

Investigating the effect of dam water level and downstream pressure on the performance of a small hydroelectric power plant using Pump As Turbine technology (Case study: Shahrchai Dam of Urmia)

Milad Hosseinpour¹, Arash Mohebbi^{2*}, Alireza Riasi^{3*}

¹MSc Graduated, Department of Bio-systems Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

²Assistant Professor, Department of Bio-systems Mechanical Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

³Associate Professor, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Corresponding Author's E-mail: ariasi@ut.ac.ir, a.mohebbi@urmia.ac.ir

Received: 11 June 2025 Accepted: 11 Nov. 2026
Revised: 10 Oct. 2025 Published: 23 Sep. 2023



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: This research focuses on generating electrical energy using a power plant that employs pump as turbine technology. The installation involves eight pumps operating in parallel, with the efficiency calculated under various conditions by altering parameters such as head, flow rate, and output pressure. The performance curve for the pump as turbine was created for a centrifugal pump model 250-33. The design was conducted for three scenarios: normal (full capacity), average (neither full nor low capacity), and finally for a minimal (low capacity) water level in the reservoir. These three scenarios were also analyzed under three different output pressures: 1.5 bar, 2.5 bar, and 3.5 bar. The results indicated that in the optimal condition, the efficiency of the pump as turbine would reach 83%. The maximum power extracted from the plant was calculated to be 947.312 kW. The electrical energy generated over 345 days, operating continuously for 24 hours, amounted to approximately 9335468.16 kWh.

Keywords: Power plant, Hydroelectricity, Pump as turbine, Turbine, Renewable energy.

Introduction: The world is gradually heading toward a severe energy crisis, as energy demand is exceeding supply. Humans have realized that daily-used energy is not infinite, yet often take it for granted—overlooking the finite nature of oil, gas, electricity, and even accessible water. The rising demand and limited availability of energy resources have led to increased prices (Manieniyn, Thambiduri, and Selvakumar, 2009). Energy remains a vital component of economic infrastructure. The integration of renewable sources such as hydro, wind, solar, tidal, and biogas has transitioned electricity generation toward cleaner, cost-effective technologies. Hybrid systems combining hydro and wind power enhance energy value and improve water resource flexibility (Shahinejad and Kakavand, 2016; Gondhali et al, 2020). The water-energy nexus is essential for sustainable development (Walker, Lv, and Masanet, 2013; Chen, and Chen, 2016; Jiang, Wang et al, 2016). Large-scale hydropower has declined in developed nations due to environmental impacts and depleted water sources. This has shifted focus toward small-scale hydropower, especially in remote areas. Pumps as turbines (PATs) have emerged as a low-cost alternative to traditional turbines, with easy maintenance and broad availability (Chapallaz, Eichenberger, and Fischer, 1992; Liu, Tan, and Cao, 2019). Centrifugal pumps operating in reverse can recover energy efficiently (Gulich, 2010). This unconventional approach is gaining traction in mechanical and energy engineering (Kusakana, 2014). PATs are increasingly adopted in small hydro plants to replace expensive hydraulic turbines (Pourrajabian, Hamekhani, Fatahi, Dehghan, and Rahgozar, 2018; Nejadali, 2021). However, manufacturers often do not provide performance curves in turbine mode, posing a key challenge (Williams, 1994; Barbarelli et al, 2016). This study designs a small hydropower plant using PAT technology for the Shahrchai Dam in Urmia, Iran. It analyzes its performance across three water levels using both maximum and minimum output scenarios, highlighting the potential of PATs in enhancing clean energy production aligned with sustainable economic goals.

Methodology: In recent years, the growing global demand for energy, coupled with the depletion of fossil fuel

resources, has increased the focus on renewable energy sources (Manieniyn, Thambiduri, & Selvakumar, 2009; Shahinejad and Kakavand, 2016; Gondhali et al, 2020). Electricity generated from renewables such as water, wind, and solar is considered a sustainable and cost-effective solution (Shahinejad and Kakavand, 2016; Gondhali et al, 2020). A novel approach in hydropower generation involves using pumps as turbines (PAT) (Chapallaz, Eichenberger, and Fischer, 1992; Liu, Tan, and Cao, 2019), where centrifugal pumps operate in reverse mode to convert hydraulic energy into electricity (Gülich, 2010). This method is gaining attention, especially in developing countries, due to its low cost, ease of maintenance, and wide availability of components (Kusakana, 2014; Pourrajabian, Hamekhani, Fatahi, Dehghan, and Rahgozar, 2018; Nejadali, 2021).

This study presents the design and performance analysis of a small-scale hydropower plant using PAT technology, intended for installation on the drinking water transmission line of Shahrchai Dam in Urmia, Iran. The proposed system includes eight pumps arranged in parallel. Its operation was evaluated under three hydrological scenarios (wet, normal, and dry years) and at three different outlet pressures (1.5, 2.5, and 3.5 bar). The results demonstrated that the pump as turbine efficiency could reach up to 83%. The maximum power output was calculated to be 947.312 kW, with an estimated annual energy production of 9,335,468.16 kWh under optimal 24-hour operation for 345 days. The generated electricity can supply the local facilities and also be connected to the national grid. PAT technology represents a promising and economical alternative for enhancing renewable energy production and effectively utilizing existing hydraulic infrastructures.

Results and Discussion: The objective of this study is to optimize the use of the water transmission line from Shahrchai Dam in Urmia for hydroelectric power generation. As shown in Eqs (1)-(12), Figs. 1 and 2 and Table 1 Initially, the system curve and the head-discharge curve of the power plant were calculated using hydraulic equations and dam data. As shown in Eq (13), Figs. 2-4, after selecting a suitable pump from the catalog, the pump-turbine's performance in both turbine and pumping modes was analyzed, and curves for head-discharge, power-discharge, and efficiency were plotted. As shown in Figs. 5-8, The power plant includes eight pump-turbines operating in parallel. Key variables such as the dam water level and the outlet pressure to Urmia's Water Treatment Plant No. 2 were analyzed for their effects on flow rate, output power, and overall efficiency. As shown in Tables 2-8, results showed that under various conditions (high flow, average, and drought) and different outlet pressures, the plant could generate power with over 80% efficiency across a wide range of flows. The parallel operation of turbines allows flexible power regulation and improved efficiency. The working point of the system is determined by the intersection of the system curve and the head-discharge curve. Using the Darcy-Weisbach equation, the total head loss was calculated, and with known dam elevation, turbine installation level, and outlet pressure (2.5 bar), the design head was estimated at 34.5 meters. Each turbine's flow rate was found to be 0.32 m³/s, and the specific speed was 59.6 rev/min. By applying conversion factors between pump and turbine modes, design variables were adapted for catalog selection. The chosen pump (model 250-33 by Pumpiran) operates at 1450 rev/min. Converting pump performance data to turbine conditions and estimating maximum/minimum conversion coefficients, the turbine's operational limits were defined. Comprehensive calculations and data showed that the plant operates efficiently with variable flow conditions and number of turbines in operation. For example, at 2.5 bar outlet pressure, annual energy production ranges from 0.7 to 9.3 MWh depending on water availability. When outlet pressure is increased or decreased (1.5–3.5 bar), the head and flow characteristics change, affecting power output and efficiency. The system's modular design allows operation from 1 to 8 turbines, adapting to seasonal variations in water demand. Even under low-flow or high-pressure scenarios, the plant maintains a performance efficiency above 80% in most configurations, demonstrating the viability and flexibility of using pump-turbines for energy recovery from water transmission systems.

Conclusion: Pumps are among the most widely used turbomachines in both industrial and domestic applications. Improving their efficiency and optimizing their performance can significantly reduce energy consumption. Centrifugal pumps, in particular, are commonly used in water facilities and are also applicable as pump-turbines. The primary objective of this study is to design a pump-turbine hydroelectric power plant for the Shahrchai Dam in Urmia. Using pump-turbine equations, key operational parameters were calculated. Design charts were then developed, and a suitable pump model (the 250-33 single-suction volute pump) was selected from the Pumpiran company catalog. The power output from eight parallel pump-turbines was subsequently estimated. The results indicate that the energy of water in transmission pipelines can be effectively recovered and converted into valuable electrical energy without environmental pollution, unlike thermal power plants. Additionally, operating pump-turbines in parallel allows for flow regulation and enables the system to function as a pressure-reducing valve.



This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

بررسی اثر ارتفاع آب سد و فشار پایین دست بر عملکرد یک نیروگاه برق آبی کوچک با استفاده از تکنولوژی پمپ به عنوان توربین (مطالعه موردی: سد شهرچای ارومیه)

میلاد حسین پور^۱، آرش محبی^{۲*}، علیرضا ریاسی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: ariasi@ut.ac.ir , a.mohebbi@urmia.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱ تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

چکیده: با توجه به توسعه روزافزون تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از پمپ به عنوان توربین در صنایع نیروگاهی افزایش چشمگیری یافته است. در این پژوهش، انرژی الکتریکی به کمک نیروگاهی با استفاده از فن آوری پمپ به عنوان توربین که بر روی خط انتقال آب شرب سد شهرچای ارومیه نصب شده است، تولید خواهد شد. روش انجام کار، نصب هشت پمپ به صورت موازی است و با تغییر پارامترهای هد، دبی و فشار استاندارد خروجی به سمت تصفیه‌خانه شماره ۲، بازده در حالت‌های مختلف محاسبه و نمودار پمپ به عنوان توربین برای پمپ‌گریز از مرکز ۳۳-۲۵۰ شرکت پمپیران تهیه گردید. این طراحی برای سه حالت بیشینه (پرآبی)، متوسط (نه پرآبی و نه کم‌آبی) کمینه (کم‌آبی) دبی جریان ورودی به سد انجام شده است. همچنین این سه حالت در سه فشار خروجی مختلف ۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ bar فشار استاندارد تحلیل گردید. نتایج نشان داد که در بهترین حالت، بازده پمپ به عنوان توربین در نقطه کاری ۸۳٪ خواهد شد. توان استخراج شده نیروگاه در حالت بیشینه برابر ۹۴۷/۳۱۲ kW محاسبه گردید. انرژی الکتریکی حاصله برای ۳۴۵ روز و تولید ۲۴ ساعته در بهترین حالت معادل ۹۳۳۵۴۶۸/۱۶ kWh محاسبه شد که علاوه بر تأمین انرژی الکتریکی تأسیسات مذکور، امکان اتصال به شبکه برق شهری را نیز دارد.

کلیدواژه‌ها: نیروگاه، برق آبی، پمپ به عنوان توربین، توربین، انرژی تجدیدپذیر.

متوجه شده است، انرژی که هر روز استفاده می‌کند نامحدود نیست، و انرژی‌های تجدیدناپذیر رو به پایان است. تقاضای روزافزون منابع انرژی و کمبود فزاینده آن باعث افزایش قیمت‌ها گردیده است (Manienyan et al. 2009).

۱- مقدمه

جهان به تدریج به سمت یک بحران شدید انرژی پیش می‌رود و تقاضای روزافزون انرژی بیش از عرضه آن است. بشر

انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تهدیدی قابل توجه برای پایداری جامعه مدرن محسوب می‌شود. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، یک استراتژی کلیدی برای کاهش این انتشارها است. برق آبی، منبع انرژی تجدیدپذیر غالب، به طور مؤثر تقریباً ۱۷ درصد از نیازهای جهانی به برق را برآورده می‌کند. (Zarei Manoujan et al., 2025).

انرژی یکی از مهم‌ترین اجزای زیرساخت‌های اقتصادی است. تلفیق انرژی الکتریسیته تولیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند آب، باد، خورشید، جزرومد و بیوگاز، موجب عبور از روش‌های سنتی و حرکت به سوی تکنولوژی‌های پیشرفته برای تولید انرژی الکتریسیته پاک و ارزان‌قیمت گردیده است. تلفیق نیروگاه‌های برق آبی با نیروگاه‌های بادی موجب افزایش ارزش مالی انرژی الکتریسیته تولید شده گردیده و هم‌چنین باعث انعطاف‌پذیری بیشتر در بهره‌برداری از منابع آبی شده است (Shahinejad and Kakavand., 2016; Gondhali et al., 2020).

پیوند آب و انرژی یکی از عوامل حیاتی برای توسعه پایدار انسانی است. این دو منبع برای تولید و زندگی جهانی ضروری هستند (Walker and Masanet, 2013; Chen and Walker and Masanet, 2013; Chen., 2016; Jiang et al, 2016). نیروگاه‌های برقابی در مقیاس بزرگ با کاهش تأسیسات و سرمایه‌گذاری‌های اقتصادی در کشورهای توسعه یافته مواجه شده است، زیرا منابع اصلی آب طبیعی موجود، مورد بهره‌برداری قرار گرفته اند و عملیات عمرانی جدید مورد نیاز برای این نیروگاه‌ها، اثرات زیست‌محیطی قابل توجهی دارد. در نتیجه، بخش برقابی از نیروگاه‌های مقیاس بزرگ به نیروگاه‌های مقیاس کوچک در حال تغییر است. نیروگاه‌های آبی در مقیاس کوچک علاوه بر تولید برق در مناطق دورافتاده و روستایی، جایی که توسعه شبکه برق آسان نیست، برای کاربردهای مانند بازیافت انرژی نیز استفاده می‌شود. پمپ‌ها به عنوان توربین به دلیل هزینه ارزان تر و در دسترس بودن قطعات یدکی بیشتر در مقایسه با توربین‌های هیدرولیک سنتی، راه‌حل جالبی را نشان می‌دهند (Chapallaz et al., 1992; Liu et al., 2019).

پمپ‌های گریز از مرکز با عملکرد معکوس می‌توانند به عنوان توربین برای بازیابی انرژی استفاده شوند (Gülich., 2008). استفاده از پمپ به صورت معکوس که به عنوان پمپ‌توربین شناخته شده است، یکی از جایگزین‌های اقتصادی و جذاب در منابع کوچک برق آبی هستند. پمپ-توربین یک نوع غیرمتعارف از توربین‌های آب واکنشی است که رفتاری مشابه با توربین‌های هیدرولیک دارد. پمپ‌ها که نگهداری آسانی دارند و بر خلاف سایر ماشین‌های معمولی نیاز به ساخت طبق مشخصات مشتری دارند، در اندازه‌ها و کارایی‌های مختلف در سراسر جهان به‌طور گسترده در دسترس هستند (Pourjabian et al., 2019; Satish et al., 2021; Zhang et al, 2022). به عنوان نوعی ماشین‌آلات هیدرولیکی که با ساختار ساده و عملکرد کاربرپسند مشخص می‌شود، نویدبخش کاربرد در سیستم‌های بازیابی انرژی ضایعات صنعتی است (Sun et al., 2025). این ایده نوآورانه، در مهندسی مکانیک و تبدیل انرژی به منظور بهره‌برداری بهینه از تجهیزات موجود و تولید انرژی سبز مورد توجه واقع شده است (Kusakana., 2014).

کمتر از صد سال است که فن‌آوری استفاده از پمپ‌توربین جهت تولید برق استفاده شده است (Jain and Patel., 2014). با این وجود، پیشرفت‌هایی در فن‌آوری کنترل دستگاه‌های برقی، مانند کنترل سرعت چرخش و گشتاور ایجاد کرده‌اند که امکان استفاده از پمپ‌ها در حالت معکوس جهت تولید برق را فراهم کرده‌اند (Fernández et al., 2004). شرکت‌های سازنده پمپ به طور کلی منحنی عملکرد پمپ در حالت توربینی را فراهم نمی‌کنند (Williams., 1994). از این رو یکی از چالش‌های اصلی برای استفاده پمپ در نیروگاه‌های برق آبی کوچک، یافتن منحنی عملکرد پمپ در حالت توربینی خواهد بود (Barbarelli et al., 2016).

یافتن عملکرد پمپ در حالت توربینی شامل دو مرحله است: ۱- یافتن نقطه بیشترین بازده ۲- یافتن کل منحنی عملکرد پمپ (Tahani et al., 2020). پمپ گریز از مرکز به پمپی اطلاق که مایع را با نیروی گریز از مرکز تولید شده توسط چرخش پروانه حمل کند، این ماشین‌ها را می‌توان به طور

تحلیل تأثیر فشار خروجی، ارتفاع آب سد، و بررسی ترکیب‌های مختلف از پمپ‌توربین‌های موازی انجام گرفته است. نوآوری این تحقیق در استفاده از پمپ‌های سانتریفیوژ متداول به عنوان توربین در یک سامانه واقعی انتقال آب شهری است، به گونه‌ای که ضمن بازیافت انرژی مازاد موجود در خط انتقال سد شهرچای، سیستم قادر است هم‌زمان نقش تولید انرژی الکتریکی و تنظیم فشار شبکه را ایفا کند. همچنین در این پژوهش، تحلیل عملکرد هشت پمپ‌توربین موازی در سه حالت هیدرولیکی (کم‌آبی، نرمال و پرآبی) و در سه فشار خروجی مختلف (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ بار فشار استاندارد) انجام شده است که ترکیب این عوامل، دید جامع و کاربردی نسبت به رفتار واقعی نیروگاه فراهم می‌آورد.

۲- رابطه‌های حاکم

هدف این مطالعه، شناسایی پیکربندی بهینه نیروگاه برق سد شهرچای با در نظر گرفتن شرایط متغیر هد و جریان است. در این پژوهش، از روش چاپالاز برای پیش‌بینی منحنی عملکرد پمپ‌ها در حالت توربین استفاده شده است. دلیل انتخاب روش چاپالاز آن است که این روش بر اساس آزمایش‌های تجربی انجام‌شده بر روی حدود ۸۰ درصد از پمپ‌ها با سرعت مخصوص بین ۱۰ تا ۱۱۰ توسعه یافته است. این روش کلیه روابط حاکم بر محاسبه توان، هد، سرعت مخصوص و ضرایب تبدیل مربوط به هد و دبی به منظور تعیین بهترین نقطه عملکرد در بازه کاری توربین ارائه می‌دهد (Chapallaz et al., 1992; Liu et al., 2019). برای محاسبه نقطه کاری، ابتدا لازم است منحنی سیستم تعیین شود. سپس با یافتن نقطه تقاطع منحنی سیستم و منحنی هد-دبی، نقطه کاری نیروگاه مشخص خواهد شد. بدین منظور، به‌منظور محاسبه منحنی سیستم، محاسبه افت انرژی امری ضروری است؛ از این‌رو، از رابطه داری-ویسباخ (رابطه ۱) برای تعیین افت کل استفاده گردید. در این مطالعه، افت کل برابر با ۴ متر محاسبه شد.

$$h_l = \frac{f l v^2}{d 2g} \quad (1)$$

گسترده در برق، متالورژی و سایر صنایع برای انتقال دوغاب‌های حاوی ذرات جامد استفاده کرد (Zhang et al., 2022). هم‌زمان با بحران انرژی در جهان، در کشور ما نیز با توجه به اولویت برنامه ششم (اقتصاد مقاومتی و رسیدن به توسعه پایدار اقتصادی) مدیریت انرژی اهمیتی دوچندان یافته است. با توجه به گستردگی سدها در داخل کشور و موقعیت جغرافیایی آن‌ها، نصب توربین‌های تولید انرژی الکتریسیته راهکاری در جهت تولید انرژی از این منابع خواهد بود. بنابراین با توجه به اینکه در کشور تحقیقات اندکی در زمینه استفاده تولید انرژی برق از نیروگاه‌های برق‌آبی پمپ‌توربینی صورت گرفته، در پژوهش حاضر ضمن مطالعه منابع موجود در زمینه تولید انرژی برق از آب، اقدام به طراحی نیروگاه برق‌آبی کوچک جهت نصب در سد شهرچای ارومیه با استفاده از تکنولوژی پمپ‌توربین شده است.

با توجه به افزایش مصرف انرژی و ضرورت استفاده از منابع تجدیدپذیر، بهره‌گیری از انرژی پتانسیل موجود در شبکه‌های انتقال آب می‌تواند راهکاری مؤثر در جهت کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی باشد. در سامانه‌های انتقال آب، معمولاً اختلاف ارتفاع و فشار مازاد توسط شیرهای فشارشکن تلف می‌شود. در حالی که با استفاده از پمپ‌های سانتریفیوژ به‌صورت توربین، این انرژی می‌تواند به برق تبدیل گردد. در سد شهرچای ارومیه، اختلاف تراز آب مخزن و فشار خروجی به تصفیه‌خانه شماره دو، ظرفیت مناسبی برای تولید برق‌آبی فراهم کرده است.

مسئله اصلی پژوهش حاضر، بررسی عملکرد و بازده پمپ‌توربین‌ها در شرایط مختلف فشار خروجی و ارتفاع آب سد و انتخاب بهینه تعداد پمپ‌ها در حالت موازی است تا ضمن تأمین دبی مورد نیاز شبکه، بیشترین توان و بازده حاصل شود. هدف اصلی این پژوهش، طراحی و تحلیل فنی نیروگاه برق‌آبی پمپ‌توربینی برای سد شهرچای ارومیه و بررسی رفتار عملکردی پمپ‌توربین‌های سانتریفیوژ در شرایط هیدرولیکی مختلف است. این مطالعه با هدف دستیابی به بیشترین بازدهی و توان خروجی ممکن، در کنار حفظ فشار لازم برای تصفیه‌خانه شماره دو ارومیه انجام شده است. برای این منظور، انتخاب نوع پمپ مناسب،

η_p محاسبه شد.

با بهره‌گیری از سرعت مخصوص پمپ و نمودارهای ضرایب تبدیل، ضرایب تبدیل هد و دبی تعیین گردیدند؛ به طوری که ضریب تبدیل هد برابر با $c_h = 1/32$ و ضریب تبدیل دبی برابر با $c_q = 1/25$ به دست آمد.

اعمال ضرایب تبدیل هد و دبی بر روی هد طراحی و دبی در حالت توربینی، امکان محاسبه متغیرهای عملکردی پمپ در بهترین نقطه بازده و در سرعت پیشنهادی توربین را فراهم ساخت. بر اساس این ضرایب و با استفاده از روابط (۵) و (۶) (Chapallaz et al, 1992)، هد پمپ برابر با ۲۶ m و دبی آن معادل $0.256 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ محاسبه گردید. در نهایت، با در نظر گرفتن این مقادیر، پمپ مناسب از میان محصولات شرکت‌های سازنده انتخاب خواهد شد.

$$h_{np(nt)} = \frac{h_{nt}}{c_h} \quad (5)$$

$$q_{np(nt)} = \frac{q_{nt}}{c_q} \quad (6)$$

که در روابط (۵) و (۶) $h_{np(nt)}$ هد پمپ در حالت توربینی (متر)، h_{nt} هد توربین (متر)، c_h ضریب تبدیل هد و $q_{np(nt)}$ دبی پمپ در حالت توربینی و c_q ضریب تبدیل دبی است.

از آنجا که در اغلب موارد، سرعت نامی پمپ (n_p) با سرعت توربین پیشنهادی (n_t) یکسان نیست، لازم است مقادیر h_{np} و q_{np} مطابق با روابط (۷) و (۸) به شرایط جدید هد و دبی متناظر با سرعت اسمی پمپ تبدیل شوند (اصلاحیه هد و دبی انجام گیرد). پس از انجام این اصلاحیه، هد برابر با 24.29 m و دبی معادل $0.89/0.88 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ محاسبه گردید.

$$h_{np(np)} = h_{np(nt)} \left(\frac{n_p}{n_t}\right)^2 \quad (7)$$

$$q_{np(np)} = q_{np(nt)} \left(\frac{n_p}{n_t}\right) \quad (8)$$

که $h_{np(np)}$ هد پمپ در حالت پمپی (m)، $h_{np(nt)}$ هد پمپ در حالت توربینی (m)، n_p سرعت چرخشی پروانه

که h_t افت هد، f ضریب استکاک داریسی، l : طول لوله، d : قطر لوله، v : سرعت سیال درون لوله، g : شتاب گرانش می‌باشند.

$$h_1 - h_{l,total} - h_2 = h_t \quad (2)$$

که h_1 : میانگین تراز سال‌های آماری سد شهرچای ارومیه (m)، $h_{l,total}$: افت هد کل (m)، h_t : هد طراحی نیروگاه (m)، h_2 : تراز استقرار توربین‌ها می‌باشد (m).

در مرحله طراحی، ابتدا لازم است سیستم از حالت توربینی به حالت پمپی تبدیل شود. بدین منظور، دبی مورد نیاز برای هر توربین با تقسیم دبی کل بر تعداد توربین‌ها محاسبه گردید و دبی هر یک از توربین‌ها برابر با $0.32 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ به دست آمد. سپس، سرعت مخصوص توربین با استفاده از رابطه (۳) برابر با $59/6 \text{ Rev.min}^{-1}$ محاسبه شد

$$n_q = n \frac{q^{1/2}}{h^{3/4}} \quad (3)$$

در رابطه (۳) n_q : سرعت مخصوص، n : سرعت دورانی پره (Rev.min^{-1})، q : دبی (m^3s^{-1})، h : هد (m) می‌باشند.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد، با استفاده از جریان موجود برای توربین و تقسیم آن بر ضریب تبدیل میانگین $1/3$ ، مقادیری با دقت کافی برای انجام پیش‌انتخاب پمپ حاصل می‌شود. بر اساس رابطه (۴)، دبی اسمی پمپ پیش‌انتخابی برابر با $0.246 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ محاسبه گردید.

$$q_{np} = \frac{q_{nt}}{1/3} \quad (4)$$

که q_{np} : دبی اسمی پمپ (m^3s^{-1})، q_{nt} : دبی اسمی توربین می‌باشد (m^3s^{-1}).

در این مرحله، محاسبه بازده پمپ انجام می‌گیرد. با استفاده از سرعت مخصوص و دبی اسمی پمپ، بازده کل آن به سادگی به دست آمده و در مراحل بعدی، به‌ویژه در انتخاب پمپ مناسب از کاتالوگ شرکت‌های سازنده، مورد استفاده قرار می‌گیرد. بازده پمپ در این مطالعه برابر با 86%

بیشترین مقدار دبی برابر با $0/377 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ، کمترین مقدار هد برابر با $28/5 \text{ m}$ و کمترین مقدار دبی برابر با $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ $0/325$ است.

$$h_{nt.max(np)} = c_{h.max} h_{np} \quad (9)$$

$$q_{nt.max(np)} = c_{q.max} q_{np} \quad (10)$$

$$h_{nt.min(np)} = c_{h.min} h_{np} \quad (11)$$

$$q_{nt.min(np)} = c_{q.min} q_{np} \quad (12)$$

که c_h و c_q به ترتیب ضرایب هد و دبی می باشند.

در این مرحله، اصلاحیه هد و دبی توربین با استفاده از سرعت اسمی پمپ انجام می‌شود. از آنجا که هد و دبی برای بیشترین و کمترین مقادیر محاسبه شده‌اند، اصلاحیه‌ها نیز به ترتیب برای بیشترین مقدار هد برابر با $37/29 \text{ m}$ ، بیشترین مقدار دبی $0/39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ، کمترین مقدار هد m $30/51$ و کمترین مقدار دبی $0/33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ به دست آمد.

پس از تعیین مقادیر اصلاح شده، توان خروجی هر توربین طراحی شده محاسبه می‌شود. این محاسبه بر اساس رابطه (۱۲) انجام گردید.

$$p_{nt} = \rho g q_{nt} h_{nt} \eta_t \quad (13)$$

که در آن؛ ρ : چگالی سیال (kg.m^{-3})، g : شتاب گرانش (m.s^{-2})، h_{nt} : هد اسمی توربین (m)، q_{nt} : دبی اسمی توربین ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)، η_t : بازده در نقطه مورد نظر (%) است.

توان نیروگاه در دو حالت بیشینه و کمینه با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه شد. در نقاط کاری، بیشینه توان برابر با $118/414 \text{ kw}$ و کمینه توان برابر با $83/475 \text{ kw}$ به دست آمد.

نیروگاه مورد مطالعه شامل ۸ توربین است، بنابراین برای محاسبه توان کل نیروگاه، توان محاسبه شده هر توربین در ۸ ضرب گردید. بر این اساس، بیشینه توان کل نیروگاه برابر با $947/312 \text{ kw}$ و کمینه توان کل برابر با $667/8 \text{ kw}$

پمپ (Rev.min^{-1})، n_t : سرعت چرخشی رانر توربین (Rev.min^{-1})، $q_{np(np)}$: دبی پمپ در حالت پمپی ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) و $q_{np(nt)}$: دبی پمپ در حالت توربینی است. ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)

۱-۲- انتخاب پمپ مناسب

با توجه به مقادیر محاسبه شده و با استفاده از کاتالوگ شرکت پمپیران، پمپ مناسب برای این تحقیق انتخاب گردید. پمپ انتخابی از نوع $250-33$ پمپیران با سرعت دورانی $1450 \text{ Rev.min}^{-1}$ و دارای هد ارزیابی شده برابر با 24 m ، دبی ارزیابی شده برابر با $0/283 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ و حداکثر بازده 86% است. پمپ انتخاب شده به عنوان توربوماشین مورد نظر، از حالت پمپی به حالت توربینی تبدیل شده و سپس بازده و توان توربین آن محاسبه و مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲-۲- رسیدن از حالت پمپ به حالت توربین

برای تبدیل عملکرد پمپ از حالت پمپی به حالت توربینی، دسترسی به منحنی‌های هد-دبی، توان-دبی و بازده-دبی ضروری است. در این راستا، مشخصات پمپ انتخابی نقش تعیین کننده‌ای دارد و لازم است سرعت مخصوص پمپ و ضرایب تبدیل هد و دبی محاسبه شوند.

در این مطالعه، ضریب تبدیل هد برابر با $1/32$ ، ضریب تبدیل دبی برابر با $1/24$ و سرعت مخصوص پمپ معادل $71/16$ به دست آمد. به منظور تخمین محدوده عملکرد ممکن در حالت توربینی، تبدیل باید دو بار انجام گیرد: یک بار با استفاده از حداقل ضرایب تبدیل و بار دیگر با فاکتورهای حداکثر. این تغییرات شامل $\pm 10\%$ برای ضریب تبدیل هد و $7/5\% \pm 7/5\%$ برای ضریب تبدیل دبی هستند. بر این اساس، بیشینه ضریب تبدیل هد $1/425$ ، کمینه آن $1/188$ ، بیشینه ضریب تبدیل دبی $1/333$ و کمینه ضریب تبدیل دبی $1/147$ محاسبه گردید. برای محاسبه هد و دبی طراحی توربین در سرعت اسمی پمپ، از مقادیر حداقل و حداکثر ضرایب تبدیل استفاده شد تا شرایط کاری در دو حد نهایی مشخص گردد. نتایج حاصل از روابط (۹) تا (۱۲) نشان می‌دهد که بیشترین مقدار هد برابر با $34/8 \text{ m}$

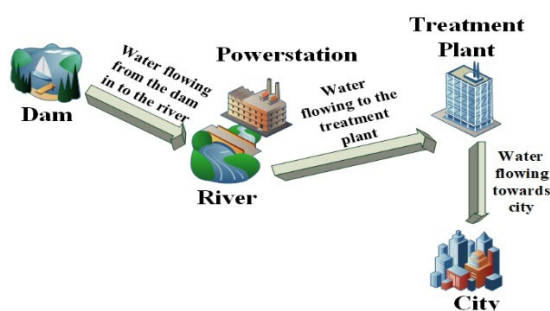


Fig. 1 Urban Water Transfer Cycle

شکل ۱ چرخه انتقال آب به شهر

جدول ۱ مشخصات سد شهرچای ارومیه

Table 1 Specifications Of Shahrchay Dam In Urmia

Specifications	Value
Normal Water Level	1580m
Average Water Level	1571.5m
Minimum Water Level	1563.7m
Turbine Elevation	1508m
Pipe Flow Rate	2.54 m ³ s ⁻¹

۳- نتایج و بحث

در این پژوهش، پس از انتخاب پمپ مناسب برای پروژه، گام مهم بعدی تهیه نمودارهای پمپ-توربینی است. بر این اساس، پس از انتخاب پمپ و انجام محاسبات دقیق، در نهایت نمودار پمپ-توربین برای یک پمپ-توربین خاص تهیه شد (شکل ۲).

این نمودار شامل منحنی هد-دبی است و از سه منحنی تشکیل شده است؛ یکی از این منحنی‌ها عملکرد پمپ-توربین را در بیشترین مقدار نشان می‌دهد و منحنی‌های دیگر وضعیت عملکرد در شرایط متفاوت را مشخص می‌کنند. منحنی دوم عملکرد پمپ-توربین را در کمترین مقدار نشان می‌دهد، در حالی که منحنی سوم نمودار، منحنی سیستم موجود در مسیر انتقال سیال را مشخص می‌کند. نقطه برخورد منحنی پمپ-توربین با منحنی سیستم، نقطه کاری سیستم را تعیین می‌کند.

برای دستیابی به عملکرد بهینه، این نقطه کاری باید همواره در شرایط اضافه بار قرار گیرد، که این موضوع به وضوح در شکل ۲ قابل مشاهده است.

محاسبه شد.

۲-۳- مورد مطالعاتی: سد شهرچای ارومیه

تصفیه‌خانه شماره دو ارومیه، که یکی از جدیدترین تصفیه‌خانه‌های آب ایران به شمار می‌آید، در جنوب غربی شهر ارومیه و در ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا در منطقه گلشهر واقع شده است (شماتیک مورد مطالعه اضافه گردد). ظرفیت اسمی این تصفیه‌خانه برابر با $2/1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ است که از این مقدار، $1/0.5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ مربوط به فاز اول تصفیه‌خانه بوده و در حال حاضر آماده بهره‌برداری است.

آب خام ورودی این تصفیه‌خانه از سد شهرچای تأمین می‌شود. انتقال آب از محل شیرخانه سد به تصفیه‌خانه از طریق یک کانال بتنی به طول ۱۱ km و یک خط لوله فولادی به طول ۶ km (جمعاً ۱۷ km) انجام شده و آب از ضلع غربی با روش ثقلی وارد تصفیه‌خانه می‌شود. سد شهرچای ارومیه، یک سد خاکی-سنگریزه‌ای با هسته رسی است که با ارتفاع ۸۴ m از بستر سنگ و طول تاج ۵۵۰ m بر روی رودخانه شهرچای و در فاصله ۱۵ km جنوب غربی و بالادست شهر ارومیه احداث شده است. هدف اصلی ساخت این سد، تأمین آب شرب و صنعتی شهر ارومیه و همچنین تأمین نیاز آبی اراضی کشاورزی پایین‌دست سد است. برای انتقال آب از سد شهرچای به تصفیه‌خانه شماره دو، از یک خط انتقال به قطر ۱۶۰۰ mm استفاده شده است. حداکثر دبی قابل انتقال توسط این خط حدود $3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ می‌باشد. با توجه به تدابیر اندیشیده‌شده، می‌توان با احداث یک نیروگاه برق آبی در مسیر این خط انتقال، از پتانسیل موجود بهره‌برداری کرد و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل نمود (شکل ۱). محل پیشنهادی این نیروگاه برق آبی در مجاورت روستای نوشان اولیا و بر روی رودخانه شهرچای قرار دارد. موقعیت جغرافیایی آن $44^{\circ}55'6''$ طول شرقی و $37^{\circ}27'26''$ عرض شمالی تعیین شده است. مطابق با اطلاعات میدانی صورت گرفته، مشخصات سد شهرچای ارومیه با استفاده از گزارشات الکترومکانیکال نیروگاه برق آبی سد شهرچای ارومیه و شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی به شرح جدول ۱ خواهد بود

برای استخراج توان تولیدی پمپ‌توربین طراحی شده، از نمودار توان-دبی استفاده خواهد شد (شکل ۴).

شکل ۳ نمایانگر بازده پمپ‌توربین مورد نظر در حالت‌های بیشینه و کمینه و در دبی‌های مختلف است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بازده در هر دو حالت بیشینه و کمینه در بهترین نقطه عملکرد، برابر $\eta = 0.83$ محاسبه گردید.

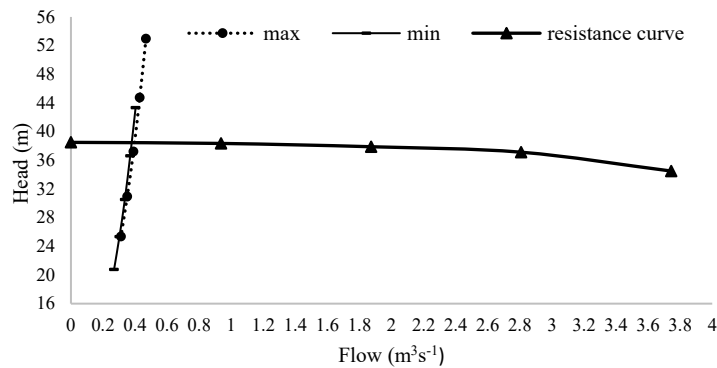


Fig. 2 Pump-Turbine Head-Flow Curve

شکل ۲ نمودار هد-دبی پمپ‌توربین

در تحقیق حاضر، نیروگاه پمپ‌توربینی مورد نظر از هشت پمپ‌توربین موازی تشکیل شده است (شکل ۵). بر این اساس، نمودار (شکل ۲) با در نظر گرفتن فشار استاندارد خروجی ۲/۵ بار، برای هشت توربین بسط داده شده و نمودار نهایی در (شکل ۶) ارائه گردیده است. با توجه به اتصال پمپ‌ها در شرایط موازی، دبی هر پمپ‌توربین اولیه در بارهای آبی یکسان، از عدد دو تا هشتضرب شده و نمودار (شکل ۶) حاصل شده است. سیستم فوق در شرایط کاری بین حالت‌های بیشینه و کمینه عملکرد می‌کند، که این موضوع در تحلیل عملکرد کل نیروگاه مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس، حالت میانگین بین بیشینه و کمینه برای نمودارهای هد-دبی، بازده-دبی و توان-دبی در نظر گرفته شده و در مراحل بعدی تحلیل‌ها از این مقادیر استفاده خواهد شد.

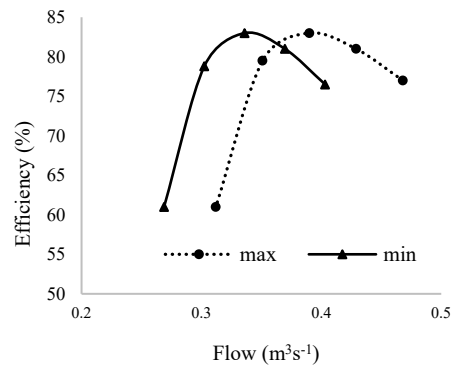


Fig. 3 Pump-Turbine Efficiency-Flow Curve

شکل ۳ نمودار بازده-دبی پمپ‌توربین

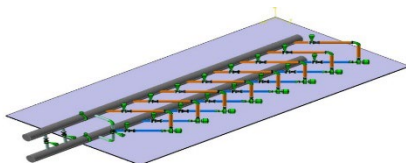


Fig. 5 Schematic of 8 Parallel Pump-Turbine

شکل ۵ شماتیک ۸ پمپ‌توربین موازی

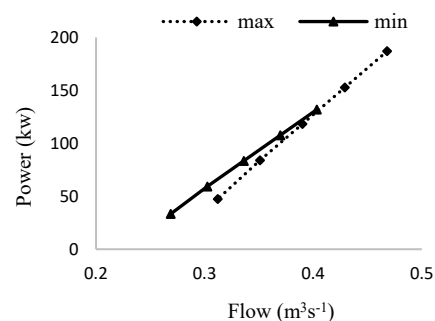


Fig. 4 Pump-Turbine Power-Flow Curve

شکل ۴ نمودار توان-دبی پمپ‌توربینی

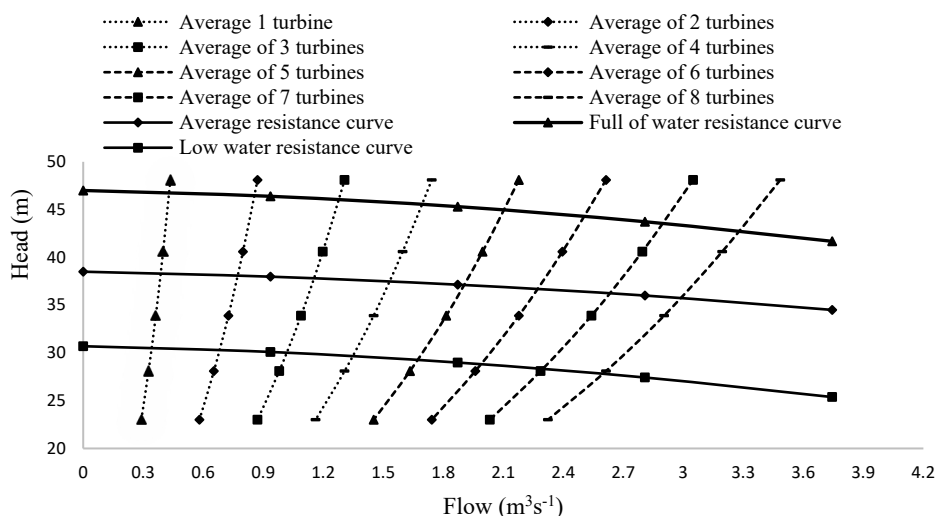


Fig. 6 Average Maximum And Minimum Head-Flow Curve At 2.5 Bar Outlet Pressure

شکل ۶ نمودار میانگین حالت بیشینه و کمینه هد-دبی در ۲/۵ بار فشار استاندارد خروجی

برابر با $2/59 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ، توان کل خروجی $545/92 \text{ kw}$ و بازده کل مجموعه برابر با ۷۷٪ خواهد بود. در صورتی که با نظر کارفرما و بر اساس تغییر سالیانه دبی آب شرب، نیاز به عبور دبی‌های متفاوت باشد، می‌توان بین یک تا هشت پمپ‌توربین را به صورت موازی به کار گرفت.

در این حالت، بازه دبی از $0/34 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ تا $2/59 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و توان کل از $64/84 \text{ kw}$ تا $545/92 \text{ kw}$ تغییر خواهد کرد. بازده کل نیز بین ۸۲٪ تا ۷۷٪ متغیر است. دلایل کاهش بازده شامل:

۱. دور شدن سیستم از بهترین نقطه بازدهی
۲. کاهش ارتفاع آب سد و در نتیجه عدم وجود فشار کافی

با توجه به موازی بودن پمپ‌ها، دبی مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها از $30/5 \text{ m}$ تا $27/9 \text{ m}$ متر تغییر خواهد کرد. در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه در بازه $0/7 \text{ Mw.h}$ تا $4/52 \text{ Mw.h}$ متغیر خواهد بود (جدول ۲).

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که هنگامی که آب سد شهرچای در شرایط متوسط (نه پرآبی و نه کم‌آبی) قرار دارد

در این تحقیق، متغیرهای مورد بررسی شامل موارد زیر است:

۱. ارتفاع آب سد
۲. فشار خروجی به سمت تصفیه‌خانه شماره دو ارومیه

با تغییر ارتفاع آب سد، منحنی مقاومت‌ها تغییر می‌کند و سه حالت مقاومت شامل حالت پرآبی، حالت متوسط و حالت کم‌آبی را ایجاد می‌نماید که در نمودار هد-دبی به وضوح مشاهده می‌شود. فشار استاندارد خروجی سیستم نیروگاه برای تأمین آب ورودی به تصفیه‌خانه شماره دو ارومیه به صورت پایه‌ای برابر با ۲/۵ بار فشار استاندارد در نظر گرفته شد. با این حال، با توجه به تغییرات جمعیت در آینده و پیش‌بینی نظر کارفرما مبنی بر کاهش یا افزایش فشار استاندارد خروجی، دو فشار دیگر یعنی ۱/۵ و ۳/۵ بار فشار استاندارد نیز مورد بررسی قرار گرفتند

۱-۳- تحلیل نیروگاه طراحی شده برای ۲/۵ بار فشار استاندارد خروجی

نتایج ارائه‌شده در جدول ۲ نشان می‌دهد که در دوران کم‌آبی و با فشار خروجی ۲/۵ بار فشار استاندارد، و با قرارگیری هشت پمپ‌توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه

از $119/07 \text{ kw}$ تا $872/24 \text{ kw}$ تغییر خواهد کرد. با توجه به موازی بودن پمپ‌ها، دبی کل مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها در بازه $38/3 \text{ m}$ تا $35/9 \text{ m}$ متغیر خواهد بود. در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه بین $98/0 \text{ Mw.h}$ تا $22/7 \text{ Mw.h}$ تغییر خواهد کرد

مطابق **جدول ۴**، هنگامی که آب سد شهرچای در شرایط پرایبی (نرمال) قرار دارد و فشار خروجی برابر با $2/5$ بار است، با قرارگیری هشت پمپ‌توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه برابر با $3/28$ مترمکعب بر ثانیه، توان کل خروجی $872/24$ کیلووات و بازده مجموعه 83% خواهد بود. یکی از ویژگی‌های مهم شرایط پرایبی، ارتفاع و فشار بالای آب است که موجب دور شدن ناگهانی از بهترین نقطه بازدهی شده و سبب کاهش بازده می‌گردد؛ در نتیجه، تنها در صورت بهره‌برداری از هشت پمپ در شرایط پرایبی، بازده کل.

و فشار خروجی برابر با $2/5$ بار فشار استاندارد خروجی است، با قرارگیری هشت پمپ‌توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه برابر با $2/98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ، توان کل خروجی $872/24 \text{ kw}$ و بازده مجموعه 83% خواهد بود. ویژگی قابل توجه این شرایط آن است که در صورت عدم کارکرد یکی از پمپ‌توربین‌ها و تولید توان توسط هفت پمپ‌توربین، بازده کل مجموعه همچنان 83% باقی می‌ماند، هرچند دبی کل عبوری از نیروگاه به $2/63 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ کاهش می‌یابد. یکی دیگر از نکات مهم این است که تحت این شرایط، بازده بالای 80% برای تولید توان نیروگاه با تعداد مختلف پمپ‌توربین‌ها حفظ می‌شود؛ به طوری که حتی با یک تا هشت پمپ‌توربین، بازده بالای 80% مشاهده گردید. همچنین، در صورت نیاز به عبور دبی‌های متفاوت با توجه به تغییر سالیانه دبی آب شرب و نظر بهره‌بردار، می‌توان بین یک تا هشت پمپ‌توربین را به صورت موازی به کار گرفت. در این حالت، بازه دبی از $0/39 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ تا $2/98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و توان کل

جدول ۲ نتایج تراز حداقل (کم‌آبی) برای $2/5$ بار فشار استاندارد خروجی

Table 2 Results Of Minimum Water Level At 2.5 Bar Outlet Pressure

No.	Total flow (m3s-1)	Flow rate of each pump (m3s-1)	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.34	0.34	30.5	84.64	84.64	700819	82
2	0.68	0.34	30.2	82.53	165.07	1366813	81.7
3	1.02	0.34	30	81.55	244.65	2025702	81.5
4	1.35	0.33	29.7	79.84	319.38	2644500	81.2
5	1.65	0.33	29.1	75.96	379.84	3145034	80.3
6	1.99	0.33	28.9	75.49	452.94	3750343	80.3
7	2.29	0.32	28.2	71.6	501.2	4149936	79.15
8	2.59	0.32	27.9	68.24	545.92	4250218	77.2

جدول ۳ نتایج تراز میانگین برای $2/5$ بار فشار استاندارد خروجی

Table 3 Results Of Average Water Level At 2.5 bar Outlet Pressure

No.	Total flow (m3s-1)	Flow rate of each pump (m3s-1)	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.39	0.39	38.3	119.07	119.07	985900	81.9
2	0.77	0.38	38	118.11	263.22	1955902	82.5
3	1.15	0.38	38	118.4	354.9	2938572	82.5
4	1.53	0.38	37.5	116.21	464.84	3848875	82.7
5	1.90	0.38	37.14	114.86	574.3	4755204	82.75
6	2.27	0.37	36.9	113.29	679.74	5628247	82.8
7	2.63	0.37	36.1	110.52	773.64	6405739	83
8	2.98	0.37	35.9	109.03	872.24	7222147	83

۲-۳- تحلیل نیروگاه طراحی شده برای ۳/۵ bar فشار استاندارد خروجی

طبق نمودار **شکل ۷**، هنگامی که فشار خروجی نیروگاه برابر با ۳/۵ بار است، نیروگاه تنها در شرایط هد بیش از ۲۳ m قادر به تولید توان و ادامه کار می‌باشد. در هد کمتر از ۲۳ m، هیچ توانی تولید نشده و نیروگاه قادر به عملکرد نخواهد بود. با توجه به نتایج **جدول ۵**، افزایش فشار خروجی از ۲/۵ به ۳/۵ بار فشار استاندارد باعث کاهش ارتفاع و فشار به میزان ۱۰ واحد شده است. در شرایط پرآبی سد شهرچای و فشار خروجی ۳/۵ بار فشار استاندارد، با قرارگیری هشت پمپ توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه برابر با m^3s^{-1} ۲/۸۸، توان کل خروجی kw ۷۸۴/۶۱ و بازده مجموعه.

مجموعه به حدود ۸۰٪ خواهد رسید. در صورتی که با توجه به تغییر سالیانه دبی آب شرب، نیاز به عبور دبی‌های متفاوت باشد، می‌توان بین یک تا هشت پمپ را به صورت موازی به کار گرفت.

در این حالت، بازه دبی از m^3s^{-1} ۰/۴۳ تا m^3s^{-1} ۳/۲۸ و توان کل از ۱۵۳/۱۳ تا ۱۱۲۷/۵ kw تغییر خواهد کرد. با توجه به موازی بودن پمپ‌ها، دبی کل مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها در بازه ۴۶/۹ تا ۴۳/۸ قرار خواهد گرفت. در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه بین ۱/۲۶ m تا ۹/۳۳ m و بازده کل بین ۷۷/۴٪ تا ۸۰٪ متغیر خواهد بود.

جدول ۴ نتایج تراز نرمال برای ۲/۵ بار فشار استاندارد خروجی

Table 4 Results Of Normal Water Level At 2.5 Bar Outlet Pressure

No.	Total flow (m3s-1)	Flow rate of each pump (m3s-1)	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.43	0.43	46.9	153.13	153.13	1267883	77.4
2	0.85	0.42	46.5	151.15	302.3	2503061	77.6
3	1.28	0.42	46	149.94	449.82	3724510	78
4	1.69	0.42	45.6	148.16	592.64	4907059	78.3
5	2.10	0.42	45.6	146.07	730.04	6044723	78.6
6	2.50	0.41	44.3	143.70	862.25	7139413	79.3
7	2.89	0.41	43.5	140.46	983.25	8141293	79.7
8	3.28	0.41	43.8	140.93	1127.5	9335468	80

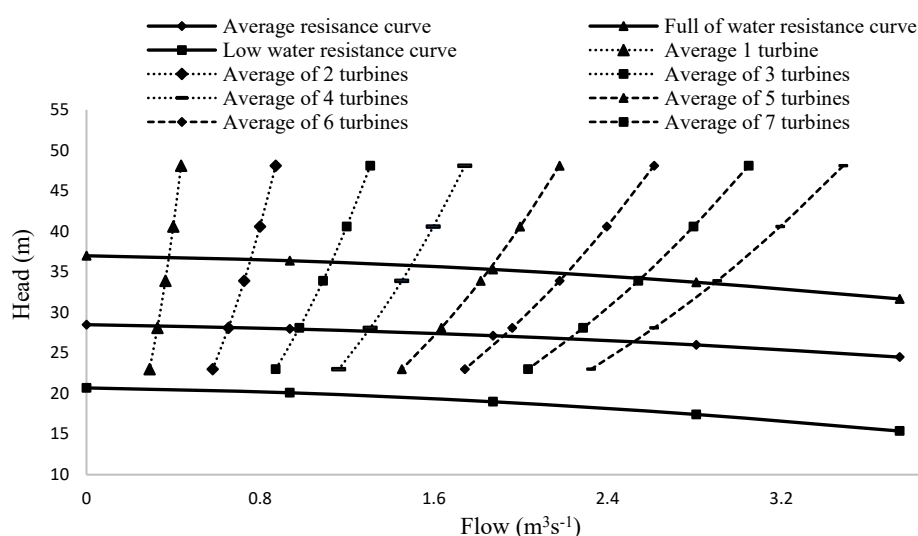


Fig. 7 Average Maximum And Minimum Head-Flow Curve At 3.5 Bar Outlet Pressure

شکل ۷ نمودار میانگین حالت بیشینه و کمینه هد-دبی در ۳/۵ بار فشار استاندارد خروجی

خواهد کرد. در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه بین ۰/۹۴ تا ۶/۴۹ Mw.h متغیر خواهد بود

نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که هنگامی که آب سد شهرچای در شرایط متوسط قرار دارد و فشار خروجی برابر با ۳/۵ بار فشار استاندارد است، با قرارگیری هشت پمپ‌توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه برابر با $۷۴/۵ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ، توان کل خروجی ۴۸۸ kw و بازده مجموعه ۷۴/۵٪ خواهد بود. ویژگی مهم در این شرایط، پایین بودن ارتفاع و فشار آب است که موجب دور شدن سیستم از بهترین نقطه بازدهی شده و سبب کاهش بازده به کمتر از ۸۰٪ می‌گردد. در این شرایط، تنها در صورت بهره‌برداری از یک پمپ‌توربین، بازده کل مجموعه به حدود ۸۰٪ خواهد رسید. با توجه به تغییر سالیانه دبی آب شرب و نیاز به عبور دبی‌های متفاوت، می‌توان بین یک تا هشت پمپ‌توربین را به صورت موازی به کار گرفت. در این حالت، بازه دبی از $۰/۳۳ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ تا $۲/۲۵ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و توان کل از ۷۳/۸۱ kw تا ۴۸۸kw تغییر خواهد کرد....

۸۲/۹٪ خواهد بود. ویژگی قابل توجه این شرایط آن است که در صورت عدم کارکرد یک تا سه پمپ‌توربین، بازده کل مجموعه همچنان در بیشترین مقدار و برابر با ۸۳٪ باقی می‌ماند. دبی کل عبوری از نیروگاه در این حالت‌ها به ترتیب برابر با $۶۳/۲ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ برای هفت پمپ، $۲۱/۲ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ برای شش پمپ و $۸۵/۱ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ برای پنج پمپ است. یکی دیگر از نکات مهم این است که تحت شرایط یاد شده، بازده بالای

۸۰٪ برای تولید توان نیروگاه با تعداد مختلف پمپ‌توربین‌ها حفظ می‌شود؛ به طوری که با یک تا هشت پمپ‌توربین، بازده بالای ۸۰٪ مشاهده گردید. همچنین، در صورت نیاز به عبور دبی‌های متفاوت با توجه به تغییر سالیانه دبی آب شرب و نظر بهره‌بردار، می‌توان بین یک تا هشت پمپ‌توربین را به صورت موازی به کار گرفت. در این حالت، بازه دبی از $۰/۳۸ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ تا $۲/۸۸ \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و توان کل از ۱۱۳/۷۹ kw تا ۷۸۴/۶۱ kw کیلووات تغییر خواهد کرد. با توجه به موازی بودن پمپ‌ها، دبی کل مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها در بازه ۳۷ m تا ۳۳/۵ m تغییر

جدول ۵ نتایج تراز نرمال برای ۳/۵ بار فشار استاندارد خروجی

Table 5 Results Of Normal Water Level At 3.5 Bar Outlet Pressure

No.	Total flow (m^3s^{-1})	Flow rate of each pump (m^3s^{-1})	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.38	0.38	37	113.79	113.79	942181.20	82.5
2	0.75	0.37	36.5	112.09	224.18	1856210	82.6
3	1.13	0.37	36	110.10	330.30	2734884	82.7
4	1.49	0.37	36	109.23	436.92	3617698	82.7
5	1.85	0.37	35	105.44	527.20	4365216	83
6	2.21	0.36	35	104.87	629.22	5209942	83
7	2.55	0.36	34	100.76	705.36	5840455	83
8	2.88	0.36	33.5	98.07	784.61	6496620	82.9

جدول ۶ نتایج تراز میانگین برای ۳/۵ بار فشار استاندارد خروجی

Table 6 Results Of Average Water Level At 3.5 Bar Outlet Pressure

Number	Total flow (m^3s^{-1})	Flow rate of each pump (m^3s^{-1})	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.33	0.33	28.5	73.81	73.81	611146.80	80
2	0.65	0.32	28	71.78	143.56	1188677	79.8
3	0.97	0.32	28	71.27	213.81	1770347	79.6
4	1.29	0.32	27.7	67.65	270.60	2240568	77.2
5	1.60	0.32	27.2	65.99	329.95	2731986	76.9
6	1.92	0.32	27	64.84	389.04	3221251	76.5
7	2.22	0.31	27	63.81	446.67	3698428	76
8	2.52	0.31	26.5	61	488	4040640	74.5

شدن سیستم از بهترین نقطه بازدهی و کاهش راندمان می‌گردد؛

در نتیجه، با کارکرد یک تا هفت پمپ‌توربین، بازده کل مجموعه کمتر از ۸۰٪ خواهد بود و تنها در صورت بهره‌برداری از هشت پمپ، راندمان کل مجموعه ۷۸/۵٪ خواهد بود. با توجه به تغییر سالیانه دبی آب شرب و نیاز به عبور دبی‌های متفاوت، می‌توان بین یک تا هشت پمپ‌توربین را به صورت موازی به کار گرفت. در این حالت، بازه دبی از $0.43 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ تا $3.37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ و توان کل از 157.37 kw تا 1171.28 kw متغیر خواهد بود. همچنین، با موازی بودن پمپ‌ها، دبی کل مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها در بازه ۴۸ m تا ۴۵ m قرار خواهد گرفت. در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه بین 9.69 Mw.h تا 1.3 و بازده کل نیروگاه بین ۷۶/۷۳٪ تا ۷۸/۵٪ متغیر خواهد بود.

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد که هنگامی که آب سد شهرچای در شرایط حداقل (کم‌آبی) قرار دارد و فشار خروجی برابر با ۱/۵ بار فشار استاندارد است، با قرارگیری هشت پمپ‌توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه برابر با $3.04 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ، توان کل خروجی 912.48 کیلووات و بازده مجموعه ۸۲/۷٪ خواهد بود.

با موازی بودن پمپ‌ها، دبی کل مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها در بازه 28.5 m تا 26.5 قرار خواهد گرفت. در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه بین 0.61 Mw.h تا 4.04 Mw.h و بازده کل نیروگاه بین ۷۴/۵٪ تا ۸۰٪ متغیر خواهد بود.

۳-۳- تحلیل نیروگاه طراحی شده در ۱/۵ bar فشار استاندارد خروجی

طبق نمودار شکل ۸، نیروگاه طراحی شده با فشار خروجی ۱/۵ بار فشار استاندارد تنها در محدوده هد بین 40.6 m تا 48.1 m قادر به تولید توان و ادامه کار می‌باشد. در هد بالاتر یا پایینتر از این محدوده، هیچ توانی تولید نشده و نیروگاه قادر به عملکرد نخواهد بود. دلیل این امر آن است که هیچ نقطه کاری در نمودار وجود ندارد و برای تولید توان توسط نیروگاه پمپ‌توربینی، وجود نقطه کاری ضروری است.

مطابق جدول ۷، هنگامی که آب سد شهرچای در شرایط متوسط قرار دارد و فشار خروجی برابر با ۱/۵ بار فشار استاندارد است، با قرارگیری هشت پمپ‌توربین در مدار، دبی عبوری از نیروگاه برابر با $3.37 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ، توان کل خروجی 1171.28 و بازده کل مجموعه ۷۸/۵٪ خواهد بود. ویژگی مهم این شرایط، ارتفاع و فشار آب بالاست که موجب دور

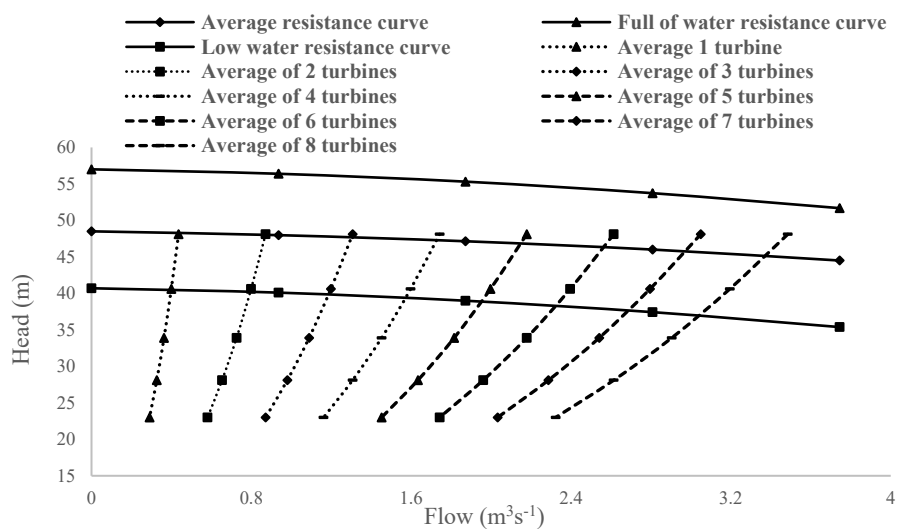


Fig. 8 Average Maximum And Minimum Head-Flow Curve At 1.5 Bar Outlet Pressure

شکل ۸ نمودار میانگین حالت بیشینه و کمینه هد-دبی در ۱/۵ بار فشار استاندارد خروجی

جدول ۷ نتایج تراز متوسط برای ۱/۵ بار فشار استاندارد خروجی

Table 7 Results Of Average Water Level At 1.5 Bar Outlet Pressure

No.	Total flow (m ³ s ⁻¹)	Flow rate of each pump (m ³ s ⁻¹)	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.43	0.43	48	157.38	157.38	1303106	76.73
2	0.87	0.43	4.10	157.71	315.42	2611678	76.73
3	1.30	0.43	47.50	155.15	465.45	3853926	76.90
4	1.73	0.43	47.50	155.18	620.72	5139562	77
5	2.14	0.42	47	153.92	769.60	6372288	78
6	2.56	0.42	46.50	151.76	910.56	7539437	78.10
7	2.97	0.42	46	149.81	1048.67	8682988	78.30
8	3.37	0.42	45	146.41	1171.28	9698198	78.50

جدول ۸ نتایج تراز حداقل برای ۱/۵ بار فشار خروجی

Table 8 Results Of Minimum Water Level At 1.5 Bar Outlet Pressure

No,	Total flow (m ³ s ⁻¹)	Flow rate of each pump (m ³ s ⁻¹)	Head of each pump (m)	Power of each pump (kw)	Total power (kw)	Annual production (kw.h)	Efficiency (%)
1	0.39	0.39	40.50	128.97	128.97	1067872	81.10
2	0.79	0.39	40.60	128.71	257.42	2131438	81.30
3	1.18	0.39	40	125.68	377.04	3121891	81.50
4	1.57	0.39	39	122.54	490.16	4058525	81.50
5	1.95	0.39	38.50	120.34	601.70	4982076	81.70
6	2.32	0.38	38.10	118.44	710.64	5884099	82.10
7	2.69	0.38	37.90	117.78	824.46	6826529	82.50
8	3.04	0.38	37	114.06	912.48	7555334	82.7

در نهایت، تولید سالیانه نیروگاه بین ۱/۰۶ Mw.h تا ۱/۰۶ Mw.h متغیر خواهد بود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، طراحی و ارزیابی نیروگاه برق‌آبی پمپ‌توربینی برای سد شهرچای ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی مطالعه، انتخاب پیکربندی بهینه پمپ‌توربین‌ها با در نظر گرفتن شرایط متغیر هد و جریان در طول سال است. برای پیش‌بینی عملکرد پمپ در حالت توربینی از روش تجربی چاپالاز استفاده گردید که به دلیل پوشش بازه وسیعی از سرعت‌های مخصوص (۱۰ تا ۱۱۰)، دقت بالایی در تخمین منحنی‌های هد-دبی و بازدهی دارد. در این تحقیق، پمپ مدل ۳۳-۲۵۰ پمپیران به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب و تبدیل آن از حالت پمپی به توربینی انجام شد. سپس با محاسبه ضرایب تبدیل هد و دبی، نمودارهای هد-دبی، توان-دبی و بازده-دبی استخراج و عملکرد سیستم

ویژگی قابل توجه این شرایط آن است که در صورت عدم کارکرد چهار یا پنج پمپ‌توربین و تولید توان توسط سه یا چهار پمپ، بازده کل مجموعه با هم برابر شده و حدود ۸۱/۵٪ خواهد بود. دبی کل عبوری از نیروگاه در این حالت‌ها به ترتیب برابر با ۱/۱۸ m³s⁻¹ برای سه پمپ و ۱/۵۷ m³s⁻¹ برای چهار پمپ است. یکی دیگر از نکات مهم این شرایط، حفظ بازده بالای ۸۰٪ برای تولید توان نیروگاه در تعداد مختلف پمپ‌توربین‌ها است؛

به‌طوری که با یک تا هشت پمپ‌توربین، بازده بالای ۸۰٪ مشاهده گردید. همچنین، در صورت نیاز به عبور دبی‌های متفاوت با توجه به تغییر سالیانه دبی آب شرب و نظر بهره‌بردار، می‌توان بین یک تا هشت پمپ‌توربین را به‌صورت موازی به کار گرفت. در این حالت، دبی کل از ۰/۳۹ m³s⁻¹ تا ۳/۰۴ m³s⁻¹ و توان کل از ۱۲۸/۹۷ kw تا ۹۱۲/۴۸ kw تغییر خواهد کرد. با توجه به موازی بودن پمپ‌ها، دبی کل مجموعه افزایش و هد کاهش می‌یابد؛ بنابراین، هد پمپ‌ها در بازه ۳۷ m تا ۴۰/۵ m قرار خواهد گرفت.

حاکمی از آن است که بازده سیستم در محدوده کاری بین ۷۷٪ تا ۸۳٪ متغیر بوده و در اکثر حالتها بالاتر از ۸۰٪ باقی می ماند. به طور کلی، استفاده از پمپ توربین ها در خطوط انتقال آب، علاوه بر بازیافت انرژی هیدرولیکی تلف شده، می تواند به عنوان یک سیستم کاهش دهنده فشار نیز مورد استفاده قرار گیرد، بدون آن که آلودگی زیست محیطی ایجاد کند.

در سه وضعیت پرابی، متوسط و کم آبی و تحت سه فشار خروجی مختلف (۱/۵، ۲/۵ و ۳/۵ بار فشار استاندارد) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که در فشار استاندارد خروجی ۲/۵ بار و شرایط متوسط، بیشترین بازده نیروگاه با مقدار ۸۳٪ حاصل می شود. همچنین نیروگاه طراحی شده با هشت پمپ توربین موازی قادر است توان خروجی بین ۸۴/۶۴ تا ۱۱۲۷/۵ کیلووات را تأمین نماید. بررسی ها

5- List of symbols

h_l (m)	Head loss
f	Darcy friction coefficient
L (m)	Pipe length
D (m)	Pipe diameter
v (m.s ⁻¹)	Fluid velocity inside the pipe
g (m.s ⁻²)	Gravitational acceleration
h_t (m)	Design head of the power plant
h_1 (m)	Long-term average reservoir level
h_2 (m)	Turbine installation elevation
q_{np} (m ³ s ⁻¹)	Nominal pump discharge
q_{nt} (m ³ s ⁻¹)	Nominal turbine discharge
c_h (-)	Head conversion coefficient
c_q (-)	Flow conversion coefficient
$h_{np(nt)}$ (m)	Nominal pump head in turbine mode
$q_{np(nt)}$ (m ³ s ⁻¹)	Nominal pump discharge in turbine mode
$h_{np(np)}$ (m)	Nominal pump head in pumping mode
$q_{np(np)}$ (m ³ s ⁻¹)	Nominal pump discharge in pumping mode
h_{nt} (m)	Nominal turbine head
n_p (Rev.min ⁻¹)	Rotational speed of pump impeller
n_t (Rev.min ⁻¹)	Rotational speed of turbine runner
p_{nt} (kw)	Nominal turbine power
n_q (-)	Specific speed
η_p (%)	Efficiency in pump mode
η_t (%)	Efficiency in turbine mode
ρ (kg.m ⁻³)	Density

Acknowledgments

We sincerely express our gratitude and appreciation to the supervisors at the University of Urmia and the University of Tehran for their invaluable guidance and support.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, (A.M. and A.R.); Methodology,

(A.M. and A.R.); Software, (M.H.); data analysis, (M.H.); Writing-Original Draft Preparation, (M.H.); Writing-Review and Editing, (A.M. and A.R.); Supervision, (A.M. and A.R.).

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

This research received no external funding, and no institutional or contractual financial support was provided.

Data Availability Statement

Data will be provided to applicants upon request, subject to limited and controlled access.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Barbarelli, S., Amelio, M., & Florio, G. (2016). Predictive model estimating the performances of centrifugal pumps used as turbines. *Energy*, 107, 103–121. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.122>
- Chapallaz, J.-M., Eichenberger, P., & Fischer, G. (1992). *Manual on pumps used as turbines*. UNIDO.
- Chen, S., & Chen, B. (2016). Urban energy–water nexus: A network perspective. *Applied Energy*, 184, 905–914. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.042>
- Fernández, J., Blanco, E., Parrondo, J., Stickland, M. T., & Scanlon, T. J. (2004). Performance of a centrifugal pump running in inverse mode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 218(4), 265–271. <https://doi.org/10.1243/0957650041200632>
- Gondhali, P. V., Sargar, M. V., Janugade, P. A.,

- Navale, R. R., Patil, N. D., & Chandak, P. G. (2020). Design of hydraulic micro turbine and application in plumbing system. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(5), 726–730. <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS050543>
- Gulich, J. F. (2008). *Operation of centrifugal pumps*. Springer.
- Jain, S. V., & Patel, R. N. (2014). Investigations on pump running in turbine mode: A review of the state-of-the-art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 841–868. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.030>
- Jiang, S., Wang, J., Zhao, Y., Lu, S., Shi, H., & He, F. (2016). Residential water and energy nexus for conservation and management: A case study of Tianjin. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(35), 15919–15929. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.04.181>
- Kusakana, K. (2014). A survey of innovative technologies increasing the viability of micro-hydropower as a cost-effective rural electrification option in South Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 370–379. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.026>
- Liu, M., Tan, L., & Cao, S. (2019). Theoretical model of energy performance prediction and BEP determination for centrifugal pump as turbine. *Energy*, 172, 712–732. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.162>
- Manieniyar, V., Thambidurai, M., & Selvakumar, R. (2009). Study on energy crisis and the future of fossil fuels. *Proceedings of SHEE 10*, 2234–3689. <https://doi.org/10.13140/2.1.2234.3689>
- Nejadali, J. (2021). Analysis and evaluation of the performance and utilization of regenerative flow pump as turbine (PAT) in Pico-hydropower plants. *Energy for Sustainable Development*, 64, 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.08.002>
- Pourjabian, H., Hamekhani, H., Alabakhsh, A., Fattahi, M., Dehghan, M., & Rahgozar, M. (2019). Feasibility study of utilizing the hydropower potential for electricity generation in water transfer lines of Kermanshah city. *Ecohydrology*, 3(6), 781–792. (In Persian)
- Satish, D., Doshi, A., & Bade, M. (2021). Review on pump as turbine application in water distribution networks for power generation. *AIP Conference Proceedings*, 2341(May), Article 050115. <https://doi.org/10.1063/5.0050115>
- Shahinijad, B., & Kakavand, A. (2016). The approach of hydropower plants in energy production and their combined use with other energy generation systems. *1st National Conference on New Technologies in Engineering Sciences*.
- Sun, X., Huang, H., Zhao, Y., Tong, L., Lin, H., & Zhang, Y. (2025). A Review of Methods for "Pump as Turbine"(PAT) Performance Prediction and Optimal Design. *Fluid Dynamics & Materials Processing*, 21(6). <http://dx.doi.org/10.32604/fdmp.2025.064329>
- Tahani, M., Kandi, A., Moghimi, M., & Houreh, S. D. (2020). Rotational speed variation assessment of centrifugal pump-as-turbine as an energy utilization device under water distribution network condition. *Energy*, 213, Article 118502. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118502>
- Walker, M. E., Lv, Z., & Masanet, E. (2013). Industrial steam systems and the energy–water nexus. *Environmental Science & Technology*, 47(22), 13060–13067. <https://doi.org/10.1021/es403715z>
- Williams, A. A. (1994). The turbine performance of centrifugal pumps: A comparison of prediction methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 208(1), 59–66. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1994_208_009_02
- Zhang, W., An, L., Li, X., Chen, F., Sun, L., Wang, X., & Cai, J. (2022). Adjustment method and energy consumption of centrifugal pump based on intelligent optimization algorithm. *Energy Reports*, 8, 12272–12281. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.03>
- Zarei Manoujan, A., Hosseinpour, M., Mohebbi, A., & Riasi, A. (2025). Technical and economic analysis of pump-as-turbine systems versus commercial turbines for harnessing energy from small water potentials. *Energy*, 334(C). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137713>
- Zhang, W., An, L., Li, X., Chen, F., Sun, L., Wang, X., & Cai, J. (2022). Adjustment method and energy consumption of centrifugal pump based on intelligent optimization algorithm. *Energy Reports*, 8, 12272–12281. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.09.031>