

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

کاظم شاهوردی\*<sup>۱</sup>

۱. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران (k.shahverdi@basu.ac.ir)

### چکیده

انرژی جنبشی و پتانسیل موجود در آب که در سازه‌هایی مانند شیب شکن در کانالها مستهلک می‌شود، را می‌توان برای تولید جریات برق در مقیاس کوچک استفاده کرد. برای این منظور می‌توان از توربین آبی پیچ ارشمیدس به عنوان یک توربین نوظهور برای تبدیل انرژی پتانسیل و جنبشی آب به انرژی مکانیکی استفاده کرد. در این تحقیق، توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از FLOW3D مدل‌سازی شد. هندسه توربین مذکور در محیط اتوکد سه‌بعدی طراحی و وارد نرم‌افزار FLOW3D شد. شرایط مرزی و شرایط اولیه آن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی تعریف شد. سپس با اعتبارسنجی آن، تعداد مش‌های بهینه تعیین شد. عملکرد توربین پیچ ارشمیدس برای سرعت‌های زاویه‌ای مختلف و نسبت استغراق مختلف در پایاب بررسی شد. نسبت استغراق بصورت عمق آب در روی انتهای پیچ بر قطر خارجی آن تعریف شد. نتایج نشان داد که سرعت زاویه‌ای بهینه برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه است و عمق پایاب در عملکرد توربین پیچ ارشمیدس موثر است بطوریکه وجود استغراق در انتهای آن، جهت داشتن عملکرد مطلوب، ضروری است. با افزایش نسبت استغراق از ۰/۵ تا ۰/۷۵، مقدار توان مکانیکی و راندمان چندان تغییر نکرد ولی برای مقادیر بالاتر نسبت استغراق، توان مکانیکی و راندمان کاهش یافت. بنابراین نسبت استغراق ۰/۵ تا ۰/۷۵ در پائین‌دست توربین پیچ ارشمیدس پیشنهاد می‌شود.

### کلمات کلیدی:

توربین پیچ ارشمیدس، نیروگاه برق آبی کوچک، مدل‌سازی عددی، FLOW-3D.

\*کاظم شاهوردی، k.shahverdi@basu.ac.ir

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

### مقدمه

در کانال‌های آبیاری و سیستم‌های آبرسانی، جهت استهلاک انرژی جنبشی و پتانسیل آب از شیب شکن، تنداب و ... جهت مستهلک کردن انرژی مازاد استفاده می‌شود. با توجه به کمبود انرژی و استفاده بهینه از منابع آب، می‌توان بجای استفاده از سازه‌های فوق، از توربین پیچ ارشمیدس جهت تبدیل انرژی پتانسیل و جنبشی آب به انرژی مکانیکی و تولید برق استفاده کرد.

پیچ ارشمیدس، پمپ پیچ یا پیچ آب یکی از بزرگ‌ترین اختراعاتی است که از عصر باستان تاکنون، انجام شده است و با کمترین تغییر، مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرد. اخیراً کاربرد جدید این پیچ به‌عنوان توربین آبی جهت تولید انرژی پاک با استفاده از انرژی پتانسیل و جنبشی آب در کانالها، رودخانه‌ها و ... مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین آشنایی با فناوری و بومی‌سازی آن، امری ضروری است.

با توجه به ظرفیت‌های موجود در سامانه‌های آبرسانی، شبکه‌های آبیاری، رودخانه‌ها و ... می‌توان نیروگاه‌های میکرو، که در آن از توربین پیچ ارشمیدس استفاده شده است، در آنها احداث کرد. در نتیجه مطالعه جهت شناخت کارکرد آن، ضروری است.

نیروگاه‌های برق آبی بر اساس ظرفیت تولید برق، به نیروگاه‌های برق آبی بزرگ (ظرفیت بیشتر از ۱۰۰ مگاوات)، متوسط (ظرفیت بین ۱۵ تا ۱۰۰ مگاوات)، کوچک (بین ۱ تا ۱۵ مگاوات)، خیلی کوچک (ظرفیت ۱۰۰ کیلووات تا ۱۰۰۰ کیلووات)، ریز (ظرفیت بین ۵ کیلووات تا ۱۰۰ کیلووات) و خیلی ریز (ظرفیت بین ۳۰۰ وات تا ۵ کیلووات) طبقه‌بندی می‌شوند [۲].

ظرفیت نیروگاه‌های نصب‌شده در ایران، ۷۳ هزار مگاوات است که سهم نیروگاه‌های برق آبی (نیروگاه‌های متوسط و بزرگ) از این میزان ۱۴/۷ درصد از کل انرژی تولید شده، یعنی ۱۰ هزار و هفت صد مگاوات، هست. نیروگاه‌های کارون ۳ و کرخه به ترتیب ۲ هزار و ۴۰۰ مگاوات انرژی تولید می‌کنند.

نیروگاه‌های برق آبی با ظرفیت تولید پائین، منابع انرژی نسبتاً کوچکی هستند که تقریباً ۳ تا ۴ درصد کل انرژی مورد نیاز انسان را تولید می‌کنند [۸]. مشتریان نیروگاه‌های برق آبی میکرو افرادی هستند که یا دسترسی به شبکه توزیع برق ندارند و یا افرادی که می‌خواهند برق مورد نیاز خود را مستقلاً تولید کنند. در ایران، پتانسیل‌های زیادی برای نیروگاه‌های کوچک وجود دارد.

با آن‌که این پیچ به وفور جهت پمپاژ آب استفاده شده است، اما مطالعه‌های مربوط به تئوری آن مربوط به دو دهه اخیر است [۷]. رورس معادلات ارائه شده برای پیچ را با استفاده از روش‌های عددی حل کرد [۹].

در تحقیقی در مالزی، اثر تعداد پره‌ها و تعداد گام‌های هر پره بر روی راندمان پیچ ارشمیدس با تحلیل عددی و نرم‌افزار فلونتت بررسی شد. طرح اولیه پیچ ارشمیدس با استفاده از نرم‌افزار سالدورک ترسیم شد. در شبیه‌سازی‌ها، شرایط مرزی و شرایط جریان به صورت ماندگار در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که پیچ با ۳ پره و ۳ دور، راندمان قابل قبولی دارد و تعداد دورهای پره اثر بیشتری نسبت به تعداد پره‌ها بر روی راندمان پیچ دارد [۱].

در تحقیقی 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 تحقیق 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، ۴ 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 [۴]. محدوده مربوط به پیچ ارشمیدس برای دبی  $0/2$  مترمکعب بر ثانیه تا  $8$  مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع حدود  $1$  تا  $8$  متر است [۱۱]. در تحقیق شاهوردی و همکاران [۱۰]، یک توربین برای جایگزینی بجای یک شیب شکن در کانال آبیاری عقلی شرقی طراحی و بهینه‌سازی شد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت که نشانگر قابلیت استفاده از توربین پیچ ارشمیدس در این نوع سازه‌ها می‌باشد.

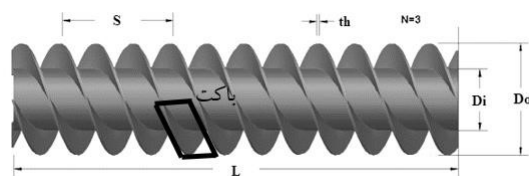
با توجه به اینکه عمق آب در خروجی توربین به کانال پائین دست، تابع عمق پایاب کانال است، بررسی تغییرات عمق پائین دست بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس ضروری است. در این تحقیق، در نظر است تا مدل‌سازی سه بعدی پیچ ارشمیدس با استفاده از FLOW3D انجام شود و عمق‌های مختلف پائین دست و سرعت‌های زاویه‌ای مختلف توربین با استفاده از مدل تهیه شده با FLOW3D بررسی شود. استفاده از FLOW3D برای مدل‌سازی توربین پیچ ارشمیدس، اولین بار است که انجام می‌شود.

### معرفی توربین پیچ ارشمیدس

اجزاء توربین پیچ ارشمیدس، که در شکل ۱ نشان داده شده است، شامل ورودی کانال بالادست، بدنه یا هسته مرکزی پیچ ارشمیدس، جعبه دنده، گاورنر، ژنراتور، شبکه آشغال گیر، دریچه تخلیه، تابلو کنترل، تراف و کانال پائین دست است. آب از طریق کانال ورودی بالادست وارد توربین شده و با اعمال فشار هیدرواستاتیکی به توربین باعث چرخش آن می‌شود. با چرخش توربین آب در داخل آن به پائین دست هدایت شده و وارد کانال پائین دست می‌شود.

هسته مرکزی یک توربین پیچ ارشمیدس، بدنه پیچ ارشمیدس است که هندسه آن بسیار شبیه به پمپ پیچ ارشمیدس است. یک پیچ ارشمیدس، مجموعه‌ای از صفحات 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 پائین شفت را در برمی‌گیرد. به‌طور معمول یک درز کوچک بین پیچ و محفظه قرار دارد که در نتیجه آن، پیچ می‌تواند به‌طور آزادانه در داخل محفظه بچرخد. بخشی از آب که می‌تواند از قسمت درز به پائین دست حرکت کند نشد جریان نام دارد. جریانی از آب که از روی شفت به پائین دست می‌تواند ریزش کند جریان سرریز نامیده می‌شود. در برخی موارد، محفظه نیز به پیچ متصل شده و همراه با آن می‌چرخد. زاویه‌ای که محور پیچ با خط افق می‌سازد، زاویه استقرار پیچ نام دارد.

آب از قسمت بالا وارد مجموعه و با چرخش پیچ وارد پره‌های آن شده و نهایتاً از خروجی پیچ در پائین دست خارج می‌شود. آبی که در راستای محور پیچ به قسمت پائین حرکت می‌کند بین دو پره مجار گیر افتاده 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 مارپیچ 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.



شکل ۱: شماتیک توربین پیچ ارشمیدس و اجزاء آن

طبق تقسیم‌بندی شرکت لندیوستری، توربین پیچ ارشمیدس برای محدوده دبی ۰/۲ تا ۱۵ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع ۱ تا ۱۰ متر قابل استفاده است که حدوداً تا ۱۰۰۰ کیلووات توان قابل تولید است [۱۱].

### 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 علم CFD استفاده می‌شود. در این راستا نرم‌افزارهای مختلفی توسعه یافته است. در این تحقیق از نرم‌افزار Flow3D استفاده شده است. اندازه‌گیری میدان‌های فشار و سرعت با استفاده از کارهای آزمایشگاهی بسیار پیچیده، زمان‌بر و غیردقیق 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.

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

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 معادله ناویر-استوکس معروف است (معادله ۲):

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

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 اعداد رینولدز پائین، جریان صاف و لایه‌های هم‌جوار به آرامی روهم می‌لغزند. در مقادیر عدد رینولدز بالاتر، تغییرات جدی در رفتار جریان وجود دارد که باعث می‌شود حرکت ذرات تصادفی و نامنظم شود در نتیجه سرعت، فشار و سایر خواص جریان به صورت تصادفی و نامنظم تغییر می‌کند که در این حالت، جریان را جریان آشفته می‌نامند.

برای ایجاد ترم‌های جریان آشفته در معادلات حاکم بر جریان، متوسط‌گیری زمانی (معادله ۳) از پارامترهای معادلات انجام می‌شود:

$$\begin{aligned} u &= \bar{u} + u' \\ p &= \bar{p} + p' \end{aligned} \quad (3)$$

در این صورت با توجه به اینکه سیال آب غیرقابل تراکم است، معادلات پیوستگی و مومنتم را می‌توان به ترتیب به صورت روابط ۴ و ۵ نوشت.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} + \rho' u') &= 0 \rightarrow \\ \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u}) + \nabla \cdot (\rho' u') &= 0 \rightarrow \nabla \cdot (\bar{u}) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial t} + (\bar{u} + u') \cdot \nabla (\bar{u} + u') \right) &= \\ -\nabla (\bar{p} + p') + \mu \nabla^2 (\bar{u} + u') + f & \end{aligned} \quad (5)$$

مدل‌های دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  و  $k-\omega$  از معروف‌ترین مدل‌های محاسبه آشفتگی فوق هستند که در آن‌ها یک معادله برای محاسبه انرژی جنبشی تلاطم و یک معادله برای محاسبه اتلاف آشفتگی استفاده می‌شود. در این تحقیق، مدل  $k-\omega$  استفاده شد. در این تحقیق، از نرم‌افزار FLOW3D برای حل معادلات حاکم بر جریان استفاده شده است.

نرم افزار FLOW3D یکی از مدل‌های عددی سه بعدی قدرتمند و بسیار دقیق دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) است که میدان حل را (محدوده جریان و سیال مسئله) به شبکه‌های با اندازه کوچک به نام مش تقسیم کرده و معادلات حاکم بر سیال (معادله ناویر-استوکس و معادله پیوستگی) را برای هر مش از شبکه، گسسته‌سازی و حل می‌کند.

### طراحی پیچ ارشمیدس

هندسره پیچ ارشمیدس در محیط نرم افزار اتوکد طراحی ترسیم و سپس وارد نرم‌افزار Flow3D شد. در ادامه سه بلوک مش برای کانال بالادست، پیچ ارشمیدس و کانال پائین دست تعریف شد. با توجه به پیچیدگی هندسه پیچ ارشمیدس، اندازه مش مربوطه بسیار کوچک تر از مش‌های کانال بالادست و پائین دست در نظر گرفته شد. مشخصات پیچ طراحی شده جهت شبیه‌سازی، پیچ ارشمیدس تحقیق آزمایشگاهی لوبیتر و همکاران [۶] (جدول ۱) است که برای اعتبار سنجی FLOW3D نیز استفاده شد.

جدول ۱: مشخصات پیچ ارشمیدس طراحی شده

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
قطر داخلی	$D_i$	cm	۸/۰۳
قطر خارجی	$D_o$	cm	۱۴/۶
گام پیچ	S	cm	۱۴/۶
طول پیچ	L	cm	۵۸/۴
ضخامت پره	$th$	cm	۰/۳
تعداد پره	N	-	۳
زاویه استقرار	B	°	۳۰
دبی	Q	$m^3.s^{-1}$	۱/۱۳

### آماده‌سازی مدل جهت شبیه‌سازی

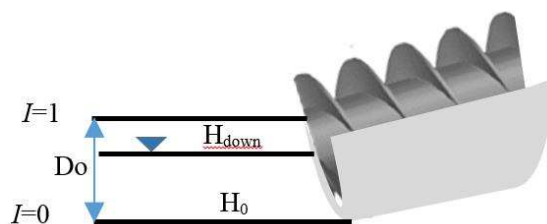
شرایط مرزی تعریف شده بصورت زیر است: شرایط مرزی کف و کناره‌های کانال بصورت دیوار (W)، شرایط مرزی سطح آب سیمتری (S) (یعنی شرایط جریان در روی مرز، همانند شرایط داخل مرز است)، شرط مرزی ورودی به کانال بالادست به صورت دبی ثابت (Q) که توسط کاربر تعریف می‌شود و شرط مرزی خروجی از کانال پائین دست بصورت فشار یا ارتفاع (P) ثابت که متناسب با ارتفاع آب در پائین دست، تعریف می‌شود.

شرایط اولیه شامل جریان ماندگار، ارتفاع آب ثابت در داخل کانال‌های بالادست و پائین دست 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 پائین دست به صورت هیدرواستاتیک است.

لازم به ذکر است که سرعت زاویه‌ای توربین پیچ ارشمیدس نسبت به سایر توربین‌ها کمتر است لذا عمر مفید آن بالاتر می‌باشد. با توجه به این نکته و همچنین مقادیر استفاده شده در تحقیقات دیگر، سه سرعت زاویه‌ای شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ رادیان بر ثانیه در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. جهت بررسی تاثیر عمق آب در کانال پائین دست بر توان مکانیکی تولید شده و راندمان، سه نسبت استغراق به ترتیب برابر با ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ بررسی گردید. برای این منظور سطح آب در کانال بالادست ثابت در نظر گرفته شد. بطوریکه آب از روی شفت مرکزی پیچ در آستانه سرریز شدن باشد. با تغییر عمق آب در کانال پائین دست، نسبت استغراق‌های مختلف ایجاد شد. نسبت استغراق با استفاده از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

$$I = \frac{H_{\text{down}} - H_0}{D_0} \quad (6)$$

که در آن،  $I$  نسبت استغراق،  $D_0$  برابر با قطر خارجی پیچ،  $H_{\text{down}}$  ارتفاع آب در کانال پائین دست و  $H_0$  ارتفاع پائین ترین نقطه کانال است. در شکل ۲، پارامترهای فوق نشان داده شده است.



شکل ۲: پارامتر نسبت استغراق

برای بررسی تغییرات ارتفاع پائین دست پیچ ارشمیدس، پنج نسبت استغراق ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ بررسی شد. اگر انتهای پیچ کاملا مستغرق شده باشد، نسبت استغراق برابر با ۱ و اگر هیچ استغراقی وجود نداشته باشد، نسبت استغراق برابر با صفر است. لازم به ذکر است که گشتاوری که در پیچ ایجاد می‌شود برابر با جمع تک تک گشتاورهای ایجاد شده در تک تک باکتها است. اگر نسبت استغراق کمتر از نیم شود آب در باکت انتهای پیچ خالی شده و عملاً گشتاور تولید شده توسط باکت مذکور صفر می‌شود و گشتاور کل و در نتیجه توان کل کاهش می‌یابد. در نتیجه، نسبت استغراق کمتر از نیم در سیستم اجازه داده نشد و در این تحقیق بررسی نشده است. به منظور اطمینان از همگرایی مدل باید معیار همگرایی در نظر گرفته شود. در صورتی که سطح آب در حوضچه‌ها ثابت شود یا پارامترهایی مانند گشتاور و دبی در یک مقدار مشخص که از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده است ثابت بمانند، در این صورت مدل همگرا شده است. همچنین، در Flow3D در صورتی که مدل همگرا شده باشد یک پیغامی مبنی بر همگرایی و رسیدن به حالت ماندگار را به کاربر می‌دهند.

### اعتبارسنجی مدل FLOW3D

برای اطمینان از اعتبار محاسبات نرم‌افزارهای CFD از جمله FLOW3D و استفاده از آن برای شبیه‌سازی‌های مختلف، باید نتایج محاسبات CFD با نتایج عملی و آزمایشگاهی مطابقت داده شود. اگر خطای بین نتایج محاسباتی با نتایج آزمایشگاهی، در حد قابل قبولی باشد، یعنی اعتبارسنجی مدل انجام شده و می‌توان از نتایج CFD استفاده کرد.

از آنجا که اعتبارسنجی مدل می‌تواند با نتایج مقالات معتبر ارائه شده در کنفرانس‌ها و مجله‌های معتبر انجام شود، در این تحقیق از نتایج تحقیق لوبیتز و همکاران [۶] استفاده شد که مشخصات این پیچ در جدول (۱) ارائه شده است. مطابق با نتایج تحقیق ذکر شده، توان مکانیکی برای سرعت‌های زاویه‌ای ۵، ۱۰ و ۱۵ به ترتیب برابر با ۱/۹۴۲، ۲/۱۸۷ و ۱/۹۸۰ وات می‌باشد.

## نتایج و بحث

در این تحقیق، اعتبارسنجی مدل FLOW3D برای سرعت‌های زاویه‌ای ۵، ۱۰ و ۱۵ رادیان بر ثانیه انجام گرفت. لازم به ذکر است که سرعت زاویه‌ای بهینه مرتبط با توان مکانیکی و راندمان مکانیکی حداکثر، در تحقیق آزمایشگاهی لوبیتز و همکاران [۶]، برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه حاصل شده است. در تحقیق حاضر و در مدل‌سازی عددی نیز، سرعت زاویه‌ای بهینه برابر با ۱۰ رادیان بر ثانیه به دست 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 به صورت کامل توسط نرم‌افزار قابل شناسایی باشد و نتایج با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد.

برای پیدا کردن مش بهینه، مش‌های مختلف بررسی شد. برای مش‌های کمتر از ۱ میلیون، هندسه پیچ به طور کامل توسط مدل قابل شناسایی نبود. زیرا، به علت کم بودن تعداد مش‌ها، پره‌های پیچ بطور کامل شناسایی نشد و روزه‌هایی بر روی پره وجود داشت که آب می‌تواند از داخل آنها عبور کرده و در نتیجه دقت محاسبات را کاهش دهد. در حالی که آب از داخل جسم جامد (یعنی بدنه پیچ ارشمیدس) نمی‌تواند، و نباید، عبور کند. به همین منظور تعداد مش‌های زیادتر مورد بررسی قرار گرفت.

بررسی مش‌های مختلف نشان داد که برای تعداد مش بیشتر از ۱ میلیون، نرم‌افزار می‌تواند تمام قسمت‌های پیچ را به طور کامل بشناسد. به همین دلیل برای مش‌های بیشتر از ۱ میلیون، انطباق نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی مد نظر قرار گرفت. پس از انجام شبیه‌سازی و بدست آوردن توان مکانیکی با نرم‌افزار برای مش‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلیون در سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه، به عنوان سرعت زاویه‌ای بهینه، خطای بین نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی برای مش‌های مورد بررسی محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده است.

**جدول ۲: مقایسه نتایج مدل‌سازی و آزمایشگاهی توان مکانیکی برای مش‌های مختلف**

در سرعت زاویه‌ای ۱۰ rad/s

تعداد مش‌ها (میلیون)	خطای مدل‌سازی و واقعی (%)
۱	۱۶/۶
۱/۵	۳/۶
۲	۰/۴۱
۲/۵	۰/۱۷

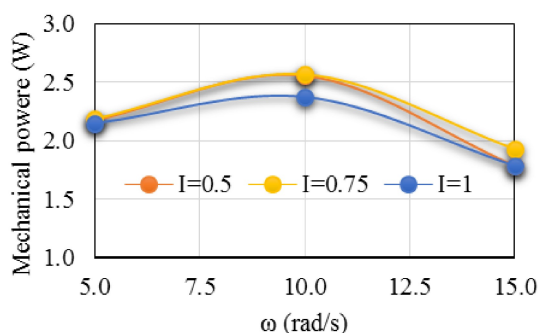
برای ۲ میلیون مش، مقدار خطا برابر با ۰/۴۱ درصد و برای ۲/۵ میلیون مش برابر با ۰/۱۷ درصد است که اختلاف چندانی ندارند. از این رو برای کاهش محاسبات تعداد مش برابر با ۲ میلیون، به عنوان تعداد مش بهینه انتخاب شد و برای سرعت‌های زاویه‌ای ۵ و ۱۰ رادیان بر ثانیه نیز شبیه‌سازی انجام شد.

در شکل ۳ و ۴ به ترتیب نمودار توان مکانیکی تولید شده و راندمان در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف نشان داده شده است. جهت بررسی فقط اثر عمق آب پائین دست، عمق آب در بالادست طوری ثابت نگهداشته شده است که آب از روی شفت مرکزی پیچ در آستانه سرریز

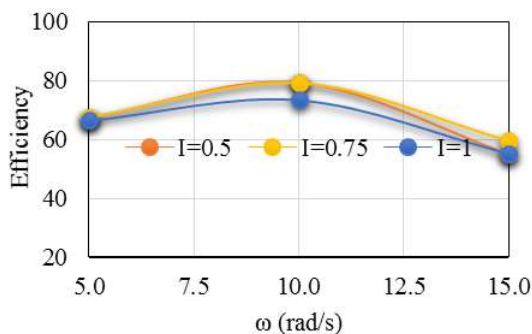
شدن باشد ولی سرریز نکند. زیرا سرریز شدن آب باعث ایجاد تلفات و کاهش راندمان خواهد شد. با تغییر ارتفاع آب پائین‌دست، میزان استغراق پائین‌دست تغییر می‌کند.

همانطور که مشاهده می‌شود، حداکثر توان مکانیکی (۲/۵۷ وات) و راندمان (۷۹٪) در سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه حادث شده است. با افزایش نسبت استغراق، توان مکانیکی تولید شده تا استغراق ۰/۷۵ تقریباً تغییر چندانی نمی‌کند. با این حال، توان مکانیکی برای نسبت استغراق ۱، کاهش یافته و به ۲/۳۸ وات می‌رسد که دلیل آن افزایش فشار هیدرواستاتیک آب با افزایش ارتفاع آب در کانال پائین‌دست است که باعث مقاومت در مقابل جریان می‌شود. فشار هیدرواستاتیک آب در بالادست پره‌ها و ورودی کانال بالادست، نیروی مقاوم و در پائین دست پره‌ها و خروجی به کانال پائین‌دست، نیروی مقاوم است.

گشتاور ایجاد شده در پره‌ها بر اثر نیروی هیدرواستاتیک آب برابر با مجموع گشتاورهای ایجاد شده در تک تک باکت‌هاست. بنابراین، وجود مقداری استغراق در کانال پائین‌دست، باعث کاهش نوسانات و افزایش راندمان خواهد شد. ایجاد استغراق‌های مختلف در پائین‌دست، با تغییر عمق پایاب در کانال پائین‌دست، انجام می‌شود.



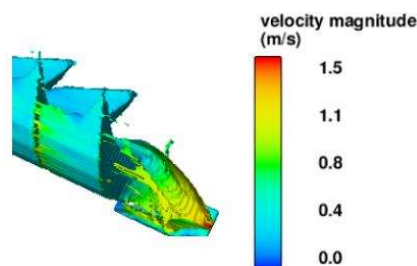
شکل ۳: توان مکانیکی در مقادیر مختلف نسبت استغراق و سرعت زاویه‌ای



شکل ۴: راندمان در مقادیر مختلف نسبت استغراق و سرعت زاویه‌ای

یکی از مزایای دینامیک سیالات محاسباتی، استخراج میدان سرعت و فشار جریان است که در مدل‌های آزمایشگاهی بسیار مشکل و حتی غیرممکن است. میدان سرعت پیچ ارشمیدس مدل شده در این تحقیق، در شکل ۵ نشان داده شده است.





شکل ۵: میدان سرعت در بدنه پیچ ارشمیدس

در شکاف بین پره‌های پیچ و ترف که جریان می‌تواند آزادانه به پائین دست حرکت کند، سرعت بیشتر است. همچنین جریان در پائین دست سرعت بیشتری نسبت به بالادست دارد با این حال سرعت جریان در تمامی باکت‌ها تقریباً برابر است و توزیع یکسانی مشاهده می‌شود. حداکثر سرعت در پیچ برابر با ۱/۵ متر بر ثانیه است که در مقایسه با سایر توربین‌ها، سرعت کمتری است و نتیجتاً باعث اصطکاک کمتر و طول عمر بیشتر پیچ می‌شود. در مراجع مختلف از جمله [۵] طول عمر پیچ حدود ۳۰ سال گزارش شده است.

اختلاف ارتفاعی که باعث ایجاد گشتاور می‌شود در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است در کل ۱۲ باکت در شکل وجود دارد که گشتاور ایجاد شده توسط هر کدام از آنها در نسبت استغراق ۰/۷۵ و سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه برابر با ۰/۲۱۴ نیوتن-متر است. اگر گشتاور ایجاد شده در هر باکت در تعداد آنها (۱۲ باکت) ضرب شود، گشتاور کل بدست می‌آید که برابر با ۰/۲۵۷ نیوتن-متر است. اگر گشتاور کل در سرعت زاویه‌ای ۱۰ ضرب شود، توان مکانیکی تولید شده به دست می‌آید که برای نسبت استغراق ۰/۷۵ و سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه برابر با ۲/۵۷ وات است که در شکل ۵ نیز قابل مشاهده است.

نتایج نشان داد که عمق آب در کانال پائین دست باید حداقل در مرکز پیچ ارشمیدس و یا کمی بالاتر از آن (بین ۰/۵ تا ۰/۷۵) باشد تا حداکثر توان و راندمان حاصل شود.

### نتیجه گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی سه بعدی توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D انجام و اثر عمق پایاب بر روی عملکرد توربین بررسی شد. هندسه سه بعدی پیچ ارشمیدس در محیط اتوکد سه بعدی 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 بررسی مش‌های مختلف نشان داد که تعداد مش‌های بیشتر از ۲ میلیون مش با خطای ۰/۴۱ درصد، 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، پائین تر بوده و در نتیجه تلفات اصطکاکی کمتری خواهد داشت. همچنین عمر مفید توربین نیز در مقایسه با سایر توربین‌ها بیشتر خواهد شد.

نتایج نشان داد که وجود استغراق در انتهای پیچ ارشمیدس ضروری است زیرا وجود جریان آزاد در انتهای پیچ باعث می‌شود که تاثیر آب موجود در باکت انتهایی در تولید گشتاور و توان مکانیکی پائین باشد. با این حال، نسبت استغراق نباید بیشتر از ۰/۷۵ باشد زیرا نیروی هیدرواستاتیکی تولید شده توسط آن بصورت نیروی مقاوم عمل کرده و باعث کاهش توان خواهد شد. نتایج نشان داد که استغراق بین ۰/۵

تا ۰/۷۵ مناسب می باشد. بطور کلی، باید بین توان تلف شده در باکت انتهایی و توان تلف شده ناشی نسبت استغراق، تعادلی وجود داشته باشد تا توان مکانیکی حداکثر شود. این تعادل در نسبت استغراق ۰/۵ تا ۰/۷۵ بوجود می آید.

#### مراجع:

1. 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.
2. Derakhshan, S. and Riasi, A. 2014. Water turbines. Tehran: Jahad Daneshgahi.
3. Kozyn A., Lubitz W.D. 2017. A power loss model for Archimedes screw generators. Renewable Energy, 108:260-273.
4. Lashofer A., Hawle W., Pelikan B. 2012. State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine, meeting of Hydro .
5. Lisicki M., Lubitz W., Taylor G. W. 2016. Optimal design and operation of Archimedes screw turbines using Bayesian optimization. Applied Energy, 183:1404-1417.
6. 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.
7. Nuernbergk D.M. 2017. Archimedes Screw in the Twenty-First Century, Archimedes in the 21st Century, Springer. pp. 113-124 .
8. REN21. 2013. Renewables 2013: Global Status Report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
9. Rorres C. 2000. The turn of the screw: optimal design of an Archimedes screw. Journal of Hydraulic Engineering, 126:72-80.
10. Shahverdi, K., Loni, R., Ghobadian, B., Gohar, S, Marofi, S. and Bellos, E. 2020. Numerical Optimization Study of Archimedes Screw Turbine (AST): a Case Study, Journal of Renewable Energy, 145: 2130-2143.
11. 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 13th International Conference on Environmental Science and Technology.

## Investigating the Effect of Tail-water Depth on Archimedes Screw Turbine Performance in Generating Energy from Flowing Water in Canals

Kazem Shahverdi<sup>1\*</sup>

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

### Abstract

Kinetic and potential energies, existing in water and dissipating using structures like drops, can be used for generating electricity in 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 this research, an Archimedes screw turbine was modeled using FLOW3D. The geometry of the turbine was designed with Autocad3D software and imported to the FLOW3D. The initial and boundary conditions were defined based on the experimental data. After validating the FLOW3D, the optimal number of mesh was determined. The performance of the Archimedes turbine was investigated under different rotation speeds of the screw and different tail-water. The optimal screw's rotation speed was determined by 10 rad/s. The results showed that tail-water affects the performance of the Archimedes screw so that the submergence of the end of the screw is necessary. The mechanical power and efficiency of the screw were not varied as the submergence ratio was increased from 0.5 to 0.75; however, those were increased as the submergence ratio was increased to values more than 0.75. Therefore, a submergence ration between 0.5 and 0.75 is recommended at the end of the screw.

**Key words:** Archimedes Screw Turbine, Small Hydropower Plant, Numerical Modeling, FLOW3D

\*Corresponding author

E-mail: k.shahverdi@basu.ac.ir