

تغییر اندازه توربین شعاعی یک توربوشارژر برای استفاده در موتوری با احتراق رقیق*

مقاله پژوهشی

مهیار مفاخری^(۱) اسرا امانی^(۲) علی مددی^(۳)

چکیده هدف اصلی این مقاله شبیه‌سازی عددی توربین شعاعی توربوشارژر یک موتور احتراق داخلی و بازطراحی آن است. یکی از روش‌های کاهش میزان آلاینده‌ها، کاهش دمای محفظه احتراق با استفاده از احتراق رقیق است. بدین منظور لازم است که موتور با جریان هوای بیشتری کار کند. برای دستیابی به جریان هوای بیشتر لازم است که تغییراتی در هندسه توربوشارژر اعمال شود. در گام نخست، سعی شده است شبیه‌سازی عددی مناسب برای این مسئله انجام شود، سپس روش عددی مناسب یافت شده است و اعتبارسنجی آن مطابق با داده‌های تجربی انجام می‌شود. در ادامه، تغییر اندازه توربوشارژر انجام و برای افزایش جریان، سناریو متفاوت پیشنهاد می‌شود و با استفاده از شبیه‌سازی عددی، عملکرد آن‌ها ارزیابی می‌شود. در سناریو اول، فقط شعاع منحنی هاب کاهش می‌یابد که منجر به افزایش نیم‌درصدی جریان عبوری می‌شود. در سناریو دوم، شعاع شراد افزایش و شعاع هاب کاهش می‌یابد که نتیجه آن تغییر هفت‌درصدی نرخ جریان بوده است. در سناریو سوم، شعاع ورودی و شعاع شراد افزایش و شعاع هاب کاهش می‌یابد؛ این تغییر هندسه منجر به افزایش یازده‌درصدی جریان عبوری می‌شود. در نهایت در سناریو چهارم، هندسه توربین بدون هیچ محدودیتی تغییر می‌یابد و جریان عبوری بیست‌درصد افزایش پیدا می‌کند. در کم‌هزینه‌ترین سناریو افزایش چشمگیری در دبی جرمی ایجاد نشده، در سناریو کم‌هزینه دوم ۷ درصد، در سناریو نسبتاً کم‌هزینه سوم ۱۱ درصد و در سناریو پرهزینه چهارم ۲۰ درصد افزایش دبی جرمی در شبیه‌سازی عددی مشاهده شده است. همچنین درباره بازده سکون به سکون هم در سناریوهای اول و دوم تغییرات محسوسی دیده نشده و در سناریو سوم افزایش سه‌درصدی بازده حاصل شده است. لازم به ذکر است که سناریو چهارم عملاً بازطراحی توربین نبوده و براساس روش‌های ذکر شده در بخش مقدمه به روش کلاسیک طراحی شده است.

واژه‌های کلیدی توربین شعاعی، توربوشارژر، شبیه‌سازی عددی، CFD، تغییر اندازه.

مقدمه

طراحی یک‌بعدی مطالعه شوند تا با توسعه آن‌ها قیدها و شرایط مختلف روی مسئله اعمال شود. در ادامه، توضیح مختصری درباره مزایای احتراق رقیق بیان می‌شود و به‌مرور روش‌های طراحی یک‌بعدی و بازطراحی بررسی می‌شوند.

کاهش ابعاد وسایل استفاده‌شده موجب صرفه‌جویی در هزینه ساخت می‌شود و به حفظ محیط‌زیست کمک شایانی می‌کند. موتورهای احتراق داخلی هم از این قاعده مستثنا نیستند. توربوشارژرها از یک توربین و

موتور احتراق داخلی با شرایط استوکیومتری در حال کار است و به دلیل دمای زیاد احتراق استوکیومتری باعث تجزیه نیتروژن و ایجاد آلاینده‌ها می‌شود. برای کاهش دمای احتراق و بهبود میزان آلایندگی نیاز است حجم هوای وارد شده به موتور افزایش یابد که نتیجه آن گسترده‌تری در پیچه ورودی توربین است. هدف این پژوهش یافتن کم‌هزینه‌ترین روش برای افزایش دبی جرمی توربین است. بدین منظور لازم است روش‌های

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۵/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۲۸ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

(۲) دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

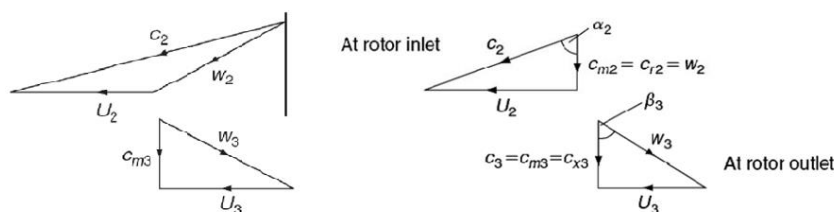
(۳) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران. Email: Ali.Madadi@aut.ac.ir

باتوجه به این که هدف از این پژوهش بازطراحی توربین موجود با استفاده از شبیه‌سازی عددی است، بررسی روش‌های طراحی توربین‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شود. روش ویتفیلد [3,4] و روش آنزیر [5] مرسوم‌ترین روش‌های طراحی توربین‌های شعاعی هستند و سایر روش‌ها، برگرفته از این روش هستند. چن [6] با استفاده از زوایای مثبت، منفی و صفر روشی برای بهینه‌سازی توربین شعاعی ارائه کرده است. احمد دابو و همکارانش [7] با استفاده از حل عددی و کوپل حل با روش بهینه‌سازی جست‌وجوی تصادفی، بازدهی یک پره حاصل از بازطراحی سه‌بعدی را از ۸۳ درصد به ۸۹ درصد افزایش دادند. در مقاله یادشده در مرجع [8] سورخا یک میکروتوربین شعاعی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی کرده است و نتیجه کار، کاهش ۲ میلی‌متری شعاع ریشه بوده است. در نهایت میلر (مرجع [9]) با استفاده هم‌زمان از الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی، توربین شعاعی یک توربوشارژر را بهینه‌سازی کرده و راندمان از ۷۵ درصد به ۸۰ درصد افزایش یافته است. در پژوهش [11] ایچورن با استفاده از قیدهای مناسب و سپس پیاده‌سازی روش‌های بهینه‌سازی اقدام به بازطراحی یک توربین شعاعی کرده است (البته این پژوهش روی یک توربین با استاتور هندسه متغیر انجام شده است) و هدف از بازطراحی فقط افزایش بازدهی است، برخلاف مسئله پژوهش حاضر که هدف اصلی افزایش دبی بوده و اهمیت افزایش بازدهی در سایر مراحل قرار می‌گیرد.

کمپرسور که معمولاً روی یک محور قرار گرفته، ساخته شده است [1] و در این زمینه کمک زیادی به دنیای مهندسی کرده‌اند؛ در واقع در توربوشارژرها با استفاده از افزایش فشار و دبی جرمی ورودی، کاهش اندازه موتور را امکان‌پذیر می‌کند و این کاهش اندازه موتور، کاهش مصرف سوخت را نیز به دنبال دارد.

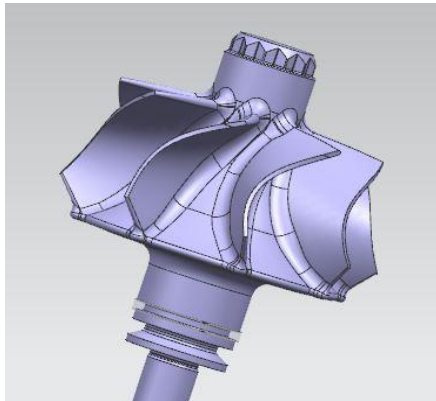
توربین‌ها به دو دسته کلی توربین شعاعی و توربین محوری تقسیم‌بندی می‌شوند. در مصارفی که به تولید انرژی اندکی نیاز دارند، مانند موتور خودروها یا ماشین‌آلات صنعتی، استفاده از توربین‌های شعاعی گزینه مناسبی است؛ زیرا در جریان‌های پایین در یک طبقه، نسبت فشار بالایی تولید می‌کنند. بنابراین، در توربین میکرو، توربین‌ها، توربوشارژرها و توربین‌های ارزان‌قیمت به کار گرفته می‌شود [2].

از دیدگاه جریان، توربین‌های شعاعی به دسته جریان داخلی و جریان خارجی تقسیم می‌شوند. در توربین‌های شعاعی جریان خارجی، جریان خارجی از شعاع کمتر به سمت شعاع بیشتر حرکت می‌کند و در طی انبساط جریان، کار تولید می‌شود. در توربین‌های جریان داخلی، جریان داخلی از شعاع بیشتر به شعاع کمتر می‌رود و بسته به این که جریان در چه زاویه‌ای وارد می‌شود، به دو نوع ۹۰ درجه (جریان کاملاً شعاعی وارد می‌شود) و غیر ۹۰ درجه (به این نوع توربین‌ها، توربین‌های کانتیلور گفته می‌شود) تقسیم می‌شوند. در شکل (۱)، مثلث‌های سرعت توربین شعاعی جریان داخلی ۹۰ درجه و غیر ۹۰ درجه نشان داده شده است [3].

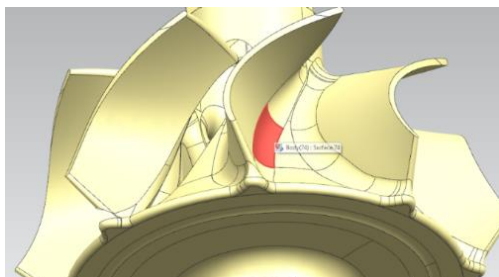


شکل ۱ مثلث‌های سرعت مربوط به توربین شعاعی جریان داخلی ۹۰ درجه (سمت راست) و غیر ۹۰ درجه (سمت چپ) [3]

نمی‌کند). در شکل (۳) پرّه توربین بدون فیلِت نشان داده شده است. در ادامه با دستور منحنی‌های پارامتر ثابت، پرّه مربوط به توربین جداسازی می‌شود؛ به این ترتیب می‌توان نمای نصف‌النهاری و نمای سه‌بعدی پرّه را برای شبیه‌سازی عددی استخراج کرد (شکل ۴).



شکل ۲ هندسه توربین استخراج شده با نرم‌افزار کتیا

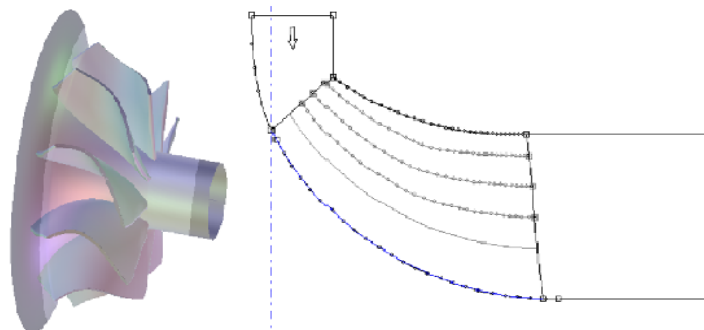


شکل ۳ نمای پرّه توربین با فیلِت حذف شده

در این پژوهش ابتدا هندسه توربین استخراج و با استفاده از نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس شبیه‌سازی شده است. پس از آن با استفاده از داده‌های تجربی صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی انجام شده است. در مرحله بعدی با استفاده از روش‌های طراحی یک‌بعدی و نوآورانه، سعی شده است هزینه‌های بازطراحی توربین کم شود و در نهایت چهار سناریو که هرکدام قیده‌های مختلفی برای طراحی دارند، بررسی شده است. در سناریو اول نیازی به تغییر پوسته توربوشارژر نیست. در سناریو دوم پوسته باید براده‌برداری شود (اما تغییرات به حدی است که با براده‌برداری امکان‌پذیر باشد). در سناریو سوم ورودی و خروجی هم تغییر کرده‌اند که نیاز است پوسته برش‌کاری و سپس جوش‌کاری شود و در آخر سناریو چهارم با اجرای بدون قید کد طراحی یک‌بعدی اجرا می‌شود. پس از ارائه سناریوها هرکدام از سناریوها شبکه‌بندی و با شرایط یکسانی مقایسه شده‌اند و بهترین آن‌ها برای طراحی انتخاب و نمایش داده می‌شود.

استخراج هندسه

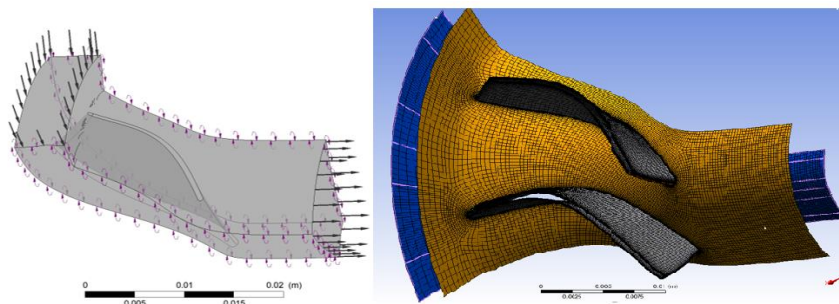
هندسه توربین با نرم‌افزار کتیا جداسازی شده است (شکل ۲). سپس با استفاده از نرم‌افزار ان‌ایکس، برای سادگی شبکه‌بندی و کاهش زمان حل، فیلِت پرّه حذف می‌شود (این موضوع به ماهیت هندسه لطمه‌ای وارد



شکل ۴ نمای نصف‌النهاری پرّه توربین (تصویر سمت راست) و نمای سه‌بعدی پرّه توربین (تصویر سمت چپ)

جدول ۱ نوع حل و شرایط مرزی مسئله شبکه‌بندی

شرط مرزی مدنظر	قیود اعمال شده در شرط مرزی
نوع حل و شرایط شبیه‌سازی	حل از نوع دقت بالا بوده و در شرایط پایا انجام شده است.
شرایط مرزی ورودی	دما و فشار سکون ورودی به‌عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته می‌شود. (به ترتیب ۱۰۰۰ کلوین و ۴ بار)
شرایط مرزی خروجی	فشار استاتیک خروجی به‌عنوان شرط مرزی خروجی در نظر گرفته می‌شود. (۱۸۰ کیلو پاسکال)
شرایط مرزی دیواره‌ها	بدون تنش برشی، بدون انتقال حرارت و زبری ۶ میکرون.
شرایط مرزی کانال حل	به‌صورت چرخش متناوب در نظر گرفته شده است.
شرایط اغتشاش	مدل اس‌اس‌تی و ضریب دیواره حدود ۱/۵ در نظر گرفته شده است. (در مدل اس‌اس‌تی، ضریب دیواره باید کمتر از ۵ در نظر گرفته شود)



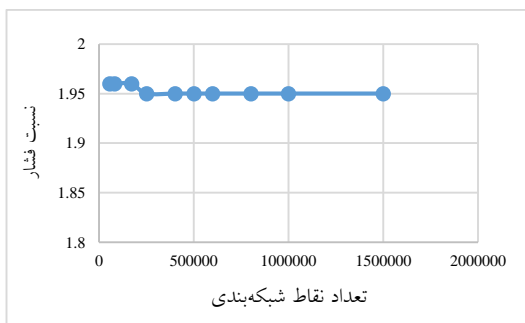
شکل ۴ شبکه‌بندی هندسه سه‌بعدی پره (تصویر سمت راست) و شرایط مرزی کانال حل (تصویر سمت چپ)

شرایط شبیه‌سازی عددی و شرایط مرزی

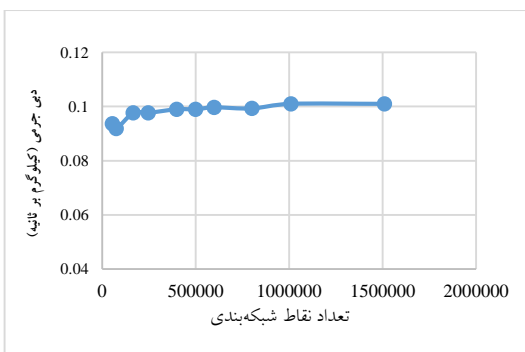
شبکه محاسباتی به‌حالت خودکار و با نرم‌افزار توربوگرید تولید شده و از نوع سازمان‌یافته بوده و در حالت لایه مرزی قرار گرفته است. این شبکه دارای پانصد هزار نقطه برای میدان محاسباتی جریان هندسه بوده که طبق الگوریتم استقلال از شبکه، حاصل شده است. حل شبکه محاسباتی تولیدشده از طریق نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس بوده و نوع حل به همراه شرایط مرزی حل در جدول (۱) توضیح داده شده است. در این پژوهش سیال عامل گاز ایدئال هوا با دمای خروجی از موتور در نقطه طراحی بوده و صرفاً افزایش دبی جرمی و نهایتاً افزایش کار که به انتقال توان بیشتر به کمپرسور و تزریق هوای بیشتر منجر می‌شود، بررسی شده است (همچنین

محصولات احتراق و اثر نسبت هوا به سوخت بررسی نشده است). در این حل، ضریب هم‌گرایی برای میانگین مربعی باقی‌مانده‌ها در حدود 10^{-6} در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی در حالت پایا انجام شده و شرایط مرزی ورودی روی دما و فشار سکون و شرایط مرزی خروجی روی فشار استاتیک تنظیم شده است؛ به‌علاوه، شرایط مرزهای کانال به‌صورت چرخش متناوب مدل‌سازی می‌شود. همچنین دیواره‌ها به‌صورت شرط مرزی بدون لغزش با ضریب زبری ۶ هستند. مدل توربولانسی از نوع مدل SST بوده و برای دقت بهتر شبکه محاسباتی به گونه‌ای طراحی شده است که ضریب دیواره ۱/۵ باشد. در شکل (۵) تصویر مربوط به شبکه‌بندی هندسه و شرایط مرزی کانال مشاهده می‌شود.

جدول‌های فشار و دبی جرمی برحسب تعداد نقاط شبکه استخراج شده است. همان‌طور که از شکل (۸) مشخص است، تغییرات منحنی نسبت فشار بعد از چهارصد هزار گره در شبکه‌بندی بسیار اندک بوده، به طوری که با چهاربرابر شدن تعداد نقاط شبکه تغییرات نسبت فشار کمتر از نیم درصد خواهد شد؛ در منحنی دبی (شکل ۹) شیب تغییرات بعد از پانصد هزار نقطه بسیار اندک است، به طوری که تغییرات جواب بین پانصد هزار نقطه و یک میلیون و پانصد هزار نقطه در حدود ۱/۱ درصد خواهد شد.



شکل ۸ استقلال شبکه محاسباتی. منحنی نسبت فشار برحسب تعداد نقاط

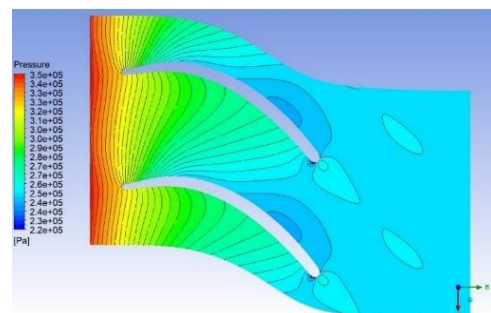


شکل ۹ استقلال شبکه محاسباتی برای منحنی دبی جرمی برحسب تعداد نقاط شبکه بندی

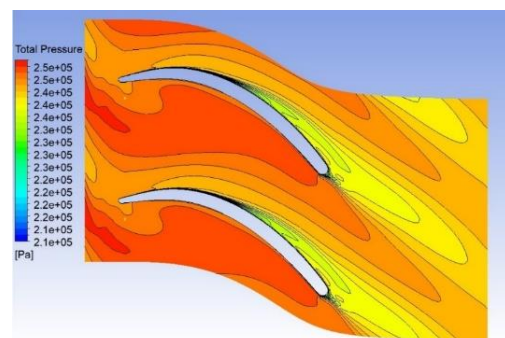
برای بررسی دقیق‌تر مقدار عددی نسبت فشار و دبی جرمی برحسب تعداد نقاط شبکه‌بندی، این مقادیر در جدول (۲) ذکر شده‌اند. محل کاهش شیب

برای اطمینان از حل شبکه‌بندی و عملکرد بهینه پره نمودارهای فشار برای پره رسم شده است. همان‌طور که از شکل (۶) مشاهده می‌شود، عدم شکستگی و تغییرات شدید جریان بیان‌کننده روند یکنواخت افت فشار و شکل‌گیری درست جریان در امتداد پره است.

از طرفی نمودار فشار سکون در دستگاه نسبی، بیان‌کننده افت است. همان‌طور که از شکل (۷) مشخص است، به جز در سطح مکشی پره و لبه فرار، تغییراتی وجود ندارد و این موضوع بیان‌کننده عدم تشکیل شوک و جدایش در طول پره توربین است (جریان ماخ زیر ۱ دارد و در محدوده خفگی نیست).



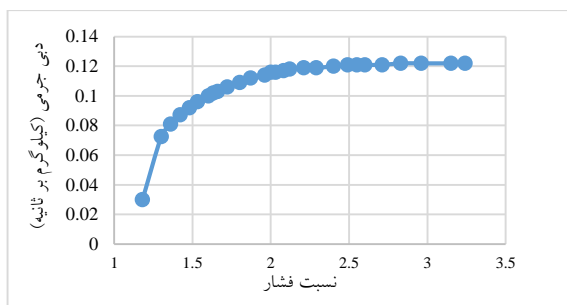
شکل ۶ توزیع فشار در شعاع میانی نقطه طراحی



شکل ۷ فشار سکون در دستگاه نسبی نقطه طراحی

استقلال از شبکه محاسباتی

پس از اطمینان از شکل‌گیری درست جریان در طول پره، استقلال از شبکه محاسباتی باید ارزیابی شود. برای اطمینان از استقلال شبکه محاسباتی، شبکه‌بندی‌های مختلفی ارزیابی شده‌اند و برای هر کدام نمودارها و



شکل ۱۰ منحنی عملکرد توربین (دبی جرمی بر حسب نسبت فشار)

نمودارهای مسئله در بازه چهارصد هزار تا پانصد هزار نقطه اتفاق می افتد. به همین دلیل در این مقاله شش صد هزار نقطه برای شبکه بندی هندسه انتخاب می شود؛ زیرا در این مقدار تغییرات خاصی در نسبت فشار و دبی جرمی رخ نمی دهد و استقلال از شبکه محاسباتی به خوبی تضمین می شود.

منحنی عملکرد توربین

به منظور استخراج منحنی عملکرد توربین، ۳۲ شبیه سازی عددی با نرم افزار CFX در همه نقاط و همه مراحل فشار و دمای سکون ورودی ثابت بوده و با تغییر فشار استاتیک خروجی منحنی عملکرد رسم شده است. در این شبیه سازی ها، دما و فشار سکون ورودی معادل با ۱۰۰۰ کلوین و ۰ بار بوده و فشار خروجی از ۰ تا ۳ بار تغییر کرده است. در شکل (۱۰)، نمودار دبی جرمی بر حسب نسبت فشار رسم شده است. در این منحنی از حدود نسبت فشار ۲، دبی جرمی تقریباً ثابت می ماند؛ بنابراین نسبت فشار ۲ را می توان آغاز خفگی در نظر گرفت.

جدول ۲ مقدار عددی نسبت فشار و دبی جرمی بر اساس تعداد

نقاط شبکه بندی

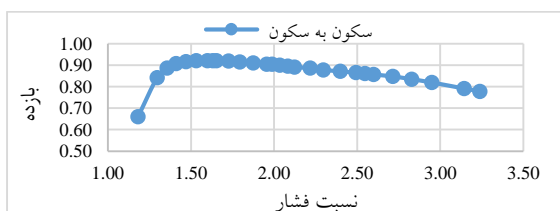
تعداد نقاط شبکه بندی	نسبت فشار	دبی جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)
۶۰۰۰۰	۱/۹۷	۰/۰۹۳۶
۸۰۰۰۰	۱/۹۷	۰/۰۹۲۸
۱۷۰۰۰۰	۱/۹۶	۰/۰۹۷۶
۲۵۰۰۰۰	۱/۹۶	۰/۰۹۳۶
۴۰۰۰۰۰	۱/۹۵	۰/۰۹۸۴
۵۰۰۰۰۰	۱/۹۵	۰/۰۹۸۴
۶۰۰۰۰۰	۱/۹۵	۰/۰۹۹۲
۸۰۰۰۰۰	۱/۹۵	۰/۰۹۹۲
۱۰۰۰۰۰۰	۱/۹۵	۰/۱۰۰۰
۱۵۰۰۰۰۰	۱/۹۴	۰/۱۰۰۰

در ادامه روابط مورد نیاز برای محاسبه بازده سکون به سکون و بازده سکون به استاتیک به ازای نسبت فشارهای مختلف در روابط (۱ و ۲) معرفی شده اند. در رابطه (۱) که فشار خروجی فشار سکون است، راندمان آدیاباتیک سکون به سکون محاسبه می شود و در رابطه (۲) که فشار خروجی، فشار استاتیکی است، راندمان آدیاباتیک سکون به استاتیک محاسبه می شود.

$$\eta_{t-t} = \frac{(T_{01}/T_{02}) - 1}{(P_{01}/P_{02})^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} \quad (1)$$

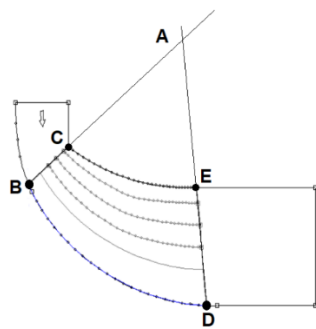
$$\eta_{t-s} = \frac{(T_{01}/T_2) - 1}{(P_{01}/P_2)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} \quad (2)$$

از شکل های (۱۰ و ۱۱)، نقطه ای با نسبت فشار ۲/۰۳، بازده سکون به سکون ۰/۹ و دبی جرمی ۰/۱ کیلوگرم بر ثانیه، به عنوان نقطه طراحی انتخاب می شود. این نقطه، در نزدیکی محدوده خفگی است و راندمانی نزدیک به بیشینه مقدار قابل حصول دارد.



شکل ۵ منحنی عملکرد توربین (بازده توربین بر حسب نسبت فشار)

B فقط در امتداد خط AC و تغییرات نقطه D فقط در امتداد خط AE انجام می‌شود. در ادامه این سناریوها توضیح داده شده و به ترتیب از کم‌هزینه به پرهزینه مرتب شده‌اند. در واقع سناریوهای کم‌هزینه قیدهای بیشتری دارند که این قیدها باعث شده است هزینه تغییر آن‌ها برای سازنده زیاد نباشد. سناریو چهارم حاصل خروجی اجرای کد طراحی بدون قید است. دلیل تغییرات شگرف نیز در همین مسئله مقیدنبودن این سناریو است. در جدول (۳) سناریوهای معرفی شده به صورت خلاصه بیان شده‌اند.



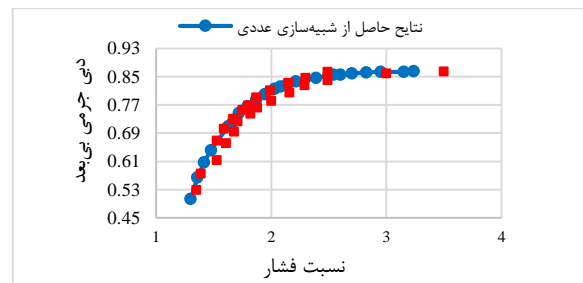
شکل ۱۳ نحوه تغییر نقاط ورود و خروج

سناریو اول

در این روش با ثابت نگه داشتن منحنی شراد، شعاع ورودی و خروجی در شعاع میانی، صرفاً منحنی هاب تغییر کرده و شعاع آن حدود ۰/۵ میلی‌متر کاهش یافته که حدود ۵ درصد شعاع کل است. نقطه قوت این روش در این است که به هیچ‌گونه تغییری در پوسته و بدنه توربوشارژر نیاز ندارد و صرفاً با تغییر پروانه ورودی می‌توان آن را عملی کرد. پس از به دست آمدن نقاط ورود و خروج هاب، منحنی هاب طبق تغییرات بی‌بعد از هندسه اولیه طبق کد طراحی به دست آمده است. توزیع زاویه‌ای نیز به صورت بی‌بعد از هندسه اولیه به دست آمده و در بازه تغییرات به دست آمده از کد طراحی اعمال شده است. برای محاسبه ضخامت نیز (مانند زاویه)، به صورت بی‌بعد از هندسه اولیه استفاده شده است، با این تفاوت که ضخامت بیشینه و کمینه آن طبق پیش‌بینی

صحت‌سنجی

صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی از طریق داده‌های تجربی موجود انجام می‌شود [10]. ذکر این نکته حائز اهمیت است که این داده‌ها به صورت بی‌بعد ثبت شده‌اند، بنابراین برای استفاده از این داده‌ها، نتایج خروجی را هم باید بی‌بعد شوند. از مقایسه نتایج تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی (شکل ۱۲) می‌توان به این نتیجه رسید که شبیه‌سازی عددی از دقت بالایی برخوردار است.



شکل ۱۲ نمودار صحت‌سنجی شبیه‌سازی عددی با نتایج تجربی [10]

سناریوها و روش‌های پیشنهادی برای افزایش

دبی جرمی

در این مقاله، با استفاده از کد طراحی بر روی هندسه توربین تغییراتی برای افزایش دبی جرمی اعمال می‌شود. سپس هر سناریو با استفاده از روش عددی صحت‌سنجی شده و در بخش قبل شبیه‌سازی شده است. چهار سناریو از طریق شبیه‌سازی عددی برای افزایش دبی جرمی توربین بررسی می‌شود. این سناریوها بسته به میزان تغییراتی که در شعاع هاب یا شراد یا هر دو انجام می‌شود، افزایش دبی و بازدهی را به دنبال دارند. در شکل (۱۳)، نمای نصف‌النهاری پره توربین همراه با نقطه A و خطوط ورود و خروج نشان داده شده است. نکته‌ای که باید به آن توجه کرد، این است که در سناریوهای اول، دوم و سوم نقطه حاصل از برخورد خط ورود و خروج پره ثابت می‌ماند. بنابراین، طبق شکل (۱۳)، تغییرات نقطه

هستند. پس از آن، تنظیمات صحت‌سنجی شده مجدداً با نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس انجام می‌گیرد.

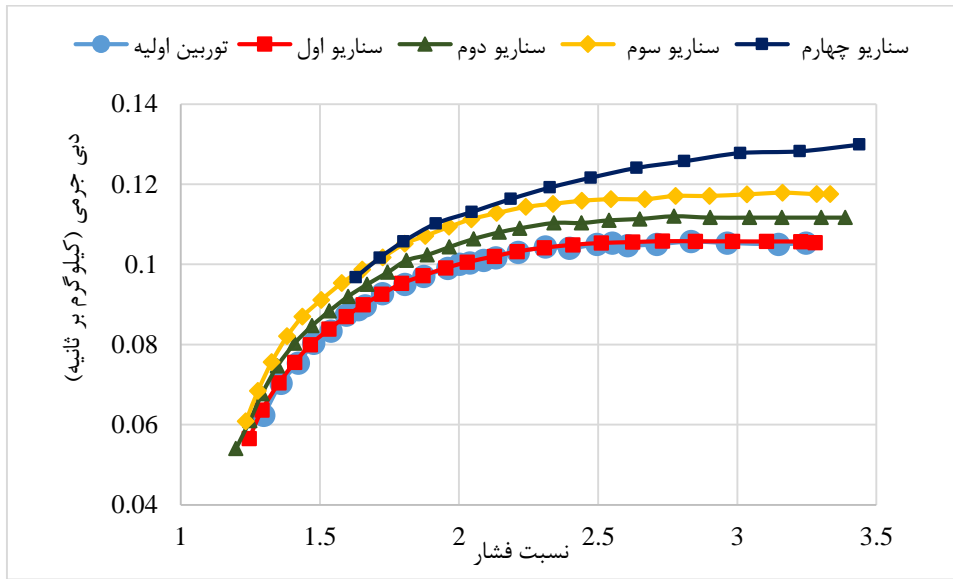
در ابتدا یک شبیه‌سازی عددی در نقطه طراحی انجام شده است تا نحوه شکل‌گیری جریان و توزیع فشار بررسی شود و اطمینان از حل صورت پذیرد. پس از اطمینان از صحت شکل‌گیری جریان با تغییر فشار خروجی، منحنی عملکرد این توربین به دست آمده است. همان‌طور که از شکل (۱۴) مشخص است، تغییرات جریان در این روش بسیار ناچیز بوده و در جریان خفگی فقط ادرصد افزایش جریان حاصل شده است. همچنین در شکل (۱۵) نیز منحنی بازده پره قابل‌رؤیت است. باتوجه‌به اطلاعات موجود در نمودارهای شکل (۱۴) و (۱۵)، می‌توان گفت این سناریو عملاً نتیجه مطلوبی ندارد و نمی‌توان از آن برای افزایش دبی جرمی استفاده کرد.

کد انجام شده است، درحالی‌که این ضخامت بیشینه و کمینه در ورودی و خروجی قرار ندارد. همان‌طور که از قبل گفته شد، این توربین کاملاً شعاعی نیست و ورودی آن زاویه دارد. برای به دست آوردن نقطه شروع و پایان هاب، روش‌های گوناگونی وجود دارد، از جمله ثابت‌نگهداشتن زاویه ورودی، ثابت‌نگهداشتن نقطه و ثابت‌نگهداشتن مرکز برخورد خطوط ورود و خروج که نهایتاً روش سوم اجرا شده است (شکل ۱۳).

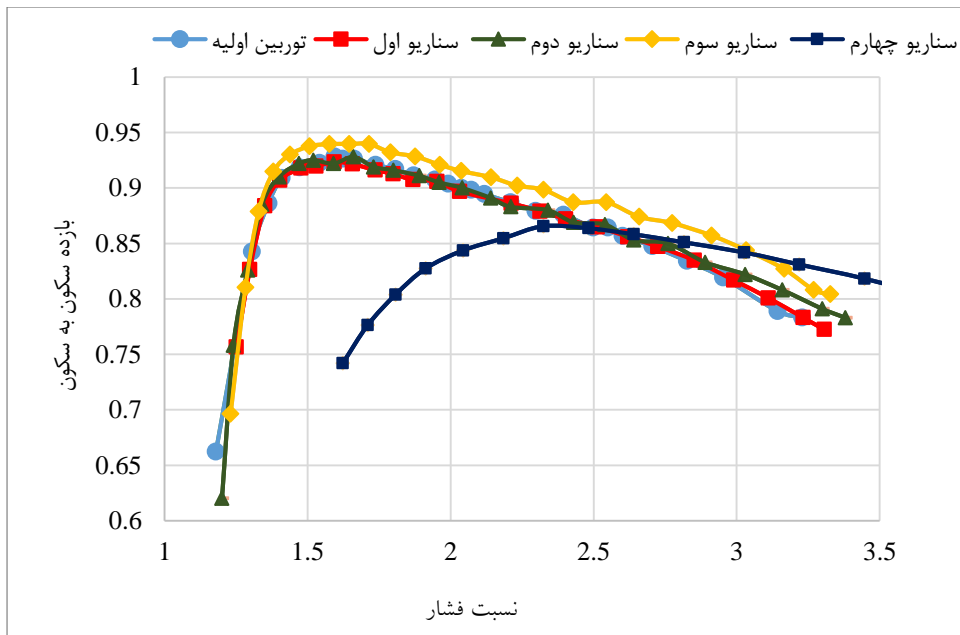
در این روش، منحنی هاب حدود ۰/۵ میلی‌متر به سمت محور منتقل شده است. نقطه ضعف این مسئله بحث سازه‌ای آن است که باتوجه‌به کوچک شدن قطر هاب باید ارزیابی شود. در نهایت پس از مشخص شدن هندسه، ماژول توربوگرید آن تنظیم و پیاده‌سازی شده و کیفیت نقاط بررسی شده از کیفیت مطلوبی برخوردار

جدول ۳ معرفی کیفی سناریوها

سناریو	جزئیات	هزینه و عملکرد
سناریو اول	منحنی‌های هندسی ورودی، خروجی و شراد مقید شده‌اند و تغییرات تنها روی هاب اعمال شده است.	در این سناریو پوسته توربین بدون تغییر می‌ماند و صرفاً ایمپلر عوض می‌شود این سناریو کم‌هزینه‌ترین سناریو ممکن است، اما از نظر افزایش دبی عملکرد غیرقابل قبولی از خود ارائه داده است
سناریو دوم	منحنی‌های هندسی ورودی و خروجی ثابت است اما شراد و هاب تغییر کرده‌اند.	در این سناریو سازنده باید پوسته توربین را براده‌برداری کند و میزان تغییرات شراد هم به اندازه‌ای است که با براده‌برداری ساده امکان‌پذیر باشد. در این سناریو در عین کم‌هزینه بودن افزایش دبی قابل قبولی اتفاق افتاده است.
سناریو سوم	در این سناریو منحنی‌های هندسی ورودی و خروجی و مساحت‌های آن‌ها مقید نیستند، اما تغییرات محدودی دارند تا با برش‌کاری و تراشکاری پوسته، هندسه مدنظر قابل دستیابی باشد.	در این سناریو هزینه برش‌کاری و تراشکاری ولو، ورودی و خروجی توربین اضافه شده است، اما بازهم تغییرات به صورت مقید انجام شده است تا به تغییر پوسته نیاز نباشد. در این سناریو هزینه از سناریوهای قبلی بیشتر است، اما میزان افزایش دبی قابل توجه است.
سناریو چهارم	در این سناریو کد توسعه یافته طراحی به صورت نامقید و آزاد اجرا شده است.	در این روش عملاً پوسته توربین عوض می‌شود. عملاً این سناریو یک طراحی یک‌بعدی توربین شعاعی به روش‌های کلاسیک است که برای مقایسه ۳ سناریو قبلی باحالت آزاد انتخاب شده است، زیرا در این سناریو هزینه بسیار زیاد است و عملاً توربوشارژر عوض می‌شود.



شکل ۱۴ مقایسه دبی جرمی برحسب نسبت فشار برای سناریوهای مختلف و توربین اولیه



شکل ۷ مقایسه بازده برحسب نسبت فشار برای سناریوهای مختلف و توربین اولیه

سناریو دوم

در این سناریو منحنی هاب تغییر کرده و تغییرات آن دقیقاً برابر با تغییرات هاب در سناریو اول است؛ اما شعاع میانی در ورودی پره و همچنین شعاع میانی در خروجی پره ثابت فرض شده است. همچنین منحنی شراذ تغییر کرده و شعاع آن حدود ۰/۵ میلی متر افزایش یافته است

که حدود ۵ درصد شعاع کل است. نقطه قوت این روش در این است که نیازی به تغییرات کلی در پوسته و بدنه توربوشارژر وجود ندارد و صرفاً با یک براده برداری ۰/۵ میلی متری و تعویض پروانه ورودی، افزایش دبی جرمی صورت می پذیرد. بقیه مراحل این سناریو مانند سناریو قبلی پیاده سازی شده است، به طوری که پس از

نیز در کد طراحی عددی اعمال شده است، به صورتی که افزایش جریان ۱۵ درصدی به کد داده شده است. نکته درخورتوجه این است که در این سناریو هم، نقطه A (توضیح داده شده در شکل (۱۳))، نقطه اصلی لبه حمله و لبه فرار) ثابت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین، از نظر ساختی این روش نسبت به دو روش قبلی هزینه بیشتری دارد؛ زیرا نیازمند تغییرات ورودی و خروجی بدنه توربوشارژر است، اما باز هم این تغییرات به حدی هستند که با براده برداری از ولوت و تغییراتی در دیفیوزر قابل انجام باشد. در این سناریو شعاع میانی ورودی حدود ۵ درصد افزایش یافته است که با توجه به این تغییرات، در کد عددی زوایای جریان پیش بینی شده است و همچنین مانند دو حالت قبلی توزیع منحنی هاب و شراد و زاویه و ضخامت به صورت بی بعد از توربین اولیه استخراج شده است.

پس از استخراج هندسه، تولید شبکه با ماژول تنظیم شده انجام و کیفیت مناسبی نیز حاصل شده است. پس از تولید شبکه، شبیه سازی عددی در نقطه طراحی انجام شده است تا با اطمینان از صحت شکل گیری جریان، منحنی های عملکرد توربین استخراج شود.

در شکل (۱۴) منحنی عملکرد جریان بر حسب نسبت فشار برای سناریوهای مختلف در مقایسه با توربین اولیه نشان داده شده است. افزایش جریان در این سناریو به طور محسوس مشخص است، به طوری که در نقطه خفگی حدود ۱۱ درصد نسبت به توربین اولیه افزایش جریان ایجاد شده است. از منحنی شکل (۱۵) برداشت می شود که بازده توربین اندکی نسبت به توربین اولیه بیشتر شده است. همچنین با توجه به افزایش ۱۱ درصدی جریان، سناریو سوم می تواند سناریو مناسبی برای افزایش جریان بدون تغییرات اساسی بدنه توربوشارژر باشد.

سناریو چهارم

در سه سناریو قبلی تلاش برای دستیابی به تغییرات اندک در طول محوری و شعاع ورودی جریان صورت انجام شده است. این محدودیت ها به این دلیل انجام

به دست آمدن نقاط ورود و خروج شراد، منحنی شراد طبق تغییرات بی بعد از هندسه اولیه به دست آمده است. همان طور که در سناریو اول گفته شد، این توربین کاملاً شعاعی نیست و ورودی آن زاویه دارد. برای به دست آوردن نقطه شروع و پایان هاب روش های گوناگونی وجود دارد که مانند سناریو قبلی نقطه A در شکل (۱۳) ثابت فرض شده است. در این سناریو منحنی شراد نیز دستخوش تغییر شده و همین مسئله باعث انبساط دهانه توربین شده است (درواقع هاب پره همان هاب سناریو گذشته است و شراد تغییر کرده است). در نهایت پس از مشخص شدن هندسه، ماژول توربوگرید تنظیم شده روی آن پیاده و کیفیت نقاط بررسی شده، نشان دهنده کیفیت مطلوب آنها است. پس از آن با نرم افزار سی اف ایکس تنظیمات عیناً به همان طریق صحت سنجی شده انجام می گیرد.

در ابتدا یک حل در نقطه طراحی انجام شده است تا نحوه شکل گیری جریان و توزیع فشار بررسی شود و اطمینان از حل صورت پذیرد. پس از اطمینان از صحت شبیه سازی عددی، ۲۵ شبیه سازی عددی برای رسم منحنی عملکرد این توربین انجام شده است.

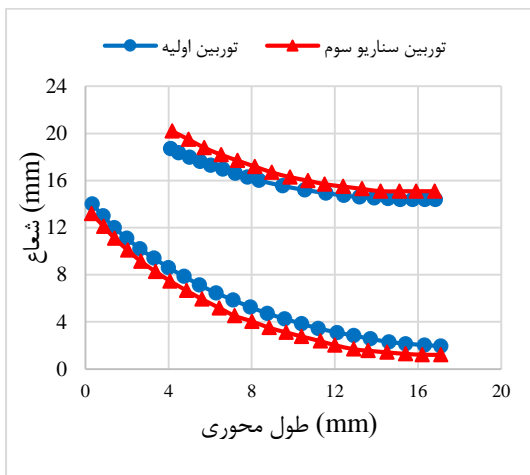
در منحنی شکل (۱۴) افزایش جریان سناریو دوم نسبت به سناریو اول به صورت محسوس بیشتر است، به طوری که جریان در محدوده خفگی حدود ۷ درصد افزایش یافته است. همچنین منحنی عملکرد بازده سناریو دوم در مقایسه با سایر سناریوها و توربین اولیه در شکل (۱۵) مشخص شده است. همان طور که دیده می شود، در منحنی بازده، تغییرات زیادی وجود ندارد. با توجه به نمودارهای موجود در شکل (۱۴) و (۱۵) می توان گفت این سناریو برای افزایش جریان بدون تغییرات کلی در بدنه توربوشارژر قابل تأمل است.

سناریو سوم

در دو سناریو قبلی، شعاع میانی ورودی و طول محوری پره در شعاع میانی خروج، ثابت در نظر گرفته شده بود تا نیازی به تغییر در ولوت و خروجی نباشد؛ اما در این سناریو، تغییرات شعاع و طول محوری در شعاع میانی

شده، همچنین حدود ۲ درصد بیشینه بازده افزایش یافته است (شکل ۱۵).

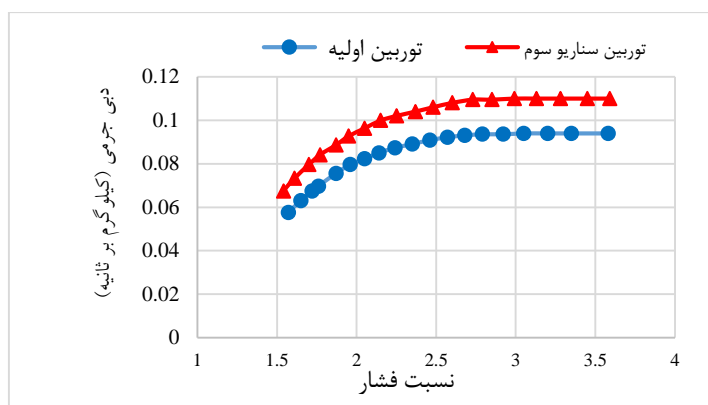
از بررسی سناریوهای فوق می‌توان به این نتیجه رسید که سناریو سوم نتایج نسبتاً خوبی به همراه داشته و در این سناریو افزایش ۱۱ درصدی دبی جرمی و افزایش ۲/۵ درصدی بازده اتفاق افتاده است. در سناریوهای اول و دوم بازدهی بهبودی نداشته و در سناریو چهارم به دلیل تغییر کلی توربین عملکرد آن کاملاً متفاوت شده است. سناریو سوم به هزینه ساخت کمتری نیاز دارد. در شکل (۱۶) نمای نصف‌النهاری توربین اولیه و توربین طراحی سوم نشان داده شده است. نمودار دبی جرمی بر حسب نسبت فشار و نمودار بازده سکون به سکون بر حسب نسبت فشار به ترتیب در شکل (۱۷ و ۱۸) نشان داده شده است. در نهایت با استفاده از تحلیل جریان روی هندسه پره حاصل از سناریو سوم، در شکل (۱۹) و (۲۰)، هندسه سه بعدی پره حاصل از سناریو سوم نشان داده شده است.



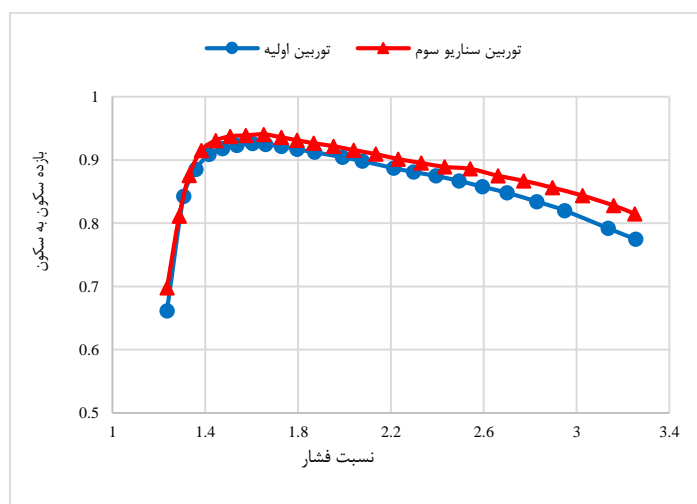
شکل ۱۶ نمای نصف‌النهاری توربین اول و توربین حاصل از طراحی سوم

شده که بدون تغییرات اساسی در بدنه توربوشارژر، صرفاً با براده برداری و تغییر پروانه ورودی به جریان و توان بالاتری بتوان رسید؛ اما با توجه به مسئله، این احتمال وجود دارد که نیاز به افزایش جریان بیش از ۱۱ درصد مدنظر باشد. در این صورت تغییرات شدیدی در ساختار توربین اولیه ایجاد می‌شود که نیازمند بازطراحی کامل اجزای توربین است. سناریو چهارم در واقع به صورت آزادانه برای افزایش ۲۰ درصدی جرم طراحی شده و هیچ محدودیتی بر روش طراحی یک بعدی صورت نگرفته است؛ به این معنا که به صورت آزادانه همه پارامترهای طراحی تغییر می‌کنند. در این سناریو، ورودی جریان به صورت کاملاً شعاعی و خروجی جریان به صورت کاملاً محوری فرض شده است. همان‌طور که در ابتدا گفته شد، در این سناریو بدنه به‌طور کلی دستخوش تغییرات می‌شود و عملاً باید به صورت کلی تغییر کند؛ اما توزیع زوایا و توزیع ضخامت طبق توزیع هندسه اولیه انجام شده است. لازم به ذکر است از شبیه‌سازی عددی حاصل، نتیجه‌گیری می‌شود که دبی جرمی گذرنده از توربین بیشتر از ۲۰ درصد افزایش نخواهد یافت و برای دستیابی به دبی جرمی گذرنده بیشتر، نیاز است که فشار سکون ورودی، فشار استاتیک خروجی، دما سکون ورودی و دور توربین تغییر کند.

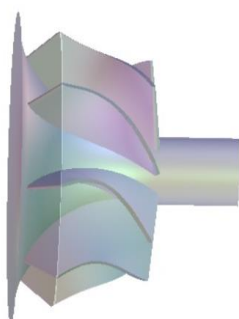
تولید شبکه این هندسه نیز با همان تنظیمات سناریوهای قبلی، در نرم‌افزار توربوگرید انجام شده است. تعداد ۱۵ حل عددی برای ترسیم منحنی عملکرد این توربین انجام شده است. از منحنی شکل (۱۴) مشخص است که این سناریو افزایش جریان قابل توجهی داشته، به طوری که جریان خفگی افزایش ۲۰ درصدی نسبت به توربین اولیه داشته است. به علت اختلاف به‌وجود آمده در ورودی و خروجی توربین و همچنین انتخاب نقطه طراحی در نسبت فشار بالاتر از بیشینه بازدهی، بیشینه بازده کمی به سمت فشارهای بالاتر منتقل



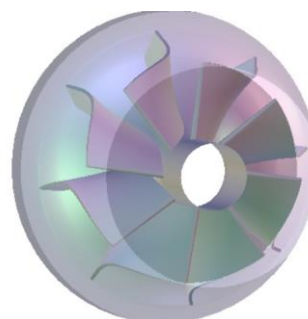
شکل ۸ نمودار بازدهی سکون به سکون برحسب نسبت فشار برای توربین اولیه و توربین حاصل از طراحی سناریو سوم



شکل ۹ نمودار بازدهی سکون به سکون برحسب نسبت فشار برای توربین اولیه و توربین حاصل از طراحی سناریو سوم



شکل ۱۰ هندسه پره سه بعدی حاصل از سناریو سوم (نمای جانبی)



شکل ۱۹ هندسه پره سه بعدی حاصل از سناریو سوم (نمای روبه رو)

نتیجه گیری

ضخامت، تعداد پره و منحنی شراد و هاب پرداخت تا علاوه بر بهبود دبی جرمی، بازدهی های مطلوب تری حاصل شود. در واقع پیاده سازی روش های بهینه سازی پس از پیدا کردن این قیدها باید انجام شود که به عنوان پیشنهاد برای پژوهش های آینده ارائه می شود. به طور کلی تغییرات هاب به تنهایی اثر اندکی در جرم عبوری داشته و باعث شکست سناریو اول این مسئله شده است. در سناریو سوم اما به دلیل تغییرات ورودی و خروجی میزان جرم ورودی به صورت قابل توجهی افزایش می یابد. این سناریو با توجه به این که از تعویض پوسته بی نیاز است، باعث صرفه جویی چشمگیری در هزینه ها می شود.

در این پژوهش تغییر اندازه یک توربوشارژر برای دستیابی به احتراق رقیق بررسی شده است. در ابتدا روش های طراحی یک بعدی برای توربین شعاعی بررسی شده و تغییراتی بر آن ها اعمال شده است تا مقیدسازی بخش های مختلف آن انجام گیرد، سپس منحنی عملکرد توربین اولیه با استفاده از شبیه سازی عددی رسم و با داده های تجربی شبیه سازی مقایسه و روش شبیه سازی عددی صحت سنجی شده است. برای دستیابی به احتراق رقیق، دبی جرمی هوای عبوری باید افزایش یابد، به همین دلیل منحنی هاب و شراد برای عبور دبی بیشتر تغییر داده شده است. در این تغییر سعی شده است که هندسه توربین حاصل مشابه توربین اولیه باشد و توزیع زوایای جریان مشابهی داشته باشند. در نهایت چهار سناریو ارائه شده است. در سناریو اول کد طراحی توسعه یافته با قیدهای قابل توجه زیادی انجام شده و فقط هاب تغییر کرده است تا نیازی به اصلاح پوسته نباشد. در سناریو دوم شراد هم تغییر کرده، اما تغییرات اندک بوده است تا با براده برداری قابل دستیابی باشد. در سناریو سوم علاوه بر هاب و شراد، ورودی و خروجی هم تغییر کرده اند که برش کاری ولوهای ورودی و خروجی انجام می شود، اما باز هم نیازی به تعویض پوسته نیست. در آخر، سناریو چهارم با اجرای آزاد کد طراحی شکل گرفته است. پس از شبیه سازی عددی با فرض تغییر کمتر هندسه توربین و هزینه ساخت کمتر، مشخص می شود که سناریو سوم بهترین پاسخ را برای افزایش دبی جرمی به دنبال دارد که در حدود ۱۱ درصد افزایش برای دبی جرمی داشته است. لازم به ذکر است همان طور که در مقاله [11] هم مشابه این اتفاق افتاده است، پس از مرحله اعمال قیدها و اثرشان و انتخاب سناریو مناسب، می توان به بهینه سازی پارامترهای محدودی از جمله توزیع زوایا از ورود تا خروج، توزیع

واژه نامه

Isotropic curve	منحنی پارامترهای ثابت
Meridional	نمای نصف النهاری
RMS- Residual	ریشه میانگین مربعات باقی مانده ها
High Resolution	دقت بالا
Rotational periodicity	متناوب دورانی
Tip	نوک پره
Hub	ریشه پره
Velocity Triangle	مثلث سرعت
Simulation	شبیه سازی
Validation	صحت سنجی
Working Fluid	سیال عامل
Performance Curve	منحنی عملکرد

مراجع

1. Alaviyoun, S.S. and M. Ziabasharhagh. "Experimental thermal investigation of turbocharger in internal combustion engine and considering effect of electrical water pump on heat soak test", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, pp. 266-274, (2018).
2. Whitfield, A." The preliminary design of radial inflow turbines", in ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, *American Society of Mechanical Engineers*, (1989).
3. Aungier, R.H "Turbine Aerodynamics: axial-flow and radial-flow turbine design and analysis", ASME, (2006).
4. Chen, H. and N. Baines "Analytical optimization design radial and mixed flow turbines". *Journal of Power and Energy*, Vol. 206, pp. 177-187, (1992).
5. Daabo, A.M., et al "Development of three-dimensional optimization of a small-scale radial turbine for solar powered Brayton cycle application", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 111, pp. 718-733, (2017).
6. Surekha, N., et al. "Optimization of principal dimensions of radial flow gas turbine rotor using genetic algorithm", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 3 (2017).
7. Mueller, L., Z. Alsalihi, and T. Verstraete. "Multidisciplinary optimization of a turbocharger radial turbine", *Journal of Turbomachinery*, Vol. 135, pp. 210-220, (2013).
8. Baar, Bojan Savic- Rainer Zimmermann- B. Jander- Rolan" Radial Turbines". European Conference on Turbomachinery Fluid dynamics & Thermodynamics. Berlin: s.n., (2017).
9. Zargar, A. and A. tousi "1D radial turbine design for gasturbine".
10. Whitfield, A, N.C. Baines "Design of radial turbomachines". (1990).
11. Eichhorn, R et al. "Redesign of a radial turbine variable stator geometry with optimized free space parameter for improved efficiency", SAE, (2017).

Resizing a Turbocharger Radial Turbine for a Lean Combustion Engine

Mahyar Mafakheri¹ Asra Amani²
Ali Madadi³

1. Introduction

The main purpose of this study is to redesign the geometry of a radial turbine using numerical simulations. In general, lowering the temperature of the combustion chamber can lead to dilute combustion and reduce the level of pollutants emitted. One way to achieve this goal is to increase the inlet air flow rate, which can be achieved through geometric changes. Four different methods make these changes. In the first three scenarios, the geometry has minor modifications, mainly due to changes in the inlet and outlet radius or the radius of the hub and the shroud radius. Considering the two goals of low-cost changes and achieving maximum inlet flow, the third case is selected as the most suitable solution. Only the inlet and hub radii are modified in this method, and the turbine inlet mass flow rate increases about 11%.

In this study, the turbine simulation is done using CFX software, then the validation of numerical results is studied through the available experimental data, and the obtained numerical method is used in the simulation process. Finally, four scenarios, each with different design constraints, are considered. In the first to third scenarios, there is no need to change the turbocharger casing. The desired geometry can be achieved only by cutting or welding, but in the fourth scenario, the whole geometry will be changed without any specific constraints.

2. Numerical simulation and validation process

First, the geometry generation is explained, and then the numerical simulation settings are described. Then, the results of the numerical simulation are presented. The independence of the results from the number of computational nodes is examined, and the simulation results are compared to the experimental data.

Geometry generation and preparing a computational domain for simulation

The simulation is performed in a steady-state condition. The inlet boundary conditions are set to the total temperature and pressure and the outlet boundary conditions as the static pressure. Moreover, the walls are assumed to be a non-slip boundary condition with a roughness factor of 6 microns, and the turbulence model is selected as the SST model type. To increase the accuracy of the simulations, the wall y plus is considered equal to 1.5.

The maximum difference between the simulation results and the experimental data is about 3% and indicates the high accuracy of the simulation (Figure 1). For this simulation, the obtained method is used in the following simulation process.

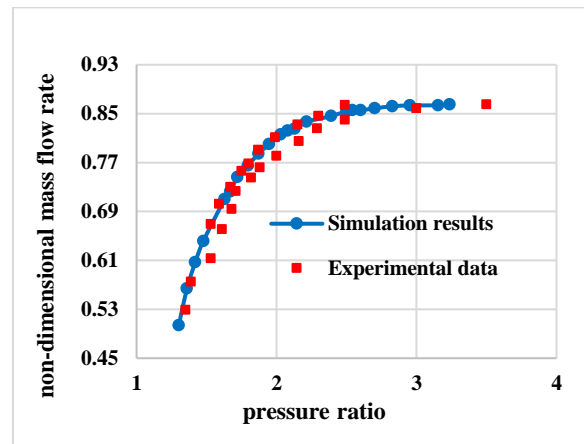


Figure 1. Numerical simulation results compared to the experimental data

3. Scenarios and methods of performance improvement

Geometry changes are made to increase the turbine mass flow by using the developed design code. Each scenario is then simulated using the validated numerical method explained in previous section. Four scenarios are examined through numerical simulations to increase the turbine mass flow. These scenarios increase flow and efficiency, depending on the level of changes made to the hub or shroud or both boundaries. The sequence of scenarios is from low-cost to high-cost ones. The low-cost scenarios have more constraints, making it less expensive for the manufacturer to produce them. The fourth

¹ MSc., Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

² MSc. Student, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

³ Corresponding Author: Assistant Professor, Department of Aerospace Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, Email: ali.madadi@aut.ac.ir

scenario is the result of an unconstrained design code. This scenario improves mass flow rate considerably because it is not limited by the hub and shroud radii constraints.

The first scenario

In this scenario, the turbine casing remains unchanged, and only the impeller is modified. This scenario is the lowest possible scenario in terms of cost and changes, but it has offered unacceptable performance in terms of increasing the flow.

The second scenario

In the second scenario, the shroud radius has changed and increased by about half a millimeter, which is about 5% of the total radius. Figure 2 shows that this scenario can be considered to increase the flow by about 7% without applying any essential changes to the turbocharger body.

The third scenario

In the previous two scenarios, the midline inlet radius and the axial location of the blade in the middle outlet radius were considered constant; however, in this scenario, changes in radius and axial location in the middle radius are also applied to the numerical design code in such a way that a 15% increase in flow is achieved. According to the manufacturing costs, this method is more expensive than the previous two scenarios, because it requires changes in the inlet and outlet of the turbocharger body though these changes can be done by a small modification of the volute the diffuser. The increase in mass flow in this scenario is noticeable at the design point of about 11%. Therefore, the third scenario can be an acceptable method to increase the flow without significant changes to the turbocharger body.

The fourth scenario

In this scenario, the developed design code is executed without geometrical constraints, and the turbine casing is changed as well. Practically this scenario is a one-dimensional design of a radial turbine in the classical way, which was implemented to compare the previous three scenarios with free mode design. In this scenario, the cost is very high, and the turbocharger is practically changed to a newly designed one. However, in the end, it leads to a 20% increase in inlet airflow.

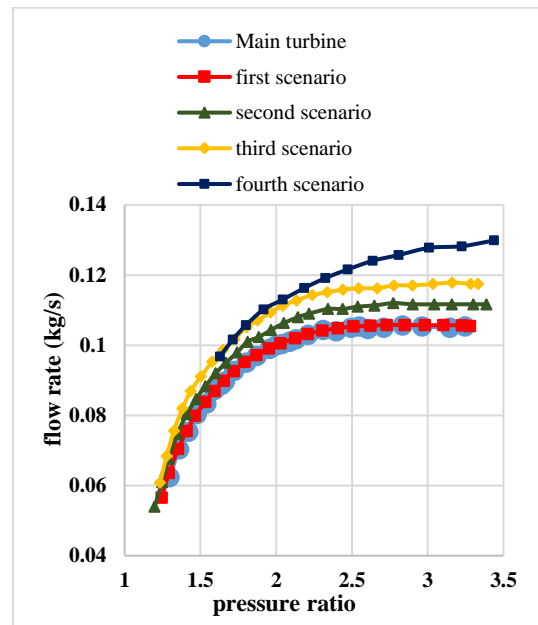


Figure 2. Comparison of mass flow performance curves for different scenarios and initial turbine

4. Conclusion

In this study, the resizing a turbocharger to achieve dilute combustion was investigated. The mass flow of the passing air must be increased, so the hub and shroud curves were changed to allow more flow. In this modification, it was tried that the geometry of the designed turbine is similar to the original one and have the same flow angle distribution. Finally, four scenarios were presented from low cost to high cost modifications. In the first scenario, the mass flow increase is not considerable. The second scenario offers a 7% increment in the mass flow rate. In the third scenario, which can be selected as the best one, 11% improvement is obtained. The fourth scenario, which is a new designed turbine, improves the mass flow rate by 20%.