ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2025;25(02):97-105.

Numerical Investigation of the Effect of Adding Stay Blades on Improving the Performance of Centrifugal Pump as Turbine

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Saremian S.[1],
Shojaeefard M.H.[1*],

How to cite this article
Saremian S, Shojaeefard M.H, Numerical Investigation of the Effect of Adding Stay Blades on Improving the Performance of Centrifugal Pump as Turbine. Modares Mechanical Engineering; *2025;25(02):97-105.*

ABSTRACT

With the changing patterns of energy consumption and the emergence of economic and environmental issues, renewable energy production has received a lot of attention all over the world. Micro-hydropower plants that utilize pumps as turbine (PAT) instead of traditional turbines offer unique advantages such as low construction and maintenance costs, and short commissioning time. In the present study, the design and simulation of a centrifugal PAT were performed using CFturbo and CFX software. The governing equations were discretized using the finite volume method, and the k-ω SST turbulence model was employed for numerical analysis. The performance curves of simulated PAT show acceptable agreement with experimental results. Since pumps are not designed for reverse operation and lack equipment to guide fluid flow from the volute to the impeller, significant losses occur, particularly under off-design operating conditions. In order to improve the PAT performance, diffusers equipped with stay blades were designed for implementation in the space between the impeller and the volute, and the effect of the number of stay blades on operating range was numerically investigated. Results indicate that the PAT equipped with a 10-blade diffuser exhibits more uniform turbulent kinetic energy distribution and provides a wider operating range with high efficiency. Besides, the PAT efficiency at the design point has increased by 2.7%.

Keywords Pump as Turbine, Energy Recovery, Efficiency Improvement, Adding Stay Blades, Computational Fluid Dynamics.

[1] Energy Conversion Academic Department, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

***Correspondence**
Address: Energy Conversion Academic Department, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

shojaeefard@iust.ac.ir

Article History
Received: February 16, 2025
Accepted: April 6, 2025
ePublished: April 26, 2025

CITATION LINKS

1- An Operative Framework for the Optimal Selection of ... 2- Energy management strategies in ... 3- The vortex dynamics characteristics in a pump-turbine: A rigid ... 4- Numerical study of the influence of ... 5- Pump as Turbine for the Energy Recovery in ... 6- A jazz-based approach for ... 7- PaT-ID: A tool for the selection of the optimal pump as ... 8- Optimal Location of PRVs and Turbines in Water Distribution Systems, 9- Pump as turbine – A pico-hydro alternative in ... 10- Energy Production in Water Distribution Networks: A PAT Design Strategy, 11- Losses Reduction and Energy Production in Water-Distribution Networks, 12- Reverse running pumps analytical, experimental and ... 13- Cost Analysis of Pump as Turbine for ... 14- Optimal design of blade in pump as turbine based on ... 15- Experimental investigation of centrifugal pump working as ... 16- Effects of impeller diameter and rotational speed on ... 17- Numerical Research on Effects of Splitter Blades to the Influence of Pump as Turbine, 18- Numerical simulation of hydraulic force on the impeller of ... 19- Effects of impeller geometry modification on ... 20- Geometrical Optimization of Pump-As-Turbine (PAT) Impellers for ... 21- Enhancing Pump as Turbine (PAT) performances: A numerical investigation into ... 22- Numerical investigation of splitter blades on ... 23- Analysis on the effect of variable guide vane numbers on ... 24- Performance evaluation of an axial-flow pump with adjustable guide vanes in turbine mode, 25- Analyzing the impact of blade geometrical parameters on ... 26- Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a ... 27- Numerical investigation on energy change field in a ... 28- Investigation Effect of Type and Diameter of ... 29- A numerical study on mechanisms of energy dissipation in a pump as ... 30- Investigation Effect of Changes Geometry of Impeller on Turbine Mode Performance of ... 31- Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of ... 32- Studying the impact of impeller geometrical parameters on ... 33- Numerical and experimental investigations on inflow loss in ... 34- Experimental methods for engineers eighth edition.

Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی عددی تأثیر افزودن پره‌های ثابت بر بهبود عملکرد پمپ معکوس سانتریفیوژ

سلمان صارمیان[۱]، محمدحسن شجاعی فرد[۱*]
[۱] گروه آموزشی تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

چکیده
با تغییر الگوی مصرف انرژی همچنین مطرح شدن مباحث اقتصادی و زیست‌محیطی، تولید انرژی تجدیدپذیر در سراسر دنیا مورد توجه زیادی قرار گرفته است. نیروگاه‌های برقابی میکرو که از پمپ معکوس به جای توربین استفاده می‌کنند مزایای منحصربه‌فردی مانند هزینه پایین ساخت و نگهداری، زمان کوتاه راه‌اندازی دارند. در مطالعه حاضر، طراحی و شبیه‌سازی پمپ معکوس گریز از مرکز با استفاده از نرم‌افزارهای سی‌اف‌توربو و سی‌اف‌ایکس انجام شده است. گسسته سازی معادلات حاکم به روش حجم محدود صورت گرفته و مدل آشفتگی کا-امگا اس‌اس‌تی برای تحلیل عددی استفاده شده است. نمودارهای عملکردی پمپ معکوس شبیه‌سازی شده تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارد. از آنجایی که پمپ‌ها برای کارکرد معکوس طراحی نشده‌اند و تجهیزی برای هدایت سیال خروجی از حلزونی به پروانه ندارند، تلفات قابل توجهی به خصوص در شرایط کاری خارج از طراحی اتفاق می‌افتد. به منظور بهبود عملکرد پمپ معکوس دیفیوزرهایی با پره برای به‌کارگیری در فضای بین پروانه و حلزونی طراحی شدند و به صورت عددی تأثیر تعداد پره‌های ثابت دیفیوزر بر محدوده کاری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که پمپ معکوس با دیفیوزر ۱۰ پره توزیع انرژی جنبشی آشفتگی یکنواخت‌تری دارد و محدوده کارکرد با راندمان بالای گسترده‌تری دارد. همچنین راندمان پمپ معکوس در نقطه طراحی ۲/۷ درصد افزایش یافته است.

کلیدواژه‌ها: کلمات، پمپ معکوس، بازیابی انرژی، بهبود راندمان، اضافه کردن پره‌های ثابت، دینامیک سیالات محاسباتی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷
*نویسنده مسئول: shojaeefard@iust.ac.ir

۱- مقدمه
ازآنجایی‌که ظرفیت منابع تجدید ناپذیر مانند نفت و زغال‌سنگ همچنان رو به کاهش است و پدیده‌های زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های فسیلی و آلودگی هوا [1,2] رو به وخامت است، دولت‌ها در سراسر جهان تمرکز خود را به سمت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سبز سوق داده‌اند [3]. در گذشته هزینه‌های احداث و همچنین عدم توجیه اقتصادی باعث کم توجهی به پتانسیل‌های نیروگاه‌های میکرو می‌شد ولی با استفاده از پمپ به جای توربین و کاهش هزینه اولیه و همچنین توجیه اقتصادی این نیروگاه‌ها در همه جای دنیا دیدگاه‌ها طوری تغییر کرد که در سال‌های اخیر بیشترین سرمایه‌گذاری را کشورهای چین و آمریکا در این بحث داشته‌اند [4]. کشور ما با توجه به شرایط جغرافیایی معمولاً اختلاف ارتفاع قابل ملاحظه‌ای بین مخازن تا محل مصرف وجود دارد و با استفاده از نیروگاه‌های فشارشکن می‌توان از این فشار مازاد برق تولید کرد و امکان توجیه اقتصادی پروژه فراهم شود [5]. تولید انرژی برق یکی از موضوعات نسبتاً جدید است که در زمینه مدیریت شبکه‌های توزیع آب مطرح شده است. رویکرد عملیاتی در این سامانه‌ها بر بازیابی فشار اضافی [6]، با تولید برق [7] تمرکز دارد. شیرهای فشارشکن در شبکه توزیع آب شهری برای نگه‌داری فشار پایین‌دست در حد معینی استفاده می‌شوند. بااین‌وجود از این فشار اضافی می‌توان برای تولید انرژی با استفاده از توربین‌های آبی و یا پمپ معکوس بهره‌برداری شود [9]. امکان استفاده از پمپ‌ها به عنوان توربین به‌طور گسترده‌ای از دهه سوم قرن بیستم فراگیر شده است اما تنها در سال‌های اخیر مزیت استفاده از آن‌ها در شبکه‌های توزیع آب [10,11] مشخص شده است. پمپ‌های معکوس راندمان کمتری نسبت به توربین‌های آبی دارند اما درعین‌حال هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه پایین‌تری دارند [12]. به دلیل تولید انبوه تجاری، نصب و راه‌اندازی سریع‌تر، تعمیر و نگهداری آسان‌تر و در دسترس بودن قطعات یدکی، توجیه فنی و اقتصادی امکان‌پذیر است [13]. محققان مختلف بر اساس نتایج کارهایشان استفاده از پمپ‌های سانتریفیوژ یک طبقه در نیروگاه‌هایی با ظرفیت پایین از نظر فنی و اقتصادی توصیه کرده‌اند [14,15].

پیشرفت سریع تکنولوژی و افزایش قدرت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری در سال‌های اخیر سبب افزایش کارایی و دقت دینامیک سیالات محاسباتی شده و محققان آن را ابزاری کارآمد در کنار مطالعات تجربی یافته‌اند. در این حوزه مطالعات مختلفی جهت بهبود عملکرد پمپ‌های معکوس به صورت عددی و تجربی انجام شده که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. جاین و همکارانش [16] عملکرد پمپ معکوس را در دبی پایین مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که کاهش قطر و سرعت دورانی پروانه سبب افزایش بازده پمپ معکوس می‌شود. اثر پخ زدن لبه ورودی پره پروانه در حالت معکوس سبب بهبود ۳ تا ٤ درصدی راندمان شده است. یانگ و همکارانش [17] به صورت عددی اثر به‌کارگیری پره‌های جداکننده را بر عملکرد پمپ معکوس بررسی کردند نتایج نشان می‌دهد که هد کاهش یافته و راندمان افزایش یافته و افزودن پره‌های جداکننده سبب کاهش نوسانات فشار شده است. لی و همکارانش [18] به صورت عددی تأثیر نیروی‌های هیدرولیکی بر عملکرد پمپ معکوس بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که نیروهای هیدرولیکی به شرایط کارکرد توربینی وابسته است. جریان‌های برگشتی و گردابه‌ها علت فیزیکی به وجود آمدن نیروهای بزرگی هستند که به صورت عمودی بر پروانه وارد و سبب ایجاد نایکنواختی‌هایی در جریان داخل پروانه می‌شوند. شجاعی‌فرد و همکارانش [19] به صورت عددی اصلاح هندسه پروانه بر بهبود پارامترهای هیدرولیکی و بازده پمپ توربینی را بررسی کردند. اضافه کردن پره‌های جدا کنده باعث کاهش جدایش در

ورودی پره و کاهش تلفات انرژی می‌شود. هد پمپ معکوس با افزایش عرض عبور پروانه کاهش قابل توجهی یافته و بازده با توجه کاهش تلفات در محدوده نقطه عملکردی و بالاتر از آن افزایش یافته است. وانگ و همکارانش [20] به صورت عددی و تجربی عملکرد پمپ معکوس را بررسی کردند و برای بهبود عملکرد پمپ معکوس، پروانه مخصوص با پره‌های فوروارد طراحی شد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که جریان داخلی و گرادیان فشار در پروانه اصلاح شده یکنواخت‌تر از پروانه اصلی است. با کاهش تلفات هیدرولیکی در پروانه مخصوص به طور قابل توجهی راندمان افزایش یافته و محدوده کارکرد با راندمان بالای توربین افزایش یافته است. تچادا و همکارانش [21] به صورت عددی تأثیر گرد کردن لبه ورودی پمپ معکوس را بررسی کردند. این مطالعه نشان داد که لبه تیز ورودی پروانه اصلی اثرات منفی بر عملکرد پمپ معکوس به دلیل جدا شدن جریان و ناهماهنگی جریان دارد. با گرد کردن لبه ورودی و کاهش تلفات، راندمان در دبی‌های کم میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد، با افزایش دبی روند بهبود راندمان روند نزولی دارد اما همچنان بهتر از پمپ معکوس اولیه است. یو و همکاران [22] یک مطالعه عددی و تجربی برای بررسی تأثیر افزودن پره‌های جداکننده به پروانه با پره‌های روبه‌جلو در حالت توربین انجام دادند. نتایج نشان می‌دهد که پمپ معکوس با پروانه اصلاح شده تمام پارامترهای هیدرولیکی افزایش یافته و دامنه کارکرد با راندمان بالا افزایش داشته است. اجرای پره‌های جداکننده در پروانه، توزیع میدان جریان را بهبود می‌بخشد، در نتیجه تشکیل گردابه‌ها را در پروانه کاهش می‌دهد. شی و همکارانش [23] تأثیر استفاده از پره‌های راهنما را بر عملکرد توربینی پمپ معکوس بررسی کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که توزیع انرژی جنبشی آشفتگی یکنواخت‌تر از حالت اصلی است و توربین عملکرد ثابت‌تری دارد. نیروی شعاعی روی پروانه با وجود پره راهنما کاهش یافته و توزیع متقارن‌تر نیروی شعاعی در پروانه اتفاق می‌افتد. کویین و همکارانش [24] اثر به‌کارگیری یک سیستم پره‌های راهنمای قابل تنظیم برای کنترل دبی ورودی یک پمپ معکوس را به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. با کنترل زاویه ورود سیال به پروانه، کارایی پمپ معکوس در شرایط خارج از طراحی بهبود قابل‌ملاحظه دارد.

نتایج مطالعات انجام شده در این حوزه نشان می‌دهد که به دلیل عدم وجود سیستمی برای هدایت سیال در ورودی پروانه پمپ معکوس، سیال ورودی انطباق مناسبی با پروفیل پره ندارد و در این شرایط تلفات قابل توجهی به وجود می‌آید. بسیاری از محققان به منظور بهبود عملکرد پمپ‌ها در حالت معکوس به‌کارگیری پره‌های راهنمای قابل تنظیم را بررسی کردند که با توجه به هندسه پمپ برای اجرای این نوآوری مجبور به تغییر هندسه پروانه و حلزونی شدند. این کار اگرچه باعث افزایش محدوده کاری و عملکرد پمپ معکوس می‌شود اما هزینه بالایی دارد و تا حد زیادی توجیه اقتصادی نیروگاه‌ها در مقیاس میکرو که دلیل استفاده از پمپ معکوس کم کردن هزینه‌ها است را کاهش می‌دهد. در این مطالعه پروانه تراش‌خورده و هندسه حلزونی تغییری نداشته و یک دیفیوزر با پره در فضای بین پروانه و حلزونی طراحی شده است. به منظور دستیابی به بهترین عملکرد تأثیر تعداد پره‌های دیفیوزر بر عملکرد پمپ معکوس به صورت عددی بررسی شده است.

۲- روش و تنظیمات عددی

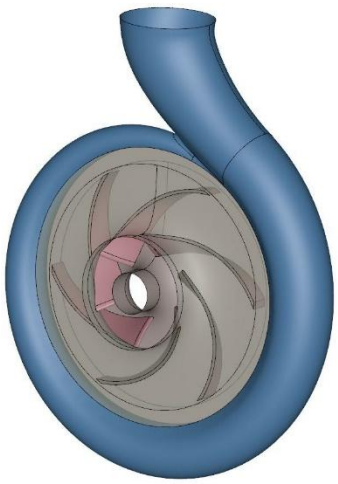
ویژگی‌های عملکرد هیدرولیکی پمپ معکوس به دلیل دشواری مشاهده مستقیم توسط روش تجربی، باید به تفصیل توسط روش شبیه‌سازی عددی تحلیل شوند. انتخاب مدل توربولانس مناسب، روش تحلیل و تنظیمات شبیه‌سازی عددی بسیار مهم است. این بخش عمدتاً روش‌ها و تنظیمات مرتبط مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی را معرفی می‌کند.

۲-۱- مدل هندسی

در این مطالعه عملکرد یک پمپ معکوس سانتریفیوژ بررسی می‌شود، به منظور مطالعه عددی در مرحله اول کل حوزه‌های دامنه محاسباتی که شامل یک حلزونی، دیفیوزر و پروانه در نرم‌افزار سی‌اف‌توربو طراحی شده است. مشخصات هندسی پروانه در جدول ۱ فهرست شده‌اند و هندسه سه‌بعدی پمپ در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱) مشخصات طراحی پروانه

پارامتر	مقدار
تعداد پره‌ها	۶
قطر ورودی پروانه (میلی‌متر)	۱۲۰
قطر خروجی پروانه (میلی‌متر)	۲۶۰
عرض خروجی پره (میلی‌متر)	۱۹
زاویه ورودی تیغه (°)	۲۷
زاویه خروجی تیغه (°)	۲۰



شکل ۱) پمپ معکوس طراحی‌شده در نرم‌افزار سی‌اف‌توربو

۲-۲- معادلات حاکم و مدل‌سازی آشفتگی

به منظور تحلیل جریان درون پمپ معکوس گریز از مرکز، معادلات حاکم بر حرکت سیال، شامل معادلات پیوستگی و مومنتوم، می‌بایست حل گردند. بااین‌حال، به دلیل حرکت سیال در داخل پاساژ و حرکت دورانی پروانه، جملات شتاب کوریولیس و شتاب گریز از مرکز به عنوان جملات چشمه به معادله مومنتوم افزوده می‌شوند. برای شبیه‌سازی جریان سه‌بعدی تراکم‌ناپذیر داخل توربوماشین از شکل متوسط گیری شده معادلات ناویر-استوکس (RANS) استفاده می‌شود. ازآنجاکه سیال تراکم‌ناپذیر است، معادله پیوستگی و معادله مومنتوم به شرح زیر هستند:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \qquad (۱)$$

$$\rho\left(\overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j}\right) - S_{ui} \qquad (۲)$$

در اینجا u سرعت،p فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی است.

به دلیل وجود ترم غیرخطی در معادله مومنتوم، دستگاه معادلات بسته نیستند؛ بنابراین، برای بستن معادلات، به‌کارگیری یک مدل توربولانس ضروری است. در این مطالعه، مدل دو معادله‌ای انتقال تنش برشی (SST) به برای بستن دستگاه معادلات با ایجاد رابطه بین تنش رینولدز و ویسکوزیته گردابی انتخاب شده است. این مدل بر اساس دو معادله انتقال k (انرژی جنبشی آشفته) و ω (فرکانس آشفته) نوشته شده است [25] که به شرح زیر است:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\overline{u}_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^*\rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \sigma_k\mu_T)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\omega\overline{u}_i)}{\partial x_i} = \left[\frac{5}{9}F_1 + 0.44(1-F_1)\right] \times \frac{1}{\upsilon_t}\tilde{P}_k - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \sigma_\omega\mu_T)\frac{\partial\omega}{\partial x_i}\right] + 2(1-F_1)\frac{\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial\omega}{\partial x_i} \qquad (۴)$$

که Pk جمله تولید انرژی جنبشی آشفتگی است. پارامترهای β، β*، σk و σω ثابت‌های مدل توربولانس هستند و F1 تابع اختلاط است، μt ویسکوزیته دینامیکی آشفتگی است. مدل آشفتگی انتقال تنش برشی (SST) به دلیل به‌کارگیری مدل استاندارد کا-امگا در نزدیکی دیوار و استفاده از مدل استاندارد کا-اپسیلون در جریان آزاد دور از دیواره، دقت مناسبی در مدل‌سازی جریان‌های پیچیده در نواحی دوار توربوماشین‌ها دارد [26-32].

در این مطالعه حلگر انسیس سی‌اف‌ایکس به کار گرفته شده که از یک رویکرد ترکیبی که شامل روش المان محدود برای گسسته‌سازی معادلات و روش حجم محدود برای تحلیل هندسه استفاده می‌کند. این استراتژی امکان استفاده از انعطاف‌پذیری هندسی روش المان محدود را ضمن حل معادلات با کمک روش حجم محدود فراهم می‌کند [33]. معادلات حاکم بر سیال (u، v، w و p) با استفاده از یک حلگر کوپل شده در فرآیند حل عددی، به طور همزمان حل می‌شوند.

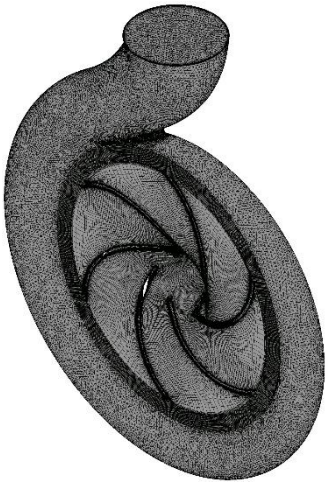
۲-۳- تنظیمات عددی و شرایط مرزی

در این مطالعه از نسخه تجاری انسیس برای مش زنی و تحلیل عددی استفاده شده است. روش حجم محدود برای حل معادلات ناویر-استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز (RANS) با مدل توربولانس دو معادله‌ای انتقال تنش برشی (SST) به کار گرفته شده است. در پژوهش حاضر از آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، چگالی ۹۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب و لزجت دینامیکی ۱×۱۰^{-۳} پاسکال در ثانیه در حل عددی استفاده شده است. از روش فصل مشترک روتور منجمد (frozen rotor) برای ارتباط بین قسمت ثابت و متحرک استفاده شده است. شرط مرزی ورودی دبی جرمی و شرط مرزی خروجی فشار استاتیکی تنظیم شده است. شدت توربولانس در ورودی ۵ درصد لحاظ شده است. سطح دیواره به عنوان دیواره صاف بدون لغزش تنظیم شده است. همچنین معیار همگرایی رسیدن باقیمانده‌های معادلات پیوستگی و مومنتوم به $۱۰^{-۶}$ تعیین شده است.

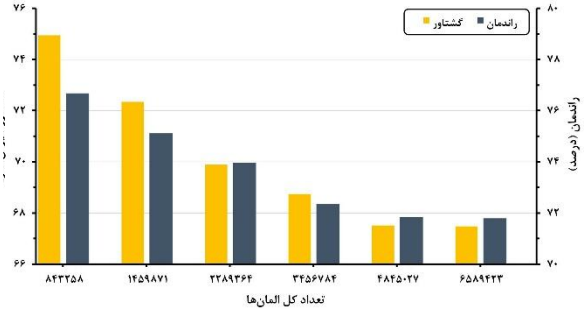
۲-۴- تولید شبکه محاسباتی و استقلال شبکه

برای انجام شبیه‌سازی عددی، لازم است که حوزه سیال با استفاده از روش حجم محدود گسسته شود. تعداد المان‌های شبکه تأثیر آشکاری بر نتیجه دارد. نوع شبکه تأثیر مستقیمی بر همگرایی و راندمان محاسبات دارد.

هندسه توربین دو بخش پروانه متحرک و حلزونی ثابت تقسیم می‌شود و به صورت جداگانه در نرم‌افزارهای توربوگرید و انسیس مش شبکه محاسباتی ایجاد می‌شود. اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، نه تنها نیازمند رعایت استانداردهای کیفیت مش است، بلکه باید پارامتر y+ را بر اساس استاندارد مدل آشفتگی در نظر گرفته شود تا شیب‌های تند نزدیک دیوارها را با دقت ثبت کند. مش بندی بخش متحرک پروانه با استفاده از یک شبکه با سازمان شش‌ضلعی انجام شده است و ضخامت اولین لایه نزدیک به پره‌ها بر اساس معیار y+ تنظیم شده است. در فرآیند تولید شبکه محاسباتی میزانy+ در پروانه با توجه به‌کارگیری مدل آشفتگی انتقال تنش برشی (SST) در این مطالعه کمتر از ۱ در نظر گرفته شده است. برای حلزونی، یک مش بی‌سازمان با ترکیب المان‌های چهاروجهی و منشوری ایجاد شده و یک‌لایه مرزی با ۱۰ لایه با نرخ رشد ۱٫٤ در کنار دیواره‌ها لحاظ شده است. با تشخیص اهمیت زبانه حلزونی در شبیه‌سازی، مش بندی آن بسیار ریز شده است.



شکل ۳) نمایی از شبکه ایجادشده در پمپ معکوس



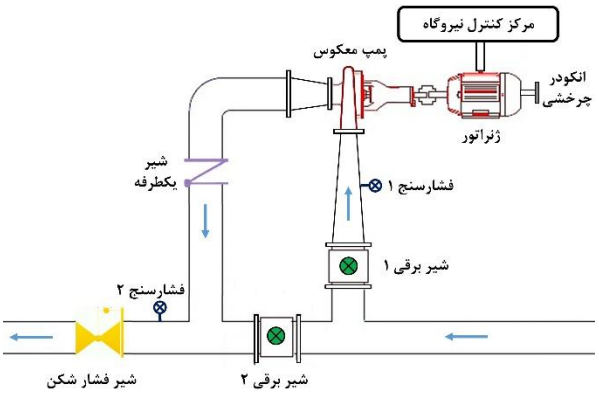
شکل ۴) بررسی استقلال حل از شبکه

کیفیت مش در حلزونی با استفاده از دو معیار تعامد و کشیدگی المان‌ها ارزیابی شده است. شکل ۳ مش نهایی پروانه و حلزونی را نشان می‌دهد.

برای به حداقل رساندن منابع محاسباتی ضمن تضمین دقت شبیه‌سازی، بررسی استقلال شبکه ضروری است. شش مجموعه شبکه برای انجام محاسبات در نقطه عملکردی انتخاب شدند. شکل ٤ نشان می‌دهد که وقتی تعداد شبکه‌ها از ٤٫۸۵ میلیون فراتر رفت، گشتاور (T) و راندمان (η) حاصل از شبیه‌سازی پایدار می‌شوند. اختلاف نتایج شبیه‌سازی برای پارامترهای هد و راندمان کمتر از ۰٫۰۵ درصد است؛ بنابراین مجموعه مش پنجم به عنوان مش نهایی شبیه‌سازی انتخاب شد.

۳- بررسی تجربی و اعتبار سنجی نتایج عددی

شکل ۵ شماتیک و آرایش نیروگاه را در خطوط لوله شبکه توزیع آب شهری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، پمپ معکوس در یک مسیر جانبی که به موازات خط لوله اصلی ایجاد شده و جایگذاری شده است. لوله‌های مورد استفاده در شبکه توزیع آب از جنس چدن با قطر داخلی ۲۰۰ میلی‌متر هستند. پمپ معکوس از طریق نازل‌هایی در ورودی (۲۰۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر) و خروجی (۱۵۰ میلی‌متر به ۲۰۰ میلی‌متر) به لوله‌ها متصل شده است. فشار ورودی و خروجی توسط دو فشارسنج در قبل و بعد از توربین اندازه‌گیری می‌شوند. دو شیر برقی که به یک



شکل ۵) شماتیک نیروگاه پمپ معکوس

پی‌ال‌سی (PLC) متصل هستند، وظیفه باز و بسته کردن مسیر جریان را در خط اصلی و جانبی بر عهده دارند. در محدوده مشخصی از دبی‌ها، پمپ معکوس وارد مدار شده و در سایر مواقع، شیر برقی دیگر باز شده و پمپ معکوس از مدار خارج می‌شود. یک درایو الکتریکی فرکانس متغیر با توجه به سرعت متغیر پمپ معکوس، کنترل پمپ را با تنظیم گشتاور در ژنراتور القایی انجام می‌دهد. به کمک یک اینورتر پشت‌به‌پشت، جریان فرکانس متغیر ورودی به یک فرکانس ثابت ۵۰ هرتز تبدیل شده و به شبکه برق شهری تزریق می‌شود. تنظیم فشار خروجی از خط اصلی و جانبی در محدوده مجاز شبکه توزیع آب به‌وسیله شیر فشارشکنی که پس از توربین نصب شده انجام می‌پذیرد.

به منظور ارزیابی عدم قطعیت نتایج آزمایشگاهی پارامترها در شرایط کاری یکسان، هر پارامتر هشت بار به طور مکرر اندازه‌گیری و داده‌های حاصل با استفاده از روش موفات [34] تحلیل شد. نتایج حاکی از آن است که میزان عدم قطعیت تخمینی برای پارامترهای هد، دبی، توان و راندمان به ترتیب برابر با ۱/۱±، ۰/۵±، ۱/۳± و ۱/٤± درصد است.

۳-۱- اعتبار سنجی نتایج عددی

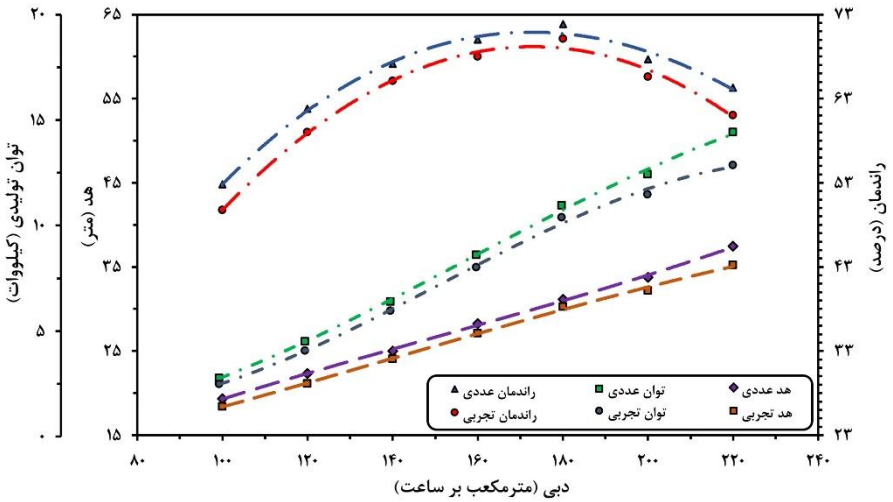
برای بررسی عددی عملکرد پمپ معکوس در محدوده کاری از نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس استفاده شده است. مقادیر هد، توان و راندمان به روش عددی، با استفاده از روابط مربوطه محاسبه گردید.

$$H = \frac{P_{T(in)} - P_{T(out)}}{\gamma} \quad (۵)$$

$$P = T_{All\ Blade} \times \omega \quad (۶)$$

$$\eta = \frac{P}{\rho g Q H} \times 100 \quad (۷)$$

در شکل ٦ مقایسه بین نمودارهای عملکردی تجربی و عددی پمپ معکوس انجام شده است. بررسی نمودار حاکی از تطابق نسبی بین روند تغییرات منحنی عملکرد پمپ معکوس شبیه‌سازی شده با نتایج تجربی است. بااین‌وجود، اختلافاتی جزئی بین نتایج عددی و تجربی مشاهده می‌شود. این اختلافات را می‌توان به عوامل



شکل ۶) مقایسه نتایج عددی و تجربی

متعددی از جمله استفاده از مدل‌های توربولانس برای حل معادلات متوسط گیری شده رینولدز به جای حل مستقیم معادلات ناویر- استوکس، خطاهای ناشی از گسسته‌سازی معادلات دیفرانسیل و عدم در نظر گرفتن کامل تلفات جریان در محاسبات عددی نسبت داد.

بااین‌وجود، میزان اختلاف کلی بین نتایج حل عددی و تجربی در محدوده قابل قبول است. حداکثر اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در نقطه طراحی برای هد، توان و راندمان به ترتیب برابر با ۲/۷۳، ۵/۰۹ و ۲/۴۳ درصد است؛ بنابراین، با توجه به اعتبارسنجی صورت گرفته در این بخش، استفاده از شبکه محاسباتی و روش عددی ارائه شده در این مطالعه منطقی به نظر می‌رسد.

۴- نتایج و تحلیل

ازآنجایی‌که پمپ برای کارکرد در حالت معکوس طراحی نشده است زمان کارکرد توربینی به دلیل عدم وجود پره‌های راهنما، سیال در ورودی پروانه دچار جدایش شده، در این شرایط گردابه‌های در پروانه شکل می‌گیرد و سبب افزایش هد موردنیاز همچنین کاهش توان تولیدی و راندمان می‌شود. در این بخش تأثیر افزودن پره به دیفیوزر و همچنین تعیین تعداد بهینه پره مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۱- بررسی تأثیر تعداد پره‌های ثابت دیفیوزر بر عملکرد پمپ معکوس

در این مطالعه به منظور بهبود عملکرد پمپ معکوس، دیفیوزرهایی با ٦، ٨، ١٠، ١٢ و ١٤ پره طراحی شده‌اند و عملکرد در محدوده کاری به صورت عددی بررسی شده است. در مرحله اول طراحی‌ها در نرم‌افزار دیزاین مدلر انجام شده و در مرحله بعد مش بندی دیفیوزرهای با پره‌ها در توربوگرید انجام شده است و سپس حل عددی در نرم‌افزار سی‌اف‌ایکس انجام شده است. زمانی که پره‌های ثابت به دیفیوزر اضافه می‌شود به دلیل بهبود میدان‌های جریان و زاویه مناسب ورود سیال به پروانه، در محدوده نقطه عملکردی و بالاتر از آن سیال در ورودی پره دچار جدایش و گردابه‌های کمتری خواهد شد، البته در دبی‌های خیلی پایین‌تر از نقطه عملکردی شرایط این‌گونه نیست و کاهش میزان سرعت مطلق به پروانه باعث افزایش زاویه شوک در ورودی پمپ معکوس و افزایش گردابه می‌شود.

در دبی‌های کمتر از نقطه عملکردی بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۲، افزایشی در هد موردنیاز و همچنین کاهشی در گشتاور ایجاد می‌شود که منجر به کاهش جزئی راندمان پمپ معکوس می‌گردد. نتایج حل عددی نشان می‌دهد که با افزایش دبی تا نقطه عملکردی و بالاتر از آن، به دلیل کاهش میزان جدایش جریان در لبه ورودی پره، کاهش گردابه‌ها در پاساژ و پیروی سیال از پروفیل پره در داخل پروانه اتفاق می‌افتد. در شکل ۷ مقایسه‌ای بین راندمان پمپ معکوس با دیفیوزرهایی با تعداد متفاوت پره ثابت در محدوده کاری انجام شده است.

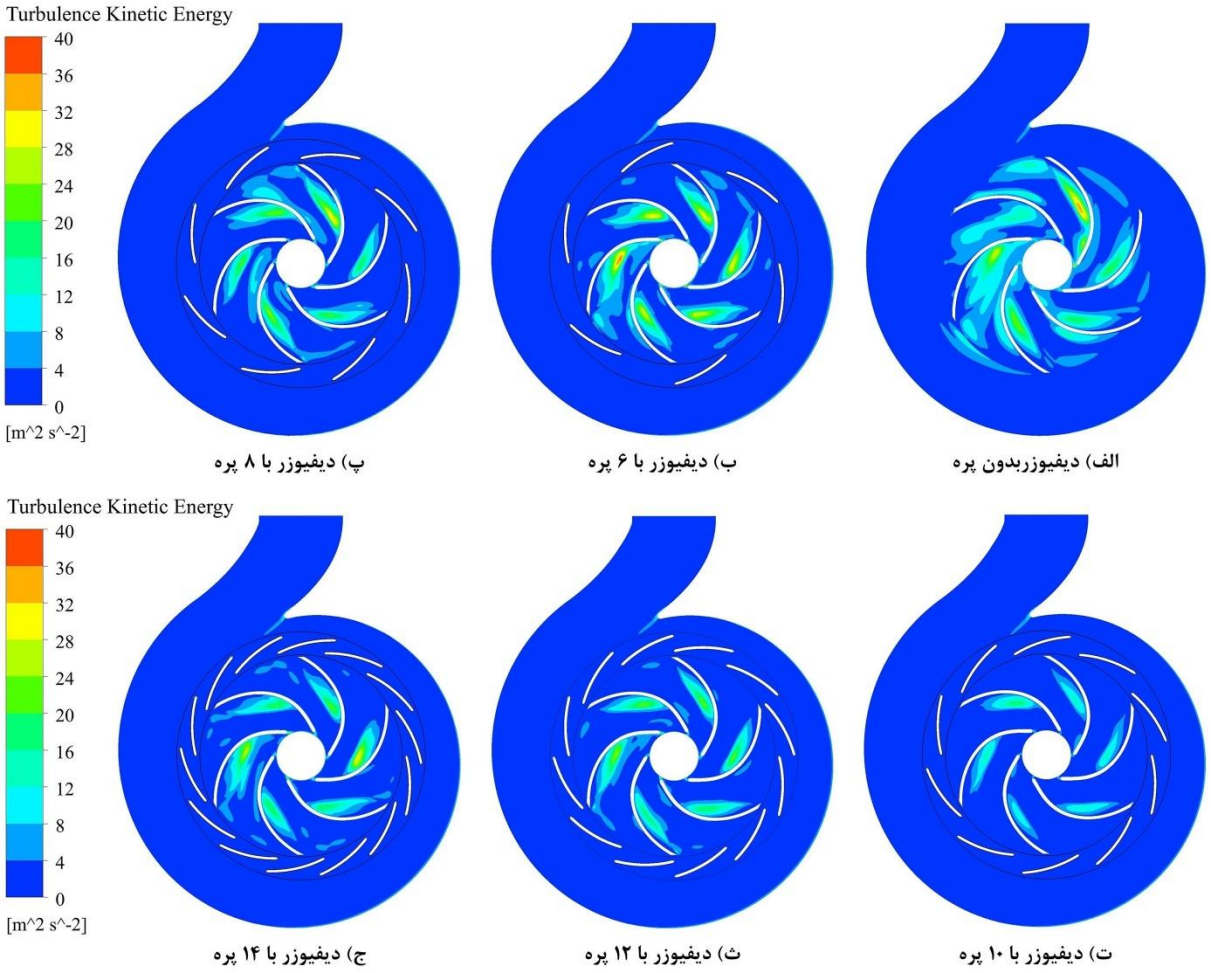
به منظور بررسی تأثیر تعداد پره‌های ثابت دیفیوزر بر عملکرد پمپ معکوس، تحلیل میدان‌های جریان و تلفات ضروری است. در این مطالعه از معیار انرژی جنبشی آشفتگی برای قضاوت در مورد شرایط جریان در پمپ معکوس استفاده می‌شود؛ هرچه شدت آشفتگی بیشتر باشد، حالت جریان ناپایدارتر و تلفات جریان بیشتر خواهد بود. معادلات انرژی جنبشی آشفتگی و شدت آشفتگی به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$k = \frac{3}{2}(uI)^2 \qquad (۸)$$

$$I = 0.16(Re)^{\frac{-1}{8}} \qquad (۹)$$

جدول ۲) مقایسه هد موردنیاز و توان تولیدی پمپ معکوس با تعداد پره ثابت متفاوت

توان (کیلووات)							هد (متر)						دبی (مترمکعب بر ساعت)
۱۴ پره	۱۲ پره	۱۰ پره	۸ پره	۶ پره	بدون پره		۱۴ پره	۱۲ پره	۱۰ پره	۸ پره	۶ پره	بدون پره	
۲/۵۷	۲/٦٤	۲/٦۹	۲/۸۵	۲/۸۷	۲/۷۷		۱۹/٦۷	۱۹/۹۳	۲۰/۷٦	۲۱/۵۷	۲۲/۲٤	۱۹/۳۲	۱۰۰
٤/۲۷	٤/۷۱	٤/۳۹	٤/٦۳	٤/۱۷	۴/۵۱		۲۲/۵٦	۲۲/۸٦	۲۲/٤۱	۲٤/۰۲	۲۳/۹۵	۲۲/۳۵	۱۲۰
٦/۲۱	٦/۸۵	٦/٤۱	٦/۸٤	٦/۵٤	۶/۳۹		۲۵/٤۳	۲۵/۹٤	۲۵/۰۵	۲٦/٤۱	۲٦/٦۳	۲۵/۰۱	۱۴۰
۸/٤٦	۹/۱۲	۸/۷۵	۸/۸٤	۸/۹۳	۸/۶۱		۲۹/۱۱	۲۹/٤۵	۲۸/۰۹	۲۹/۱۳	۲۹/۷٤	۲۸/۳۷	۱۶۰
۱۰/۵۳	۱۰/٦۹	۱۰/۷۳	۱۰/۹۷	۱۱/۲۱	۱۰/۹۵		۳۰/۵۷	۳۰/۸٤	۲۹/٤۵	۳۱/۱۳	۳۲/۰۸	۳۱/۱۴	۱۸۰
۱۲/۳۲	۱۲/۵٤	۱۲/٦۹	۱۲/۷٦	۱۲/٦۹	۱۲/۴۲		۳۳/۰۵	۳۳/٤۱	۳۲/۰۳	۳۳/۰٤	۳۵/۱۳	۳۳/۷۳	۲۰۰
۱٤/٤۹	۱٤/۳۸	۱٤/۷۳	۱٤/۵۹	۱٤/۸٤	۱۴/۴۱		۳٦/۱۹	۳۵/۵۷	۳۵/۲٤	۳٦/۳٤	۳۹/۷۲	۳۷/۴۶	۲۲۰
۱۵/۳٤	۱۵/۵۷	۱۵/٦۱	۱۵/۸٤	۱۵/۹۳	۱۵/۵۳		٤۰/۷۱	٤۰/٦۷	۳۸/۷۹	۳۹/۸٦	٤۲/۱۳	۴۱/۰۲	۲۴۰



شکل ۸) مقایسه کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در صفحه میانی پمپ معکوس با تعداد متفاوت پره‌های دیفیوزر

که در این معادلات u سرعت متوسط، I شدت آشفتگی و Re عدد رینولدز است. در شکل ۵ مقایسه‌ای بین کانتور انرژی جنبشی آشفتگی در نقطه عملکردی انجام شده است. همانطور که مشخص است تعداد پره‌های ثابت دیفیوزر تأثیر بسزایی بر انرژی جنبشی دارد. بررسی کانتورها نشان می‌دهد که انرژی جنبشی در حلزونی یکنواخت‌تر است و انرژی جنبشی متمرکز در پروانه، زبانه حلزونی ظاهر می‌شود. مقایسه عملکرد پمپ معکوس در دبی‌های مختلف بیان می‌کند که هرچه نرخ دبی بیشتر باشد، انرژی جنبشی افزایش می‌یابد، بنابراین در دبی‌های پایین، انرژی جنبشی کمتر است. توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در پروانه اصلی دو طرف مکش و فشار پره و میزانی هم در دیفیوزر قابل مشاهده است. در حالت پمپ معکوس، شکل میدان‌های جریان به‌واسطه پره‌های ثابت مختلف تغییر می‌کند و انرژی جنبشی به‌طور یکنواخت‌تر توزیع می‌شود. عملکرد توربین با اضافه شده پره‌های ثابت پایدارتر است،

بنابراین با مقایسه عملکرد پمپ معکوس با تعداد متفاوت پره در محدوده کاری حالت بهینه مشخص می‌شود. با اضافه شدن پره‌های ثابت به دیفیوز از سطح آشفتگی کم شده است همان‌طور که مشخص است با اضافه شدن ٦ و ٨ پره از میزان آشفتگی نسبت به پمپ معکوس اولیه کم شده است. همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است پمپ معکوس که دیفیوزر ۱۰ پره دارد در محدوده دبی بین ۱٤۰ تا ۲٤۰ مترمکعب بر ساعت عملکرد بهتری نسبت بقیه دارد. بررسی کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی (شکل ۸) نشان می‌دهد که توزیع آشفتگی یکنواخت‌تری دارد و در این شرایط کاری تلفات کمتری اتفاق می‌افتد. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که دیفیوزر با ۱۰ پره برای این پمپ معکوس حالا بهینه است. البته باید توجه داشت که در دیفیوزر با ۱۲ و ١٤ پره هم میزان آشفتگی مناسبی نسبت به پروانه اصلی وجود دارد اما در این حالت‌ها افزایش هد در دبی‌های بالا را داریم که سبب کاهش راندمان می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

پمپ‌ها برای کارکرد در حالت توربینی طراحی نشده‌اند و ازآنجایی‌که در پمپ‌ها پره‌های راهنما برای هدایت سیال خروجی به سمت پروانه وجود ندارد سیال در ورودی پروانه دچار جدایش می‌شود و در این شرایط تلفات قابل توجهی شکل می‌گیرد. در این مطالعه به منظور بهبود عملکرد پمپ معکوس، تأثیر اضافه کردن پره‌های ثابت به دیفیوزر بررسی شد و برای تعیین حالت بهینه دیفیوزرهایی با تعداد پره‌های متفاوت مورد مطالعه قرار گرفت.

بررسی عملکرد پمپ معکوس نشان می‌دهد که با افزودن پره‌ها ثابت راندمان بهبود یافته است. البته در دبی‌های بالا بازیابی انرژی و کاهش تلفات هد بیشتری اتفاق می‌افتد و راندمان پمپ معکوس در این محدوده کاری بهبود قابل توجهی دارد. هد موردنیاز توربین از یک طرف با اضافه شدن پره‌های ثابت به علت افزایش سطح تماس سیال با دیواره پره‌ها افزایش و از طرف دیگر با هدایت بهتر سیال کاهش جدایش در ورودی پروانه رخ می‌دهد، اما به صورت کلی برآیند هد در دبی‌های بالا کاهش یافته است. توزیع انرژی جنبشی آشفتگی با اضافه شدن پره‌های ثابت یکنواخت‌تر از پمپ معکوس اصلی است و عملکرد پایدارتری در این شرایط دارند. پمپ معکوس با دیفیوزری که ۱۰ پره ثابت دارد بهترین عملکرد را در محدوده دبی بین ۱٤۰ تا ۲٤۰ مترمکعب بر ساعت دارد. توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در این حالت بهینه است و بیشترین بهبود راندمان در دبی ۲۲۰ مترمکعب بر ساعت رخ می‌دهد و راندمان ۵/۵ درصد افزایش یافته است.

تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

[1] Pugliese F, Giugni M. An operative framework for the optimal selection of centrifugal pumps as turbines (PATs) in water distribution networks (WDNs). Water. 2022 Jun 1;14(11):1785.

[2] Olatomiwa L, Mekhilef S, Ismail MS, Moghavvemi M. Energy management strategies in hybrid renewable energy systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016 Sep 1;62:821-35.

[3] Yan X, Kan K, Zheng Y, Xu Z, Rossi M, Xu L, Chen H. The vortex dynamics characteristics in a pump-turbine: A rigid vorticity analysis while varying guide vane openings in turbine mode. Energy. 2024 Feb 15;289:130086.

[4] Saremian S, Shojaeefard MH. Numerical study of the influence of changing impeller geometry on improving the performance of a centrifugal pump as a turbine. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2024 Mar 20;56(1):103-24.

[5] Balacco G, Binetti M, Capurso T, Stefanizzi M, Torresi M, Piccinni AF. Pump as Turbine for the Energy Recovery in a Water Distribution Network: Two Italian (Apulian) Case Studies. Environmental Sciences Proceedings. 2020 Aug 7;2(1):1.

[6] De Paola F, Galdiero E, Giugni M. A jazz-based approach for optimal setting of pressure reducing valves in water distribution networks. Engineering Optimization. 2016 May 3;48(5):727-39.

[7] Balacco G, Fiorese GD, Alfio MR, Totaro V, Binetti M, Torresi M, Stefanizzi M. PaT-ID: A tool for the selection of the optimal pump as turbine for a water distribution network. Energy. 2023 Nov 1;282:128366.

[8] Giugni M, Fontana N, Ranucci A. Optimal location of PRVs and turbines in water distribution systems. Journal of Water Resources Planning and Management. 2014 Sep 1;140(9):06014004..

[9] Arriaga M. Pump as turbine–A pico-hydro alternative in Lao People's Democratic Republic. Renewable Energy. 2010 May 1;35(5):1109-15..

[10] Carravetta A, Del Giudice G, Fecarotta O, Ramos HM. Energy production in water distribution networks: A PAT design strategy. Water resources management. 2012 Oct;26:3947-59.

[11] Fontana N, Giugni M, Portolano D. Losses reduction and energy production in water-distribution networks. Journal of Water Resources Planning and Management. 2012 May 1;138(3):237-44.

[12] Nautiyal H, Kumar A. Reverse running pumps analytical, experimental and computational study: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2010 Sep 1;14(7):2059-67.

[13] Motwani KH, Jain SV, Patel RN. Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants–a case study. Procedia Engineering. 2013 Jan 1;51:721-6.

[14] Sen-Chun M, Hong-Biao Z, Ting-Ting W, Xiao-Hui W, Feng-Xia S. Optimal design of blade in pump as turbine based on multidisciplinary feasible method. Science Progress. 2020 Dec;103(4):0036850420982105..

[15] Nautiyal H, Varun V, Yadav S. Experimental investigation of centrifugal pump working as turbine for small hydropower systems. Energy Science and technology. 2011 Feb 18;1(1):79-86.
[16] Jain SV, Swarnkar A, Motwani KH, Patel RN. Effects of impeller diameter and rotational speed on performance of pump running in turbine mode. Energy conversion and management. 2015 Jan 1;89:808-24.
[17] Sun-Sheng Y, Fan-Yu K, Jian-Hui F, Ling X. Numerical research on effects of splitter blades to the influence of pump as turbine. International Journal of Rotating Machinery. 2012;2012(1):123093.
[18] Li JW, Zhang YN, Liu KH, Xian HZ, Yu JX. Numerical simulation of hydraulic force on the impeller of reversible pump turbines in generating mode. Journal of Hydrodynamics, Ser. B. 2017 Aug 1;29(4):603-9.
[19] Shojaeefard MH, Saremian S. Effects of impeller geometry modification on performance of pump as turbine in the urban water distribution network. Energy. 2022 Sep 15;255:124550.
[20] Wang L, Asomani SN, Yuan J, Appiah D. Geometrical optimization of pump-as-turbine (PAT) impellers for enhancing energy efficiency with 1-D theory. Energies. 2020 Aug 10;13(16):4120.
[21] Tchada AM, Tchoumboué NK, Mesquita AL, Hendrick P. Enhancing Pump as Turbine (PAT) performances: A numerical investigation into the impact of impeller leading edge rounding. Heliyon. 2024 Aug 15;10(15)..
[22] Yu H, Wang T, Dong Y, Gou Q, Lei L, Liu Y. Numerical investigation of splitter blades on the performance of a forward-curved impeller used in a pump as turbine. Ocean Engineering. 2023 Aug 1;281:114721.
[23] Shi F, Yang J, Wang X. Analysis on the effect of variable guide vane numbers on the performance of pump as turbine. Advances in Mechanical Engineering. 2018 Jun;10(6):1687814018780796.
[24] Qian Z, Wang F, Guo Z, Lu J. Performance evaluation of an axial-flow pump with adjustable guide vanes in turbine mode. Renewable Energy. 2016 Dec 1;99:1146-52.
[25] Shojaeefard MH, Saremian S. Analyzing the impact of blade geometrical parameters on energy recovery and efficiency of centrifugal pump as turbine installed in the pressure-reducing station. Energy. 2024 Feb 15;289:130004.
[26] Shojaeefard MH, Tahani M, Ehghaghi MB, Fallahian MA, Beglari M. Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid. Computers & Fluids. 2012 May 15;60:61-70.
[27] Chen X, Zhang Z, Huang J, Zhou X, Zhu Z. Numerical investigation on energy change field in a centrifugal pump as turbine under different flow rates. Renewable Energy. 2024 Sep 1;230:120804.
[28] Tahani M, Saremian S, Yousefi H, Fahimi R, Noorollahi Y. Investigation Effect of Type and Diameter of Volute on the Efficiency of Centrifugal Reverse Pump at Different Operating Conditions.
[29] Ghorani MM, Haghighi MH, Maleki A, Riasi A. A numerical study on mechanisms of energy dissipation in a pump as turbine (PAT) using entropy generation theory. Renewable Energy. 2020 Dec 1;162:1036-53.
[30] Tahani M. 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. 2018 Mar 10;18(1):11-9.
[31] Yousefi H, Noorollahi Y, Tahani M, Fahimi R, Saremian S. Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of a centrifugal pump for high-viscosity fluid pumping. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2019 Aug 1;34:16-26.
[32] Shojaeefard MH, Saremian S. 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. 2023 Nov 1;216:119060.
[33] Qi B, Zhang D, Geng L, Zhao R, Van Esch BP. Numerical and experimental investigations on inflow loss in the energy recovery turbines with back-curved and front-curved impeller based on the entropy generation theory. Energy. 2022 Jan 15;239:122426.
[34] Holman JP. Experimental methods for engineers eighth edition.