از جمله افزودن یک طبقه کمپرسور در ورودی، بهبود هندسه‌ی ورودی توربین و تغییر پروفیل پره‌های روتور کمپرسور و توربین توان آزاد، به توربین گاز +LM2500 تبدیل شد. این تغییرات، توان تولیدی را از حدود 25 مگاوات تا 30 مگاوات (حدود 20 درصد) افزایش داد، [6].

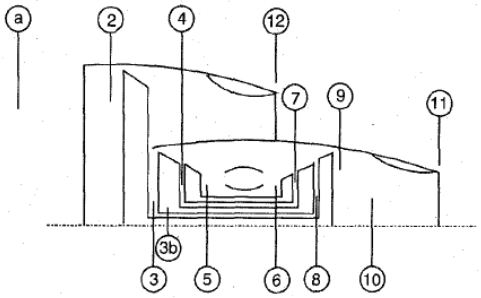
موتور توربوفن سه محوره

www.SID.ir

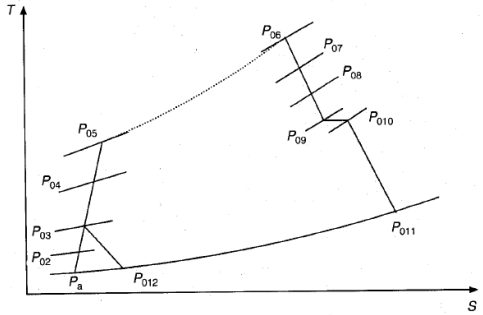
Archive of SID

موتور Trent 800 که در کار حاضر مورد بررسی قرار گرفته و از آن برای طراحی موتور صنعتی استفاده شده است، دارای پیکربندی سه محوره می‌باشد. این پیکربندی از یک محور فشار ضعیف تشکیل شده است که در آن، فن توسط توربین فشار ضعیف به حرکت درمی‌آید. محور فشار متوسط نیز دارای کمپرسور فشار متوسط بوده و توسط توربین فشار متوسط به حرکت در می‌آید. همچنین، یک محور فشار قوی نیز موجود می‌باشد که کمپرسور فشار قوی و توربین فشار قوی روی آن قرار می‌گیرند. از جمله دیگر موتورهایی که از این پیکربندی استفاده می‌کنند می‌توان به موتورهای RB211 و Trent 900 اشاره نمود.

طرح شماتیک یک موتور توربوفن معمول با پیکربندی مورد بحث در شکل (1) نشان داده شده است. نمودار دما-آنتروپی معادل با این پیکربندی نیز در شکل (2) آورده شده است. بخش‌های مختلف این پیکربندی در ادامه مورد بحث قرار گرفته و روابط مربوط به آن‌ها ارائه گردیده است.



شکل 1- پیکربندی سه محوره موتور توربوفن، [1].



شکل2- نمودار دما-آنتروپی معادل با سیکل موتور توربوفن سه محوره، [1].

ورودی:

ورودی موتور هوایی، بخش بحرانی آن می‌باشد که تأثیر زیادی روی بازده‌ی موتور و ایمنی هواپیما دارد. مهم‌ترین مطلب در طراحی ورودی، کمینه کردن افت فشار در ورودی تا رسیدن جریان به کمپرسور است تا اطمینان حاصل شود که در تمام شرایط پروازی، جریان با سرعت و فشار یکنواخت وارد کمپرسور می‌شود. جریان غیریکنواخت ممکن است منجر به خفقان (سرج) کمپرسور شود که نتیجه‌ی آن از کار افتادن موتور یا آسیب‌های مکانیکی ناشی از لرزش تیغه‌ها (به دلیل ناپایداری آیرودینامیکی) می‌باشد. هرچند با طراحی خوب ورودی نیز دوری از انحراف جریان طی مانورهای مختلف موتور بسیار دشوار است، [7].

شرایط ورودی به موتور، دما و فشار محیط (T_a و P_a) می‌باشند. ورودی دارای بازده‌ی آیزنتروپیک (η_d) می‌باشد. پس، برای سرعت پروازی M_a، فشار و دمای سکون در خروجی ناحیه‌ی ورودی به ترتیب با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$P_{02} = P_a\left(1+\eta_d\frac{\gamma_a-1}{2}\right)^{\gamma_a/(\gamma_a-1)} \quad (1)$$

$$T_{02} = T_{0a} = T_a\left(1+\eta_d\frac{\gamma_a-1}{2}M_a^2\right)^{\gamma_a/(\gamma_a-1)} \quad (2)$$

در این روابط، η_d بازده‌ی آیزنتروپیک دیفیوزر و γ_a نسبت گرماهای ویژه‌ی جریان هوا می‌باشند.

فن:

با توجه به نمودار شکل (2) فشار ورودی به فن (خروجی از بخش ورودی) به P_{02} رسیده است. حال با در نظر گرفتن نسبت فشار فن (π_f) داریم:

$$P_{03} = P_{02}\times\pi_f \quad (3)$$

$$T_{03} = T_{02}\left[1+\frac{1}{\pi_f}\left(\pi_f^{(\gamma_a-1)/\gamma_a}-1\right)\right] \quad (4)$$

کمپرسور فشار متوسط:

با در نظر گرفتن نسبت فشار کمپرسور فشار متوسط (π_{LPC}) داریم:

$$P_{04} = P_{03}\times\pi_{IPC} \quad (5)$$

$$T_{04} = T_{03}\left[1+\frac{1}{\pi_{IPC}}\left(\pi_{IPC}^{(\gamma_a-1)/\gamma_a}-1\right)\right] \quad (6)$$

کمپرسور فشار قوی:

حال، با در نظر گرفتن نسبت فشار کمپرسور فشار قوی (π_{HPC})، روابط زیر برای این جزء حاکم هستند:

$$P_{05} = P_{04}\times\pi_{HPC} \quad (7)$$

$$T_{05} = T_{04}\left[1+\frac{1}{\pi_{HPC}}\left(\pi_{HPC}^{(\gamma_a-1)/\gamma_a}-1\right)\right] \quad (8)$$

محفظه‌ی احتراق:

فشار خروجی از محفظه‌ی احتراق با استفاده از افت فشار در محفظه‌ی احتراق به دست می‌آید:

$$P_{06} = P_{05} - \Delta P_{CC} \quad (9)$$

دمای خروجی از محفظه‌ی احتراق بیشترین دمای موجود در موتور بوده و مشخص است. زیرا این دما به سطح تحمل مواد به کار برده شده بستگی دارد. بنابراین، نسبت سوخت به هوا با استفاده از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$f = \frac{\left(C_{Ph}/C_{PC}\right)\left(T_0/T_{05}\right)-1}{\eta_b\left(Q_R/C_{PC}T_{05}\right)-\left(C_{Ph}/C_{PC}\right)\left(T_{06}/T_{05}\right)} \quad (10)$$

در این رابطه، C_{Ph} و C_{Pc} به ترتیب بیانگر گرمای ویژه در فشار ثابت برای گازهای داغ و هوای سرد می‌باشند. همچنین، Q_R و η_b نشان‌دهنده‌ی گرما و بازده‌ی احتراق هستند.

توربین فشار قوی:

برای محاسبه‌ی دما و فشار خروجی از توربین فشار قوی، باید یک تعادل انرژی بین کمپرسور فشار قوی و توربین فشار قوی نوشته شود که به صورت زیر قابل بیان است:

$$W_{HPC} = W_{HPT} \quad (11)$$

$$\dot{m}_a C_{PC}\left(T_{05}-T_{04}\right) = \dot{m}_a\left(1+f\right)C_{Ph}\left(T_{06}-T_{07}\right) \quad (12)$$

از رابطه‌ی بالا، دمای خروجی از توربین T_{07} تعیین می‌شود. بعلاوه، با مشخص بودن بازده‌ی آیزنتروپیک توربین فشار بالا (η_{HPT}) و با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان فشار خروجی از توربین فشار بالا را تعیین نمود:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\frac{P_{06}}{P_{05}}=\left[1-\frac{1}{\eta_t}\left(1-\frac{T_{06}}{T_{05}}\right)\right]^{\gamma_g/(\gamma_g-1)} \quad (13)$$

در این رابطه، γ_g نسبت گرماهای ویژه‌ی گازهای داغ خروجی از محفظه‌ی احتراق می‌باشد.

توربین فشار متوسط:

مانند توربین فشار قوی، برای به دست آوردن فشار و دمای خروجی از توربین فشار متوسط نیز باید تعادل انرژی بین کمپرسور و توربین فشار متوسط نوشته شود. در نتیجه داریم:

$$W_{IPC}=W_{IPT} \quad (14)$$

$$\dot{m}_a C_{PC}\left(T_{04}-T_{03}\right)=\dot{m}_a\left(1+f\right)C_{Ph}\left(T_{07}-T_{08}\right) \quad (15)$$

در نتیجه برای محاسبه‌ی دما و فشار خروجی از توربین فشار متوسط داریم:

$$T_{08}=T_{07}-\left(\frac{C_{PC}}{C_{Ph}\left(1+f\right)}\right)\left(T_{04}-T_{03}\right) \quad (16)$$

$$P_{08}=P_{07}\left(1-\frac{T_{07}-T_{08}}{\eta_{t2}\times T_{07}}\right)^{\gamma_g/(\gamma_g-1)} \quad (17)$$

توربین فشار ضعیف:

برای به دست آوردن فشار و دمای خروجی از توربین فشار ضعیف نیز باید تعادل انرژی بین کمپرسور و توربین فشار ضعیف نوشته شود. در نتیجه داریم:

$$W_{LPC}=W_{LPT} \quad (14)$$

$$\dot{m}_a C_{PC}\left(T_{05}-T_{04}\right)=\dot{m}_a\left(1+f\right)C_{Ph}\left(T_{08}-T_{09}\right) \quad (15)$$

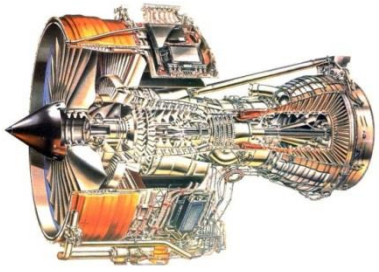
در نتیجه برای محاسبه‌ی دما و فشار خروجی از توربین فشار متوسط داریم:

$$T_{09}=T_{08}-\left(\frac{C_{PC}}{C_{Ph}\left(1+f\right)}\right)\left(T_{05}-T_{04}\right) \quad (16)$$

$$P_{09}=P_{08}\left(1-\frac{T_{08}-T_{09}}{\eta_{t2}\times T_{08}}\right)^{\gamma_g/(\gamma_g-1)} \quad (17)$$

توربین گاز Trent 800:

این موتور دارای پیکربندی سه محوره بوده و از نوع توربوفن می‌باشد. این موتور دارای 8 طبقه کمپرسور فشار متوسط، 6 طبقه کمپرسور فشار بالا، 6 طبقه توربین فشار بالا، 1 طبقه توربین فشار متوسط و 5 طبقه توربین فشار ضعیف می‌باشد. شکل (3) موتور Trent 800 را نشان می‌دهد.



شکل 3- موتور Trent 800 ساخت شرکت رولزرویس.

بازده‌های اجزاء مختلف موتور که در مدل‌سازی این موتور در برنامه کامپیوتری مورد استفاده قرار می‌گیرد، در جدول (1) ارائه گردیده است.

جدول 1- مشخصات هندسی و بازده‌های مختلف موتور Trent 800.

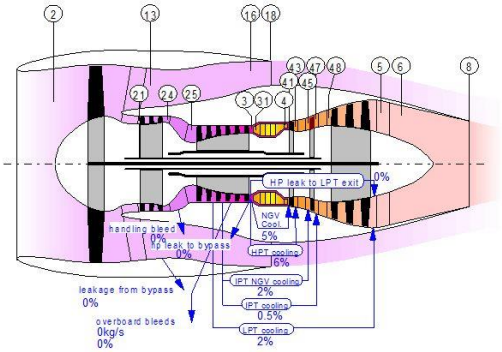
پارامتر	مقدار
بازده‌ی ورودی موتور (η_I)	0,98
بازده آیزنتروپیک فن (η_{Pf})	0,90
بازده آیزنتروپیک کمپرسور (η_{PC})	0,86
بازده آیزنتروپیک توربین فشار قوی (η_{PHPT})	0,85
بازده آیزنتروپیک توربین فشار متوسط (η_{PIPT})	0,89
بازده آیزنتروپیک توربین فشار ضعیف (η_{PLPT})	0,91
بازده مکانیکی (η_m)	0,99
افت فشار محفظه‌ی احتراق (ΔP_{CC})	0,04
بازده احتراق (η_b)	0,99

همچنین، مشخصات طراحی موتور در دو شرایط عملکردی کروز و برخاستن، در جدول (2) آورده شده است. پس از انجام مدل‌سازی، نتایج حاصل از نرم‌افزار GasTurb با استفاده از اطلاعات موجود در این جدول، صحه‌گذاری خواهند شد.

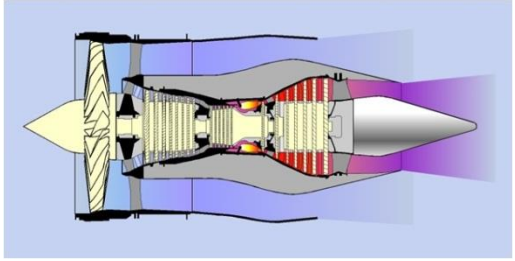
همچنین باید ذکر کرد که سرعت دورانی محور فشار ضعیف موتور Trent 800 برابر با 3300 دور در دقیقه، سرعت دورانی محور فشار متوسط برابر با 7000 دور در دقیقه و سرعت دورانی محور فشار قوی 10611 دور در دقیقه می‌باشد.

مدل‌سازی توربین گاز Trent 800

به منظور مدل‌سازی یک موتور در نرم‌افزار GasTurb ابتدا باید سیکل ترمودینامیکی مورد نظر انتخاب شود. این موتور از نوع توربوفن بوده و دارای پیکربندی دو محوره می‌باشد. لذا سیکل ترمودینامیکی متناظر در نرم‌افزار انتخاب شده و در شکل (4) نشان داده شده است. همچنین، سیکل موتور Trent 800 نیز در شکل (5) نشان داده شده است.



شکل 4- سیکل ترمودینامیکی متناظر با موتور Trent 800 در نرم‌افزار GasTurb.



شکل 5- نمایی از موتور Trent 800 و اجزاء آن.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول (2) مشخصات عملکردی موتور Trent 800 در نقطه طراحی و نقطه خارج از طرح.

پارامتر	نقطه‌ی طرح (Take-Off)	نقطه خارج از طرح (کروز)
ارتفاع (کیلومتر)	0,0	10,670
عدد ماخ	0,0	0,85
نسبت فشار فن	1,52	1,44
نسبت فشار کمپرسور فشار متوسط	6,1	5,6
نسبت فشار کمپرسور فشار قوی	4,4	4,15
نسبت فشار کل	40,8	33,56
نسبت کنارگذر	5,8	6,4
دمای ورودی به توربین (کلوین)	1692	1328
دبی جرمی هوا (کیلوگرم بر ثانیه)	1200	445
تراست (کیلونیوتون)	407,5	62,0
مصرف سوخت ویژه $(mg/N.s)$	9,7	15,9

همانگونه که در جدول (2) ارائه گردیده است، اطلاعات این موتور در دو نقطه در دست است. نقطه‌ی طراحی که شرایط برخاستن از زمین می‌باشد و نقطه‌ی خارج از طرح که شرایط کروز در نظر گرفته شده است. یک موتور هوایی بیشترین تراست تولیدی را در حالت برخاستن از زمین (Take-Off) دارد. از آنجا که قرار است از این موتور برای تولید توان صنعتی استفاده شود و هدف تولید بیشترین توان است، بنابراین نقطه‌ی مورد مطالعه، نقطه‌ی برخاستن از زمین و شرایط موتور و اجزاء آن در این نقطه می‌باشد.

به منظور بررسی عملکرد نرم‌افزار و مدل مورد استفاده در نرم‌افزار، موتور Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین مدل‌سازی شده و عملکرد خارج از طرح آن در نقطه‌ی کروز شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از نرم‌افزار در حالت کروز و برخاستن از زمین به ترتیب در جدول (3) و (4) ارائه گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود، نتایج حاصل از مدل‌سازی مطابقت خوبی با داده‌های موجود دارد.

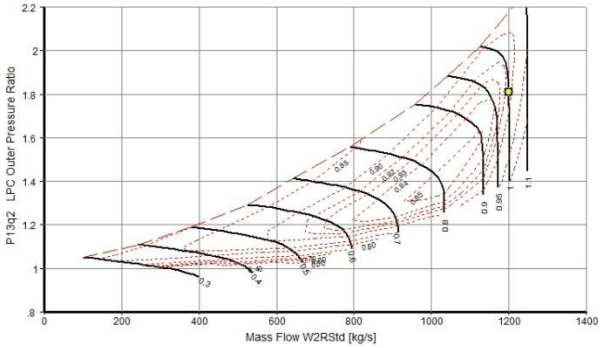
جدول 3- مشخصات مدل شده موتور Trent 800 در نقطه خارج از طرح (کروز)

پارامتر	مقدار
دبی جرمی هوا (kg/s)	453,61
دبی جرمی سوخت (kg/s)	0,97
تراست (kN)	61,10
مصرف سوخت ویژه تراست $(g/kN.s)$	16,02
نسبت فشار کل	33,28
بازده‌ی هسته موتور (%)	53,53

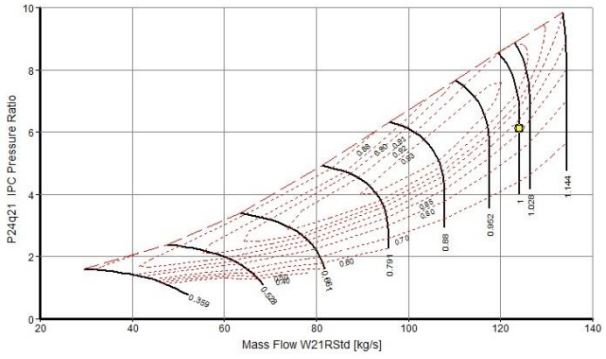
جدول 4- مشخصات مدل شده موتور Trent 800 در نقطه طراحی (برخاستن از زمین)

پارامتر	مقدار
دبی جرمی هوا (kg/s)	1200,00
دبی جرمی سوخت (kg/s)	3,95
تراست (kN)	407,80
مصرف سوخت ویژه تراست $(g/kN.s)$	9,70
نسبت فشار کل	40,80
بازده‌ی هسته موتور (%)	48,43

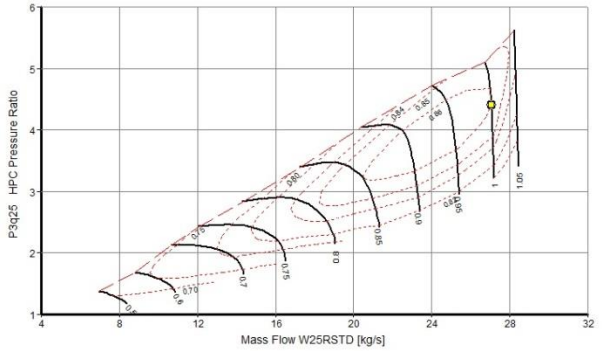
در ادامه نمودارهای عملکردی اجزاء توربوماشینی توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین ارائه شده است. در شکل‌های (6) تا (8) به ترتیب نمودارهای عملکردی فن، کمپرسور فشار متوسط و کمپرسور فشار قوی نشان داده شده است. این منحنی‌ها نسبت فشار را بر حسب دبی جرمی اصلاح شده و به وسیله‌ی خطوط سرعت ثابت نشان می‌دهند. همچنین، خطوط بازده ثابت نیز به وسیله‌ی خط‌چین نشان داده شده‌اند



شکل 6- منحنی عملکردی فن توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین و نقطه عملکرد آن.

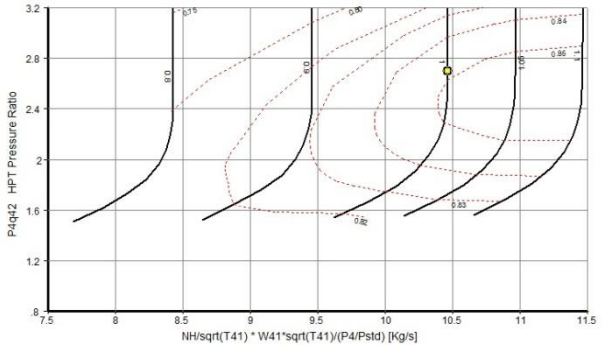


شکل 7- منحنی عملکردی کمپرسور فشار متوسط توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین و نقطه عملکرد آن.



شکل 8- منحنی عملکردی کمپرسور فشار قوی توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین و نقطه عملکرد آن.

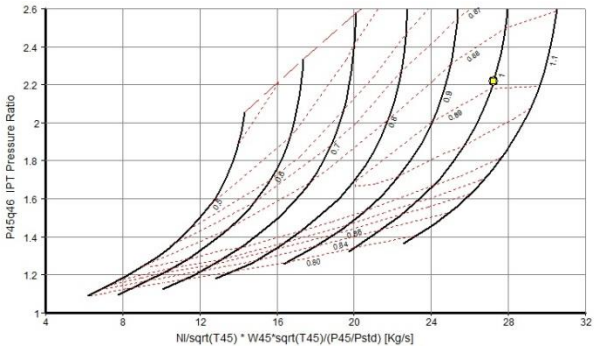
منحنی‌های عملکردی توربین‌های فشار قوی، فشار متوسط و فشار ضعیف نیز به ترتیب در شکل‌های (9) تا (11) آورده شده‌اند.



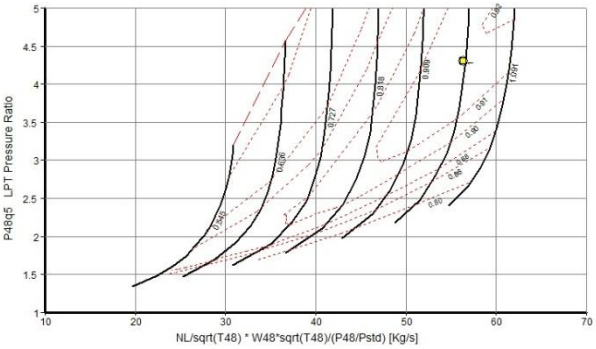
شکل 9- منحنی عملکردی توربین فشار قوی توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین و نقطه عملکرد آن.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل 10- منحنی عملکردی توربین فشار متوسط توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین و نقطه عملکرد آن.



شکل 11- منحنی عملکردی توربین فشار ضعیف توربین گاز Trent 800 در شرایط برخاستن از زمین و نقطه عملکرد آن.

شبیه‌سازی توربین گاز صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800:

به منظور طراحی توربین گاز مشتق شده از موتور هوایی Trent 800 روش‌های مختلفی را می‌توان مورد استفاده قرار داد. انتخاب این روش‌ها و استفاده از آن‌ها به موارد زیادی نظیر نوع نیاز، توانایی ساخت، نوع کاربرد و ... بستگی دارد. در کار حاضر تلاش بر آن است که حالت‌های مختلفی را مورد مطالعه قرار دهیم.

برای تبدیل موتور هوایی به توربین گاز صنعتی، باید فن حذف شود. در این حالت، کمپرسورهای فشار قوی و فشار متوسط در نقطه‌ی عملکرد خود کار نمی‌کنند. از طرفی، موتور صنایع هوایی، بیشترین نیروی تراست را در حالت برخاستن از زمین تولید می‌نماید. بنابراین، می‌توان در طراحی موتور صنعتی مشتق‌شده، با اضافه کردن چند طبقه کمپرسور به کمپرسور فشار متوسط و تولید نسبت فشار متناظر با فن، کمپرسورها را به نقطه‌ی عملکردی متناظر با شرایط برخاستن از زمین نزدیک کرد. همچنین، از آنجا که سوخت مصرفی در موتورهای صنعتی، غالباً گاز طبیعی می‌باشد، در کار حاضر نیز برای موتور صنعتی مشتق‌شده این سوخت را در نظر می‌گیریم.

به منظور تولید توان از هسته‌ی موتور صنایع هوایی می‌توان با حذف فن، یک پیکربندی دو محوره را ایجاد کرد و چند طبقه توربین را به عنوان توربین توان آزاد اضافه نمود. این توربین توان آزاد از نظر مکانیکی مستقل بوده و از نظر آیرودینامیکی به خروجی توربین فشار ضعیف کوپل می‌شود. دور دورانی این توربین توان باید متناسب با فرکانس برق تولیدی باشد. این طرح را می‌توان در دو حالت مورد استفاده قرار داد. حالت اول این که تنها فن را حذف کنیم و کمپرسورها از نقطه‌ی طرح خارج شوند و حالت دوم این که به ابتدای توربین گاز، دو طبقه کمپرسور اضافه شود تا عملکرد کمپرسورها به نقطه‌ی متناظر با عملکرد موتور هوایی در شرایط برخاستن از زمین نزدیک شود.

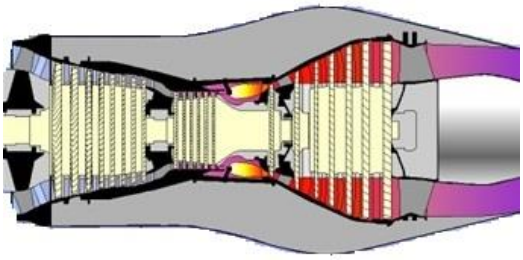
به طور مختصر در مطالعه‌ی حاضر دو روش زیر را برای طراحی توربین گاز صنعتی مشتق‌شده در نظر گرفت:

1- موتور صنعتی مشتق‌شده با حذف فن و نازل موتور هوایی به صورت پیکربندی دو محوره و افزودن توربین توان آزاد.

2- موتور صنعتی مشتق‌شده با حذف فن و نازل موتور هوایی به صورت پیکربندی دو محوره، جایگزین کردن طبقات کمپرسور و افزودن توربین توان آزاد.

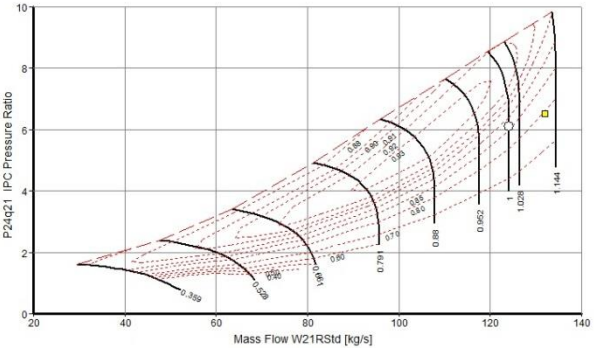
1- موتور صنعتی مشتق‌شده با حذف فن و نازل موتور هوایی به صورت پیکربندی دو محوره و افزودن توربین توان آزاد

به منظور شبیه‌سازی عملکرد توربین گاز صنعتی مشتق شده از توربین گاز Trent 800 ابتدا باید عملکرد این توربین گاز را در حالتی که فن ورودی موتور، نازل خروجی و داکت کنارگذر آن حذف می‌شوند مورد بررسی قرار داد. شکل شماتیک این توربین گاز در حالت حذف فن، نازل و داکت کنارگذر در شکل (12) نشان داده شده است.



شکل (5-15) شماتیک توربین گاز Trent 800 با حذف فن و نازل.

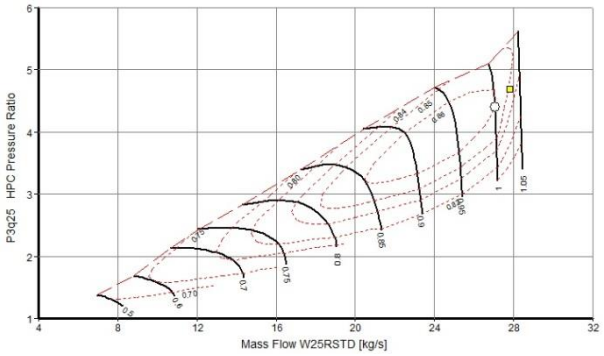
این موتور، در نرم‌افزار GasTurb مدل‌سازی شده و نتایج آن در ادامه ارائه گردیده است. برای تبدیل موتور هوایی به موتور صنعتی، در نظر گرفته شده است که دمای ورودی به توربین ثابت باشد، یعنی دمای ورودی به توربین در موتور هوایی و موتور صنعتی مشتق شده برابر است. در نمودارهای شکل (13) و (14) به ترتیب منحنی عملکردی کمپرسورهای فشار متوسط و فشار قوی نشان داده شده است. نقطه‌ی دایره‌ای توخالی، نقطه‌ی طرح موتور (کروز) و نقطه‌ی مربعی توپر، نقطه‌ی عملکرد موتور را روی زمین و بدون فن و نازل نشان می‌دهند. همانطور که در نمودارها نیز مشخص است، با حذف فن و نازل موتور و در حالی که توربین گاز روی سطح زمین عمل می‌کند، سرعت دورانی کمپرسورها افزایش می‌یابد. این در حالی است که در کمپرسور فشار متوسط و در فشار قوی، نسبت فشار افزایش می‌یابد. این منحنی‌ها، افزایش دبی جرمی اصلاح شده را نشان می‌دهند در حالی که دبی جرمی هوای عبوری از کمپرسورها کاهش یافته است.



شکل 13- منحنی عملکردی کمپرسور فشار متوسط توربین گاز Trent 800 و نقاط عملکردی در حالت طرح و در حالت حذف فن و نازل.

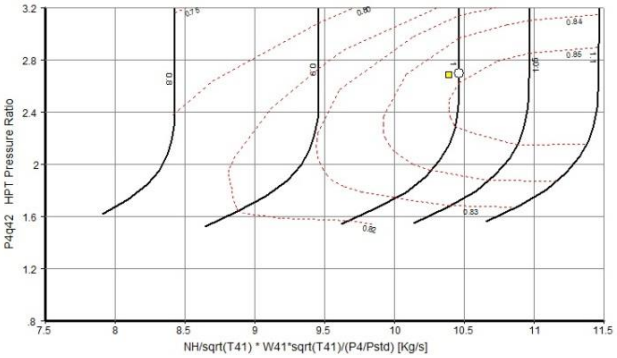
www.SID.ir

Archive of SID

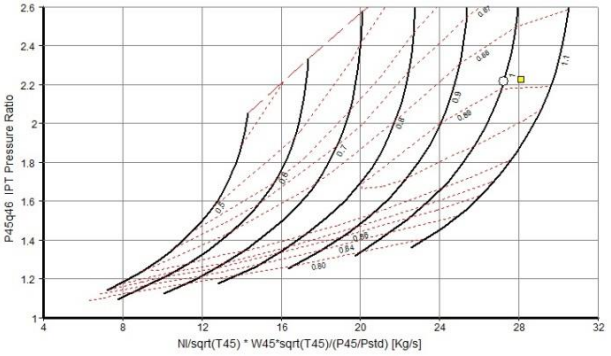


شکل 14- منحنی عملکردی کمپرسور فشار قوی توربین گاز Trent 800 و نقاط عملکردی در حالت طرح و در حالت حذف فن و نازل.

همچنین، منحنی‌های عملکردی توربین‌های فشار قوی و فشار متوسط، به ترتیب در شکل‌های (15) و (16) نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها نیز نقطه‌ی دایره‌ای توخالی، نقطه‌ی حالت طرح موتور و نقطه‌ی مربعی توپر، نقطه‌ی عملکرد موتور را روی زمین و بدون فن و نازل نشان می‌دهند.



شکل 15- منحنی عملکردی توربین فشار قوی توربین گاز Trent 800 و نقاط عملکردی در حالت طرح و در حالت حذف فن و نازل.



شکل 16- منحنی عملکردی توربین فشار متوسط توربین گاز Trent 800 و نقاط عملکردی در حالت طرح و در حالت حذف فن و نازل.

به منظور مدل‌سازی موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 باید پارامترهای عملکردی حاصل از شبیه‌سازی موتور هوایی در حالت حذف فن و نازل را استخراج نموده و از آن‌ها استفاده نمود. در جدول (5) پارامترهای عملکردی موتور Trent 800 پس از حذف فن و نازل ارائه شده و با پارامترهای استخراجی از مدل‌سازی موتور هوایی در نقطه‌ی طرح (کروز) و نقطه‌ی خارج از طرح (برخاستن از زمین) مقایسه شده است.

جدول 5- پارامترهای عملکردی موتور Trent 800 و اجزاء آن در سه حالت کروز، برخاستن از زمین و حذف فن.

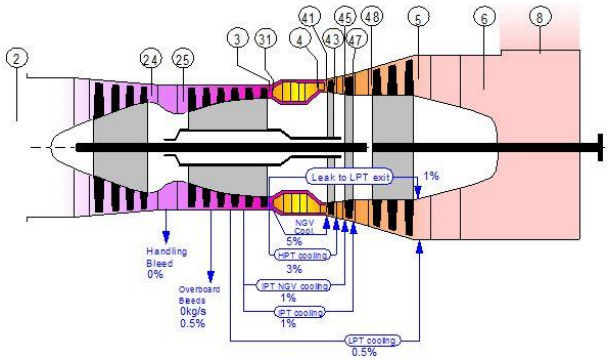
پارامتر	کروز	برخاستن از زمین	مشتق شده
نسبت فشار کمپرسور فشار قوی	4,15	4,4	4,68
بازده آیزنتروپیک کمپرسور فشار قوی	0,86	0,86	0,85
نسبت فشار کمپرسور فشار متوسط	5,6	6,1	6,15
بازده آیزنتروپیک کمپرسور فشار متوسط	0,90	0,61	0,79
دبی جرمی عبوری از هسته موتور (کیلوگرم بر ثانیه)	445	1200	132,484
سرعت دورانی محور فشار قوی (دور در دقیقه)	9268	10611	10520
سرعت دورانی محور فشار متوسط (دور در دقیقه)	5932	7000	7251

از اطلاعات ارائه شده در جدول (5) مشخص است که با حذف فن و نازل، دبی جرمی هوای عبوری از توربین گاز مشتق شده کاهش می‌یابد.

بنابراین موتور مشتق شده از موتور هوایی دارای خصوصیات زیر خواهد بود:

1- دبی جرمی هوای عبوری از موتور، 132,48 کیلوگرم بر ثانیه است.
2- شرایط ورودی به موتور، دما و فشار محیط می‌باشد.
3- دمای گازهای ورودی به توربین، برابر با 1692 کلوین می‌باشد.
4- موتور دارای 8 طبقه کمپرسور فشار ضعیف با نسبت فشار 6,51 است که توسط 1 طبقه توربین فشار متوسط به حرکت در می‌آید.
5- موتور دارای 6 طبقه کمپرسور فشار قوی با نسبت فشار 4,68 است که توسط 6 طبقه توربین فشار قوی به حرکت در می‌آید.
6- به منظور توانایی تولید توان الکتریکی با فرکانس مناسب، دور دورانی محور فشار پایین که به طور مستقیم برای تولید توان مورد استفاده قرار می‌گیرد، برابر با 7350 دور در دقیقه در نظر گرفته شده است.

این موتور صنعتی در نرم‌افزار GasTurb مدل‌سازی شده است. به منظور انجام این کار، پیکربندی مورد استفاده در نرم‌افزار، به صورت موتور توربوشفت دو محوره می‌باشد. شماتیک این موتور در شکل (17) نشان داده شده است. در این مورد از توربین توان آزاد استفاده نشده است.



شکل (17) شماتیک پیکربندی مورد استفاده در نرم‌افزار GasTurb برای مدل‌سازی موتور صنعتی مشتق‌شده.

با انجام محاسبات، توان تولیدی توسط این موتور و سایر پارامترهای عملکردی آن استخراج شده و در جدول (6) ارائه شده‌اند. این موتور مشتق‌شده‌ی صنعتی که از موتور هوایی Trent 800 گرفته شده و بدون

www.SID.ir

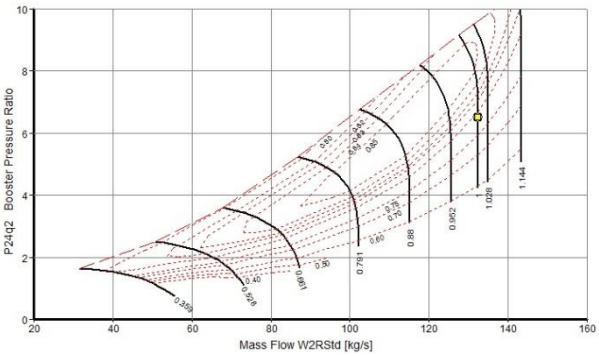
Archive of SID

توربین توان و با استفاده از توربین فشار ضعیف موتور هوایی عمل می‌نماید، توانایی تولید 46 مگاوات توان محوری را دارد.

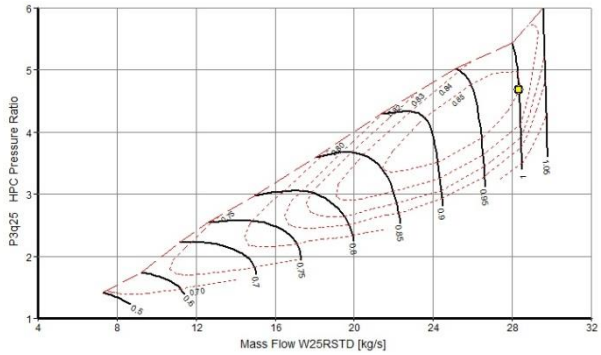
جدول 6- پارامترهای عملکردی موتور مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

پارامتر	مقدار
توان محوری (مگاوات)	46,97
دمای ورودی به توربین (کلوین)	1692
دمای گازهای خروجی از موتور (کلوین)	795,42
نسبت فشار کل	30,01
مصرف سوخت ویژه $(kg/kW.h)$	0,190
دبی جرمی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه)	2,485
نرخ حرارتی	9473,8
بازده حرارتی (درصد)	38,00

در ادامه نمودارهای عملکردی اجزاء توربوماشینی این موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 نشان داده شده‌اند. در نمودار شکل (18) منحنی عملکردی کمپرسور فشار ضعیف و در نمودار شکل (19) منحنی عملکردی کمپرسور فشار قوی ارائه گردیده‌اند. با مقایسه‌ی این منحنی‌ها با منحنی‌های عملکردی کمپرسورهای فشار ضعیف و فشار قوی موتور هوایی در حالتی که فن آن حذف شده بود (شکل‌های (13) و (14))، می‌توان مشاهده کرد که نقطه‌ی عملکردی کمپرسورها در حالت صنعتی منطبق بر نقطه‌ی عملکردی کمپرسورها در حالت خارج از طرح موتور هوایی می‌باشد. این مسئله نشان می‌دهد که موتور صنعتی، در نقطه‌ی عملکردی پیش‌بینی شده کار می‌کند و به خوبی مدل شده است.

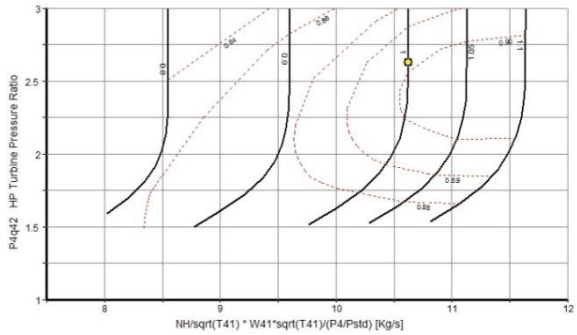


شکل (18) منحنی عملکردی کمپرسور فشار ضعیف موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

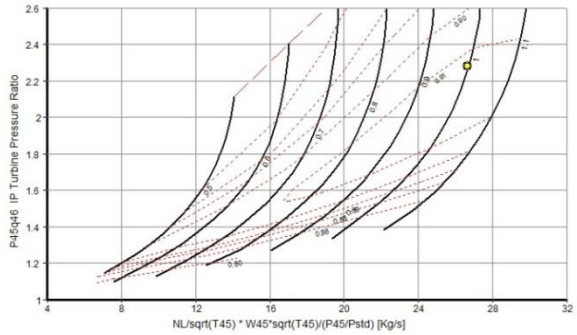


شکل (19) منحنی عملکردی کمپرسور فشار قوی موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

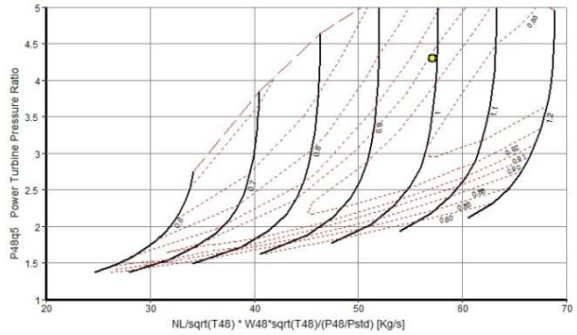
در شکل‌های (20) و (21) نیز به ترتیب منحنی‌های عملکردی توربین‌های فشار قوی و فشار ضعیف برای موتور صنعتی مشتق‌شده نشان داده شده و نقطه‌ی عملکردی آن‌ها مشخص شده است. در شکل (22) نیز منحنی عملکردی توربین توان آزاد نشان داده شده است.



شکل (20) منحنی عملکردی توربین فشار قوی موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.



شکل (21) منحنی عملکردی توربین فشار ضعیف موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.



شکل (22) منحنی عملکردی توربین توان آزاد موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

2- موتور صنعتی مشتق‌شده با حذف فن و نازل موتور هوایی به صورت پیکربندی دو محوره، جایگزین کردن طبقات کمپرسور و افزودن توربین توان آزاد

این مورد، مانند روش قبل است با این تفاوت که پس از حذف فن، در نظر گرفته شده است که طبقات کمپرسوری جایگزین آن شوند که نسبت فشار معادل با فن را ایجاد کنند.

به منظور طراحی این سیستم، ابتدا باید شرایط عملکردی موتور هوایی را در حالتی که داکت کنارگذر و نازل خروجی حذف شده‌اند بررسی کنیم تا ورودی‌های لازم برای مدل‌سازی موتور صنعتی حاصل گردد. به این منظور عملکرد خارج از طرح موتور هوایی با حذف داکت و نازل شبیه‌سازی شده و نتایج حاصل، در جدول (7) ارائه گردیده است. شکل شماتیک موتور Trent 800 با حذف داکت کنارگذر و نازل خروجی، در شکل (23) نشان داده شده است.

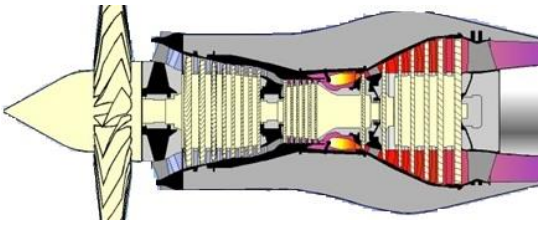
جدول 7- پارامترهای عملکردی هسته موتور Trent 800 روی زمین با در نظر گرفتن کمپرسور جایگزین برای فن.

پارامتر	مقدار
نسبت فشار فن	1,52

www.SID.ir

Archive of SID

بازده آیزنتروپیک فن	0/90
نسبت فشار کمپرسور فشار قوی	4/40
بازده آیزنتروپیک کمپرسور فشار قوی	0/86
نسبت فشار کمپرسور فشار متوسط	6/10
بازده آیزنتروپیک کمپرسور فشار متوسط	0/86
دبی جرمی عبوری از هسته موتور (کیلوگرم بر ثانیه)	176/47
سرعت دورانی محور فشار قوی (دور در دقیقه)	10611
سرعت دورانی محور فشار ضعیف (دور در دقیقه)	7000



شکل (23) پیکربندی موتور Trent 800 با حذف داکت و نازل و وجود فن.

بنابراین موتور مشتق شده از موتور هوایی Trent 800 در حالتی که به جای فن، 2 طبقه کمپرسور قرار گیرد تا نسبت فشار معادل آن را تأمین نماید، دارای خصوصیات زیر خواهد بود:

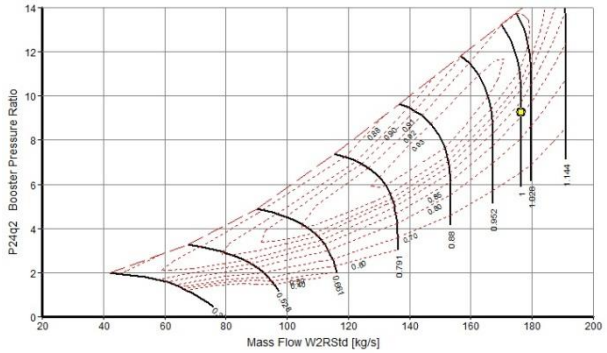
1- دبی جرمی هوای عبوری از موتور، 176/47 کیلوگرم بر ثانیه است.
2- شرایط ورودی به موتور، دما و فشار محیط می‌باشد.
3- دمای گازهای ورودی به توربین، برابر با 1692 کلوین می‌باشد.
4- موتور دارای 10 طبقه کمپرسور فشار ضعیف با نسبت فشار 9/27 است که توسط 1 طبقه توربین فشار متوسط به حرکت در می‌آید.
5- موتور دارای 6 طبقه کمپرسور فشار قوی با نسبت فشار 4/40 است که توسط 6 طبقه توربین فشار قوی به حرکت در می‌آید.
6- به منظور توانایی تولید توان الکتریکی با فرکانس مناسب، دور دورانی محور فشار پایین که به طور مستقیم برای تولید توان مورد استفاده قرار می‌گیرد، برابر با 7350 دور در دقیقه در نظر گرفته شده است.

با انجام محاسبات، مشخص شد که توان تولیدی برای این حالت نسبت به حالت قبل، افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد. این افزایش توان، ناشی از افزایش نسبت فشار کل توربین گاز و همچنین افزایش دبی جرمی عبوری نسبت به حالت قبل است. بازده‌ی حرارتی توربین گاز نیز در این حالت افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در جدول (8) ارائه گردیده است.

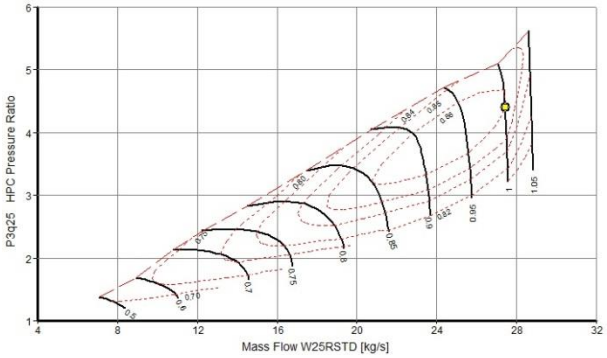
جدول 8- پارامترهای عملکردی موتور مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 با جایگزین کردن کمپرسور.

پارامتر	مقدار
توان محوری (مگاوات)	60/58
دمای ورودی به توربین (کلوین)	1692
دمای گازهای خروجی از موتور (کلوین)	735/68
نسبت فشار کل	40/7
مصرف سوخت ویژه $(kg/kW.h)$	0/178
دبی جرمی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه)	3/004
نرخ حرارتی	8880/4
بازده حرارتی (درصد)	40/53

در ادامه با انجام محاسبات مربوط به حالت خارج از طرح، نمودارهای عملکردی اجزاء توربوماشینی این موتور صنعتی استخراج شده و در ادامه ارائه گردیده‌اند. در نمودار شکل (24) منحنی عملکردی کمپرسور فشار ضعیف و در نمودار شکل (25) منحنی عملکردی کمپرسور فشار قوی نشان داده شده است.

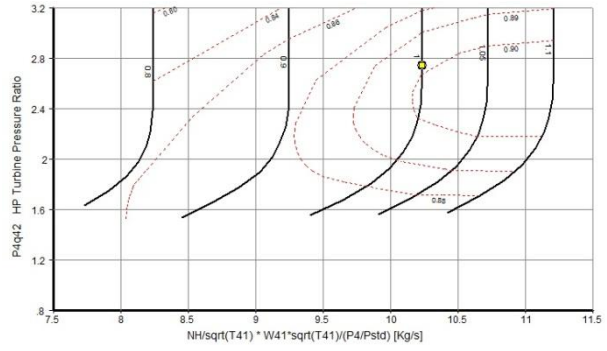


شکل (24) منحنی عملکردی کمپرسور فشار ضعیف موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 با اضافه کردن طبقات کمپرسور.

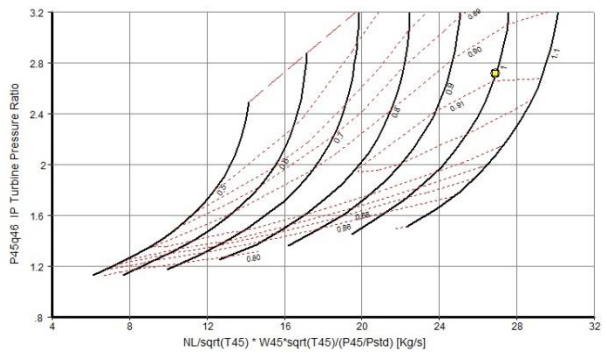


شکل (25) منحنی عملکردی کمپرسور فشار قوی موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 با اضافه کردن طبقات کمپرسور.

در شکل‌های (26) و (27) نیز به ترتیب منحنی‌های عملکردی توربین فشار قوی و توربین فشار ضعیف نشان داده شده است. منحنی عملکردی توربین توان مورد استفاده در این موتور صنعتی نیز در نمودار شکل (28) قابل مشاهده است.



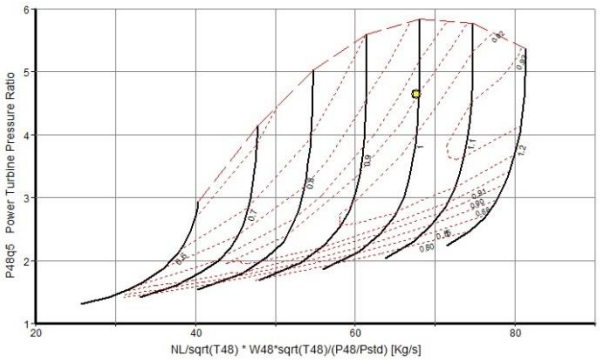
شکل (26) منحنی عملکردی توربین فشار قوی موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 با اضافه کردن طبقات کمپرسور.



www.SID.ir

Archive of SID

شکل (27) منحنی عملکردی توربین فشار ضعیف موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 با اضافه کردن طبقات کمپرسور.



شکل (28) منحنی عملکردی توربین توان آزاد موتور صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800 با اضافه کردن طبقات کمپرسور.

بحث و بررسی

تا به این جای کار، دو حالت در نظر گرفته شده برای مطالعه‌ی حاضر مورد بررسی قرار گرفته و موتورهای صنعتی مشتق‌شده برای آن‌ها با استفاده از موتور هوایی Trent 800 و نتایج آن ارائه گردیده است. در ادامه به تحلیل و بررسی موتورهای طراحی شده پرداخته و عملکرد آن‌ها را با هم مقایسه خواهیم کرد.

در ادامه به منظور سهولت در ارجاع به موتورهای طراحی شده در حالت‌های مختلف، نام‌گذاری را برای این موتورها در نظر گرفته و از آن استفاده خواهیم کرد. این نام‌گذاری در جدول زیر ارائه شده است.

جدول 9- نام‌گذاری موتورهای صنعتی مشتق‌شده برای حالت‌های مختلف.

حالت طراحی موتور مشتق‌شده	نام
هسته‌ی دو محوره موتور هوایی بدون اصلاح کمپرسور فشار ضعیف افزودن توربین توان	حالت اول Case 1
هسته‌ی دو محوره موتور هوایی با اصلاح کمپرسور فشار ضعیف افزودن توربین توان	حالت دوم Case 2

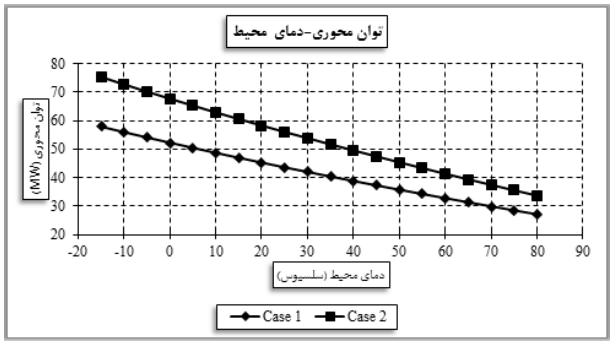
نتایج ارائه شده در بخش‌های قبل در مورد عملکرد توربین‌های صنعتی مشتق‌شده در جدول (10) به طور کامل ارائه شده است که نتایج به خوبی قابل مقایسه می‌باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود و در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، دمای ورودی به توربین برای تمام حالت‌ها مقدار 1692 کلوین در نظر گرفته شده است که معادل با دمای ورودی به توربین در حالت برخاستن از زمین موتور هوایی می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل، توان تولیدی در حالت دوم از توان تولیدی در حالت اول بیشتر است که در آن، طبقات کمپرسور به جای فن حذف شده، جایگزین شده‌اند ت نسبت فشار معادل با آن را تولید کند.. در این حالت، دبی جرمی سوخت مصرفی نیز افزایش یافته است.

در ادامه به منظور بررسی عملکرد انواع موتورهای مشتق‌شده‌ی طراحی شده و مقایسه‌ی آن‌ها، منحنی‌های عملکردی مختلفی استخراج شده و پارامترهای مهم عملکردی مورد مطالعه قرار گرفته است. در این بخش، تأثیر پارامترهای مهم روی عملکرد موتورهای صنعتی طراحی شده در قالب نمودارهایی ارائه شده است. در این نمودارها، علاوه بر ارائه‌ی عملکرد هر توربین گاز صنعتی طراحی شده، مقایسه‌ای بین آن‌ها نیز صورت گرفته است.

جدول 10- پارامترهای عملکردی توربین‌های صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی GE90 در دو حالت مختلف.

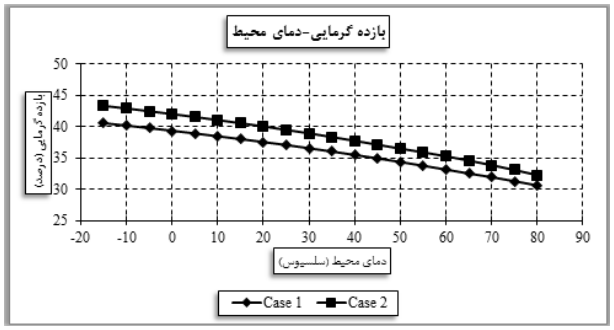
پارامتر	حالت اول	حالت دوم
توان محوری (مگاوات)	46,97	60,58
دمای ورودی به توربین (کلوین)	1692	1692
دمای گازهای خروجی از موتور (کلوین)	795,42	735,68
نسبت فشار کل	30,01	40,7
مصرف سوخت ویژه $(kg/kW.h)$	0,190	0,178
دبی جرمی سوخت (کیلوگرم بر ثانیه)	2,485	3,004
نرخ حرارتی	9473,8	8880,4
بازده حرارتی (درصد)	38,00	40,53

یکی از پارامترهای بسیار مهم در عملکرد یک توربین گاز صنعتی، دمای هوای محیط می‌باشد. در نمودار شکل (29)، تأثیر تغییرات دمای محیط بر توان محوری تولیدی توسط توربین گاز نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است با افزایش دمای محیط، توان محوری تولیدی توسط توربین گاز، کاهش می‌یابد. با افزایش دمای محیط، چگالی هوای ورودی به موتور کاهش می‌یابد. در نتیجه، کمپرسور برای متراکم کردن هوا به مقدار کار بیشتری نیاز دارد و توان بیشتری را از توربین دریافت می‌نماید. در نتیجه، توان محوری خروجی از توربین گاز کاهش می‌یابد. رفتار تمام توربین‌های گاز مشتق‌شده در کاهش توان محوری با افزایش دمای محیط مشابه است.



شکل (29) تغییرات توان محوری بر حسب دمای محیط برای توربین‌های گاز صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

در شکل (30) نمودار تغییرات بازده‌ی گرمایی توربین گاز بر حسب دمای محیط برای توربین‌های مشتق‌شده‌ی مختلف ترسیم شده است. همانگونه که مشخص است با افزایش دمای محیط، بازده‌ی گرمایی سیکل کاهش می‌یابد. این رفتار توربین گاز را نیز می‌توان با توجه به افزایش توان مورد نیاز کمپرسور با افزایش دما توجیه نمود. رفتار توربین گاز صنعتی برای دو حالت مختلف یکسان است. همچنین، با استفاده از این نمودار می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که استفاده از توربین توان آزاد، افزایش قابل ملاحظه‌ای را در بازده‌ی گرمایی توربین گاز ایجاد می‌نماید.

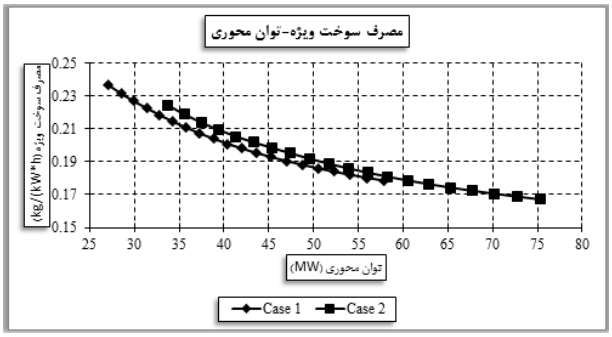


شکل (30) تغییرات بازده‌ی گرمایی بر حسب دمای محیط برای توربین‌های گاز صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

www.SID.ir

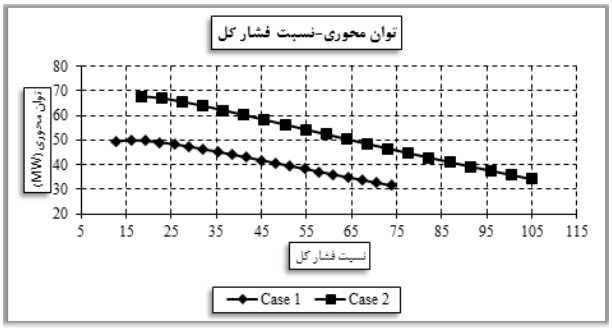
Archive of SID

یکی از نمودارهای عملکردی مهم که معمولا برای توصیف عملکرد یک توربین گاز صنعتی ارائه می‌گردد، نمودار تغییرات مصرف سوخت ویژه‌ی توربین گاز بر حسب توان محوری می‌باشد. این نمودار برای توربین‌های گاز مشتق‌شده‌ی طراحی شده از موتور هوایی Trent 800 در شکل (31) نشان داده شده است. با افزایش توان تولیدی توسط موتور صنعتی، مصرف سوخت ویژه‌ی آن کاهش می‌یابد.



شکل (31) نمودار تغییرات مصرف سوخت ویژه بر حسب توان محوری برای توربین‌های گاز صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

در نمودار شکل (32) تغییرات توان محوری موتور صنعتی بر حسب نسبت فشار کل کمپرسور نشان داده شده است. توان محوری برای یک مقدار مشخص از نسبت فشار کل موتور دارای مقدار بیشینه است. با افزایش نسبت فشار موتور از مقادیر کم، توان محوری نیز افزایش می‌یابد. بعد از رسیدن به مقدار مشخصی از نسبت فشار و با افزایش بیشتر از این مقدار، توان محوری موتور صنعتی نیز کاهش می‌یابد. حالت‌های مختلف موتور صنعتی رفتار مشابهی را با تغییر نسبت فشار از خود نشان می‌دهند.



شکل (32) تغییرات توان محوری بر حسب نسبت فشار کل موتور برای توربین‌های گاز صنعتی مشتق‌شده از موتور هوایی Trent 800.

نتیجه‌گیری

یکی از روش‌های کاهش هزینه‌ی تولید توربین‌های گاز صنعتی، استفاده از موتورهای هوایی و تبدیل آن‌ها به توربین‌های صنعتی است. به منظور انجام این کار، از ژنراتور گاز موتور هوایی به عنوان هسته‌ی توربین گاز صنعتی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین تغییرات در راستای انجام این کار، تغییر محفظه‌ی احتراق و استفاده از نوع مناسب آن است. در کار انجام شده، از موتور هوایی Trent 800 استفاده شده است. ابتدا، موتور هوایی در نقطه‌ی طراحی و شرایط خارج از طرح مدل‌سازی شده است. پس از صحه‌گذاری بر مدل‌سازی انجام‌شده، فن و نازل موتور هوایی حذف شده و پارامترهای عملکردی موتور در این حالت استخراج شد تا برای مدل‌سازی توربین گاز صنعتی مشتق‌شده مورد استفاده قرار گیرد. از دو روش برای طراحی توربین گاز صنعتی مشتق‌شده استفاده شده است. حالت اول که در آن فن حذف شده و توربین توان آزاد اضافه شد، 46,97 مگاوات توان تولید می‌نماید. در حالت دوم، به جای فن حذف شده، طبقات کمپرسور جایگزین در نظر گرفته شده و توربین توان آزاد به موتور اضافه شده است تا برای تولید توان محوری مورد استفاده قرار گیرد. در این حالت، توان تولیدی توسط توربین گاز، 60,58 مگاوات می‌باشد. در نهایت، پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد توربین گاز مورد مطالعه قرار گرفته و دو حالت طراحی شده با هم مقایسه شده‌اند.

مراجع

1. Mattingly, Jack D., Heiser, William H. and Pratt, David T. *Aircraft Engine Design, Second Edition.* Reston, Virginia American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002

2. Ahmed F. El-Sayed, "Aircraft Propulsion and Gas Turbine Engines", *CRC*, 2008.

3. M. Osenga, "The trent 60 gas turbine for power generation and mechanical derive", *Rolls-Royce Technical Publications*, 2009.

4. Rolls Royce plc, "The MT30 Marine Gas Turbine", *Rolls Royce Power Engineering plc*. 2012.

5. G. H. Badeer, "LM6000-60 HZ Gas Turbine Generator Set Product Specification", *GE Energy, 1333 West Loop South Houston,TX 77027, 6*, 2006.

6. G. Bogdan, "Determination of operating charracteristics of naval gas turbines LM2500", Proc. of the 1999 Tokyo Gas Turbine Congress, Bd. Vol. 3. 1999.

7. H. Cohen, GFC Rogers: "Gas Turbine Theory", *4th ed. Cambridge*, 1996.

www.SID.ir