

بررسی تجربی والگوسازی توربین گازی جریان شعاعی دو ورودی پرخورانی در شرایط ورودی کامل و جزئی

حبیب آقاعلی *

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، پژوهشگاه نیرو

haghaali@nri.ac.ir

* نویسنده مسؤل / پذیرش نهایی مقاله: ۱۳۸۷/۹/۳

علی حاجیلوی بنیسی

دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

در این مقاله، با توجه به این که استفاده از پرخوران در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند یکی از راهبردهای موتورهای درون سوز در آینده باشد، به پیش‌بینی عملکرد توربین گازی جریان شعاعی دو ورودی پرخوران، در حالت دائمی و در شرایط ورودی کامل و جزئی پرداخته شده است. بررسی تجربی با استفاده از امکانات و تجهیزات ویژه‌ای برای آزمایش توربین شعاعی دو ورودی، در شرایط ورودی کامل و جزئی و برای گستره وسیعی از سرعت‌ها انجام گرفته است. روش تحلیل عددی بر اساس الگوسازی یک‌بعدی جریان و ضرایب افت تجربی اجزاء مختلف توربین است که برای شرایط ورودی جزئی توسعه داده شده است. مقایسه بین نتایج تجربی و الگوسازی، تطابق و هماهنگی بسیار خوبی را نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در نتایج، وقوع بازده بیشینه توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی و هنگامی است که شار جرمی سمت پوسته^۱ از سمت پایه^۲ بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: توربین شعاعی دو ورودی، الگوسازی یک‌بعدی، پیش‌بینی عملکرد، بررسی تجربی، پرخوران

۱- مقدمه

توربین جریان شعاعی برای کاربردهایی که به سرعت تند و منبع قدرت فشرده نیاز است، مثل توربین‌های گاز کوچک، واحدهای قدرت کمکی^۱ و پرخوران‌ها انتخاب رایجی است [۱]. امروزه پرخوران یکی از مهم‌ترین اجزای بیشتر موتورهای دیزلی تولیدی است و در موتورهای بنزینی و حتی گازسوز هم استفاده می‌شود. پرخوران‌ها برای افزایش توان و بازده و کاهش آلودگی گازهای خروجی، به طور گسترده در موتورهای درون سوز به کار می‌روند [۲]. بنابراین مهندسان موتور، به اطلاعات جامع و کاملی از پرخوران و اثرات آن بر عملکرد موتور نیاز دارند. امروزه با توجه به هزینه‌ی سوخت و قوانین محیط زیست به پرخوران‌هایی با بازده بزرگ و گستره عملکردی وسیع‌تر نیاز است. پرخوران دارای سه جزء اصلی است که عبارتند از تنجار^۳، توربین که تنجار را به وسیله محوری به حرکت

درمی‌آورد و یاتاقان برای تکیه‌گاه محور. دلیل استفاده از توربین‌های جریان شعاعی در موارد یادشده، مزایای اقتصادی و عملکردی نسبت به توربین‌های جریان محوری در شرایط نیاز به تولید توان در محیط‌های کوچک و جمع و جور است. همچنین با توجه به این که یکی از مهم‌ترین کاربردهای توربین‌های جریان شعاعی در پرخوران موتورهای احتراق داخلی کوچک است، این توربین‌ها محدوده وسیع‌تر عملکردی نسبت به نوع محوری دارند. استفاده از پرخوران در موتورهای درون سوز باعث افزایش توان ویژه موتور و کاهش مصرف سوخت ویژه و آلاینده‌های منتشره و نیز کاهش صدای مجاری تخلیه موتور می‌شود. پس برای داشتن توان معین در حالت پرخورانی نیاز به موتوری با ابعاد کوچکتر و وزن سبکتر نسبت به حالت تنفس طبیعی است. بنابراین استفاده از پرخوران در موتورهای احتراق داخلی می‌تواند یکی از راهبردهای موتورهای درون سوز در آینده باشد. با توجه به تفاوت اساسی در عملکرد موتورهای درون سوز و توربوماشین‌ها، شناسایی دقیق رفتار توربین‌های گازی با این اهداف ضرورت دارد:

الف- امکان تطابق صحیح موتور و پرخوران

ب- استفاده بهینه از پرخوران از طریق کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری

ج- افزایش تأثیر پرخورانی^۵ از طریق اصلاح طرح و بهبود شرایط کار توربین و تنجار [۳].

Turbocharging -۵

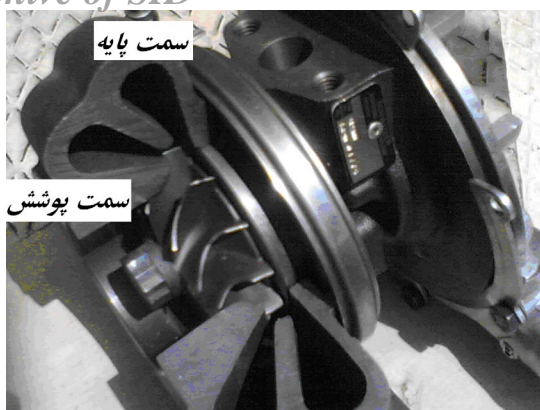
Shroud -۱

Hub -۲

Auxiliary power units -۳

Compressor -۴

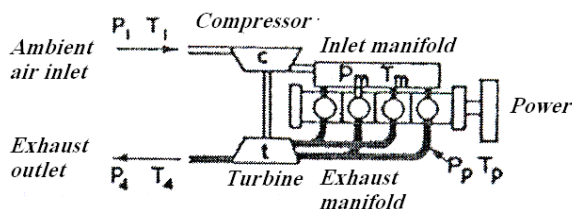
www.SID.ir



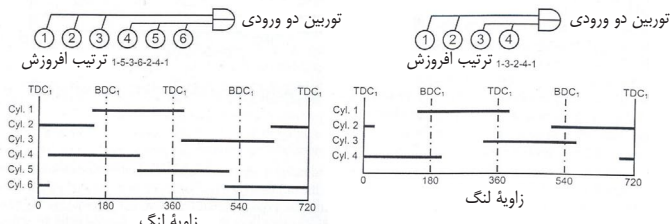
شکل ۱ توربین شعاعی دو ورودی پرخورانی



شکل ۲ توربین شعاعی دو ورودی با محفظه متقارن (سمت راست) و غیرمتقارن (سمت چپ) [۱۰]



شکل ۳ سامانه پرخوران کردن ضربانی با توربین دو ورودی [۲]



شکل ۴ زمان تخلیه موتور چهار زمانه، چهار استوانه و شش استوانه [۱۱]

دیل و واتسون [۴] به بررسی تجربی عملکرد توربین جریان شعاعی دو ورودی در حالت ورودی کامل و جزئی پرداختند. بینز و یئو [۵] با بهره گرفتن از سرعت سنج لیزری جزئیات داخلی جریان توربین شعاعی دو ورودی را اندازه گیری کردند. کاپویانکو و گامباروتا [۶] به بررسی تجربی عملکرد توربین شعاعی دو ورودی در شرایط ورودی کامل و جزئی، هم در حالت دائمی و هم ضربانی پرداختند. قاسمی و همکاران [۷] عملکرد توربین شعاعی دو ورودی پرخورانی را بررسی تحلیلی کردند. آقاعلی و حاجیلوی [۸ و ۹] توربین شعاعی دو ورودی با محفظه غیرمتقارن را در شرایط ورودی کامل و جزئی، بررسی تجربی و تحلیلی کردند. بیشتر بازده توربین شعاعی دو ورودی در شرایط ورودی جزئی و هنگامی که بزرگ تر از یک و کمترین بازده در حالتی که جریان در یکی از ورودی ها (سمت پوسته) صفر باشد، اتفاق می افتد [۴-۹].

با وجود توجه بسیار که در دنیا به زمینه صنعتی و تحقیقاتی پرخوران ها و اجزای آن می شود، در ایران نه تنها به این زمینه توجه کافی نشده، بلکه حتی در زمینه استفاده صحیح از فناوری پرخورانی نیز مشکلات فراوانی وجود دارد. در بعضی موارد از این وسیله استفاده نمی شود و در موارد دیگر به علت عدم امکان استفاده از ظرفیت کامل تأسیسات موجود، خسارت زیادی پدید می آید. ساخت پرخوران در سطح دنیا در انحصار شرکت های خاصی است. این کارخانه ها عموماً اطلاعات کامل عملکردی محصولات را در اختیار مصرف کنندگان قرار نمی دهند. به همین علت در بسیاری موارد، نمی توان اشکال و عیب های پرخوران ها را ریشه یابی و حل کرد. هدف اولیه تحقیق در زمینه پرخوران پی بردن به نحوه رفتار آن است. عملکرد پرخوران نیز با تعیین مشخصات رفتاری اجزای آن (توربین و تنجار) مشخص می شود. در این مقاله، به نتایج مطالعات تجربی توربین جریان شعاعی دو ورودی پرخوران شوایتزر الگوی اس ۲ بی^۱ در حالت دائمی و در شرایط ورودی کامل و جزئی در آزمایشگاه پژوهشی پرخوران دانشگاه صنعتی شریف پرداخته می شود و سپس رفتار این توربین که دارای محفظه دو ورودی غیرمتقارن و شیپوره است (شکل ۱)، الگوسازی با نتایج تجربی ارزیابی می شود. در انتها راهکارهایی برای داشتن بازده بزرگتر در توربین جریان شعاعی دو ورودی ارائه می شود.

۲- توربین دو ورودی پرخورانی

محفظه توربین شعاعی دو ورودی می تواند به دو گونه باشد، در حالت اول، ورودی سمت پوسته و سمت پایه تقریباً یکسان است و دارای زاویه برابر و مخالف جهت همدیگر است که متقارن نامیده می شود و در حالت دیگر، قسمت پوسته می تواند به صورت مایل قرار گیرد، در حالی که ورودی سمت پایه به صورت عمودی است، که در این حالت محفظه غیرمتقارن نامیده می شود. (شکل ۲)

در توربین های دو ورودی، هنگامی که سیال عامل در هر یک از ورودی های توربین با فشار و شار جرمی یکسان و مشابه وارد شود، اصطلاحاً ورودی کامل می گویند و اگر شرایط هر یک از ورودی ها متفاوت از دیگری باشد، ورودی جزئی نامیده می شود. برای بهبود فرآیند انتقال انرژی از موتور به توربین، پرخورانی به روش ضربانی^۲ توسعه پیدا کرد. استفاده از انرژی ضربانی فشاری خصوصاً در دوره های کند موتور بسیار اهمیت دارد. به این منظور مسیرهای خروجی استوانه ها به وسیله لوله های باریکی به توربین متصل می شود. در چنین حالتی در موتور چند استوانه ای، برای تخلیه استوانه ها هم پوشانی به وجود می آید. در چنین حالتی انتهای تخلیه استوانه در لحظه هم پوشانی تحت تأثیر فشار قوی ابتدای تخلیه استوانه بعدی قرار می گیرد. برای جلوگیری از این امر، استوانه های موتور را که زمان تخلیه آن ها هم پوشانی ندارد، در یک مسیر قرار می دهند و بیش از یک مسیر جریان خواهیم داشت، در نتیجه توربین نیز باید بیش از یک ورودی داشته باشد. این امر ما را به توربین های دو ورودی رهنمون می سازد. (شکل ۳)

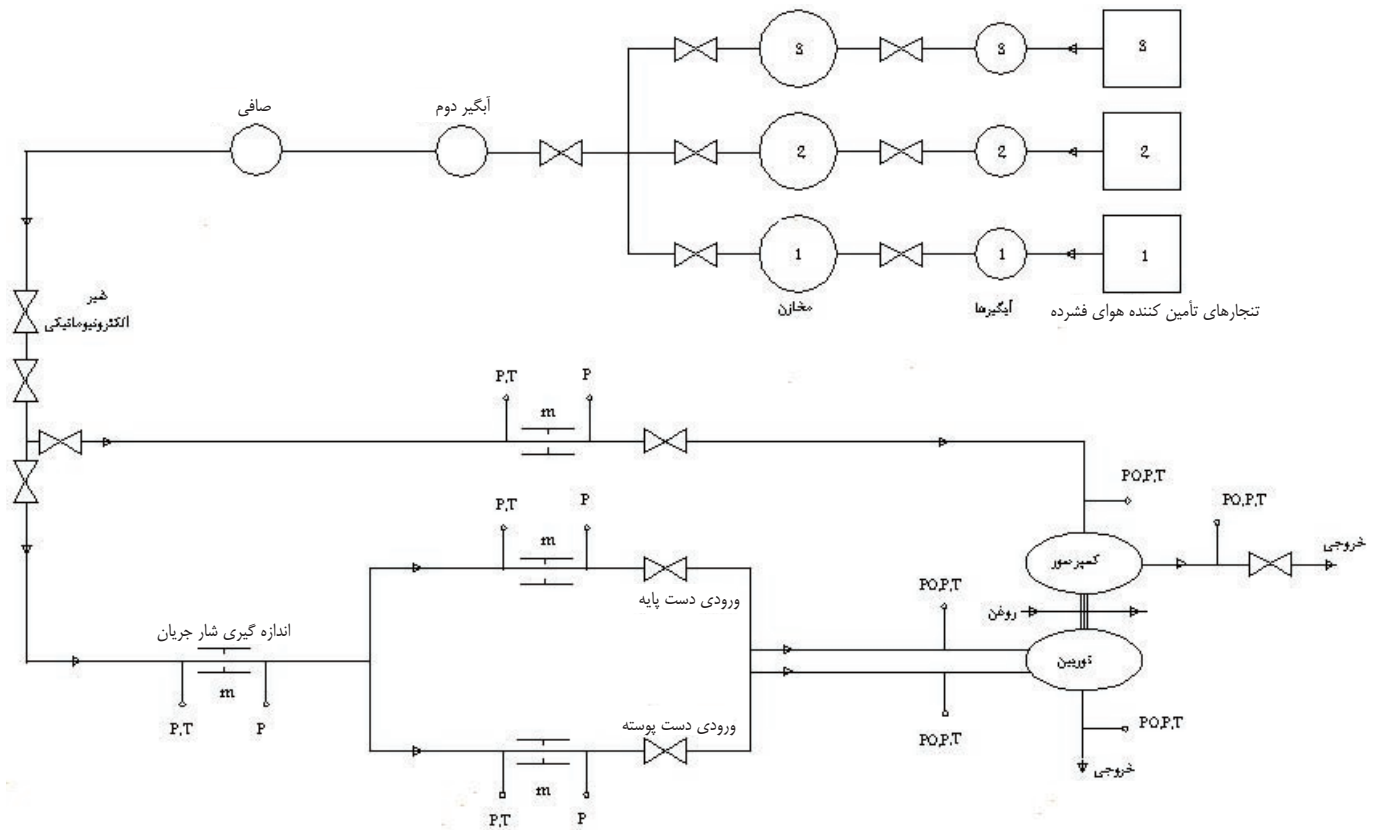
می‌شود. در نخستین ایستگاه اندازه‌گیری، شار هوا به وسیلهٔ روزنه اندازه‌گیری می‌شود. سپس مسیر جریان هوا به دو شاخه تقسیم می‌شود که هر کدام از این دو شاخه به یکی از ورودی‌های توربین ختم می‌شود، بدین وسیله امکان بررسی انواع توربین‌ها مهیا می‌شود. در هر کدام از این شاخه‌ها ایستگاه اندازه‌گیری شار وجود دارد. پیش از ورودی توربین نیز وسایل اندازه‌گیری فشار و دما نصب شده تا کمیت‌های مورد نیاز با دقت اندازه‌گیری شود. پس از انبساط درون توربین، مقادیر دما و فشار هوا در خروجی آن به توسط وسایل اندازه‌گیری مشخص و سپس به بیرون هدایت می‌شود. در سمت تنجار پرخوران پیش از ورود به آن در موقعیت مناسبی نسبت به دستگاه، شار هوا، دما و فشار هوای ورودی اندازه‌گیری می‌شود. پس از تراکم در تنجار، دما و فشار هوای خروجی مجدداً اندازه‌گیری می‌شود و سپس به بیرون هدایت می‌شود که قابلیت انتقال هوای فشرده را به موتور نیز دارد.

همهٔ ایستگاه‌های اندازه‌گیری دستگاه آزمایش به سامانه داده‌پردازی و رایانه متصل است. فشار کل، به توسط لولهٔ پیتوت و فشار ایستا به توسط سوراخ‌های کوچک جدارهٔ لوله که به وسیلهٔ شلنگ‌هایی به سامانه اندازه‌گیری فشار وصل می‌شوند، اندازه‌گیری می‌شوند. شار جرمی هوا توسط روزنه اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین دور پرخوران از دورسنج نوری (مادون قرمز) استفاده می‌شود که در سمت تنجار نصب شده است. در شکل (۶) پرخوران و قسمتی از وسایل اندازه‌گیری نشان داده شده است.

در شکل (۴) زمان تخلیهٔ موتور چهارزمانهٔ چهار و شش استوانه‌ای و نحوهٔ اتصال چندراهه‌ها به توربین دو ورودی نشان داده شده است.

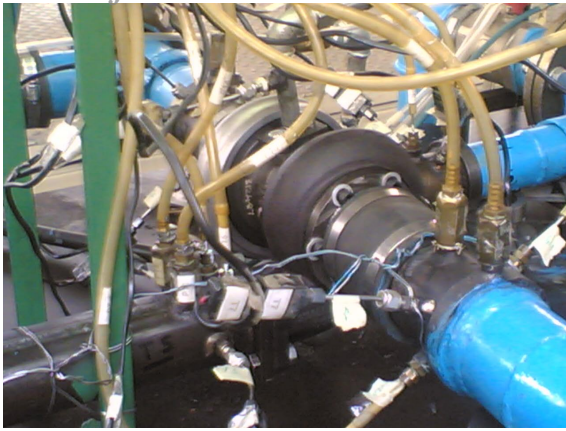
۳- بررسی تجربی

برای مطالعات تجربی، از روش شبیه‌سازی رفتار توربین استفاده می‌شود که به توسط جریان هوای متراکم، توربین پرخوران به حرکت درمی‌آید و انرژی، جریان را به حرکت دورانی تبدیل می‌کند. روش جذب توربین، استفاده از تنجار است که روش مناسبی برای اندازه‌گیری توان توربین‌های پرخوران است. اشکال اصلی این روش، محدودیت دامنهٔ کار تنجار با پدیده‌های پس‌زنی و خفگی جریان است که برای رفع این نقیصه می‌توان با پایش^۱ فشار هوای ورودی به تنجار، گسترهٔ عملکردی اندازه‌گیری شده را به طور چشمگیری گسترش داد، بدین منظور از هوای فشرده با شرایط معین به عنوان هوای ورودی تنجار استفاده می‌شود. اجزای اصلی دستگاه آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است. هوای مورد نیاز برای به حرکت درآوردن توربین به وسیلهٔ سه تنجار پیچی که در حدود ۲۳/۵ هوادهی دارند، تامین می‌شود. پس از آن، هوا وارد سه آبگیر اول می‌شود تا آب و روغن آن جدا شود، سپس وارد سه مخزن با ظرفیت جمعاً ۱۲۰۰ lit که به صورت موازی نصب شده‌اند، می‌شود. کار اصلی مخزن‌ها، ذخیرهٔ هوای مورد نیاز است. هوا پس از مخزن، وارد آبگیر دوم (میکروتورپ) می‌شود تا باقیماندهٔ آب و روغن آن جذب شود. پس از این آبگیر، صافی کوچکی^۲ قرار دارد که ذرات خیلی ریز همراه جریان در آن جدا



شکل ۵ فرآیند نامی دستگاه آزمایش پرخوران با ایستگاه‌های اندازه‌گیری آن

۴- الگوسازی



شکل ۶ پرخوران و دستگاه های اندازه گیری

با ترکیب چهار معادله حاکم بر توربوماشین ها (معادله پیوستگی، اندازه حرکت، قانون اول و دوم ترمودینامیک) و با توجه به این نکته که برای محاسبات جریان های تراکم پذیر در توربوماشین ها، بهتر است که از شرایط حالت سکون استفاده شود، می توان به یک معادله موسوم به شار جرمی بدون بعد دست یافت [۱۲]. توربین را می توان به صورت مجموعه ای شامل چند مجرا با هندسه مشخص در نظر گرفت که به دنبال هم قرار دارند. با معلوم بودن شرایط جریان در ورودی هر مجرا و هندسه آن مجرا، شرایط جریان را در خروجی از آن به دست می آوریم که شرایط ورودی قسمت بعدی خواهد بود. این روند از ورودی توربوماشین تا خروجی آن به صورت مرحله به مرحله طی می شود [۱۲]. مجاری جریان در توربین شعاعی دو ورودی شامل مجرای ورودی (۰-۱)، حلزونی (۱-۲)، فضای میانی^۱ (۳-۲)، ناحیه برخورد (۳-۴) و چرخنده (۴-۵) می شود. در جدول (۱) معادلات حاکم (شار جرمی بدون بعد) بر مجاری مختلف توربین شعاعی دو ورودی و نحوه حل آن آورده شده است.

معادله شار جرمی بدون بعد هر مجرا را برای عدد ماخ خروجی آن مجرا حل می کنیم که برای حل آن علاوه بر سطح خروجی و شرایط ورودی جریان نیاز به الگوهای جداگانه ای برای محاسبه زاویه نسبی یا مطلق جریان خروجی و تولید انترویی (افت) در مجرا داریم. اگر این موارد در یک مجرا معلوم باشد، حل به صورت مستقیم انجام می گیرد و در صورت نداشتن آن ها، معادله با سعی و خطا، قابل حل است.

پیونددهنده جریان برگشت ناپذیری واقعی و مطلوب، الگوهای تجربی و ضرایب افت هستند. هر چه دقت آن ها بیشتر باشد، پاسخ های به دست آمده دقیق تر خواهند بود. برای جریان بی درو، تغییر انترویی معیاری از درجه بازگشت ناپذیری فرآیند و انحراف آن از شرایط مطلوب است. به دو دلیل تغییرات انترویی معیار خوبی برای افت هاست: اول این که میزان انحراف از فرآیند هم انترویی (تغییر انترویی) به انتقال حرارت و بازگشت ناپذیری های جریان بستگی دارد. دلیل دوم این است که مقدار انترویی بر خلاف فشار کل، آنتالپی سکون و یا انرژی جنبشی به ساکن یا متحرک بودن مسیر بستگی ندارد و تابعی از نوع مکان (بدنه یا چرخنده) نیست، بنابراین به محض این که افزایش انترویی در هر قسمت محاسبه شد، می توان با جمع کردن افزایش انترویی اجزاء، افزایش انترویی کل مجموعه را به دست آورد. ضریب افت به این صورت تعریف می شود:

$$\sigma = P_{02} / P_{02E} = e^{(-\Delta s/R)} \quad (6)$$

افت های توربین شعاعی دو ورودی شامل این موارد است:

الف- افت محفظه شامل:

- افت اصطکاک جریان سیال و دیواره ها و بین دو جریان خروجی از حلزونی
- افت دنباله^۲ دیواره جداکننده.

ب- افت چرخنده: بخش اعظم افت های توربین در چرخنده اتفاق می افتد؛ این

افت ها را می توان به چند دسته تقسیم کرد.

- افت برخورد: این افت هنگامی به وجود می آید که زاویه برخورد جریان با زاویه برخورد بهینه متفاوت است. زاویه برخورد به صورت زاویه بین سرعت نسبی و زاویه پره تعریف می شود.

• افت اصطکاک بین جریان و دیواره ها

• افت بارگذاری پره^۳: جریان های ثانویه موجود در چرخنده، الگوی جریان در آن را

بسیار پیچیده می کنند. این جریان های ثانویه باعث ایجاد افت بارگذاری پره می شوند.

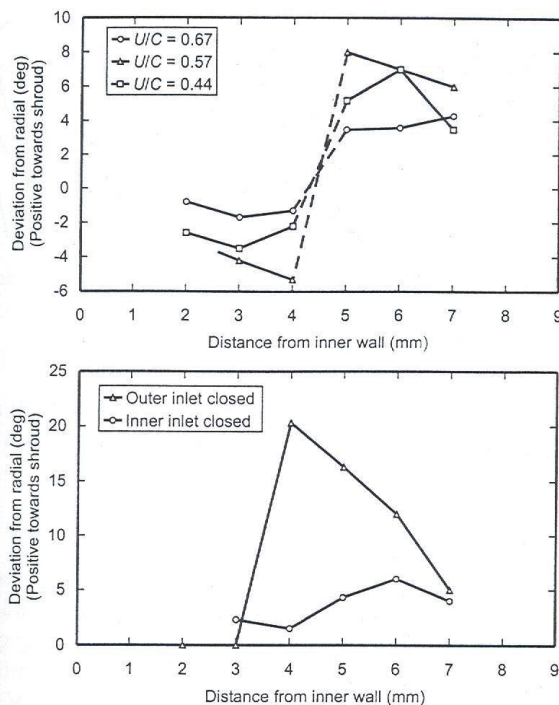
- افت ناشی: به علت نشت جریان از فاصله بین پره ها و پوسته و نیز از سمت فشاری به سمت مکشی به وجود می آید.
- افت سرعت خروجی: هنگامی که در خروجی توربین پخش کننده وجود نداشته باشد، معمولاً انرژی جنبشی خروجی استفاده نمی شود که افت سرعت خروجی نامیده می شود.
- افت اختلاط چرخنده: این افت در توربین های دو ورودی در حالتی پیش می آید که مؤلفه شعاعی سرعت جریان در ورودی چرخنده توربین دو ورودی با حالت بهینه متفاوت باشد. در واقع هنگامی که مؤلفه مماسی سرعت در ورودی چرخنده با حالت بهینه متفاوت باشد، افت برخورد اتفاق می افتد و هنگامی که مؤلفه شعاعی سرعت با حالت بهینه متفاوت باشد، افت اختلاط چرخنده اتفاق می افتد [۱۳].
- ج- افت های خارجی: افت بازرگی در فاصله بین دیواره محفظه و صفحه پشت چرخنده اتفاق می افتد و شامل گشتاور لزجی است که در اثر اصطکاک بین هوا و دیواره دوار در این منطقه اتفاق می افتد.
- توضیحات بیشتر و نحوه محاسبه این افت ها در مراجع [۸] و [۹] به طور کامل ارائه شده است.
- از مهم ترین نکات بررسی تحلیل عددی توربین شعاعی دو ورودی که محفظه اش به صورت غیر متقارن است، الگوسازی فضای میانی آن است. از آشکارترین دلایل استفاده از محفظه دو ورودی غیر متقارن، کم حجم شدن آن نسبت به محفظه متقارن است که با مایل قرار گرفتن ورودی سمت پوسته، قطر آن طرف، کوچک تر می شود و در نتیجه، وزن محفظه سبک تر می شود که این، می تواند در مصارفی که جای فشردگی دارد و سبک وزن بودن توربین مهم است، اهمیت پیدا کند. اما این بحث از نظر جریان داخل محفظه بسیار ضروری تر است. بر اثر دیواره جداکننده دو ورودی، دنباله ای ایجاد می شود که موجب افت در این قسمت، مخصوصاً در حالت ورودی جزئی می شود. با مایل قرار دادن ورودی سمت پوسته، در حقیقت این ناحیه دنباله کمتر رشد می کند، زیرا جریان در خروج از سمت پوسته مستقیماً به ناحیه دنباله وارد می شود و آن را از بین می برد. نکته دیگر انحراف جریان از صفحه شعاعی است که با غیر متقارن ساختن محفظه سعی بر کاهش انحراف جریان از این صفحه داریم، اندازه گیری های لیزری مرجع [۵] که بر روی توربین شعاعی دو ورودی با محفظه متقارن انجام گرفته، این مطلب را تأیید می کند. شکل (۷) انحراف جریان را از صفحه شعاعی در قسمت فضایی میانی (ورودی چرخنده) و در شرایط ورودی کامل و جزئی که در یکی از ورودی ها جریان برقرار نباشد، نشان می دهد. مشاهده می شود که، انحراف جریان در شرایط ورودی کامل تقریباً کم است و در سمت پوسته و پایه در خلاف جهت یکدیگر هستند و البته این انحراف در سمت پوسته مقداری بیشتر از سمت

۱- Inter space

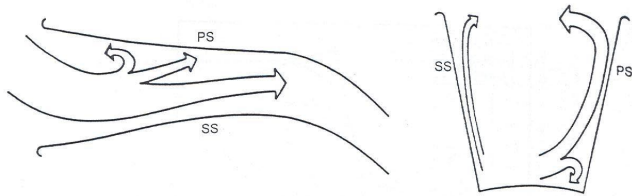
۲- wake

۳- Blade loading loss

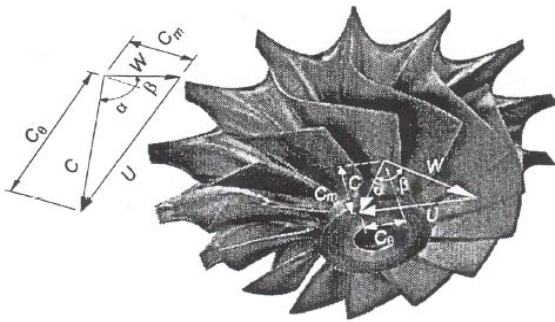
مجماری توربین دو ورودی	شماره معادله	حل معادله شار جرمی (برای عدد ماخ)	توضیحات حل
ورودی (۱-۰)	(۱)	$\frac{\dot{m}\sqrt{RT_{00}/\gamma}}{A_1 P_{00}} = \cos(\alpha_1) \cdot M_1 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2\right)^{-(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$	(جداگانه برای سمت پوسته و سمت پایه) مستقیم
حلزونی (۲-۱)	(۲)	$\frac{\dot{m}\sqrt{RT_{01}/\gamma}}{A_2 P_{01}} = \sigma_{1-2} \cos(\alpha_2) M_2 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_2^2\right)^{-(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$	(جداگانه برای سمت پوسته و سمت پایه) سعی و خطا
فضای میانی (۳-۲)	(۳)	$\frac{\dot{m}\sqrt{RT_{02}/\gamma}}{A_3 P_{02}} = \sigma_{2-3} \cos(\alpha_3) M_3 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_3^2\right)^{-(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$	(جداگانه برای سمت پوسته و سمت پایه) مستقیم
ناحیه برخورد (۴-۳)	(۴)	$\frac{\dot{m}\sqrt{RT'_{03}/\gamma}}{A_4 P'_{03}} = \sigma_{3-4} \cos(\beta_4) M'_4 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M'^2_4\right)^{-(\gamma+1)/2(\gamma-1)}$	(جداگانه برای سمت پوسته و سمت پایه) مستقیم
چرخنده (۵-۴)	(۵)	$\frac{\dot{m}\sqrt{R/\gamma}}{A_5} \left(\frac{\sqrt{T'_{04,s}}}{P'_{04,s}}\right)^{Mr_s} \cdot \left(\frac{\sqrt{T'_{04,h}}}{P'_{04,h}}\right)^{Mr_h} = \sigma_{4-5} \cdot \cos(\beta_5) M'_5 \times \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M'^2_5\right)^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \left\{ \left(1 - \frac{U_4^2 - U_5^2}{2C_p T'_{04,s}}\right)^{Mr_s} \cdot \left(1 - \frac{U_4^2 - U_5^2}{2C_p T'_{04,h}}\right)^{Mr_h} \right\}$	سعی و خطا



شکل ۷ انحراف جریان از صفحه شعاعی در ورودی چرخنده توربین شعاعی دو ورودی با محفظه متقارن بالا- شرایط ورودی کامل پایین- شرایط ورودی جزئی [۵]



شکل ۸ فرآیند نامی گردبادهای جریان ثانویه در چرخنده توربین شعاعی راست- صفحه پره به پره نزدیک پایه چپ صفحه قائم نزدیک ورودی [۱۱]



شکل ۹ چرخنده توربین شعاعی [۱۱]

ثابت نیز با ازدیاد نسبت فشار، شار جرمی افزایش می‌یابد. نتایج تحلیل عددی و تجربی برای توربین دو ورودی در شرایط ورودی کامل دارای تطابق و هماهنگی بسیار خوبی هستند که بیشترین اختلاف بین نتایج در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه است. این اختلاف به علت افزایش عدم قطعیت آزمایش در نسبت فشارهای کوچک (در نسبت سرعت هم‌انرژی بزرگ [۴]) و به تبع آن در دوره‌های کند می‌تواند باشد.

۵-۲- ورودی نیمه‌بار

توربین دو ورودی پرخورانی معمولاً در شرایط ورودی جزئی کار می‌کند. آزمایش‌های ورودی جزئی از جریان کامل تا جریان بسته در یک ورودی و به صورت برعکس در ورودی دیگر انجام می‌گیرد. شکل (۱۲) بازده و متغیر جرمی اندازه‌گیری شده توربین دو ورودی بر حسب نسبت فشار و در شرایط ورودی کامل و جزئی و در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بازده بیشینه، نه در شرایط ورودی کامل، بلکه در شرایط ورودی جزئی و در حالتی که شار جرمی سمت پوسته بیشتر از شار جرمی سمت پایه است، رخ می‌دهد. در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، بازده بیشینه در نسبت شار جرمی سمت پوسته به سمت پایه، حدود ۱/۱ تا ۱/۷ به دست آمده، اما هنگامی که این نسبت خیلی بزرگ می‌شود، بازده کاهش می‌یابد و کمتر از بازده در شرایط ورودی کامل قرار می‌گیرد. در شرایط ورودی جزئی نهایی یعنی حالتی که یکی از ورودی‌ها کاملاً بسته باشد، بازده توربین بسیار ضعیف است و کمینه آن در حالتی است که ورودی سمت پوسته کاملاً بسته باشد ($\dot{m}_s / \dot{m}_h = 0$). این نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت بلعیدن^۱ و بازده، همواره برای ورودی سمت پوسته بیشتر از ورودی سمت پایه است و تأثیر هر یک از ورودی‌ها بر روی بازده یکسان نیست. عامل جرمی توربین دو ورودی در شرایط ورودی کامل بیشترین مقدار را نشان می‌دهد و در شرایط ورودی جزئی نهایی که کل جریان از سمت پایه می‌گذرد، کمترین مقدار را دارد.

شکل (۱۳) بازده توربین دو ورودی به دست آمده را از الگوسازی، در شرایط ورودی کامل و جزئی و در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که، این روش بخوبی روند نتایج تجربی را دنبال کرده است. در شکل‌های (۱۴) تا (۱۷) بازده توربین دو ورودی در چهار حالت ورودی جزئی در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه به دست

پایه است، اما در شرایط ورودی جزئی، هنگامی که ورودی سمت پایه (داخلی) بسته باشد، انحراف جریان کم است. اما وقتی که ورودی سمت پوسته (خارجی) بسته است، انحراف جریان وضعیت مطلوبی ندارد و همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان در سمت پوسته بسیار انحراف دارد و زاویه آن مثبت است که نشان از برگشت جریان از ورودی سمت پایه به ورودی سمت پوسته است، که مزیت غیرمتقارن ساختن محفظه در این قسمت، روشن می‌شود. در حقیقت با غیرمتقارن کردن محفظه سعی بر این است که انحراف جریان نسبت به صفحه شعاعی در همه حالات کم بماند و جریان در حالت‌های نهایی ورودی جزئی، از یک ورودی به داخل ورودی دیگر باز نگردد. حال برای اصلاح معادلات الگوسازی فضای میانی محفظه دو ورودی متقارن لازم است که زاویه تمایل ورودی سمت پوسته در این معادلات وارد شود تا فضای میانی محفظه غیرمتقارن الگو شود.

نکته مهم دیگر در الگوسازی افت‌ها، وجود جریان‌های ثانویه در چرخنده توربین جریان شعاعی است که به وسیله شتاب سریع در جهت جریان و همچنین چرخش در صفحه نصف النهاری و نیز در طول خط انحنا ایجاد می‌شود. شکل (۸) فرآیند نامی گردبادهای جریان ثانویه در چرخنده توربین شعاعی در صفحه پره به پره نزدیک پایه و صفحه قائم نزدیک ورودی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۹) که چرخنده توربین شعاعی را نشان می‌دهد، معلوم است جریانی که از سمت پایه عبور می‌کند نسبت به جریان عبوری از سمت پوسته باید مسیر طولانی‌تر و با انحنای بیشتری را طی کند. به همین دلیل است که جریان تمایل بیشتری به عبور از سمت پوسته دارد. انحنا و طول مسیر بیشتر باعث افت بیشتری در جریان سمت پایه می‌شود. افت بارگذاری پره ناشی از این وضعیت است. بر همین اساس در مراجع [۸] و [۹] افت بارگذاری پره برای ورودی سمت پایه و سمت پوسته به طور جداگانه به دست آمده و تأثیر هر کدام از آن‌ها در تمامی شرایط مشخص شده است.

در نهایت افت کلی چرخنده به دست می‌آید:

$$\sigma'_{4-5} = \left(1 - \frac{\gamma-1}{\gamma R T'_{05}} U_t^2 \Delta q \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

$$\Delta q = \sum \Delta q_i = \Delta q_{Fr} + \Delta q_{Cl} + \Delta q_{BL} + \Delta q_{Ex} \quad (8)$$

$$(9)$$

$$\sigma_{4-5} = \sigma'_{4-5} \cdot \sigma_{RM}$$

روند حل جریان در توربین شعاعی دو ورودی، در شکل (۱۰) آمده است.

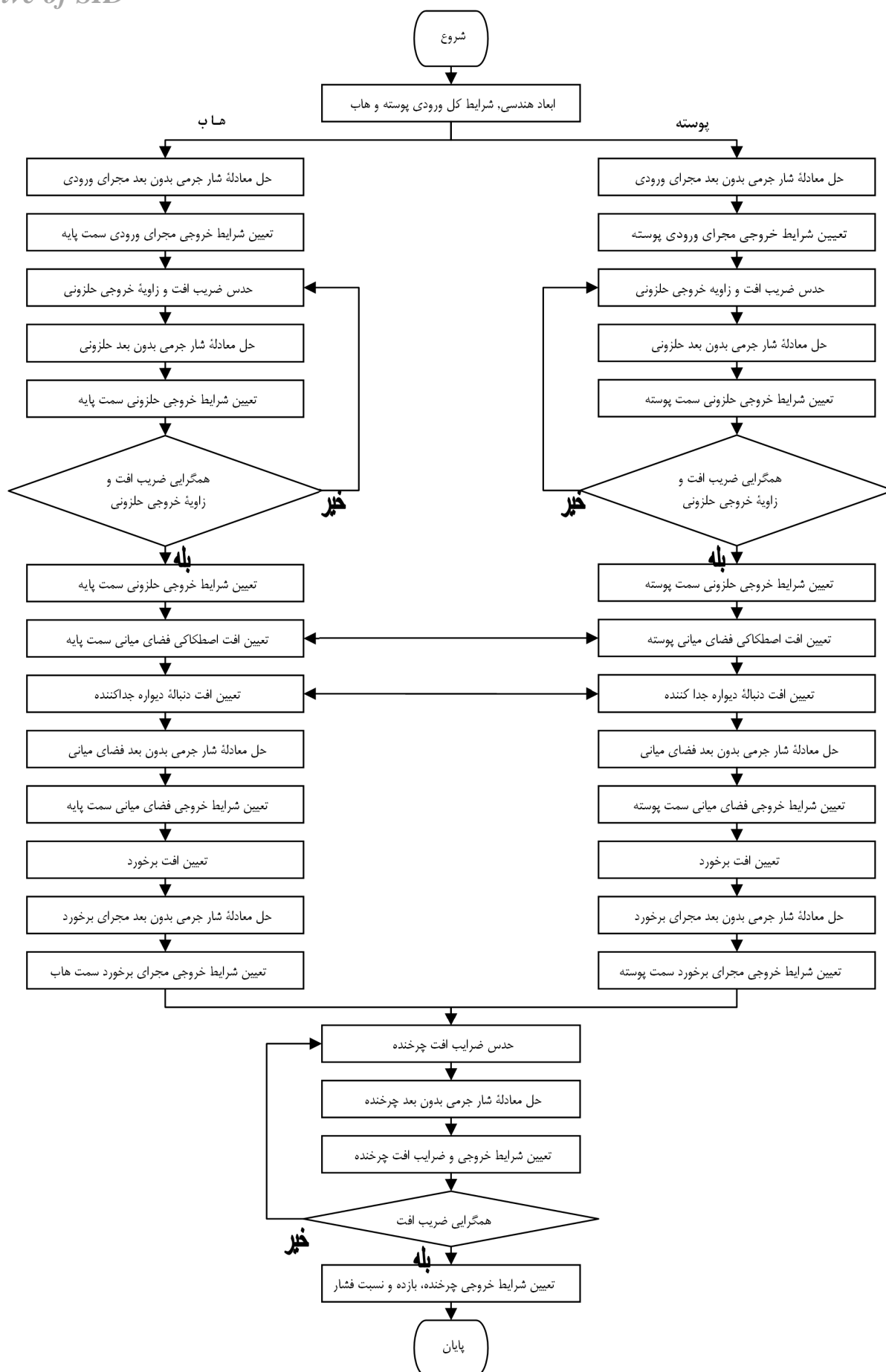
۵- نتایج و بحث در مورد آن‌ها

مشخصه‌های عملکردی توربین دو ورودی با متغیرهایی نظیر بازده هم‌انرژی کل به ایستا، نسبت فشار کل به ایستا، متغیر جرمی، سرعت دورانی و نسبت شار جرمی سمت پوسته به شار سمت پایه ارائه می‌شود.

۵-۱- ورودی باربار کامل

شکل (۱۱) بازده هم‌انرژی کل به ایستا و متغیر جرمی توربین دو ورودی را بر حسب نسبت فشار کل به ایستا برای سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که، بازده بیشینه توربین دو ورودی با افزایش سرعت دورانی کاهش می‌یابد و در عین حال در نسبت فشار بزرگ قرار می‌گیرد. افزایش افت برخورد و بارگذاری پره در دوره‌های تند، باعث کاهش بازده می‌شود.

همین‌طور با افزایش دور در نسبت فشار ثابت، شار جرمی کاهش می‌یابد و در دور

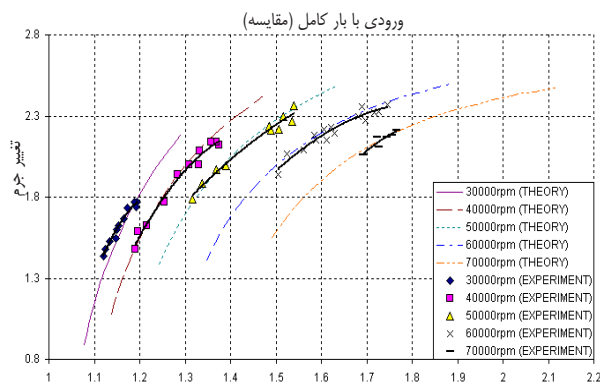


شکل ۱۰ روندنمای حل جریان در توربین دو ورودی

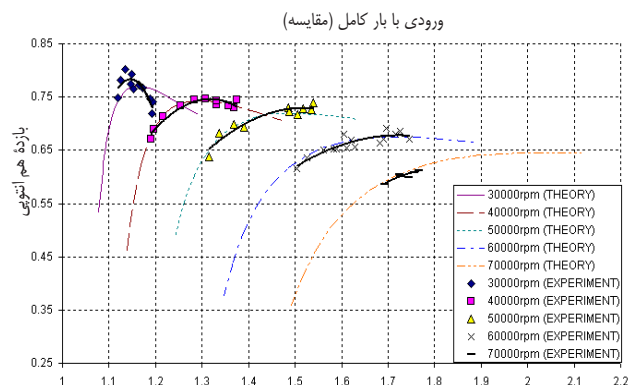
Archive of SID

اختلاف های اندکی که بین نتایج تجربی و تحلیل عددی وجود دارد احتمالاً ناشی از خطاهای اندازه گیری در آزمایش ها به سبب نوسانات جریان هوا، دقت دستگاه های اندازه گیری، عدم تعادل کامل مکانیکی و ترمودینامیکی در حین داده برداری و عدم قطعیت در نتایج آزمایش هاست. البته خطاهایی در نتایج تحلیل عددی نیز وجود دارد که به سبب عدم تخمین صحیح و دقیق افت ها در توربین دو ورودی و اندازه گیری دقیق هندسه آن می تواند باشد.

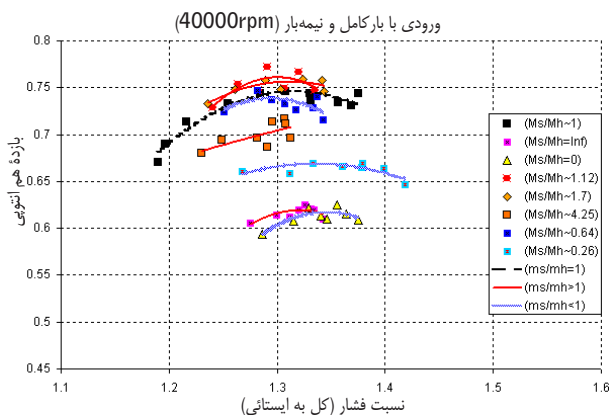
آمده از دو روش تحلیلی و تجربی با هم مقایسه شده اند. شکل های (۱۸) و (۱۹) بترتیب نتایج تجربی بازده و متغیر جرمی و نتایج تحلیل عددی بازده توربین دو ورودی را در شرایط ورودی کامل و جزئی در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه نشان می دهند. مشاهده می شود که شبیه سازی یک بعدی بخوبی توانسته عملکرد توربین دو ورودی را پیش بینی کند و با نتایج تجربی تطابق و همخوانی خوبی داشته باشد. شکل های (۲۰) تا (۲۴) بازده اندازه گیری شده توربین دو ورودی را در پنج حالت مختلف ورودی جزئی در سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه با بازده شبیه سازی شده مقایسه می کند.



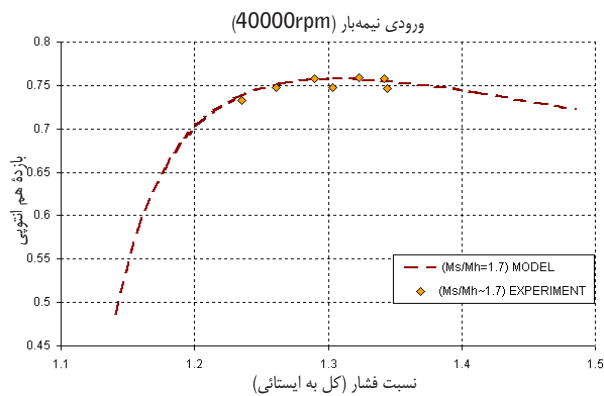
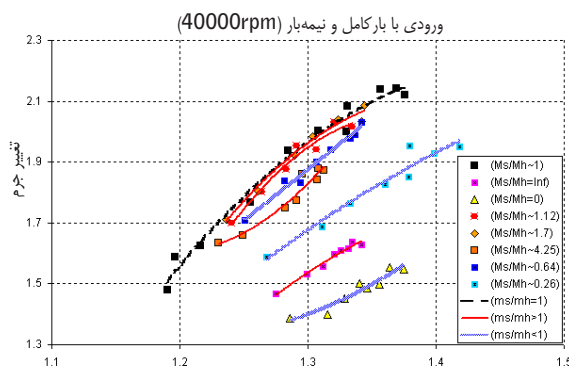
شکل ۱۱ بازده هم اتروبی کل به ایستای و متغیر جرمی توربین دو ورودی بر حسب نسبت فشار کل به ایستای در سرعت های مختلف



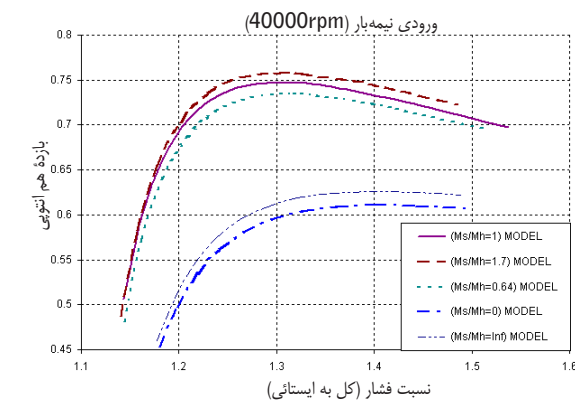
شکل ۱۲ بازده هم اتروبی کل به ایستای و متغیر جرمی توربین دو ورودی بر حسب نسبت فشار کل به ایستای در سرعت های مختلف



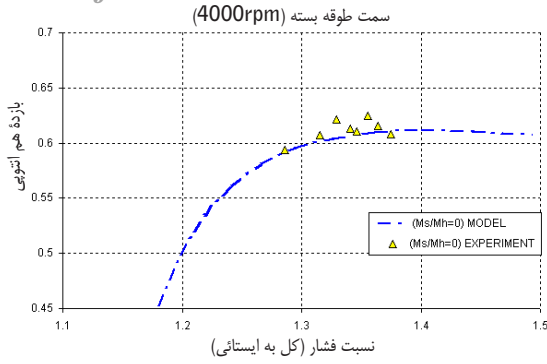
شکل ۱۳ بازده و متغیر جرمی اندازه گیری شده توربین دو ورودی بر حسب نسبت فشار، شرایط ورودی نیمه بار کامل و نیمه بار (40000rpm)



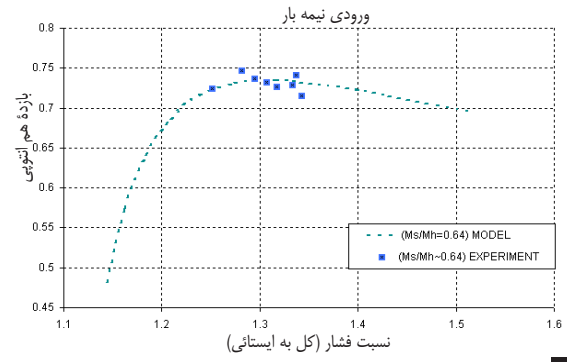
شکل ۱۴ مقایسه بازده محاسبه و اندازه گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (40000rpm)



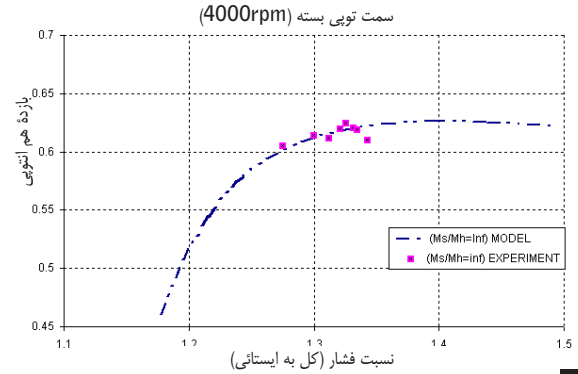
شکل ۱۵ بازده محاسبه شده توربین دو ورودی بر حسب نسبت فشار، شرایط ورودی کامل و جزئی (40000rpm)



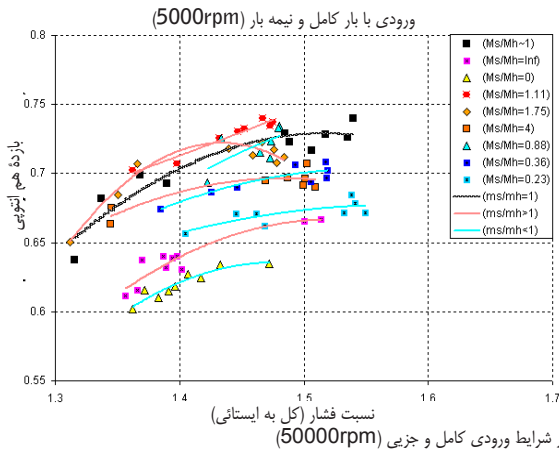
شکل ۱۷ مقایسه بازده محاسبه و اندازه گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (40000rpm)



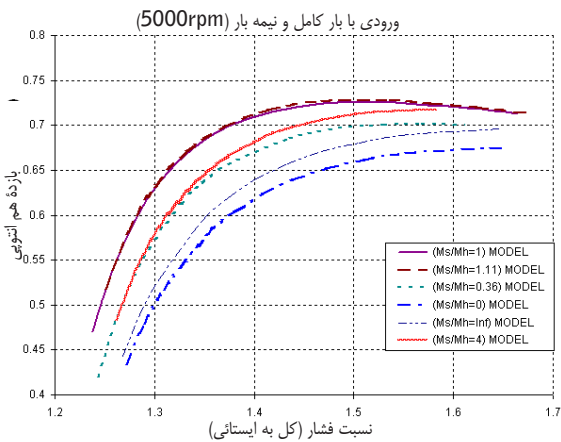
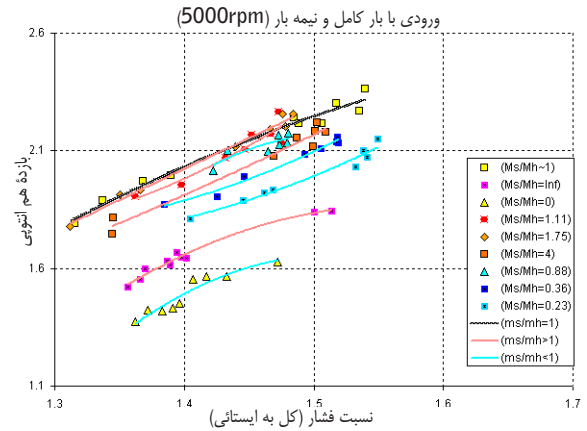
شکل ۱۵ مقایسه بازده محاسبه و اندازه گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (4000rpm)



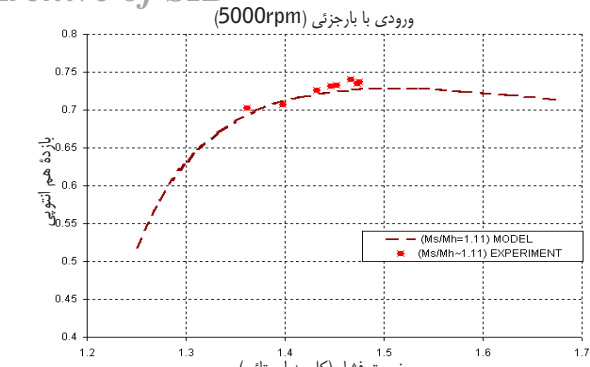
شکل ۱۶ مقایسه بازده محاسبه و اندازه گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (40000rpm)



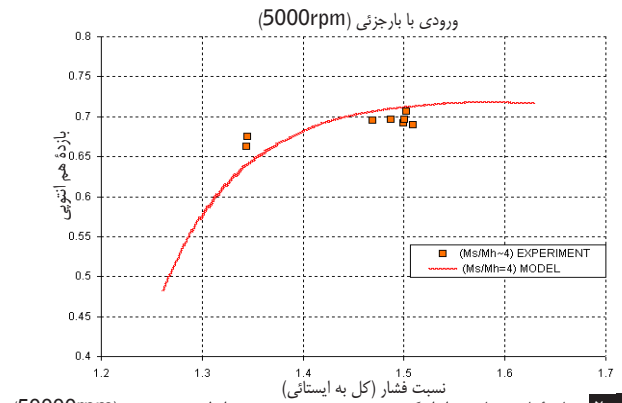
شکل ۱۸ نتایج تجربی بازده و متغیر جرمی توربین دو ورودی در شرایط ورودی کامل و جزئی (50000rpm)



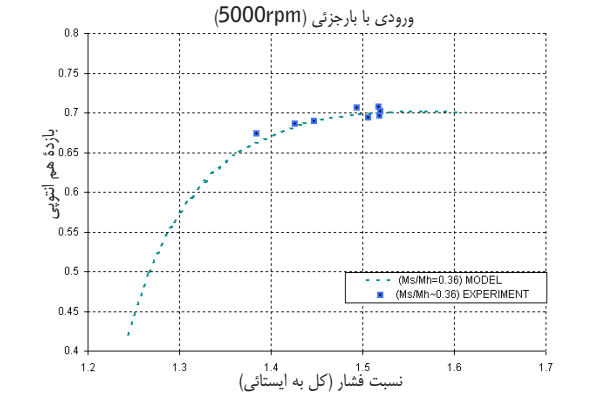
شکل ۱۹ نتایج تحلیل عددی بازده توربین دو ورودی در شرایط ورودی کامل و جزئی (50000rpm)



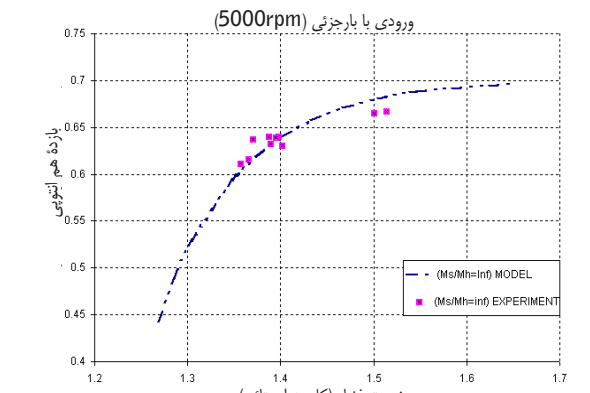
شکل ۲۱ مقایسه بازده محاسبه و اندازه‌گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (5000rpm) نسبت فشار (کل به ایستائی)



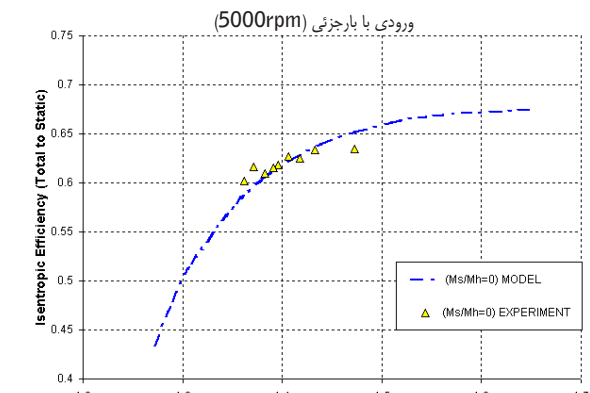
شکل ۲۰ مقایسه بازده محاسبه و اندازه‌گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (5000rpm) نسبت فشار (کل به ایستائی)



شکل ۲۲ مقایسه بازده محاسبه و اندازه‌گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (5000rpm) نسبت فشار (کل به ایستائی)



شکل ۲۳ مقایسه بازده محاسبه و اندازه‌گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (5000rpm) نسبت فشار (کل به ایستائی)



شکل ۲۴ مقایسه بازده محاسبه و اندازه‌گیری شده توربین دو ورودی در شرایط ورودی جزئی (5000rpm) نسبت فشار (کل به ایستائی)

۱۶- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق، نتایج بررسی‌های تجربی بر روی توربین جریان شعاعی دو ورودی پرخورانی در حالت دائمی و شرایط ورودی کامل و جزئی ارائه و بحث شد. همچنین شبیه‌سازی یک‌بعدی پیشرفته‌ای برای توربین دو ورودی و در شرایط ذکر شده، با تأکید ویژه بر عدم تقارن محفظه دو ورودی و افت بارگذاری پره در چرخنده، توسعه داده شد. دانش و فهم رفتار توربین در چنین شرایطی، یکی از مهم‌ترین نیازمندی‌ها برای بهبود تطابق پرخوران و موتور و حتی طراحی بهینه این نوع توربین‌هاست. نظر به این که تحقیقات بسیار اندکی در زمینه عملکرد توربین دو ورودی انجام گرفته، این تلاش می‌تواند خلاء موجود را تا حدودی مرتفع سازد.

از بررسی تجربی و تحلیل عددی عملکرد توربین جریان شعاعی دو ورودی در شرایط ورودی کامل و جزئی، رفتارهای ویژه و جالبی به دست آمد:

۱) عملکرد توربین شعاعی دو ورودی کاملاً تحت تأثیر شرایط ورودی جزئی است و توربین در این شرایط، بازده کمتری در مقایسه با شرایط ورودی نشان می‌دهد. دلیل این مسأله، عدم یکنواختی جریان در ورود به چرخنده در شرایط ورودی جزئی است که منجر به افت برخورد و بارگذاری بیشتر پره می‌شود. همچنین افت ناشی از دیواره جداکننده در فضای میانی در این شرایط بیشتر است. کمترین بازده توربین در شرایطی رخ می‌دهد که جریان جرمی کاملاً از سمت پایه بگذرد. بازده وقتی که جریان جرمی سمت پوسته بیشتر از جریان جرمی سمت پایه است، بیشینه است که این، می‌تواند به سبب فرآیندهای جریان ثانویه نزدیک ورودی چرخنده باشد که با جملات افت بارگذاری پره در چرخنده مشخص می‌شوند.

۲) هر یک از دو ورودی توربین، در مشخصه‌های بازده و متغیر جرمی، کاملاً متفاوت ظاهر می‌شوند و جریان تمایل بیشتری به عبور از سمت پوسته را دارد. در شرایط ورودی کامل متغیر جرمی توربین بیشترین است و در شرایط ورودی جزئی که سمت پوسته کاملاً بسته باشد، متغیر جرمی کمترین مقدار را دارد. تعامل شدید بین ورودی‌ها و تأثیر متفاوت آن‌ها بر عملکرد توربین، شرایط ورودی جزئی را برجسته و مهم‌تر می‌سازد.

بر مبنای این تحقیق، هنگامی که توربین دو ورودی باید در شرایط ورودی جزئی کار کند، بهتر است که جریان جرمی بیشتری از سمت پوسته عبور داده شود. در پرخورانی، اکثراً هر یک از ورودی‌های توربین دو ورودی دارای شرایط جریان متفاوتی هستند که همانند شرایط ورودی جزئی است. بنابراین، استفاده از نتایج این تحقیق روند تطابق پرخورانی به روش ضربانی و عملکرد موتور را بهبود خواهد بخشید [۲]. یادآوری می‌شود که شبیه‌سازی یک‌بعدی توربین از جمله توربین جریان شعاعی دو ورودی براساس الگوهای افت تجربی، ابزاری بسیار مناسب و قوی برای پیش‌بینی عملکرد آن است.

سپاسگزاری

از حمایت‌های قطب علمی تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف و نیز از پشتیبانی مالی وزارت صنایع و معادن در پیشبرد این پژوهش قدردانی می‌شود. همچنین از زحمات آقایان مجیدرضا شاه حسینی و محمد جستان زرنقی در انجام دادن آزمایش‌ها تشکر می‌شود ■

فهرست علائم و اختصارات

A	مساحت
C_p	گرمای ویژه فشار ثابت
M	عدد ماخ
\dot{m}	شار جرمی
Mr_h	نسبت شار جرمی ورودی سمت پایه به کل شار جرمی توربین
Mr_s	نسبت شار جرمی ورودی سمت پوسته به کل شار جرمی توربین
N	نرمال
P	فشار
R	ثابت گاز
T	دما
U	سرعت تیغه
α	زاویه مطلق جریان
β	زاویه نسبی جریان
γ	نسبت حرارت های ویژه
Δq	افت آنتالپی بدون بعد
ρ	چگالی
σ	تایع تولید آنتروپی، ضریب افت

زیرنویس‌ها و بالانویس‌ها

۰	ورود به توربین، شرایط سکون یا کل
۱	ورود به حلزونی
۲	خروج از حلزونی، ورود به فضای میانی
۳	خروج از فضای میانی، ورود به ناحیه برخورد
۴	خروج از ناحیه برخورد
۵	خروج از چرخنده
BL	بارگذاری پره
Cl	لقی
Ex	سرعت خروجی
Fr	اصطكاکی
h	سمت پایه
RM	اختلاط چرخنده
s	سمت پوسته
t	نوک پره چرخنده
,	شرایط نسبی
.	

Reference:

- 1-Ebaid, M. S. Y., Bhinder, F. S. and Khdairi, G. H., "A Unified Approach for Designing a Radial Flow Gas Turbine", Journal of Turbomachinery 125, (2003): 598-606.
- 2-Watson, N. and Janota, M. S., Turbocharging the Internal Combustion Engine, London: Longman Scientific and Technical Publishing Company, 1982.
- 3-Hajilouy-Benisi, A., Farshchi, M., Ghelichkhani, M., "Steady State Behavior Modeling of Radial Inflow Gas Turbine", International Conference of Iranian Aerospace Society, Iran, 2001.
- 4-Dale, A. and Watson, N., "Vaneless Radial Turbocharger Turbine Performance", IMechE, C110/86, (1986): 56-76.
- 5-Baines, N. C. and Yeo, J. H., "Flow in a Radial Turbine under Equal and Partial Admission Conditions", IMechE, C423/002, 1991.
- 6-Capobianco, M. and Gambarotta, A., "Performance of a Twin-Entry Automotive Turbocharger Turbine", ASME Paper, 93-ICE-2, 1993.
- 7-Ghasemi, Sh., Shirani, E. and Hajilouy-Benisi, A., "Performance Prediction of Twin Entry Turbocharger Turbine", ASME Turbo Expo, GT-2002-30576, 2002.
- 8-Aghaali, H., Hajilouy-Benisi, A., "Experimental and Theoretical Investigation of Twin-Entry Radial Inflow Gas Turbine with Unsymmetrical Volute under Full and Partial Admission Conditions", ASME Turbo Expo, GT2007-27807, 2007.
- 9-Aghaali, H., Experimental and Theoretical Investigation of Twin-Entry Radial Inflow Turbine Performance, School of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Iran, M. Sc. Thesis, 2001.
- 10-Baines, N. C., Partial Admission and Unsteady Flow in Radial Turbines, VKI, Series 1992-05, 1992.
- 11-Baines, N. C., Fundamentals of Turbocharging, Concepts NREC, 2005.
- 12-Whitfield, A. and Baines, N. C., Design of Radial Turbomachines, London: Longman Scientific and Technical Publishing Company, 1990.
- 13-Ghasemi, Sh., Shirani, E. and Hajilouy-Benisi, A., "Performance Prediction of Twin Entry Turbocharger Turbines", Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 298, No. B2, (2005).