



Construction, test, and evaluation of hydrodynamic screw turbine in laboratory scale

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 20 March 2024
Received in revised form
10 April 2024
Accepted 2 May 2024
Published online 5 September 2024

ABSTRACT

Due to the increasing importance of using clean energy, Hydrodynamic screw turbine has been considered as a small-scale hydropower source. One of the characteristics that makes the mentioned turbine to be unique compared to others is its acceptable performance in low head and flow conditions. Although a lot of research has been done in the world to achieve the best configuration to achieve the maximum output efficiency using numerical and laboratory methods, but the methods of making these types of turbines have rarely been examined. In this research, for the first time in Iran, the construction of a hydrodynamic screw turbine with a traditional method based on common industrial processes has been described. Then, its testing and evaluation have been considered. The installation angle of 24 degrees was obtained as the optimal installation angle.

Keywords:

Hydrodynamic Screw Turbine
Energy
Small-scale
Water

Cite this article: Godini, A., Shahverdi, K., & Gohari, S. (2024). Construction, test, and evaluation of hydrodynamic screw turbine in laboratory scale. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (2), 329-342.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374166.1154>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374166.1154>



ساخت، آزمون و ارزیابی توربین پیچ هیدرودینامیک در مقیاس آزمایشگاهی

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

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. رایانامه: abbas.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

چکیده

اطلاعات مقاله

امروزه با توجه به اهمیت روزافزون استفاده از انرژی‌های پاک، توربین پیچ هیدرودینامیک به‌عنوان یک منبع انرژی در مقیاس کوچک موردتوجه قرار گرفته است. یکی از خصوصیات که توربین مذکور را نسبت به سایر روش‌های تولید انرژی منحصربه‌فرد کرده است، عملکرد قابل قبول آن در شرایط ارتفاع و دبی پایین است. اگرچه پژوهش‌های زیادی در دنیا جهت رسیدن به بهترین ساختار توربین با راندمان خروجی حداکثر، با استفاده از روش‌های عددی و آزمایشگاهی انجام شده است، اما به‌روش‌های ساخت این نوع توربین‌ها کم‌تر پرداخته شده است. در این پژوهش، برای اولین بار در ایران به تشریح ساخت توربین پیچ هیدرودینامیک با یک روش سنتی که مبتنی بر فرایندهای متداول صنعتی می‌باشد، پرداخته شده است. سپس، آزمون و ارزیابی آن موردتوجه قرار گرفته است. با توجه به نتایج این پژوهش، زاویه استقرار ۲۴ درجه به‌عنوان بهترین زاویه استقرار می‌باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۱۱
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۲/۱۳
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۶/۱۵

کلیدواژه‌ها:

آب
انرژی
توربین پیچ هیدرودینامیک
کوچک-مقیاس

استناد: گودینی، عباس؛ شاهوردی، کاظم و گوهری، سعید (۱۴۰۳). ساخت، آزمون و ارزیابی توربین پیچ هیدرودینامیک در مقیاس آزمایشگاهی. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۲)، ۳۲۹-۳۴۲. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.374166.1154>



۱. مقدمه

در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، انرژی الکتریکی از آب جاری با استفاده از توربین‌های با محدوده ظرفیتی ۱۰-۵۰۰ کیلووات تولید می‌شود. تولید انرژی آبی کوچک در مناطق روستایی، به تمرکززدایی در تأمین انرژی کمک می‌کند و اغلب مقرون به صرفه‌ترین روش برای برق‌رسانی در مناطق دور افتاده به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است (Laghari *et al.*, 2013). هم‌چنین، توربین پیچ هیدرودینامیک یک راه‌حل مطمئن برای تولید انرژی آبی برای مناطق با تنوع زیستی آبی بالا است (YoosefDoost and Lubitz, 2020).

توربین پیچ هیدرودینامیک یک نوع هیدروتوربین است که از نظر هندسی مشابه پمپ پیچ هیدرودینامیک بوده و در گذشته برای پمپاژ آب به مکان‌های با ارتفاع بالاتر استفاده می‌شده است (Waters and Aggidis, 2015). این پیچ در ابتدا توسط ارشمیدس، ریاضیدان یونانی معرفی شد و کاربرد اولیه آن برای پمپاژ آب موجود در کشتی‌ها بود (Koetsier and Blauwendraat, 2004). در قرن اول قبل از میلاد، ویتروویوس به‌طور گسترده کاربردهای مختلف پمپ‌های پیچ هیدرودینامیکی را مورد مطالعه قرار داد (Rorres, 2000).

این توربین‌ها که براساس پمپ پیچ‌های هیدرودینامیکی مدل شده‌اند، عموماً دارای دو جزء تیغه‌های پیچ مارپیچ و شفت پیچ هستند (Shahverdi *et al.*, 2021). آب جاری به کانال ورودی توربین پیچ هیدرودینامیک وارد می‌شود و به دلیل حرکت پیوسته تیغه‌های پیچ مارپیچ در باکت‌ها، به پایین دست منتقل می‌شود. گشتاور حاصل از آب جاری روی پره‌های پیچ، آن‌ها را می‌چرخاند و در نتیجه، شفت پیچ که برای تولید نیروی الکتریکی به ژنراتور متصل می‌شود به چرخش در می‌آید (Ubando *et al.*, 2022).

عمده پژوهش‌های انجام‌شده در مورد توربین‌های پیچ هیدرودینامیک، در مورد طراحی اجزای توربین‌ها متمرکز بوده است و مطالعات محدودی در مورد فرایندهای ساخت آن‌ها وجود دارد. زاویه استقرار ایده‌آل برای تعداد پره‌های مختلف در توربین پیچ هیدرودینامیک متفاوت است. در شیب ۱۵ درجه پیچ سه پره، در شیب ۲۰ درجه پیچ چهار پره و در شیب ۲۵ درجه پیچ پنج پره، بیش‌ترین توان را تولید می‌کند (Dellinger *et al.*, 2019).

نسبت قطر خارجی به قطر داخلی ۰/۵ برای پمپ‌های پیچ هیدرودینامیک توصیه شده است (Lashofer *et al.*, 2013). نسبت قطر خارجی به گام پیچ برابر یک برای توربین پیچ هیدرودینامیک پیشنهاد شده است (Simmons *et al.*, 2017). هم‌چنین، نشان داده شده است که کنترل سرعت چرخش در افزایش کارایی پیچ ضروری است (Alonso-Martinez *et al.*, 2020). در زوایای شیب زیاد نیز، توربین پیچ هیدرودینامیک می‌تواند راندمان بالای ۸۰ درصد داشته باشد (Edirisinghe *et al.*, 2021). یک مدل عددی براساس پارامترهای هندسی توربین پیچ هیدرودینامیک در متلب توسعه یافت و راندمان مکانیکی ۹۰/۸۳ درصد حاصل شد (Shahverdi, 2021). با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی یک توربین پیچ هیدرودینامیک در شیب‌های بالا (۳۰ تا ۹۰ درجه)، راندمان مکانیکی ۹۴/۶ درصد حاصل شد (Lee and San Lee, 2021).

نتایج نشان داد توربین‌های پیچ هیدرودینامیک عموماً با ژنراتورهای جریان-متناوب، عملکرد بهتری نسبت به ژنراتورهای جریان-مستقیم دارند (Dedić-Jandrek and Nižetić, 2019). از روش پاسخ سطح و تجزیه و تحلیل آماری برای توسعه معادله‌ای برای پیش‌بینی راندمان استفاده شد و نسبت قطر، طول پیچ و گام پیچ به صورت تابعی از ضریب توان بیان شد (Betancour *et al.*, 2021). مقادیر بهینه برای نسبت قطر داخلی به خارجی، طول پیچ و گام پیچ به ترتیب برابر با ۰/۱ متر، ۰/۳۶ متر و ۰/۲۲ متر و حداکثر راندمان برابر با ۷۳/۹۴ درصد به دست آمد (Bouvant *et al.*, 2021). یک مطالعه آزمایشگاهی و عددی بر روی یک توربین پیچ هیدرودینامیک، برای بررسی عملکرد آن انجام شد و اثرات نامطلوب فرایند جوش کاری در زمان ساخت توربین پیچ هیدرودینامیک بررسی شد (Rohmer *et al.*, 2016). برای بررسی

رابطه سرعت دورانی و توان توربین، یک نمونه توربین پیچ هیدرودینامیک با استفاده از روش سنتی ساخته شد و در آن از لوله پی‌وی‌سی برای ساخت غلاف و از تیغه‌های آلومینیوم برای ساخت پره‌ها استفاده گردید (Erinofiaridi et al., 2015). یک مطالعه عددی و تجربی بر روی یک نمونه توربین پیچ هیدرودینامیک برای بررسی اثر سرعت جریان، زاویه شیب شفت و تعداد پره‌ها بر روی عملکرد پیچ انجام شد. پیچ مذکور از ۱۲ عدد پره فلزی که بر روی یک شفت توخالی جوش گردیده، ساخته شد. پره‌ها از ورق‌های فلزی حلقوی ساخته شد و به شکل مارپیچ در آمد. جنس پره‌ها و شفت از فولاد ضد زنگ و جنس غلاف آن فولادی بود (Abdullah et al., 2021). از توربین پیچ هیدرودینامیک برای تولید انرژی از آب فاضلاب استفاده شد. در فرایند تولید برش، نورد و جوش کاری استفاده شد. از ورق‌های فلزی گالوانیزه برای ساخت پره‌ها و غلاف استفاده شد (Durrani et al., 2019).

در پژوهش Syam et al. (2019)، برای سنجش عملکرد توربین پیچ هیدرودینامیک سرعت جریان، گشتاور، توان و راندمان آن بررسی شد. نمونه اولیه شامل یک شفت لوله‌ای توخالی بود که پره‌ها بر روی آن وصل شد. نوع مواد به کار رفته فولاد ضد زنگ ۲۰۱ بود. یک نمونه توربین پیچ هیدرودینامیک برای کاربرد در رودخانه‌ای در فیلیپین طراحی و ساخته شد. از یک گیره که روی یک میز نصب شده بود برای تغییر شکل دادن به ورق‌های فلزی پره‌ها استفاده شد. پره‌ها به یک لوله پی‌وی‌سی توخالی متصل شد (Bauyon, 2018).

عملکرد پیچ با سه شکل پره متفاوت شیاردار، صاف، شیاردار معکوس مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت پره‌های شیاردار و صاف از یک دستگاه چاپ با دقت یک میلی‌متر استفاده شد. جنس پره‌ها از پلاستیک ABS بود. برای اتصال پره‌ها از شش میله دو سر رزوه به قطر چهار میلی‌متر استفاده شد. دو کلاهدک از فولاد ضد زنگ به قطر ۱۲/۷ میلی‌متر با دو سوراخ انتهایی به قطر سه میلی‌متر برای نگهداری شفت استفاده شد. طول هر پیچ چهار برابر گام بود. غلاف پیچ‌ها از یک قطعه لوله پلی‌پورتان به قطر خارجی ۲۰/۳۵ سانتی‌متر، ضخامت ۰/۶۳۵ سانتی‌متر و طول ۷۶/۶ سانتی‌متر ساخته شد که یک قطاع ۹۰ درجه از آن برش خورده بود (Straalsund et al., 2018).

در این پژوهش، نحوه ساخت توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از روش سنتی تشریح شده و سپس، با استفاده از روش مذکور یک توربین پیچ هیدرودینامیک در مقیاس آزمایشگاهی ساخته شد و پس از استقرار در فلوم آزمایشگاهی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا، توربین مذکور مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت. لازم به ذکر است که این پژوهش، اولین مطالعه در مقیاس آزمایشگاهی با ساخت سنتی است که در آن توربین پیچ هیدرودینامیک ساخته شده و مورد آزمون و ارزیابی قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. توربین پیچ هیدرودینامیک

توربین پیچ ارشمیدس (که پیچ هیدرودینامیک نیز نامیده می‌شود) برای بیش از دو هزار سال در فناوری‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. پیچ هیدرودینامیک از مجموعه‌ای از پره‌های مارپیچ تشکیل شده است که دور یک لوله استوانه‌ای مرکزی پیچیده شده‌اند. پیچ که معمولاً به صورت مایل است، بین پایه‌های بالا و پایین توسط دو عدد بلبرینگ نگهداشته می‌شود و در یک غلاف استوانه‌ای هم‌مرکز که روی آن باز است، محصور می‌شود. حجم‌هایی از آب بین پره‌های پیچ و غلاف به دام می‌افتد که باکت نامیده می‌شود. معمولاً غلاف ثابت است و پیچ درون آن می‌چرخد. یک شکاف کوچک بین لبه پره‌ها و غلاف وجود دارد تا پره‌ها داخل غلاف آزادانه بچرخند (Simmons and Lubitz, 2021). شکل (۱) به صورت شماتیک اجزای یک توربین پیچ هیدرودینامیک را نشان می‌دهد.

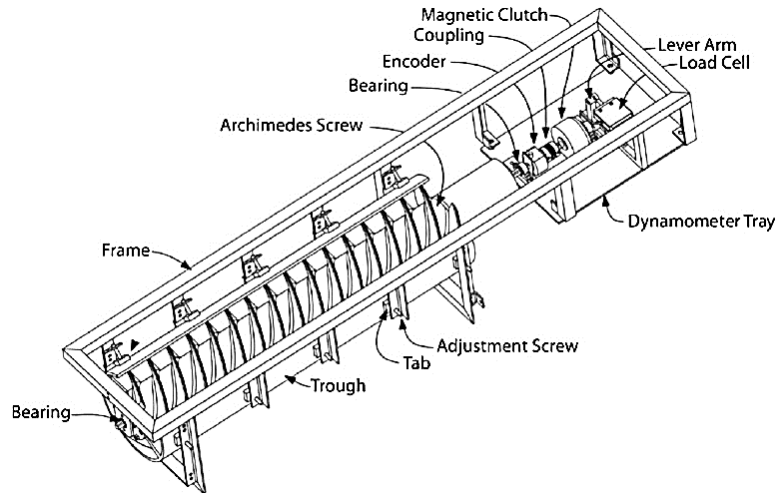


Figure 1. Schematic and geometry of the Hydrodynamic screw turbine

۲.۲. طراحی پیچ هیدرودینامیک

ابتدا هندسه پیچ هیدرودینامیک در محیط نرم افزار اتوکد ترسیم شد. در این پژوهش، پارامترهای طراحی مطابق جدول (۱) می باشد. شکل (۲) طراحی پیچ را در محیط نرم افزار مذکور نشان می دهد. پره های پیچ به سه رنگ مجزا نشان داده شده است.

Table 1. Screw specification

Parameter	Symbol	Unit	Value
Inner diameter	D_i	cm	7
Outer diameter	D_o	cm	15
Pitch	S	cm	10
Length	L	cm	40
Blade number	N	-	3

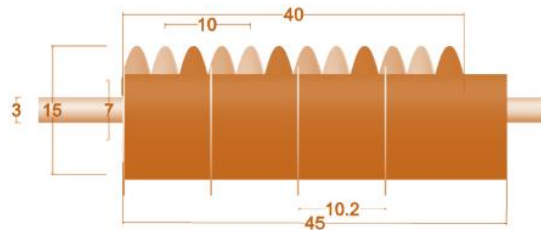


Figure 2. Section view of hydrodynamic screw turbine

۳.۲. روش ساخت

با استناد به کارهای پژوهشی مختلف و اختراعات ثبت شده مشاهده می شود که چهار روش عمده برای ساخت توربین پیچ هیدرودینامیک استفاده شده است که شامل روش سنتی، روش CNC، ریخته گری و چاپ سه بعدی می باشد. روش سنتی به روش های ساخت مبتنی بر فرایندهای فلزکاری معمولی که در صنعت استفاده می شود، اشاره دارد. برخلاف روش مبتنی بر چاپ سه بعدی، روش سنتی شامل فرایندهای مختلفی است و از ترکیب چند فرایند، محصول نهایی حاصل می شود (Ubando *et al.*, 2022). در این پژوهش، از یک روش سنتی برای ساخت پیچ مورد نظر در مقیاس آزمایشگاهی استفاده

گردید که ترکیبی از روش CNC و فرایندهای معمولی فلزکاری در کارهای صنعتی می‌باشد. مشخصات ورق استفاده شده در ساخت پره‌ها، غلاف و شفت در جدول (۲) ارائه شده است.

Table 2. Properties of the materials used in the screw construction.

Components	Material	Unit	Thickness	Diameter
Blades	St 304	mm	2	150
Trough	St 304	mm	2	153
Shaft	Chromium	mm	2	70

ابتدا یک ورق نیمه‌سنگین استیل ۳۰۴ به ضخامت دو میلی‌متر با CNC برش خورد و حفره‌هایی به قطر ۷۰ میلی‌متر به همراه یک شیار شعاعی درون آن‌ها ایجاد گردید. سپس، تعداد ۱۲ عدد پره متحدالشکل به قطر ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شد و مطابق شکل (۳)، با استفاده از یک پرس هیدرولیکی از محل شیار شعاعی خمیده شد.

به دلیل این که لوله‌های استیل موجود در بازار، دارای قطر استاندارد ۷۵ میلی‌متر می‌باشند، جهت ساخت شفت مرکزی، یک عدد لوله استیل ۳۰۴ به طول ۴۰۰ میلی‌متر، قطر ۷۵ میلی‌متر و ضخامت دو میلی‌متر توسط دستگاه تراش به قطر ۷۰ میلی‌متر رسانده شد. سپس، پره‌های متحدالشکل به صورت سه رشته و در هر رشته چهار عدد پره کنار یکدیگر جوش خوردند. در دو انتهای شفت مرکزی، دو تکه شفت توپر به قطر ۳۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰ میلی‌متر جهت نصب بلبرینگ‌های ابتدا و انتها جوش خورد. برای ساخت غلاف از یک ورق استیل ۳۰۴ استفاده گردید و توسط دستگاه خم به شکل یک استوانه روباز درآمد. جهت جلوگیری از تغییر شکل آن در اثر وزن آب، چهار عدد مهار نعل اسبی در فواصل ۱۰/۲ سانتی‌متر به دور آن جوش شد. شکل (۴) پیچ و غلاف ساخته شده در کارگاه را نشان می‌دهد.

جهت چرخش آزاد پیچ از دو عدد بلبرینگ UCF 208 به قطر شفت ۳۰ میلی‌متر و یک قاب مربعی شکل که از پروفیل قوطی ۲×۴ تهیه و به دور غلاف جوش شد، استفاده گردید. بلبرینگ‌ها مطابق شکل (۵) در دو طرف غلاف نصب شدند و با لحاظ یک شکاف به اندازه سه میلی‌متر بین پره‌ها و غلاف، پیچ درون غلاف قرار گرفت.

مجموعه پیچ، بلبرینگ‌ها، غلاف و قاب با دو عدد لولا، جهت دوران آزاد حول محور عمودی (برای تنظیم شیب موردنظر) بر روی یک شاسی ثابت که از پروفیل ۴×۲ ساخته شده است، مطابق شکل (۶) نصب گردید. ستون‌های عمودی انتهای شاسی جهت نصب سرریز جوش شده‌اند. برای تنظیم زاویه استقرار در فلوم آزمایشگاهی، یک فلکه کوچک بر روی پیچ نصب گردید و با یک کابل به قطر دو میلی‌متر به انتهای قاب پیچ وصل شد. شکل (۷) مجموعه سیستم تنظیم زاویه استقرار پیچ را نشان می‌دهد.

۴.۲. هدایت آب

با توجه به این که تنظیم شیب باعث می‌شود ارتفاع ورودی پیچ تغییر کند جهت برقراری ارتباط پیوسته بین ورودی پیچ و سازه سرریز، از یک لوله پی‌وی‌سی خرطومی فنردار به قطر ۱۶۰ میلی‌متر و طول ۶۰ سانتی‌متر جهت هدایت آب جمع شده پشت سرریز به داخل توربین استفاده شد. سرریز از جنس پی‌وی‌سی به ابعاد ۵۰×۶۰ سانتی‌متر می‌باشد که در ارتفاع ۴۰ سانتی‌متر آن یک روزنه به قطر ۱۴۰ میلی‌متر تعبیه گردید. یک فلنج پلی‌اتیلن بر روی سرریز وصل شد و سپس مجموعه داخل فلوم نصب و آب‌بندی شد. شکل (۸) مجموعه سرریز و لوله انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد.



Figure 3. Manufactured blades bent by hydraulic press



Figure 4. Screw and trough



Figure 5. Screw placed in the trough by the bearings



Figure 6. The screw is placed on a frame



Figure 7. Inclination angle adjustment system



Figure 8. Weir and flexible pipe for water conveyance

۵.۲. افزایش دور

با توجه به این که توربین های پیچ هیدرودینامیک دارای دور پایین و گشتاور بالا هستند جهت تأمین دور لازم برای چرخش یک مینی ژنراتور ۳۰۰۰ دور در دقیقه، از یک سیستم انتقال توان و افزایش سرعت چرخش استفاده شد. این مینی ژنراتور، تحت یک بار حداکثری ۱۰ وات، اختلاف پتانسیل ۲۴ ولت و شدت جریان ۱/۲ آمپر را تأمین می کند. سیستم انتقال توان و افزایش سرعت چرخش شامل سه عدد پولی می باشد که عبارتند از یک عدد پولی به قطر ۳۰ میلی متر که بر روی شفت پیچ نصب شد، یک عدد پولی دابل واسطه به قطرهای کوچک و بزرگ به ترتیب برابر با ۳۰ و ۲۲۵ میلی متر جهت افزایش دور و یک عدد پولی به قطر ۱۵ میلی متر که بر روی شفت مینی ژنراتور نصب گردید. برای اتصال بین پولی ها، دو عدد تسمه دندانه دار GT2 به طول ۸۰۰ میلی متر و عرض دو میلی متر استفاده شد. با استفاده از سیستم انتقال توان مذکور، سرعت چرخش توربین ۱۵ برابر شد و دور لازم برای مینی ژنراتور ایجاد گردید. شکل (۹) مجموعه پولی ها، تسمه و ژنراتور را نشان می دهد.

۶.۲. سنجش دور

برای اندازه گیری میزان چرخش پیچ، از یک سنسور القایی تشخیص فلز استفاده شد و بر روی شفت نصب گردید. در هر چرخش شفت و همراستا شدن سنسور القایی با برآمدگی ایجاد شده در روی شفت، یک سیگنال برای دورسنج دیجیتال ارسال می شود. دورسنج دیجیتال، تعداد سیگنال های ارسال را تبدیل به دور بر دقیقه کرده و نتیجه آن را بر روی صفحه نمایش دیجیتالی ارائه می دهد. شکل (۱۰) سنسور تشخیص فلز و دورسنج دیجیتال را نشان می دهد.

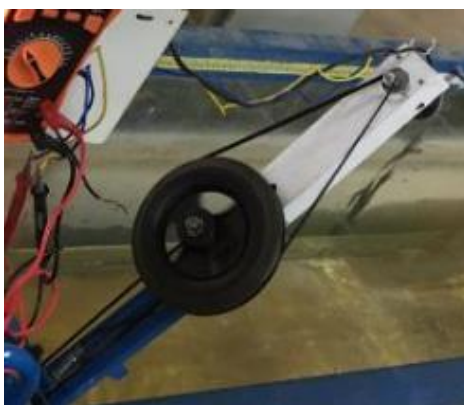


Figure 9. Pulleys and belts to increase generator rotation

۷.۲. سنجش ارتفاع

برای سنجش عمق آب در ورودی پیچ، یک لوله شفاف قابل انعطاف در ورودی پیچ و در ابتدای پره‌های آن، جایی که بتوان ارتفاع آب روی پره‌ها را اندازه‌گیری کرد، نصب شد. ارتفاع بالاآمده درون این لوله شفاف (پیزومتر) توسط یک خط‌کش مدرج قابل اندازه‌گیری می‌باشد. شکل (۱۱) لوله پیزومتر را نشان می‌دهد.

۸.۲. سنجش شیب

یک نقاله مدرج برای اندازه‌گیری زاویه شیب پیچ بر روی یکی از ستون‌های عمودی شاسی، دقیقاً مجاور لبه قاب نگهدارنده پیچ نصب گردید و به‌گونه‌ای کالیبره شد که وقتی پیچ کاملاً افقی باشد لبه قاب بر روی ۹۰ درجه قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده زاویه استقرار صفر است. شکل (۱۲) نقاله شیب‌سنج را نشان می‌دهد.

۹.۲. توان الکتریکی

با توجه به این که برای اندازه‌گیری توان الکتریکی در یک مدار بسته، دو پارامتر اختلاف پتانسیل و شدت جریان موردنیاز می‌باشد، ژنراتور باید تحت یک بار الکتریکی قرار بگیرد. در این پژوهش، از یک لامپ فشنگی با حداکثر توان ۱۰ وات استفاده شد. جهت قرائت دو پامتر مذکور از یک دستگاه مولتی‌متر دیجیتال با دقت میلی‌ولت و میکروآمپر استفاده گردید. شکل (۱۳)، بار ۱۰ وات و مولتی‌متر را نشان می‌دهد.



Figure 10. Inductive sensors (left) and digital tachometer (right)



Figure 11. Piezometer for head measurement



Figure 12. Inclination angle measurement



Figure 13. Multimeter and power of 10 W

۲.۱۰. آزمون و ارزیابی

با توجه به این که دبی توسط یک الکتروپمپ دور متغیر سانتریفیوژ تأمین می‌گردد و دور موتور توسط یک اینورتر دیجیتال کنترل می‌شود، لذا مقدار دبی در هر دور ثابت است. در این پژوهش، برای تأمین دبی‌های مورد آزمایش از سیستم بای‌پس استفاده شد. اندازه‌گیری دبی به روش حجمی صورت پذیرفت که پس از هر بار کنترل جریان توسط شیر فلکه و برقراری جریان ماندگار، اندازه‌گیری دبی انجام می‌گرفت. برای این منظور، با استفاده از یک شیر فلکه بخشی از آب به درون مخزن ذخیره برمی‌گردد. آزمایش‌ها با دبی‌های $1/3$ تا $2/3$ لیتر در ثانیه با گام $0/2$ لیتر در ثانیه انجام شد. زاویه استقرار پیچ برای هر دبی توسط یک نقاله کالیبره شده قرائت شد. پس از قرائت داده‌ها برای یک زاویه استقرار مشخص، توسط فلکه تنظیم شیب، زاویه استقرار تنظیم می‌گردید. در این پژوهش، برای هر دبی، سه زاویه استقرار ۲۱، ۲۴ و ۲۷ درجه تست شد. دلیل استفاده از این سه زاویه استقرار این بود که امکان تنظیم زاویه استقرار بیش‌تر از ۲۷ درجه وجود نداشت و در زاویه استقرار کمتر از ۲۱ درجه نیز توربین، در حالت استغراق و فاقد چرخش بود، بدین معنی که گشتاور لازم برای چرخش پیچ ایجاد نمی‌شد.

۳. نتایج و بحث

در این پژوهش، مراحل ساخت یک نمونه آزمایشگاهی توربین پیچ هیدرودینامیک در یک مقیاس آزمایشگاهی تشریح شد. هدف از ساخت این توربین تبدیل انرژی جنبشی و پتانسیل آب به انرژی الکتریکی می‌باشد. با مطالعه موارد ساخته شده در سایر نقاط جهان می‌توان نتیجه گرفت که ساخت این توربین‌ها براساس فرایندهای متداول صنعتی با ماشین‌های پیشرفته انجام می‌پذیرد. از پارامترهای مؤثر بر عملکرد این توربین، مواد به‌کاررفته در ساخت قسمت‌های مختلف آن می‌باشد. در ساخت پره‌ها، شفت و غلاف، مواد به‌کار رفته باید دارای وزن سبک جهت چرخش آسان‌تر و مقاومت کافی در برابر سایش مواد و رسوبات معلق در آب باشد، به‌طوری‌که سطوح آن‌ها در اثرات اصطکاک، کم‌ترین آسیب را ببیند. در ساخت نمونه پژوهش حاضر، محور مرکزی پره‌ها توخالی انتخاب گردید اما در ساخت پره‌ها از ورق به ضخامت دو میلی‌متر استفاده شد. اگرچه در فرایند جوش پره‌ها به محور مرکزی تغییر شکل چندانی مشاهده نشد اما منجر به افزایش وزن پیچ شد. فرایند جوش‌کاری علاوه بر آن‌که موجب تغییر شکل در قطعات می‌شود باعث به‌وجود آمدن اغتشاشات در جریان سیال درون باکت‌ها شده و باعث افزایش تلفات اصطکاک می‌شود. شکل (۱۴) یک نمونه از آثار فرایند جوش‌کاری در حین انجام آزمایش‌ها بر روی نمونه ساخته شده را نشان می‌دهد.



Figure 14. Turbulence by the effects of the welding process

با توجه به این‌که یکی از پارامترهای مؤثر در کاهش توان خروجی، افزایش دبی نشت از فاصله بین پره‌ها و غلاف می‌باشد و وجود این شکاف برای گردش آزادانه پره‌ها در داخل غلاف اجتناب‌ناپذیر است، اما می‌باید غلاف به‌گونه‌ای ساخته شود که قطر داخلی آن فقط به اندازه یک تا دو میلی‌متر از قطر خارجی پره‌ها بیش‌تر شود تا دبی نشت به حداقل ممکن برسد. در این نمونه اندازه شکاف در حدود چهار میلی‌متر بود. توجه شود که تأثیر شکاف بر روی دبی نشت در نمونه‌های واقعی که دارای دبی زیادی هستند قابل چشم‌پوشی است. انتخاب نوع بلبرینگ‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری‌که بلبرینگ انتهایی پایین دست باید دارای جنس مقاوم در برابر خوردگی ناشی از مواد محلول در آب باشد و به‌گونه‌ای روی شفت قرار گیرد که هیچ‌گونه مقاومت یا تنگ‌شدگی و ایجاد تلاطم در خروجی توربین ایجاد نکند. بلبرینگ ابتدای توربین باید بالاتر از سطح آب قرار داشته باشد تا بلبرینگ خارج از آب نصب شود و هیچ‌گونه مقاومتی در برابر ورود آب به داخل توربین ایجاد نکند. در نمونه ساخته شده در این پژوهش، دلیل این‌که پیچ به‌گونه‌ای روی شاسی لولا شده است که قابلیت چرخش جهت تنظیم شیب را داشته باشد، به ناچار بلبرینگ ابتدایی در دهانه ورودی پیچ نصب شد که موجب تنگ‌شدگی مقطع در ورودی پیچ گردید. شکل (۱۵) تنگ‌شدگی ورودی و خروجی آب به توربین توسط بلبرینگ ابتدا و انتها را نشان می‌دهد.

براساس رابطه $p=\tau\omega$ یکی از پارامترهای مؤثر در توان مکانیکی توربین، مقدار چرخش شفت است که معمولاً برحسب دور در دقیقه یا رادیان بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود. انواع زیادی از دورسنج‌ها در بازار وجود دارد که معمولاً به صورت تماسی و غیرتماسی دور شفت را اندازه‌گیری می‌کنند. در این پژوهش، از یک دورسنج غیرتماسی القایی استفاده شد که در هر بار عبور فلز از فاصله دو میلی‌متری یا کمتر، با ایجاد یک جریان القایی در سیم‌پیچ داخلی سنسور دورسنج و ایجاد یک پالس، یک دور برای شفت شمارش می‌شود. با توجه به زمان سنج موجود در داخل دستگاه دورسنج، در نهایت نتیجه برحسب دور بر دقیقه محاسبه می‌گردد. بهتر است سنسور دورسنج در جایی نصب شود که در تماس با آب نباشد در غیر این صورت باید از سنسورهایی استفاده شود که در مشخصات آن‌ها "دارای IP ۶۷" یا "دارای IP ۶۸" ذکر شده باشد.



Figure 15. Water inlet and outlet contraction due to the bearing

در اکثر نمونه‌های ساخته شده در دنیا برای افزایش دور توربین و انتقال آن به ژنراتور از سیستم جعبه‌دنده استفاده می‌شود و شفت با استفاده از تعدادی چرخ‌دنده بزرگ و کوچک به ژنراتور متصل می‌شود. در پژوهش حاضر، به دلیل آن که سر شفت درون لوله قابل انعطاف در ورودی توربین قرار گرفت، امکان اتصال وسیله ثانوی به آن وجود نداشت و برای انتقال قدرت شفت به ژنراتور از سیستم پولی و تسمه در انتهای شفت استفاده گردید. با وجود آن که تسمه‌ها از نوع GT-2 ، که دندانه‌دار هستند، انتخاب گردید اما به دلیل ارتباط با آب، اصطکاک بین آن و پولی روی شفت کم شده و مقداری اتلاف توان در اثر هرزگردی پولی مشاهده شد (شکل ۱۶).

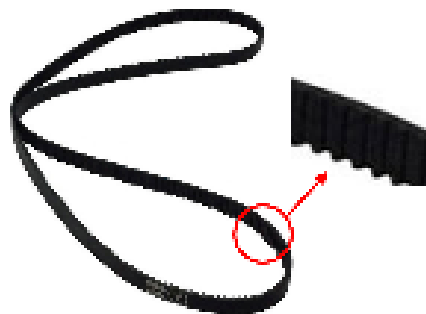


Figure 16. GT-2 toothed belt

ژنراتور و بار استفاده شده باید متناسب با محدوده انرژی تولیدی باشد. در این پژوهش، از یک مینی ژنراتور دی‌سی ۲۴ ولت استفاده شد که حداکثر جریان ۱/۲ آمپر در چرخش ۳۶۰۰ دور در دقیقه را می‌دهد. براساس رابطه $P=VI$ ، حداکثر

توان تولیدی مینی ژنراتور ۲۸/۸ وات به دست می آید. با توجه به این که حداکثر توان مکانیکی تولیدی نمونه ساخته شده در دبی ۲/۸ لیتر در ثانیه و ارتفاع ۳۰ سانتی متر در شیب ۲۴ درجه اتفاق می افتد، لذا براساس رابطه $P = \gamma HQ$ ، توان مکانیکی برابر با ۸ وات به دست می آید، در نتیجه از یک بار ۱۰ وات در انجام آزمایش ها استفاده گردید. شکل (۱۷) نمونه ساخته شده را در زمان انجام آزمایش ها نشان می دهد.



Figure 17. Hydrodynamic screw turbine in lab scale

نمودار راندمان توربین که نسبت توان الکتریکی به توان هیدرولیکی می باشد در سه زاویه استقرار ۲۱، ۲۴ و ۲۷ درجه و شش دبی ۱/۳، ۱/۵، ۱/۷، ۱/۹، ۲/۱، ۲/۳، ۲/۳ لیتر در ثانیه در شکل (۱۸) نشان شده است. بیشترین راندمان در زاویه استقرار ۲۴ درجه و دبی ۲/۳ لیتر در ثانیه برابر با ۵۸/۵ درصد حاصل شده است. در زوایای استقرار ۲۱ و ۲۷ درجه و دبی ۲/۷ لیتر در ثانیه، راندمان به ترتیب برابر با ۵۶/۵۶ و ۵۳/۱۶ درصد به دست آمده است. با افزایش دبی، حجم پرشدگی باکت ها افزایش یافته که منجر به افزایش راندمان می شود. به طور کلی، نتایج نشان می دهد که بهترین عملکرد توربین پیچ هیدرولیک در زاویه استقرار ۲۴ درجه است.

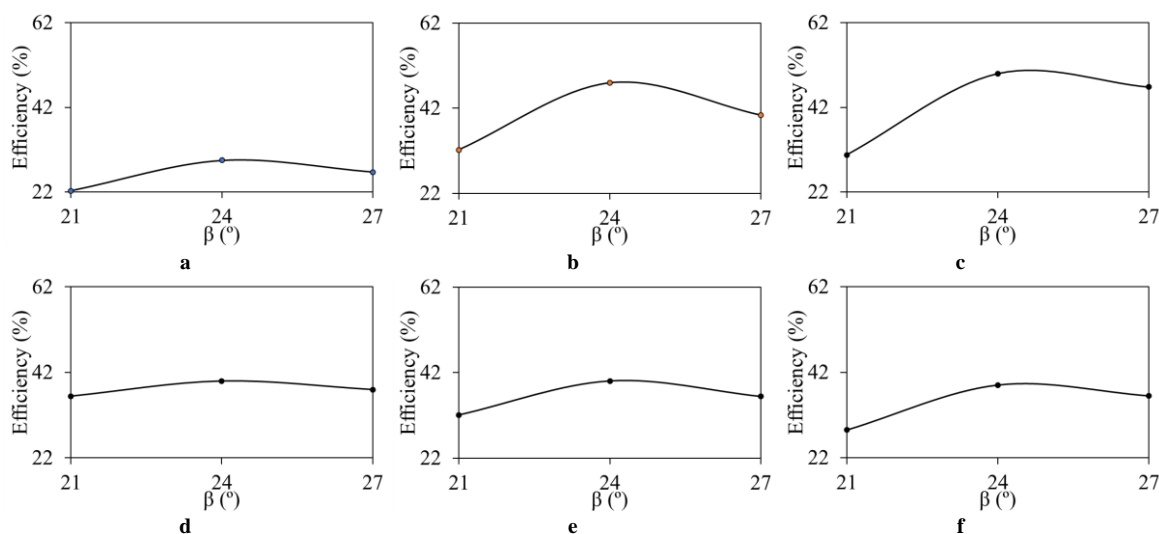


Figure 18. Inclination angle against efficiency for flows of: a) 1.3, b) 1.5, c) 1.7, d) 1.9, e) 2.1, and f) 2.3 l/s

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش، نحوه ساخت یک نمونه آزمایشگاهی توربین پیچ هیدرودینامیک مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت نمونه مذکور از روش‌های سنتی که مبتنی بر عملیات‌های فلزکاری متداول نظیر جوش کاری، برش و خم کاری بود، استفاده شد. نتایج نشان داد که جوش کاری قطعات به دلیل افزایش اصطکاکی در باکت‌ها و افت ناشی از سرریز، در راندمان خروجی سرریز مؤثر است. همچنین، خم کردن پره‌ها توسط پرس‌های هیدرولیکی معمولی با توجه به کم و زیاد شدن فاصله لبه پره‌ها منجر به یکسان نشدن حجم باکت‌ها خواهد شد که افزایش افت ناشی از جریان سرریز را به همراه خواهد داشت. در اتصال پره‌ها به شفت مرکزی، استفاده از جوش باعث تغییر شکل در محل جوش و ایجاد یک فاصله بین پره‌ها و شفت مرکزی شد که منجر به نشت آب و افزایش افت می‌شود. در ساخت پیچ، وزن قطعات مورد استفاده تأثیر به‌سزایی در میزان دور آن خواهد داشت. با توجه به این که بخشی از افت در توربین در نتیجه افت اصطکاکی در یاتاقان‌ها می‌باشد، انتخاب نوع و جنس یاتاقان‌ها باید متناسب با نیروی وارده از پیچ به آن‌ها باشد. در نمونه مذکور، یاتاقان پایینی پس از مدتی تا حدی روانی خود را از دست داد که دلیل آن نفوذ آب به داخل آن و زنگ‌زدگی ساچمه‌های درون بلبرینگ بود. لذا، پیشنهاد می‌شود از بوشن به جای بلبرینگ در انتهای شفت استفاده شود. نتایج نشان داد که با افزایش دبی راندمان توربین پیچ هیدرودینامیک افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش زاویه استقرار از ۲۱ درجه به ۲۴ درجه، راندمان افزایش می‌یابد و سپس راندمان کاهش می‌یابد که مطابق با یافته‌های دیگر تحقیقات است.

۵. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۶. 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.
- Bauyon. (2018). Archimedes screw turbine as an energy conversion device for a run-of-river micro-hydropower plant. *3rd International Conference on Power and Energy Engineering*, December 03-04, Rome, Italy
- Betancour, J., Velásquez, L., Jaramillo, L., Chica, E., & Rubio-Clemente, A. (2021). Application of a central composite face-centered design in the optimization of an archimedean hydrokinetic turbine. *Renew. Energy Power Qual J*, 19, 418-422.
- Bouvan, 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., 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.
- Durrani, A. M., Mujahid, O., & Uzair, M. (2019). Micro hydro power plant using sewage water of Hayatabad Peshawar. *15th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, IEEE.
- 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.

- Erinofiardi, E., Syaiful, M., & Prayitno, A. (2015). Electric power generation from low head simple turbine for remote area power supply. *Journal Teknologi*, 74(5).
- Koetsier, T., & Blauwendraat, H. (2004). The Archimedean screw-pump: A note on its invention and the development of the theory. *International Symposium on History of Machines and Mechanisms: Proceedings HMM2004*, Springer.
- Laghari, J., Mokhlis, H., Bakar, A., & Mohammad, H. (2013). A comprehensive overview of new designs in the hydraulic, electrical equipments and controllers of mini hydro power plants making it cost effective technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 279-293.
- Lashofer, A., Kaltenberger, F., & Kaltenberger, F. (2013). Does the Archimedean Screw Turbine Stand the Test? *Wasserkraftprojekte: Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft*, 310-318.
- 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*, 35(5), 319-326.
- 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.
- Rorres, C. (2000). The turn of the screw: Optimal design of an Archimedes screw. *Journal of hydraulic engineering*, 126(1), 72-80.
- 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., Maestre, J., & Najafi, G. (2021). CFD numerical simulation of Archimedes screw turbine with power output analysis. *Ocean Engineering*, 231, 108718.
- Simmons, S., Songin, K., & Lubitz, W. (2017). Experimental investigation of the factors affecting Archimedes screw generator power output. *HYDRO*, 20-17.
- Simmons, S. C., & Lubitz, W. D. (2021). Archimedes screw generators for sustainable micro-hydropower production. *International Journal of Energy Research*, 45(12), 17480-17501.
- 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.
- Syam, I., Maulana, M. I., & Syuhada, A. (2019). Design and performance of archimedes single screw turbine as micro hydro power plant with flow rate debit variations (case study in air dingin, samadua-south aceh). *Journal Inotera*, 4(1), 13-22.
- Ubando, A. T., Marfori, I. A. V., Peradilla, M. S., Sy, C. L., Calapatia, A. M. A., & Chen, W.-H. (2022). Sustainable Manufacturability of Archimedes Screw Turbines: A Critical Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 6(6), 161.
- Waters, S., & Aggidis, G. A. (2015). Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes Screw from Pump to Turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 497-505.
- YoosefDoost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes screw turbines: A sustainable development solution for green and renewable energy generation-A review of potential and design procedures. *Sustainability* 12(18), 7352.