

Journal of Water and Wastewater, Vol. 32, No.1, pp: 16-26

# Evaluation of Hydraulic Performance of a Type of Vertical Axis Water Microturbine for Use in Medium Pressure Water Supply Network

H. Amjadi<sup>1</sup>, J. Soltani<sup>2</sup>, M. Khashehchi<sup>3</sup>, A. H. Ahmadihaji<sup>4</sup>

1. Former Graduate Student, Biosystems Mechanical Engineering, Renewable Energy, Abouraihan Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
2. Assist. Prof., Dept. of Civil Engineering, Campus of Abouraihan University of Tehran, Tehran, Iran  
(Corresponding Author) jsoltani@ut.ac.ir
3. Assist. Prof., Dept. of Mechanical Engineering, Campus of Abouraihan University of Tehran, Tehran, Iran
4. Former Graduate Student, Irrigation Engineering, Hydraulic Structures, Campus of Abouraihan University of Tehran, Tehran, Iran

(Received Aug. 27, 2019 Accepted June 27, 2020)

#### To cite this article:

Amjadi, H., Soltani, J., Khashehchi, M., Ahmadihaji, A. H. 2021. "Evaluation of hydraulic performance of a type of vertical axis water microturbine for use in medium pressure water supply network" Journal of Water and Wastewater, 32(1), 16-26. Doi: 10.22093/wwj.2020.199431.2914. (In Persian)

#### Abstract

One of the oldest methods of producing electrical energy is the use of latent energy in running water, which uses a water turbine to achieve this. It is one of the most important sources of renewable energy and has attracted the attention of many researchers in recent years. In this study, laboratory evaluation of hydraulic performance of a type of water microturbine to convert excess pressure in medium pressure water supply networks into electrical energy usable for sensors or equipment such as flow meters, pressure meters, leak detectors, etc., used to manage energy consumption and intelligent water supply networks is investigated. For this purpose, in three different scenarios, the effect of parameters such as flow rate, pressure and different angles of the guide vane on the microturbine performance and pressure drop was investigated. The results showed that the highest microturbine output power (59.01 watts) and pressure drop rate (9.71 meters H<sub>2</sub>O) were obtained when the inlet discharge was 42.61 m<sup>3</sup>/hr and the opening guide vane was 20 degrees. It also has the lowest output power (0.8 watts) and pressure drop rate (4.65 meters H<sub>2</sub>O) for a flow rate of 46 m<sup>3</sup>/hr without the guide vane. The coefficient of determination (R<sup>2</sup>) for the equations of microturbine output power and pressure drop was calculated to be 0.92 and 0.99, respectively.

**Keywords:** Electric Energy, Water Supply Network, Excess Pressure, Hydraulic Performance, Hydro Microturbine.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۲، شماره ۱، صفحه: ۲۶-۱۶

## ارزیابی عملکرد هیدرولیکی یک نوع میکروتوربین آبی عمود محور برای استفاده در شبکه آبرسانی فشار متوسط

حسین امجدی<sup>۱</sup>، جابر سلطانی<sup>۲</sup>، مرتضی خشه‌چی<sup>۳</sup>، امیرحسین احمدی حاجی<sup>۴</sup>

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک بیوسیستم، انرژی‌های تجدیدپذیر،

پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی آبیاری، سازه‌های آبی،

پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

(نویسنده مسئول) joltani@ut.ac.ir

۳- استادیار، گروه فنی کشاورزی، مهندسی مکانیک بیوسیستم،

پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آبیاری، سازه‌های آبی،

پردیس ابوریحان دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش ۹۹/۴/۷

(دریافت ۹۸/۶/۵)

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام بفرمایید:

امجدی، ح.، سلطانی، ج.، خشه‌چی، م.، احمدی حاجی، ا.ح.، ۱۴۰۰، "ارزیابی عملکرد هیدرولیکی یک نوع میکروتوربین آبی عمود محور برای

استفاده در شبکه آبرسانی فشار متوسط" مجله آب و فاضلاب، ۳۲(۱)، ۲۶-۱۶. Doi: 10.22093/wwj.2020.199431.2914

### چکیده

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تولید انرژی الکتریکی، استفاده از انرژی نهفته در آب جاری است که برای دستیابی به این هدف از یک توربین آبی استفاده می‌شود. این انرژی یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در این پژوهش به ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی یک نوع میکروتوربین آبی برای تبدیل فشار اضافی موجود در شبکه‌های آبرسانی فشار متوسط به انرژی الکتریکی قابل‌استفاده برای حسگرها و یا تجهیزاتی مانند فلومترها، فشارسنج‌ها و سیستم‌های نشت‌یاب که به منظور مدیریت مصرف انرژی و هوشمندسازی شبکه‌های آبرسانی استفاده می‌شوند، پرداخته شد. برای این منظور طی سه سناریوی مختلف، تأثیر پارامترهایی مانند دبی، فشار و زوایای مختلف صفحه هدایت‌کننده جریان بر روی عملکرد میکروتوربین و میزان افت فشار بررسی شد. نتایج نشان داد، بیشترین توان خروجی میکروتوربین ۵۹/۰۱ وات و میزان افت فشار ۹/۷۱ متر آب مربوط به زمانی است که دبی ورودی ۴۲/۶۱ مترمکعب بر ساعت است و بازشدگی صفحه هدایت‌کننده جریان ۲۰ درجه است. کم‌ترین میزان توان خروجی ۰/۸ وات و افت فشار ۴/۶۵ متر آب نیز برای حالتی است که دبی ورودی برابر با ۴۶ مترمکعب بر ساعت و از صفحه هدایت‌کننده جریان استفاده نشده است. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای معادلات توان خروجی میکروتوربین و میزان افت فشار به ترتیب به میزان ۰/۹۹ و ۰/۹۹ محاسبه شد.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی الکتریکی، شبکه آبرسانی، فشار مازاد، عملکرد هیدرولیکی، میکروتوربین آبی

### ۱- مقدمه

کمبود منابع سوختی و انرژی روبه‌رواست (Ghaisari, 2011). بیشتر سازمان‌های جهانی، میزان سوخت‌های فسیلی موجود را تنها برای ۴۰ تا ۵۰ سال آینده کافی می‌دانند (Nourbakhsh, 2009).

در حال حاضر حدود ۸۰ درصد از انرژی مصرفی سراسر جهان از سوزاندن سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود. با توجه به این حجم زیاد مصرف، جهان برای تأمین نیاز نسل‌های آینده، با مشکل

امروزه با استفاده از میکروتوربین‌های آبی ویژه که طول عمر مفیدشان چند برابر شیرهای فشارشکن است می‌توان ضمن تقلیل فشار آب، با استحصال انرژی الکتریکی از خطوط انتقال و توزیع آب شرب، از مقدار انرژی مفیدی که تاکنون به هدر می‌رفته بهره‌برداری بهینه کرد (Bakhshi and Roshan, 2016).

به‌منظور تأمین توان کافی و ایمن برای سیستم‌های مانتورینگ، نیروی برق آبی موجود در خطوط لوله شبکه‌های آب‌رسانی، بسیار جذاب به‌نظر می‌رسد. فشار اضافی آب یا بخش کوچکی از انرژی جنبشی آب داخل خطوط لوله، به‌راحتی می‌تواند مورد نیاز سیستم‌های مانتورینگ را تأمین کند، اما چالش اساسی در استفاده از این نوع سیستم‌ها، انتخاب یک توربین آب است که برای شرایط مورد نیاز خطوط آب به‌ویژه برای شرایط زیرزمینی و سایت‌های شهری بتواند مناسب باشد (Penche, 2004).

توربین‌های موجود هرکدام بنا بر مشکلاتی که دارند برای استفاده در داخل خطوط لوله مناسب نیستند. به‌عنوان مثال توربین کاپلان که در سال ۱۹۱۳ توسط پروفیسور استرالیایی ویکتور کاپلان ساخته شد قادر است که در دبی و فشار کم آب کار کند، اما به‌دلیل تغییر دادن مسیر جریان آب و همچنین مشکل ادغام با لوله، برای استفاده در خطوط لوله مناسب نیستند (Chen et al., 2013).

توربین Ampair's UW100 picohydro که نوعی از توربین‌های لامپی محسوب می‌شود، برای تولید برق مصرفی سنسورهای بی‌سیم پیشنهاد و توسعه داده شد. اگرچه این نوع توربین مسیر جریان آب را تغییر نمی‌دهد، اما ژنراتور و بعضی از اجزای الکتریکی آن در داخل آب غوطه‌ور است و منجر به آلوده کردن آب آشامیدنی می‌شود. علاوه بر این به‌دلیل اندازه بزرگ و در نتیجه آن مشکل نصب در داخل خطوط لوله آب، نمی‌توان از این نوع میکروتوربین به‌عنوان یک گزینه مناسب برای تأمین برق مصرفی سنسورها و کنترل‌کننده‌ها استفاده کرد (Saftner et al., 2008, Zhou et al., 2014).

در پژوهش دیگری که پژوهشگران بر روی سیستم‌های برق آبی کوچک انجام دادند به این نتیجه دست یافتند که به‌جای از بین بردن فشار اضافی موجود در شبکه می‌توان با استفاده از این گونه سیستم‌ها که امروزه به‌عنوان یک روش مؤثر برای کنترل سطح

علاوه بر این، استفاده از سوخت‌های فسیلی باعث ایجاد مشکلات محیط‌زیستی بسیاری از جمله، افزایش گازهای گلخانه‌ای، افزایش دمای کره زمین و تأثیرات منفی گوناگون بر اکوسیستم‌های طبیعی می‌شود (Rittmann, 2008).

امروزه دستیابی به منابع انرژی که جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی باشند و در عین حال ضمن داشتن تطابق‌های محیط‌زیستی، توان کشورها را در تأمین مصرف داخلی برای تولید انرژی الکتریکی، انرژی گرمایی و حمل‌ونقل تأمین کنند، یکی از مسایل مهمی است که تفکر جمعی کشورهای مختلف را به خود مشغول کرده است (Ahmadi and Aalami, 2012).

از مهم‌ترین منابع انرژی جایگزین سوخت‌های فسیلی می‌توان به انرژی خورشیدی، زیست توده، انرژی باد، زمین گرمایی و انرژی برق آبی اشاره کرد. اگر در گذشته انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک گزینه اختیاری در کنار سایر منابع انرژی مطرح بود، امروزه این انتخاب تبدیل به یک اجبار شده و این امر ضرورت توجه بیش از پیش به این مسئله را می‌طلبد.

بی‌شک یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر که بنا بر مزایای فراوان آن از جمله بازده و طول عمر کارکرد زیاد، امروزه بسیار مورد توجه است، انرژی نهفته در آب جاری است (Fraenkel, 1999).

این نوع انرژی، از گذشته در اثر جریان یا ریزش آب در ارتفاعات و یا از مخازن تولید می‌شد اما امروزه با توجه به وجود پتانسیل‌های آبی فراوان در شهرها و روستاهای کشور، استفاده از انرژی هیدرولیکی آب در ایستگاه‌های پمپاژ آب شرب و شبکه آب‌رسانی توزیع و انتقال، راهکار مناسبی برای تولید انرژی پاک در سطح کشور است. در برخی موارد فشار داخل لوله‌های آب به‌علت توپوگرافی منطقه به حدی افزایش می‌یابد که از شیرهای فشارشکن<sup>۱</sup> مکانیکی و برقی برای تعدیل و خنثی‌سازی نیروی فشار اضافی و جلوگیری از ترکیدگی و شکستگی لوله‌ها استفاده می‌شود. با این عمل نیروی فشار مازاد داخل لوله‌ها به هدر می‌رود، علاوه بر این طول عمر مفید این فشارشکن‌ها پایین و به‌طور متوسط پنج سال است که پس از این مدت نیاز به تعمیرات اساسی و در نتیجه صرف هزینه‌های گزاف دارند (Chamani and Taeb, 2018).

<sup>1</sup>Pressure Reducing Valve

پروپلر<sup>۱</sup> را به جای شیرهای فشارشکن در شبکه تأمین آب فریبورگ<sup>۲</sup> سوئیس استفاده کردند. برای یافتن محل نصب مناسب میکروتوربین نام برده در داخل شبکه، از یک الگوریتم بهینه‌سازی بهره بردند. نتایج نشان داد که با استفاده از این سیستم می‌توانند ۱۰ درصد پتانسیل انرژی اضافی موجود در شبکه را بازیابی کنند (Samora et al., 2016).

طی پژوهشی که دو و همکاران در سال ۲۰۱۷ بر روی یک سیستم برق آبی کوچک انجام دادند، عملکرد آن را در یک مجموعه آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سیستم موردنظر می‌تواند به‌عنوان یک روش جایگزین مناسب برای شیرهای فشارشکن و همچنین برای تولید انرژی برق آبی در خط لوله‌های آب استفاده شود (Du et al., 2017).

در پژوهشی دیگر ما و همکاران در سال ۲۰۱۸ یک سیستم تولید انرژی برق آبی را برای تأمین انرژی برق مصرفی تجهیزات و حسگرهای موجود بر روی شبکه آب‌رسانی توسعه دادند، برای این هدف از یک نوع توربین آبی Drag-type با تعداد پره‌های مختلف ۳، ۶، ۹ و ۱۲ برای خطوط لوله با اندازه متوسط با قطر ۲۵۰ میلی‌متر و یک نوع دیگر توربین از نوع Lift-type برای خطوط لوله مقیاس بزرگ با قطر ۶۰۰ میلی‌متر استفاده کردند. به‌منظور افزایش انرژی جنبشی در نزدیک توربین، از یک صفحه راهنمای انعطاف‌پذیر در داخل لوله استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی آنها نشان داد که توربین ۱۲ پره با توان خروجی برای سرعت‌های جریان ۱/۵ و ۳ متر بر ثانیه به ترتیب به میزان ۲۰۰ و ۴۰۰ وات، از بقیه نمونه‌ها بهتر است (Ma et al., 2018).

طی پژوهشی که لی و همکاران در سال ۲۰۱۹ بر روی یک توربین پروپلر کوچک برای استفاده در داخل لوله و در شرایط فشار بسیار کم انجام دادند، پتانسیل تعویض پره‌های توربین موردنظر که از فولاد ضدزنگ ماشین‌کاری شده ساخته شده بود را با پره‌هایی از جنس کامپوزیت با وزن سبک بررسی کردند. برای این منظور هر دو جنس پره میکروتوربین را برای مقایسه از لحاظ عملکرد در یک مقیاس آزمایشگاهی، آزمایش کردند. نتایج نشان داد که توربین با پره‌های از جنس کامپوزیت توان بیشتری را تولید می‌کند اما نسبت

فشار توجه زیادی را به خود جلب کرده است، برای بازیابی انرژی استفاده کرد (Coelho and Andrade-Campos, 2014).

سیستم‌های برق آبی در مقیاس کوچک همراه با سایر منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌عنوان یک منبع انرژی جایگزین محبوبیت کافی به دست آورده‌اند و در حال حاضر کشورهای مختلف از آن بهره می‌برند. در این گونه سیستم‌ها، اگر به اندازه کافی منابع آب در دسترس باشد، قابل پیش‌بینی هستند و دارای اثرات محیط‌زیستی مثبت هستند (Yaakob et al., 2014).

در پژوهشی نتایج امکان‌سنجی نصب میکروتوربین‌های آبی بر روی خطوط شبکه انتقال آب شهر تهران نشان داد که امکان نصب میکروتوربین پلتون از سایر انواع آن بیشتر است. لازم به ذکر است که این امکان‌سنجی، با سنجش پارامترهای مربوط به این نوع میکروتوربین، فشار در دسترس، دبی آب ورودی به شیرهای فشارشکن یا مخازن و موقعیت نقاط، انجام شد. بر اساس امکان‌سنجی انجام شده، می‌توان با نصب میکروتوربین پلتون در نقاط بررسی شده، توان ۱۹۸ تا ۱۰۰۰ و ۲۳۵ کیلووات را تولید کرد (Mohammadi and Voshtani, 2015).

سرکار و همکاران در سال ۲۰۱۴ یک نوع میکروتوربین آبی را برای تولید انرژی الکتریکی از فشار اضافی سیستم پساب در طبقه همکف یک ساختمان بلند در کشور هندوستان نصب و آزمایش کردند، نتایج آزمایش‌های آنان نشان داد که سیستم موردنظر از لحاظ تجاری برای بسیاری از شهرهای بزرگ در این کشور، می‌تواند امیدوارکننده باشد (Sarkar et al., 2014).

کاسینی در سال ۲۰۱۵ طی پژوهشی پتانسیل بازیابی انرژی تجدیدپذیر از فشار اضافی داخل خطوط لوله آب خانگی و شهری و همچنین خلاصه‌ای از انواع مختلف سیستم‌های آبی داخل خطوط لوله موجود در بازار را بررسی کرد. در این پژوهش، مزایای این سیستم‌ها را در مقیاس ساختمانی و شهری در مقایسه با دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر از جمله سیستم باد و فتوولتائیک تشریح کرد (Casini et al., 2015).

سامورا و همکاران در سال ۲۰۱۶ روشی را برای اندازه‌گیری پتانسیل انرژی برق آبی بر پایه انرژی اضافی در شبکه پیشنهاد کردند، به این منظور یک نمونه واقعی از یک میکروتوربین پنج پره

<sup>1</sup> Propeller  
<sup>2</sup> Fribourg

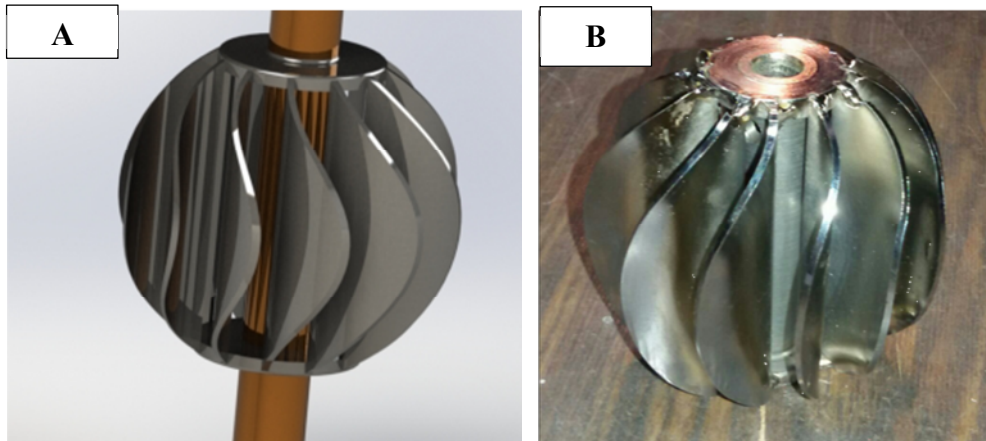


Fig. 1. A) Designed microturbine 3D model, B) Prototype

شکل ۱- A) مدل طراحی شده سه بعدی میکروتوربین، B) نمونه ساخته شده

فشار متوسط به انرژی الکتریکی قابل استفاده برای حسگرها و یا تجهیزاتی مانند فلومترها، فشارسنج‌ها و سیستم‌های نشت یاب است. برای این منظور، تأثیر پارامترهای مختلفی مانند دبی، فشار و میزان بازشدگی صفحه هدایت‌کننده جریان بر روی میزان توان خروجی و همچنین میزان افت فشار ناشی از میکروتوربین و صفحه هدایت‌کننده جریان بررسی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- توصیف مدل

مدل بررسی شده در این پژوهش، یک میکروتوربین آبی کروی شکل با محور عمودی<sup>۱</sup> و ساختار توخالی<sup>۲</sup> است که در شکل ۱ نمونه طراحی شده آن با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks 2017 و همچنین نمونه اولیه ساخته شده آن نشان داده شده است. این میکروتوربین به منظور استفاده در خطوط لوله آب با قطر ۱۰۰ میلی‌متر طراحی و ساخته شده است. پارامترهای طراحی میکروتوربین موردنظر در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور انجام آزمایش‌های مختلف بر روی میکروتوربین موردنظر، یک مجموعه آزمایشگاهی مطابق با شکل ۲ شامل اجزای مختلف راه‌اندازی شد. برای مشاهده رفتار جریان در اطراف میکروتوربین، حدود دو متر از طول لوله به کار گرفته شده در مجموعه آزمایشگاهی، از جنس پلکسی گلاس شفاف ساخته و نصب شد.

به توربین با پره از جنس فولاد ضد زنگ، به فشار بیشتری حدود ۰/۰۸ متر نیاز دارد (Li et al., 2019).

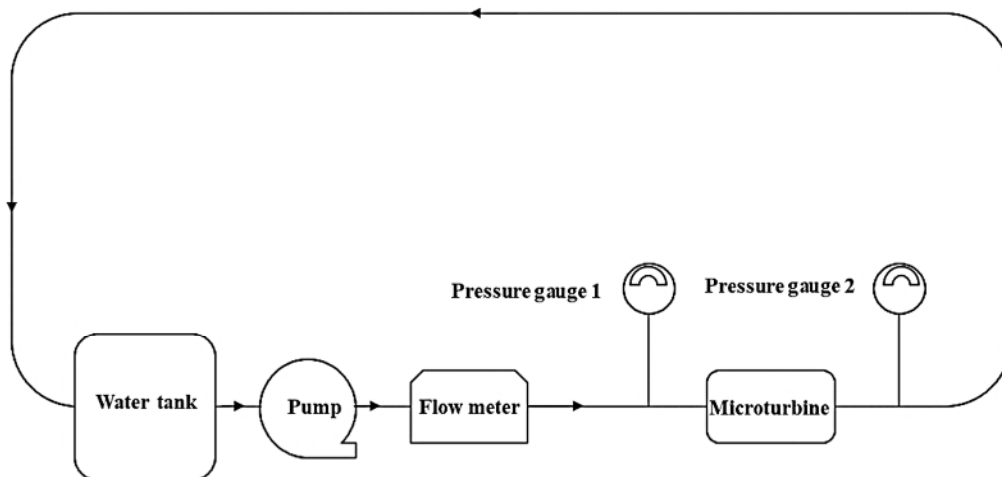
امجدی در سال ۲۰۱۹ طی پژوهشی به طراحی، شبیه‌سازی هیدرودینامیکی، ساخت و ارزیابی یک میکروتوربین آبی عمود محور برای تبدیل فشار اضافی موجود در شبکه آبرسانی فشار متوسط به انرژی الکتریکی قابل استفاده برای حسگرها و تجهیزات ناظر بر شبکه (فلومترها، فشارسنج‌ها و سیستم‌های نشت یاب) پرداختند. نتایج شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های آنها حاکی از آن بود که میکروتوربین موردنظر می‌تواند به راحتی با خطوط لوله شبکه‌های آبرسانی فشار متوسط ادغام شود و همچنین قادر است که برق مصرفی حسگرها و سایر تجهیزات ناظر بر شبکه را تأمین کند (Amjadi, 2019).

در پژوهشی مشابه، احمدی حاجی در سال ۲۰۱۹ به ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد هیدرولیکی و استخراج روابط توربین‌های آبی کوچک برای استفاده در شبکه‌های آبرسانی پرداختند. به منظور استخراج روابط و محاسبه اعداد بی بعد از روش آنالیز ابعادی و تئوری پی باکینگهام استفاده کردند. مقایسه نتایج حاصل از ارزیابی آزمایشگاهی و روش آنالیز ابعادی نشان داد که روش نام‌برده توانست توان خروجی میکروتوربین را با دقت خوبی ( $R^2 = 0/97$ ) پیش‌بینی کند (Ahmadihaji, 2019).

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی آزمایشگاهی عملکرد یک نوع میکروتوربین آبی عمود محور با تعداد ۱۰ پره و با ساختار کروی توخالی برای تبدیل فشار اضافی موجود در شبکه‌های آبرسانی

<sup>1</sup> Vertical Axis

<sup>2</sup> Hollow Type



**Fig. 2.** Schematic of laboratory set up for various microturbine tests  
 شکل ۲- شماتیک مجموعه آزمایشگاهی راه اندازی شده برای تست های مختلف میکروتوربین

دیجیتالی (MP5W, Autonics, South Korea) برای اندازه گیری سرعت دورانی میکروتوربین با دقت مناسب، استفاده شد. در نهایت با استفاده از مقدار بیان شده از نیروسنج و پالس متر و معادلات زیر، گشتاور و در نتیجه توان خروجی میکروتوربین در هر بار تکرار آزمایش محاسبه شد

$$f = mg - F \quad (1)$$

$$T = f \times r \quad (2)$$

$$P_t = \omega \times T \quad (3)$$

$$\omega = \frac{2\pi \times N}{60} \quad (4)$$

که در آنها

$f$  نیروی اصطکاک بین تسمه و پولی چرخ لنگر بر حسب نیوتن،  $m$  جرم وزنه ها به علاوه کفه وزنه ها (kg)،  $g$  شتاب گرانش ( $m/s^2$ )،  $F$  مقدار یادداشت شده از نیروسنج بر حسب نیوتن،  $T$  گشتاور ( $N \cdot m$ )،  $r$  شعاع پولی چرخ لنگر (m)،  $P_t$  توان خروجی میکروتوربین (Watt)،  $\omega$  سرعت زاویه ای (rad/sec) و  $N$  سرعت دورانی میکروتوربین (rpm) است.

جدول ۱- پارامترهای طراحی میکروتوربین موردنظر

**Table 1.** Microturbine design parameters

Design parameters	(mm)
Rotor size	92
Hollow cylinder diameter	45
Number of blades	10

برای ذخیره آب از یک مخزن ۲۰۰۰ لیتری فلزی استفاده شد، همچنین یک پمپ گریز از مرکز نوع ۵۰-۲۵۰ و سرعت چرخش ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و بیشترین هد و دبی به ترتیب ۱۷ متر و ۴۶ مترمکعب بر ساعت و وظیفه ایجاد دبی و فشار آب مورد نیاز آزمایش های مختلف میکروتوربین را برعهده داشت. بنا بر اهمیت اطلاعات دقیق فشار در قبل و بعد از میکروتوربین، از دو فشارسنج دیجیتالی (BCT-110, Atek, Turkey) استفاده شد و همچنین از فشارسنج های معمولی با حد بالای ۶ بار برای اندازه گیری فشار در نقاط مختلف مدار تست استفاده شد. به منظور اندازه گیری دبی، از یک فلومتر<sup>۱</sup> التراسونیک دیجیتالی (RayanSmartuf7, Germany) استفاده شد. برای اندازه گیری گشتاور و در نتیجه توان خروجی میکروتوربین، از یک دستگاه نیروسنج دیجیتالی (LutronFG-5100, Lutron, Taiwan) برای اعمال وزنه بر روی شفت میکروتوربین و یک دستگاه پالس متر

<sup>1</sup> Flow Meter

### ۳-۱- نتایج سناریوی اول

نتایج حاصل از سناریوی اول در شکل ۴ که ارتباط بین پارامترهای دبی، توان خروجی میکروتوربین و افت فشار را نشان می‌دهد، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش دبی، توان خروجی میکروتوربین با یک نظم خاصی در حال افزایش است به طوری که بیشترین توان خروجی به میزان ۵۹/۰۱ وات، به ازای بیشترین دبی ورودی در دسترس ۴۲/۶۱ مترمکعب بر ساعت به دست آمد. در مورد میزان افت فشار هم نتایج حاکی از آن است که با افزایش دبی ورودی به میکروتوربین، میزان افت فشار با شیب کمتری نسبت به توان خروجی میکروتوربین در حال افزایش است. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای معادلات توان خروجی میکروتوربین و میزان افت فشار به ترتیب به میزان ۰/۹۲ و ۰/۹۹ محاسبه شد.

در شکل ۵ ارتباط بین توان خروجی میکروتوربین و فشار قبل از آن نشان داده شده است. در قسمت ورودی میکروتوربین بیشترین فشاری که از طریق پمپ موجود ایجاد شد برابر ۱۰/۶۱ متر بود. همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، با افزایش فشار ورودی، توان خروجی میکروتوربین هم تقریباً به صورت خطی در حال افزایش است، طوری که در حالت بیشترین فشار موجود ۱۰/۶۱ متر، توانی معادل با ۵۹/۰۱ وات استخراج شد. مقدار ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای معادله توان خروجی میکروتوربین در این حالت حدود ۰/۹۷ محاسبه شد. شکل ۶ هم بیانگر ارتباط بین دبی ورودی به میکروتوربین و فشار قبل از آن است که با افزایش دبی تا حدود ۴۲/۶۱ مترمکعب بر ساعت، فشار قبل از میکروتوربین هم سیر صعودی داشته است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) برای ارتباط بین دبی ورودی و فشار قبل از میکروتوربین ۰/۹۹ به دست آمد.

### ۳-۲- نتایج سناریوی دوم

این سناریو برای بررسی تأثیر هدهای مختلف بعد از میکروتوربین انجام شد. به این منظور پنج زاویه مختلف ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه شیر تخلیه به مخزن انتخاب و آزمایش شدند. در همین سناریو برای بررسی تأثیر صفحه هدایت‌کننده جریان بر روی عملکرد و میزان افت ناشی از میکروتوربین، آزمایش‌ها برای زیرسناریوی اول، با وجود صفحه هدایت‌کننده جریان با بازشدگی

به منظور هدایت جریان آب به سمت پره‌های میکروتوربین و همچنین شتاب دادن به آن، که منجر به افزایش انرژی جنبشی و سرعت دورانی میکروتوربین می‌شود، از یک صفحه هدایت‌کننده جریان که در شکل ۳ نشان داده شده است استفاده شد. آزمایش‌های مختلف بر روی میکروتوربین در سه سناریوی اصلی و پنج زیرسناریو مطابق با جدول ۲ انجام شد. سناریوی اول ( $S_1$ ) به منظور بررسی تأثیر دبی‌های مختلف بر روی عملکرد و میزان افت فشار میکروتوربین تعریف شد. در این سناریو که با وجود صفحه هدایت‌کننده جریان با بازشدگی ۲۰ درجه انجام شد، با تأمین دبی‌های مختلف از طریق تغییر زاویه شیر بای پس انجام شد. سناریوی دوم ( $S_2$ ) به منزله ایجاد فشارهای مختلف بعد از میکروتوربین، از پنج زاویه مختلف ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه شیر تخلیه به مخزن و باز با وجود صفحه هدایت‌کننده جریان با بازشدگی ۲۰ درجه انجام شد. سناریوی سوم ( $S_3$ ) هم به منظور بررسی تأثیر زاویه بازشدگی صفحه هدایت‌کننده جریان بر روی عملکرد میکروتوربین انجام شد، طوری که علاوه بر زاویه بازشدگی ۲۰ درجه، دو زاویه ۳۵ و ۵۰ درجه هم بررسی و آزمایش شدند.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مجموعه آزمایش‌های انجام شده به سه بخش اصلی شامل، نتایج سناریو اول، دوم و سوم تقسیم‌بندی شد و یافته‌ها در قالب جدول و نمودارهایی ارائه و مورد بحث قرار گرفتند.

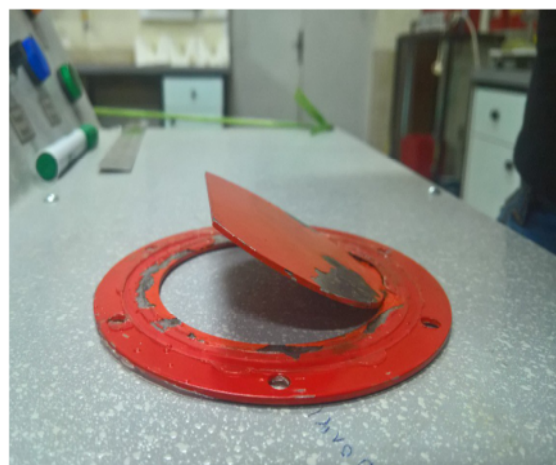
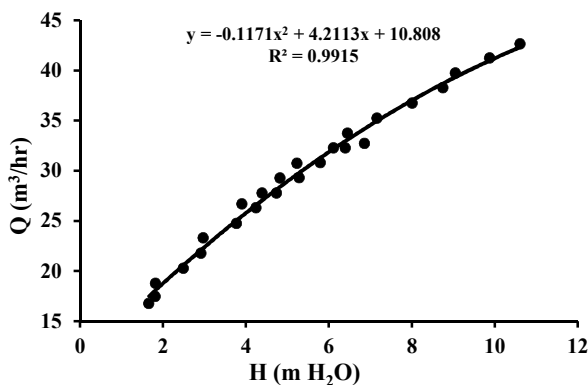


Fig. 3. Flow guide vane  
شکل ۳- صفحه هدایت‌کننده جریان

جدول ۲- سناریوها و زیرسناریوهای تعریف شده برای آزمایش میکروتوربین  
**Table 2.** Scenarios and sub-scenarios defined for microturbine testing

Scenario	Scenario description	Sub-scenario
S <sub>1</sub>	Microturbine performance testing under different flow rate	With guide vane -opening angle: 20°
S <sub>2</sub>	Different angles of the outlet valve to the tank (butterfly valve)	With guide vane Without guide vane
S <sub>3</sub>	Different angles of the guide vane	Opening angle: 35° Opening angle: 50°



**Fig. 6.** Relationship between the flow rate and water flow pressure at the microturbine inlet

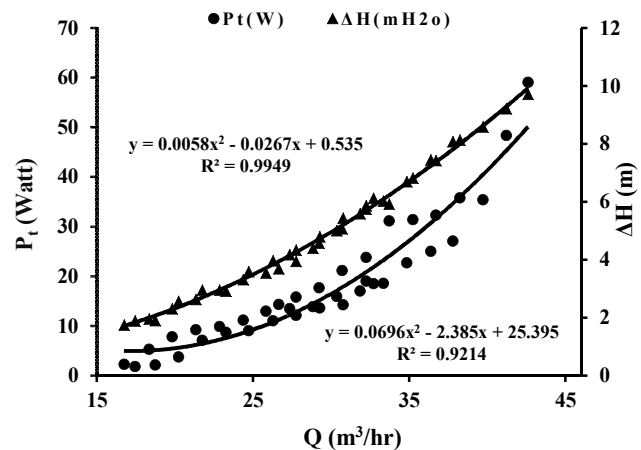
شکل ۶- رابطه بین دبی ورودی و فشار قبل از میکروتوربین

۲۰ درجه و برای هر پنج زاویه مختلف شیر تخلیه به مخزن انجام شد. آزمایش‌های زیرسناریوی دوم نیز با حذف این صفحه و برای هر پنج زاویه ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵ درجه تکرار شدند.

### ۳-۲-۱- مقایسه نتایج زیرسناریوی اول و دوم

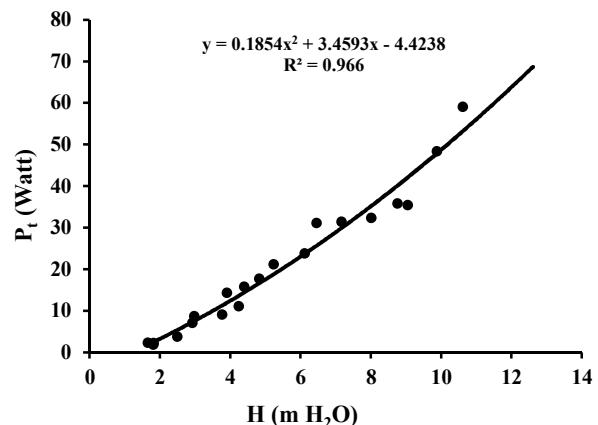
به منظور مقایسه نتایج حاصل از سناریوی دوم در جدول ۳ توان خروجی میکروتوربین و میزان افت فشار تحت تأثیر زوایای مختلف شیر پروانه‌ای تخلیه به مخزن نشان داده شده است.  $Q$  بیان‌کننده دبی جریان  $(m^3/hr)$ ،  $p_t$  توان خروجی میکروتوربین (Watt) و  $\Delta H$  مقدار افت فشار  $(m H_2O)$  است.

با توجه به نتایج سناریوی دوم می‌توان دریافت که در حالت وجود صفحه هدایت‌کننده جریان، با تغییر زاویه شیر تخلیه به مخزن از صفر تا ۴۵ درجه، دبی ورودی به مقدار خیلی ناچیزی کاهش پیدا کرد. همچنین میزان توان خروجی میکروتوربین به مقدار کمتر از



**Fig. 4.** Relationship between the microturbine output power, flow rate and pressure drop

شکل ۴- رابطه بین توان خروجی میکروتوربین، دبی ورودی و میزان افت فشار



**Fig. 5.** Relationship between the microturbine output power and water flow pressure at the microturbine inlet

شکل ۵- رابطه بین توان خروجی میکروتوربین با فشار جریان قبل از میکروتوربین



جدول ۳- توان خروجی میکروتوربین و افت فشار تحت تأثیر زوایای مختلف شیر تخلیه به مخزن

Table 3. Microturbine output power and pressure drop due to different angles of discharge valve to tank

Different angles of outlet valve to the tank- with guide vane														
0°			15°			30°			40°			45°		
Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH
42.5	41.7	9.69	42.1	41	9.51	41.7	38.1	9.63	40.8	41.3	9.53	40.2	42	8.29

Different angles of outlet valve to the tank- without guide vane														
0°			15°			30°			40°			45°		
Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH	Q	P <sub>t</sub>	ΔH
49.4	2.2	5.55	49.2	2.5	5.57	49.3	2.6	5.39	47.5	41.3	4.93	46	0.8	4.65

ناشی از آن نیز نسبت به زاویه ۳۵ درجه از ۹/۷۶ به ۱۰/۰۱ متر افزایش یافت. از میان سه زاویه بازشدگی انتخاب شده برای صفحه هدایت‌کننده جریان، بهترین نتیجه از لحاظ توان خروجی و میزان افت فشار زمانی حاصل شد که پمپ در حالت بیشترین دبی و فشار خود قرار داشت و هم‌زمان از صفحه هدایت‌کننده جریان با زاویه بازشدگی ۲۰ درجه استفاده شد.

جدول ۴- توان خروجی میکروتوربین و افت فشار تحت تأثیر زوایای مختلف صفحه هدایت‌کننده جریان

Table 4. Microturbine output power and pressure drop due to different angles of guide vane

Opening angle	Q (m <sup>3</sup> /hr)	(mH <sub>2</sub> O)	
		ΔH	P <sub>t</sub> (Watt)
20°	42.61	9.71	59.01
35°	42.95	9.76	51.71
50°	43.30	10.01	54.64

#### ۴- نتیجه‌گیری

انرژی نهفته در آب جاری یکی از مهم‌ترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر است که در سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در این پژوهش، به منظور ارزیابی قابلیت تولید انرژی الکتریکی از فشار آب اضافی موجود در شبکه آب‌رسانی فشار متوسط، یک نوع میکروتوربین محور عمودی با ساختار کروی توخالی برای ارزیابی عملکرد هیدرولیکی و بررسی

یک وات افزایش یافت. در این حالت، میزان افت فشار ناشی از مجموعه میکروتوربین و صفحه هدایت‌کننده جریان از ۹/۶۹ متر به ۸/۲۹ متر کاهش پیدا کرد. در حالتی که این صفحه از مدار تست هیدرولیکی برداشته شد، توان خروجی میکروتوربین برای هر پنج زاویه انتخاب شده شیر تخلیه به مخزن، کاهش زیادی پیدا کرد، به طوری که با افزایش زاویه شیر تخلیه به مخزن از صفر به ۴۵ درجه، توان از ۲/۲ وات به ۰/۸ وات کاهش پیدا کرد و میزان افت فشار نیز به ۴/۶۵ متر تنزل یافت که دلیل این امر را می‌توان به کاهش انرژی جنبشی در نزدیکی میکروتوربین و در نتیجه کاهش سرعت دورانی آن در حالت نبود صفحه هدایت‌کننده جریان نسبت داد.

#### ۳-۳- سناریوی سوم

برای بررسی تأثیر زوایای مختلف بازشدگی صفحه هدایت‌کننده جریان بر روی میزان توان خروجی میکروتوربین و افت فشار، علاوه بر زاویه بازشدگی ۲۰ درجه این صفحه، آزمایش‌ها برای دو زاویه ۳۵ و ۵۰ درجه انجام شد. به منظور مقایسه راحت‌تر تأثیر این سه زاویه بر روی میزان توان خروجی و افت فشار، نتایج حاصل از هر سه زاویه در جدول ۴ ارائه شده است.

نتایج حاصل از این سناریو حاکی از آن است که با افزایش زاویه بازشدگی صفحه هدایت‌کننده جریان از ۳۵ به ۵۰ درجه، میزان توان خروجی میکروتوربین حدود ۳ وات افزایش یافت (توان خروجی از ۵۱/۷۱ به ۵۴/۶۴ وات رسید)، افت فشار

بیشترین توان خروجی میکروتوربین به میزان ۵۹/۰۱ وات برای حالتی به دست آمد که در آن دبی ورودی برابر ۴۲/۶۱ مترمکعب بر ساعت و زاویه بازشدگی صفحه هدایت کننده جریان ۲۰ درجه بود. همچنین کمترین توان خروجی برابر با ۰/۸ وات برای حالتی حاصل شد که دبی برابر ۴۶ مترمکعب بر ساعت و از صفحه هدایت کننده جریان استفاده نشده بود.

### ۵- قدردانی

نویسندگان پژوهش از پردیس ابوریحان دانشگاه تهران به خاطر در اختیار قرار دادن کلیه کارگاه‌ها و آزمایشگاه‌ها برای انجام آزمایش‌ها، قدردانی می‌کنند.

اثر پارامترهای مختلف از جمله دبی و فشارهای متفاوت و همچنین زوایای مختلف شیر تخلیه به مخزن و صفحه هدایت کننده جریان، مورد ارزیابی آزمایشگاهی قرار گرفت.

برای دستیابی به این اهداف، سه سناریوی اصلی و پنج زیرسناریو تعریف شد. نتایج سناریوها حاکی از تأثیر فراوان میزان دبی، صفحه هدایت کننده جریان و همچنین زاویه شیر تخلیه به مخزن بر روی عملکرد میکروتوربین مورد بررسی بود. در کلیه سناریوهای تعریف شده، با افزایش میزان دبی ورودی، افت فشار ناشی از میکروتوربین به طور نسبی کاهش یافته و میزان توان خروجی میکروتوربین با شیب بیشتری نسبت به افت فشار افزایش پیدا کرد.

### References

- Ahmadihaji, A.H. 2019. Evaluation of hydraulic performance and extract relations of small water turbines in water supply network. Master's thesis. Irrigation and drainage department. Abouraihan campus. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Amjadi, H. 2019. Design and hydrodynamic simulation of water microturbine for use in medium pressure water supply network. Master's thesis agro-technology department. Abouraihan campus. University of Tehran, Tehran, Iran. (In Persian)
- Ahmadi, M. & Aalami, H. 2012. Analyzing the status of renewable energy in Iran and the world and investment opportunities, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> National Wind and Solar Energy Conference*, 3-4. 2012. Tehran, Iran. (In Persian)
- Bakhshi, Y. & Roshan, M. 2016. Electricity generation from drinking water transmission line by installing water microturbine for residential homes, case study (Lahijan Azarbayjan water supply transmission line). *International Congress on Modern Sustainable Development in Architecture, Urban Development, Civil Engineering and Building Engineering*, Center of Industry and Construction, Istanbul, Turkey. (In Persian)
- Casini, M. 2015. Harvesting energy from in-pipe hydro systems at urban and building scale. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 4, 316-327.
- Chen, J., Yang, H. X., Liu, C. P., Lau, C. H. & Lo, M. 2013. A novel vertical axis water turbine for power generation from water pipelines. *Energy*, 54, 184-193.
- Coelho, B. & Andrade-Campos, A. 2014. Efficiency achievement in water supply systems-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 59-84.
- Du, J., Yang, H., Shen, Z., & Chen, J. 2017. Micro hydro power generation from water supply system in high rise buildings using pump as turbines. *Energy*, 137, 431-440.
- Fraenkel, P. 1999. Flowing too slowly performance and potential of hydro. *Renewable Energy World*, 2, 50-54.
- Ghaisari, M. H. 2011. Energy biogas in waste, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Iranian Bioenergy Conference*, Tehran, Iran. (In Persian)

- Li, H., Zhou, D., Martinez, J. J., Deng, Z. D., Johnson, K. I. & Westman, M. P. 2019. Design and performance of composite runner blades for ultra low head turbines. *Renewable Energy*, 132, 1280-1289.
- Ma, T., Yang, H., Guo, X., Lou, C., Shen, Z., Chen, J., & Du, J. 2018. Development of inline hydroelectric generation system from municipal water pipelines. *Energy*, 144, 535-548.
- Mohammadi, A. & Voshtani, M. 2015. Feasibility of installing small hydroelectric power plants on Tehran water supply network, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Iranian National Conference on Energy and Sustainable Development*, Takestan, Qazvin, Iran. (In Persian)
- Nourbakhsh, A. 2005. Turbomachinery, University of Tehran Publications. Tehran, Iran. (In Persian)
- Penche, C. 2004. Guide on how to develop a small hydropower plant. *European Small Hydropower Association*. ESHA Pub., Belgium.
- Rittmann, B. E. 2008. Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms. *Biotechnology and Bioengineering*, 100(2), 203-212.
- Saftner, D. A., Hryciw, R. D., Green, R. A., Lynch, J. P. & Michalowski, R. L. 2008. The use of wireless sensors in geotechnical field applications. *In Proceedings of the 15<sup>th</sup> annual Great Lakes geotechnical/geo environmental conference*, Indianapolis, Indiana, USA.
- Samora, I., Manso, P., Franca, M. J., Schleiss, A. J. & Ramos, H. M. 2016. Energy recovery using micro-hydropower technology in water supply systems: the case study of the city of Fribourg. *Water*, 8(8), 344.
- Sarkar, P., Sharma, B. & Malik, U. 2014. Energy generation from grey water in high raised buildings: the case of India. *Renewable Energy*, 69, 284-289.
- Taebi, A. & Chamani, M. 2018. *Urban water distribution networks*. Isfahan University of Technology Publications, Isfahan, Iran. (In Persian)
- Yaakob, O., Ahmed, Y. M., Elbatran, A. & Shabara, H. 2014. A review on micro hydro gravitational vortex power and turbine systems. *Journal Technologi*, 69, 1-7.
- Zhou, G., Huang, L., Li, W. & Zhu, Z. 2014. Harvesting ambient environmental energy for wireless sensor networks: a survey. *Journal of Sensors*, 42(8), 442-462.