



## مدیریت آب و آبیاری (نشریه علمی)

دوره ۱۱ ■ شماره ۳ ■ پاییز ۱۴۰۰

صفحه‌های ۶۶۷-۶۵۹

DOI: 10.22059/jwim.2021.330835.926

مقاله پژوهشی:

### بررسی اثر عمق پایاب بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس در تولید انرژی از جریان آب در کانال‌ها

کاظم شاهوردی<sup>\*</sup>

استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

#### چکیده

انرژی جنبشی و پتانسیل موجود در آب را، که با سازه‌هایی مانند شیب‌شکن در کانال‌ها مستهلک می‌شود، می‌توان برای تولید جریان برقابی کوچک مقیاس استفاده کرد. با توجه به ساختار توربین آبی پیچ ارشمیدس به‌عنوان یک توربین نوظهور، این توربین در کانال‌های روباز موجود قابل اجراست. با این وجود، تا به حال پژوهشی در این زمینه انجام نشده است. در پژوهش حاضر، اثر عمق پایاب در کانال بعد از استقرار توربین پیچ ارشمیدس روی آن بررسی شده است. برای این منظور، توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از FLOW-3D مدل‌سازی و اعتبارسنجی و عملکرد آن برای نسبت استغراق‌های مختلف در پایاب کانال بررسی شد. نتایج نشان داد وجود استغراق (نسبت استغراق ۰/۵ تا ۰/۷۵) در کانال پایاب و در انتهای توربین پیچ ارشمیدس برای جلوگیری از تلفات توان ضروری است. در این شرایط می‌توان، توان و راندمان حداکثر را در شرایط یکسان سایر پارامترها از جریان آب گرفت.

**کلیدواژه‌ها:** انرژی، کانال، نیروگاه برق‌آبی کوچک، FLOW-3D.

### Investigating the effect of tail water depth on Archimedes screw turbine in generating energy from flowing water in canals

Kazem Shahverdi<sup>\*</sup>

Assistant Professor, Department of Water Science Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

Received: August 23, 2021

Accepted: October 28, 2021

#### Abstract

Kinetic and potential energies available in water dissipating using structures like drops can be used for generating electricity on small scale. To this aim, the Archimedes screw turbine, as an emerging turbine, can be employed for converting kinetic and potential energies to mechanical energy in irrigation canals. However, there is no literature in this regard. In this research, the effect of tailwater on turbine performance was investigated. To this end, an Archimedes screw turbine was designed and validated using FLOW-3D, and the effect of different submersion ratios was investigated. The results showed that there needs 0.5 to 0.75 submersion ratio in the downstream canal to avoid extra power loss, resulting in maximum power and efficiency in the same conditions.

**Keywords:** Canal, Energy, FLOW-3D, Small Hydropower Plant.

## مقدمه

یکی از مکان‌های مناسب جهت تولید انرژی پاک، کانال‌های آبیاری است، که در آن‌ها جهت استهلاك انرژی جنبشی و پتانسیل مازاد آب از شیب‌شکن، تنداب و ... در محل‌های مختلف از جمله محل آب‌بندها استفاده می‌شود. با توجه به کمبود انرژی و استفاده بهینه از منابع آب، می‌توان به‌جای استفاده از سازه‌های فوق، از توربین پیچ ارشمیدس جهت تبدیل انرژی پتانسیل و جنبشی آب به انرژی مکانیکی و تولید برق جهت افزایش بهره‌وری آب در کانال‌های آبیاری استفاده کرد.

پیچ ارشمیدس یکی از اختراعاتی است که از عصر باستان تاکنون، انجام شده است و مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرد. به‌تازگی، کاربرد جدید این پیچ به‌عنوان توربین آبی جهت تولید انرژی پاک مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به ظرفیت‌های موجود در سامانه‌های آبرسانی، شبکه‌های آبیاری، رودخانه‌ها و ... می‌توان از توربین پیچ ارشمیدس جهت تولید انرژی استفاده کرد. در نتیجه، مطالعه جهت شناخت کارکرد آن در این سامانه‌ها، ضروری است که مطالعه آن در کانال‌های آبیاری موضوع پژوهش حاضر است.

نیروگاه‌های برق‌آبی براساس ظرفیت تولید برق، به نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ<sup>۱</sup> (ظرفیت بیش‌تر از ۱۰۰ مگاوات)، متوسط<sup>۲</sup> (ظرفیت بین ۱۵ تا ۱۰۰ مگاوات)، کوچک<sup>۳</sup> (بین یک تا ۱۵ مگاوات)، خیلی کوچک<sup>۴</sup> (ظرفیت ۱۰۰ کیلووات تا ۱۰۰۰ کیلووات)، ریز<sup>۵</sup> (ظرفیت بین پنج کیلووات تا ۱۰۰ کیلووات) و خیلی ریز<sup>۶</sup> (ظرفیت بین ۳۰۰ وات تا ۵ کیلووات) طبقه‌بندی می‌شوند (Derakhshan & Riassi, 2014).

نیروگاه‌های برق‌آبی با ظرفیت تولید پایین، منابع انرژی نسبتاً کوچکی هستند که تقریباً ۳ تا ۴ درصد کل انرژی موردنیاز انسان را تولید می‌کنند (REN21, 2013). مشتریان

نیروگاه‌های برق‌آبی میکرو افرادی هستند که یا دسترسی به شبکه توزیع برق ندارند و یا افرادی که می‌خواهند برق موردنیاز خود را به‌طور مستقل تولید کنند. در ایران، پتانسیل‌های زیادی برای نیروگاه‌های کوچک در کانال‌های آبیاری وجود دارد.

با آن‌که این پیچ به‌وفور جهت پمپاژ آب استفاده شده است، اما مطالعه‌های مربوط به تئوری آن مربوط به دو دهه اخیر است (Nuernbergk, 2017). Rorres (2000) معادلات ارائه‌شده برای پیچ را با استفاده از روش‌های عددی حل کرد. در پژوهش C Zafirah & Nurul Suraya (2016) در مالزی، اثر تعداد پره‌ها و تعداد گام‌های هر پره بر روی راندمان پیچ ارشمیدس با تحلیل عددی و نرم‌افزار فلونت بررسی شد. طرح اولیه پیچ ارشمیدس با استفاده از نرم‌افزار سالیدورک<sup>۷</sup> ترسیم شد. در شبیه‌سازی‌ها، شرایط مرزی و شرایط جریان به‌صورت ماندگار در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که پیچ با سه پره و سه دور، راندمان قابل قبولی دارد و تعداد دورهای پره اثر بیش‌تری نسبت به تعداد پره‌ها بر روی راندمان پیچ دارد.

در پژوهشی که از طریق پرسش‌نامه و استعلام از کارخانه‌های سازنده انجام شد، مشخص شد که بیش از ۴۰۰ مورد توربین پیچ ارشمیدس در دنیا ساخته و نصب شده است. در پژوهش مذکور، تجارب بهره‌برداری کشورهای اروپایی شامل اتریش، ایتالیا، آلمان، ایرلند و سوئیس و ... با طراحی یک پرسش‌نامه و مطالعات میدانی بررسی شد. در این بررسی، نمونه آماری ۷۱ مورد توربین پیچ ارشمیدس (۳۰ مورد در آلمان، ۱۸ مورد در انگلیس، ۱۴ مورد در اتریش، چهار مورد در ایتالیا و یک مورد در کشورهای ایرلند، لوگزامبورگ، فرانسه، سوئیس و جمهوری چک) بود. در اکثر این پیچ‌ها، گام پیچ برابر با قطر خارجی، قطر داخلی نصف قطر خارجی، توان تولیدی بین ۱۰ تا ۶۰ کیلووات، راندمان کل بین ۶۵ تا ۷۵ درصد گزارش شده است (Lashofer et

می تواند به طور آزادانه در داخل محفظه بچرخد. بخشی از آب که می تواند از قسمت درز به پایین دست حرکت کند نشت جریان<sup>۱۲</sup> نام دارد. جریانی از آب که از روی شفت به پایین دست می تواند ریزش کند جریان سرریز<sup>۱۳</sup> نامیده می شود. در برخی موارد، محفظه نیز به پیچ متصل شده و همراه با آن می چرخد. زاویه ای که محور پیچ با خط افق می سازد، زاویه استقرار پیچ نام دارد.

آب از قسمت بالا وارد مجموعه و با چرخش پیچ وارد پره های آن شده و در نهایت از خروجی پیچ در پایین دست خارج می شود. آبی که در راستای محور پیچ به قسمت پایین حرکت می کند بین دو پره مجاور گیر افتاده و واحدهای حجمی گسسته را تشکیل می دهد که باکت<sup>۱۴</sup> نام دارد. با توجه به مایل بودن محور پیچ، باکتها باعث به وجود آمدن اختلاف ارتفاع (اختلاف فشار) در دو طرف پره ها خواهند شد. شکل ماریپچ پره ها باعث می شود که مؤلفه مماسی نیروی فشاری وارد بر محور مرکزی پیچ، گشتاوری را ایجاد کند که منجر به چرخیدن پیچ می شود. اگر یک ژنراتور به پیچ وصل شود، چرخش مکانیکی پیچ می تواند برای تولید برق استفاده شود.

همان طور که در شکل (۱) مشاهده می شود با توجه به ساختار توربین پیچ ارشمیدس به راحتی، حتی در کانال های آبیاری موجود نیز در محل سازه هایی مانند شیب شکن که پتانسیل قابل توجهی جهت تولید انرژی در آنها وجود دارد، قابل اجراست. در شکل (۲)، تصویر یک شیب شکن قبل (a) و بعد (b) از نصب توربین پیچ ارشمیدس ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود جریان از شیب شکن به صورت سرریز عبور کرده و پس از استهلاك انرژی در امتداد کانال جریان می یابد. در صورت نصب توربین پیچ ارشمیدس، جریان وارد آن شده و انرژی آب به جای مستهلک شدن به جریان برق تبدیل می شود.

(al., 2012). محدوده مربوط به پیچ ارشمیدس برای دبی ۰/۲ مترمکعب بر ثانیه تا ۸ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع حدود ۱ تا ۸ متر است ( Stergiopoulou & Kalkani, 2015; ) (Stergiopoulou et al., 2013)، که در اکثر کانال های آبیاری در ایران، این پتانسیل وجود دارد.

با توجه به این که عمق آب در خروجی توربین به کانال پایین دست، تابع عمق پایاب کانال است، بررسی تغییرات عمق پایین دست بر عملکرد توربین پیچ ارشمیدس ضروری است. در این پژوهش، در نظر است تا مدل سازی سه بعدی پیچ ارشمیدس با استفاده از FLOW-3D انجام شود و تأثیر عمق های مختلف پایاب بر عملکرد آن با استفاده از مدل مذکور بررسی شود. بررسی هیدرولیک جریان، قبل از بکارگیری آن ها در کانال های آبیاری امری ضروری است.

## مواد و روش ها

### معرفی توربین پیچ ارشمیدس

شکل شماتیک توربین پیچ ارشمیدس در شکل (۱) نشان داده شده است. آب از طریق کانال ورودی بالادست وارد توربین شده و با اعمال فشار هیدرواستاتیکی به توربین باعث چرخش آن می شود. با چرخش توربین آب در داخل آن به پایین دست هدایت شده و وارد کانال پایین دست می شود.

هسته مرکزی یک توربین پیچ ارشمیدس، بدنه پیچ ارشمیدس است که هندسه آن بسیار شبیه به پمپ پیچ ارشمیدس است. یک پیچ ارشمیدس، مجموعه ای از صفحات ماریپچ به نام پره<sup>۸</sup> است که روی یک شفت سیلندری مرکزی<sup>۹</sup> به صورت ثابت قرار گرفته اند. پیچ در یک محفظه ای<sup>۱۰</sup> قرار گرفته است که یا به صورت کامل پیچ را احاطه کرده و یا به صورت نیم سیلندر فقط قسمت پایین شفت را در بر می گیرد. به طور معمول یک درز<sup>۱۱</sup> کوچک بین پیچ و محفظه قرار دارد که در نتیجه آن، پیچ

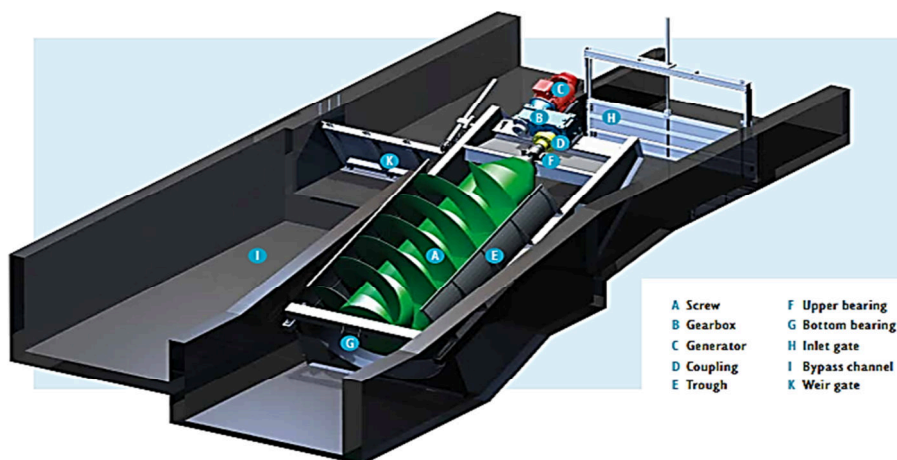


Figure 1. The components of an Archimedes screw turbine

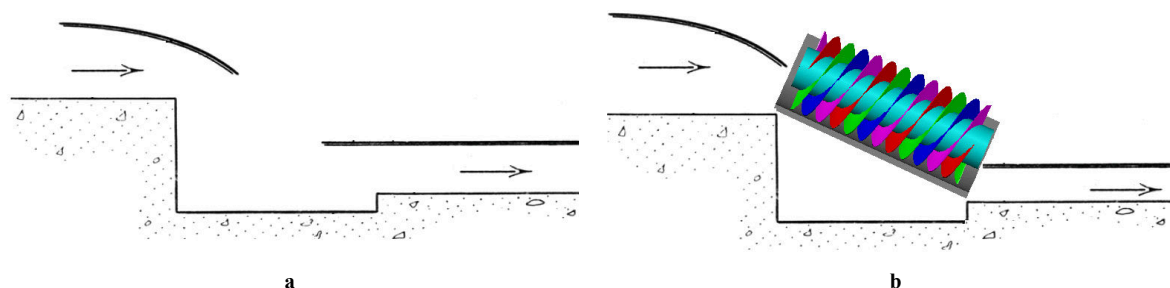


Figure 2. Vertical drop (a), and installed Archimedes screw on the vertical drop (b)

### معادلات حاکم بر توربین پیچ ارشمیدس

برای مدل‌سازی ریاضی و حل عددی پدیده حاکم بر پیچ ارشمیدس، باید معادلات حاکم بر پدیده سیال‌ها یعنی معادلات سه‌بعدی و غیر ماندگار ناویر-استوکس را حل کرد. برای این منظور از روش CFD<sup>۱۰</sup> استفاده می‌شود. در این راستا نرم‌افزارهای مختلفی توسعه یافته است، که در این پژوهش از نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شده است. اندازه‌گیری میدان‌های فشار و سرعت با استفاده از کارهای آزمایشگاهی بسیار پیچیده، زمان‌بر و با خطا همراه است. حال آن‌که، با استفاده از روش‌های عددی به سهولت می‌توان میدان‌های سرعت و فشار را محاسبه کرد. با داشتن فشار می‌توان گشتاور و در نتیجه راندمان توربین پیچ ارشمیدس را محاسبه کرد. معادله دیفرانسیلی جزئی برای پیوستگی به صورت معادله (۱) نوشته می‌شود.

در جدول (۱)، مقدار توان قابل‌حصول در انواع شیب‌شکن‌ها براساس اطلاعات نشریه شماره ۴۸۲ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (۱۳۸۸) محاسبه و ارائه شده است. لازم به ذکر است که کل توان قابل‌حصول براساس دبی و ارتفاع محل با ضرب سه پارامتر دبی، ارتفاع و وزن مخصوص آب به دست می‌آید.

Table 1. Exploitable power from drops located in irrigation canals

Type of drop	Maximum flow (m <sup>3</sup> /s)	Maximum head (m)	Maximum available power (kW)
Vertical drop	3.0	1.8	53.0
Rectangular inclined drop	3.0	4.5	132.4
Pipe drops	1.5	4.5	66.2
Baffled apron drop	28.3	4.5	1248.8

مش‌های کانال بالادست و پایین‌دست در نظر گرفته شد. مشخصات پیچ طراحی شده جهت شبیه‌سازی، پیچ ارشمیدس پژوهش آزمایشگاهی (Lubitz et al. 2014) است (جدول ۲)، که برای اعتبارسنجی FLOW-3D نیز استفاده شد.

**Table 2. The screw specification**

Parameter	Symbol	Unit	Value
Inner diameter	$D_i$	cm	8.03
Outer diameter	$D_o$	cm	14.6
Pitch length	S	cm	14.6
Blade number	L	cm	58.4
Inclination angle	$N$	-	3
Volume flow rate	$B$	°	30
	Q	$m^3.s^{-1}$	1.13

### شبیه‌سازی

شرایط مرزی تعریف شده در این پژوهش به صورت زیر است. شرایط مرزی کف و کناره‌های کانال و سطح آب به صورت شرط مرزی تقارن که در آن شرایط داخل میدان حل به مرزها و خارج از میدان انتقال می‌یابد، شرط مرزی ورودی به کانال بالادست به صورت دبی ثابت (Q) و شرط مرزی خروجی از کانال پایین‌دست به صورت فشار یا ارتفاع (P) ثابت که متناسب با ارتفاع آب در پایین‌دست، تعریف می‌شود. این شرط مرزی باید طوری تعریف شود که منطبق بر شرایط جریان در کانال پایین‌دست باشد.

شرایط اولیه شامل جریان ماندگار، ارتفاع آب ثابت در داخل کانال‌های بالادست و پایین‌دست است. پیچ ارشمیدس در ابتدا دارای سرعت صفر (پیچ بدون چرخش است) بوده که جهت جلوگیری از آشفتگی‌های زیاد، به تدریج سرعت آن تا سرعت مورد نظر افزایش می‌یابد. فشار در ابتدای کانال بالادست و انتهای کانال پایین‌دست به صورت هیدرواستاتیک است.

لازم به ذکر است که سرعت زاویه‌ای توربین پیچ ارشمیدس نسبت به سایر توربین‌ها کم‌تر است لذا عمر

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

که در آن،  $u$  بردار سرعت،  $\rho$  جرم مخصوص سیال و  $t$  زمان است.

معادله کلی حرکت را می‌توان از قانون دوم نیوتن استخراج کرد که به صورت معادله (۲) می‌باشد:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + f \quad (2)$$

که در آن  $u$  بردار سرعت،  $t$  زمان،  $\rho$  جرم مخصوص،  $p$  بردار فشار،  $\mu$  بردار تنش برشی و  $f$  بردار نیروی داخلی است. سمت چپ معادله فوق برابر شتاب انتقالی و لحظه‌ای و سمت راست برابر با گرادیان‌های فشار، تنش برشی و نیروهای داخلی  $f$  است. نیروی داخلی در اینجا فقط نیروی ثقل است.

در این پژوهش، جهت مدل‌سازی آشفتگی از مدل  $k-\epsilon$  RNG نرم‌افزار FLOW-3D استفاده شد. نرم‌افزار FLOW-3D یکی از مدل‌های عددی سه بعدی قدرتمند و بسیار دقیق دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که میدان حل را (محدوده جریان و سیال مسأله) به شبکه‌های با اندازه کوچک به نام مش<sup>۱۷</sup> تقسیم کرده و معادلات حاکم بر سیال را برای هر مش از شبکه، گسسته‌سازی و حل می‌کند. با توجه به تعداد و حجم زیاد معادلات مربوطه از ارائه آن‌ها در اینجا صرف‌نظر شده است و جهت اطلاع از معادلات و روش حل به سایت FlowScience معرفی می‌شود.

### طراحی پیچ ارشمیدس

هندس‌ پیچ ارشمیدس در محیط نرم‌افزار اتوکد طراحی ترسیم و سپس وارد نرم‌افزار FLOW-3D شد. در ادامه سه بلوک مش برای کانال بالادست، پیچ ارشمیدس و کانال پایین‌دست تعریف شد. با توجه به پیچیدگی هندسه پیچ ارشمیدس، اندازه مش مربوطه بسیار کوچک‌تر از

برای اطمینان از اعتبار محاسبات FLOW-3D و استفاده از آن برای شبیه‌سازی‌های مختلف، باید نتایج محاسبات عددی با نتایج عملی و آزمایشگاهی مطابقت داده شود. اگر خطای بین نتایج محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی، در حد قابل‌قبولی باشد، یعنی نتایج مدل معتبر می‌باشد. در این پژوهش از نتایج پژوهش Lubitz *et al.* (2014) جهت اعتبارسنجی استفاده شد که مشخصات این پیچ در جدول (۱) ارائه شده است. مطابق با نتایج پژوهش ذکرشده، توان مکانیکی برای سرعت‌های زاویه‌ای پنج، ۱۰ و ۱۵ به‌ترتیب برابر با ۱/۹۴۲، ۲/۱۸۷ و ۱/۹۸۰ وات می‌باشد.

### نتایج و بحث

در این پژوهش، اعتبارسنجی مدل FLOW-3D برای سرعت‌های زاویه‌ای پنج، ۱۰ و ۱۵ رادیان بر ثانیه انجام گرفت. سرعت زاویه‌ای بهینه مرتبط با توان مکانیکی و راندمان مکانیکی حداکثر، در پژوهش آزمایشگاهی Lubitz *et al.* (2014)، برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه حاصل شده است. در پژوهش حاضر و در مدل‌سازی عددی نیز، سرعت زاویه‌ای بهینه برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه به‌دست آمد. برای شبیه‌سازی پیچ ارشمیدس و یافتن مقادیر گشتاور و توان مکانیکی که مطابق با نتایج آزمایشگاهی باشند، تعداد مش‌های مختلف بررسی شد. حداقل تعداد مش باید به اندازه‌ای باشد که هندسه پیچ ارشمیدس به‌صورت کامل توسط نرم‌افزار قابل شناسایی باشد و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد.

بررسی مش‌های مختلف نشان داد که برای تعداد مش بیش‌تر از یک میلیون، نرم‌افزار می‌تواند تمام قسمت‌های پیچ را به‌طور کامل بشناسد. به همین دلیل برای مش‌های بیش‌تر از یک میلیون، انطباق نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مدنظر قرار گرفت. پس از انجام شبیه‌سازی،

مفید آن بالاتر می‌باشد. با توجه به این نکته و همچنین مقادیر استفاده‌شده در پژوهش‌های دیگر، سه سرعت زاویه‌ای شامل پنج، ۱۰ و ۱۵ رادیان بر ثانیه در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی تأثیر عمق آب در کانال پایین‌دست بر توان مکانیکی تولیدشده و راندمان، سه نسبت استغراق به‌ترتیب برابر با ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ بررسی شد. نسبت استغراق با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{H_{\text{down}} - H_0}{D_o} \quad (3)$$

که در آن،  $I$  نسبت استغراق،  $D_o$  برابر با قطر خارجی پیچ،  $H_{\text{down}}$  ارتفاع آب در کانال پایین‌دست و  $H_0$  ارتفاع پایین‌ترین نقطه کانال است. در شکل (۳)، پارامترهای فوق نشان داده شده است.

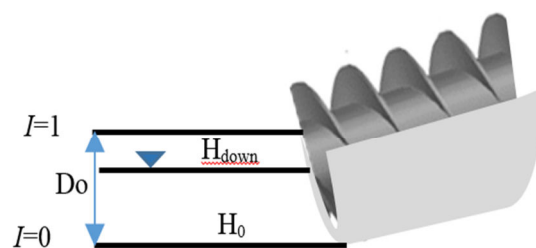


Figure 3. Submersion ratio.

اگر انتهای پیچ کاملاً مستغرق شده باشد، نسبت استغراق برابر با ۱ و اگر هیچ استغراقی وجود نداشته باشد، نسبت استغراق برابر با صفر است. به‌منظور اطمینان از هم‌گرایی مدل باید معیار هم‌گرایی در نظر گرفته شود. در صورتی که سطح آب در حوضچه‌ها ثابت شود و پارامترهایی گشتاور و دبی در یک مقدار مشخص که از نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده است ثابت بمانند، در این صورت مدل هم‌گرا شده است. لازم به ذکر است که مدل FLOW-3D در صورتی که مدل هم‌گرا شده باشد یک پیغامی مبنی بر هم‌گرایی و رسیدن به حالت ماندگار را به کاربر می‌دهند.

نسبت استغراق، توان مکانیکی تولیدشده تا استغراق ۰/۷۵ تقریباً تغییر چندانی نمی‌کند. با این حال، توان مکانیکی برای نسبت استغراق یک، کاهش یافته و به ۲/۳۸ وات می‌رسد که دلیل آن افزایش فشار هیدرواستاتیک آب با افزایش ارتفاع آب در کانال پایین دست است که باعث مقاومت در مقابل جریان می‌شود. فشار هیدرواستاتیک آب در بالادست پره‌ها و ورودی کانال بالادست، نیروی مقاوم و در پایین دست پره‌ها و خروجی به کانال پایین دست، نیروی مقاوم است. گشتاور ایجادشده در پره‌ها بر اثر نیروی هیدرواستاتیک آب برابر با مجموع گشتاورهای ایجادشده در تک تک باکت‌هاست. بنابراین، وجود مقداری استغراق در کانال پایین دست، باعث کاهش نوسانات سطح آب و جلوگیری از تلاطم و افزایش توان خروجی خواهد شد.

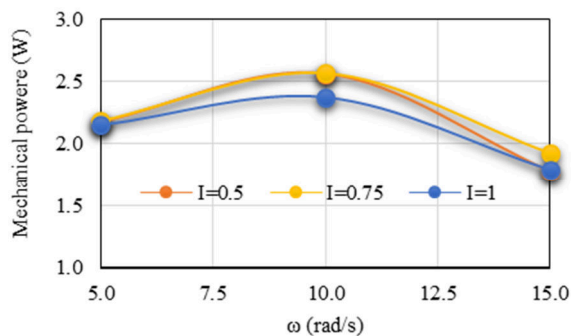


Figure 4. Mechanical power output

حداکثر و راندمان (۷۹٪) نیز در سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه حادث شده است (شکل ۵). با افزایش نسبت استغراق، راندمان تا استغراق ۰/۷۵ تقریباً تغییر چندانی نمی‌کند. عمده تأثیر عمق آب پایاب در عملکرد توربین، به خاطر کاهش تلاطم آب خروجی از توربین می‌باشد، زیرا مانند یک مانع در برابر جریان عمل کرده و منجر به تشکیل جریان زیربحرانی در خروجی پیچ ارشمیدس می‌شود به طوری که حداکثر مقدار عدد فرود

توان مکانیکی حاصله برای مش‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلیون در سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه محاسبه شد. نتایج نشان داد که تعداد دو میلیون مش، بهینه بوده و با این تعداد مش، میانگین مربع خطاهای نتایج عددی و آزمایشگاهی حداقل و برابر با ۰/۰۸۴ می‌باشد (جدول ۳). ذکر این نکته ضروری است که برای مش ۲/۵ میلیون مقدار میانگین مربع خطاها برابر با ۰/۰۷۸ می‌باشد، با این حال، مش دو میلیون نیز نتایج قابل قبول به دست می‌دهد که جهت کاهش محاسبات مقدار دو میلیون در نظر گرفته شد. همچنین تعداد مش‌ها در جهت طول، عرض و ارتفاع (در حالت دو میلیون مش) به ترتیب ۳۵۰، ۷۹ و ۷۲ و اندازه سلول‌ها در تمامی جهات برابر با ۰/۰۲۱ براساس مش ساختار یافته می‌باشد. گام زمانی محاسبات نیز بین ۰/۰۰۰۱ تا ۰/۰۰۰۴ تغییر می‌کرد. در ادامه نتایج براساس، تعداد مش‌های بهینه شبیه‌سازی و ارائه شده است.

Table 3. Relative errors for different mesh cells

No. of mesh cells	RMSE
1.0	0.384
1.5	0.111
2.0	0.084
2.5	0.078

در شکل (۴) نمودار توان مکانیکی خروجی نشان داده شده است. جهت بررسی فقط اثر عمق آب پایین دست، عمق آب در بالادست طوری ثابت نگه‌داشته شد که آب از روی شفت مرکزی پیچ در آستانه سرریز شدن باشد. زیرا سرریز شدن آب باعث ایجاد تلفات و کاهش راندمان خواهد شد. با تغییر ارتفاع آب پایین دست، میزان استغراق پایین دست تغییر می‌کند که این کار با استفاده از یک سرریز انجام شد. حداکثر توان مکانیکی (۲/۵۷ وات) در سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه ایجاد شده است. با افزایش

فقط بخشی از پیچ در محور طولی نمایش داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود سرعت نسبتاً پایینی در پیچ وجود دارد که علت آن فشار هیدرواستاتیکی پایین است که در سیستم وجود دارد. مقدار جزئی سرریز نیز مشاهده می‌شود که به صورت پرتاب قطرات آب از روی پیچ می‌باشد. لازم به ذکر است که جهت مشاهده بهتر میدان، هندسه پیچ ارشمیدس ارائه نشده است.

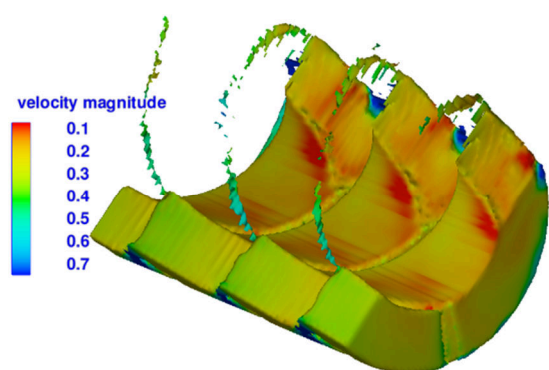


Figure 7. Velocity magnitude within the screw and trough

### نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی سه‌بعدی توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D جهت به‌کارگیری در کانال‌های آبیاری انجام و اثر عمق پایاب در کانال بر عملکرد توربین بررسی شد. هندسه سه‌بعدی پیچ ارشمیدس در محیط اتوکد سه‌بعدی ترسیم و سپس وارد نرم‌افزار شد. در نرم‌افزار مذکور، شرایط اولیه و مرزی تعریف و سپس اعتبارسنجی آن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی انجام شد. نتایج بررسی‌های مختلف نشان داد که تعداد مش‌های بیش‌تر از دو میلیون مش، برای مدل‌سازی مناسب است. همچنین، بررسی سرعت‌های زاویه‌ای مختلف نشان داد که سرعت زاویه‌ای بهینه برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه است. این سرعت زاویه‌ای در مقایسه با سرعت زاویه‌ای سایر توربین‌ها، پایین‌تر بوده که منجر به تلفات اصطکاکی کم‌تر و عمر مفید توربین خواهد شد.

حاصله ۰/۹ به‌دست آمد. این در حالی است که آزادبودن انتهای پایین‌دست باعث به‌وجود آمدن عدد فرود تا ۲ نیز می‌شود که نشانگر سرعت بالای جریان در خروجی و در نهایت تلفات زیاد می‌باشد.

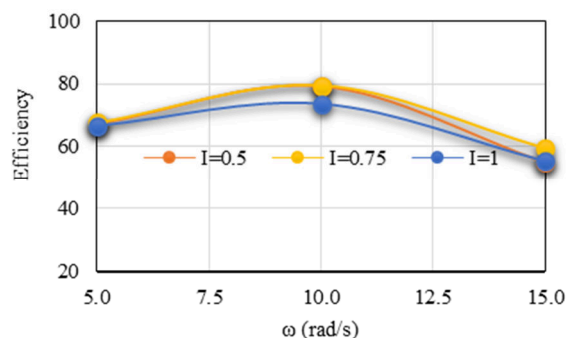


Figure 5. Efficiency output

منحنی تغییرات عمق در طول شبیه‌سازی در انتهای توربین پیچ ارشمیدس و داخل کانال پایین‌دست در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از طول ۰/۵۹ متر که کانال پایین‌دست شروع می‌شود تقریباً تغییرات عمق یک روند ثابتی به خود می‌گیرد و با نزدیک شدن به سرریز عمق افزایش یافته و پس از سرریز شدن در امتداد کانال، ادامه می‌یابد.

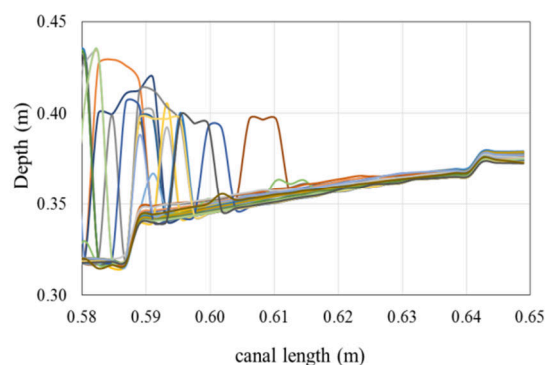


Figure 6. Tailwater variations during the simulation.

در شکل (۷) تغییرات سرعت جریان در میدان حل نشان داده شده است. جهت بزرگ‌نمایی و نمایش بهتر



- Derakhshan, S., & Riasi, A. (2014). *Water turbines*. Tehran, Jahad Daneshgahi.
- Kozyn, A., & Lubitz, W.D. (2017). A power loss model for Archimedes screw generators. *Renewable Energy*, 108, 260-273.
- Lashofer, A., Hawle, W., & Pelikan, B. (2012). State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine, *In Proceedings of the Hydro 2012-Innovative Approaches to Global Challenges*, Bilbao, Spain, 29-31 October.
- Lisicki M., Lubitz W., & Taylor, G.W. (2016) Optimal design and operation of Archimedes screw turbines using Bayesian optimization. *Applied Energy*, 183, 1404-1417.
- Lubitz, W.D., Lyons, M., & Simmons, S. (2014). Performance model of archimedes screw hydro turbines with variable fill level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 40, 04014050.
- Müller, G., & Senior, J. (2009). Simplified theory of Archimedean screws. *Journal of Hydraulic Research*, 47, 666-669.
- Muysken, J. (1932). Calculation of the Effectiveness of the Auger. *De Ingenieur*, 21, 77-91.
- No. 482, (2009). *Hydraulic Design Criteria for Drops, chutes, and Energy Dissipators in Irrigation and Drainage Networks*, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision. (In Persian).
- Nuernbergk, D.M. (2017). Archimedes Screw in the Twenty-First Century, Archimedes in the 21st Century, Springer. pp. 113-124.
- REN21. (2013). *Renewables 2013: Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- Rorres, C. (2000). The turn of the screw: optimal design of an Archimedes screw. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126, 72-80.
- Stergiopoulou, A., Stergiopoulos, V., & Kalkani, E. (2013). Contributions to the study of hydrodynamic behaviour of innovative Archimedean screw turbines recovering the Hydropotential of watercourses and of coastal currents. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*, Athens, Greece, 5-7 September.
- Stergiopoulou, A., & Kalkani, E. (2015). Towards a First CFD Study of Modern Horizontal Axis Archimedean Water Current Turbines. *International Research Journal of Engineering and Technology (Iretj)*, E-Issn, 2395-0056.

نتایج نشان داد که وجود استغراق در انتهای پیچ ارشمیدس ضروری است، زیرا وجود جریان آزاد در انتهای پیچ باعث می‌شود که تأثیر آب موجود در باکت انتهایی در تولید گشتاور و توان مکانیکی پایین باشد. این‌حال، نسبت استغراق نباید بیش‌تر از ۰/۷۵ باشد، زیرا نیروی هیدرواستاتیکی تولیدشده توسط آن به‌صورت نیروی مقاوم عمل کرده و باعث کاهش توان خواهد شد. نتایج نشان داد که استغراق بین ۰/۵ تا ۰/۷۵ مناسب می‌باشد و در احداث این توربین‌ها در کانال‌های آبیاری، عمق آب پایاب متناظر باید ایجاد شود.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Large
2. Medium
3. Small
4. Mini
5. Micro
6. Pico
7. Solidworks
8. Blade
9. Central Cylindrical Shaft
10. Trough
11. Gap
12. Flow Leakage
13. Weir Flow or Overflow
14. Bucket
15. Computational Fluid Dynamic
16. ReNormalized Group
17. Mesh

#### تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### منابع

- C Zafirah, R., & Nurul Suraya, A. (2016). Parametric Study on Efficiency of Archimedes Screw Turbine. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 10904-10908.