

## مدل سازی توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از FLOW3D و بررسی اثر تعداد پره ها بر روی عملکرد آن

کاظم شاهوردی<sup>۱\*</sup>

### چکیده

با توجه به محدود بودن سوخت های فسیلی، کاربرد انرژی های تجدیدپذیر در مقیاس کوچک مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از توربین آبی پیچ ارشمیدس به عنوان یک توربین نوظهور برای تبدیل انرژی پتانسیل و جنبشی آب به انرژی مکانیکی در حال افزایش است. در این تحقیق، عملکرد توربین پیچ ارشمیدس به صورت عددی با استفاده از معادلات ناویر-استوکس متوسط زمانی (RANS) در محیط Flow3D با بررسی اثر تعداد پره ها و سرعت های زاویه ای مختلف بر آن مورد توجه قرار گرفت. جهت مدل سازی آشفتگی از مدل  $k - \epsilon$  و جهت شبیه سازی سطح سیال از روش کسر حجمی سیال (VOF) استفاده شد. مدل عددی تهیه شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، اعتبارسنجی شد. تعداد سلول های بهینه مورد نیاز برای مش بندی تعیین شد. نتایج اعتبارسنجی نشان داد که نتایج عددی، مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد و حداکثر راندمان توربین پیچ ارشمیدس برابر با ۷۹ درصد حاصل شد. نتایج نشان داد که از میان گزینه های بررسی شده، پیچ ارشمیدس با ۲ پره نسبت به سایر موارد از نظر فنی و اقتصادی ارجح است.

### واژه های کلیدی:

توربین پیچ ارشمیدس، نیروگاه برق آبی کوچک، مدل سازی عددی.

۱. استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. k.shahverdi@basu.ac.ir \*

## مقدمه

دنیا ساخته و نصب شده است. در اکثر این پیچ‌ها، گام پیچ برابر با قطر خارجی، قطر داخلی نصف قطر خارجی، توان تولیدی بین ۱۰ تا ۶۰ کیلووات و راندمان کل بین ۶۵ تا ۷۵ درصد گزارش شده است.

مطالعه‌های مربوط به تئوری پیچ ارشمیدس در دو دهه اخیر انجام شده است (نورنبرگ<sup>۸</sup>، ۲۰۱۷). رورس<sup>۹</sup> معادله ارائه شده توسط اولر<sup>۱۰</sup> برای پمپ پیچ ارشمیدس را با استفاده از روش‌های عددی حل کرد (رورس، ۲۰۰۰).

اولین تئوری مربوط به توربین پیچ ارشمیدس در حالت دوبعدی ارائه شد که نتایج آن نشان داد راندمان توربین پیچ ارشمیدس فقط تابعی از هندسه توربین و تلفات توان است (مولر<sup>۱۱</sup> و سنپور<sup>۱۲</sup>، ۲۰۰۹). مطالعه اثر زاویه استقرار در محدوده ۲۵ تا ۵۰ درجه بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس نشان داد زاویه ۳۵ درجه، زاویه بهینه برای محدوده مختلف دبی‌ها است (لیسدیانتی<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۲).

اولین مدل در حالت سه‌بعدی برای پیش‌بینی راندمان توربین پیچ ارشمیدس توسط لوبیتز<sup>۱۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴) ارائه شد که یک مدل ایدئال بود و تلفات توان را شامل نمی‌شد. در این تحقیق، یک مدل آزمایشگاهی با سه پره و زاویه استقرار ۲۴/۹ درجه نیز ساخته و اجرا شد. در این مدل تئوری ایدئال توسط کوزین<sup>۱۵</sup> و لوبیتز (۲۰۱۷) با استفاده از نتایج آزمایشگاهی اصلاح شد که شامل تمامی تلفات توان، از جمله تلفات اصطکاکی و دبی بوده و نتایج آن برای توربین ۳ پره رضایت‌بخش اعلام شد.

تولید انرژی پایدار، یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی جامعه امروزی است. در عصر حاضر با توجه به محدود بودن سوخت‌های فسیلی، کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر جهت تولید انرژی رو به افزایش است. در نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک به‌عنوان یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر، با استفاده از توربین‌های آبی، از انرژی آب جریان برق تولید می‌شود.

اخیراً توربین پیچ ارشمیدس (AST)، به‌عنوان فرم نوظهور توربین‌های آبی مورد توجه قرار گرفته است که محدوده کاربرد آن برای دبی ۰/۲ تا ۸ مترمکعب بر ثانیه و ارتفاع ۱ تا ۸ متر است (استرجیوپولو<sup>۲</sup> و کلکانی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۳؛ استرجیوپولو و همکاران، ۲۰۱۳).

هسته مرکزی یک توربین پیچ ارشمیدس، بدنه پیچ ارشمیدس است که مجموعه‌ای از صفحات مارپیچ به نام پره<sup>۴</sup> است که بر روی یک شفت سیلندری مرکزی<sup>۵</sup> به‌صورت ثابت قرار گرفته‌اند و توسط محفظه‌ای<sup>۶</sup> احاطه شده است. به‌طور معمول یک درز کوچک بین پیچ و محفظه، جهت چرخش آزادانه پیچ، قرار دارد. آب از کانال بالادست داخل پیچ شده و پس از چرخاندن آن و تولید فشار هیدرواستاتیکی وارد کانال پائین‌دست می‌شود. 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. با وصل یک ژنراتور به پیچ، از چرخش مکانیکی پیچ می‌توان برق تولید کرد.

با بررسی میدانی که لاشوفر<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۲) از طریق پرسشنامه و استعلام از کارخانه‌های سازنده انجام داده‌اند، مشخص شد که بیش از ۴۰۰ مورد توربین پیچ ارشمیدس در

۹. Rorres  
۱۰. Euler  
۱۱. Müller  
۱۲. Senior  
۱۳. Lisdiyanti  
۱۴. Lubitz  
۱۵. Kozyn

۱. Archimedes Screw Turbine  
۲. Stergiopoulou  
۳. Kalkani  
۴. Blade  
۵. Central Cylindrical Shaft  
۶. Trough  
۷. Lashofer  
۸. Nuernbergk

توربین پیچ ارشمیدس یکی از توربین‌های نوظهور جهت تبدیل انرژی پتانسیل آب به انرژی مکانیکی است. کل توان هیدرولیکی موجود در آب ( $P_h$ ) بر حسب وات برابر است با:

$$P_h = \gamma QH \quad (1)$$

که در آن،  $\gamma$  وزن مخصوص آب (نیوتن بر مترمکعب)،  $Q$  دبی (مترمکعب بر ثانیه) و  $H$  ارتفاع (متر) است. توان مکانیکی ( $P_m$ ) تولیدشده توسط توربین بر حسب وات برابر است با:

$$P_m = \tau \omega \quad (2)$$

که در آن،  $\tau$  گشتاور (نیوتن-متر) و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای (رادیان بر ثانیه) است. راندمان توربین ( $\eta$ ) نیز از تقسیم توان مکانیکی بر توان هیدرولیکی به دست می‌آید.

$$\eta = \frac{P_m}{P_h} = \frac{\tau \omega}{\gamma QH} \quad (3)$$

نظر به اینکه اطلاعات هیدرولیکی جریان (دبی و ارتفاع) در دسترس است، با محاسبه گشتاور و سرعت زاویه‌ای می‌توان توان مکانیکی و راندمان را محاسبه کرد. برای محاسبه گشتاور و سرعت زاویه‌ای، از نرم‌افزارهای CFD می‌توان استفاده کرد که در تحقیق حاضر از Flow3D استفاده شده است. بدین منظور سرعت زاویه‌ای موردنظر، به صورت مقدار از پیش تعریف‌شده در نرم‌افزار وارد شده و با اجرای نرم‌افزار، گشتاور موردنظر محاسبه می‌شود.

### معادلات حاکم بر جریان

جریان در توربین پیچ ارشمیدس به صورت سطح آزاد، غیرقابل تراکم، غیرماندگار و آشفته است. برای حل عددی پدیده حاکم بر پیچ ارشمیدس، باید معادلات سه‌بعدی و غیرماندگار ناویر-استوکس متوسط زمانی<sup>۳</sup> را حل کرد. در این روش، تنش‌های رینولدز که به صورت مجهول در معادلات هستند با استفاده از یک مدل آشفتگی محاسبه می‌شوند. در ادامه معادلات مربوطه

با آنکه اولین تحقیقات بر روی توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD<sup>۱</sup>) توسط استرجیوپولو و کلکانی (۲۰۱۳) و استرجیوپولو و همکاران (۲۰۱۳) انجام شده است اما نتایج کامل و رضایت‌بخشی از این تحقیقات گزارش نشده است. دلینگر<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶) و دلینگر و همکاران (۲۰۱۸)، عملکرد توربین پیچ ارشمیدس با ۳ پره را در شرایط مختلف جریان با استفاده از OpenFoam بررسی کرده و حداکثر راندمان را، ۸۰ درصد گزارش کردند.

دلینگر و همکاران (۲۰۱۹) عملکرد توربین پیچ ارشمیدس را با استفاده از نرم‌افزار دینامیک سیالاتی Openfoam بررسی کردند و حداکثر راندمان ۸۷ درصد را گزارش کردند. نتایج آن‌ها نشان داد راندمان توربین پیچ ارشمیدس با تغییر هندسه پیچ ارشمیدس و تغییر رژیم جریان تغییر خواهد یافت و تحقیقات بیشتری بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس در شرایط مختلف موردنیاز است.

بامطالعه تحقیقات قبلی بر روی توربین پیچ ارشمیدس مشاهده می‌شود که تعداد تحقیقات انجام‌شده با استفاده از CFD محدود است. در عمده این تحقیقات نیز، اثر شرایط مختلف جریان و زاویه استقرار توربین بررسی شده است. برای دستیابی به راهنمای طراحی در مورد تعداد پره‌های موردنیاز در توربین پیچ ارشمیدس، نیاز به بررسی اثر تعداد پره‌ها بر روی عملکرد آن است. در نتیجه هدف از تحقیق حاضر، بررسی اثر تعداد پره‌های توربین پیچ ارشمیدس و سرعت‌های زاویه‌ای مختلف بر روی عملکرد آن است که برای اولین بار در سطح بین‌المللی انجام می‌شود. با توجه به هزینه‌های بالای تحقیقات آزمایشگاهی بر روی توربین پیچ ارشمیدس و نظر به توسعه روش‌های CFD و دقت بالای آن‌ها، اهمیت این مطالعه دوچندان است.

### مواد و روش‌ها

#### محاسبه توان مکانیکی و راندمان توربین

۲. Dellinger

۳. Reynolds-Averaged Navier-Stokes

۱. Computational Fluid Dynamic

ارائه و پارامترهای آن‌ها معرفی می‌شوند. معادله پیوستگی به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho k u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (۸)$$

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = \frac{R_{sor}}{\rho} \quad (۴)$$

که در آن  $u, v$  و  $w$  مؤلفه‌های سرعت در جهات  $x, y$  و  $z$ ؛  $A_x, A_y$  و  $A_z$  کسر مساحت جریان در جهات  $x, y$  و  $z$ ؛  $V_F$  کسر حجمی سیال؛  $\rho$  چگالی سیال و  $R_{sor}$  منبع جرم می‌باشد.

معادلات مومنتم<sup>۱</sup> در جهات  $x, y$  و  $z$  به ترتیب به صورت معادلات (۵) تا (۷) می‌باشند.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + Gx + fx \quad (۵)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Gy + fy \quad (۶)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Gz + fz \quad (۷)$$

که در آن  $G_x, G_y$  و  $G_z$  شتاب‌های بدنه و  $f_x, f_y$  و  $f_z$  مؤلفه‌های شتاب در نتیجه ویسکوزیته در جهات  $x, y$  و  $z$  می‌باشد.

در Flow3D، از مدل‌های آشفتگی مختلفی مانند طول اختلاط پراانتل<sup>۲</sup>، مدل‌های یک معادله‌ای، مانند  $k - \omega$  و  $k - \varepsilon$  و سه معادله‌ای LES استفاده می‌شود. در این تحقیق، از مدل  $k - \varepsilon$  استفاده شد که معادلات آن به صورت روابط (۸) و (۹) می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \varepsilon u) = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (۹)$$

که در آن  $G_b$  و  $G_k$  ترم‌های انرژی جنبشی آشفته مرتبط با شناوری و گرادیان‌های سرعت متوسط،  $G_{1\varepsilon} = 1.44$ ،  $G_{2\varepsilon} = 1.92$  و  $G_{3\varepsilon} = 0.09$ ، و  $\sigma_\varepsilon$  و  $\sigma_k$  اعداد اختلاط پراانتل برای  $\varepsilon$  و  $k$  و به ترتیب برابر با  $1/3$  و  $1$  می‌باشند.

برای حل این معادلات، از Flow3D از میدان حل با شبکه‌های با اندازه کوچک به نام مش<sup>۳</sup> استفاده کرده و معادلات حاکم بر سیال برای هر مش از شبکه را، با استفاده از روش حجم محدود گسسته‌سازی و حل می‌کند. جهت حل عددی، از حل گر ضمنی<sup>۴</sup> برای فشار، حل گر صریح<sup>۵</sup> برای تنش‌های ویسکوز و جسم متحرک (پیچ)، الگوی مرتبه اول برای انتقال مومنتم و کسر حجمی سیال (VOF<sup>۶</sup>) برای پیش‌بینی سطح سیال استفاده شد.

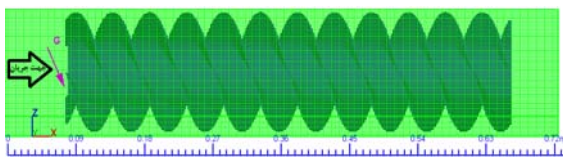
#### معرفی هندسه پیچ ارشمیدس

هسته مرکزی یک توربین پیچ ارشمیدس، بدنه پیچ ارشمیدس است که با افق زاویه‌ای می‌سازد که زاویه استقرار ( $B$ ) نام دارد. آبی که از کانال بالادست وارد پیچ ارشمیدس شده و در راستای محور پیچ به سمت کانال پائین‌دست حرکت می‌کند بین دو پره مجار گیر افتاده و واحدهای حجمی گسسته را تشکیل می‌دهد که باکت<sup>۷</sup> 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.

۵. Explicit  
۶. Volume of Fluid  
۷. Bucket

۱. Momentum  
۲. Prandtl  
۳. Mesh  
۴. Implicit

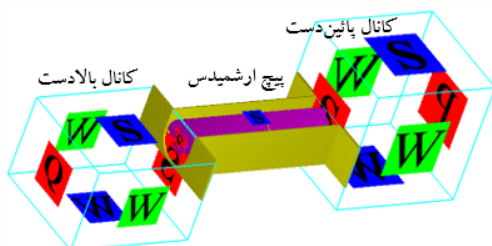
برای انجام مش‌بندی، تعداد سلول‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که در بخش نتایج و بحث در مورد آن بحث خواهد شد. در شکل (۲)، مش‌بندی نهایی (۲ میلیون مش) در نظر گرفته شده در این تحقیق ارائه شده است. لازم به توضیح است برای کاهش هزینه محاسباتی، عرض کانال بالادست و پائین‌دست برابر با اندازه ورودی پیچ ارشمیدس در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): مش‌بندی انجام شده بر روی پیچ ارشمیدس

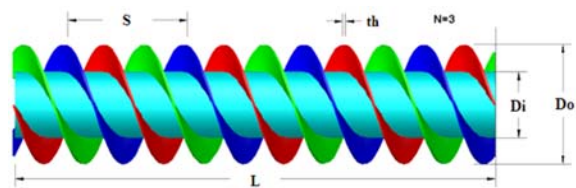
### تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه

شرایط مرزی تعریف شده در این تحقیق در شکل (۳) ارائه شده است که در آن شرایط مرزی کف و کناره‌های کانال به صورت دیوار (W)، شرایط مرزی سطح آب سیمتری<sup>۱</sup> (S) (شرایط بیرون شبکه حل دقیقاً مشابه شرایط روی مرز داخلی شبکه در نظر گرفته می‌شود مانند سطح مشترک بین آب و هوا. این نوع شرط مرزی، در شبیه‌سازی‌های متقارن و شبیه‌سازی سطح آزاد سیال استفاده می‌شود)، شرط مرزی ورودی به کانال بالادست به صورت دبی ثابت (Q) که توسط کاربر تعریف می‌شود و شرط مرزی خروجی از کانال پائین‌دست به صورت فشار یا ارتفاع (P) ثابت که متناسب با ارتفاع آب در پائین‌دست، تعریف می‌شود.



شکل (۳): شرایط مرزی استفاده شده جهت مدل‌سازی پیچ ارشمیدس در تحقیق حاضر

در شکل (۱)، اجزاء اصلی بدنه پیچ ارشمیدس که با استفاده از اتوکل طراحی شده است، نشان داده شده است که شامل قطر خارجی ( $Do$ )، قطر داخلی ( $Di$ )، گام پیچ ( $S$ )، طول پیچ ( $L$ )، ضخامت پره‌ها ( $th$ ) و تعداد پره‌ها ( $N$ ) (در شکل ارائه شده، تعداد پره‌ها برابر با ۳ است) است. مشخصات پیچ فوق‌الذکر در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): بدنه پیچ ارشمیدس طراحی شده (۳ پره)

جدول (۱): مشخصات پیچ ارشمیدس طراحی شده

پارامتر	نماد	واحد	مقدار
قطر داخلی	$Di$	cm	۸/۰۳
قطر خارجی	$Do$	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	$B$	°	۲۴/۹
ارتفاع آب در پائین‌دست	$H_{down}$	cm	متغیر
دبی	$Q$	$m^3.s^{-1}$	۱/۱۳
طول کانال بالادست	$L_{up}$	cm	۱۰۰
طول کانال پائین‌دست	$L_{down}$	cm	۱۰۰

### مش‌بندی پیچ ارشمیدس

یکی از مهم‌ترین بخش‌های حل عددی، تعیین اندازه شبکه‌های محاسباتی یا اندازه سلول‌ها در مش‌بندی است. تعداد سلول‌ها در یک مش بستگی به محدوده و اندازه تعیین شده دارد و بر دقت و زمان محاسبات تأثیرگذار می‌گذارد. در نتیجه، لازم است که مش‌بندی مناسبی اتخاذ گردد که هم جوابگوی دقت موردنیاز در محاسبات باشد و هم از نظر زمان انجام محاسبه در حد متعارفی باشد.

### نتایج و بحث

در این تحقیق، اعتبارسنجی مدل FLOW3D با استفاده از یک پیچ با ۳ پره انجام گرفت. پس از انطباق نتایج آزمایشگاهی با نتایج عددی برای پیچ ۳ پره، شبیه‌سازی عددی برای تعداد پره‌های برابر با ۲، ۳ و ۴ و برای سرعت‌های زاویه‌ای مختلف بررسی شد.

نتایج بررسی مش‌های مختلف نشان داد که حداقل تعداد مش باید به اندازه‌ای باشد که مرزهای صلب پیچ ارشمیدس به صورت کامل توسط ابزار FAVOR<sup>۱</sup> موجود در Flow3D شناسایی شود.

کمترین اندازه در توربین پیچ ارشمیدس فاصله بین لبه‌های پره‌ها و محفظه بیرونی و همچنین ضخامت پره‌ها است؛ زیرا با کاهش ضخامت پره‌ها، اندازه مش‌ها نیز باید کاهش یابد. با توجه به اینکه ضخامت پره‌ها در توربین‌های آبی بین ۳ تا ۵ میلی‌متر پیشنهاد شده است (درخشان و ریاسی، ۱۳۹۳)، در این تحقیق ضخامت حداقل یعنی ۳ میلی‌متر به منظور کاهش تعداد مش‌ها در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن دو نکته مهم فوق‌الذکر و برای پیدا کردن تعداد مش بهینه، از تعداد ۱۰۰ هزار مش شروع شد و با گام‌های ۱۰۰ هزار افزایش یافت. نتایج نشان داد برای مش‌های کمتر از ۱ میلیون، مرزهای صلب پیچ به طور کامل توسط مدل قابل شناسایی نبود؛ اما به تدریج با افزایش تعداد سلول‌ها، قابلیت شناسایی بیشتر می‌شد. برای نمونه، مرزهای جامد شناسایی شده برای پیچ ارشمیدس با تعداد ۸۰۰ هزار مش در شکل (۵-الف) و ۲ میلیون مش در شکل (۵-ب) ارائه شده است. توجه شود که برای وضوح بیشتر تصاویر بخشی از آن‌ها نشان داده شده است.

بررسی‌ها 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 مدنظر قرار گرفت. برای مش‌های ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ میلیون، خطای نسبی بین نتایج مدل‌سازی و نتایج آزمایشگاهی در جدول (۲) ارائه شده است.

شرایط اولیه شامل جریان ماندگار، ارتفاع آب در داخل کانال‌های بالادست و پائین‌دست است که برای کاهش هزینه محاسباتی، مقادیر اولیه استفاده شده در کار آزمایشگاهی، مورد استفاده قرار گرفت. جهت جلوگیری از آشفتگی‌های زیاد، سرعت پیچ ارشمیدس در ابتدا صفر لحاظ شد و به تدریج سرعت آن تا سرعت موردنظر افزایش یافت.

### شرط همگرایی مدل

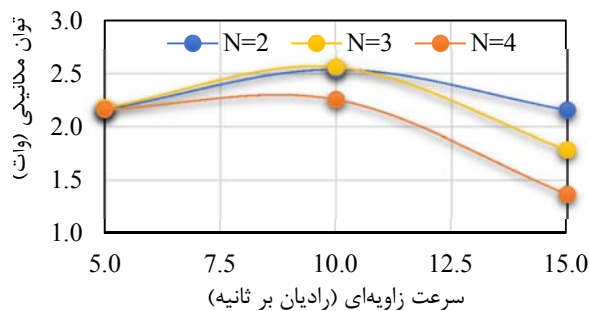
به منظور اطمینان از همگرایی مدل، باید معیار همگرایی در نظر گرفته شود. در صورتی که در دو گام زمانی متوالی، تغییر در سطح آب در حوضچه‌ها، تغییر در گشتاور و تغییر در دبی کمتر از ۰/۱ درصد و منطبق با نتایج آزمایشگاهی باشد، مدل همگرا شده است. در این شرایط، Flow3D نیز یک پیغامی مبنی بر همگرایی به کاربر نمایش می‌دهد.

### اعتبارسنجی مدل FLOW3D

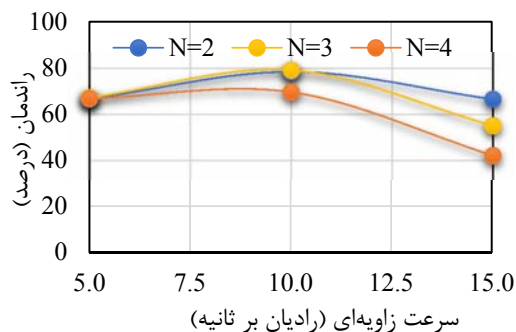
در این تحقیق، برای اعتبارسنجی مدل عددی از نتایج آزمایشگاهی لوبیتز و همکاران (۲۰۱۴) استفاده شد. لازم به ذکر است که در تحقیق فوق‌الذکر فقط یک پیچ سه پره استفاده شده است و بررسی اثر تعداد پره‌ها بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس در تحقیق آزمایشگاهی لوبیتز و همکاران (۲۰۱۴) انجام نشده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی در مرحله اعتبارسنجی در شکل (۴) ارائه شده است که نشانگر تطابق خوب نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی است. شاخص خطای نسبی برای مش انتخاب شده برابر با ۰/۴۱ درصد به دست آمد که با توجه به اینکه کمتر از ۱ درصد است کاملاً قابل قبول است (دلینگر و همکاران، ۲۰۱۸).



شکل (۴): مقایسه نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده توسط Lubitz et al. (2014) و نتایج عددی

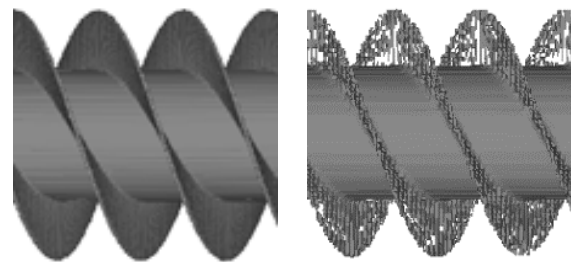


شکل ۶: توان مکانیکی محاسباتی برای پیچ‌های مختلف



شکل ۷: راندمان محاسباتی برای پیچ‌های مختلف

همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۷) مشاهده می‌شود با افزایش سرعت زاویه‌ای از ۵ رادیان بر ثانیه تا ۱۰ رادیان بر ثانیه (سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه، سرعت زاویه‌ای بهینه مذکور است زیرا بیشترین توان و راندمان در سرعت مذکور مشاهده شده است)، به علت عبور دبی بیشتر از داخل پیچ و سرریز کمتر آب، توان مکانیکی و راندمان افزایش یافته است. با افزایش سرعت زاویه‌ای (مقادیر بالاتر از ۱۰ رادیان بر ثانیه)، جریان بیشتری از داخل پیچ عبور کرده و عملاً مقدار حجمی باکت‌ها کاهش است که در نتیجه آن ارتفاع آب در داخل باکت‌ها و مقدار فشار کاهش خواهد یافت. همچنین، به علت افزایش سرعت زاویه‌ای، تلفات اصطکاکی نیز افزایش خواهد یافت؛ زیرا مطابق با کوزین و لوبیتز (۲۰۱۷)، تلفات اصطکاکی با توان سوم سرعت زاویه‌ای ارتباط دارد، در نتیجه در سرعت‌های زاویه‌ای بالاتر، تلفات توان به شدت افزایش خواهد یافت. با افزایش سرعت زاویه‌ای، با توجه به کاهش سطح آب در داخل پیچ و افزایش اصطکاک، توان مکانیکی و راندمان در پیچ کاهش می‌یابد.



الف) ۸۰۰ هزار مش (ب) مش بهینه (۲ میلیون مش)

شکل (۵): هندسه پیچ ارشمیدس شناسایی شده در Flow3D

برای مش‌های مختلف.

لازم به توضیح است که در عمده تحقیقات انجام شده، شاخص خطای نسبی کمتر از ۱ درصد به عنوان شاخص قابل قبول مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول (۲): مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج آزمایشگاهی توان

مکانیکی و مقدار خطای نسبی مدل‌سازی برای مش‌های مختلف

تعداد مش‌ها (میلیون)	آزمایشگاهی (W)	مدل‌سازی (W)	خطای نسبی (%)
۱	۲/۱۸۷	۱/۸۲	۱۶/۶
۱/۵	۲/۱۸۷	۲/۱۱	۳/۶
۲	۲/۱۸۷	۲/۱۷۸	۰/۴۱
۲/۵	۲/۱۸۷	۲/۱۸۳	۰/۱۷

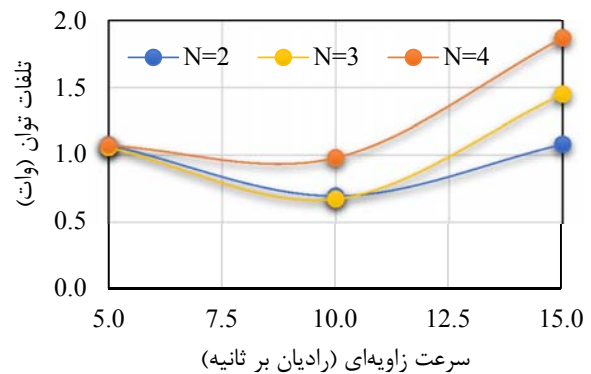
برای تعداد مش برابر با ۲ میلیون، خطای نسبی برابر با ۰/۴۱ درصد و برای ۲/۵ میلیون مش ۰/۱۷ درصد است که اختلاف چندانی ندارند. از این رو برای کاهش محاسبات تعداد مش برابر با ۲ میلیون، به عنوان تعداد مش بهینه انتخاب شد و در ادامه تمامی شبیه‌سازی‌های عددی با ۲ میلیون مش انجام شد. در شکل (۶) و (۷) توان مکانیکی تولید شده و راندمان برای سه پیچ با تعداد پره‌های برابر با ۲، ۳ و ۴ در سرعت‌های زاویه‌ای مختلف ارائه شده است. لازم به توضیح است که برای یک دبی ثابت که از داخل پیچ ارشمیدس عبور می‌کند اگر سرعت پیچ ارشمیدس پائین باشد، همانند مانعی در مقابل جریان عمل خواهد کرد و باعث می‌شود بخشی از جریان آب به صورت سرریز از روی بدنه پیچ ارشمیدس عبور کند و منجر به تلفات توان هیدرولیکی شود. هر چه سرعت زاویه‌ای بیشتر باشد، مقدار سرریز آب، کمتر خواهد بود.

آزمایشگاهی انجام شد. نتایج بررسی مش‌های مختلف از ۱۰۰ هزار مش تا ۲/۵ میلیون مش نشان داد که تعداد مش‌های بیشتر از ۲ میلیون مش، برای مدل‌سازی مناسب است. از این رو، ۲ میلیون مش به‌عنوان مش بهینه انتخاب شد. خطای محاسبات مربوط به ۲ میلیون مش برابر با ۰/۴۱ درصد است که قابل قبول 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 و در نتیجه تلفات اصطکاکی کمتری خواهد داشت. همچنین، عمر مفید توربین نیز در مقایسه با سایر توربین‌ها بیشتر است. پیچ ارشمیدس با ۳ پره، راندمان بالاتری را نسبت به پیچ ارشمیدس با ۲ و ۴ پره برای سرعت زاویه‌ای بهینه نشان داد. حداکثر راندمان به‌دست‌آمده برای پیچ ۳ پره برای سرعت زاویه‌ای ۱۰ رادیان بر ثانیه، برابر با ۷۹ درصد به دست آمد. باین‌حال، راندمان پیچ ۲ پره و ۳ پره تقریباً برابر بوده و از نقطه نظر ساخت، پیچ ۲ پره ارجح است. نتایج نشان داد که با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D می‌توان توربین پیچ ارشمیدس را با دقت بالایی مدل‌سازی کرد.

#### فهرست علائم

$D_i$	قطر شفت یا قطر داخلی
$D_o$	قطر پیچ یا قطر خارجی
$f$	بردار نیروی داخلی (نیروی وزن)
$g$	شتاب ثقل
$G_w$	عرض نشت
$H_{down}$	ارتفاع آب در پائین‌دست
$H_{up}$	ارتفاع آب در بالادست
$L$	طول پیچ
$L_{down}$	طول حوضچه پائین‌دست
$L_{up}$	طول حوضچه بالادست
$N$	تعداد پره
$p$	فشار
$Q$	دبی
$S$	طول یک گام پیچ
$t$	زمان
$th$	ضخامت پره
$u$	بردار سرعت



شکل (۸): تلفات توان برای پیچ‌های مختلف

مقدار تلفات توان نیز در شکل (۸) ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان مشاهده کرد که توان مکانیکی برای پیچ ۳ پره نسبت به ۴ پره بالاتر است زیرا با توجه به تعداد کمتر پره‌ها تلفات اصطکاکی در آن کمتر است. نتایج مشابهی در مورد تغییرات راندمان برای پیچ‌های ۳ پره و ۴ پره مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که تغییرات موردنظر در سرعت زاویه‌ای بهینه (۱۰ رادیان بر ثانیه) مورد توجه و تأکید بیشتری است چون سرعت کارکرد توربین خواهد بود.

راندمان پیچ ۲ پره و ۳ پره تقریباً برابر ۷۹ درصد است و توان مکانیکی آن‌ها نیز تقریباً برابر است؛ اما نکته‌ای که مهم است این است که در سرعت‌های زاویه‌ای کمتر از سرعت بهینه، توان مکانیکی و راندمان در هر دو پیچ ۲ پره و ۳ پره تقریباً برابر است اما در سرعت‌های بالاتر، توان مکانیکی و راندمان در پیچ ۲ پره به علت تلفات اصطکاکی کمتر، بیشتر است در نتیجه برای توربین‌های با دور متغیر، پیچ ۲ پره عملکرد بهتری خواهد داشت. همچنین، هزینه‌های ساخت پیچ ۲ پره نیز کمتر است از این رو پیچ با تعداد پره‌های کمتر در شرایط مشابه ارجحیت بیشتری دارد.

#### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی سه‌بعدی توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از نرم‌افزار FLOW3D انجام شد. هندسه سه‌بعدی پیچ ارشمیدس در محیط اتوکد سه‌بعدی ترسیم و سپس وارد نرم‌افزار FLOW3D شد. در نرم‌افزار مذکور، شرایط اولیه و مرزی تعریف و سپس اعتبارسنجی آن با استفاده از داده‌های



13. Rorres C. (2000) The turn of the screw: optimal design of an Archimedes screw. *Journal of Hydraulic Engineering* 126:72-80.
14. 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 Proceedings of the 13th international conference on environmental science and technology. Athens.
15. Stergiopoulou A., Kalkani E. (2015) TOWARDS A FIRST CFD STUDY OF MODERN HORIZONTAL AXIS ARCHIMEDEAN WATER CURRENT TURBINES.

### فهرست علائم یونانی

$\mu$  بردار تنش برشی  
 $\rho$  جرم مخصوص سیال

### مراجع

۱. درخشان، ش. و ریاسی، ع. (۱۳۹۳). توربین‌های آبی. انتشارات جهاد دانشگاهی. ۲۳۲ ص.
2. Dellinger, G., Garambois, P.A., Dellinger, N., Dufresne, M., Terfous, A., Vazquez, J., and Ghenaim, A. (2018). "Computational fluid dynamics modeling for the design of Archimedes Screw Generator." *Renewable Energy*, 118, 847-857.
3. Dellinger, G., Garambois, P., Dufresne, M., Terfous, A., Vazquez, J., and Ghenaim, A. (2016). "Numerical and experimental study of an Archimedean Screw Generator." *Proc., IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, 102002.
4. Dellinger, G., Simmons, S., Lubitz, W. D., Garambois, P.-A., and Dellinger, N. (2019). "Effect of slope and number of blades on Archimedes screw generator power output." *Renewable Energy*, 136, 896-908.
5. Kozyn A., Lubitz W.D. (2017) A power loss model for Archimedes screw generators. *Renewable Energy* 108:260-273.
6. Lashofer A., Hawle W., Pelikan B. (2012) State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine, meeting of Hydro.
7. Lisdiyanti, L., Hizhar, Y., and Yulistiyanto, B. (2012). "Effect Of Flow Discharge And Shaft Slope Of Archimides (Screw) Turbin On The Micro-Hydro Power Plant."
8. 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.
9. Müller G., Senior J. (2009) Simplified theory of Archimedean screws. *Journal of Hydraulic Research* 47:666-669.
10. Muysken J. (1932) Calculation of the Effectiveness of the Auger. *De Ingenieur*:77-91.
11. Nuernbergk D.M. (2017) Archimedes Screw in the Twenty-First Century, *Archimedes in the 21st Century*, Springer. pp. 113-124.
12. REN21. (2013). *Renewables 2013: Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.

## **Archimedes Screw Turbine Modeling using FLOW3D and Investigating Blade Number Effect on its Performance**

Kazem Shahverdi<sup>۲۹\*</sup>

### **Abstract**

Due to fossil fuel limitations, the application of small-scale renewable energies has been considered. Recently, the utilization of Archimedes screw turbines, as an emerging turbine, are being increased for converting the potential and kinetic energies of water to a mechanical one. In this research, the performance of Archimedes Screw Turbine (AST) was numerically, using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, considered in Flow3D to investigate the effect of different blade numbers and rotation speeds. The two equation  $k - \varepsilon$  model and Volume of Fluid (VOF) method were used to model turbulence and water surface, respectively. The provided model was validated using experimental results. The optimal mesh cells to meshing was determined afterwards. The validation results showed that the numerical model has a good agreement with experimental one, and a maximum efficiency of 79% was obtained. The results showed that among the investigated options, 2-bladed screw is economically and technically preferable compared to others.

### **Keywords:**

Archimedes Screw Turbine, Small Hydropower Plant, Numerical Modeling.

---

29. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.  
k.shahverdi@basu.ac.ir