



Research Article

The Effect of Fixed Blades Installation Angle on the High-Efficiency Operating Range of a Centrifugal Pump as Turbine

Mohammad Hassan Shojaeefard* and Salman Saremian

Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

* corresponding author:(shojaeefard@iust.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 24 December 2024

Revised: 1 June 2025

Accepted: 20 July 2025

Keywords:

Pump as turbine,
micro hydropower plant,
energy recovery,
fixed blades angle,
numerical solution.

Abstract

Using the pump as turbine (PAT) for energy recovery has received considerable attention in recent years as an efficient and economical approach. This study investigates the performance of a centrifugal PAT both numerically and experimentally within its operational range. For numerical analysis, design and simulation processes were conducted using CFTurbo and CFX software. The validity of numerical simulations was confirmed by comparing them with experimental results. Due to the absence of a flow control mechanism at the impeller inlet, a significant reduction in efficiency is observed compared to pumping mode, particularly under off-design conditions. To enhance PAT performance, a diffuser with fixed blades was designed, and the impact of its blade angles on performance was numerically analyzed by varying angles between 15° and 35°. Turbulent kinetic energy parameter was employed to evaluate performance at different fixed blade angles. Results indicate that the blades' installation angle substantially affects both the distribution and the magnitude turbulent kinetic energy. Higher turbulence intensity was primarily concentrated in the impeller and volute tongue. Comparison of turbulent kinetic energy contours indicates that for a PAT with fixed blades at 25°, the distribution is more uniform, resulting in an efficiency improvement of 2.63% at the design point.

Introduction

Energy, as a fundamental factor, plays a crucial role in the development of human societies and facilitates continuous progress in social, economic, and cultural domains. Hydropower is recognized as the largest sustainable source of renewable electricity generation and is effective in reducing air pollution [5, 6]. Given the country's topography, there are significant elevation differences between reservoirs and consumption sites [7]. The utilization of pressure-reducing power plants for electricity generation from this excess pressure, in addition to supplying part of the grid demand, provides the capability to regulate pressure within permissible limits [11, 12]. In developing countries, PAT technology is proposed as a cost-effective alternative to conventional turbines. PATs offer advantages over

conventional turbines, including ease of procurement, maintenance, and lower costs [13-15].

Because pumps are not optimized for turbine operation, the fluid enters the impeller at an inappropriate angle, causing flow separation and reduced efficiency. In the present study, a diffuser with fixed blades has been designed. The blade angle of the diffuser has a direct influence on the flow field distribution and energy conversion rate. Through numerical simulations and flow field analysis, the optimal blade angle of the diffuser has been determined to achieve a broader operating range with high efficiency.

Methodology

The complete three-dimensional fluid domain of the pump was created using CFTurbo software and is presented in Figure 1. For the numerical analysis of incompressible flow

To Cite this article:

Shojaeefard, M.H. and Saremian. S. 2025. The effect of fixed blades installation angle on the high-efficiency operating range of a centrifugal pump as turbine, Sharif Mechanical Engineering Journal, 41(2), 49-61,
<https://doi.org/10.24200/ij40.2025.66460.1735>

in turbomachines, three-dimensional Navier-Stokes equations were employed.

A structured mesh was employed for the impeller and diffuser, while an unstructured mesh was used for the volute. Grid independence was performed by examining the efficiency parameter, and a mesh with 5.6 million elements was selected. To validate the numerical simulations, the centrifugal PAT was compared with experimental results. Figure 5 illustrates the schematic and configuration of the PAT power plant in urban water distribution network pipelines.

Figure 6 compares the required head, power output, and efficiency obtained from numerical simulations and experimental investigations. It is observed that the head, power, and efficiency curves derived from numerical simulations exhibit approximately similar trends to those obtained from experiments. The generated computational grid and the numerical solution settings appear reasonable, given the validation performed.

Results and Discussion

Investigation of PAT efficiency revealed significant performance degradation under off-design operating conditions. In the present study, a diffuser with fixed blades has been designed to enhance the PAT performance. The design and meshing of the diffusers were carried out in Design Modeler and TurboGrid software, respectively, followed by numerical analysis. A diffuser with appropriate blade angles can provide a more uniform and stable flow pattern, reduces pressure fluctuations, and improves overall performance. For projects with considerable flow-rate

variations, adding fixed-blade diffusers with an optimum angle is not efficient across the entire operating range. The turbulent kinetic energy criterion was employed to assess the flow conditions in the PAT.

A comparison of turbulent kinetic energy contours for PAT with various fixed-blade installation angles has been conducted across the operational range. As the flow rate increases and approaches the design point, the performance of the PAT with fixed blades at a 25-degree angle improves (Figure 9), indicating that 25° is optimal. Furthermore, the distribution of turbulent kinetic energy in this configuration is more uniform, thereby reducing energy losses.

Conclusion

The fixed blade angle is a critical parameter influencing the PAT performance. Its role in energy conversion, efficiency, flow stability, power recovery, and operational range underscores the importance of selecting an optimal configuration.

This study investigates the effect of fixed blade angle on PAT performance within the operational range of a micro-hydropower plant. Numerical analysis results indicate that a diffuser with 25-degree fixed blades represents the optimal configuration, as it enhances hydraulic performance and efficiency across a flow rate range of 135 to 240 m³/h compared to the main PAT. Comparison of turbulent kinetic energy contours between the optimal configuration and the original PAT reveals a significant reduction in turbulence intensity within the operational range, indicating lower losses. The most substantial efficiency improvement occurs at a flow rate of 200 m³/h, with an efficiency increase of 5.78%.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.



تأثیر زاویه نصب پره‌های ثابت در محدوده‌ی کارکرد با راندمان بالای پمپ معکوس سانتریفیوژ

محمدحسن شجاعی فرد* و سلمان صارمیان

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

*نویسنده مسئول (shojaeeefard@iust.ac.ir)

چکیده

با توجه به محدودیت منابع فسیلی و چالش‌های زیست‌محیطی نیروگاه‌های سنتی، توسعه‌ی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر در راستای تأمین نیازهای جهانی، توجه گسترده‌ای را به خود معطوف کرده است. استفاده از پمپ معکوس برای بازیابی انرژی در نیروگاه‌های برقایی کوچک احداث‌شده در شبکه‌ی توزیع و انتقال آب در سال‌های اخیر فراگیر شده است. در مطالعه‌ی حاضر، عملکرد یک پمپ معکوس سانتریفیوژ به‌صورت‌های عددی و تجربی در محدوده‌ی کاری بررسی شده است. پمپ معکوس تجهیز برای کنترل جریان ورودی به پروانه ندارد و کاهش قابل‌توجهی در راندمان در شرایط خارج از طراحی اتفاق می‌افتد. برای بهبود کارایی پمپ معکوس، یک دیفیوژر با پره طراحی و تأثیر زاویه‌ی پره‌های ثابت در عملکرد توربینی به‌صورت عددی تحلیل شده است. توزیع انرژی جنبشی آشفته‌ی در دیفیوژر، که پره‌های ثابت با زاویه‌ی ۲۵ درجه دارد، یکنواخت‌تر بوده و راندمان در نقطه‌ی عملکردی، ۶۳٪ افزایش یافته است.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۲

تاریخ اصلاحیه: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۷

واژگان کلیدی:

پمپ معکوس،
نیروگاه برقایی میکرو،
بازیابی انرژی،
زاویه‌ی پره‌های ثابت،
حل عددی.

۱. مقدمه

انرژی به‌عنوان عاملی بنیادین، نقش بسزایی در توسعه‌ی جوامع بشری ایفا می‌کند و پیشرفت مستمر عرصه‌های اجتماعی، اقتصادی، و فرهنگی را تسهیل می‌سازد. با تداوم کاهش منابع تجدیدپذیر فسیلی، از جمله: نفت و زغال‌سنگ و نیز تشدید معضلات زیست‌محیطی در سطح جهانی، رویکرد دولت‌ها در اقصی نقاط جهان به بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک، مانند انرژی‌های باد و خورشیدی معطوف شده است.^[۱، ۲] این شرایط منجر به افزایش توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر شده است.^[۳، ۴] در این میان، انرژی آبی به‌عنوان بزرگ‌ترین و پایدارترین منبع تولید برق تجدیدپذیر و مؤثر در کاهش آلودگی هوا شناخته می‌شود.^[۵، ۶]

با توجه به شرایط توپوگرافی کشور، اختلاف ارتفاع قابل‌توجهی بین مخازن ذخیره‌ی آب و محل مصرف وجود دارد.^[۷] شیرهای فشارشکن در شبکه‌های توزیع آب شهری به‌منظور حفظ فشار پایین‌دست در محدوده‌ی مشخصی استفاده می‌شوند و انرژی پتانسیل قابل‌توجهی در شرایط مذکور تلف می‌شود.^[۸] تولید انرژی الکتریکی از این طریق، موضوعی نسبتاً نوین در حوزه‌ی مدیریت شبکه‌های توزیع آب شهری است. رویکرد عملیاتی در این سیستم‌ها، مبتنی بر

بازیابی انرژی فشار اضافی،^[۹] از طریق تولید برق،^[۱۰] است. استفاده از نیروگاه‌های فشارشکن به‌منظور تولید برق از فشار مازاد مذکور، علاوه‌بر تأمین بخشی از نیاز شبکه، امکان تنظیم فشار در محدوده‌ی مجاز را فراهم می‌سازد.^[۱۱] در کشورهای در حال توسعه، استفاده از پمپ معکوس به‌عنوان یک فناوری مقرون‌به‌صرفه در مقایسه با توربین‌های سنتی مطرح است. پمپ‌های معکوس در مقایسه با توربین‌های سنتی، مزایایی از جمله: سهولت در تأمین، تعمیر، و نگهداری، و همچنین هزینه‌ی پایین‌تری دارند.^[۱۲-۱۴] به‌کارگیری پمپ معکوس در معادن، صنایع شیمیایی، پالایش نفت، مجموعه‌های پرورش ماهی، و سایر صنایع، امکان تبدیل فشار بالای سیال ورودی به انرژی مکانیکی یا الکتریکی را فراهم می‌آورد.^[۱۵، ۱۶]

پیشرفت چشمگیر فناوری و افزایش توانمندی‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در سال‌های اخیر، منجر به ارتقاء کارایی، و دقت دینامیک سیالات محاسباتی^۱ شده است. به گونه‌ای که امروزه، پژوهشگران، روش مذکور را به‌عنوان ابزاری کارآمد در کنار مطالعات تجربی استفاده می‌کنند.^[۱۸] در این راستا، پژوهش‌های متعددی به‌صورت‌های عددی و تجربی با هدف بهبود عملکرد پمپ‌های معکوس^۲ انجام شده است، که در ادامه به آن‌ها پرداخته شده است.

² Pump as Turbine¹ Computational fluid dynamics

استناد به این مقاله:

شجاعی فرد، محمدحسن و صارمیان، سلمان، ۱۴۰۴. تأثیر زاویه‌ی نصب پره‌های ثابت در محدوده‌ی کارکرد با راندمان بالای پمپ معکوس سانتریفیوژ. مهندسی مکانیک شریف، ۴۱(۲)، صص. ۴۹-۶۱. <https://doi.org/10.24200/j40.2025.66460.1735>

داشتند. یو^۸ و همکاران (۲۰۲۳)^[۲۵] در بررسی تأثیر افزودن پره‌های جداکننده در عملکرد پمپ معکوس با پره‌های فوروارد دریافته‌اند که افزودن پره‌های جداکننده می‌تواند محدوده‌ی کارکرد با راندمان بالا را افزایش و تلفات انرژی در پروانه و لوله‌های خروجی را کاهش دهد. پره‌های جداکننده باعث بهبود الگوی جریان داخلی و کاهش جدایش جریان و جریان‌های ثانویه می‌شوند. وانگ و همکاران (۲۰۲۳)^[۲۶] در یک مطالعه‌ی تحلیلی و عددی روی تأثیر هندسه‌ی پره‌ی راهنما در منحنی هد-دبی در پمپ‌های معکوس چندمرحله‌ای نشان داده‌اند که بزرگ کردن مساحت گلوگاه بیشترین، و پس از آن، زاویه‌ی خروجی، تعداد تیغه‌ها، و قطر دایره‌ی پایه به ترتیب بیشترین تأثیر را داشته‌اند. بهینه‌سازی مناسب مساحت گلوگاه، همچنین نقطه‌ی بهترین بازدهی را به میزان ۱٪/۶۵ بهبود بخشیده و آن را به سمت دبی‌های بالاتر منتقل کرده است، در حالی که سایر اصلاحات، نقطه‌ی بهترین بازدهی را کمی کاهش داده‌اند. کویین^۹ و همکاران (۲۰۱۶)^[۲۷] به صورت‌های تجربی و عددی، تأثیر استفاده از یک سیستم پره‌های راهنمای قابل تنظیم را برای کنترل جریان ورودی یک پمپ محوری بررسی کرده‌اند. مثلث سرعت مناسب در ورودی پروانه به کمک گام پره‌های راهنمای متغیر فراهم شده و بهبود قابل ملاحظه‌ی راندمان پمپ معکوس جریان محوری تحت شرایط بارگذاری جزئی مشاهده شده است. نتایج نشان داده است که دامنه‌ی عملکرد پمپ با راندمان بالا در پیکربندی ذکر شده در مقایسه با واحدهای پمپ معکوس سنتی گسترده‌تر بوده و هزینه‌ی اولیه و دوره‌ی بازپرداخت کمتری نسبت به توربین‌های فرانسس در مقیاس کوچک داشته است. لذا، سیستم اخیر به عنوان راهکاری مقرون به صرفه برای تولید انرژی در مناطق روستایی و دورافتاده پیشنهاد شده است. شی^{۱۰} و همکاران (۲۰۱۸)^[۲۸] در بررسی تأثیر تعداد پره‌های ثابت در عملکرد پمپ معکوس دریافته‌اند که با افزایش تعداد پره‌های ثابت، توزیع انرژی جنبشی آشفته‌ی یکنواخت‌تر و توزیع نیروهای شعاعی متقارن‌تر می‌شود. هنگامی که تعداد پره‌ها ۹ باشد، توزیع انرژی جنبشی بهینه و نیروهای شعاعی به میزان کمینه بوده و پایداری عملکرد توربین افزایش و تلفات توان کاهش یافته است. یان^{۱۱} و همکاران (۲۰۲۴)^[۲۹] به صورت عددی، ساختارهای گردابه‌ای صلب در یک پمپ معکوس تحت بازشدگی‌های مختلف پره‌ی راهنما را با هدف ارزیابی چگونگی تأثیر ساختارهای گردابه‌ای در پایداری و بازده توربینی بررسی کرده و دریافته‌اند که در بازشدگی‌های کوچک پره‌ی راهنما (۱۲ میلی‌متر)، انسداد جریان باعث ایجاد ساختارهای گردابه‌ای پیچیده در مناطق پره‌ی راهنما و رانر شده است. در بازشدگی بهینه‌ی پره‌ی راهنما (۲۴ میلی‌متر)، جریان پایدار شده و گردابه‌ها به میزان کمینه رسیده‌اند. در بازشدگی‌های بزرگ‌تر (۳۶ میلی‌متر)، آثار برشی قوی باعث جدایش جریان و گردابه‌های بزرگ مقیاس در گذرگاه‌های پروانه شده است.

از آنجا که پمپ‌ها برای عملکرد در حالت توربینی، بهینه نشده‌اند؛ سیال با زاویه‌ی مناسبی وارد پروانه نمی‌شود و در نتیجه، در ورودی پروانه، جدایش جریان رخ می‌دهد، که منجر به کاهش قابل توجه راندمان می‌شود. بسیاری از پژوهشگران کل هندسه‌ی پمپ را تغییر می‌دهند و پره‌های راهنما را اضافه می‌کنند. در مطالعه‌ی حاضر، هندسه‌ی حلزونی تغییر داده نشده و فقط پروانه

وانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۰)^[۱۹] در بررسی عملکرد سه پروانه با پره‌های فوروارد و مقایسه‌ی آن‌ها با پروانه‌های دارای پره‌های بکوارد در محدوده‌ی سرعت‌های مخصوص ۱۸ تا ۵۲ دریافته‌اند که اتلاف هیدرولیک در پروانه‌های با پره‌های فوروارد به دلیل یکنواخت‌تر بودن جریان داخلی و گرادیان فشار، به طور چشمگیری کاهش یافته است. علاوه بر این، دامنه‌ی عملکرد پمپ‌های معکوس با پروانه‌ی ویژه، در مقایسه با پروانه‌ی اصلی، در محدوده‌ی راندمان بالا گسترده‌تر بوده است، که سبب انعطاف‌پذیری بیشتری در عملکرد سیستم شده است. تچادا^۴ و همکاران (۲۰۲۴)^[۲۰] به صورت عددی تأثیر پخش زدن لبه‌ی ورودی پره‌ها در بهبود عملکرد پمپ معکوس را بررسی کردند و دریافته‌اند که اصلاح ورودی می‌تواند آثار جدایش جریان و ناسازگاری جریان را کاهش دهد و در شرایط خارج از طراحی، عملکرد پمپ معکوس را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. اتلاف‌های هیدرولیکی در زیردامنه‌های مختلف کاهش یافته‌اند، به جز در لوله‌ی خروجی که افزایش یافته‌اند، اما برآوردشان کاهش یافته است. شجاعی فرد و همکاران (۲۰۲۳)^[۲۱] به بررسی تأثیر اصلاح هندسه‌ی پروانه (ضخامت پره، عرض ورودی پره، و تعداد پره‌ها) در بهبود عملکرد پمپ معکوس پرداخته و پروانه‌ی ویژه را با اصلاح همزمان پارامترها طراحی کرده‌اند. تحلیل عملکرد با پروانه‌ی ویژه نشان داده است که شکل میدان‌های جریان یکنواخت‌تر و پایدارتر بوده و اصلاح هندسه سبب کاهش جدایش جریان در لبه‌ی جلویی و انتهایی پره شده است. اتلاف‌ها و شدت آشفته‌گی با افزایش انطباق سیال با پروفیل پره کاهش قابل توجهی داشته و پارامترهای هیدرولیکی در این شرایط کاری نسبت به پروانه‌ی اصلی بهبود یافته است. یوکسینگ^۵ و همکاران (۲۰۱۷)^[۲۲] به صورت عددی به بررسی تأثیر زاویه‌ی پیچش پره در بهبود پارامترهای هیدرولیکی و راندمان پمپ معکوس پرداخته و پنج پروانه با زوایای پیچش مختلف را بررسی کرده و دریافته‌اند که با افزایش زاویه‌ی پیچش پره در دبی‌های پایین و بالا، تلفات هیدرولیکی پروانه به ترتیب کاهش و افزایش یافته است. تجزیه و تحلیل جریان نشان می‌دهد که یک گردابه‌ی چرخان در مقاطع ورودی و خروجی پروانه وجود دارد، که ناشی از ناپایداری‌های جریان است و با افزایش زاویه‌ی پیچش پره، امکان حذف گردابه در خروجی پروانه فراهم می‌شود. یانگ^۶ و همکاران (۲۰۱۴)^[۲۳] با انجام شبیه‌سازی‌های عددی، تأثیر ضخامت پره در عملکرد پمپ‌های معکوس را مطالعه و سه پروانه با سرعت‌های مخصوص پایین، متوسط، و بالا را با ضخامت پره‌های ۲، ۴، و ۶ میلی‌متر بررسی کرده و دریافته‌اند در حالی که هد و توان با افزایش ضخامت پره افزایش یافته است، راندمان کاهش یافته است. تجزیه و تحلیل تلفات حاکی از آن بوده است که با افزایش ضخامت پره، تلفات هیدرولیکی در پروانه و کل تلفات هیدرولیکی افزایش یافته است. اتلاف هیدرولیکی در حلزونی پمپ معکوس با سرعت مخصوص پایین، افزایش و با سرعت‌های مخصوص متوسط و بالا، کاهش یافته است. همچنین تغییر تلفات هیدرولیک در لوله‌ی خروجی ناچیز بوده است. سن-چان^۷ و همکاران (۲۰۱۹)^[۲۴] تأثیر اصلاح هندسه در عملکرد پمپ را به صورت عددی بررسی کرده و هندسه‌ی بهینه‌ی پروانه با پارامترسازی صفحه‌ی نصف‌النهار را با استفاده از شبکه‌ی عصبی بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک به دست آورده‌اند. نتایج نشان داده است که پمپ معکوس بهینه‌سازی شده در نقطه‌ی عملکردی افزایش راندمان ۲/۲۸ درصدی

⁸ Yu⁹ Qian¹⁰ Shi¹¹ Yan³ Wang⁴ Tchada⁵ Yuxing⁶ Yang⁷ Sen-chun

معادله‌های سه‌بعدی ناویر-استوکس استفاده شده‌اند. با وجود این، حل مستقیم معادله‌های مذکور با استفاده از سیستم‌های محاسباتی موجود، به دلیل محدودیت منابع سخت‌افزاری و پیچیدگی محاسبات، مستلزم صرف زمان و هزینه قابل توجهی است. از این رو، به منظور کاهش پیچیدگی محاسبات و تسهیل فرآیند حل، از روش تجزیه‌ی رینولدز^{۱۵} استفاده شده است؛ که در آن، هر پارامتر سیال (مانند سرعت و فشار) به دو بخش میانگین و نوسانی تفکیک و معادله‌های پیوستگی و مومنوم برای جریان تراکم‌ناپذیر به صورت رابطه‌های ۱ و ۲ بازنویسی شده‌اند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho_i \overline{u'_i u'_j} \right) - S_{ui} \quad (2)$$

معادله‌های متوسط‌گیری شده، معادله‌های ناویر-استوکس^{۱۵} RANS نامیده می‌شوند و مبنای بسیاری از شبیه‌سازی‌های عددی را تشکیل می‌دهند. آن‌ها، با معرفی تنش‌های رینولدز به عنوان جملات مجهول، نیاز به مدل‌سازی آشفتگی را ایجاد می‌کنند. در مطالعه‌ی حاضر، برای بستن دستگاه معادله‌ها با در نظر گرفتن ویسکوزیته‌ی آشفتگی برای مدل کردن تنش رینولدز از مدل SST k- ω استفاده شده است (رابطه‌های ۳ و ۴).^[۳۰]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - 0.9 \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \sigma_k \mu_T \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \left[\frac{5}{9} F_1 + 0.44(1 - F_1) \right] \frac{1}{\nu_t} \tilde{P}_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \sigma_\omega \mu_T \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \quad (4)$$

$$2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

ویسکوزیته‌ی آشفتگی مطابق رابطه‌ی ۵ محاسبه می‌شود:

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} F_2)} \quad (5)$$

در سال‌های اخیر، مطالعه‌های متعددی نشان داده‌اند که مدل انتقال تنش برشی^{۱۶}، دقت و قابلیت اطمینان بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های پیچیده در توربوماشین‌ها دارد؛^[۳۷-۳۱] و به عنوان ابزاری کارآمد در شبیه‌سازی‌های عددی مسائل مرتبط با توربوماشین‌ها در نرم‌افزارها عددی شناخته می‌شود و امکان تخمین و تحلیل مناسب میدان‌های جریان، هم در نواحی داخلی لایه‌ی مرزی و هم در جریان آزاد را فراهم می‌سازد.^[۳۸]

در شبیه‌سازی عددی، هندسه‌ی پمپ معکوس به دو بخش پروانه‌ی متحرک و حلزونی ثابت تقسیم شده است. در تحلیل حاضر، از روش فصل مشترک روتور

تراش داده شده و یک دیفیوزر با پره در فضای بین پروانه و حلزونی طراحی شده است. زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر، اهمیت بالایی دارد؛ زیرا تأثیر مستقیمی در نحوه‌ی توزیع میدان‌های جریان و میزان تبدیل انرژی دارد. با انجام شبیه‌سازی‌های عددی و تحلیل میدان‌های جریان، زاویه‌ی بهینه‌ی پره‌های دیفیوزر به منظور دستیابی به محدوده‌ی کارکرد با راندمان بالای گسترده‌تر تعیین شده است.

۲. شبیه‌سازی عددی

۲.۱. مدل هندسی

یک پمپ گریز از مرکز تک‌مکشه، موضوع مطالعه‌ی عددی حاضر است. مشخصات هیدرولیک پمپ انتخاب شده در نقطه‌ی عملکردی به این شرح هستند:

دبی (Q=120m³/h)، هد (H=19.2m)، سرعت چرخش (n=1450rpm) و سرعت مخصوص (n_s=28.86). پارامترهای اصلی طراحی پروانه در جدول ۱ فهرست شده‌اند. اجزاء اصلی، شامل: پروانه، دیفیوزر، و حلزونی بوده‌اند. کل دامنه‌ی سیال سه‌بعدی پمپ با استفاده از نرم‌افزار سی‌اف‌توربو^{۱۲} طراحی و در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲.۲. تنظیم‌های استفاده شده در شبیه‌سازی‌های عددی

به منظور تحلیل رفتار سیال و عملکرد هیدرولیکی پمپ معکوس، شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار تجاری آنسیس سی‌اف‌ایکس^{۱۳} انجام شده است. به منظور تحلیل عددی جریان تراکم‌ناپذیر در توربوماشین‌ها،

جدول ۱. مشخصات هندسی پروانه.

Table 1. Geometrical characteristics of the impeller.

Parameter	Value
Number of Blades	6
Suction Diameter (mm)	120
Impeller Diameter (mm)	260
Outlet Width (mm)	19
Blade Angle β_1 (°)	27
Blade Angle β_2 (°)	20

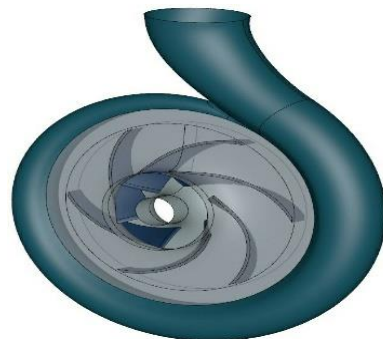


Figure 1. Geometrical model of the pump designed in CFTurbo software.

شکل ۱. مدل هندسی پمپ طراحی شده در نرم‌افزار سی‌اف‌توربو.

¹⁵ Reynolds Averaged Navier Stokes

¹⁶ Shear Stress Transport

¹² CFTurbo

¹³ ANSYS CFX

¹⁴ Reynolds decomposition

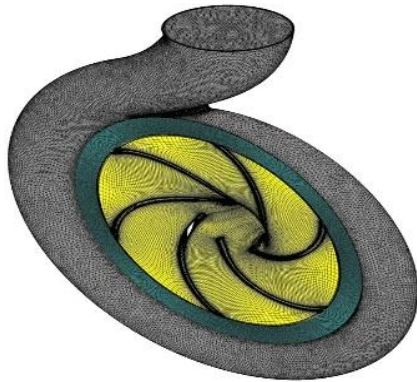


Figure 2. Mesh generation for the impeller, diffuser, and volute.

شکل ۲. تولید مش برای پروانه، دیفیوزر، و حلزونی.

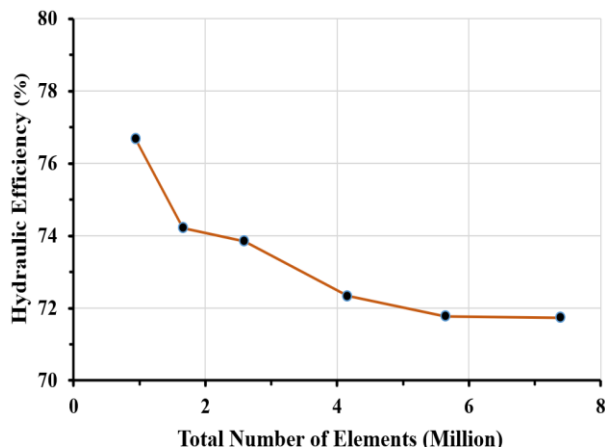


Figure 3. Grid independence verification.

شکل ۳. تأیید استقلال حل از شبکه.

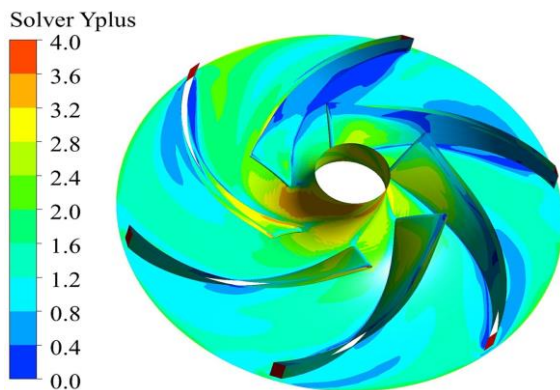


Figure 4. y^+ contour on impeller walls.

شکل ۴. کانتر y^+ روی دیواره‌های پروانه.

توزیع آب از جنس چدن با قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر بوده‌اند. پمپ معکوس از طریق نازل‌های کاهنده/افزاینده قطر در ورودی (از ۲۰۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر) و خروجی (از ۱۵۰ میلی‌متر به ۲۰۰ میلی‌متر) به خطوط لوله‌ی شبکه‌ی توزیع متصل شده‌اند. فشار ورودی و خروجی توسط دو فشارسنج، که قبل و بعد از پمپ معکوس نصب شده‌اند، اندازه‌گیری شده‌اند. دو شیر برقی، که به یک سیستم کنترل منطقی قابل‌برنامهریزی (PLC)^{۲۰} متصل بودند،

منجمد^{۱۷} به‌منظور ارتباط بین بخش‌های ثابت و متحرک هندسه استفاده شده است. شرایط مرزی به‌صورت دبی برای ورودی و فشار استاتیکی برای خروجی سیستم تنظیم شده‌اند. متوسط شدت آشفته‌گی در ورودی جریان به میزان ۵٪ در نظر گرفته شده است. سطح دیواره نیز به‌عنوان دیواره‌ی صاف بدون لغزش تعریف شده است. معیار همگرایی برای حل عددی، بر روی رسیدن باقیمانده‌ی معادله‌های پیوستگی و مومنوم به مقدار 10^{-6} تنظیم شده است.

۳.۲. تولید مش و مطالعه‌ی استقلال حل از شبکه

کیفیت شبکه‌ی محاسباتی، نقش تعیین‌کننده‌ای در حصول همگرایی و اعتبار نتایج عددی ایفا می‌کند. در شکل ۲، نمایی از شبکه‌ی محاسباتی استفاده‌شده در شبیه‌سازی‌های عددی مشاهده می‌شود. شبکه‌ی سازمان‌یافته‌ی پروانه با استفاده از نرم‌افزار تولید شبکه‌ی توربوگريد تولید شده است. به‌منظور حصول اطمینان از درستی و اعتبار نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی، علاوه بر رعایت الزام‌های کیفی مش‌بندی، توجه به پارامتر y^+ و انطباق آن با الزام‌های مدل آشفته‌گی استفاده‌شده، به‌منظور ثبت دقیق گرادیان‌های سرعت در نزدیکی دیواره‌ها، امری ضروری است؛ به‌عبارت دیگر، تراکم مناسب المان‌ها در لایه‌ی مرزی باید به گونه‌ای باشد که میزان تعیین‌شده‌ی y^+ برای مدل توربولانسی لحاظ شود.

برای بخش حلزونی، از یک شبکه‌ی بدون سازمان متشکل از المان‌های چهاروجهی و منشوری با ۱۵ لایه‌ی مرزی و نرخ رشد ۱/۴ استفاده شده است. کیفیت مش حلزونی با استفاده از دو معیار اصلی، تعامد^{۱۸} و کشیدگی المان‌ها^{۱۹} ارزیابی شده است.

به‌منظور بررسی تأثیر تعداد المان‌ها در نتایج عددی، مطالعه‌ی استقلال شبکه برای پارامتر راندمان پمپ معکوس انجام شده است. در این راستا، تعداد المان‌ها در ۶ مرحله با افزایش تراکم مش در محدوده‌ی ۰/۹۵ تا ۷/۴ میلیون المان تغییر داده شده است، که در شکل ۳ مشاهده می‌شود. هنگامی که تعداد المان‌ها به ۵/۶۱ میلیون رسیده است، راندمان پمپ معکوس به‌تدریج به مقدار ثابتی میل کرده و بر این اساس، تعداد کل المان‌ها در کل دامنه‌ی محاسباتی همان مقدار ۵/۶۱ میلیون المان در نظر گرفته شده است، که ۳/۲۱ میلیون المان مربوط به پروانه، ۰/۸۳ میلیون المان مربوط به دیفیوزر، و ۱/۵۶ میلیون المان مربوط به حلزونی بوده است. انتخاب تعداد المان مذکور، ضمن تضمین دقت قابل‌قبول نتایج، از صرفه‌ی اقتصادی محاسبات نیز اطمینان حاصل می‌کند.

برای اطمینان از درستی شبکه‌بندی به کاررفته در شبیه‌سازی عددی، با توجه به استفاده از مدل آشفته‌گی SST، مقادیر y^+ در نواحی نزدیک به دیواره‌های پروانه مطابق شکل ۴ ارزیابی شده‌اند. نمودارهای کانتر y^+ نشان می‌دهند که کیفیت شبکه‌بندی در نواحی نزدیک به دیواره قابل‌قبول بوده است.

۳. بررسی تجربی و اعتبارسنجی حل عددی

به‌منظور اعتبارسنجی، شبیه‌سازی‌های عددی پمپ معکوس گریز از مرکز با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. در شکل ۵، شماتیک و آرایش نیروگاه پمپ معکوس در خطوط لوله‌ی شبکه‌ی توزیع آب شهری مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، پمپ معکوس در یک مسیر جانبی که به موازات خط لوله‌ی اصلی ایجاد شده است، نصب و جای‌گذاری شده است. لوله‌های استفاده‌شده در شبکه‌ی

^{۱۹} Skewness

^{۲۰} Programmable Logic Controller

^{۱۷} Frozen rotor

^{۱۸} Orthogonal quality

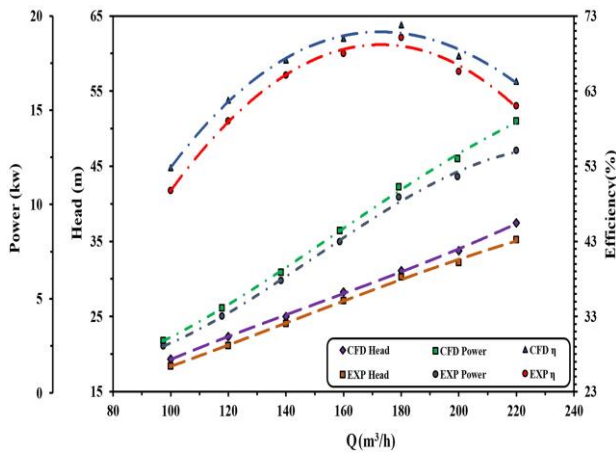


Figure 6. Comparison of experimental and numerical performance curves of the pump as turbine.

شکل ۶. مقایسه‌ی نمودارهای عملکردی تجربی و عددی پمپ معکوس.

درصد بوده است؛ اگرچه خطاهای نسبی هد و راندمان تحت شرایط عملیاتی مختلف افزایش یافته است، که می‌تواند ناشی از قطع معادله‌های دیفرانسیل و مدل آشفتگی باشد. به‌کارگیری شبکه‌ی محاسباتی ایجادشده و تنظیمات لحاظ‌شده برای حل عددی در مطالعه‌ی حاضر با توجه به اعتبارسنجی انجام‌شده در بخش حاضر منطقی به‌نظر می‌رسد.

۴. نتایج و تحلیل

بررسی راندمان پمپ معکوس نشان می‌دهد که در شرایط کار خارج از طراحی، عملکرد پمپ معکوس کاهش قابل‌توجهی دارد. در مطالعه‌ی حاضر به‌منظور بهبود عملکرد پمپ در کارکرد معکوس، یک دیفیوزر با پره در فضای بین پروانه تراش‌خورده و حلزونی طراحی شده است. طراحی و مش‌بندی دیفیوزرهای با پره به ترتیب در نرم‌افزارهای دیزاین مدر و توربوگرید انجام شده و سپس تحلیل عددی بر روی آن‌ها صورت گرفته است. در بخش کنونی، اثر زاویه‌ی نصب پره‌های ثابت دیفیوزر به‌عنوان یکی از پارامترهای هندسی اثرگذار در بهبود عملکرد، با مقایسه‌ی نمودارهای عملکردی بررسی شده است. همچنین، مقایسه‌ای بین تلفات ناشی از اصطکاک و آشفتگی انجام شده است.

۱.۴. تأثیر زاویه‌ی پره‌های ثابت دیفیوزر در عملکرد پمپ معکوس

زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر نقش مهمی در حفظ پایداری میدان‌های جریان در داخل پمپ معکوس ایفا می‌کند. یک دیفیوزر با زوایای مناسب پره، الگوی جریان یکنواخت‌تر و پایداری را فراهم می‌سازد و نوسان‌های فشار را کاهش می‌دهد و عملکرد کلی را بهبود می‌بخشد. البته زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر نامناسب می‌تواند منجر به آشفتگی بیشتر، جدایش، و جریان برگشتی شود، که عملکرد پمپ معکوس را به‌طور منفی تحت تأثیر قرار دهد. مطابق جدول ۲، دیفیوزر همچنین به‌طور قابل‌توجهی به کاهش هد موردنیاز پمپ معکوس کمک می‌کند. بهینه‌سازی زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر برای بهینه‌سازی توان تولیدی و کاهش هد بسیار مهم است، که مستقیماً در بهبود راندمان اثرگذار است.

زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر بهینه برای هر پمپ متفاوت است و تحت تأثیر پارامترهای هندسی پمپ، از جمله: قطر پروانه، زوایای پره، و تعداد پره‌هاست. زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر باید به‌گونه‌ای طراحی شود که شکل سیال خروجی

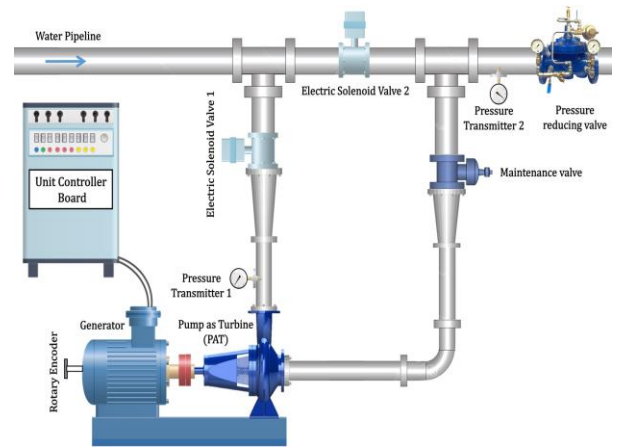


Figure 5. Schematic of a hydropower plant.

شکل ۵. شماتیک نیروگاه برقابی.

وظیفه‌ی باز و بسته کردن مسیر جریان را در خط‌های اصلی و جانبی بر عهده داشته‌اند. در محدوده‌ی مشخصی از دی‌ها، شیر برقی مرتبط باز و پمپ معکوس وارد مدار شده است. در سایر مواقع، شیر برقی دیگر باز و مسیر اصلی جریان برقرار و پمپ معکوس از مدار خارج شده است. یک درایو الکتریکی بسامد متغیر (VFD) با توجه به سرعت متغیر چرخش، کنترل توربین را از طریق تنظیم گشتاور اعمالی به ژنراتور القایی^{۲۲} انجام داده است. توان الکتریکی تولیدی توسط ژنراتور القایی، به کمک یک مبدل بسامد (اینورتر) پشت‌به‌پشت، جریان بسامد متغیر را به یک جریان بسامد ثابت ۵۰ هرتز تبدیل و سپس به شبکه‌ی برق شهری تزریق شده است. به‌منظور تنظیم فشار موردنیاز شبکه‌ی توزیع پس از عبور جریان از توربین، یک شیر فشارشکن^{۲۳} نیز در خروجی نصب شده است.

به‌منظور ارزیابی عدم قطعیت^{۲۴}، نتایج آزمایشگاهی پارامترها در شرایط کاری یکسان، هر پارامتر ۸ بار به‌طور مکرر اندازه‌گیری و داده‌های حاصل با استفاده از روش موفا^{۲۵} (۱۹۸۲)،^[۳۹] تحلیل شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که میزان عدم قطعیت برای پارامترهای هد، دی، توان، و راندمان به ترتیب برابر با $\pm 1/1$ ، $\pm 5/0$ ، $\pm 3/1$ و $\pm 4/1$ درصد بوده است.

برای بررسی عددی عملکرد پمپ معکوس در محدوده‌ی کاری از نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس استفاده شده است. مقادیر هد، توان، و راندمان به روش عددی، با استفاده از روابط ۶ الی ۸ محاسبه شده‌اند:

$$H = \frac{P_{T(in)} - P_{T(out)}}{\gamma} \quad (6)$$

$$P = T_{All\ Blade} \times \omega \quad (7)$$

$$\eta = \frac{P}{\rho g Q H} \times 100 \quad (8)$$

در شکل ۶، مقایسه‌ای از مقادیر هد موردنیاز، توان تولیدی، و راندمان حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی و تجربی مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، منحنی‌های هد، توان، و راندمان به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های عددی تقریباً با منحنی‌های به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها روند تغییرات مشابهی را دارند. تحت شرایط طراحی، خطای نسبی برای هد، توان و راندمان به ترتیب برابر با ۲/۵۷، ۴/۸۵، و ۲/۳۴

²⁴ Uncertainty

²⁵ Moffat

²¹ Variable Frequency Drive

²² Induction generator

²³ Pressure reducing valve

جدول ۲. مقایسه‌ی هد موردنیاز و توان تولیدی پمپ معکوس با دیفیوزرهای متفاوت.

Table 2. Comparison of required head and power output of PAT with various diffusers.

Q (m ³ /h)	Head (m)				Power (kW)			
	without blades	15-degree blades	25-degree blades	35-degree blades	without blades	15-degree blades	25-degree blades	35-degree blades
100	19.29	19.96	20.84	21.45	2.76	3.09	2.91	2.87
120	22.31	22.62	23.61	23.97	4.48	4.67	4.64	4.59
140	24.95	25.38	25.75	26.63	6.36	6.32	6.49	6.54
160	28.24	29.89	28.34	29.74	8.58	8.64	8.78	8.93
180	31.09	32.43	30.43	32.08	10.89	10.53	11.05	11.21
200	33.75	34.55	32.25	33.12	12.47	12.02	12.93	12.83
220	37.38	37.94	35.02	35.65	14.54	13.26	14.67	14.98
240	41.04	42.35	38.69	37.72	15.48	14.39	15.95	16.06

جدول ۳. سرعت مخصوص با دیفیوزرهای مختلف.

Table 3. Specific speed with various diffusers.

PAT with different diffuser	without blades	15-degree blades	25-degree blades	35-degree blades
n _{st}	26.49	25.67	26.92	25.88

مطابق نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که سرعت مخصوص نسبت به حالت کارکرد پمپ کاهش یافته و استفاده از دیفیوزر با پره‌های ثابت ۲۵ درجه، باعث افزایش سرعت مخصوص شده است.

به‌منظور بررسی تأثیر زاویه‌ی پره‌های ثابت دیفیوزر در عملکرد پمپ معکوس، تحلیل میدان‌های جریان و تلفات ضروری است. در مطالعه‌ی حاضر، از معیار انرژی جنبشی آشفستگی برای قضاوت در مورد شرایط جریان در پمپ معکوس استفاده شده است؛ هر چه شدت آشفستگی بیشتر باشد، حالت جریان ناپایدارتر و تلفات جریان بیشتر خواهد بود. معادله‌های انرژی جنبشی آشفستگی و شدت آشفستگی به صورت رابطه‌های ۱۰ و ۱۱ تعریف می‌شوند:

$$k = \frac{3}{2}(ul)^2 \quad (10)$$

$$I = 0.16(Re)^{-\frac{1}{8}} \quad (11)$$

که در آن‌ها، u سرعت متوسط جریان، I شدت آشفستگی، و Re عدد رینولدز هستند. معادله‌های مذکور، امکان محاسبه‌ی کمی شدت آشفستگی را با توجه به مشخصات جریان فراهم می‌آورند.

در شکل‌های ۸ الی ۱۰، مقایسه‌ی بین کانتورهای انرژی جنبشی آشفستگی پمپ معکوس با دیفیوزرهای مختلف در محدوده‌ی کاری مشاهده می‌شود. تحلیل کانتورهای مذکور نشان می‌دهد که زاویه‌ی پره‌های ثابت دیفیوزر، تأثیر قابل‌توجهی در توزیع و مقدار انرژی جنبشی آشفستگی دارد. بررسی شکل‌ها حاکی از آن است که توزیع انرژی جنبشی آشفستگی در محفظه‌ی حلزونی، یکنواختی بیشتری دارد. این در حالی است که تمرکز قابل‌توجهی از انرژی جنبشی آشفستگی در نواحی پروانه و زبانه‌ی حلزونی وجود دارد. علاوه‌بر این، ارزیابی عملکرد هیدرودینامیکی پمپ معکوس در محدوده‌ی کاری نشان می‌دهد که رابطه‌ی مستقیمی بین نرخ دبی و میزان انرژی جنبشی آشفستگی

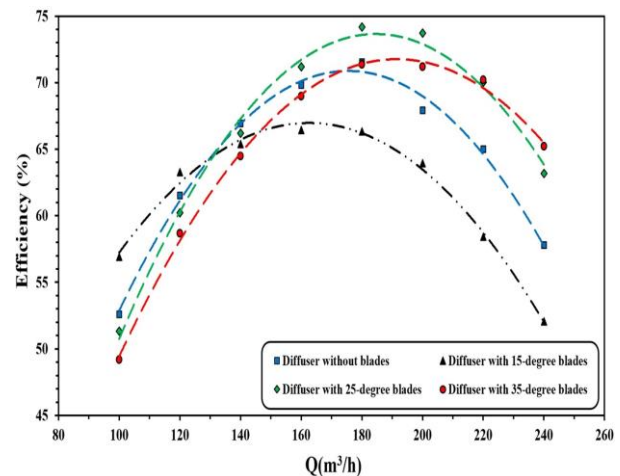


Figure 7. Comparison of efficiency of the pump as turbine with different diffusers.

شکل ۷. مقایسه‌ی راندمان پمپ معکوس با دیفیوزرهای متفاوت.

انطباق مناسبی با ورودی پروانه داشته باشد، تا انتقال انرژی به بهترین شکل انجام شود.

در دیفیوزر با پره‌های ثابت در پروژه‌هایی که تغییرات قابل‌توجهی در دبی وجود دارد، زاویه‌ی بهینه در کل محدوده‌ی کاری کارآمد نیست، حتی در برخی دبی‌ها ممکن است باعث کاهش راندمان شود. به همین دلیل باید عملکرد در زوایای مختلف در محدوده‌ی عملکرد نیروگاه بررسی شود. در نهایت، زوایای که باعث بهبود عملکرد در محدوده‌ی گسترده‌تری می‌شود، به‌عنوان حالت بهینه برای پمپ معکوس مذکور انتخاب شود. در تجزیه‌وتحلیل انجام شده، عملکرد پمپ معکوس در زوایای ۱۵ تا ۳۵ درجه به‌صورت عددی بررسی شده است. در شکل ۷، مقایسه‌ی بین راندمان در محدوده‌ی پمپ معکوس با دیفیوزرهای مختلف مشاهده می‌شود.

در برخی مطالعات، [۴۰ و ۴۱] مشخص شده است که پمپ معکوس با سرعت مخصوص بالاتر، عملکرد بهتری دارد و تلفات کمتری اتفاق می‌افتد. سرعت مخصوص پمپ معکوس مطابق رابطه‌ی ۹ محاسبه شده است:

$$n_{st} = n_t \frac{Q_t^{0.5}}{H_t^{0.75}} \quad (9)$$

همچنین، مقایسه‌ای بین پمپ‌های معکوس با دیفیوزرهای مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.

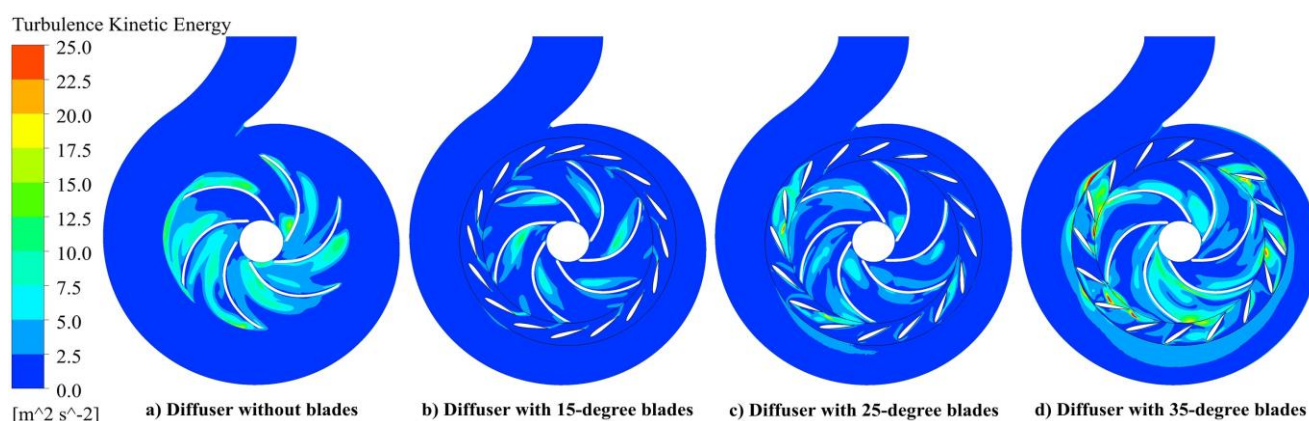


Figure 8. Comparison of turbulent kinetic energy contours at a flow rate of 140 m³/h.

شکل ۸. مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در دبی ۱۴۰ مترمکعب بر ساعت.

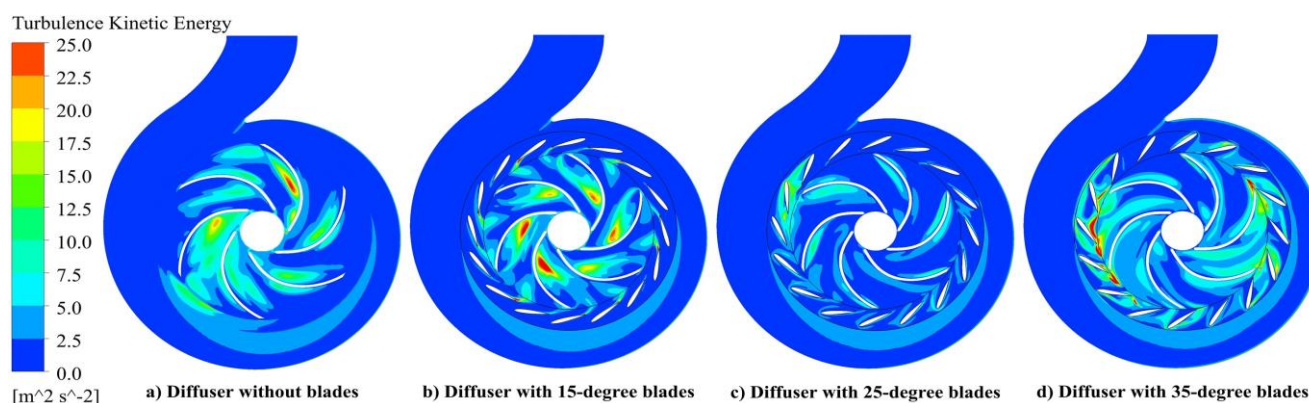


Figure 9. Comparison of turbulent kinetic energy contours at a flow rate of 180 m³/h.

شکل ۹. مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در دبی ۱۸۰ مترمکعب بر ساعت.

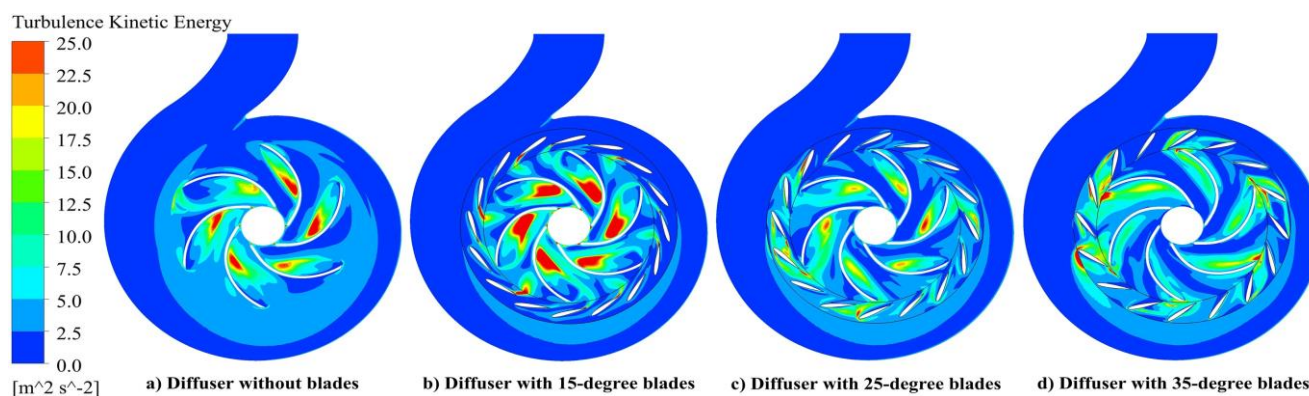


Figure 10. Comparison of turbulent kinetic energy contours at a flow rate of 220 m³/h.

شکل ۱۰. مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در دبی ۲۲۰ مترمکعب بر ساعت.

پارامترهای دیگری، نظیر: هد موردنیاز، توان تولیدی، و راندمان پمپ معکوس در نظر گرفته شوند. تحلیل محدوده‌ی کاری پمپ معکوس با دیفیوزرهای مختلف نشان می‌دهد که پره‌های ثابت با زاویه‌ی ۲۵ درجه، پایداری بیشتری در میدان‌های جریان ایجاد می‌کنند و توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در این حالت یکنواخت‌تر است و این یکنواختی نه فقط به کاهش تلفات انرژی کمک می‌کند، بلکه به بهبود راندمان کلی سیستم نیز منجر می‌شود.

۲.۴. تحلیل تلفات انرژی

با صرف نظر از آثار اتلاف نشتی و اتلاف انتقال حرارت، اتلاف هیدرولیکی در پمپ معکوس را می‌توان متشکل از اتلاف اضمحلال آشفتگی و اتلاف اصطکاک دیواره مطابق رابطه‌ی ۱۲ در نظر گرفت.

وجود دارد. به عبارت دقیق‌تر، با افزایش دبی جریان، انرژی جنبشی آشفتگی نیز به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در شکل ۸ مشاهده می‌شود که پره‌های دیفیوزر با زاویه‌ی ۱۵ درجه، کمترین سطح انرژی جنبشی آشفتگی را در میان پمپ‌های معکوس بررسی شده در دبی‌های پایین دارند. با افزایش دبی و نزدیک شدن به نقطه‌ی طراحی، عملکرد پمپ معکوس با پره‌های ثابت دارای زاویه‌ی ۲۵ درجه بهبود یافته است (شکل ۹)، که نشانگر بهینه‌بودن زاویه‌ی ۲۵ درجه در شرایط عملیاتی نزدیک به نقطه‌ی طراحی است. در شرایط کاری با دبی‌های بالا، زوایای ۲۵ و ۳۵ درجه، عملکرد مطلوبی از خود نشان داده‌اند (شکل ۱۰). به‌منظور انتخاب زاویه‌ی بهینه‌ی پره‌های دیفیوزر علاوه بر تحلیل انرژی جنبشی آشفتگی، باید

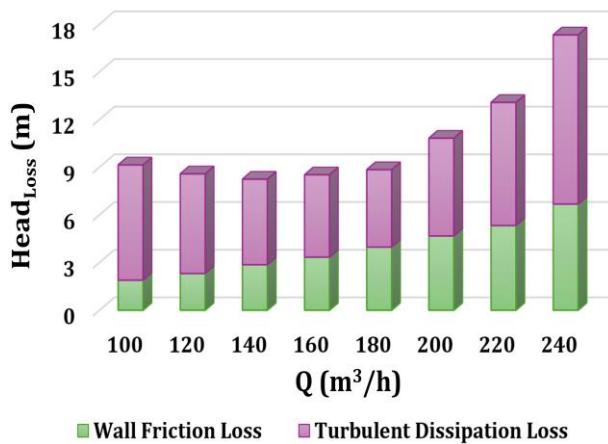


Figure 11. Total losses of the main pump as turbine at various flow rates.

شکل ۱۱. تلفات کل پمپ معکوس اصلی در دبی‌های مختلف.

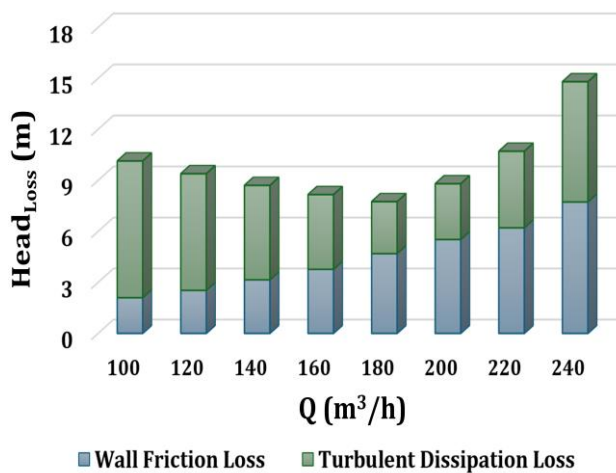


Figure 12. Total losses of the pump as turbine with optimized diffuser at various flow rates.

شکل ۱۲. تلفات کل پمپ معکوس با دیفیوزر بهینه در دبی‌های مختلف.

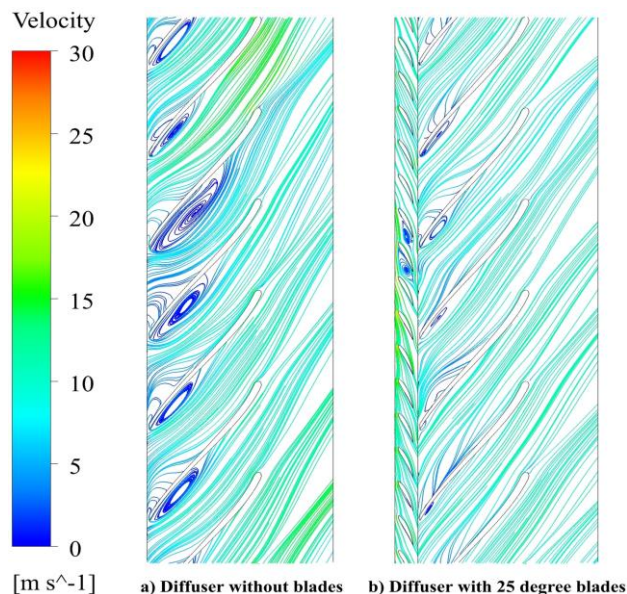


Figure 13. Comparison of streamlines between the pump as turbine with the main and optimized diffuser.

شکل ۱۳. مقایسه خطوط جریان بین پمپ معکوس با دیفیوزر اصلی با بهینه.

$$Loss = Loss_{Fri} + Loss_{Tur} \quad (12)$$

که در آن، $Loss_{Tur}$ اتلاف اضمحلال آشفتگی (وات) و $Loss_{Fri}$ اتلاف اصطکاک دیواره (وات) هستند، که به ترتیب مطابق معادله‌های ۱۳ و ۱۴ به‌دست می‌آیند:^[۴۲]

$$Loss_{Tur} = \int_V \rho \varepsilon dV \quad (13)$$

$$Loss_{Fri} = \int_A \tau \cdot v dA \quad (14)$$

که در آن‌ها، ε نرخ اضمحلال آشفتگی (مترمربع بر ثانیه مکعب)، V حجم جسم کنترل (مترمکعب)، A مساحت سطح دامنه‌ی محاسباتی (مترمربع)، τ تنش برشی دیواره (پاسکال)، v سرعت سیال نزدیک دیواره (متر بر ثانیه)، و $\rho \varepsilon$ نرخ اتلاف اضمحلال آشفتگی (وات بر مترمکعب) هستند. هنگام استفاده از مدل آشفتگی SST برای شبیه‌سازی، معادله‌ی ۱۳ را می‌توان با معادله‌ی ۱۵ جایگزین کرد.

$$Loss_{Tur} = \int_V 0.09 \rho \omega dV \quad (15)$$

که در آن، ω بسامد آشفتگی (بر ثانیه) و k انرژی جنبشی آشفتگی (مترمربع بر ثانیه مربع) است؛ بنابراین، اتلاف هد (H_{loss}) را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۱۶ به‌دست آورد:

$$H_{Loss} = H_{Loss_{Fri}} + H_{Loss_{Tur}} = \frac{Loss}{mg} \quad (16)$$

که در آن، $H_{loss_{Tur}}$ اتلاف هد ناشی از اضمحلال آشفتگی (متر)، $H_{loss_{Fri}}$ اتلاف هد ناشی از اصطکاک دیواره (متر)، $\dot{m}$ نرخ جریان جرمی (کیلوگرم بر ثانیه)، و g شتاب گرانشی (متر بر مجذور ثانیه) هستند.

در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، توزیع تلفات کل در دبی‌های مختلف به ترتیب برای پمپ معکوس اصلی و با دیفیوزر بهینه مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن‌ها، تلفات اصطکاکی با افزایش دبی، روند صعودی داشته است؛ اما تلفات آشفتگی، روند نزولی تا نقطه‌ی عملکردی و بعد از آن روند صعودی داشته است. در پمپ معکوس با دیفیوزر با پره از یک طرف، پره‌های پروانه‌ی تراش خورده و تلفات اصطکاکی کاهش یافته و از طرف دیگر، با اضافه‌شدن پره‌های ثابت دیفیوزر افزایش یافته است. در مجموع تلفات اصطکاکی نسبت به پروانه‌ی اصلی افزایش یافته است. آشفتگی در پمپ معکوس با دیفیوزر بهینه در دبی‌های پایین‌تر از ۱۴۰ مترمکعب بر ساعت بیشتر شده است؛ که دلیل آن، کاهش میزان سرعت مطلق و زاویه‌ی ورود جریان به پروانه است، که باعث افزایش زاویه‌ی شوک و افزایش گردابه‌ها شده و تلفات آشفتگی نسبت به پمپ معکوس اصلی افزایش یافته است. با افزایش دبی در پمپ معکوس با دیفیوزر بهینه سیال در ورودی، پره دچار جدایش و گردابه‌های کمتری خواهد شد و تلفات کاهش قابل توجهی دارد. در شکل ۱۳، مقایسه‌ای بین خطوط جریان بین پمپ معکوس اصلی و با دیفیوزر بهینه انجام شده است جدایش با اضافه‌شدن پره‌های ثابت به پمپ معکوس در نقطه‌ی عملکردی به شدت کاهش یافته و راندمان بهبود قابل توجهی با توجه به کاهش تلفات داشته است.

۵. نتیجه‌گیری

زاویه‌ی پره‌های ثابت دیفیوزر، پارامتری اثرگذار در عملکرد پمپ معکوس است. نقش آن بر تبدیل انرژی، راندمان، پایداری جریان، بازیابی توان، و دامنه‌ی عملکرد، اهمیت طراحی، و انتخاب حالت بهینه را برجسته می‌کند. هندسه‌ی دیفیوزر و به‌خصوص زاویه‌ی پره‌های آن، اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا می‌تواند

"فهرست علائم"

علائم انگلیسی		علائم یونانی	
g	شتاب گرانش ($m.s^{-2}$)	ρ	چگالی (kg/m^3)
H	هد پمپ (m)	β_1	زاویه‌ی ورودی پره
I	شدت آشفتگی	β_2	زاویه‌ی خروجی پره
k	انرژی جنبشی آشفته (m^2/s^2)	τ	تنش برشی (Pa)
n_s	سرعت مخصوص	η	راندمان
P	فشار (Pa)	Ω	سرعت چرخش (rpm)
Q	دبی (m^3/h)	ω	سرعت زاویه‌ای چرخشی پروانه (rad/s)
T	گشتاور کل روی پروانه (N.m)	μ	ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال ($kg/m.s$)
		ν	ویسکوزیته‌ی سینماتیک سیال (m^2/s)

زیرنویس

i, j بردارهای یک‌ه‌ی مختصات دکارتی

اتلاف انرژی را کاهش دهد، جدایش جریان را محدود کند، و درنهایت، عملکرد کلی سیستم را بهبود بخشد.

در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر زاویه‌ی پره‌ی دیفیوزر در عملکرد پمپ معکوس در محدوده‌ی کارکرد نیروگاه برقایی بررسی شده است. نتایج تحلیل‌های عددی نشان داده‌اند که رفتار عملکردی پمپ معکوس به‌شدت وابسته به زاویه‌ی پره‌های دیفیوزر و دبی ورودی است. دیفیوزر با پره‌های ۱۵ درجه، عملکرد مناسبی را در محدوده‌ی دبی‌های پایین از خود نشان داده است، در حالی که زاویه‌ی ۳۰ درجه، برتری قابل‌توجهی در شرایط عملیاتی با دبی‌های بالا داشته است. با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر، بهینه‌سازی عملکرد پمپ معکوس در کل محدوده‌ی کارکرد نیروگاه برقایی بوده است، دیفیوزر با پره‌های ۲۵ درجه، حالت بهینه است؛ چون باعث بهبود عملکرد هیدرولیکی و راندمان در محدوده‌ی دبی ۱۳۵ تا ۲۴۰ مترمکعب بر ساعت نسبت به پروانه‌ی اصلی شده است. مقایسه‌ی کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی حالت بهینه با پمپ معکوس اصلی، کاهش قابل‌توجهی در شدت آشفتگی را در محدوده‌ی کاری نشان می‌دهد، که حاکی از کاهش تلفات است. بیشترین بهبود راندمان در دبی ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت با افزایش راندمان ۵/۷۸٪ رخ داده است.

References – منابع

- Ding, Y. Tan, Q. Shan, Z. Han, J. and Zhang, Y., 2023. A two-stage dispatching optimization strategy for hybrid renewable energy system with low-carbon and sustainability in ancillary service market. *Renewable Energy*, 207, pp. 647–659. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.050>
- Telikani, A. Rossi, M. Khajehali, N. and Renzi, M., 2023. Pumps-as-Turbines (PaTs) performance prediction improvement using evolutionary artificial neural networks. *Applied Energy*, 330, pp. 120316. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120316>
- Destek, M. A. and Sinha, A., 2020. Renewable, non-renewable energy consumption, economic growth, trade openness and ecological footprint: evidence from Organisation for Economic Co-operation and Development countries. *Journal of Cleaner Production*, 242, pp. 118537. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118537>
- Hanif, I. Aziz, B. and Chaudhry, I. S., 2019. Carbon emissions across the spectrum of renewable and nonrenewable energy use in developing economies of Asia. *Renewable Energy*, 143, pp. 586–595. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.032>
- Ma, J. and Poursoleiman, R., 2022. Optimization of the home energy system in presence of price fluctuation and intermittent renewable energy sources in grid-connected and islanded modes. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54, pp. 102875. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102875>
- Williamson, S. J. Stark, B. H. and Booker, J. D., 2014. Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. *Renewable Energy*, 61, pp. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.020>
- Sareman, S. and Shojaeefard, M. H., 2024. Numerical study of the influence of changing impeller geometry on improving the performance of a centrifugal pump as turbine. *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 56(1), pp. 103–124. [In Persian]. <https://doi.org/10.22060/mej.2024.22708.7680>
- García-Ávila, F. Avilés-Añazco, A. Ordoñez-Jara, J. Guanuchi-Quezada, C. Flores del Pino, L. and Ramos-Fernández, L., 2019. Pressure management for leakage reduction using pressure reducing valves. Case study in an Andean city. *Alexandria Engineering Journal*, 58 (4), pp. 1313–1326. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.11.003>
- Paola, F. Galdiero, E. and Giugni, M., 2015. A jazz-based approach for optimal setting of pressure reducing valves in water distribution networks. *Engineering Optimization*, 48, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2015.1042476>
- Giugni, M. Fontana, N. and Portolano, D., 2009. Energy saving policy in water distribution networks. *Renewable Energy & Power Quality*, 1, pp. 733–738. <https://doi.org/10.24084/>
- Lydon, T. Coughlan, P. and McNabola, A., 2017. Pressure management and energy recovery in water distribution networks: Development of design and

- selection methodologies using three pump-as-turbine case studies. *Renewable Energy*, 114, pp. 1038–1050. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.120>
12. Borge-Diez, D. Godoy-Déniz, J. M. López-Rey, A. and Colmenar-Santos, A., 2021. Pico turbines, the solution to self-supply energy to the water supply network. A case study in Las Palmas de Gran Canaria. *Energy*, 229, pp. 120653. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120653>
13. Motwani, K. H. Jain, S. V. and Patel, R. N., 2013. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – A case study. *Procedia Engineering*, 51, pp. 721–726. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.103>
14. Rossi, M. and Renzi, M., 2018. A general methodology for performance prediction of pumps-as-turbines using artificial neural networks. *Renewable Energy*, 128, pp. 265–274. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.060>
15. Zhu, Z. Gu, Q. Chen, H. Ma, Z. and Cao, B., 2024. Investigation and optimization into flow dynamics for an axial flow pump as turbine (PAT) with ultra-low water head. *Energy Conversion and Management*, 314, pp. 118684. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118684>
16. Morani, M. C. Carravetta, A. Fecarotta, O. and McNabola, A., 2020. Energy transfer from the freshwater to the wastewater network using a PAT-equipped turbopump. *Water*, 12 (1), pp. 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12010038>
17. Renzi, M. Rudolf, P. Stefan, D. Nigro, A. and Rossi, M., 2019. Installation of an axial Pumps-Turbine (PaT) in a wastewater sewer of an oil refinery: A case study. *Applied Energy*, 250, pp. 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.052>
18. Shojaefard, M. H. and Sareman, S., 2022. Effects of impeller geometry modification on performance of pump as turbine in the urban water distribution network. *Energy*, 255, pp. 124550. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124550>
19. Wang, L. Asomani, S. N. Yuan, J. and Appiah, D., 2020. Geometrical optimization of pump-as-turbine (PAT) impellers for enhancing energy efficiency with 1-D theory. *Energies*, 13 (16), pp. 4120. <https://doi.org/10.3390/en13164120>
20. Tchada, A. M. Tchoumboué, N. K. Mesquita, A. L. A. and Hendrick, P., 2024. Enhancing pump as turbine (PAT) performances: A numerical investigation into the impact of impeller leading edge rounding. *Heliyon*, 10 (15), pp. e34663. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34663>
21. Shojaefard, M. H. and Sareman, S., 2023. Studying the impact of impeller geometrical parameters on the high-efficiency working range of pump as turbine (PAT) installed in the water distribution network. *Renewable Energy*, 216, p. 119060. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119060>
22. Yuxing, B. Fanyu, C. Sunsheng, Y. Kai, C. and Tao, D., 2017. Effect of blade wrap angle in hydraulic turbine with forward-curved blades. *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 18709–18717. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.185>
23. Yang, S. S. Wang, C. Chen, K. and Yuang, K., 2014. Research on blade thickness influencing pump as turbine. *Advances in Mechanical Engineering*, pp. 18709–18717. <https://doi.org/10.1155/2014/190530>
24. Sen-chun, M. Zhi-xiao, S. Xiao-hui, W. Feng-xia, S. and Guang-tai, S., 2019. Impeller meridional plane optimization of pump as turbine. *Science Progress*, 103 (1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.1177/00368504198765>
25. Yu, H. Wang, T. Dong, Y. Gou, Q. Lei, L. and Liu, Y., 2023. Numerical investigation of splitter blades on the performance of a forward-curved impeller used in a pump as turbine. *Ocean Engineering*, 281, pp. 114721. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114721>
26. Wang, S. Yang, J. and Xu, G., 2023. Influence of Positive Guide Vane Geometric Parameters on the Head-Flow Curve of the Multistage Pump as Turbine. *Processes*, 11, pp. 3393. <https://doi.org/10.3390/pr11123393>
27. Qian, Z. Wang, F. Guo, Z. and Lu, J., 2016. Performance evaluation of an axial-flow pump with adjustable guide vanes in turbine mode. *Renewable Energy*, 99, pp. 1146–1152. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.020>
28. Shi, F. Yang, J. and Wang, X., 2018. Analysis on the effect of variable guide vane numbers on the performance of pump as turbine. *Advances in Mechanical Engineering*, 10, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1177/168781401878>
29. Yan, X. Kan, K. Zheng, Y. Xu, Z. Rossi, M. and Xu, L., 2024. The vortex dynamics characteristics in a pump-turbine: A rigid vorticity analysis while varying guide vane openings in turbine mode. *Energy*, 289, pp. 130086. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130086>
30. Menter, F. R., 2009. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 23 (4), pp. 305–316. <https://doi.org/10.1080/10618560902773387>
31. Shojaefard, M. H. Tahani, M. Ehghaghi, M. B. Fallahian, M. A. and Beglari, M., 2012. Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid. *Computers & Fluids*, 60, pp. 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.02.028>
32. Tahani, M. Sareman, S. Yousefi, H. Noorollahi, Y. and Fahimi, R., 2019. Investigation effect of type and

- diameter of volute on the efficiency of centrifugal reverse pump at different operating conditions. *Journal of Mechanical Engineering*, 49, pp. 229–238. [In Persian].
https://tumechj.tabrizu.ac.ir/article_9029.html
33. Ghorani, M. M. Sotoude Haghighi, M. H. Maleki, A. and Riasi, A., 2020. A numerical study on mechanisms of energy dissipation in a pump as turbine (PAT) using entropy generation theory. *Renewable Energy*, 162, pp. 1036–1053.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.102>
 34. Tahani, M. and Saremian, S., 2018. Investigation effect of changes geometry of impeller on turbine mode performance of the centrifugal pump at the governing condition of the urban water distribution network. *Modares Mechanical Engineering*, 18 (1), pp. 11–19. [In Persian]. <http://mme.modares.ac.ir/article-15-825-en.html>
 35. Shojaeefard, M. H. and Saremian, S., 2024. Analyzing the impact of blade geometrical parameters on energy recovery and efficiency of centrifugal pump as turbine installed in the pressure-reducing station. *Energy*, 289, pp. 130004.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.130004>
 36. Yousefi, H. Noorollahi, Y. Tahani, M. Fahimi, R. and Saremian, S., 2019. Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of a centrifugal pump for high-viscosity fluid pumping. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 34, pp. 16–26.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.04.011>
 37. Saremian, S. and Shojaeefard, M. H., 2025. The role of changing runner geometry in expanding energy efficiency of a centrifugal pump as turbine (PAT). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 77, pp. 104329.
<https://doi.org/10.1016/j.seta.2025.104329>
 38. Maleki, A. Ghorani, M. M. Haghighi, M. H. S. and Riasi, A., 2020. Numerical study on the effect of viscosity on a multistage pump running in reverse mode. *Renewable Energy*, 150, pp. 234–254.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.113>
 39. Moffat, R. J., 1982. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 104 (2), pp. 250–258.
<https://doi.org/10.1115/1.3241818>
 40. Carravetta, A. Derakhshan, S. and Ramos, H. M., 2018. *Pumps as Turbines: Fundamentals and Applications*. 1th Edn., pp.77-96, Springer Cham, Switzerland.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-67507-7>
 41. Yang, S. S. Derakhshan, S. and Kong, F. Y., 2012. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance. *Renewable Energy*, 48, pp. 507–513.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.002>
 42. Xie, H. Luo, X. Feng, J. Zhu, G. and Wang, L., 2024. Energy performance and flow characteristics of a pump-turbine under pump mode at different guide vane openings. *Journal of Energy Storage*, 97, pp. 112743.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112743>

این صفحه عمل خالی گذاشته شده است.