

ارتقاء عملکرد توربین جریان شعاعی یک پرخوران با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و مدلسازی

سیدمحمدحسین میری^۱، علی حاجیلوی بنیسی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، mohammad839miri@yahoo.com

۲- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، hajilouy@sharif.edu

چکیده

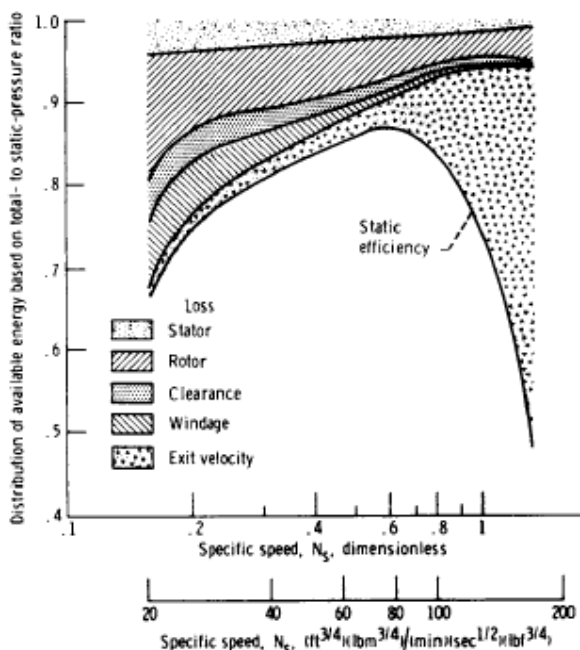
در این پژوهش، مشخصات رفتاری توربین جریان شعاعی دو ورودی پرخوران (Turbocharger) گرت مدل (GT-4082) در شرایط ورودی کامل و پایا با استفاده از روش‌های تجربی و مدلسازی تعیین می‌شود. منحنی‌های عملکرد توربین به روش تجربی در بستر آزمون پرخوران دانشگاه صنعتی شریف بدست می‌آید. میدان جریان در داخل توربین، با مدلسازی، مشخص می‌گردد و علل اتلاف انرژی در توربین بررسی می‌شود. عملکرد توربین بدست آمده از نتایج مدلسازی با نتایج تجربی مقایسه می‌شود که از تطابق قابل قبولی برخوردار است. میزان اتلاف انرژی در چرخ توربین، نسبت به قسمت‌های دیگر، بیشتر می‌باشد. یک علت مهم این اتلاف انرژی، جریان چرخشی در قسمت نوک خروجی چرخ توربین است. در این پژوهش هدف در ارتقاء توربین، کاهش جریان چرخشی با تغییر هندسه چرخ توربین است. فرایند ارتقاء عملکرد، هندسه چرخ توربین با محدودیت‌های ابعادی محافظه توسعه داده می‌شود. برای این منظور، حداکثر بازده در نقطه طراحی توربین معیار قرار داده می‌شود. منحنی عملکردی توربین توسعه یافته با طرح موجود مقایسه می‌گردد. همچنین علاوه بر افزایش بازده توربین در نقطه طراحی، محدوده‌ی کاری خارج از بازده زیاد ماشین نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پرخوران - توربین جریان شعاعی دو-ورودی - بررسی تجربی - مدلسازی یک بعدی - مدلسازی سه بعدی

۱- مقدمه

توربین‌های گازی جریان شعاعی در واحدهای تولید توان کمکی (Auxiliary Power unit)، توربین‌های گازی صنعتی کوچک و پرخوران‌ها کاربرد بسیاری دارد. زمانی که دبی کم و نسبت فشار بالایی وجود داشته باشد (سرعت مخصوص کم)، از این نوع توربین استفاده می‌شود. در این شرایط کاری، توربین جریان محوری به دلیل افزایش قابل توجه تلفات ناشی و اصطکاکی، بازده و عملکرد خوبی نداشته و هزینه ساخت آن نیز زیاد است. به همین دلیل استفاده از توربین جریان شعاعی مناسب‌تر است. از مزایای توربین جریان شعاعی گستره عملکردی وسیع با بازده زیاد و ابعاد کوچک آن است [1].

توربین جریان شعاعی در پرخوران‌ها از دو قسمت ثابت و متحرک تشکیل می‌شود. نقش قسمت ثابت، محفظه و نازل توربین، هدایت جریان و افزایش سرعت سیال تا رسیدن به چرخ توربین (Rotor) است. هر چه میزان افزایش سرعت بیشتر باشد انرژی در دسترس توربین نیز بیشتر خواهد بود. در قسمت متحرک توربین (چرخ توربین) بخشی از انرژی گاز به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.



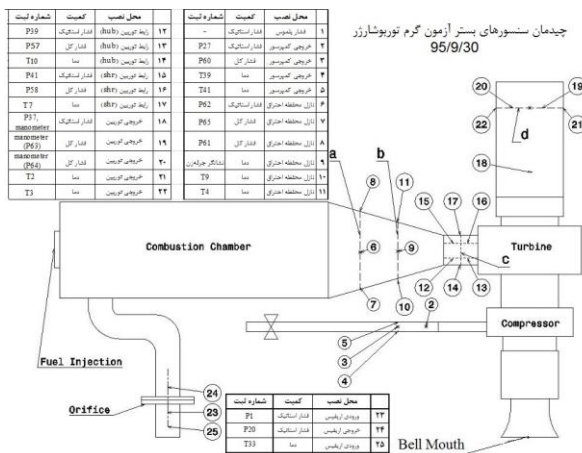
شکل ۱- میزان انرژی در دسترس توربین بر اساس عوامل اصلی افت انرژی [2]

مطابق شکل ۱ با توجه به تاثیر هر بخش در میزان افت انرژی در دسترس توربین، چرخ توربین بیشترین سهم در اتلاف انرژی را دارد. از این رو در این پژوهش برای ارتقاء عملکرد توربین، میدان جریان چرخ توربین بررسی می‌شود [2]. عدد رینولدز جریان در ضرایب مدلسازی برای توربین اثر داشته و منحنی عملکردی توربین را تحت تاثیر قرار می‌دهد [3]. تیغه جداکننده محفظه توربین بر روی سرعت شعاعی توربین اثر دارد و آن با توجه به هندسه توربین مشخص می‌شود [4]. جریان در ورود به توربین دارای یکنواختی در سرعت و راستا می‌باشد و می‌توان جریان توربین دو ورودی (Twin-Entry) در حالت ورودی کامل را همانند توربین تک ورودی (Single-Entry)، یکنواخت و در راستای نصف النهای (Meridional) در نظر گرفت [5].

در این مقاله، به نتایج مطالعات تجربی توربین جریان شعاعی دو ورودی در یک پرخوران متعلق به شرکت گرت (GT-4082) در حالت ورودی کامل و جریان پایا در آزمایشگاه پرخوران دانشگاه صنعتی شریف پرداخته می‌شود. همچنین مدلسازی توربین انجام می‌شود و نتایج مدلسازی با نتایج آزمایشگاهی ارزیابی می‌شود. در انتها با توجه به نتایج مدلسازی و شناخت عوامل افت در توربین، راهکارهای ارتقاء توربین، بررسی و با انتخاب

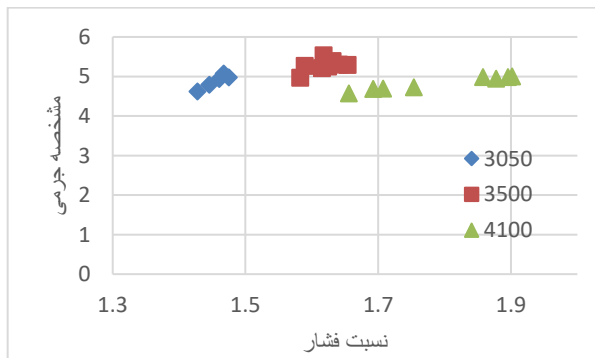


شکل ۲- بستر آزمون پرخوران دانشگاه صنعتی شریف



شکل ۳- محل قرارگیری حسگرها بر بستر آزمون

مطابق شکل ۳، در بستر آزمون، دما و فشار در ورود و خروج از توربین و نیز سرعت دوران با استفاده از حسگرهای نصب شده بر روی بستر آزمون اندازه گیری می گردد. از نتایج بدست آمده در آزمون می توان منحنی های عملکرد توربین را ترسیم نمود.



شکل ۴- داده های مشتخصه جرمی برحسب نسبت فشار توربین در سه مشتخصه سرعت

تغییرات هندسی مناسب، منحنی عملکرد جدید توربین استخراج و مشخصات اولیه مقایسه می شود.

- در این پژوهش از فرض هایی برای بررسی توربین استفاده می گردد.
- با توجه به سرعت زیاد جریان، از انتقال حرارت صرف نظر می شود و جریان در توربین به صورت بی دررو (Adiabatic) می باشد.
 - جریان در توربین با توجه به عدد ریچاردسون کم، پایا منظور می شود [6].

برای بیان عملکرد توربین از متغیرهای زیر استفاده می شود تا بتوان در عین اختصار در نمودارها، بیان کاملی از عملکرد توربین در شرایط کاری متفاوت داشت.

۱-۱- مشتخصه جرمی

بیانگر دبی جرمی گذرنده از توربین با توجه به شرایط گاز ورودی است.

$$MFP = \left(\frac{\dot{m} \sqrt{T_{t,1}}}{P_{t,1}} \right) \left(\frac{Kg \cdot K^{0.5}}{s \cdot bar} \right) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)، $T_{t,1}$ و $P_{t,1}$ به ترتیب دما و فشار کل ورودی به توربین و \dot{m} دبی جرمی گذرنده از توربین است.

۲-۱- نسبت فشار

نسبت فشار کل ورودی به فشار استاتیک خروجی، نسبت فشار توربین منظور می شود.

$$PR = \frac{P_{t,1}}{P_{st,6}} \quad (2)$$

۱-۳- مشتخصه سرعت

ارتباط بین سرعت دوران توربین و شرایط ورودی جریان، توسط این مؤلفه می باشد.

$$SP = \frac{N}{\sqrt{T_{t,1}}} \left(\frac{rpm}{K^{0.5}} \right) \quad (3)$$

۲- مطالعات تجربی

مطالعات تجربی، در آزمایشگاه پرخوران دانشگاه صنعتی شریف انجام شد. در شکل ۲ بستر آزمون پرخوران مشاهده می شود. به دو روش، توربین آزمایش می شود.

۱- آزمون سرد

۲- آزمون گرم

در آزمون سرد، با استفاده از هوای فشرده، هوای مورد نیاز توربین، تامین می شود. از مزایای آزمون سرد می توان به سهولت در انجام آزمایش و ایمنی بالا اشاره نمود. با انجام آزمون سرد برای بالابردن هر چه بیشتر دور توربین، آزمون گرم انجام می شود. در این آزمون، با استفاده از سوخت JP-4 و یک محفظه احتراقی، دمای سیال را بالا برده تا بتوان به دورهای زیادتر در بستر آزمون برای توربین رسید. در آزمون فشار و دما در مقاطع ورود و خروج از توربین داده برداری می شود.

سرعت زاویه‌ای جریان با استفاده از رابطه جریان گردابه آزاد (Free Vortex) (۴) محاسبه می‌شود. برای مدل‌سازی انجام شده با توجه به توربین موجود، مقدار S ، با توجه به نتایج آزمایشگاهی ۰.۹۲ در نظر گرفته می‌شود. [7] و [8]

$$C_1 \cdot r_1 = S \cdot C_{\theta,x} \cdot r_x \quad (۴)$$

برای سرعت شعاعی در ورودی چرخ توربین، با استفاده از روابط تجربی محاسبه می‌گردد (۵) [4].

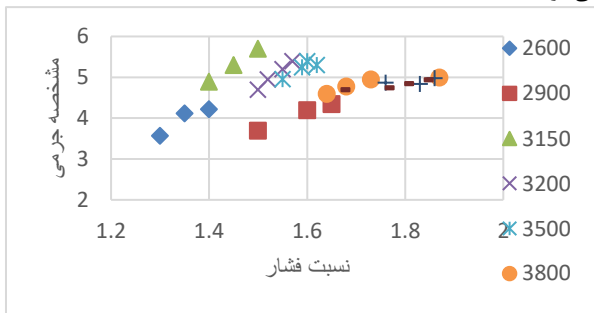
$$r^m V_{r3} = Const \quad (۵)$$

$$m = \frac{r_1}{2r_1 + 0.0348r_0}, r_1 = \frac{B^2}{A} + \frac{b_3}{2}$$

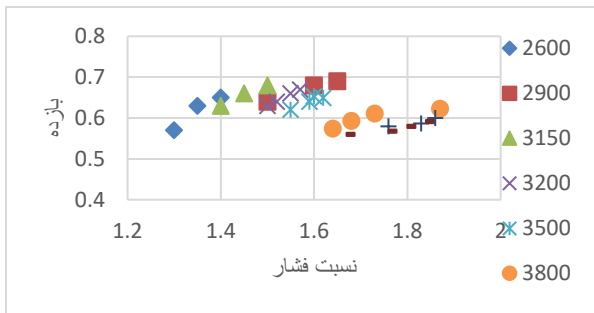
که در آن

$$A = L_R - \frac{b_3}{2}, B = r_4 - \sqrt{\frac{r_{6,sh}^2 + r_{6,h}^2}{2}}$$

به این ترتیب، نتایج عملکردی توربین در مدل‌سازی یک بعدی در مشخصه‌های سرعت متفاوت بدست می‌آید که در شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود.



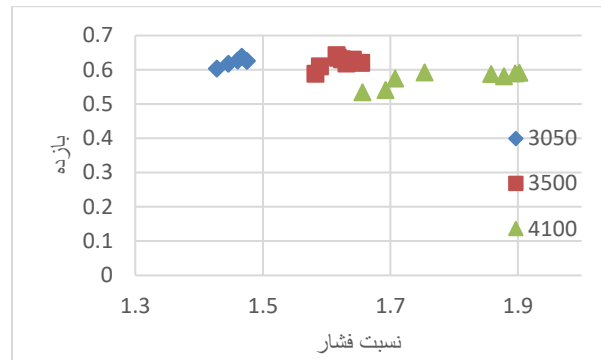
شکل ۷- داده‌های مشخصه جرمی توربین بر حسب نسبت فشار در شش مشخصه سرعت از مدل‌سازی یک بعدی



شکل ۸- داده‌های بازده توربین بر حسب نسبت فشار در شش مشخصه سرعت از مدل‌سازی یک بعدی

۲-۳- مدل‌سازی سه بعدی

برای مدل‌سازی سه بعدی، هندسه چرخ توربین توسط ابر نقاط استخراج گردید. برای محفظه توربین، به کمک مدل‌سازی یک بعدی زاویه ورود به نازل بدون تیغه محاسبه و به عنوان شرط ورودی به نرم افزار انسیس (Ansys CFX) منظور می‌شود. با در نظر گرفتن معادلات گاز کامل برای مدل‌سازی، منحنی عملکردی توربین با مدل‌سازی سه بعدی برای سه مشخصه دور ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ استخراج می‌گردد که در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه می‌شود.



شکل ۵- داده‌های بازده بر حسب نسبت فشار توربین در سه مشخصه سرعت

داده‌های عملکردی توربین جریان شعاعی پرخوران مورد بررسی در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.

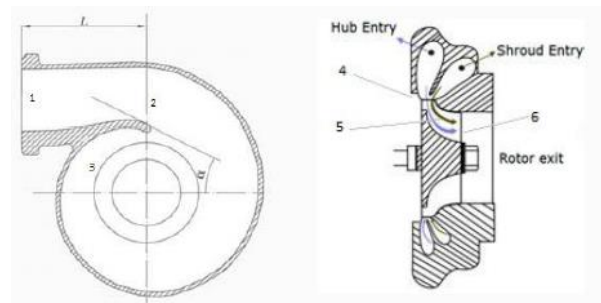
۳- مدل‌سازی یک بعدی و سه بعدی

بدلیل وجود محدودیت در آزمایش، مدل‌سازی جریان داخل توربین انجام می‌شود. مدل‌سازی انجام شده بوسیله نتایج آزمایشگاهی، صحت‌سنجی می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی یک بعدی

در مدل‌سازی یک بعدی که به آن مدل‌سازی خط میانگین (Mean-Line Modelling) نیز گفته می‌شود، میدان جریان به صورت یک بعدی بررسی می‌شود. در این روش، با استفاده از روابط جریان تراکم پذیر آیزنتروپیک یک بعدی گاز کامل و نیز با روابط افت انرژی، عملکرد اجزاء توربین مشخص می‌گردد. برای بدست آوردن شرایط جریان در مقاطع توربین، مطابق شکل ۶، در توربین ۶ مقطع انتخاب می‌شود.

- ۱- ورودی به توربین
- ۲- زبانه توربین
- ۳- ورودی به نازل بدون تیغه
- ۴- خروج از نازل و ورودی به چرخ توربین
- ۵- گلوگاه چرخ توربین
- ۶- خروج از چرخ توربین

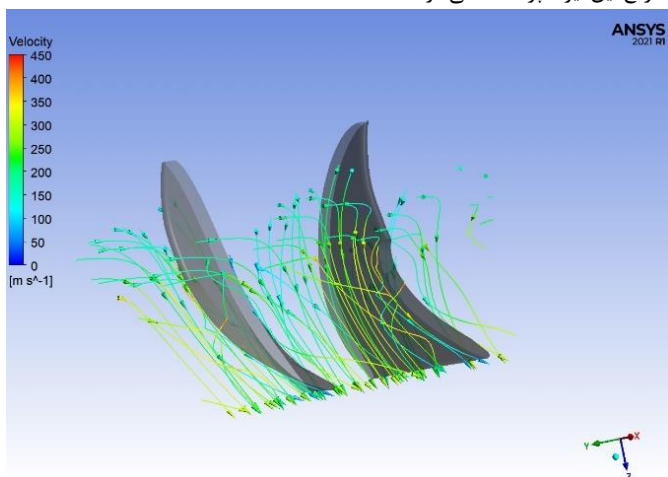


شکل ۶- مقاطع توربین جریان شعاعی در مدل‌سازی یک بعدی

با مشخص بودن مشخصات هندسی در مقاطع توربین و معادلات پایه‌ای بقای جرم، بقای تکانه، قانون اول و دوم ترمودینامیک [6] و نیز روابط افت انرژی، مشخصات جریان در هر مقطع از توربین محاسبه و با استفاده از آن‌ها، عملکرد توربین بدست می‌آید. در توربین جریان شعاعی

۴- علل افت در توربین

به کمک مدل‌سازی سه‌بعدی به بررسی میدان جریان سیال در توربین جریان شعاعی پرداخته می‌شود تا علت افت عملکرد در توربین مشخص گردد. با مشاهده خطوط جریان سه‌بعدی در چرخ توربین، شکل ۱۲، جریان چرخشی در قسمت انتهایی و در نوک پره مشاهده می‌شود. مقدار این چرخش در نقطه طراحی برای توربین قابل توجه است و برای نقاط خارج طراحی توربین نیز این چرخش قوی‌تر می‌شود. برای ارتقاء عملکرد توربین به رفع این ایراد پرداخته می‌شود.



شکل ۱۲- خطوط جریان در مسیر پره توربین

۵- ارتقاء عملکردی توربین

برای ارتقاء عملکرد، محفظه توربین تغییر نمی‌کند و هندسه ارتقاء یافته چرخ توربین، با فرض محدودیت‌های ابعادی آن است. برای توربین مورد نظر چند تغییر در هندسه چرخ انجام گرفت.

۱- طول محوری در انتهای چرخ توربین به طور میانگین در حدود

۲ میلی‌متر افزایش می‌یابد. این مقدار برای نوک پره، حدود ۳

میلی‌متر و برای پایه آن ۱.۵ میلی‌متر است. این تغییرات با روش

مرجع [9] هماهنگی دارد.

۲- زاویه چرخ در خروج نیز از پایه تا نوک تغییر می‌کند.

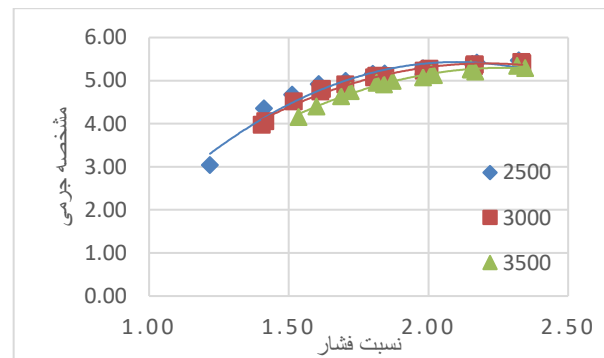
۳- ارتفاع پره در خروج افزایش پیدا می‌کند. فرایند مذکور با کمتر

کردن شعاع چرخ در پایه همراه است.

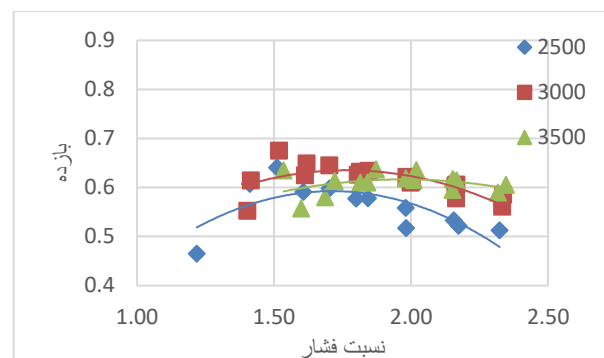
در شکل ۱۳، هندسه پره توربین در صفحه نصف‌النهاری

(Meridional) برای دو حالت موجود و جدید مشاهده می‌شود. تغییرات

چرخ توربین با رنگ قرمز است.

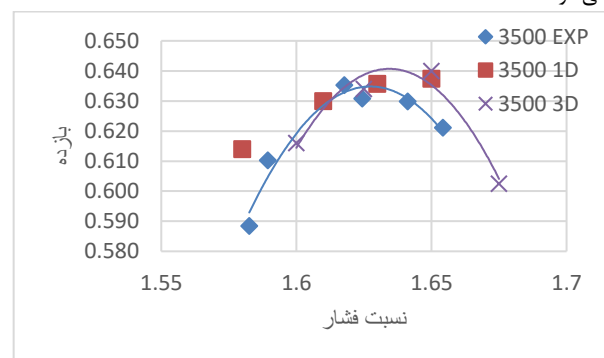


شکل ۹- نمودار مشخصه جرمی توربین بر حسب نسبت فشار در سه مشخصه سرعت از مدل‌سازی سه‌بعدی



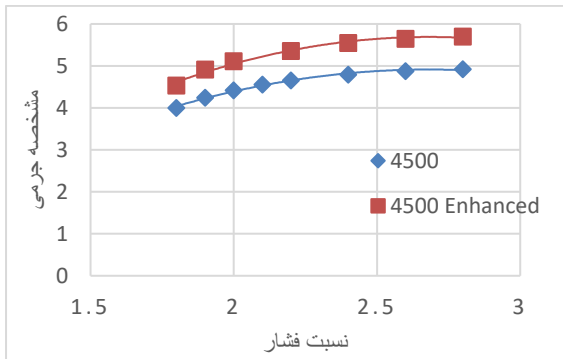
شکل ۱۰- نمودار بازده توربین بر حسب نسبت فشار در سه مشخصه سرعت از مدل‌سازی سه‌بعدی

با مشخص شدن منحنی عملکردی توربین توسط مدل‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی، به مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی پرداخته می‌شود.

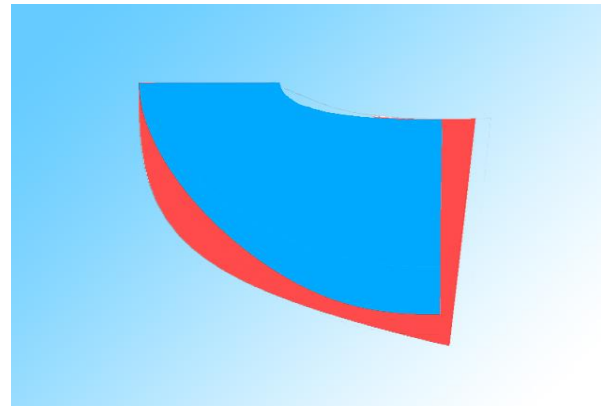


شکل ۱۱- نمودار مقایسه بازده توربین در مدل‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی با نتایج تجربی

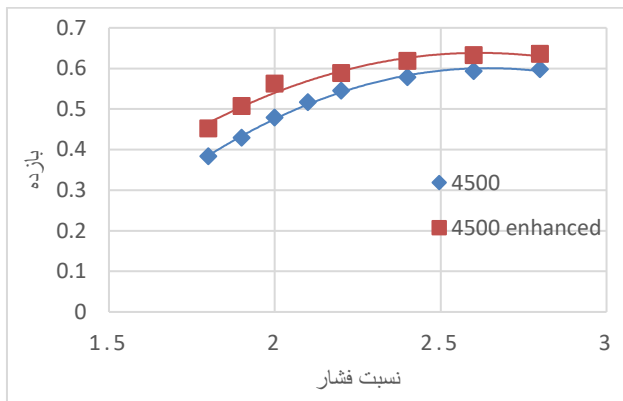
با مقایسه نتایج بدست آمده برای منحنی عملکردی توربین از مدل‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی با نتایج آزمون‌ها در مشخصه دور ۳۵۰۰، حداکثر اختلاف در بازده برای مدل‌سازی سه‌بعدی ۱/۲ درصد و حداقل آن ۰/۵ درصد می‌باشد. برای مدل‌سازی یک‌بعدی حداکثر اختلاف بازده حدود ۲/۵ درصد و حداقل آن ۰/۴ درصد است. بنابراین مدل‌سازی‌ها از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. حال به فرآیند ارتقاء عملکرد توربین پرداخته می‌شود.



شکل ۱۶- منحنی مشخصه جرمی توربین برحسب نسبت فشار برای طرح پایه و ارتقاء یافته برای مشخصه دور ۴۵۰۰

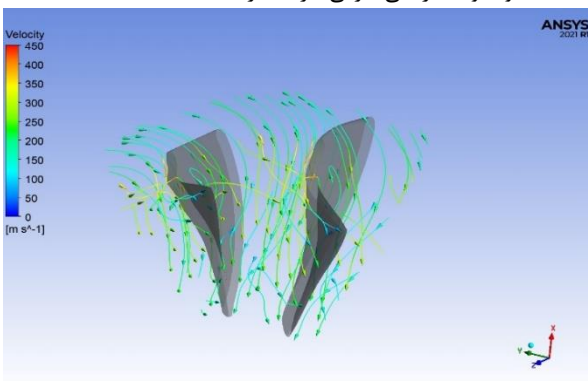


شکل ۱۳- مقایسه هندسه پره توربین جدید و موجود در صفحه نصف‌النهاری



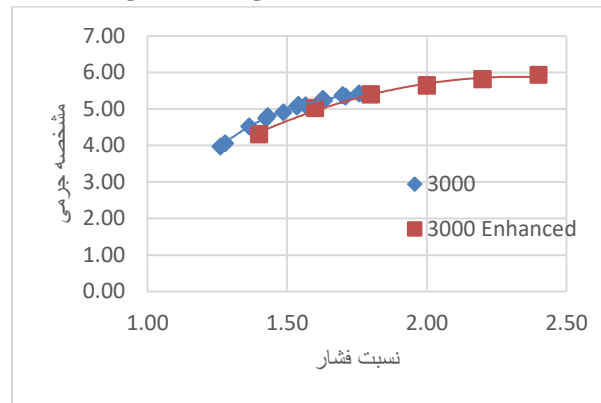
شکل ۱۷- منحنی بازده توربین برحسب نسبت فشار برای طرح پایه و ارتقاء یافته برای مشخصه دور ۴۵۰۰

مطابق شکل ۱۶ و ۱۷ در مشخصه سرعت ۴۵۰۰، حداکثر بازده در حدود ۴ درصد افزایش دارد. محدوده کاری با بازده زیاد نیز افزایش یافته است. محدوده و مقدار دبی جرمی نیز بیشتر شده است.

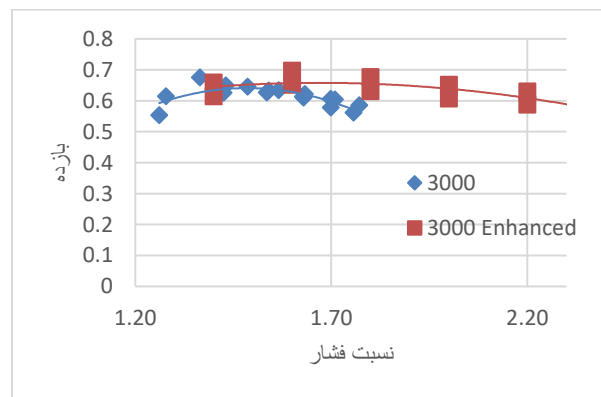


شکل ۱۸- خطوط جریان در مسیر بین دو پره توربین در طرح پایه

چرخ توربین جدید را به صورت سه بعدی مدل سازی کرده و نتایج پیش بینی رفتار آن در دو مشخصه سرعت ۳۰۰۰ و ۴۵۰۰ با نتایج مدل سازی سه بعدی توربین موجود در شکل های ۱۴ الی ۱۷ مقایسه می شود.



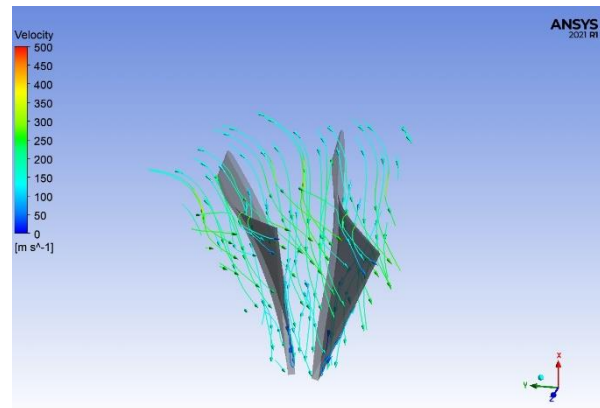
شکل ۱۴- نمودار مقایسه مشخصه جرمی توربین برحسب نسبت فشار برای طرح پایه و ارتقاء یافته برای مشخصه دور ۳۰۰۰



شکل ۱۵- نمودار بازده توربین بر حسب نسبت فشار برای طرح پایه و ارتقاء یافته برای مشخصه دور ۳۰۰۰

همانطور که در شکل ۱۴ و ۱۵ مشاهده می شود، در مشخصه سرعت ۳۰۰۰، بازده در حدود ۲ درصد افزایش می یابد. دبی جرمی نیز افزایش دارد. در طرح ارتقاء یافته گستره کاری توربین با بازده زیاد نیز افزایش دارد که برای پرخوران ها که در محدوده وسیعی از شرایط کاری فعالیت می کنند، بسیار مطلوب می باشد.

- flow conditions', *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 93–111, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.11.001.
- [6] A. Whitfield and N. C. Baines, *Design of radial turbomachines*. Harlow New York: Longman J. Wiley and sons, 1990.
- [7] H. Moustapha and M. F. Zelesky, Eds., *Axial and radial turbines*. White River Junction, Vt: Concepts NREC, 2003.
- [8] H. I. H. Saravanamuttoo, G. F. C. Rogers, and H. Cohen, *Gas turbine theory*, 5th ed. Harlow, England ; New York: Prentice Hall, 2001.
- [9] L. Mueller, Z. Alsalihi, and T. Verstraete, 'Multidisciplinary Optimization of a Turbocharger Radial Turbine', *Journal of Turbomachinery*, vol. 135, no. 2, p. 021022, Mar. 2013, doi: 10.1115/1.4007507.



شکل ۱۹- خطوط جریان در مسیر بین دو پره توربین در طرح ارتقاء یافته مطابق اشکال ۱۸ و ۱۹ طرح ارتقاء یافته چرخش جریان و تلفات انرژی کمتری دارد.

۶- نتیجه گیری

با استفاده از مدل سازی یک بعدی و سه بعدی ، میدان جریان در نقاط مختلف توربین جریان شعاعی پرخوران گرت (GT-4082) بررسی شد. مدل سازی با فرض جریان پایا و ورودی کامل است. آزمون های تجربی سرد و گرم توربین برای تهیه مشخصات رفتاری انجام گرفت. بیشینه اختلاف نتایج مدل سازی یک بعدی و سه بعدی با نتایج تجربی به ترتیب ۳ و ۱/۲ درصد می باشد که در حد قابل قبول است. در توربین جریان شعاعی بیشترین میزان اتلاف انرژی در چرخ توربین اتفاق می افتد. از این رو برای ارتقاء عملکرد توربین میدان جریان در مسیر چرخ توربین بررسی شد. از نتایج میدان جریان چرخشی توأم با افت انرژی در نوک خروجی پره های چرخ توربین مشاهده می شود. برای ارتقاء عملکرد توربین سعی در کاهش این پدیده شد نتیجه آن افزایش ۴ درصدی حداکثر بازده و وسعت بیشتر محدوده کاری با بازده زیاد به مقدار ۴۰ درصد است.

۷- منابع

- [1] م. شاه حسینی، ع. حاجیلوی بنیسی و م. راد، «بررسی عددی و تجربی رفتار جریان در توربین جریان شعاعی دو ورودی در شرایط ورودی کامل و جزئی»، در شانزدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک، ۱۳۸۷
- [2] D. G. Wilson and T. Korakianitis, *The design of high-efficiency turbomachinery and gas turbines*, 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1998.
- [3] R. H. Aungier, *Turbine aerodynamics: axial-flow and radial-inflow turbine design and analysis*. New York: ASME Press, 2006.
- [4] S. Ghasemi, E. Shirani, and A. Hajilouy-Benisi, 'Performance Prediction of Twin-Entry Turbocharger Turbines', presented at the ASME Turbo Expo 2002: Power for Land, Sea, and Air, Feb. 2009, pp. 1087–1095. doi: 10.1115/GT2002-30576.
- [5] M. Cerdoun and A. Ghenaiet, 'Unsteady behaviour of a twin entry radial turbine under engine like inlet