



Archimedes Screw Turbine Performance: a review

Abbas Godini¹ | Kazem Shahverdi² | Saeed Gohari³

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: abbass.godini@gmail.com
2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: k.shahverdi@basu.ac.ir
3. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. E-mail: s.gohari@basu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 August 2023

Received in revised form

20 September 2023

Accepted 15 October 2023

Published online 17 January 2023

ABSTRACT

Due to the increasing human need for electrical energy and the reduction of non-renewable resources for its production, the use of non-fossil and renewable resources and resources that have less environmental damage have been taken into consideration. Archimedes screw turbine is used as a means of producing clean energy in waterways, and many theoretical and experimental studies have been done on it. Most of these studies, in laboratory and numerical form, are in the field of optimization of screw constituent components and their effect on its efficiency including length, inner and outer diameter, installation angle, number of blades and screw pitch. In this research, the most important studies conducted in the field of Archimedes screw turbine performance, which have been published in the last two decades, were reviewed. The results showed that the parameters of screw components have a greater effect on efficiency compared to hydraulic parameters.

Keywords:

Archimedes screw

Energy

small-scale

water

Cite this article: Godini, A., Shahverdi, K., & Gohari, S. (2024). Archimedes Screw Turbine Performance: a review. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (4), 1093-1105.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.363842.1094>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.363842.1094>



عملکرد توربین پیچ ارشمیدس: مطالعه مروری

عباس گودینی^۱ | کاظم شاهوردی^۲ | سعید گوهری^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: abbass.godini@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: k.shahverdi@basu.ac.ir
۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: s.gohari@basu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	با توجه به نیاز روزافزون بشر به انرژی برق و کاهش منابع تجدیدناپذیر برای تولید آن، استفاده از منابع غیرفسیلی و تجدیدپذیر و منابعی که خسارت‌های زیست‌محیطی کم‌تری را داشته باشند، مورد توجه قرار گرفته است. توربین پیچ ارشمیدس به‌عنوان یک وسیله تولید انرژی پاک در مجاری آبی مورد استفاده قرار گرفته و مطالعات عددی و آزمایشگاهی زیادی بر روی آن صورت پذیرفته است. بیش‌تر این مطالعات، در زمینه بهینه‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده پیچ و تأثیر آن‌ها بر راندمان آن می‌باشد و شامل طول، قطر داخلی و خارجی، زاویه استقرار، تعداد پره‌ها و گام پیچ است. در این پژوهش، مهم‌ترین مطالعات انجام‌گرفته در زمینه توربین پیچ ارشمیدس که در دو دهه اخیر چاپ شده است، مرور می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای تشکیل‌دهنده اجزای پیچ تأثیر بیش‌تری بر روی راندمان، در مقایسه با پارامترهای هیدرولیکی دارد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷	
کلیدواژه‌ها: آب انرژی پیچ ارشمیدس کوچک‌مقیاس	

استناد: گودینی، عباس؛ شاهوردی، کاظم و گوهری، سعید (۱۴۰۲). عملکرد توربین پیچ ارشمیدس: مطالعه مروری. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۳ (۴)، ۱۰۹۳-۱۱۰۵
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.363842.1094>



۱. مقدمه

امروزه انرژی‌های آبی در مقیاس بزرگ به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این وجود، این سیستم‌ها حیات وحش را از بین می‌برند یا مختل می‌کنند، به تأسیسات بزرگ نیاز دارند، مناطق قابل سکونت را سیلابی می‌کنند و توربین‌های مورد استفاده در آن‌ها با سرعت‌های چرخشی بالا کار می‌کنند. نیروگاه آبی بزرگ جریان طبیعی آب را تغییر داده و در نتیجه رسوبات و مسیرهای حرکت ماهی‌ها را مختل می‌کند. علاوه بر این، جریان آب در پایین دست نوسان داشته و درگیری‌های ژئوپلیتیکی در مناطق مرزی محتمل خواهد بود. عمده پتانسیل‌های انرژی آبی در مقیاس بزرگ در کشورهای توسعه‌یافته مورد استفاده قرار گرفته و یافتن مکان‌های جدید با توجه به محدودیت منابع آبی و خشکسالی متوالی دشوارتر می‌شود. بنابراین، با استفاده از انرژی‌های آبی در مقیاس کوچک، می‌توان افق‌های جدیدی را در استفاده از آب به‌عنوان منبع انرژی، با اثرات زیست‌محیطی کمتر، باز کرد (Shimomura and Takano, 2013).

پیچ ارشمیدس، که پیچ هیدرودینامیک یا پمپ پیچ نیز نامیده می‌شود، بیش از دو هزار سال برای کاربردهای مختلف از جمله پمپاژ آب مورد استفاده قرار گرفته است (Dedić-Jandrek and Nižetić, 2019). این پیچ، از مجموعه‌ای مارپیچ از پره‌ها تشکیل شده است که دور یک لوله استوانه‌ای مرکزی پیچیده شده‌اند. پیچ معمولاً مایل بوده و بین یاتاقان‌های ثابت بالایی و پایینی قرار می‌گیرد و در یک غلاف متحدالمرکز و ثابت با سطح باز محصور می‌شود. آب بین پره‌های پیچ و غلاف محبوس می‌شود و واحد حجمی را تشکیل می‌دهد که باکت نامیده می‌شود. یک شکاف کوچک بین لبه پره‌ها و غلاف وجود دارد تا پیچ آزادانه داخل غلاف بچرخد (Simmons et al., 2021). پیچ ارشمیدس که به‌عنوان توربین استفاده می‌شود، معمولاً در مکان‌هایی با هد یک تا ۶/۵ متر و دبی حجمی ۲۰۰ تا ۶۵۰۰ لیتر در ثانیه (هدهای کم و دبی متوسط) نصب می‌شود (Shahverdi et al., 2021). با این حال، ممکن است برای تبدیل انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی در مکان‌های با هد صفر نیز اجرا شود (Bouvan et al., 2021). مجاری آبی، پتانسیل زیادی را در این زمینه دارند (Edirisinghe et al., 2021). به‌عنوان مثال، کانال‌های آبیاری یکی از بهترین منابع کوچک‌مقیاس برق‌آبی هستند زیرا دارای سازه‌های مختلف برای مستهلک کردن انرژی مازاد هستند که به‌صورت تلفات گرمایی از بین می‌رود. این انرژی مازاد آب جاری می‌تواند به برق تبدیل شود (Shahverdi et al., 2020).

مزیت انتخاب پیچ ارشمیدس نیز این است که تغییرات دبی تأثیر کمی بر راندمان توربین دارد و یکی از بهترین راه‌ها برای تولید برق برای جوامع و مناطق روستایی است. نصب پیچ ارشمیدس در مقیاس کوچک جهت تولید برق با دبی متوسط و هد پایین در مناطق روستایی به‌ویژه مناطق دور افتاده بسیار مناسب است (Suraya et al., 2015). موارد زیادی در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف اجرا شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هزینه‌های اجرایی آن تابع عوامل زیادی است، با این حال، مقدار متوسط هزینه برابر با ۱۵۰۰ دلار بر کیلووات برآورد شده است. با توجه به کاربردی بودن توربین پیچ ارشمیدس، مطالعه، مدل‌سازی عددی و پژوهش‌های آزمایشگاهی بر روی آن در سال‌های اخیر به‌طور جدی مورد توجه قرار گرفته است (Siswantara et al., 2019). در این پژوهش مروری، تأثیر پارامترهای مختلف بر روی توربین پیچ ارشمیدس بررسی می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی مهم‌ترین پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی توربین پیچ ارشمیدس در سال‌های اخیر و بررسی اثر پارامترهای مختلف بر روی توربین پیچ ارشمیدس می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. اجزای هندسی پیچ ارشمیدس

هسته مرکزی یک توربین پیچ ارشمیدس، بدنه پیچ ارشمیدس است که هندسه آن بسیار شبیه به پیچ مرسوم است. یک

پیچ ارشمیدس، مجموعه‌ای از صفحات حلزونی (مارپیچ) به نام پره است که بر روی یک شفت سیلندری مرکزی به صورت ثابت قرار گرفته‌اند. پیچ در یک محفظه‌ای قرار گرفته است که یا به صورت کامل پیچ را احاطه کرده و یا به صورت نیم سیلندر فقط قسمت پایین شفت را در برمی‌گیرد. به طور معمول یک درز کوچک بین پیچ و محفظه قرار دارد که در نتیجه آن، پیچ می‌تواند به طور آزاد در داخل محفظه بچرخد. بخشی از آب که می‌تواند از قسمت درز به پایین دست حرکت کند، نشت جریان نام دارد. جریانی از آب که از روی شفت به پایین دست ریزش می‌کند جریان سرریز نامیده می‌شود. در برخی موارد، محفظه نیز به پیچ متصل شده و همراه با آن می‌چرخد. آبی که در راستای محور پیچ به قسمت پایین حرکت می‌کند بین دو پره مجار محبوس شده و واحدهای حجمی گسسته را تشکیل می‌دهد که باکت نام دارد. با توجه به مایل بودن محور پیچ، باکت‌ها باعث به وجود آمدن اختلاف ارتفاع (اختلاف فشار) در دو طرف پره‌ها خواهند شد. شکل حلزونی پره‌ها باعث می‌شود که مؤلفه مماسی نیروی فشاری وارد بر محور مرکزی پیچ، گشتاوری را ایجاد کند که منجر به چرخیدن پیچ می‌شود. اگر یک ژنراتور به پیچ وصل شود، چرخش مکانیکی پیچ می‌تواند برای تولید برق استفاده شود. در شکل (۱) اجزای یک توربین پیچ ارشمیدس نشان داده شده است. قطر خارجی (Do)، قطر داخلی (Di)، گام پیچ (S)، طول کل (L)، تعداد پره‌ها (N) و زاویه استقرار (β) از اجزای اصلی مؤثر بر عملکرد پیچ می‌باشد (Erinofardi *et al.*, 2022).

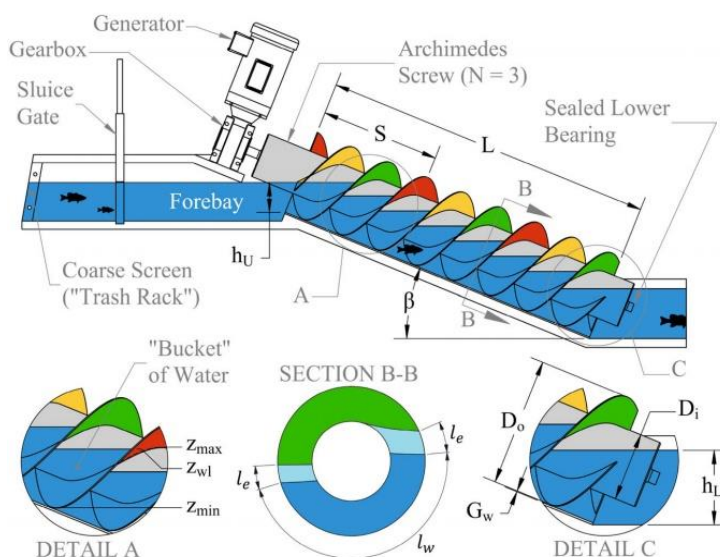


Figure 1. Schematic and geometry of the Archimedes screw turbine (Simmons *et al.*, 2021)

۲.۲. مطالعات عددی

Shimomura and Takano (2013) از یک مدل عددی سه بعدی برای تجزیه و تحلیل جریان در توربین پیچ ارشمیدس استفاده کردند. نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی نشان داد. نتایج نشان داد که هندسه جریان و چرخش توربین ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند و بر مکانیسم تولید گشتاور تأثیر قابل توجهی می‌گذارند.

Lubitz *et al.* (2014) دو مدل نظری مبتنی بر تحلیل فشار شبه استاتیک را، برای پیش‌بینی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس توسعه دادند. مدل اول یک مدل ایده‌آل و بدون چرخش پیچ بود در حالی که مدل دوم، ویژگی‌های هندسی یک پیچ ارشمیدس در حال چرخش از جمله شیب، گام و قطر داخلی و خارجی را در برآورد لحاظ می‌کرد. شبیه‌سازی عملکرد پیچ ارشمیدس برای عمق‌های مختلف آب محبوس شده در داخل پیچ انجام شد. نتایج نشان داد که اگر تمام از

تلفات اصطکاکی و اثرات ورودی و خروجی صرف نظر شود، پیچ ارشمیدس می تواند تمام انرژی پتانسیل موجود در جریان آب را به توان مکانیکی تبدیل کند. اثرات نشت شکاف در شبیه سازی باعث کاهش راندمان می شود. نتایج نشان داد که حداکثر راندمان یک توربین پیچ ارشمیدس زمانی رخ می دهد که پیچ تقریباً پر باشد. با این حال، پیچ ارشمیدس برای حالت هایی که بیش از حد یا کمتر پر شود، راندمان تقریباً ثابتی را خواهد داشت.

Rohmer *et al.* (2016) با توسعه یک مدل عددی و مقایسه نتایج آن با یک نمونه تجربی نشان دادند که مکان های

با هد یک تا ۶/۵ متر و دبی ۰/۲۵ تا ۶/۵ مترمکعب بر ثانیه، مناسب ترین مکان ها برای نصب توربین پیچ ارشمیدس است. ظرفیت تولید برق چنین نیروگاهی بین ۱/۷ تا ۳۰۰ کیلووات با راندمان کلی ۷۲ درصد برآورد شده است. پارامترهای هندسی بهینه پیچ ارشمیدس را با استفاده از تجزیه و تحلیل نمودارهای راندمان مکانیکی استخراج کردند.

Dellinger *et al.* (2016) با توسعه یک مدل نظری و مقایسه آن با نتایج یک نمونه آزمایشگاهی نشان دادند که

تلفات اصطکاکی روی پره ها و تلفات ناشی از نشتی شکاف بین پره ها و غلاف به ترتیب حدود ۱۵ درصد و هفت درصد است که تلفات نشت با افزایش سرعت جریان کاهش می یابد.

Kozyn and Lubitz (2017) مدل تلفات توان برای توربین پیچ ارشمیدس را با لحاظ کردن تلفات اصطکاکی و تلفات

استغراق خروجی در یک مدل ایده آل توسعه دادند. به طور متوسط، تلفات توان استغراق خروجی، تلفات توان اصطکاکی چرخش و تلفات اصطکاکی یاتاقان به ترتیب ۴۱/۲، ۱۴/۳ و ۱۲/۳ درصد از کل تلفات توان برآورد شد که در مجموع بیش از ۶۷/۶ درصد از تلفات توان را شامل می شود. ائتلاف توان مربوط به ژنراتور و تجهیزات مربوطه نیز به طور متوسط ۲۶/۵ درصد از کل تلفات توان، به ویژه در دبی های پایین می باشد.

Maulana *et al.* (2019) با بررسی عملکرد یک پیچ ارشمیدس با یک پره تحت دو دبی جریان پنج و ۳/۷۵ لیتر بر

ثانیه نشان دادند که سیستم انتقال چرخنده می تواند دور چرخش توربین را از ۲۳۶ دور در دقیقه به ۵۶۸ دور در دقیقه افزایش دهد. بهترین عملکرد توربین با استفاده از سیستم مذکور در دبی پنج لیتر بر ثانیه با قدرت ۱۵/۳۸ وات و چرخش نهایی ۴۱۰/۶۷ دور در دقیقه به دست آمد.

Shahverdi *et al.* (2019) یک سیستم هیبریدی برای تولید انرژی با ترکیب توربین پیچی ارشمیدس و انرژی

خورشیدی توسعه دادند. بیشترین راندمان برابر با ۵۸/۲۴ درصد و برای پیچ با طول ۱/۵ متر، زاویه استقرار ۲۵ درجه و تعداد پره یک به دست آمد. Shahverdi *et al.* (2020) یک مدل تئوری را در محیط متلب توسعه دادند که پارامترهای هندسی یک توربین پیچ ارشمیدس را بهینه سازی می کرد. مقادیر بهینه طول، زاویه و تعداد پره را به ترتیب برابر با شش متر، ۲۰ درجه و یک پره به دست آوردند که منجر به راندمان مکانیکی ۹۰/۸۳ درصد شد.

Alonso-Martinez *et al.* (2020) با بررسی دو نمونه آزمایشی در شمال اسپانیا و بررسی نتایج عددی و تجربی

نشان دادند که راندمان توربین پیچ ارشمیدس به شدت به میزان پرشدن باکتها بستگی دارد. پرشدگی ۱۰۰ درصد بالاترین راندمان را به دست می دهد. با این حال، به دلیل حرکت دورانی پیچ، تلفات سرریز در پرشدگی بیش از ۸۵ درصد رخ می دهد و در نتیجه راندمان توربین کاهش می یابد.

Shahverdi (2021) روش های پاسخ سطح و پای باکینگهام را برای پیش بینی مقادیر بهینه یک توربین پیچ

ارشمیدس استفاده کرد و مقادیر بهینه زاویه و تعداد پره ها را به ترتیب برابر با ۲۷ درجه و پنج پره با راندمان ۸۳/۴ درصد به دست آورد.

Edirisinghe *et al.* (2021) پژوهشی به منظور تجزیه و تحلیل میدان جریان در توربین پیچ ارشمیدس جریان

روزمینی با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی انجام دادند و حداکثر زاویه استقرار را برابر با ۴۵ درجه، حداکثر راندمان

را حدود ۸۲ درصد برای ارتفاع ۵/۲ متر و دبی ۰/۲۳۲ مترمکعب بر ثانیه به دست آوردند. با آن که، بسیاری از پژوهش‌گران ادعا می‌کنند که راندمان بالای ۸۰ درصد برای توربین پیچ ارشمیدس با زاویه شیب کم همراه با مخازن بالادست و پایین دست می‌باشد، این مطالعه نشان داد که توربین پیچ ارشمیدس با زاویه شیب بالاتر و با جریان روزمینی می‌تواند تا ۸۰ درصد راندمان داشته باشد.

Shahverdi *et al.* (2021) اثر سرعت چرخش، دبی جریان و زاویه استقرار را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس بررسی کردند. خطای نسبی کم‌تر از یک درصد (۰/۶۹ درصد) برای سرعت چرخش ۱۰ رادیان بر ثانیه و زاویه استقرار ۲۴/۹ درجه به دست آمد. مدل عددی توان مکانیکی را بیش از مقدار واقعی پیش‌بینی کرد، زیرا برخی تلفات توان در مدل لحاظ نشده بود. حداکثر توان خروجی مکانیکی برای سرعت چرخش ۱۰ رادیان بر ثانیه به دست آمد. توان مکانیکی با افزایش سرعت چرخش پیچ از پنج رادیان بر ثانیه به ۱۰ رادیان بر ثانیه افزایش یافت و سپس برای سرعت‌های چرخش بین ۱۰ رادیان بر ثانیه و ۱۵ رادیان بر ثانیه کاهش یافت. راندمان برای تغییرات جریان نزدیک به جریان طراحی تقریباً ثابت ماند و حداکثر سرعت آب در ناحیه شکاف مشاهده شد که همراه با گرادیان فشار زیاد بود. Shahverdi *et al.* (2023) با استفاده از بهینه‌سازی مدل پیش‌بینی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس با الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری بهترین مقادیر را برای نسبت قطر داخلی به قطر خارجی، نسبت گام به قطر خارجی، زاویه استقرار و تعداد پره‌ها به ترتیب در محدوده‌های ۰/۴۳-۰/۵۶، ۱-۱/۲، ۲۰-۲۲/۵ درجه و دو تا چهار به دست آوردند.

۳.۲. روش‌های تجربی

Saroinsong *et al.* (2016) تأثیر عدد فرود بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس سه پره را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد که اگر عدد فرود افزایش یابد، گردابه در بین پره‌ها تشکیل شده و منجر به کاهش راندمان می‌شود. بیش‌ترین راندمان ۸۹ درصد به دست آمد که به ترتیب در زاویه استقرار ۲۵ درجه و عدد فرود ۰/۱۵ حادث شد. Straalsund *et al.* (2018) با انجام آزمایش بر روی سه شکل پره شامل پره صاف، انحنا دار محدب و انحنا دار مقعر که با پرینتر سه بعدی ساخته شدند، عملکرد توربین پیچ ارشمیدس را مورد ارزیابی قرار دادند. مقایسه ارتفاع‌های ورودی مختلف نشان داد که در دبی‌های کم‌تر از ۳/۷۸۵ لیتر بر ثانیه در حالتی که گام پیچ با طول آن برابر باشد، ظرفیت عبور جریان برای سه شکل پره تقریباً یکسان بود. در دبی‌های بالاتر، در طراحی انحنا دار محدب، به ارتفاع آب بالاتری نسبت به پره صاف و انحنا دار مقعر نیاز بود. آن‌ها نشان دادند که حجم باکت بزرگ‌تر منجر به عبور دبی بیش‌تر نمی‌شود. در نتیجه، برای طراحی انحنا دار محدب، به سرعت چرخش بالاتری نسبت به پره صاف یا انحنا دار مقعر برای عبور جریان، مورد نیاز بود. در دبی‌های پایین‌تر نیز، توان، گشتاور، دبی عبوری و راندمان برای سه شکل مشابه بودند. در دبی‌های بالاتر، شکل انحنا دار محدب به اختلاف ارتفاع بیش‌تری برای عبور یک دبی مشخص نیاز داشت. شکل نسبی پره‌های پیچ کم‌ترین تأثیر را بر گشتاور، در سرعت چرخش و دبی جریان پایین دارد در نتیجه، هر سه شکل پیچ عملکرد مشابه داشتند.

Saroinsong *et al.* (2018) تأثیر پارامترهای هندسی و جریان را بر روی راندمان پیچ ارشمیدس در مقیاس آزمایشگاهی و با استفاده از روش سطح پاسخ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که حداکثر راندمان برابر با ۸۲/۷۲ درصد بود که برای زاویه استقرار ۵۱/۸۲ درجه، عمق جریان ورودی توربین ۰/۰۶۴ متر و سرعت ورودی ۰/۶ متر بر ثانیه به دست آمد.

Simmons (2019) سه پیچ مختلف را که در همه پارامترها به جز طول پیچ یکسان بودند، در مقیاس آزمایشگاهی بررسی کردند. زاویه استقرار پیچ‌ها قابل تغییر بود و اختلاف ارتفاع ثابت در نظر گرفته شد. از آنجایی که اختلاف ارتفاع در همه پیچ‌ها یکسان بود، پیچ‌ها در زوایای استقرار مختلف نصب شدند. مشخص شد که طولانی‌ترین پیچ (با کم‌ترین زاویه استقرار که برابر با ۱۵ درجه بود) بهترین عملکرد را دارد و پیچ با زاویه شیب ۲۵ درجه در رتبه بعدی قرار دارد. کوتاه‌ترین پیچ (در تندترین زاویه استقرار که برابر با ۳۳/۸ درجه بود) بدترین عملکرد را داشت.

Siswantara *et al.* (2019) تأثیر زاویه استقرار بر روی عملکرد توربین ارشمیدس را با روش آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش با دبی ۱/۰۶ لیتر بر ثانیه، شیب بین ۳۶ درجه تا ۴۴ درجه و سه ارتفاع مختلف انجام گرفت. مشخص شد که نشت سرریز تأثیر قابل توجهی بر راندمان توربین پیچ ارشمیدس ندارد. دلیل آن این است که توان و راندمان توربین در هنگام وقوع سرریز همچنان افزایش می‌یابد.

Dedić-Jandreć and Nižetić (2019) تغییرات توان خروجی توربین، گشتاور و راندمان را در مقابل تغییرات زاویه استقرار، دبی جریان و سرعت دورانی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. سه زاویه شیب مختلف، ۲۱، ۲۵ و ۳۰ درجه آزمایش شد و نتایج با دو نوع ژنراتور جریان مستقیم و متناوب مقایسه شد. با توجه به نتایج، حداکثر راندمان ۶۴ درصد در زاویه استقرار ۲۱ درجه و دبی ۱۰ لیتر در ثانیه به دست آمد. در این شرایط، توان خروجی ژنراتور حدود ۳۵ وات به دست آمد. همچنین مشخص شد که حداکثر توان خروجی در ژنراتور (۵۷ وات)، در زاویه استقرار ۳۰ درجه و جریان آب ۱۲/۸۱ لیتر در ثانیه به دست می‌آید.

Dellinger *et al.* (2019) با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و مطالعه آزمایشگاهی، عملکرد توربین پیچ ارشمیدس را برای تعیین تأثیر زاویه شیب و تعداد پره‌ها بر روی توان و راندمان آن بررسی کردند. تطابق خوبی بین مدل و نتایج آزمایشگاهی حاصل شد. مدل دینامیک سیالات محاسباتی دارای خطا نسبی کم‌تر از دو درصد در موارد بهینه بود. زوایای شیب بین ۱۰ و ۳۸ درجه و تعداد پره‌های مختلف (سه، چهار و پنج) بررسی شد. تلفات سرریز و نشت جریان در شیب‌های بالاتر افزایش می‌یابد. این تلفات با افزایش تعداد پره‌ها کاهش می‌یابد و پیچ پنج‌پره بیش‌ترین توان را تولید کرد. پیچ‌های چهار و پنج‌پره بیش‌ترین راندمان را در زوایای استقرار بین ۲۰ تا ۲۴/۵ درجه تولید کردند و پیچ سه پره در زوایای شیب نسبتاً پایین‌تر دارای بالاترین راندمان است.

Shahverdi *et al.* (2020) در یک مطالعه عددی، بهینه‌سازی یک نمونه توربین پیچ ارشمیدس را با شبیه‌سازی آن در کانال عقیلی شرقی واقع در استان خوزستان، انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با جایگزینی درجه با توربین بهینه شده و بدون تغییر قابل توجه در شرایط کانال، می‌توان بین ۱۸ تا ۲۰ کیلووات توان مکانیکی تولید نمود. Lee and San (2021) با انجام آزمایش بر روی یک توربین پیچ ارشمیدس در شیب‌های زیاد (۳۰ تا ۹۰) نشان دادند که مقادیر بهینه زاویه استقرار و سرعت به ترتیب برابر با ۴۵ درجه و ۱/۵ متر بر ثانیه می‌باشد که منجر به راندمان مکانیکی ۹۴/۶ درصد می‌شود. Zitti *et al.* (2020) ضریب عملکرد یک توربین پیچ بدون مجرا را برای یک هندسه ثابت ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند توربین شیب‌دار عملکرد بدتری نسبت به توربین افقی دارد.

Abdullah *et al.* (2021) تأثیر دبی جریان، زاویه استقرار و تعداد پره‌ها را با استفاده از مدل آزمایشگاهی و مدل عددی برای تعیین عملکرد توربین پیچی ارشمیدس در سد رمادی عراق مورد بررسی قرار دادند. مدل فیزیکی از فولاد ضدزنگ با پارامترهای زیر ساخته شد؛ نسبت شعاع ۰/۵۳۶، گام ۷۰ میلی‌متر، شیب مورد بررسی ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درجه. نتایج نشان داد که بیش‌ترین راندمان در زاویه ۳۵ درجه و دبی ۱/۱۲ لیتر در ثانیه برابر با ۸۱/۴ درصد به دست می‌آید. حداکثر توان به دست آمده ۲۵/۱۳ وات در زاویه ۴۵ درجه، دبی ۲/۰۶۵ لیتر بر ثانیه و راندمان ۷۲ درصد بود. در مورد

ارتباط گشتاور و راندمان با تعداد پره‌ها، میزان گشتاور و راندمان هر دو با افزایش تعداد پره‌ها به دلیل افزایش سطح تماس بین آب و پره‌ها افزایش می‌یابد، اما افزایش بیش‌تر تعداد پره‌ها باعث افزایش بیش‌تر مقادیر گشتاور و راندمان نمی‌شود و فقط هزینه ساخت را افزایش خواهد داد.

۳. نتایج و بحث

با توجه به مطالعات انجام‌شده که خلاصه و مهم‌ترین دستاورد آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است، می‌توان معیارهای زیر را استخراج نمود و در طراحی اولیه توربین پیچ ارشمیدس به کار برد. بدیهی است طراحی نهایی نیاز به بهینه‌سازی و مطالعه اقتصاد طرح خواهد داشت.

Table 1. Results of studies: tilt angle (β) in degree, flow (Q) in cubic meters per second, screw's rotation speed (ω) in radian per second, bucket volume (V) in percent, and outer radius (Ro), inner radius (Ri), outer diameter (Do), inner diameter (Di), screw's length (L), pitch (S), geodetic height (H), gap width (Gw) all in meters

Type	Variable	Value	Result	Efficiency
Dellinger <i>et al.</i> (2018)	Ro	0.096	• Friction losses and gap leakage are main losses.	77
	Ri	0.052		
	S	0.192		
	L	0.4		
	ω	5.5-16		
	Q	4-1		
	β	30-18		
Shahverdi (2021)	Do	0.15-0.11	• Response surface method and Buckingham π theorem were used to develop the efficiency prediction model. • The optimal tilt angle and the number of blades were obtained as 27 degrees and 4 blades, respectively, and resulted in an efficiency of 83.4%.	83.4
	Q	7-0.6		
	H	0.4-0.2		
	β	35-20		
	N	4-2		
	ω	25-6		
Edirisinghe <i>et al.</i> (2021)	Ro	1.2	• 80% efficiency can also be reached at high tilt angles.	82.1
	Ri	0.643		
	S	0.836		
	L	7		
	β	45		
	N	3		
	Gw	0.005		
Q	232			
Maulana <i>et al.</i> (2018)	Ro	0.167	• The gearbox can increase the turbine rotation speed from 236 rpm to 567.46 rpm. • The best performance of the turbine was obtained using a gearbox wheel at a flow rate of 0.05 cubic meters per second with a power of 15.38 W and a final rotation of 410.67 rpm.	55
	Ri	0.089		
	S	0.287		
	L	2		
	Q	50, 37.5		
	β	30		
	H	0.096		
Saroinsong <i>et al.</i> (2016)	Ro	0.055	• The highest efficiency is 89% in the tilt angle of 25 degrees and the flow speed of 0.5 m/s, the characteristic length is equal to Ro and the Froude number is 0.15.	89
	Ri	0.03		
	S	0.132		
	ω	5.5-16		
	β	25,35,45		
	N	3		
Scott Simmons ¹ (2019)	Do	0.381	• less length has better performance.	88
	Di	0.168		
	S	0.381		
	L	0.925,0.617,0.478		
	N	4		
	Q	11,10.5,10.9,5.9		
	β	5.6,8.15,33.24		
Saroinsong <i>et al.</i> (2018)	Ro	0.055	• The maximum efficiency was 82.72% with a shaft tilt angle of 51.82 degrees.	
	Ri	0.030		
	S	0.132		
	ω	5.5-16		
	β	25,35,45		
	N	3		
Siswantara <i>et al.</i> (2019)	Ro	0.096	• The maximum gap leakage loss was 7%, decreasing slowly with increasing flow rate.	77
	Ri	0.052		
	S	0.192		
	L	0.4		
	ω	5.5-16		
	Q	1-4		
	β	30-18		

Continued table 1. Results of studies: tilt angle (β) in degree, flow (Q) in cubic meters per second, screw's rotation speed (ω) in radian per second, bucket volume (V) in percent, and outer radius (Ro), inner radius (Ri), outer diameter (Do), inner diameter (Di), screw's length (L), pitch (S), geodetic height (H), gap width (Gw) all in meters

	Type	Variable	Value	Result	Efficiency
Dedić-Jandrek & Nižetić (2019)	Experimental	Ro	0.150	• Archimedes screw turbine with a direct generator has less performance.	67
		Ri	0.0825		
		S	0.300		
		L	1		
		ω	6.4		
		Q	12.8-10		
		β	21,25 ,30		
Lee & San Lee (2021)	Experimental	Gw	0.0025	• The experimental tests on an Archimedes screw turbine at very high screw angle (30-90 degrees) resulted in an optimal tilt angle value of 45 degrees with a mechanical efficiency of 94.6%.	94.6
		Ro	0.120		
		Ri	0.06		
		S	0.150		
		L	1.560		
		Q	100-20		
		β	30,45 ,60,75 ,90		
Zitti <i>et al.</i> (2020)	Experimental	Gw	5	• The coefficient of performance of a ductless screw turbine was accurately evaluated for a fixed geometry. The inclined configuration performs slightly worse than the horizontal one.	23.8
		N	1		
		Ro	0.05		
		Ri	0.02		
		S	0.16		
		L	0.320		
Abdullah <i>et al.</i> (2021)	Experimental	β	0	• The highest efficiency was 81.4% at an angle of 35 degrees. The maximum energy obtained at an angle of 45 degrees with an efficiency of 72%. Increasing the number of blades (2-4) will increase the efficiency.	81.4
		N	1		
		Ro	0.130		
		Ri	0.07		
		S	0.07		
		L	1		
		β	45,40,35,30		
Shahverdi <i>et al.</i> (2019)	Numerical	Q	2.75,2.25,1.75 ,1.25	• The highest efficiency was 58.24% with a tilt angle of 25 degrees and the number of blades was 1.	58.24
		Gw	0.002		
		Do	0.146		
		Di	0.0803		
		S	0.146		
		L	2.5-1		
		β	5,10,15,20,25,30,35,40		
Shimomura & Takano (2013)	Numerical	N	5-1	• Flow geometry and screw rotation are closely related to each other and significantly affect the efficiency.	83.4
		Q	15.7,13.5,10.5,6.9,4.9		
		N	4		
		β	25,20,15,10,5		
		L	1		
		S	0.4		
		Di	0.05		
Lubitz <i>et al.</i> (2014)	Experimental	Do	0.37	• The maximum efficiency of an Archimedes screw turbine occurs when the screw is operating completely full.	80
		Di	0.0803		
		S	0.146		
		L	0.584		
		β	24.9		
		N	3		
		Gw	0.000762		
Rohmer <i>et al.</i> (2016)	Numerical	ω	10	• The most common field application for Archimedes screw turbines is from 1 to 6.5 meters for head and flow rates between 0.25 and 6.5 cubic meters per second. The electrical power capacity of the Archimedes screw turbine can be estimated between 1.7 and 300 kW with an overall efficiency of 72%.	84
		D	0.840		
		Di	0.420		
		S	0.96		
		L	1.142		
		β	30		
		N	3		
Q	17,11,5				
Dellinger <i>et al.</i> (2016)	Experimental	Ro	0.096	• Losses due to leakage of overfilling increases as it is more than optimal.	77
		Ri	0.052		
		S	0.192		
		L	0.4		
		β	30-18		
		N	3		
Kozyn & Lubitz (2017)	Numerical	D	0.325	• On average, the output power loss, rotational friction power loss, and bearing friction loss accounted for approximately 41.2%, 14.3%, and 12.3% of the total predicted power loss, respectively. • On average, approximately 26.5% of the total power loss is related to the generator and its related equipment.	78
		Di	0.1683		
		S	0.033		
		L	1.2		
		β	24.4		
		N	3		
		Gw	0.00199		
Q	12, 10, 7.5, 4				

Continued table 1. Results of studies: tilt angle (β) in degree, flow (Q) in cubic meters per second, screw's rotation speed (ω) in radian per second, bucket volume (V) in percent, and outer radius (Ro), inner radius (Ri), outer diameter (Do), inner diameter (Di), screw's length (L), pitch (S), geodetic height (H), gap width (Gw) all in meters

Type	Variable	Value	Result	Efficiency	
Shahverdi <i>et al.</i> (2021)	Numerical	D	0.146	<ul style="list-style-type: none"> The relative error was less than 1% (0.69%) for a rotation speed of 10 rad/s, a volumetric flow rate of 1.13 l/s, and a tilt angle of 24.9°. The maximum mechanical output power was obtained for a rotation speed of 10 rad/s. 	-
		Di	0.0803		
		S	0.146		
		L	0.584		
		β	30, 24.9, 20		
		N	5-1		
		Q	5.1 -1.13		
Shahverdi <i>et al.</i> (2020)	Numerical	D	1.5	<ul style="list-style-type: none"> The maximum efficiency was obtained as 90.83%. 	91
		Di	0.75		
		S	0.146		
		L	7-4		
		β	35, 30, 25, 20, 15		
		N	1		
		Q	1220		
Shahverdi <i>et al.</i> (2023)	Numerical	D	1.32	<ul style="list-style-type: none"> The best values for the ratio of inner diameter to outer diameter, ratio of pitch to outer diameter, angle of inclination and number of blades are in the ranges of 0.43-0.56, 1-1.2, 20-22.5, and 2-4, respectively. 	91
		Di	0.761		
		S	1.39		
		L	4.53		
		β	22		
		N	3		
		Q	536		
Alonso-Martinez <i>et al.</i> (2020)	Numerical	D	0.564	<ul style="list-style-type: none"> Efficiency is highly dependent on the filling of buckets. 100% filling provides the highest efficiency ideally. However, due to screw rotation, overflow losses occur above 85% filling, and the turbine efficiency decreases. 	90
		Di	0.302		
		S	0.972		
		L	3.203		
		β	22		
		N	1		
		H	1.94		
Straalsund <i>et al.</i> (2018)	Experimental	Gw	0.003	<ul style="list-style-type: none"> The screw shape has no effect of performance in lower flows. It has significant effect in higher flows. 	75
		V	40-100		
		Ro	0.0957		
		Ri	0.0478		
		S	0.1914		
		L	0.766		
		β	29.1, 20.6		
N	4				
Q	12, 10, 7.5, 4				

نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پیچ ارشمیدس می‌تواند تمام انرژی پتانسیل موجود در جریان آب را به نیروی مکانیکی تبدیل کند. تعداد پره‌های توربین پیچ ارشمیدس که در آن راندمان پیچ در حالت بهینه می‌باشد بین سه تا چهار پره است. افزایش تعداد پره‌ها نه تنها موجب افزایش قابل توجهی در راندمان نمی‌شود بلکه هزینه‌های ساخت را بالا می‌برد. زاویه استقرار بهینه بین ۲۰ تا ۲۲/۵ درجه پیشنهاد شده است. انتخاب طول پیچ ارتباط مستقیمی با زاویه استقرار آن دارد به طوری که که طول بیش‌تر با زاویه ۱۵ درجه راندمان بیش‌تری نسبت به طول کم‌تر با زاویه ۳۹ درجه دارد. طول بهینه ۱/۵ و شش متر در زاویه استقرار ۲۵ و ۲۰ درجه به دست آمده است.

در اکثر پژوهش‌های حاضر قطرهای داخلی و خارجی دارای نسبت تقریباً ثابت می‌باشند که بین ۰/۴ تا ۰/۶ متغیر است. نسبت بهینه قطر داخلی به قطر خارجی بین ۰/۴ تا ۰/۵ گزارش شده است. بررسی اثر شکل پره‌ها بر راندمان نشان داد که در دی‌های پایین شکل پره‌ها اثری بر راندمان ندارد اما با افزایش دی، ارتفاع ورودی آب برای اشکال مختلف متفاوت خواهد بود تا جریان یکسانی عبور کند. شکاف بین پره‌ها و غلاف در توربین‌های آزمایشگاهی منجر به تلفات توان حدود هفت درصد می‌شود که با افزایش سرعت جریان به تدریج کاهش می‌یابد. با این که پرشدگی بیش از ۸۵ درصد می‌تواند منجر به تلفات سرریز شود، اما پرشدگی ۱۰۰ درصد، بیش‌ترین راندمان را تولید می‌کند.

تغییرات هندسه در ورودی و خروجی کانال تأثیر قابل توجهی بر میزان چرخش و گشتاور توربین پیچ ارشمیدس دارد. تلفات توان استغراق خروجی، تلفات توان اصطکاک دورانی، و تلفات اصطکاک یاتاقان به ترتیب ۴۱/۲ درصد، ۱۴/۳ درصد و ۱۲/۳ درصد از کل تلفات توان پیش‌بینی شده را تشکیل می‌دهند. حدود ۲۶/۵ درصد از کل تلفات توان نیز مربوط به ژنراتور و تجهیزات مربوطه می‌باشد. جهت تبدیل گشتاور مکانیکی حاصل از چرخش پیچ و تبدیل آن به جریان الکتریکی، معمولاً از یک جعبه‌دنده استفاده می‌شود که به‌طور عمده در قسمت ابتدایی شفت در بالادست نصب شده که علاوه بر افزایش دور حاصل از چرخش پیچ، آن را به یک دستگاه ژنراتور تولید توان الکتریکی انتقال می‌دهد. نتایج پژوهش‌های حاضر نشان می‌دهد که تنها استفاده از سه عدد جعبه‌دنده با قطرهای مختلف می‌تواند دور پیچ را به دو برابر افزایش دهد. همچنین ثابت شده است که ژنراتور مستقیم نسبت به ژنراتور متناوب عملکرد بهتری دارد. تعدادی از موارد واقعی نصب‌شده از این سیستم با ذکر مشخصات مهم از قبیل قدمت بهره‌برداری، ظرفیت، مشخصات هیدرولیکی در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Characteristics of installed Archimedes screw turbines

Location	United Kingdom	France	Switzerland	United Kingdom	United Kingdom	United Kingdom
Capacity (m ³ /sec)	2×10.4	2×7.45	3.5	4.5	0.8	2×6.5
Head (m)	2	1.95	3.5	3.2	4.7	3.45
Power output (kW)	2×157	2×108	90	101	25	2×164
Year (-)	2011	2013	2010	2011	2013	2015
Diameter (m)	4	3.8	2.8	3	-	3.7
Number of households (-)	400 - 500	-	100	-	-	400
Length (m)	6	-	10	8.5	11	-

۵. نتیجه‌گیری

توربین پیچ ارشمیدس به‌عنوان یک سازه تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر، دارای راندمان قابل قبولی می‌باشد. در این پژوهش، به نقش پارامترهای مختلف هندسی و هیدرولیکی در بالابردن راندمان توربین مذکور پرداخته شد. از میان پارامترهای به‌کار گرفته‌شده در پژوهش‌های مذکور برخی از پارامترها قابل کنترل و برخی دیگر وابسته به وضعیت محل و پروژه می‌باشند. دبی یکی از اصلی‌ترین پارامترهای هیدرولیکی غیرقابل کنترل در طراحی و ساخت توربین پیچ ارشمیدس است. لذا این پارامتر نسبت به سایر پارامترهای هندسی پیچ اهمیت بیش‌تری دارد. پارامترهای هندسی توربین در جهت افزایش راندمان، تحت تأثیر مستقیم پارامترهای زاویه استقرار و ارتفاع می‌باشند، به‌طوری‌که هرچه زاویه استقرار شفت بیش‌تر شود طول پیچ کوتاه‌تر و برای کنترل ارتفاع نسبت قطر داخلی به قطر خارجی آن کم‌تر می‌شود. در صورتی‌که مشخصات هندسی پیچ براساس مطالعات انجام گرفته، طراحی گردد با افزایش دبی نسبت به دبی حداکثر باید از توربین‌های موازی در پروژه استفاده گردد، تا نقطه کار توربین در حالت بهینه باقی بماند. در مورد ارتفاع آب نیز، در صورتی‌که ارتفاع آب از ارتفاع طراحی بیش‌تر باشد، می‌توان از توربین‌های متوالی استفاده کرد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Abdullah, O. S., Kamel, A. H., & Khalil, W. H. (2021). Numerical and experimental modelling of small hydropower turbine. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 80(1), 112-127.

- Alonso-Martinez, M., Suárez Sierra, J. L., Coz Díaz, J. J. d., & Martinez-Martinez, J. E. (2020). A New Methodology to Design Sustainable Archimedean Screw Turbines as Green Energy Generators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 9236.
- Bouvant, M., Betancour, J., Velásquez, L., Rubio-Clemente, A., & Chica, E. (2021). Design optimization of an Archimedes screw turbine for hydrokinetic applications using the response surface methodology. *Renewable Energy*, 172, 941-954.
- Dedić-Jandrek, H., & Nižetić, S. (2019). Small scale archimedes hydro power plant test station: Design and experimental investigation. *Journal of Cleaner Production*, 231, 756-771.
- Dellinger, G., Garambois, P.-A., Dellinger, N., Dufresne, M., Terfous, A., Vazquez, J., & Ghenaim, A. (2018). Computational fluid dynamics modeling for the design of Archimedes Screw Generator. *Renewable Energy*, 118, 847-857.
- Dellinger, G., Simmons, S., Lubitz, W. D., Garambois, P.-A., & Dellinger, N. (2019). Effect of slope and number of blades on Archimedes screw generator power output. *Renewable Energy*, 136, 896-908.
- Dellinger, G., Terfous, A., Garambois, P.-A., & Ghenaim, A. (2016). Experimental investigation and performance analysis of Archimedes screw generator. *Journal of Hydraulic Research*, 54(2), 197-209.
- Edirisinghe, D. S., Yang, H.-S., Kim, M.-S., Kim, B.-H., Gunawardane, S. P., & Lee, Y.-H. (2021). Computational Flow Analysis on a Real Scale Run-of-River Archimedes Screw Turbine with a High Incline Angle. *Energies*, 14(11), 3307.
- Erinofardi, E., Koirala, R., & Shiwakoti, N. (2022). Sustainable Power Generation Using Archimedean Screw Turbine: Influence of Blade Number on Flow and Performance. *Sustainability*, 14(23), 15948.
- Kozyn, A., & Lubitz, W. D. (2017). A power loss model for Archimedes screw generators. *Renewable Energy*, 108, 260-273.
- Lee, M. D., & San Lee, P. (2021). Modelling the energy extraction from low-velocity stream water by small scale Archimedes screw turbine. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.
- Lubitz, W. D., Lyons, M., & Simmons, S. (2014). Performance model of archimedes screw hydro turbines with variable fill level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10), 04014050.
- Maulana, M. I., Syuhada, A., & Kurniawan, R. (2019). Experimental study on the effect of flow rate on the performance of two-blade archimedes screw turbine. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 61(1), 10-19.
- Maulana, M. I., Syuhada, A., & Nawawi, M. (2018). Blade number impact on pressure and performance of archimedes screw turbine using CFD. AIP Conference Proceedings,
- Rohmer, J., Knittel, D., Sturtzer, G., Flieller, D., & Renaud, J. (2016). Modeling and experimental results of an Archimedes screw turbine. *Renewable Energy*, 94, 136-146.
- Saroinsong, T., Soenoko, R., Wahyudi, S., & Sasongko, M. N. (2016). Effect of Froude Number on Three-Bladed Archimedes Screw Turbine Efficiency. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3), 1153-1158.
- Saroinsong, T., Thomas, A., & Mekel, A. N. (2018). Performance Of Three-Bladed Archimedes Screw Turbine Using Response Surface Methodology. International Conference on Applied Science and Technology (iCAST),
- Scott Simmons, M. L., & William Lubitz. (2019). Effects of varying inclination angle on Archimedes screw generator power production with constant head, *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(3), 04021001.
- Shahverdi, K. (2021). Modeling for prediction of design parameters for micro-hydro Archimedean screw turbines. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101554.
- Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Gohari, S., Marofi, S., & Bellos, E. (2020). Numerical Optimization Study of Archimedes Screw Turbine (AST): A case study. *Renewable Energy*, 145, 2130-2143.
- Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Monem, M., Gohari, S., Marofi, S., & Najafi, G. (2019). Energy harvesting using solar ORC system and Archimedes Screw Turbine (AST) combination with different refrigerant working fluids. *Energy Conversion and Management*, 187, 205-220.
- Shahverdi, K., Loni, R., Maestre, J., & Najafi, G. (2021). CFD numerical simulation of Archimedes screw turbine with power output analysis. *Ocean Engineering*, 231, 108718.
- Shahverdi, K., Najafi, G., Mamat, R., Ghazali, M. F., El-Shafy, A., & Mousa, M. (2023). Introducing a design procedure for Archimedes Screw Turbine based on optimization algorithm. *Energy for Sustainable Development*, 72, 162-172.

- Shimomura, M., & Takano, M. (2013). Modeling and performance analysis of Archimedes screw hydro turbine using moving particle semi-implicit method. *Journal of Computational Science and Technology*, 7(2), 338-353.
- Simmons, S., Dellinger, G., Lyons, M., Terfous, A., Ghenaim, A., & Lubitz, W. D. (2021). Effects of Inclination Angle on Archimedes Screw Generator Power Production with Constant Head. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(3), 04021001.
- Siswantara, A. I., Harmadi, R., & Adanta, D. (2019). Investigation of the α angle's effect on the performance of an Archimedes turbine. *Energy Procedia*, 156, 458-462.
- Straalsund, J. L., Harding, S. F., Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2018). Experimental evaluation of advanced Archimedes hydrodynamic screw geometries. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(8), 04018052.
- Suraya, A. N., Ammar, N., & Kulthum, J. U. (2015). The effect of substantive parameters on the efficiency of Archimedes screw microhydro power: a review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- Zitti, G., Fattore, F., Brunori, A., Brunori, B., & Brocchini, M. (2020). Efficiency evaluation of a ductless Archimedes turbine: Laboratory experiments and numerical simulations. *Renewable Energy*, 146, 867-879.