

بررسی تاثیر اعمال قید دمای ورودی به توربین و دور ثابت بر عملکرد موتور توربوفن جریان-مخلوط

تک-محوره به همراه تغییرات سطح مقطع شیپوره

ستاره مستخدمین حسینی^۱، مرتضی حمزه زاده^{۲*}

۱- کارشناس، دانشکده انرژی های تجدیدپذیر، ارومیه، ایران، s.hoseini_1994@yahoo.com

۲- استادیار، hamzezade@uut.ac.ir

*مرتضی حمزه زاده

چکیده

مقاله حاضر، تاثیر اعمال دو قید طراحی را بر عملکرد یک موتور توربوفن با سطح مقطع شیپوره متغیر بررسی می‌کند. بدین منظور یک توربوفن تک-محوره از نوع جریان-مخلوط با توربین و کمپرسور تک-طبقه در نرم افزار گزترب ۱۴ شبیه سازی شده است. شبیه سازی از نوع صفر بعدی است. در این توربین گاز که سطح مقطع شیپوره در ۴ حالت و به مقادیر $\pm 10\%$ و $\pm 20\%$ تغییر می‌کند، دمای ورودی به توربین و دور موتور به عنوان قیود مورد بررسی بر حداکثر مقدارشان ثابت شده اند. به منظور محدود کردن دمای ورودی به توربین، دمای ورودی به روتور توربین بر روی حداکثر مقدار خود تنظیم شده است. سپس، برای همه ی حالت های بازشونده و جمع شونده ی شیپوره، خطوط عملکردی اجزای دوار موتور، برای همه حالت های با و بدون اعمال قیود طراحی مقایسه و بررسی شده اند. نتایج در حالت عدم اعمال قیود نشان می‌دهد که تغییرات سطح مقطع شیپوره منجر به تغییر مقدار پارامترهای دمای ورودی به توربین و دور اصلاح شده در نقشه های عملکردی می‌شود. به گونه ای که در حالت جمع شونده شیپوره برخلاف حالت بازشوندگی، دمای ورودی به توربین قابل کنترل نیست و حتی از محدوده مجاز خود فراتر می‌رود. در حالت بازشونده شیپوره نیز دور اصلاح شده کمپرسور و توربین به مقادیر بیشتری نسبت به حالت مرجع صعود می‌کند. اعمال قید دما اگرچه منجر به کنترل دمای ورودی به توربین در حالت های جمع شونده شیپوره می‌شود اما منجر به افزایش هر چه بیشتر دور اصلاح شده همه اجزای دوار موتور در حالت بازشوندگی شیپوره خواهد شد. بنابراین، اعمال قید دور به قید دما، به کنترل شرایط دور اصلاح شده در نقشه های عملکردی کمک خواهد کرد.

واژه های کلیدی: توربین گاز هوایی - موتور توربوفن - قید طراحی - خط عملکردی موتور - گزترب ۱۴

۱- مقدمه

موتورهای توربوفن زیرمجموعه ی موتورهای توربین گاز هوایی هستند که خود در شاخه ی موتورهای جت جای می‌گیرند [۱]. به طور کلی، مرور تاریخچه انواع موتورهای جت و دنبال کردن سیر تحولات توسعه و به روز رسانی این موتورها نشان می‌دهد که بهبود یک موتور به مرور زمان و با مطالعه ی موردی بر بی شمار پارامتر موثر بر عملکرد موتور انجام می‌گیرد. پارامترهای زیادی می‌توانند بر عملکرد موتوری چون توربوفن تاثیر مثبت و یا منفی بگذارند. از آن جا که بررسی هر پارامتر بر یک مدل موتور واقعی به صورت تجربی صرفه اقتصادی ندارد و نیز زمان بر است، شبیه سازی می‌تواند با دقت بسیار خوبی موتورها را به سوی طراحی بهینه تر و کارآمدتر هدایت کند.

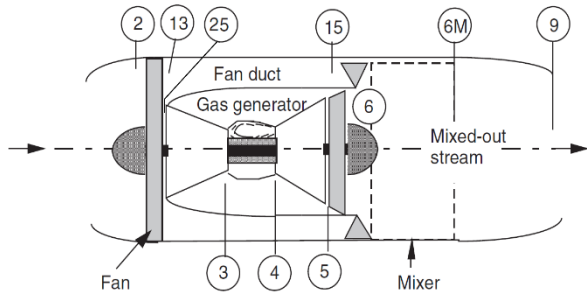
کولاکولو و همکاران [۲]، اثر نشتی گرما از یک موتور توربوفن دو-محوره به هوای محیط را بر عملکرد این موتور بررسی کرد و نشان داد که اثر نشتی گرما از هوای کنارگذر به هوای محیط بر عملکرد موتور توربوفن به طور قابل ملاحظه ای کمتر از اثرات نشتی حرارت از محصولات گرم احتراق به هوای سرد کنارگذر از طریق دیواره های محفظه احتراق است. همچنین، اثر نشت حرارت بر عملکرد موتور بسته به مقدار پارامترهای طراحی می‌تواند از یک شاخص عملکردی موتور به شاخص دیگر متفاوت باشد.

دوگان [۳]، با استفاده از روش های مچینگ دو محوره، به آنالیز عملکرد یک موتور توربوجت دومحوره بدون پس سوز در حال تعادل در شرایط استاتیک سطح دریا پرداخت و نشان داد زمانی که سرعت محور داخلی ثابت است، بستن شیپوره نقطه عملکردی کمپرسور داخلی را به سمت ناپایداری اما نقطه عملکردی کمپرسور بیرونی را در جهت دور شدن از ناپایداری هدایت می‌کند. نتیجه این امر، افزایش دمای ورودی به توربین و کاهش مقدار دبی وزنی، سرعت محور بیرونی و نسبت فشار کلی کمپرسور است. همچنین، بستن شیپوره برای سرعت محور داخلی ثابت، منجر به تغییر بسیار ناچیز رانش در نزدیکی سرعت طراحی، افزایش رانش در سرعت کم و کاهش جزئی رانش در سرعت های بالاتر می‌شود.

توران [۴]، به بررسی عملکرد یک موتور توربوجت کوچک مورد استفاده در وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین با استفاده از رویکرد مطالعه اگزرژی پرداخت. طراحی این موتور با دو پارامتر طراحی شامل نسبت فشار کمپرسور و دمای ورودی به توربین انجام گرفت. توران با تاکید بر این که مطالعه این پارامترها چقدر می‌تواند بر بهبود این توربوجت برای دستیابی به مصرف بهتر انرژی و اکسترژی تاثیر گذار نشان داد که افزایش دمای ورودی به توربین منجر به کاهش راندمان اگزرژی موتور توربوجت می‌شود. در عین حال، افزایش نسبت فشار کمپرسور همراه با افزایش ماخ پروازی منجر به افزایش راندمان اگزرژی این موتور می‌شود.

کومار و همکاران [۵]، با استفاده از فرآیند مارکوف و تکنیک های متغیر مکمل، به ارزیابی ویژگی های مختلف قابلیت اطمینان یک موتور توربوفن پرداختند. در این مقاله که هدف آن بررسی کلی عوامل موثر بر عملکرد موتورهای توربوفن است، مشخص می‌شود که زاویه حمله بسیار زیاد و یا بسیار کم می‌تواند متوسط زمانی خرابی موتور توربوفن را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. در این مقادیر از زوایای حمله، قابلیت اطمینان سیستم با توجه به عواملی چون میزان خرابی دهانه ورودی و در دسترس نبودن سوخت می‌تواند به بالاترین حد از حساسیت برسد.

رحمان [۶]، با مدل سازی یک موتور توربوجت تک-محوره در سیمولینک متلب به بررسی اثر خنک کاری موتور بر عملکرد پایا و گذرای این موتور پرداخت. در این مقاله از روش حجم بین اجزایی استفاده و اثرات



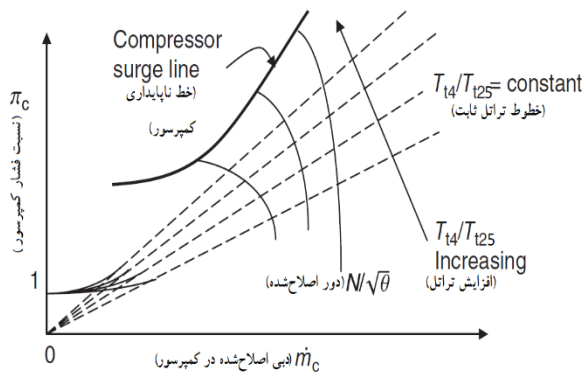
شکل ۱- طرح‌واره توربوفن تک-محوره جریان-مخلوط [۱۰]

مطابق شکل ۱، ۲ ایستگاه مهم در این موتور به شرح زیر است:

۲۵: ورودی کمپرسور

۴: ورودی توربین

برای یک موتور توربوفن، بهترین روابط برای نمایش ارتباط بین دمای ورودی به توربین با خطوط عملکردی کمپرسور، استفاده از خطوط تراتل ثابت است. این خطوط در شکل ۲، بر روی خط عملکردی کمپرسور نشان داده شده‌اند.



شکل ۲- خطوط تراتل ثابت بر روی نقشه عملکردی کمپرسور [۱۰]

مطابق شکل ۲، افزایش تراتل در جهت نزدیک شدن به خط ناپایداری کمپرسور پیش می‌رود. این موضوع برای یک دمای ورودی به کمپرسور ثابت، متناظر با افزایش دمای ورودی به توربین است. با فرض نسبت سوخت به هوا کوچک (تقریباً = ۱)، برای گاز کامل کالوریک، روابط (۱) تا (۳) به ترتیب نسبت دمای کمپرسور، نسبت فشار کمپرسور و دبی اصلاح شده کمپرسور را به صورت توابعی از تنظیمات تراتل (نسبت دمای ورودی به توربین به دمای ورودی به کمپرسور) نشان می‌دهند [۱۰].

$$\tau_c \approx 1 + (1 - \tau_t) \frac{T_{t4}}{T_{t25}} \quad (1)$$

$$\pi_c \approx \left[1 + (1 - \tau_t) \frac{T_{t4}}{T_{t25}} \right]^{\frac{\gamma e_c}{\gamma - 1}} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{c25} \alpha \frac{\pi_c}{\sqrt{\frac{T_{t4}}{T_{t25}}}} \quad (3)$$

در روابط (۱) تا (۳)، π_c و τ_c به ترتیب نسبت دما و فشار در کمپرسور، \dot{m}_{c25} دبی اصلاح شده در کمپرسور، T_{t4} و T_{t25} به ترتیب دماهای ورودی به کمپرسور و توربین، τ_t پارامتر انبساط ثابت توربین، e_c راندمان پلی تروپیک کمپرسور و γ نسبت حرارت‌های ویژه است.

بلید با و بدون کنترل سرعت موتور شبیه‌سازی شد. سپس، داده‌های عددی با داده‌های تجربی برای یک مدل موجود از این موتور بررسی شدند. نتایج نشان داد که تحت شرایط نامی بلید و یا بدون آن، نتایج تا ۵٪ و برای مقادیر بیشتر تا ۱۰٪ دقیق بود. افزایش خطا به هنگام استخراج بلید نیز به محل استخراج بلید و نیز خود استخراج بلید وابسته است که می‌تواند بر عملکرد و مشخصه‌های کمپرسورها و نیز کار مورد نیاز کمپرسورها اثر گذار باشد.

بهبود عملکرد موتورهای هوایی به‌ویژه به‌هدف افزایش نیروی رانش با کاهش مصرف سوخت، افراد را به فکر بازطراحی مجدد موتور و یا استفاده از ایده‌های موتوری جدید سوق داده‌است. برای تحلیل و طراحی سیستم‌های پیش‌ران نسل بعدی موتورهای نیز تحلیل سیستم پارامتریک برای تفسیر و تجزیه و تحلیل اثر هر پارامتر بر عملکرد موتور، امری ضروری است [۷].

آیگون و همکاران [۷]، برای تامین شرایط موتوری بهینه یک هواپیمای نظامی در جهت انجام مأموریت‌های چند منظوره و نیز برآورده کردن الزامات عملکردی آن، مدل موتور چرخه تطبیقی را ارائه داد. در این مقاله، مقایسه بهبود پارامترهای عملکردی این مدل با یک موتور توربوفن مرسوم با نسبت کنار گذر پایین از نوع سیکل ثابت انجام گرفت. همچنین، مدل موتور چرخه تطبیقی نیز در دو حالت، با کنار گذر تک و کنار گذر دوگانه بررسی شد. نتایج تحلیل با تمرکز بر بررسی چند پارامتر طراحی بر تغییرات مصرف سوخت ویژه، رانش و چند پارامتر دیگر تعیین‌کننده عملکرد موتور به دست آمد. نتایج نشان داد که مدل موتور چرخه تطبیقی در هر دو حالت از انواع کنار گذر نسبت به مدل موتور توربوفن سیکل ثابت، از نظر کارایی، برد پرواز و نیز مصرف سوخت ویژه بهتر عمل می‌کند. به‌گونه‌ای که، مصرف سوخت ویژه این موتور به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

جاکوبسکی و همکاران [۸]، با افزودن محفظه احتراق ثانویه به یک موتور توربوفن دو محوره مرسوم، به تحلیل عددی عملکرد این موتور اصلاحی پیشنهادی و مقایسه آن با توربوفن کلاسیک پرداخت و نشان داد این ایده منجر به طراحی کارآمدتر پیش‌ران به‌ویژه در هواپیماهای بزرگ مختص پرواز مادون صوتی می‌شود. نتایج نشان داد این محفظه ثانویه که ما بین توربین‌های فشار پایین و فشار بالا قرار گرفته، منجر به افزایش انرژی گازی ورودی به توربین فشار پایین و در نتیجه افزایش دمای ورودی به این توربین می‌شود. متعاقباً، دما و فشار ورودی به شیبوره و سرعت گازهای عبوری از شیبوره بیشتر می‌شود که این به‌نوبه‌ی خود رانش بیشتری را تولید می‌کند. مصرف سوخت نیز نسبت به موتور کلاسیک، به مقدار جزئی کاهش می‌یابد. لیو و همکاران [۹]، با در نظر گرفتن ادامه فرایند احتراق در توربین در هر یک از موتورهای توربوجت و توربوفن، سیکل ترمودینامیکی و عملکرد این موتورها را نسبت به موتورهای توربوجت و توربوفن مرسوم بررسی کرد و نشان داد که ادامه احتراق پیوسته از محفظه به گذرگاه توربین با افزایش رانش مخصوص بدون تغییر در مصرف سوخت رانش موتور و یا با افزایش ناچیز آن همراه است. تولید گازهایی با انرژی جنبشی بیشتر در راندمان حرارتی بالاتر نیز باعث می‌شود که بتوان مولد گاز این موتورها را در مقایسه با انواع موتورهای مرسوم، به‌عنوان پایه موتورهای عملکرد بالا در نظر گرفت. همچنین، می‌توان محدوده عملیاتی عدد ماخ و نسبت فشار کمپرسور را در موتورهای توربوجت و توربوفن و نیز نسبت کنار گذر فن را در موتور توربوفن افزایش داد.

۲- روابط و فرمول‌ها

شکل ۱، طرح‌واره‌ی یک موتور توربوفن تک-محوره جریان-مخلوط را نشان می‌دهد.

روابط (۴) تا (۶)، دور اصلاح شده و پارامترهای آن را نشان می‌دهند [۱۰].

$$N_c \equiv \frac{N}{\sqrt{\theta}} \quad (۴)$$

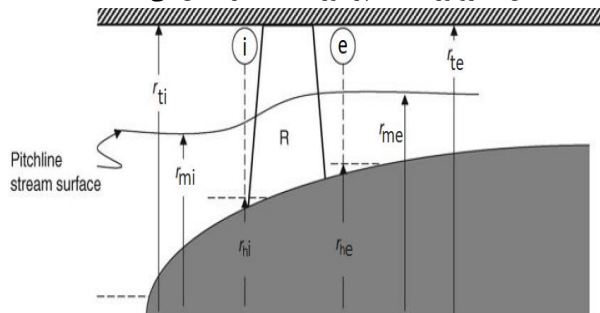
$$\theta = \sqrt{\frac{T_{25}}{T_{ref}}} \quad (۵)$$

$$N = \frac{\omega}{2\pi} \quad (۶)$$

در روابط (۴) تا (۶)، N_c دور اصلاح شده، N فرکانس زاویه‌ای و ω سرعت زاویه‌ای است. پارامتر θ نیز جذر نسبت دمای ورودی به کمپرسور (T_{25}) به دما در شرایط استاندارد سطح دریا (T_{ref}) را نشان می‌دهد [۱۰]. مقدار دمای استاندارد در سطح دریا برابر است با: $T_{ref}=288.2 \text{ k}$ [۱۰].

برای نمایش ارتباط بین دور اصلاح شده با تراشل، توان کمپرسور تعریف می‌گردد. توان کمپرسور، توسط تیغه‌های روتور آن مصرف می‌شود و تیغه‌های استاتور در انتقال توان نقشی ندارند.

شکل ۳، روتور یک کمپرسور تک طبقه را نشان می‌دهد.



شکل ۳- شماتیک روتور در یک کمپرسور تک طبقه [۱۰]

برای این کمپرسور، توان از رابطه‌ی (۷) تبعیت می‌کند.

$$\dot{\rho}_c = \dot{m} h_{t25} (\tau_c - 1) = \omega \tau_r \quad (۷)$$

در رابطه (۷)، \dot{m} دبی جریان در کمپرسور، h_{t25} آنتالپی سکون در ورودی کمپرسور و τ_r گشتاور روتور است.

رابطه (۸) ارتباط سرعت محور با تراشل را برای یک کمپرسور محوری

تک طبقه با استفاده از بسط رابطه‌ی (۷) نشان می‌دهد [۱۰].

$$h_{t25} (1 - \tau_t) \frac{T_{t4}}{T_{t25}} = \omega [r_{me} (\omega \cdot r_{me} + C_{ze} \tan \beta_e) - r_{mi} C_{zi} \tan \alpha_i] \quad (۸)$$

در رابطه فوق، r_{mi} و r_{me} به ترتیب شعاع میانگین در ورودی و خروجی روتور، C_{ze} و C_{zi} به ترتیب مولفه محوری سرعت مطلق جریان در ورودی و خروجی روتور، α_i زاویه جریان مطلق در ورودی روتور و β_e زاویه جریان نسبی خروجی روتور است [۱۰].

۳- بیان مساله و روش حل

یک موتور توربوفن جریان-مخلوط تک-محوره در محیط نرم افزار گزرتب ۱۴ شبیه سازی شد. این موتور مجهز به یک فن، کمپرسور تک طبقه و توربین تک طبقه و فاقد پس سوز است. شبیه‌پوره نیز از نوع همگراست. همچنین، در این موتور، طراحی فن صورت گرفته است. جدول ۱، مقادیر ورودی را برای طراحی فن نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقادیر ورودی برای طراحی فن

مقدار	پارامتر
۴۷۰	سرعت نوک فن (m/s)
۰/۳	نسبت شعاع ورودی فن
۰/۵۵	عدد ماخ ورودی فن
۱	نسبت ورودی موتور لقطر نوک فن

جدول ۲، مقادیر پارامترهای دور و دمای توربین را برای این موتور نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای دور طراحی و دمای توربین

مقدار	پارامتر
۲۱۰۴۲	سرعت مطلق محور (rpm)
۱	سرعت نسبی محور
۱۵۰۰	دمای ورودی به توربین (K)
۱۴۷۳	دمای ورودی به روتور توربین (K)

شبیه‌پوره برای دو حالت بازشونده به مقدار $+۱۰\%$ و $+۲۰\%$ و دو حالت جمع‌شونده به مقدار -۱۰% و -۲۰% تغییر یافته است. سپس، خطوط عملکردی در نقشه‌های عملکردی برای ۸ نقطه، به‌ازای گام $۰/۲۵$ درصد از کاهش دور، برای هر ۴ حالت تغییر یافته‌ی شبیه‌پوره، یک‌بار بدون اعمال قیود طراحی و بار دیگر با اعمال قیود رسم شده‌اند.

۴- نتیجه گیری و بحث

در طراحی یک توربین گاز هوایی برخی پارامترها مقداردهی می‌شوند. به‌عنوان مثال، دبی ورودی به موتور و وزن ناخالص برخاست به‌عنوان پارامترهای ابعادهی، و نسبت فشار کمپرسور به‌عنوان پارامتر طراحی مقداردهی اولیه می‌شوند. عموماً در طراحی یک موتور توربین گاز هوایی، یکی از پارامترهای دبی سوخت یا دمای ورودی به توربین نیز می‌بایست به‌عنوان پارامتر حد حرارتی برای بخش گرم موتور (که شامل توربین، نازل و سایر اجزای پایین دست محفظه است) مشخص شوند. این پارامترها نمایانگر تکنولوژی خنک کاری و نیز تکنولوژی مواد به‌کار رفته در بخش گرم موتور هستند [۱۰]. در واقع، محدودیت‌های متالورژیکی مواد استفاده شده در جنس پره‌های توربین، به‌عنوان بخشی که با حرارت بسیار بالای محصولات داغ خروجی از محفظه احتراق سروکار دارد، نوعی از طراحی را طلب می‌کند که در آن به‌توربین آسیب کمتری وارد شود و عمر مفید آن کاهش نیابد [۱]. لازمه عملکرد صحیح توربین نیز در حین توجه به طراحی عددی، توجه به عدم تجاوز دمای ورودی به‌توربین از مقدار در نظر گرفته شده برای طراحی یا محاسبه شده براساس مقداردهی اولیه به دبی سوخت است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دمای ورودی به توربین یکی از قیود مهم در طراحی توربین گاز هوایی به‌شمار رود. از دگر سو، هر یک از اجزای دوار موتور (شامل فن، کمپرسور و توربین) که زیرمجموعه‌ای از توربوماشین‌ها هستند نمی‌توانند در دوره‌های بیشتر از دور طراحی در نظر گرفته شده برای موتور کار کنند. چرا که تجاوز هر چه بیشتر دور از دور طراحی، منجر به افزایش تنش‌های وارده بر دیسک موتور و در نتیجه گسیختگی آن می‌شود. بنابراین، دور نیز از جمله قیود اساسی در بررسی کارکرد صحیح یک موتور توربین گاز هوایی محسوب می‌گردد [۱۱].

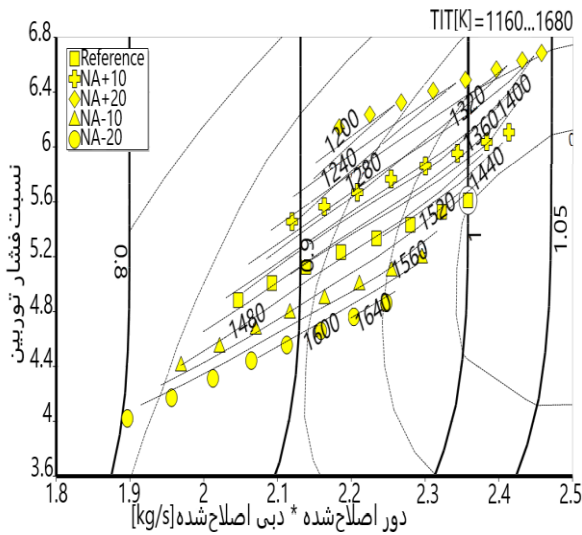
با توجه به اهمیت این پارامترها، نقشه‌های عملکردی با گام ذکر شده برای توربوماشین‌های موتور، ابتدا بدون اعمال قیود طراحی رسم شده‌اند تا سازوکار کلی این اجزای دوار مشخص شود.

شکل ۵- نقشه عملکردی کمپرسور بدون اعمال قیود با کانتور TIT

مطابق شکل ۵، برای همه درصدهای جمع‌شونده شیپوره، دور اصلاح‌شده کمپرسور، کمتر از دور حالت مرجع است، با این حال، به دلیل حفظ حاشیه امن مناسب، مطلوب به نظر می‌رسد. حالت بازشونده شیپوره نیز نشان می‌دهد که با افزایش هر چه بیشتر سطح مقطع شیپوره، دور اصلاح‌شده نسبت به حالت مرجع، رو به افزایش است. با این حال، مقدار این افزایش دور ناچیز است.

از حیث دمای ورودی به توربین نیز رفتار کمپرسور برای همه حالت‌های تغییر شیپوره، مشابه فن است. بنابراین، در کمپرسور نیز کاهش سطح مقطع شیپوره منجر به افزایش دمای ورودی به توربین می‌شود. با این حال، رفتار کمپرسور از لحاظ ناپایداری مطلوب‌تر از فن است و در هیچ حالتی از جمع‌شوندگی شیپوره، از خط ناپایداری عبور نمی‌کند.

شکل ۶، نقشه عملکردی توربین را بدون اعمال قیود با کانتور TIT نشان می‌دهد.

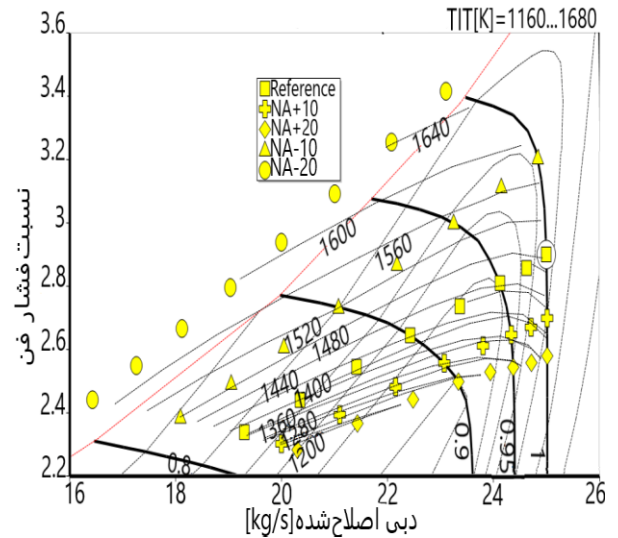


شکل ۶- نقشه عملکردی توربین بدون اعمال قیود با کانتور TIT

شکل ۶، به‌وضوح نشان می‌دهد که رفتار توربین نسبت به دمای ورودی به آن، مشابه رفتار سایر اجزای دوار موتور است. بنابراین، توربین نیز با کاهش سطح مقطع شیپوره نیازمند اعمال قیود دما برای توربین خواهد بود. از حیث دور اصلاح‌شده نیز مشاهده می‌شود که رفتار توربین همچون کمپرسور است. برای حالت جمع‌شوندگی شیپوره، از آن جا که دور اصلاح‌شده کمپرسور کاهش یافته (با فرض کارکرد صحیح فن در دور اصلاح‌شده خود برای همه درصدهای جمع‌شوندگی شیپوره)، توربین به تولید کار کمتری برای تامین کار مورد نیاز اجزا نیاز دارد که این مصادف است با دوران توربین در دور اصلاح‌شده کمتر از حالت مرجع. با همین استدلال، افزایش دور اصلاح‌شده توربین با بازشوندگی سطح مقطع شیپوره نیز قابل توجیه خواهد بود. از آن جا که تجاوز دور اصلاح‌شده در حالت بازشونده شیپوره با افزایش هر چه بیشتر سطح مقطع آن، رابطه‌ی مستقیم دارد، بنابراین لازم است درصد افزایش سطح مقطع شیپوره نیز با احتیاط و به‌مقدار کم انتخاب شود.

جدول ۳، مقدار سرعت نقشه‌های عملکردی (سرعت مپ) که معادل با همان دور اصلاح‌شده است را برای کمپرسور و توربین در درصدهای بازشونده شیپوره در حالت بدون اعمال قیود نشان می‌دهد.

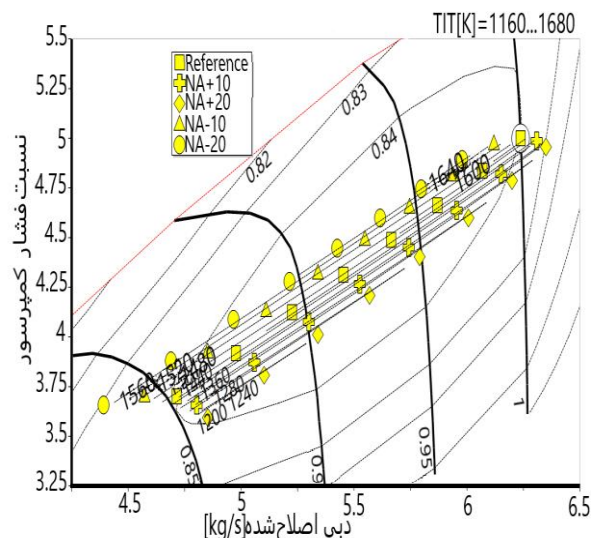
دور اصلاح‌شده، پارامتری بعد شده‌ی دور و مستقل از تاثیر تغییرات شرایط محیط بر نتایج تست موتور است. از این رو، پارامتر دور در نقشه‌های عملکردی، دور اصلاح‌شده است. بنابراین، در همه حالت‌های تحلیل، حتی با اعمال قیود طراحی، دور اصلاح‌شده بررسی خواهد شد. شکل ۴، نقشه عملکردی فن را بدون اعمال قیود طراحی و با کانتور دمای ورودی به توربین (به‌اختصار TIT) نشان می‌دهد.



شکل ۴- نقشه عملکردی فن بدون اعمال قیود با کانتور TIT

مطابق شکل ۴، دور اصلاح‌شده فن در هر دو حالت از تغییرات شیپوره مشابه حالت مرجع است. با این حال، کاهش سطح مقطع شیپوره، منجر به گذار موتور از محدوده‌ی مجاز دمای توربین به دماهای بالاتر می‌شود. گویی فن در تلاش است تا با دمای بیشتری در ورودی توربین، دور خود را ثابت نگه دارد. حاصل این گذار، کاهش حاشیه امن فن با کاهش ۱۰ درصدی سطح مقطع شیپوره و عبور از خط ناپایداری فن برای کاهش ۲۰ درصدی سطح مقطع است. به‌عبارتی، جمع‌شوندگی هر چه بیشتر شیپوره، منجر به اختلال در عملکرد فن و یا از کار افتادن آن می‌شود. در عین حال، باز شوندگی سطح مقطع، دمای توربین و دور اصلاح‌شده را در حاشیه امن مناسبی کنترل می‌کند.

شکل ۵، نقشه عملکردی کمپرسور را بدون اعمال قیود با کانتور TIT نشان می‌دهد.



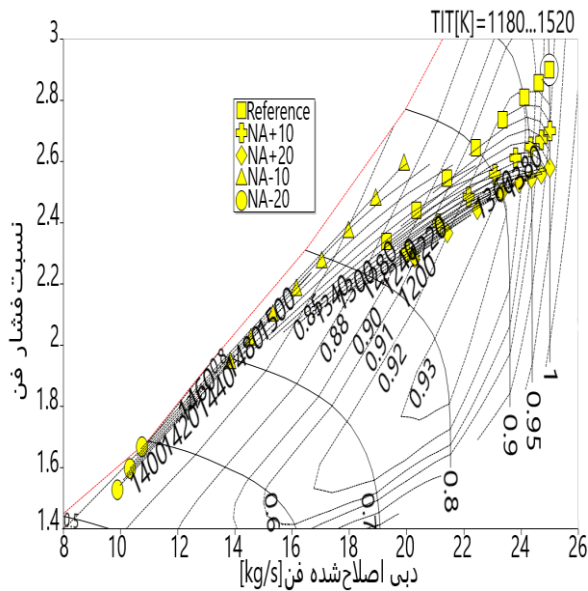
جدول ۳- سرعت مپ برای کمپرسور و توربین در درصد های بازشونده

شیپوره بدون اعمال قیود		
درصد بازشوندگی	٪۱۰	٪۲۰
سرعت مپ کمپرسور	۱/۰۰۹۶	۱/۰۱۵۵
سرعت مپ توربین	۱/۰۲۴۲	۱/۰۴۳۸

مطابق جدول ۳، ۱۰٪ افزایش سطح مقطع شیپوره نسبت به حالت ۲۰٪، سرعت کمپرسور و توربین را بهتر کنترل می‌کند.

در توربین، روتور به‌عنوان جزء چرخان توربین متحمل تنش‌های مختلف می‌شود و در نتیجه حساسیت دمایی بیشتر و تحمل دمایی کمتری نسبت به استاتور دارد. بنابراین، در توربین تک‌طبقه‌ای این موتور، برای محدود کردن دمای ورودی به توربین، دمای ورودی به روتور توربین بر حداکثر مقدار خود تنظیم شده‌است.

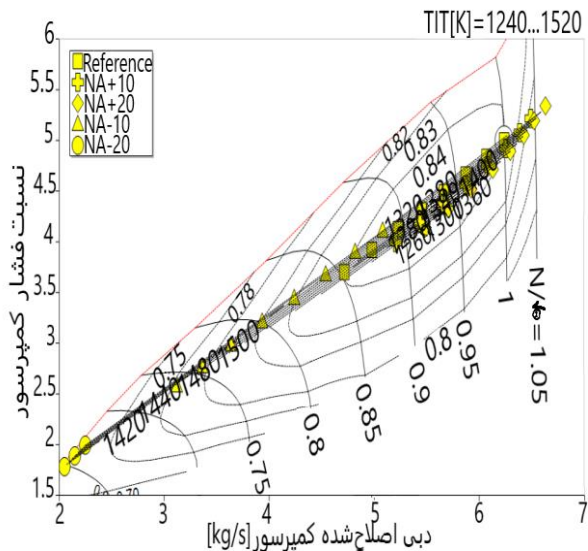
شکل ۷، نقشه عملکردی فن را با قید دمای توربین با کانتور TIT نشان می‌دهد.



شکل ۸- نقشه عملکردی فن با قید دما و دور با کانتور TIT

مطابق شکل ۸، برای حالت بازشونده‌ی شیپوره، محدود کردن دور طراحی در عین اعمال قید دما، منجر به عملکرد صحیح فن در دور اصلاح‌شده اولیه خود خواهد شد.

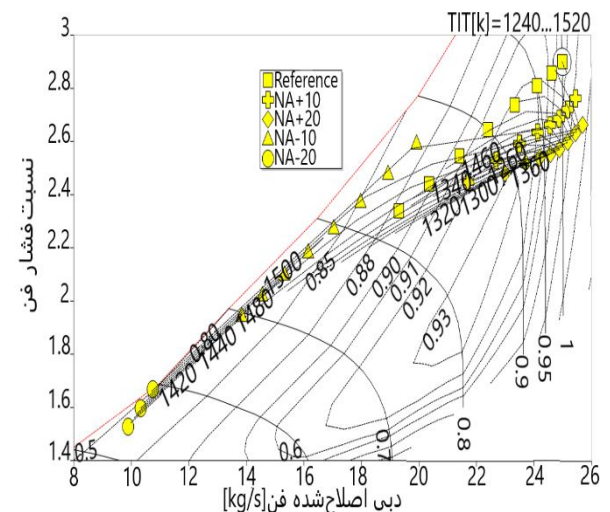
شکل ۹، نقشه عملکردی کمپرسور را با قید دمای توربین با کانتور TIT نشان می‌دهد.



شکل ۹- نقشه عملکردی کمپرسور با قید دما با کانتور TIT

شکل ۹، نشان می‌دهد که رفتار کمپرسور با اعمال قید دما در هر دو حالت از تغییرات شیپوره همچون فن (با اعمال قید دما) است. با این تفاوت که میزان تجاوز دور اصلاح‌شده از دور مرجع برای حالت افزایش‌یافته‌ی سطح مقطع شیپوره، در کمپرسور به مراتب بیشتر از فن است. به طوری که، به خط دوری ۱،۰۵ (معادل ۱۰۵٪ از دور طراحی) نیز می‌رسد. بدیهی است که در کمپرسور نیز اعمال قید دور طراحی برای کنترل دور اصلاح‌شده در حالت بازشوندگی شیپوره ضروری است.

شکل ۱۰، رفتار کمپرسور را با اعمال هر دو قید دور و دما با کانتور TIT نشان می‌دهد.



شکل ۷- نقشه عملکردی فن با قید دما با کانتور TIT

شکل ۷ نشان می‌دهد که قید دما منجر به محدود شدن نقاط نمایش داده شده در حالت جمع‌شونده شیپوره به نقاطی می‌شود که از حداکثر دمای ورودی به توربین عبور نمی‌کنند. مقایسه‌ی نقاط مجاز در خطوط عملکردی حالت‌های کاهش ۱۰ و ۲۰ درصدی سطح مقطع شیپوره نیز نشان می‌دهد که تعداد نقاط مجاز از نظر دمای ورودی به توربین با کاهش هر چه بیشتر سطح مقطع شیپوره، کاهش یافته و به تعداد نقاط کمتر و دورهای اصلاح‌شده‌ی کمتر محدود می‌شوند. قید دما برای حالت بازشونده‌ی شیپوره نیز منجر به افزایش و تجاوز دور اصلاح‌شده به مقادیر بالاتر از دور طراحی می‌گردد.

شکل ۸، نقشه عملکردی فن را با افزودن قید دور در کنار قید دما با کانتور TIT نشان می‌دهد.

شکل ۱۲، نشان می‌دهد که اعمال قید دور برای حالت قید دمای ورودی به توربین فعال، بر خطوط عملکردی توربین در حالت جمع‌شونده سطح مقطع بی‌تاثیر است. برای حالت بازشوندگی سطح مقطع نیز، مقایسه شکل ۱۲ با شکل ۱۱ نشان می‌دهد که این قید منجر به کاهش کلی سطح دور اصلاح‌شده می‌شود و مطلوب است.

مقایسه شکل ۱۲ با شکل ۶ گویای این نکته است که اعمال قید دور طراحی در کنار فعال بودن قید دما برای حالت افزایش سطح مقطع شیپوره، مشابه حالت بدون اعمال دو قید است. به عبارتی، اعمال قید دور طراحی به قید دما، تنها منجر به کاهش مقدار دور اصلاح‌شده‌ی افزایش‌یافته ناشی از "اعمال قید دمای ورودی به توربین" می‌شود و مقدار تجاوز دور اصلاح‌شده نهایی در خطوط عملکردی توربین در حالت بازشونده شیپوره، چه در حالت بدون اعمال قیود طراحی و چه در حالت اعمال هر دو قید، به افزایش سطح مقطع شیپوره باز می‌گردد.

جدول ۴، سرعت نقشه‌های عملکردی (سرعت مپ)، سرعت مطلق محور و سرعت نسبی محور را برای فن، کمپرسور و توربین در هر سه حالت بدون اعمال قید، با قید دما و با هر دو قید برای ۲۰ درصد بازشوندگی شیپوره نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقدار عددی پارامترهای سرعت نقشه عملکردی، مطلق و نسبی محور برای ۲۰٪ بازشوندگی شیپوره در حالات مختلف قیود

سرعت	سرعت	سرعت	سرعت	سرعت	۲۰٪ بازشوندگی محور
مپ فن	مپ کمپرسور	مپ توربین	مطلق محور	نسبی محور	
۱/۰۰۰۰	۱/۰۱۵۵	۱/۰۴۳۸	۲۱۰۴۱/۵	۱/۰۰۰۰	بدون قیود
۱/۰۶۵۳	۱/۰۶۷۱	۱/۰۶۵۲	۲۲۴۱۴/۵	۱/۰۶۵۳	با قید دما
۱/۰۰۰۰	۱/۰۱۵۵	۱/۰۴۳۸	۲۱۰۴۱/۵	۱/۰۰۰۰	اعمال قید دما و دور

جدول ۴، به‌وضوح نشان می‌دهد که اعمال قید دما منجر به افزایش سرعت مپ در همه اجزای دوار موتور می‌گردد. بنابراین، اعمال قید دور طراحی برای کنترل سرعت‌های اصلاح‌شده مندرج در نقشه‌های عملکردی ضروری است.

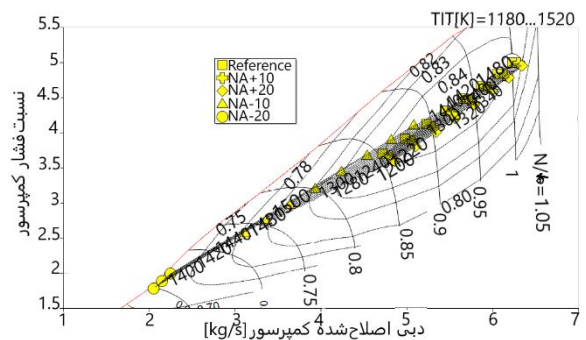
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بررسی تاثیر دو قید دمای ورودی به توربین و دور طراحی بر رفتار نقشه‌های عملکردی اجزای دوار یک موتور توربوفن تک-محوره‌ی جریان-مخلوط در محیط نرم‌افزار گزترب ۱۴ برای ۴ حالت از تغییرات شیپوره به‌ازای بازشوندگی ۱۰ و ۲۰ درصدی و نیز جمع‌شوندگی ۱۰ و ۲۰ درصدی بررسی شد.

نتایج این پژوهش به‌صورت زیر دسته‌بندی می‌شود:

فن:

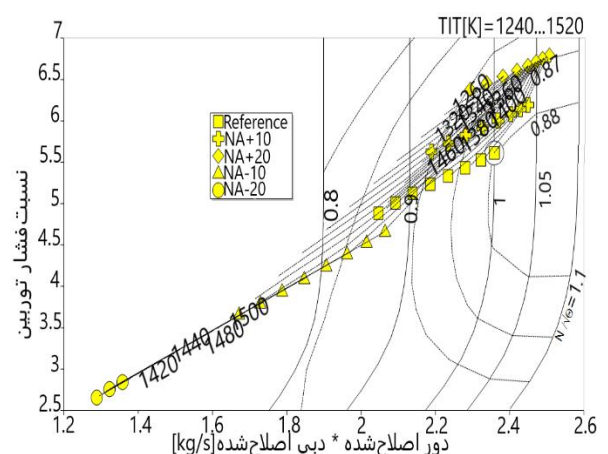
- بدون اعمال قیود طراحی، فن برای همه حالات تغییر شیپوره، در دور اصلاح‌شده‌ی مشابه با حالت مرجع کار می‌کند.
- پنالتی کارکرد فن در دور اصلاح‌شده مشابه با حالت مرجع برای حالت جمع‌شونده‌ی شیپوره بدون اعمال قیود طراحی، کارکرد فن در دماهای بالاتر از دمای مجاز توربین است.
- در این حالت پنالتی تجاوز دمای توربین از حداکثر مقدار مجاز آن برای کاهش سطح مقطع شیپوره، کاهش حاشیه امن فن برای ۱۰ درصد جمع‌شوندگی شیپوره و عبور از خط ناپایداری فن برای ۲۰ درصد جمع‌شوندگی است.



شکل ۱۰- نقشه عملکردی کمپرسور با قید دما و دور با کانتور TIT

مطابق شکل ۱۰، کنترل کمپرسور در حالت افزایش‌یافته‌ی شیپوره با قید دمای توربین، منوط به کنترل دور است.

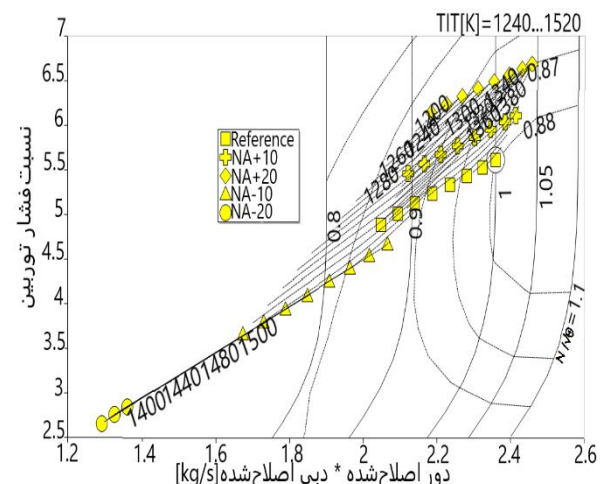
شکل ۱۱، خطوط عملکردی توربین را با قید دما با کانتور TIT نشان می‌دهد.



شکل ۱۱- نقشه عملکردی توربین با قید دما با کانتور TIT

مطابق شکل ۱۱، با اعمال قید دما به توربین، رفتار توربین برای هر دو حالت باز و جمع‌شونده‌ی شیپوره مشابه فن و کمپرسور است.

شکل ۱۲، رفتار توربین را با اعمال هر دو قید دما و دور با کانتور TIT نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- نقشه عملکردی توربین با قید دما و دور با کانتور TIT

۱- در حالت کلی، رفتار نقشه عملکردی توربین در همه حالات، چه از حیث تغییرات سطح مقطع و چه از نظرگاه قیود بر روی خطوط عملکردی توربین، مشابه کمپرسور است.

۲- برای همه حالات با و بدون اعمال قیود طراحی، افزایش دور اصلاح شده توربین به مقادیر بیشتر از حالت مرجع توربین، همواره بیشتر از افزایش مقدار این دور در کمپرسور نسبت به حالت مرجع کمپرسور است. بنابراین، پس از اعمال قیود، بهترین حالت از طراحی برای توربین، بازشوندگی کمتر شیپوره است.

۶- مراجع

- [1] A. F. El-Sayed, *Aircraft propulsion and gas turbine engines*. 1st Edition, MA: CRC Press, 2008.
- [2] M. Colakoglu, T. Tanbay, and A. Durmayaz, "Effect of heat leakage on the performance of a twin-spool turbofan engine," *International Journal of Exergy*, vol. 19, no. 2, pp. 173-198, 2016.
- [3] Jr. Dugan, F. James, "Two-spool matching procedures and equilibrium characteristics of a two-spool turbojet engine," no. NACA-RM-E54F09, July, 1954.
- [4] O. Turan, "Exergetic effects of some design parameters on the small turbojet engine for unmanned air vehicle applications," *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 51-61, 2012.
- [5] A. Kumar, R. Kumar, and M. Ram, "Turbofan engine performance under reliability measures approach," *International Journal of Engineering*, vol. 30, no. 4, pp. 610-619, April, 2017.
- [6] N. U. Rahman and J. F. Whidborne, "A numerical investigation into the effect of engine bleed on performance of a single-spool turbojet engine," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 222, no. 7, pp. 939-949, 2008.
- [7] H. Aygun, M. E. Cilgin, I. Ekmekci, and O. Turan, "Energy and performance optimization of an adaptive cycle engine for next generation combat aircraft," *Energy*, vol. 209, pp. 118261, 2020.
- [8] P. Jakubowski, M. Orkisz, and P. Wygonik, "Preliminary analysis of two combustors turbofan engine," *Journal of KONES*, vol. 20, 2013.
- [9] F. Liu, and W. A. Sirignano, "Turbojet and turbofan engine performance increases through turbine burners," *Journal of propulsion and power*, vol. 17, no. 3, pp. 695-705, May, 2001.
- [10] S. Farokhi, *Aircraft propulsion*. 2nd Edition, MA: John Wiley & Sons, 2014.
- [11] J. Kurzke, and I. Halliwell, *Propulsion and power: an exploration of gas turbine performance modeling*. 1st Edition, MA: Springer, 2018.

۴- اعمال قید دمای توربین، با حذف دسته نقاطی از خطوط عملکردی در درصدهای جمع شونده شیپوره که حد دمای توربین را رعایت نمی کردند منجر به کنترل فن برای حالات مذکور می شود.

۵- کانتور دمای TIT در فن، افزایش سطح دمای ورودی به توربین را در دوره های اصلاح شده بالاتر فن نشان می دهد. بنابراین، اعمال قید دما با حذف نقاط مربوط به دوره های بالاتر در درصدهای جمع شونده شیپوره، منجر به کاهش سطح دور اصلاح شده فن در نقشه های عملکردی می شود.

۶- اعمال قید دما، در عین کاهش دور اصلاح شده فن در حالت کاهش سطح مقطع شیپوره، منجر به افزایش دور اصلاح شده در حالت افزایش سطح مقطع شیپوره می شود.

۷- افزودن قید دور طراحی به قید دما، بر خطوط عملکردی فن در حالت جمع شونده شیپوره بی تاثیر است. چرا که سطح دور اصلاح شده در اثر اعمال قید دما کاهش یافته بود.

۸- کاهش مقدار دور اصلاح شده ی افزایش یافته در حالت بازشونده ی شیپوره ناشی از اعمال قید دما، با اعمال قید دور طراحی بر طرف می گردد. کمپرسور

۱- در حالت بدون اعمال قیود، رفتار کلی کمپرسور از نظر نحوه تغییرات دمای ورودی به توربین، مشابه فن است. بنابراین، دمای ورودی به توربین در نقشه های عملکردی کمپرسور با جمع شونده ی شیپوره افزایش می یابد و نیازمند کنترل است. با این حال، برخلاف فن، کمپرسور در هیچ درصدی از کاهش سطح مقطع شیپوره، به ناپایداری نمی رسد.

۲- همچنان در حالت بدون اعمال قیود، سطح کلی دور اصلاح شده کمپرسور برای حالت جمع شونده ی شیپوره کمتر از دور اصلاح شده در حالت مرجع است، با این حال حساسیت آن نسبت به حاشیه امن کمتر از فن است.

۳- با وجود عدم اعمال قید دور و دما، با افزایش سطح مقطع شیپوره، دور اصلاح شده کمپرسور نسبت به حالت مرجع افزایش می یابد. علت این موضوع، تاثیر تغییرات سطح مقطع شیپوره است. با این وجود، مقدار تجاوز دور اصلاح شده کمپرسور از حالت مرجع، برای درصدهای بازشوندگی ذکر شده برای شیپوره، ناچیز است.

۴- اعمال قید دما، منجر به افزایش بیشتر دور اصلاح شده کمپرسور در حالت بازشونده شیپوره و کاهش هر چه بیشتر این دور در حالت جمع شونده شیپوره می شود.

۵- اعمال قید دور طراحی، منجر به کاهش مقدار دور اصلاح شده ی افزایش یافته در کمپرسور، ناشی از اعمال قید دما می شود. توربین: