

تأثیر پارامترهای افت با به کارگیری پره تاندم در کمپرسور محوری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۹

علیرضا سخاوت‌بنیس^۱، رضا آقائی‌طوق^۲، حمزه اشراقی^۳

۱- گروه هوایی، دانشگاه علوم انظامی امین، تهران، ایران، arsb90@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران،

۳- دکترای تخصصی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

طراحان موتور هواگردها از دیرباز درصدد کاهش وزن و افزایش کارایی موتور بوده‌اند. یکی از روش‌های غیر فعال در جلوگیری از جدایش جریان، کنترل لایه مرزی، افزایش نسبت فشار و کاهش وزن توربین و کمپرسور، استفاده از تاندم می‌باشد. تاندم با افزایش زاویه چرخش جریان و افزایش نسبت فشار کمپرسور باعث بهبود عملکرد آن می‌گردد. در این مطالعه هندسه کمپرسور تاندم از مدل طراحی شده در مرکز تحقیقات لوئیس ناسا استخراج و شبکه‌ای با کیفیت بالا بر آن اعمال گردید. در مطالعه حاضر هم روتور و هم استاتور دارای تاندم می‌باشد. نرم‌افزار بکار رفته در این مطالعه CFX 2021 بوده که با مدل توربولانس $K-\omega$ SST مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در نهایت مشاهده گردید که تاندم باعث افزایش ۲.۵ درجه‌ای زاویه انحراف جریان و همچنین افزایش ۱۶ درصدی میزان ضریب افت در روتور کمپرسور می‌گردد. علاوه بر موارد اشاره شده، مشاهده شد که تاندم به میزان ۹.۸ درصد باعث افزایش ضریب پخش در روتور کمپرسور می‌گردد. همچنین مشاهده شده است که در فاصله ۸۰٪ دهانه روتور، تاندم باعث افزایش ۹.۳ درصدی پارامتر افت در روتور کمپرسور می‌گردد. در نهایت نتیجه بدین گونه حاصل گردید که تاندم با افزایش پارامترهای افت، باعث افزایش نسبت فشار طبقه کمپرسور، کاهش تعداد طبقات، کاهش وزن و حجم موتور و در نهایت کاهش نیروی پسای ایجاد شده در هواگرد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: کمپرسور محوری، تاندم، پارامتر افت، نسبت فشار

The effect of loss parameters using tandem blade in axial compressor

Alireza Sekhavat Benis¹, Reza Aghaei-Togh², Hamzeh Eshraghi³

1- Department of Aerospace Engineering, Technical and Engineering Faculty, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran. Arsb90@gmail.com

2- Department of Aerospace Engineering, Technical and Engineering Faculty, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

3- Faculty of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Engine designers have been trying to reduce weight and increase engine efficiency for a long time. One of the passive methods to prevent flow separation, control the boundary layer, increase the pressure ratio, and reduce the weight of the turbine and compressor, is the use of tandem. In this study, the tandem compressor geometry was extracted from the model designed at the NASA Lewis Research Center and a high-quality network was applied to it. In the present study, both rotor and stator have tandem. The software used in this study is CFX 2021, which was analyzed with the $k-\omega$ SST turbulence model. Finally, it was observed that the tandem causes a 2.5-degree increase in the flow deviation angle and also a 16% increase in the drop coefficient in the compressor rotor. In addition to the mentioned cases, it was observed that the tandem increases the diffusion coefficient in the compressor rotor by 9.8%. It has also been observed that at the distance of 80% of the rotor opening, the tandem increases the drop parameter in the compressor rotor by 9.3%. Finally, the result was obtained that the tandem, by increasing the drop parameters, increases the pressure ratio of the compressor stage, reduces the number of stages, reduces the weight and volume of the engine, and finally reduces the drag force created in the airship.

Keywords: axial compressor, tandem, drop parameter, pressure ratio.

۲۱۱

سال ۱۳- شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



تأثیر پارامترهای افت با به کارگیری پره تاندم در کمپرسور محوری



۱. مقدمه

به کارگیری یک پره، پس از پره اصلی در توربوماشین را تاندم می‌گویند. با وجود تاندم، نسبت فشار در یک طبقه کمپرسور افزایش یافته و بدین صورت می‌توان تعداد طبقات کمپرسور را کاهش داد. تکنولوژی تاندم، با تقسیم بار اعمالی میان پره اصلی و عقبی (تاندم)، باعث افزایش کارایی طبقه کمپرسور می‌شود. در پره و تاندم مورد مطالعه، بار اعمالی به صورت مساوی تقسیم شده است. همچنین تاندم، با کنترل لایه مرزی باعث جلوگیری از جدایش می‌شود. بدین ترتیب ۲ فاکتور اساسی در تاندم را می‌توان این‌گونه خلاصه نمود:

الف) افزایش بار اعمالی طبقه

ب) کاهش وزن موتور.

شنیدر و همکاران [۱] مشخصه‌های جریان را برای ردیف پره کمپرسور محوری تاندم را برای زوایای بزرگ خارج از طراحی، مطالعه نمودند. ایرفویل به کار رفته در این مطالعه، NACA 65 بوده و در نهایت، مشاهده شده که با به کارگیری تاندم، می‌توان، کارکرد در زوایای حمله بالاتر را در حالت خارج از طراحی، انتظار داشت. ماناس [۲]، مشخصه‌های هندسی ایرفویل تاندم را در کمپرسور محوری به صورت دو بعدی و به روش حجم محدود بررسی نمودند و به این نتیجه دست یافتند که مقدار نسبت فاصله اگر حدود ۲ باشد، ردیف پره حداکثر کارایی را خواهد داشت

کومار و همکاران [۳]، با مطالعه پره تاندم در حالت طراحی و خارج از طراحی را به صورت عددی مطالعه نموده و سپس به این داده‌ها صورت عملی مورد تایید قرار گرفت. نتایج نشان داد که ضریب پخش در روتور دارای تاندم، بیشتر

از روتور عادی است. رفتار شکاف و فاصله نازل، برهمکنش نشتی نوک روتور با شکاف نازل، عملکرد استاتور و عملکرد روتور و استاتور نیز توسط نامبردگان انجام شد. پان و همکاران [۴] با مطالعه پره‌های روتور مافوق صوت، نسبت به طراحی بهینه و آنالیز تاندم روتور ۳۷ اقدام نمودند و مشاهده نمودند که با افزودن تاندم، بازده کلی به میزان ۱.۶٪ افزایش می‌یابد. حد سرچ نیز به میزان ۲.۷۵٪ بهبود پیدا می‌نماید.

سان و همکاران [۵]، ردیف پره تاندم را برای جریان مافوق صوت طراحی و بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که با بهینه‌سازی هندسه و ضریب چرخش، ضرایب افت فشار کلی و بار کلی به ترتیب به میزان ۰.۴٪ و ۸.۵۸٪ کاهش می‌یابند. کومار و همکاران [۶]، تاثیر فاصله نوک پره را بر روی عملکرد تاندم روتور بررسی نمودند و به این نتیجه دست یافتند که عملکرد تاندم روتور به شدت وابسته به فاصله جلوی نوک پره روتور می‌باشد. فاصله زیاد نوک پره باعث اختلال در افزایش فشار کلی و پایداری پره تاندم می‌شود. کونارت و همکاران [۷]، جریان ثانویه را حول پره تاندم برای کمپرسور محوری بررسی نمودند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که تاندم باعث ایجاد دو گردابه و احیاناً سه گردابه می‌شود و برهم‌کنش این گردابه‌ها می‌تواند موضوع مهمی در عملکرد پره باشد. بررسی‌ها نشان دادند که تاندم باعث افت بیشتر جریان می‌شود. مور و همکاران [۸]، عملکرد پره هیبرید را به صورت عددی مطالعه نمودند. نتایج حاکی از آن بوده که پره هیبرید هم محاسن پره عادی را دارد و هم محاسن پره تاندم را. چرا که با به کارگیری پره هیبرید، توزیع فشار در نقاط مختلف دهانه، افزایش فشار کلی، افزایش فشار استاتیکی و انتروپی، بهبود می‌یابند. پره

تاندوم باعث افزایش بیشتر نسبت فشار می‌شود در حالی که پره هیبرید عملکرد بهتری در رابطه با واماندگی دارد. چنگ و همکاران [۹]، مکانیزم تاثیر پره‌های کم‌انرژی را در جریان مافوق صوت برای تاندوم روتور مطالعه نموده و دریافتند که عملکرد به میزان ۰.۲۴٪ و واماندگی به میزان ۵.۶٪ بهبود می‌یابد. کومار و همکاران [۱۰]، آیرودینامیک زاویه عقبگرد را در روتور تاندوم برای جریان مادون صوت بررسی نمودند و دریافتند که زاویه عقبگرد باعث بهبود واماندگی شده در حالیکه باعث کاهش میزان بار اعمالی و عملکرد نسبت به پره‌های تاندوم عادی می‌شود. لیو و همکاران [۱۱]، از پره تاندوم برای افزایش میزان بار اعمالی یک کمپرسور محوری با بار زیاد بهره بردند و مشاهده نمودند که بازده به میزان ۱٪ افزایش می‌یابد آن‌ها دریافتند که حد واماندگی از ۱۶.۹٪ به ۲۲.۳٪ افزایش یافت. بابو و همکاران [۱۲]، طبیعت ناپایدار گردابه‌های ثانویه را برای ردیف پره تاندوم روتور برای کمپرسور محوری را بررسی نمودند. آن‌ها دریافتند که جریان عبوری از پره‌ها، دارای انرژی بسیار زیادی بوده که باعث ایجاد گردابه می‌شود. جریان حول پره‌های روتور و استاتور در گام‌های مختلف زمانی به وسیله پارامتر Q بررسی شد. در قسمت روتور، گردابه‌ها بیشتر نزدیک به ریشه بال هستند. با برخورد آشفته‌گی‌های فراوان روتور با لبه حمله استاتور، گردابه‌های جدا شده طولی به وقوع می‌پیوندند که باعث کاهش عملکرد کمپرسور می‌شوند. سخاوت‌بنیس و آقایی طوق [۱۳] با بررسی تفاوت میان حل عددی عادی و حل عددی FSI را برای کمپرسور تاندوم بررسی نمودند و بدین نتیجه دست یافتند که پارامتر زاویه حمله برابر با ۱.۵ را می‌توان به عنوان مرز فلاتر پیچشی مشخص

کرد. تاندوم منجر به افزایش بار وارد شده بر روی پره‌های کمپرسور، کاهش تعداد طبقات کمپرسور و در نهایت کاهش وزن موتور می‌شود. افزودن تاندوم به روتور، فرکانس خمش ارتعاشی را ۲ برابر می‌نماید.

چنانچه مشاهده می‌شود، استفاده از پره تاندوم در کمپرسورهای محوری آثار مطلوب قابل توجهی دارد؛ اما همچنان لازم است جزئیات بیشتری از تأثیر این پره در عملکرد کمپرسور، به‌ویژه در شرایط خارج از نقطه طراحی و برای مطالعه پارامترهای افت، بررسی شود.

در کار حاضر، نتایج اثر پره تاندوم بر عملکرد یک طبقه از یک کمپرسور محوری خاص در شرایط طراحی و خارج از نقطه طراحی بررسی شده و اثر آن بر پارامترهای افت، به‌عنوان نماینده عملکرد کلی کمپرسور، بررسی مورد مطالعه واقع شده است.

۲. هندسه مسئله

هندسه به کار رفته در این مطالعه، مدل مطالعه شده در مرکز تحقیقاتی لوپس ناسا [۱۴] می‌باشد.

جدول ۱. نکات مربوط به هندسه روتور و تاندوم روتور

عنوان	مقدار
قطر نوک روتور	حداقل ۳۰ اینچ
نسبت نوک به ریشه	۰.۷ الی ۰.۸
فاکتور پخشندگی نوک روتور	کمتر از ۰.۵۵
استحکام نوک روتور	۱.۴ الی ۱.۵

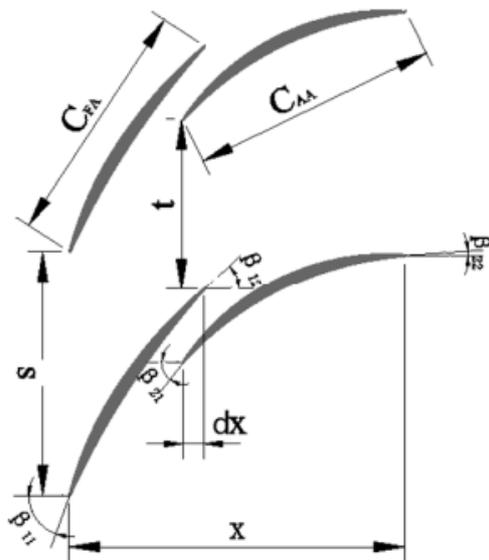
همچنین موارد ذیل در باید در هندسه اشاره شده مورد توجه قرار گیرند:

الف) پره راهنمای ورودی در هندسه وجود ندارد. (جریان ورودی محوری)



ب) خروج جریان به صورت محوری در خروجی استاتور.

ج) پره به صورت دو کمان دایروی می باشد.



شکل ۱. هندسه طبقه دارای تاندم

تبدیل می شوند که با روش ضمنی حل می شوند. یک کانال برای روتور و کانال دیگر برای استاتور مدل شده است. همانطور که قبلاً گفته شد، معادلات به صورت پایا حل شده است. برای به دست آوردن منحنی عملکرد و نسبت فشار طبقه، فشار خروجی پیوسته افزایش می یابد تا زمانی که ناپایداری عددی ملاحظه شود. روش اعمال دوران به روتور با استفاده از مدل چند قاب چرخان یا MRF انجام شده است.

۴. شرایط مرزی

شرایط مرزی که در ادامه بیان خواهد شد، برای همه شبیه سازی های این مطالعه استفاده شده است:

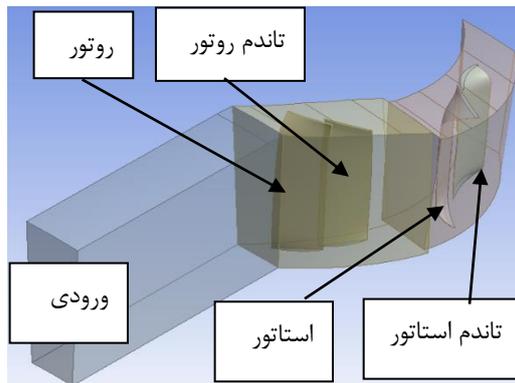
الف) برای ورودی طبقه از فشار و دمای کل استفاده شده است؛ به طوری که فشار کل برابر ۱ اتمسفر، دمای کل برابر ۲۸۸ کلوین می باشد. در ضمن، جهت جریان در ورودی و خروجی محوری است.

ب) تمامی دیواره ها یعنی پره، پوسته و ریشه

جدول ۲. مشخصات هندسی طبقه تاندم

عنوان	معادله
وتر ایرفویل جلویی	$\varphi_{FA} = \beta_{11} - \beta_{12}$
وتر ایرفویل عقبی	$\varphi_{AA} = \beta_{21} - \beta_{22}$
وتر کلی	$\varphi_{OV} = \beta_{11} - \beta_{22}$
وتر متوسط	$C_{eff} = (1 - 0.5 * AO) * s$
صلبیت موثر	$\sigma_{eff} = C_{eff} / s_{eff}$
همپوشانی محوری	$AO = dx / x$
درصد گام	$PP = t / s$

سپس هندسه مورد نظر در سه بعد به صورت زیر رسم شد:



شکل ۲. هندسه رسم شده روتور، تاندم روتور، استاتور و تاندم استاتور مورد مطالعه در سه بعد

۳. مدل عددی

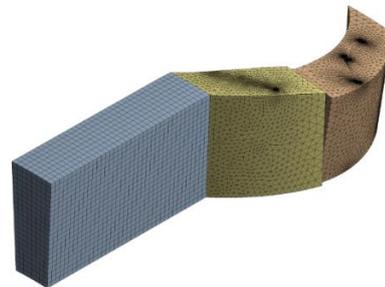
آنالیز عددی جریان سه بعدی با نرم افزار تجاری CFX انجام شده است. برای گسسته سازی محیط محاسباتی از روش راس سلول استفاده شده است. با استفاده از نظریه گاوس انتگرال حجمی به انتگرال سطحی تبدیل می شود و معادلات ناویراستوکس متوسط گیری شده رینولدز در این سطح با انتگرال گیری به معادلات جبری

بدون زبری در نظر گرفته شده است.

ج) در خروجی هم از شرط فشار استاتیک میانگین گیری شده استفاده شده است.

۵. شبکه محاسباتی

پس از تولید هندسه طبقه کمپرسور، شبکه محاسباتی بر اساس مطالعه کیفیت و استقلال شبکه ایجاد شد. پارامتر نسبت فشار روتور جهت بررسی استقلال حل از شبکه در نظر گرفته شده است. به این منظور، ۶ شبکه محاسباتی مختلف ایجاد گردید و در دور طراحی (۴۲۱۰ دور در دقیقه)، پارامتر نسبت فشار ارزیابی شد. مطابق جدول ۳ ملاحظه می شود که پارامتر فوق در ۳ مورد آخر (ردیف ۴ تا ۶) تقریباً ثابت باقی مانده است؛ بنابراین، جهت کاهش هزینه محاسبات، شبکه ۵ با ۲۴۱۳۵۱۲ گره برای مطالعه انتخاب شد.



شکل ۳. شبکه رسم شده بر هندسه روتور و تاندم روتور مورد مطالعه

جدول ۳. نتایج مطالعه استقلال شبکه

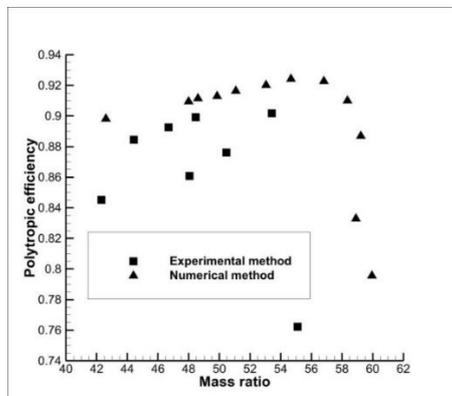
ردیف	تعداد گره‌ها	نسبت فشار روتور
۱	۱۲۳۲۴۲۵	۱/۱۹۵۸
۲	۱۶۸۰۲۱۵	۱/۲۱۵۲
۳	۱۸۵۲۴۶۵	۱/۲۵۵۴
۴	۲۰۱۱۵۸۸	۱/۲۷۵۸
۵	۲۴۱۳۵۱۲	۱/۲۷۸۶
۶	۲۶۲۱۵۸۵	۱/۲۷۸۹

همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می شود، با افزایش تعداد گره‌ها، مقدار نسبت فشار روتور به

مقدار اصلی خود (۱/۲۸) که در گزارش لويس ناسا [۱۴] نیز ذکر شده است، نزدیک تر می شود. با بیشتر نمودن تعداد گره‌ها از ردیف ۱ الی ۳، تغییر نسبتاً زیادی در مقدار نسبت فشار، ملاحظه می شود. اما با ریزتر نمودن از ردیف ۴ تا ۶، نسبت فشار روتور تغییر چندانی نمی نماید و تقریباً ثابت می ماند.

۶. اعتبار سنجی مدل

جهت صحت گذاری نتایج حاصله و اعتبارسنجی مدل، بازده پلی تروپیک به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی گزارش لويس ناسا [۱۴] با تحلیل سه بعدی تحقیق حاضر، در شکل ۴ مقایسه شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می شود، نتایج عددی و آزمایشگاهی، تطابق قابل قبولی با یکدیگر دارند و تفاوت موجود به دلیل عبور دبی جریان بیشتر در نتایج عددی می باشد. دبی جریان بیشتر در تحلیل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی به دلیل اصطکاک سطح کمتر نسبت به اصطکاک موجود در آزمایش است؛ زیرا در گزارش مرجع [۱۴] مقدار آن مشخص نشده است. با توجه به توضیحات ارائه شده، هندسه مدل شده و شبکه اعمال شده، کیفیت لازم جهت شبیه سازی عددی را دارد.



شکل ۴. مقایسه بازده پلی تروپیک روتور تحلیل عددی و آزمایشگاهی در دور 4210 rpm

۷. نتایج و بحث

شکل ۵، بیانگر زاویه انحراف بر حسب درصد دهانه روتور می‌باشد. همانگونه که در این شکل نمایان است، به جز ۱۸٪ ابتدایی دهانه، تاندم باعث کاهش زاویه انحراف می‌شود. در روتور دارای تاندم، از نیمه دهانه تا انتهای آن، مشاهده می‌شود که زاویه انحراف روتور دارای تاندم، مقداری منفی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در ابتدای دهانه، مقدار زاویه انحراف بالاست و با نزدیک شدن به انتهای آن، مقدار زاویه انحراف کاهش می‌یابد.

در نزدیکی ریشه پره به دلیل استحکام بالای آن، امکان وجود زاویه انحراف بالا وجود دارد. به دلیل انحراف بالا، جریان سرعت خود را از دست می‌دهد. از دست دادن سرعت برای کمپرسور بسیار مفید است چرا که با کاهش سرعت، انرژی جریان بالا می‌رود و انتظار از کمپرسور نیز همین است. در انتهای پره نیز به دلیل جلوگیری از فلاتر، زاویه انحراف کاهش می‌یابد.

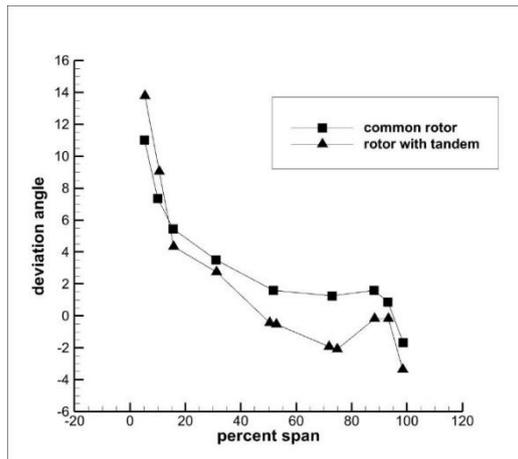
از طرف دیگر مشاهده می‌شود از ریشه تا نوک بال برای روتور دارای تاندم اختلاف زاویه انحراف، ۱۸ درجه و برای روتور عادی ۱۱ درجه می‌باشد. بدین صورت تاندم با افزایش زاویه انحراف در طول دهانه پره روتور، باعث افزایش نسبت فشار در طبقه کمپرسور، کاهش طبقات کمپرسور و در نهایت افزایش کارایی و ضریب جذب کار کمپرسور می‌شود.

همانگونه که در شکل مذکور مشاهده می‌شود، در ۱۰۰٪ دهانه روتور، تاندم باعث افزایش ۲.۵ درجه‌ای زاویه گردش جریان می‌گردد در حالیکه این زاویه انحراف در ۵۰٪ دهانه روتور مقدار ۲ درجه می‌باشد. همانگونه که از بررسی اعداد نیز

مشاهده می‌شود، تاندم باعث گردش بیشتر جریان و در نتیجه افزایش نسبت فشار می‌گردد. زاویه انحراف به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta = \beta_2 - \beta_1 \quad (1)$$

که در رابطه بالا β_1 زاویه ورودی جریان و β_2 زاویه خروجی جریان است.



شکل ۵. مقایسه زاویه انحراف روتور عادی و روتور با تاندم بر حسب درصد دهانه روتور همان گونه که در شکل ۶ مشخص است، ضریب اتلاف روتور عادی و روتور دارای تاندم، تقریباً یکسان و نزدیک به یکدیگر است و مشاهده می‌شود که ضریب اتلاف در ابتدای دهانه مقدار بالایی را نشان می‌دهد. دلیل این امر وجود دیواره در ابتدای اسپن و وجود گردابه و اغتشاش لایه مرزی در این منطقه است.

از طرف دیگر مشاهده می‌شود که در روتور دارای تاندم، به جز در ۲۰٪ از دهانه پره که محل اتصال پره تاندم به روتور می‌باشد، ضریب افت، بیشتر از روتور عادی است. همانگونه که بیان شد، تاندم با افزایش زاویه چرخش جریان باعث افزایش نسبت فشار و در نتیجه افزایش ضریب اتلاف در طبقه کمپرسور و در نتیجه بهبود عملکرد تاندم می‌شود.

همانگونه که نمایان است، تاندم باعث افزایش

۱۶ درصدی میزان ضریب افت در روتور کمپرسور می‌گردد. افزایش ضریب افت باعث افزایش مضاعف نسبت فشار و در نتیجه، بهبود عملکرد کمپرسور می‌گردد.

رابطه ضریب افت به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\omega = \frac{P_{TE_{isen}} - P_{TE}}{\bar{P}_{LE} - P_{LE}} \quad (2)$$

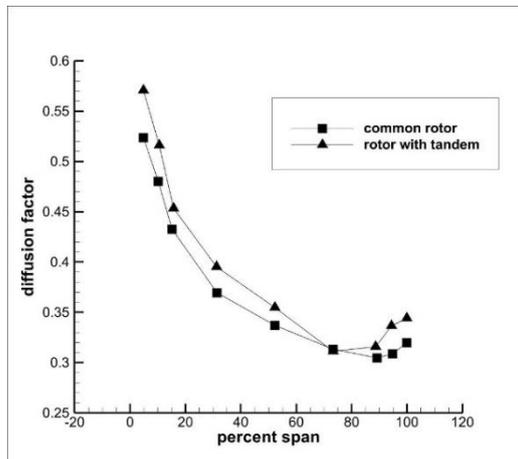
که در رابطه فوق P نشان دهنده فشار، TE نشان دهنده لبه فرار، LE نشان دهنده لبه حمله و \bar{P}_{LE} نیز نشان دهنده فشار میانگیری شده با جرم می‌باشد.

در شکل مذکور نمایان است که تاندم به میزان ۹.۸ درصد باعث افزایش ضریب پخش در روتور کمپرسور می‌گردد که با افزایش میزان ضریب جذب کار در روتور کمپرسور و در نهایت بهینه سازی کمپرسور می‌گردد.

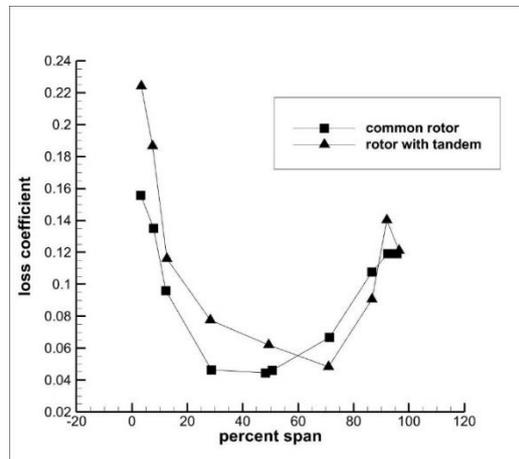
رابطه فاکتور پخش نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right) + \frac{d_2 V_{\theta 2} - d_1 V_{\theta 1}}{(d_2 + d_1) V_1} \quad (3)$$

که در رابطه فوق، V نشانگر سرعت، d نشانگر قطر و V_{θ} نشانگر سرعت شعاعی است.



شکل ۷. مقایسه فاکتور انتشار روتور عادی و روتور تاندم بر حسب درصد دهانه روتور



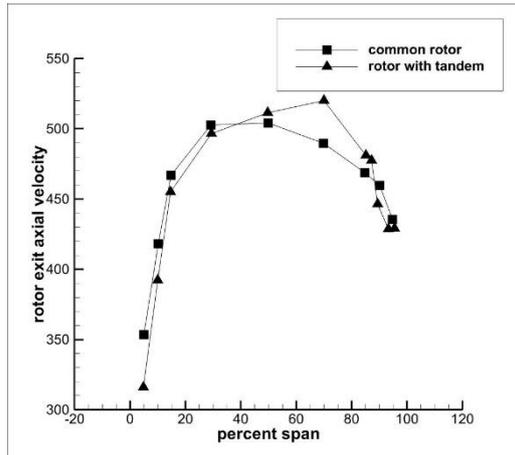
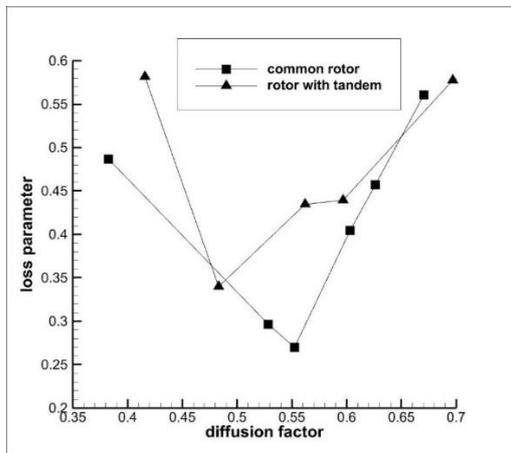
شکل ۶. مقایسه ضریب افت بر حسب درصد دهانه روتور

سرعت محوری خروجی برای روتور عادی و روتور تاندم دار بر حسب درصد دهانه روتور در شکل ۸ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، سرعت محوری خروجی برای هر دو مورد تقریباً یکسان است. سرعت کلی خروجی روتور تاندم دار کمتر از روتور عادی است ولی هندسه روتور طوری طراحی شده که سرعت محوری را ثابت نگاه می‌دارد.

شکل ۷، ضریب پخش (دیفیوژن فاکتور) بر حسب درصد دهانه روتور را نشان می‌دهد. فاکتور انتشار نشان دهنده تمایل جریان به جدایش به دلیل اختلاف فشار است. همانگونه که مشاهده می‌شود، در ابتدای اسپن به دلیل نزدیکی به دیواره، فاکتور انتشار بالایی را از خود نشان می‌دهد. در نهایت، فاکتور به معنی تمایل جریان به دیفیوز شدن است. پس تاندم به دلیل اینکه فاکتور دیفیوز را افزایش می‌دهد، باعث افزایش نسبت فشار و در نهایت بهبود عملکرد کمپرسور می‌شود.

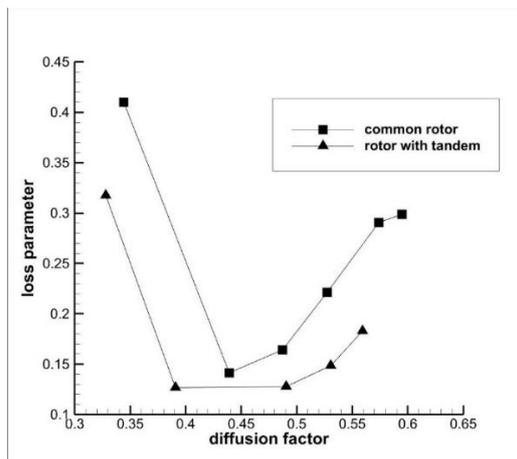


در فاصله ۸۰٪ دهانه روتور مشاهده می‌شود که تاندم باعث افزایش ۹.۳ درصدی پارامتر افت در روتور کمپرسور می‌گردد. افزایش پارامتر افت باعث افت مضاعف فشار و افزایش نسبت فشار کمپرسور می‌گردد. افزایش نسبت فشار باعث کاهش تعداد طبقات کمپرسور و در نهایت کاهش وزن، حجم و نیروی پسا می‌گردد.



شکل ۸. مقایسه سرعت محوری خروجی روتور عادی و روتور با تاندم بر حسب درصد دهانه روتور

شکل ۹. مقایسه پارامتر افت در فاصله ۲۰٪ دهانه در روتور عادی و روتور با تاندم بر حسب فاکتور پخش



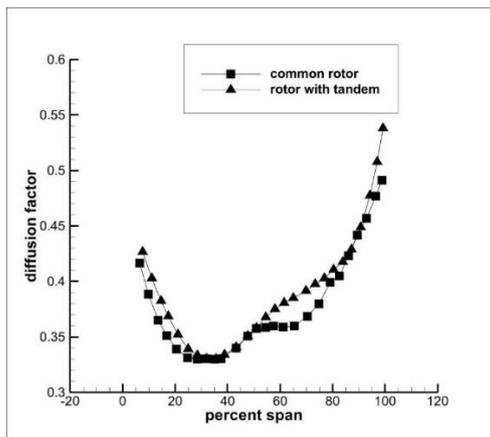
شکل ۱۰. مقایسه پارامتر افت در فاصله ۶۰٪ دهانه در روتور عادی و روتور با تاندم بر حسب فاکتور پخش

شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب پارامترهای افت را بر حسب فاکتور پخش در فواصل ۲۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ دهانه روتور نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود، در کلیه فواصل، با افزایش فاکتور پخش، پارامتر افت نیز افزایش می‌یابد، دلیل این امر این است که فاکتور پخش، میزان تمایل لایه مرزی را به جدایش نشان می‌دهد به همین ترتیب با افزایش فاکتور پخش، ضریب افت نیز افزایش می‌یابد. بدین معنا که با افزایش تمایل جریان به جدایش، افت جریان نیز افزایش می‌یابد.

$$loss\ parameter = \frac{\omega \cos \beta_2 T \cdot E}{2} \quad (4)$$

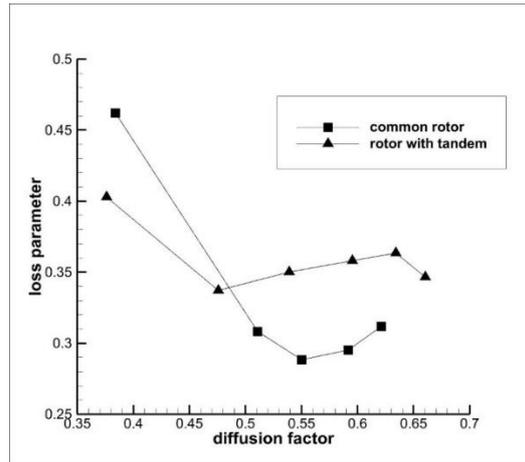
همچنین با مشاهده شکل‌های مذکور، مشاهده می‌شود که با نزدیک شدن به انتهای دهانه پره، در فاکتور پخش یکسان، میزان پارامتر افت در روتور دارای تاندم، بیشتر از روتور عادی است. این موضوع به این دلیل رخ می‌دهد که در انتهای دهانه روتور تاندم به دلیل چرخش بیشتر جریان، فشار کاهش محسوسی می‌یابد و بدین علت پارامتر افت میزان بالاتری را نشان می‌دهد.

شکل ۱۳ ضریب پخش استاتور را بر حسب درصد دهانه بیان می‌نماید. همانگونه که مشخص است در ابتدای دهانه به دلیل همجواری با پوسته اصلی ضریب و در انتهای دهانه به دلیل اثرات سه بعدی، ضریب پخش بیشتر از سایر نواحی می‌باشد. با دقت بیشتر مشاهده می‌شود که ضریب پخش استاتور دارای تاندم به مقدار بسیار کمی بیشتر از استاتور عادی است. دلیل این امر، تمایل بیشتر جریان روی تاندم برای جدایش می‌باشد. در نتیجه توانایی بیشتر جریان برای پخش و در نتیجه بهبود عملکرد کمپرسور را در پی خواهد داشت.



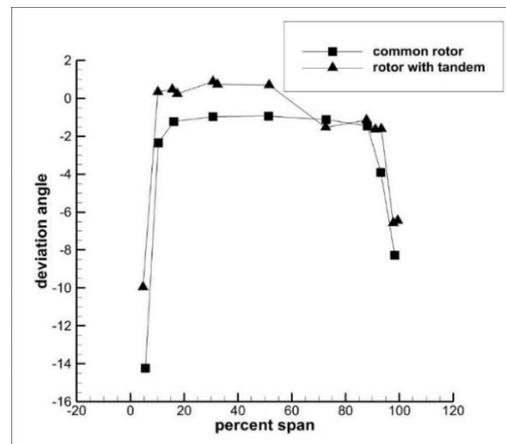
شکل ۱۳. مقایسه ضریب پخش در استاتور عادی و استاتور با تاندم بر حسب درصد دهانه

همان گونه که در شکل ۱۴ نمایان است، در ابتدا و انتهای استاتورها شاهد افزایش ضریب افت هستیم چرا که در ابتدا به دلیل وجود پوسته و در انتها به دلیل وجود شرایط ۳ بعدی شاهد افزایش ضریب افت می‌باشیم. همچنین مشاهده می‌شود که استاتور دارای تاندم افت بیشتر پیدا می‌کند که به دلیل کاهش بیشتر سرعت ورودی به دلیل وجود روتور دارای تاندم قبل از استاتور است.



شکل ۱۱. مقایسه پارامتر افت در فاصله ۸۰٪ دهانه در روتور عادی و روتور با تاندم بر حسب فاکتور پخش

همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، زاویه انحراف استاتور دارای تاندم بیشتر از استاتور عادی است. دلیل این افزایش زاویه انحراف، وجود تاندم بعد از استاتور است که باعث چرخش بیشتر جریان و در نتیجه افزایش زاویه انحراف در قسمت استاتور می‌شود. افزایش زاویه انحراف جریان در استاتور باعث چرخش بیشتر جریان افت فشار و در نهایت افزایش نسبت فشار طبقه کمپرسور می‌گردد. بکارگیری تاندم هم در روتور و هم در استاتور باعث افزایش مضاعف نسبت فشار در طبقه کمپرسور، کاهش تعداد طبقات و در نهایت کاهش وزن کمپرسور می‌گردد.



شکل ۱۲. مقایسه زاویه انحراف در استاتور عادی و استاتور با تاندم بر حسب درصد دهانه

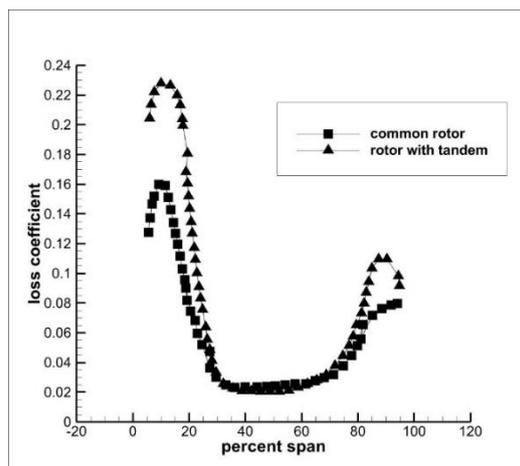
کاهش نیروی پسای ایجاد شده در هواگرد می‌گردد.

۹. فهرست علائم

C	وتر پره (m)
S	طول محی طی پره تا پره (m)
t	طول محی طی پره جلو تا پره عقب (m)
X	فاصله محوری (m)
AO	همپوشانی محوری (m)
ط	گام (بدون بعد)
P	فشار (Pa)
T	دما (K)
V	سرعت پره (m/s)
u	سرعت جری‌ان (m/s)
ω	سرعت دورانی (m/s)
N	سرعت دورانی پره (rpm)
ρ	چگالی (m ³ /V)
ϕ	ضریب جری‌ان (بدون بعد)
σ	مقدار صلیبیت (بدون بعد)
k	ضریب پخش حرارتی (بدون بعد)
μ	ضریب لزجت دی‌نامیکی (بدون بعد)
β	زاویه تی‌غه (زاویه)

۱۰. مراجع

- [1] Schneider, Tim & Kozulovic, Dragan. (2013). Flow Characteristics of Axial Compressor Tandem Cascades at Large Off-Design Incidence Angles. 6. 10.1115/GT2013-94708.
- [2] MP, M. (2022). Characterization of tandem airfoil configurations of axial compressors. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 39(2), 167-181.
- [3] Kumar, Amit & Pradeep, Maya. (2018). Performance Evaluation of a Tandem Rotor Under Design and Off-Design Operation. V02AT39A009. 10.1115/GT2018-75478.
- [4] Pan, Ruochi & Song, Zhaoyun & Liu, Bo. (2020). Optimization Design and Analysis of Supersonic Tandem Rotor Blades. Energies. 13. 3228. 10.3390/en13123228.
- [5] Sun, S., Hao, J., Yang, J., Zhou, L., & Ji, L. (2022). Impacts of tandem configurations on the aerodynamic performance of an axial supersonic through-flow fan cascade. Journal of Turbomachinery, 144(4), 041009.
- [6] Kumar, A., Chhugani, H., More, S., and Pradeep, A. M. (March 3, 2022). "Effect of



شکل ۱۴. مقایسه ضریب افت در استاتور عادی و استاتور با تاندم بر حسب درصد دهانه

۸. نتیجه گیری

در این تحقیق، تاثیر پارامترهای افت با به کارگیری پره تاندم در کمپرسور محوری مورد مطالعه قرار گرفته شده است. روش این تحقیق، عددی، سه بعدی و به صورت ناپایا می‌باشد. موارد مشاهده شده به‌قرار زیر می‌باشند:

- (الف) تاندم در کمپرسور محوری مورد مطالعه باعث افزایش ۲.۵ درجه‌ای زاویه انحراف جریان می‌شود.
- (ب) تاندم در کمپرسور محوری مورد مطالعه باعث افزایش ۱۶ درصدی میزان ضریب افت در روتور کمپرسور محوری می‌گردد.
- (ج) در تحقیق حاضر مشاهده شد که تاندم به میزان ۹.۸ درصد باعث افزایش ضریب پخش در روتور کمپرسور محوری می‌گردد.
- (د) در فاصله ۸۰٪ دهانه روتور، تاندم باعث افزایش ۹.۳ درصدی پارامتر افت در روتور کمپرسور محوری می‌گردد.
- (ه) تاندم با افزایش پارامترهای افت، باعث افزایش نسبت فشار طبقه کمپرسور، کاهش تعداد طبقات، کاهش وزن و حجم موتور و در نهایت

Differential Tip Clearance on the Performance of a Tandem Rotor." ASME. J. Turbomach.

- [7] Konrath, L., Peitsch, D., and Heinrich, A. (April 19, 2022). "An Analysis of the Secondary Flow Around a Tandem Blade Under the Presence of a Tip Gap in a High-Speed Linear
- [8] More, S., Kumar, A., Pradeep, A.M. (2023). Numerical Simulations on Performance of a Hybrid and a Tandem Rotor. In: Sivaramakrishna, G., Kishore Kumar, S., Raghunandan,
- [9] Cheng, H.; Song, Z.; Liu, B. Aerodynamic Study on the Influence Mechanism of Bow Blades on the Flow Field of Supersonic Tandem Rotors. *Energies* 2022, 15, 4474.
- [10] Kumar, A., John, J. T., Chhugani, H., Kumar, A., & Pradeep, A. M. (2022). Aerodynamics of Sweep in a Tandem-Bladed Subsonic Axial Compressor Rotor. *Journal of Fluids Engineering*, 144(12), 121203.
- [11] Baojie, L. I. U., Zhang, C., Guangfeng, A. N., Du, F. U., & Xianjun, Y. U. (2022). Using tandem blades to break loading limit of highly loaded axial compressors. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(4), 165-175.
- [12] Babu, S., Chatterjee, P., & Pradeep, A. M. (2022). Transient nature of secondary vortices in an axial compressor stage with a tandem rotor. *Physics of Fluids*, 34(6).
- [13] Benis, A. S., & Aghaei-Togh, R. (2023). Investigation of the Difference Between Ordinary and FSI Numerical Solution for Flutter of Tandem Compressor. *International Journal of Acoustics & Vibration*, 28(4).
- [14] J. A. Brent, J. G. Cheatham, And D. R. Clemmons, "Single-Stage Experimental Evaluation Of Tandem-Airfoil Rotor And Stator Blading For Compressors, Part Vii - Data And Performance For Stage E", January 1972, Pratt & Whitney Aircraft, Division Of United Aircraft Corporation, Florida Research And Development Center, Prepared For National Aeronautics And Space Administration, Nasa Lewis Research Center, Contract Nas3-11158.

۲۲۱

سال ۱۳ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

نشریه علمی

دانش و فناوری هوا فضا



تأثیر پارامترهای افیت با به کارگیری پره تاندم
در کمپرسور محوری

۲۲۲

سال ۱۳ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

نشریه علمی
دانش و فناوری خراسان



تأثیر پارامترهای افقت با به کارگیری پره تاندم
در کمپرسور محوری