



شبیه سازی سه بعدی توربین کروی لوسید و بررسی تاثیر پارامترهای مختلف پره ها بر عملکرد آن

بهنام دشتی محمود آبادی^۱، حمیدرضا زارعی^۲ و محمود پسندیده فرد^{۳*}

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

^۳ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۷/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶

چکیده

در پژوهش حاضر تحقیق بر روی توربین کروی لوسید از دسته توربین های جریان متقاطع انجام شده است. از شبیه سازی سه بعدی پایا جهت ارزیابی قدرت خروجی و عملکرد این نوع توربین در یک کانال با سرعت جریان کم استفاده شده است. از مدل آشفتگی k- ω SST جهت جریان آشفته اطراف توربین استفاده شده است. از نتایج تجربی باچانت و وزنیک گزارش شده برای توربین کروی لوسید، برای تایید صحت شبیه سازی ها استفاده شده است. اثر سه پارامتر موثر بر عملکرد توربین شامل تعداد، طول وتر و نوع مقطع پره ها در دامنه های از نسبت سرعت های نوک پره مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می دهد که افزایش طول وتر پره در نسبت سرعت های کمتر باعث افزایش ۱۵ درصدی ضریب توان توربین نسبت به نوع اصلی آن می شود؛ همچنین در توربین با سه پره بهترین نتایج به دست آمد که منجر به افزایش ضریب توان به اندازه ۱۲/۵ درصد شده است. نهایتا بدست آمد که استفاده از ایرفویل های نامتقارن تاثیر مثبتی روی عملکرد توربین دارد.

کلمات کلیدی: توربین کروی لوسید؛ ضریب توان؛ توربین آبی؛ تعداد پره؛ ابعاد پره.

Numerical Simulation of Lucid Spherical Turbine and Investigation of the Effect of Different Parameters of Blades on Its Performance

B. Dashti¹, H. Zarei², M. PasandidehFard^{3,*}

¹ M.Sc. Graduate, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

² M.Sc. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

³ Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University of Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper the research has been performed on the cross-axis flow Lucid spherical turbine. Three-dimensional steady numerical simulation is used to determine power output and performance of this kind of turbines for low velocities in a channel. The k- ω SST turbulence model is used to perform the turbulent steady flows around the turbine. Further, Bachant and Wosnik's experimental data reported for spherical Lucid turbine, is employed to confirm the simulations. The influence of three effective parameters of blades, including the chord length, the number of blades and the type of airfoil section on the turbine performance are investigated over a range of tip-speed-ratios. It was found that increasing the blade chord length in lower speed tip ratios cause to increase the power coefficient up to 15% compared to the original version. Also, for the turbine with three blades, the best results were obtained by which, the power coefficient increased by 12.5%. Finally, it is obtained that using asymmetric airfoil section for blades has a positive effect on the turbine performance.

Keywords: Lucid Spherical Turbine; Power Coefficient; Water Turbine; Number of Blades; Blade Dimensions.

۱- مقدمه

هزاران سال است که از نیروی جریان آب و باد برای انجام دادن کار استفاده شده است. ایرانیان در زمان هخامنشیان آسیاب بادی را توسعه دادند [۱]، در طی قرن نوزدهم قدرت جریان آب به عنوان یک منبع برای تولید انرژی الکتریکی مورد توجه قرار گرفت. در حال حاضر در مقیاس جهانی حدود یک چهارم انرژی الکتریکی تولیدی با استفاده از نیروی آب تامین می‌شود [۲]. در طول توسعه صنعت بادی، مفاهیم زیادی برای دستگاه‌های تولید کننده انرژی وابسته به حرکت خلق شد. تقریباً همه این دستگاه‌ها را می‌توان به دو نوع توربین طبقه بندی کرد: توربین‌های جریان محوری و توربین‌های جریان متقاطع، که نوع آن‌ها با جهت جریان سیال نسبت به محور چرخش توربین مشخص می‌شود [۱۱]. در توربین‌های جریان متقاطع، محور چرخش عمود بر جهت جریان است. در حالی که عملکرد توربین‌های جریان متقاطع به طور معمول کمتر از توربین‌های جریان محوری است، توربین‌های جریان متقاطع دارای مزایای خاصی هستند که ممکن است در کاربرد تولید انرژی از سیال آبی مورد توجه خاصی قرار بگیرند. امکان کار در آب‌های کم عمق، کانال‌های با عمق و عرض متفاوت و همچنین داشتن بیشترین سطح مقطع عمود بر جریان جهت تولید انرژی، توربین‌های جریان متقاطع را به یکی از مهم ترین دستگاه‌های تولید انرژی از سیال آبی تبدیل کرده است. شکل استوانه‌ای یا گروهی توربین جریان متقاطع باعث می‌شود، به راحتی در هر آرایشی قرار بگیرند و فضای محدود استفاده کنند. همچنین آسان بودن تعمیر و نگهداری و هزینه کم ساخت آن و حمل و نقل راحت تر این نوع توربین‌ها از جمله مزایای آن‌ها است.

یک روش محاسبه جریان که برای توربین‌های محور عمودی استفاده می‌شود، روش لوله جریان است. مدل لوله تک جریان توسط تمپلین^۱ [۴]، برای محاسبه عملکرد آیرودینامیکی توربین‌های محور متقاطع بادی با روتور منحنی ارائه شد. این مدل مبتنی بر رویکرد روتور یا دیسک است. یک سرعت ثابت در اطراف روتور که مستقیماً با نیروی پسا وارد بر توربین در ارتباط است و فرض می‌شود، سرعت در بالا دست و پایین دست روتور توربین برابر است. بر اساس تئوری گلواریت [۵]، سرعت در اطراف روتور توربین برابر میانگین

عددی سرعت آزاد جریان و سرعت جریان تحت تاثیر روتورهای توربین است. برادا^۲ [۶]، در سال ۱۹۹۹ به بررسی تجربی توربین‌های اسکروالکتریسیته^۳ برای محاسبه بیشترین ظرفیت جذب انرژی و ترسیم منحنی بازده توربین پرداخت. آندرس و همکاران [۷]، در تحقیقات خود اثر افزودن یک کانال بر عملکرد توربین را مورد بررسی قرار دادند. بکر [۸]، بصورت تئوری عملکرد یک ایرفویل با انحنای متوسط را با ایرفویل متقارن مقایسه کرد. بررسی او نشان داد که قسمت انحنا دار، نیروی مماسی (گشتاور) بزرگتری روی گستره وسیعی از زوایای حمله و نیز توان بیشتری در هر دور نسبت به ایرفویل متقارن تولید می‌کند.

شیموکاوا و همکاران [۹]، در سال ۲۰۱۲، اثر استفاده از یک ورودی باریک را در بالا دست یک توربین کلاسیک نوع داریوس بررسی کردند. داده‌های تجربی آنها نشان می‌دهد، هنگامی که یک ورودی باریک در بالادست توربین قرار گیرد، عملکرد هیدروتوربین بالاتر رفته و مشکلات مربوط به این نوع توربین تا حدودی رفع می‌شود. ماتر و همکاران [۱۰]، برخی از جنبه‌های مربوط به مدل سازی عددی Rans دو بعدی یک توربین دریایی جریان متقاطع داریوس را بررسی کردند. اولین ویژگی مورد بررسی مربوط به تاثیر تراکم شبکه در نزدیکی دیواره بر نتایج عددی بود. ویژگی دوم توانایی مدل سازی دو بعدی برای نشان دادن جریان واقعی سه بعدی توربین بود. مک ناگتون و همکاران [۱۱]، در یک بررسی عددی دو بعدی یک توربین محور عمودی، با تمرکز بر پیش-بینی دو مدل آشفتگی متفاوت پرداختند. آنها سه پیکربندی مختلف توربین با پره‌های با ضریب زبری ۱/۱ در عدد رینولدز مبتنی بر وتر 1.5×10^5 را بررسی کردند و نتایج را برای سه سرعت متفاوت نوک پره ارائه کردند.

پانگدونگا [۱۲]، یک توربین جزر و مدی جریان متقاطع داریوس با پره‌های هلالی شکل که از ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ با تعداد سه پره و زاویه تیغه ۱۲۰ درجه استفاده می‌کرد را مورد ارزیابی قرار دادند. این مدل در یک مخزن به ترتیب به طول، عرض و ارتفاع، ۴۵، ۱/۴۶ و ۳ متر آزمایش شد و چرخش و گشتاور توربین با دو نسبت سرعت مختلف بررسی شد.

^۲ brada^۳ Screwelectricity^۱ Templin.R.j

گردد و دو یا سه پره آیرودینامیکی به محور مرکزی متصل شده است. در دهه ۱۹۹۰ پروفیسور گرلوف^۳ طرحی از توربین پره مارپیچ با ابعاد کوچک جهت چرخش در سرعت‌های کم ارائه نمود. در این نوع توربین گشتاور تولیدی یکنواخت تر و مستقل از جریان است [۱۶].

توربین کروی لوسید یک نوع متداول از توربین‌های جریان متقاطع است که گشتاور را با استفاده از نیروی برآ تامین می‌کند. توربین کروی لوسید شامل پره‌هایی به شکل ایرفویل است که حول یک محور مرکزی می‌چرخند و محور چرخش آن عمود بر جهت جریان سیال آزاد است. به این ترتیب زاویه حمله ایرفویل پره‌های این توربین به طور دائم در حال تغییر است حتی برای یک جریان آزاد ثابت و یکنواخت.

۲-۱- هیدرودینامیک توربین

پارامترهای متعددی برای ارزیابی توربین‌های محور عمودی مورد استفاده قرار می‌گیرند.



شکل ۱- توربین محور عمودی جریان متقاطع گرلوف [۱۶]

باچانت و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۱۵، نیروی تراست دو نمونه توربین جریان متقاطع، توربین کروی لوسید و توربین کروی گرلوف با پره‌های منحنی شکل را با توجه به راندمان آگزژی توربین‌ها در جریان آزاد ارزیابی کردند و توربین‌ها با توجه به پارامترهای مختلف طراحی مقایسه شدند.

پریگ [۱۴]، در سال ۲۰۱۷ یافته‌های یک مطالعه تجربی در مورد بررسی تاثیر زبری سطح تیغه بر عملکرد یک توربین جزر و مدی محور عمودی را ارائه کرد. فرض بر این بود، زبری تیغه‌ها باعث به تاخیر افتادن جدایش و کاهش استال توربین می‌شود. این آزمایش در آزمایشگاه دانشگاه کاردیف انجام شده است. آنها توربین با روتورهای دارای تیغه‌های صاف و زبر را مورد بررسی قرار دادند. سه زبری سطح روتور مورد آزمایش قرار گرفته و نتیجه گرفته شده که در اعداد رینولدز بالا، سطح زبر پره کاهش عملکرد توربین را در پی دارد.

تجدیدی لنگرودی و همکاران [۱۵]، در سال ۲۰۲۰، تحقیقی در مورد گرفتن الکتروسیسته از جریان آب درون لوله، همراه با فشار آب مضاعف با استفاده از یک توربین کروی را ارائه کردند. پیکربندی توربین برای شرایط خاص طراحی شده و قابل پیاده شدن درکد نوشته شده بوده است. بهبود عملکرد بر اساس سه معیار ضریب توان، ضریب فشار و احتمال کاویتاسیون با استفاده از تحلیل عددی انجام شده است.

توربین کروی لوسید از جمله توربین‌های جدید در صنعت توربین آبی است که در سال ۲۰۱۱ در آمریکا ثبت اختراع شده است. در سطح جهانی این توربین به تازگی با تحقیقاتی همراه بوده است. در حقیقت نوآوری کار حاضر بررسی این توربین و انجام تغییراتی مانند تغییر در طول وتر پره‌ها، تعداد پره‌ها و استفاده از ایرفویل‌های نامتقارن و ارزیابی این تغییرات بر روی عملکرد توربین است.

۲- بررسی انواع توربین‌های محور عمودی

این توربین‌ها به دو دسته اصلی ساونیوس^۱ و داریوس^۲ تقسیم بندی می‌شوند. ساونیوس با نیروی پسا کار می‌کند. در توربین‌های داریوس از نیروی لیفت به جای پسا استفاده می‌-

^۱ Savonius

^۲ Darrieus

^۳ Gorlov

مرتبط به زاویه حمله بهینه پره است؛ همچنین افزایش سرعت نوک پره سبب تاخیر در واماندگی دینامیکی پره شده، هرچه سرعت نوک پره بیشتر می شود میزان دریافت انرژی از بالادست افزایش می یابد [۱۸].

فاکتورهای زیادی از جمله مشخصات هیدرودینامیکی پره، مانند شکل هندسی و زبری سطح بر عملکرد توربین های محور عمودی تاثیر گذارند؛ همچنین شدت آشفتگی جریان آزاد تاثیر به سزایی در بازده توربین دارد. بعلاوه خصوصیات هندسی روتور تاثیر مستقیم و بسزایی بر توان اتلافی ارتعاشات و نویز توربین می گذارد. عدد بدون بعدی که شکل هندسی توربین های محور عمودی بیشتر با آن بیان می شود، صلبیت توربین نام دارد و برابر است با [۱۹]:

$$\sigma = \frac{NC}{2\pi R} \quad (4)$$

که در آن N تعداد پره و C طول وتر آن است. صلبیت یکی از مهم ترین پارامترهای تاثیر گذار بر عملکرد توربین داریوس است. با افزایش طول وتر به جای کاهش شعاع توربین به منظور دستیابی به صلبیت بالاتر، رینولدز جریان نیز افزایش می یابد که در نتیجه آن زاویه واماندگی و همچنین نسبت ضریب برآ به پسا افزایش می یابد که سبب بهبود عملکرد توربین در هنگام راه اندازی می شود و همچنین سطح مقطع پره افزایش یافته که سبب افزایش نیروهای آیرودینامیکی در حالت توقف توربین می شود که باز هم سبب افزایش گشتاور راه اندازی می گردد [۲۰].

گشتاور توربین های محور عمودی نیز از رابطه (۵) به دست می آید:

$$T = (L\cos\alpha - D\sin\alpha) \quad (5)$$

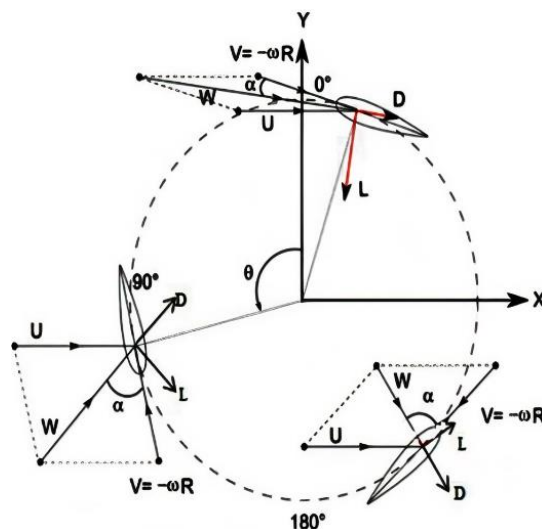
در رابطه بالا L و D به ترتیب نیروهای برآ و پسا هستند. در این صورت ضرایب بدون بعد گشتاور، برآ و پسا برابر خواهند بود با:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho S_{Ref} V^2 R} \quad (6)$$

و S_{Ref} برابر است با:

$$S_{Ref} = 2RH \quad (7)$$

که در آن H ارتفاع روتور توربین است. در معادله بالا ρ چگالی آب و همچنین S_{Ref} سطح مقطع جریان است که از روتور عبور می کند.



شکل ۲- دیاگرام آزاد حرکت نسبی توربین محور عمودی جریان متقاطع [۱۷]

با توجه به سرعت جریان آزاد U و سرعت مماسی پره V، سرعت نسبی برابر است با:

$$w = \sqrt{(V + U\cos\theta)^2 + (V\sin\theta)^2} \quad (1)$$

نیروی پسا در جهت مخالف سرعت نسبی و نیروی برآ عمود بر سرعت نسبی به پره وارد می شوند. نیروی برآ عامل اصلی تولید گشتاور پره ها حول محور مرکزی روتور است. فاکتور بسیار مهمی که خصوصیات توربین های محور عمودی بیشتر با آن سنجیده می شود نسبت سرعت مماسی پره به سرعت جریان آزاد آب است که نسبت سرعت نوک پره نام دارد.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (2)$$

که در آن λ نسبت سرعت نوک پره، R شعاع روتور و ω سرعت دورانی روتور بر حسب رادیان بر ثانیه است؛ همچنین زاویه بین خط وتر پره و سرعت نسبی، زاویه حمله را تشکیل می دهد.

$$\alpha = \text{Arctan}\left(\frac{\sin\theta}{\lambda + \cos\theta}\right) \quad (3)$$

زاویه چرخشی که حداکثر ضریب گشتاور در آن اتفاق می افتد با تغییر اندازه سرعت نوک پره تغییر می کند و هرچه سرعت نوک پره بیشتر گردد با گسترش دامنه موثر توربین، بیشینه گشتاور در زوایای چرخش بالاتر اتفاق می افتد. افزایش زاویه چرخش مربوط به بیشینه ضریب گشتاور

اسمبل^۴ فراخوانی و اجزای توربین به هم متصل می‌شود. (شکل ۳)، نمای سه بعدی این توربین را نشان می‌دهد. قطر توربین کروی ۱/۱۴ متر و ارتفاع آن ۰/۹۷ متر است.

۳-۱- روش حل عددی

برای شبیه سازی جریان توربین از نرم افزار انسیس فلونت ۱۸/۲ و روش قاب چرخان، برای چرخش روتور حول محور مرکزی استفاده شده است. در این روش معادلات ناویر استوکس را در دستگاهی حل می‌کنیم که به مش چسبیده و همراه با مش در حال چرخش است. مرزها ثابت هستند و محورهای مختصات حل چرخانده می‌شوند. به جای چرخاندن جسم، محور مختصات را در جهت عکس چرخش جسم می‌چرخانیم. برای مدل کردن جریان آشفته در اطراف روتور، مدل دو معادله‌ای SST $k-\omega$ به کار می‌رود. نویل [۲۱]، طی پژوهشی سه مدل آشفتگی مختلف را در شبیه سازی عددی یک توربین مورد ارزیابی قرار داد. طی بررسی انجام گرفته نشان داده شد، مدل SST $k-\omega$ در جریان‌های با فشار معکوس و جدا شده که به طور معمول در طی کار با هر توربین مشاهده می‌شود، رفتار بسیار بهتری نسبت به دو مدل

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A_c V^2} \quad (۸)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A_c V^2} \quad (۹)$$

که T گشتاور توربین، ρ دانسیته سیال و A_c مساحت سطح مقطع توربین است.

توان نامی توربین نیز برابر است با:

$$P = T\omega \quad (۱۰)$$

ضریب توان برابر است با:

$$C_P = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A_c V^3} \quad (۱۱)$$

که T گشتاور توربین، ρ دانسیته سیال و A_c مساحت سطح مقطع توربین است.

در نهایت رابطه بین ضرایب گشتاور، توان و ضریب سرعت نوک پره (λ) به صورت رابطه است [۱۹]:

$$C_P = \lambda C_T \quad (۱۲)$$

در این مطالعه حل عددی جریان سیال آشفته در اطراف روتورهای توربین لوسید به صورت پایا و سه بعدی انجام شده است.

۲-۲- معادله‌های اساسی جریان حرکت سیال

معادله‌های اساسی جریان حرکت سیال، معادله‌های پیوستگی و ناویر استوکس برای جریان سیال غیر قابل تراکم به همراه معادلات لازم برای مدل کردن آشفتگی جریان هستند. در مورد مدل آشفتگی بعداً توضیح داده می‌شود.

۳- هندسه و روش حل عددی

برای تولید مدل سه بعدی توربین از نرم افزار سالیدورک که یکی از توانمندترین نرم افزارها در تولید مدل سه بعدی است استفاده شده است. ابتدا مختصات پره توربین به صورت دو بعدی رسم می‌شود، سپس برای تولید مدل سه بعدی از روش جاروب^۱ استفاده می‌شود تا نمای سه بعدی پره ایجاد شود. برای قسمت هاب^۲ توربین بعد از تولید مختصات آن، از روش اکستروژن^۳ برای تولید مدل سه بعدی استفاده شده است. پس از تولید سه بعدی پره و هاب آن را به محیط



شکل ۳- نمای توربین کروی لوسید با طول وتر پره ۱۶ سانتی‌متری طراحی شده با ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ و تعداد ۴ پره، در نرم افزار سالیدورک

^۱ Sweep

^۲ Hub

^۳ Extrude

^۴ Assemble

معادلات حاکم بر جریان سیال از حل پایا، استفاده شده است. از نمودارهای ضریب برا و پسا و نمودارهای مقدار باقی مانده که در انتهای حل عددی یک خط سیر ثابت را طی می کنند، جهت مشخص کردن شرط همگرایی حل استفاده شده است. زمان محاسبات؟ در هر حل عددی به مدت ۱۲ ساعت بوده است.

۳-۱-۳- شرایط مرزی

پس از گسسته سازی معادلات حاکم به منظور حل معادلات شبیه سازی به دست آمده برای حل مدل مورد نظر شرایط مرزی لازم را اعمال می کنیم. برای حل بهتر مسئله دو ناحیه حل، یک ناحیه درونی که شامل توربین و یک ناحیه بیرونی که شامل کانال، دیوار و همچنین ورودی و خروجی جریان است، در نظر گرفته شده است. طول، عرض و ارتفاع کانال به ترتیب برابر ۱۰، ۳/۶۶ و ۲/۴۴ متر است و توربین در فاصله ۷ متری از شرط مرزی خروجی قرار دارد. در مرز ورودی از یک پروفیل ورودی سرعت یکنواخت استفاده شده است که در آن سرعت عمود بر صفحه روبرو است. در مرز خروجی از شرط مرزی جریان خروجی استفاده شده است. پایین و اطراف جریان شرط مرزی دیواره در نظر گرفته شده است. در مرز بالای کانال جریان از شرط مرزی تقارنی استفاده شده است (شکل ۴).

نرم افزار فلونت شار تمام پارامترهای جریان در مرز تقارن را صفر در نظر می گیرد. هیچگونه شار جابجایی در این مرز وجود نداشته و بنابراین مولفه های عمودی سرعت در مرز تقارن صفر است؛ همچنین هیچگونه شار انتشار در سطح تقارن وجود نداشته و گرادیان های نرمال تمام متغیرها در سطح تقارن، نیز صفر است. بطور کلی یک مرز تقارن از قوانین زیر پیروی می کند.

- مؤلفه عمودی سرعت در مرز تقارن صفر است.
- گرادیان های نرمال تمام متغیرها در مرز تقارن صفر است.

با توجه به موارد بالا، با تعریف مرز تقارن برای یک سطح، تمام شارها در آن سطح صفر است. از آنجائیکه، تنش برشی در سطح تقارن صفر است، می توان اینگونه تفسیر کرد که یک شرط مرزی تقارن، به نوعی شرط مرزی یک دیواره لغزان در یک جریان آشفته را ارضاء می کند. استفاده

آشفته دیگری دارد. همچنین این مدل آشفته گی توانایی شبیه سازی بهتر گردابه های ایجاد شده در مراحل مختلف شبیه سازی را دارد.

منتر [۲۲] مدل دو معادله ای $k - \omega$ SST را توسعه داد. مدل استاندارد $k - \omega$ به صورتی اصلاح شد که به مقادیر گردابه جریان آزاد حساس و پیش بینی جریان های جدایش یافته را بهبود بخشد. مبنای مدل $k - \omega$ SST بر پایه مدل $k - \omega$ است، اما در مواردی اصلاح شده است. این اصلاحات این امکان را می دهد تا هم زمان دو مدل $k - \omega$ و $k - \epsilon$ بکار گرفته شود. این مدل دو معادله ای ترکیبی، در نزدیکی دیواره کاملاً از مدل استاندارد $k - \omega$ استفاده کرده و در دور دست به مدل استاندارد $k - \epsilon$ تغییر می کند. این مدل ترکیبی، $k - \omega$ SST را برای طیف زیادی از جریان ها مناسب کرده است. بر مبنای این بهبودها مدل آشفته گی $k - \omega$ SST به روشی مناسب برای شبیه سازی سیالاتی هیدروتوربین های دریایی و توربین های بادی تبدیل شده است [۱۹].

۳-۱-۱- معادلات انتقال برای مدل $k - \omega$ SST

معادلات انتقال برای مدل $k - \omega$ SST به صورت زیر است:

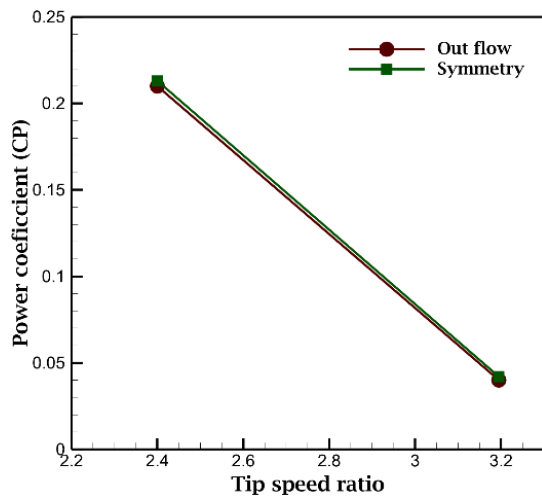
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_k - Y_k - S_k \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \bar{G}_\omega - Y_\omega - S_\omega \quad (15)$$

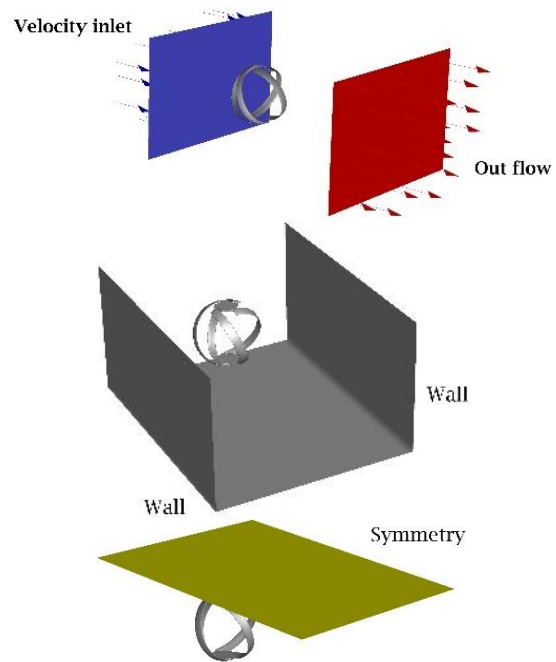
که در آن \bar{G}_k و \bar{G}_ω به ترتیب نشان دهنده تولید انرژی جنبشی آشفته گی و نیز تولید فرکانس آشفته گی ω هستند [۲۳]. ثوابت و جزئیات این مدل در مرجع [۲۳] به تفصیل آمده است.

۳-۱-۲- گسسته سازی معادلات حاکم بر سیال

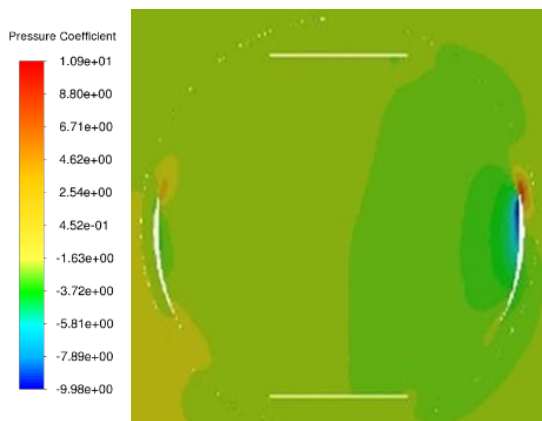
در این تحقیق حل معادلات به روش حجم محدود انجام شده است. در روش حجم محدود، میدان محاسباتی به حجم های کوچک تقسیم می شود، به طوری که تمام میدان محاسباتی پوشش داده شود. به عبارت دیگر اجتماع حجم ها با کل میدان برابر و اشتراک آن ها صفر است. برای کوپل میدان سرعت و فشار از روش سیمپل مرتبه بالاتر و برای حل



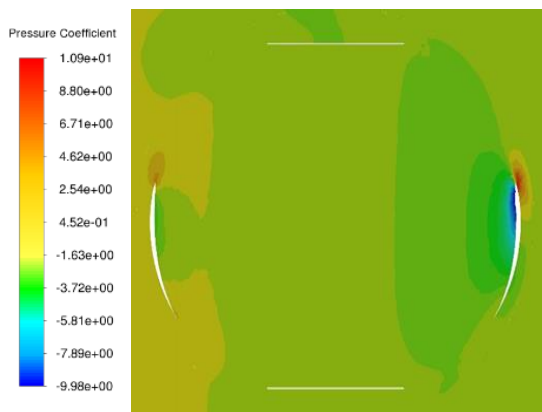
شکل ۵- نمودار مقایسه ضریب توان برای دو شرط مرزی تقارن و جریان خروجی در بالای کانال



شکل ۴- شرایط مرزی سرعت ورودی و جریان خروجی، شرط مرزی دیواره در پایین و اطراف جریان و شرط مرزی تقارن در بالای کانال جریان



(الف)

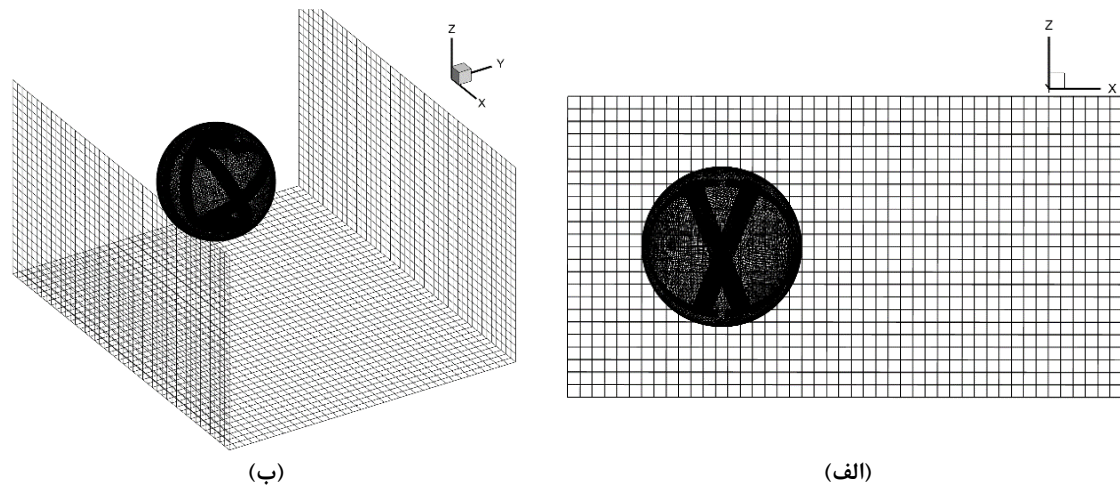


(ب)

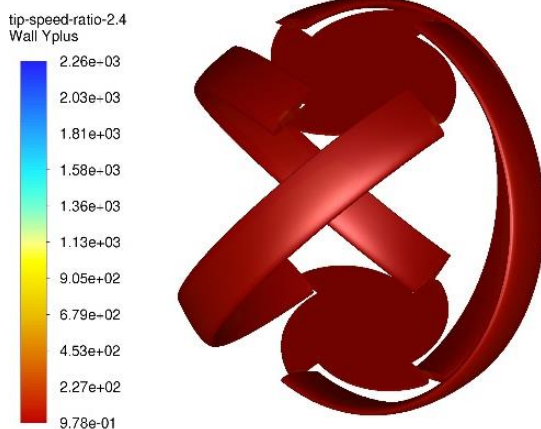
شکل ۶- مقایسه کانتورهای ضریب بی بعد فشار (الف) شرط مرزی تقارن و (ب) شرط مرزی جریان خروجی

از شرط مرزی تقارن، موجب کاهش زمان و حافظه مورد نیاز می‌شود. گرچه این شرط کاملاً دقیق نیست، ولی با توجه به هندسه جریان و فاصله در نظر گرفته شده برای مرز بالایی به واقعیت نزدیک است. به همین دلیل نتایج بدست آمده در مقایسه با مقادیر تجربی قابل قبول هستند. قابل ذکر است برای استفاده از این شرط مرزی چنانچه ارتفاع بیشتری برای کانال در نظر گرفته شود، به میزان کمی نتایج ارتقاء می‌یابد، ولی به علت سه بعدی بودن میدان از نظر زمان لازم جهت حل به صرفه نیست. بعلاوه با شرط مرزی جریان خروجی در سطح بالایی نیز مساله حل شده و نتایج حل با شرط مرزی تقارن مقایسه شده است. شکل ۵ ضریب توان را برای دو ضریب سرعت $2/4$ و $3/2$ نشان می‌دهد که بیانگر انطباق جوابها را دارد.

شکل ۶ مقایسه کانتورهای ضریب فشار را برای این دو شرط مرزی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب فشار روی دو پره چپ و راست برای این دو شرط مرزی در سطح بالایی کانال بسیار به هم نزدیک است.



شکل ۷- الف) نمای دو بعدی توربین گروی لوسید در نرم افزار گمبیت و ب) نمای سه بعدی توربین گروی لوسید و مش مورد استفاده در نرم افزار گمبیت



شکل ۸- کانتور مقدار λ^+ دیواره در نسبت سرعت $\lambda = 2.4$

۳-۱-۵- نتایج حل عددی

بعد از اعتبار آزمایشی و بررسی صحت انجام کار، با افزودن تغییراتی نظیر تغییرات در طول پره ها، تعداد پره ها و استفاده از ایرفویل های نامتقارن به بررسی عملکرد توربین پرداخته شده است و اثر هر یک، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۱-۶- بررسی ضریب پسا و ضریب توان تجربی و عددی

جهت اعتبار سنجی از پژوهش تجربی باچانت و وزنیک [۱۳]، استفاده شده است. آن ها به بررسی یک توربین گروی لوسید متعلق به شرکت تکنولوژی های انرژی لوسید، با طول وتر پره

۳-۱-۴- شبکه بندی مدل

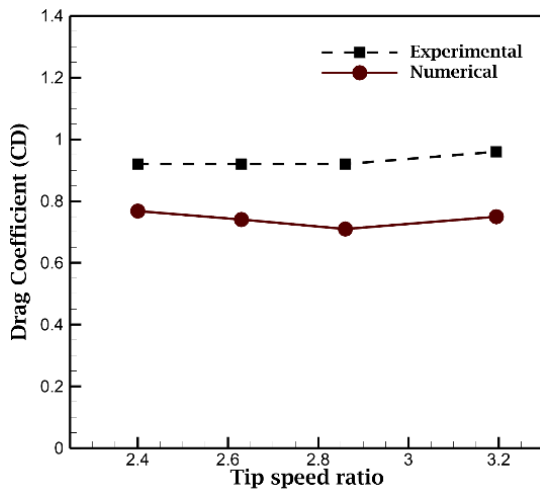
برای شبکه بندی مدل از نرم افزار گمبیت^۱ استفاده شده است (شکل ۷). استقلال از شبکه برای توربین مورد نظر در سه مرحله برای تعداد شبکه، ۱ میلیون، ۲ میلیون و ۴ میلیون سلول جهت سنجش ضریب پسا توربین انجام شده است. نتایج ارائه شده در جدول ۱ نشان می دهد، ضریب پسا برای شبکه بندی با مقدار ۲ میلیون سلول با نتایج شبکه با مقدار ۴ میلیون المان تفاوت کمی دارد، بنابراین برای صرفه جویی در زمان از شبکه ۲ میلیون سلولی برای حل مسئله استفاده شده است.

با توجه به مدل آشفتگی انتخابی، مقدار λ^+ دیواره در این حل عددی در تمام نقاط کمتر از یک است (شکل ۸).

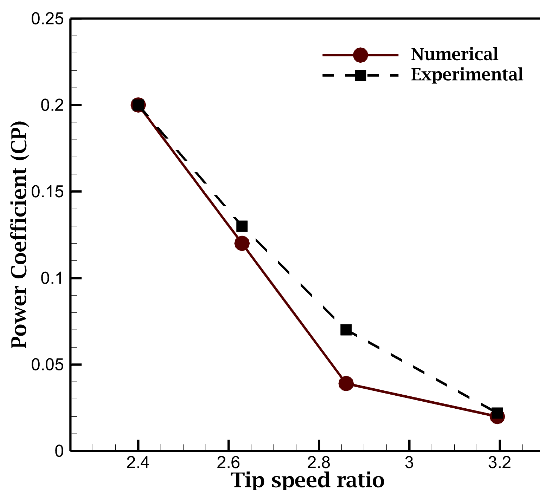
جدول ۱- استقلال از شبکه برای سنجش ضریب پسای توربین در المان های مختلف

تعداد سلول	ضریب درگ C_d
۱۰۰۰۰۰۰	۰/۸۱۷۵۶
۲۰۰۰۰۰۰	۰/۸۹۹۶۷
۴۰۰۰۰۰۰	۰/۹۰۳۷۸

^۱ Gambit



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- الف) ضریب پسا، و ب) ضریب توان به دست آمده از حل عددی در مقایسه با نتایج آزمایش تجربی وزنیک برای توربین کروی لوسید با چهار پره متقارن [۱۳]

از دبی‌های بیشتر از شرایط عملکرد بهینه توربین استفاده نمود که این امر منجر به تلف شدن بخشی از انرژی آب به دلیل راندمان پایین تر توربین می‌شود. برای پیدا کردن بهترین عملکرد توربین، آن را از سه جهت مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

- طول وتر پرها یا همان اندازه توربین
- تعداد پره‌های توربین
- نوع پره‌های توربین

۱۶ سانتی متر، مقطع پرهی ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ و تعداد چهار پره پرداخته‌اند (شکل ۹). در پژوهش تجربی وزنیک دو سری نمودار برای ضریب پسا و ضریب توان گزارش شده است، نمودارهای عادی که در شکل‌های ۶ و ۷ و نمودارهای ۹ و ۱۰ پژوهش وزنیک ارائه شده مربوط به حالت انسداد جریان است که در این پژوهش از نمودارهای عادی تحقیق تجربی وزنیک استفاده شده است.

برای انجام شبیه سازی عددی از عدد بی بعد نسبت سرعت، λ برای سرعت $1 \frac{m}{s}$ استفاده شده است. شکل ۱۰-الف) ضریب پسا و شکل ۱۰-ب) ضریب توان عددی بدست آمده را در مقایسه با نتایج تجربی نشان می‌دهند. با توجه به نمودارهای به دست آمده مشاهده می‌شود، ضریب پسا در حل عددی حداکثر دارای ۲۳ درصد خطاست، درحالی‌که ضریب توان بجز یک نقطه در بقیه نقاط بسیار به مقادیر تجربی نزدیک است.

۴- نتایج

در این بخش به ارزیابی نتایج به دست آمده از حل سه بعدی توربین کروی لوسید می‌پردازیم.

۴-۱- نتایج حل عددی

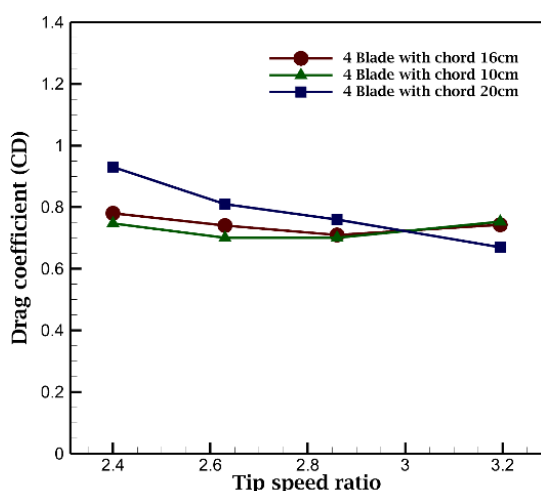
در توربین‌های عمودی می‌توان با تغییر زاویه پره، شرایط دستیابی به بهترین راندمان را در یک دبی مشخص به دست آورد. در اغلب موارد برای دستیابی به الکتریسیته بیشتر باید



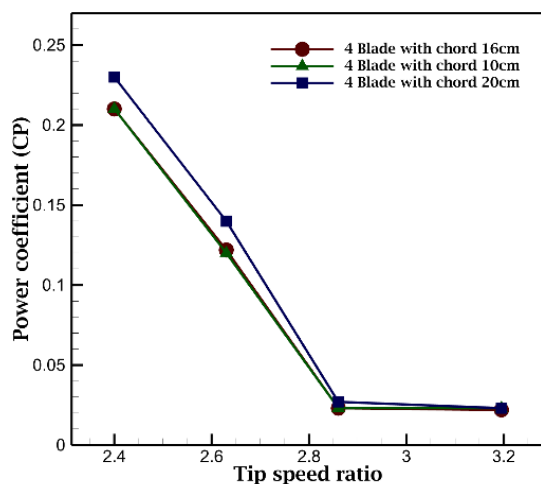
شکل ۹- مدل هندسی توربین کروی لوسید با ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ و تعداد چهار پره متقارن مورد استفاده در آزمایش تجربی باچانت و وزنیک [۱۳]

نمودارهای ضریب پسا و ضریب توان (شکل ۱۲)، نشان می دهد که در نسبت سرعت های کم، افزایش طول وتر پره باعث افزایش ۱۵ درصدی ضریب توان می شود.

کانتورهای ضریب فشار و سرعت برای توربین با طول وتر ۱۰ سانتی متر و با طول وتر ۲۰ سانتی متر در شکل های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده اند. کانتورهای ضریب فشار برای توربین با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر در نسبت سرعت های متفاوت تقریباً یک شکل ثابت را دنبال می کند، اما برای توربین با طول وتر پره ۲۰ سانتی متر تغییرات زیادی در



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ - الف) مقدار ضریب پسا، و ب) ضریب توان برای توربین با طول وتر پره های ۱۰ و ۲۰ سانتی متری در مقایسه با توربین با طول وتر پره های ۱۶ سانتی متر

۴-۱-۱- تغییر طول وتر پره های توربین

یکی از حالت های مورد بررسی در این پژوهش تأثیر افزایش طول وتر پره ها است. با توجه به اینکه در آزمایش تجربی وزنیک از ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ با طول وتر ۱۶ سانتی متر استفاده شده است، در تحقیق حاضر از ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ با دو طول وتر پره ۱۰ و ۲۰ سانتی متر (شکل ۱۱) استفاده شد.

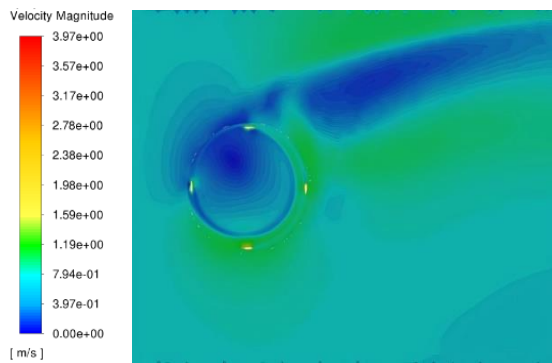


(الف)

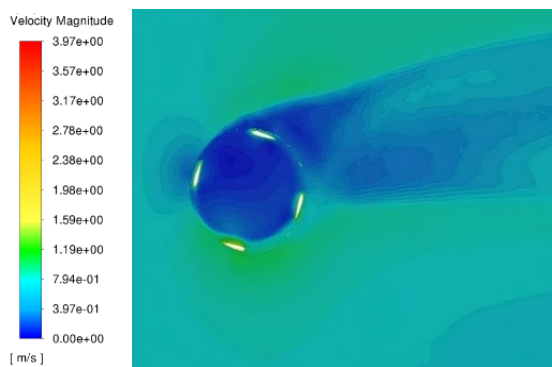


(ب)

شکل ۱۱- الف) توربین گروی لوسید با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر و ب) توربین گروی لوسید با طول وتر پره ۲۰ سانتی متر



(الف)

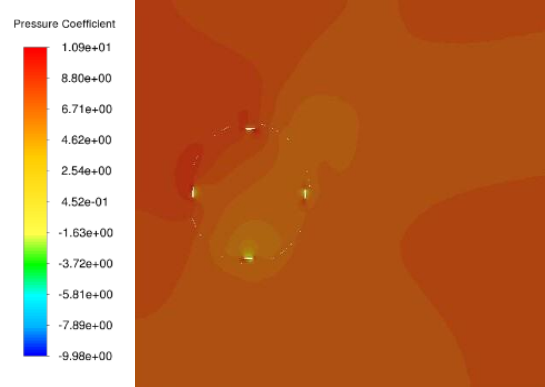


(ب)

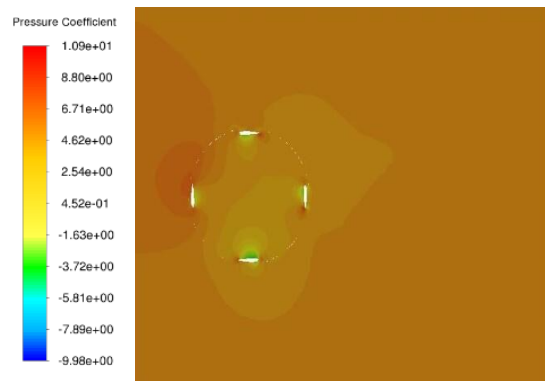
شکل ۱۴- الف) کانتورهای سرعت در نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 2.4$ برای توربین با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر و ب) با طول وتر پره ۲۰ سانتی متر

همچنین نمودار همین مورد نشان می‌دهد، افزایش نسبت سرعت نوک پره در توربین با طول وتر ۲۰ سانتی متری کاهش ضریب پسا را به همراه خواهد داشت (شکل ۱۲). با توجه به کانتورهای شدت آشفتگی (شکل ۱۵) مشاهده می‌شود که شدت آشفتگی در ناحیه پشت توربین با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر بیشتر از سایر موارد است. به همین دلیل این آشفتگی تولید شده باعث می‌شود، ضریب توان در توربین با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر در مقایسه با حالات دیگر کمتر باشد. در نسبت سرعت‌های کم برای توربین با طول وتر پره ۲۰ سانتی متر، شدت آشفتگی کمتر است و لذا ضریب توان افزایش پیدا می‌کند.

با افزایش نسبت سرعت نوک پره، شدت آشفتگی انرژی جنبشی، در توربین با طول وتر پره ۲۰ سانتی متری، بیشتر از توربین با طول وتر پره ۱۰ سانتی متری است، که این شرایط



(الف)

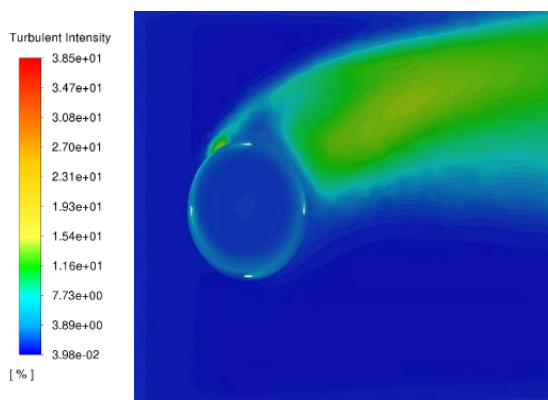


(ب)

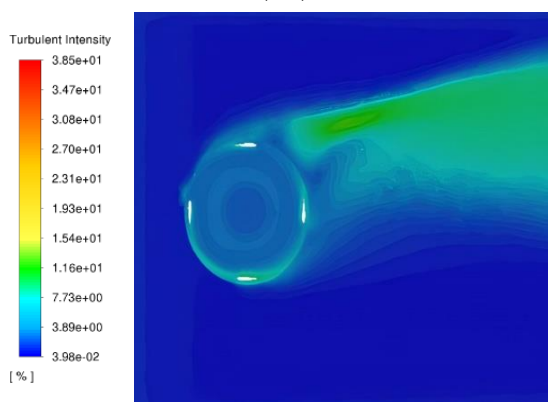
شکل ۱۳- کانتور ضریب بدون بعد فشار در نسبت سرعت $3/2$ برای: الف) توربین با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر و ب) طول وتر پره ۲۰ سانتی متری

شکل کانتور ضریب فشار مشاهده می‌شود که همین تغییرات خود را در ضریب پسا نیز نشان داده است؛ به خصوص در نسبت سرعت $3/2$ که کاهش ضریب فشار در شبکه مشهود است (شکل ۱۳).

شکل ۱۴ نشان می‌دهد، با افزایش سرعت نوک پره‌ها، ناحیه کم سرعت تر داخل توربین بزرگتر شده است. در ناحیه پشت توربین با طول وتر ۲۰ سانتی متر سرعت بسیار کمتر بوده و ناحیه آبی رنگ بیشتری به چشم می‌خورد که می‌توان دریافت که سطح روبروی جریان برای حالت توربین با طول وتر پره ۲۰ سانتی متری انرژی بیشتری از جریان دریافت خواهد کرد، بنابراین ضریب پسا و ضریب توان در توربین با طول وتر پره‌های ۲۰ سانتی متری بیشتر خواهد بود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵- کانتورهای شدت آشفتگی برای توربین در نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 2.4$ (الف) با طول وتر پره ۱۰ سانتی متر و (ب) با طول وتر پره ۲۰ سانتی متر

امر باعث افزایش ضریب توان نسبت به حالت چهار پره در نسبت سرعت‌های کم شده است. ضریب توان برای توربین با تعداد ۵ پره کمتر از حالت توربین با تعداد ۴ پره است (شکل ۱۷).

در توربین با تعداد ۲ پره، ضریب توان با افزایش سرعت نوک پره کاهش پیدا کرده که این امر افزایش ضریب پسا را نیز به همراه داشته است. با مقایسه ضریب توان در توربین های با تعداد ۲، ۳ و ۵ پره مشاهده شد، با افزایش نسبت سرعت برای توربین ۳ پره مقدار ضریب توان کمتر شده است، اما نسبت به حالات دیگر مقادیر بالاتری دارد. در توربین با تعداد ۲ پره با افزایش نسبت سرعت ضریب پسا افزایش داشته است؛ همچنین در توربین با تعداد ۵ پره مقدار ضریب پسا یک خط سیر ثابت را طی می‌کند و بیشتر از ضریب

باعث ایجاد جریانات ناهمسو و ایجاد اغتشاش در اطراف پره‌ها و در نتیجه افزایش ضریب پسا شده است. با افزایش نسبت سرعت نوک پره‌ها، جریان برگشتی و همچنین آشفتگی جریان ایجاد شده افزایش می‌یابد که این موضوع در نسبت سرعت $3/2$ برای توربین با طول وتر پره ۲۰ سانتی متر بیشتر مشاهده می‌شود. در مجموع در این حالت افزایش ضریب پسا و ضریب توان در نسبت سرعت‌های کمتر از $3/2$ با افزایش طول کورد مشاهده شد. شاید بتوان افزایش سطح مقطع برخورد جریان به پره‌ها را در حالت طول وتر ۲۰ سانتی متر مفید دانست و افزایش توان نتیجه همین افزایش سطح مقطع است.

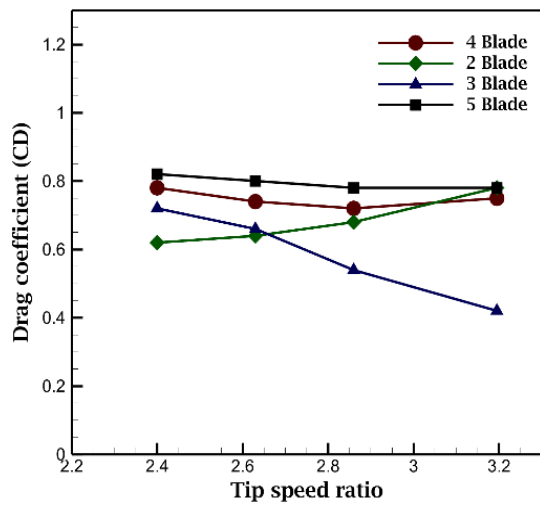
برخورد و در نتیجه دریافت نیروی چرخشی بیشتر باشد، هرچند که افزایش ضریب پسا در کاهش هد جریان تأثیر گذار است.

۴-۱-۲- تغییر تعداد پره‌های توربین

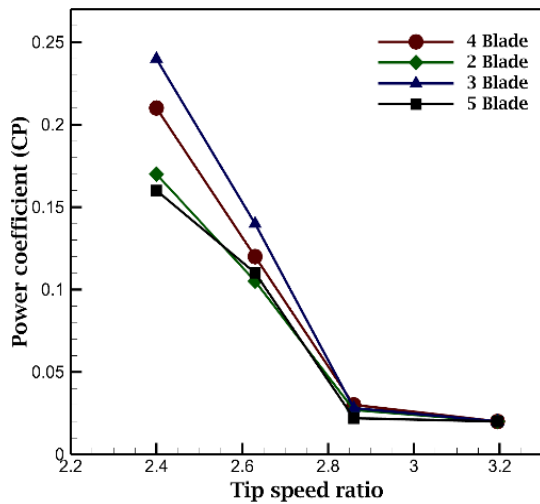
تغییر تعداد پره‌ها تأثیر زیادی بر عملکرد توربین دارد. این تحقیق به بررسی توربین با تعداد ۲، ۳ و ۵ پره می‌پردازد (شکل ۱۶) و نتایج آن با توربین ۴ پره تجربی مقایسه می‌شود.

در شکل ۱۷-الف برای توربین با تعداد دو پره مشاهده می‌شود که ضریب پسا کاهش می‌یابد که با توجه به کاهش تعداد پره‌ها و کاهش مساحت روبروی جریان این موضوع واضح است. هر چند مقدار ضریب پسا با افزایش سرعت نسبی و در نسبت سرعت $3/2$ افزایش می‌یابد و بیشتر از حالت توربین با چهار پره می‌شود، برای توربین با تعداد سه پره مشاهده می‌شود، ضریب پسا در تمام نسبت سرعت‌ها کمتر از حالت اصلی، (توربین با تعداد ۴ پره) است و این مقدار با افزایش نسبی سرعت روندی کاهشی داشته است. در این حالت ضریب پسا به اندازه حداکثر ۴۰٪ کاهش داشته است، و نسبت به حالت ۴ پره اختلاف پیدا کرده است؛ همچنین برای توربین با تعداد ۵ پره مشاهده می‌شود، مقدار ضریب پسا بیشتر از حالت اصلی بوده و دارای روند ثابتی است (شکل ۱۷).

ضریب توان برای توربین با تعداد ۲ پره کمتر از حالت اصلی (توربین با تعداد ۴ پره) شده است، اما برای توربین با تعداد سه پره با کاهش تعداد پره‌ها مشاهده می‌شود که این



(الف)



(ب)

شکل ۱۷- الف) ضریب پسا و ب) ضریب توان برای توربین با تعداد ۲، ۳ و ۵ پره در مقایسه با توربین با تعداد ۴ پره

پسای توربین نوع اصلی است. مقادیر ضریب توان در این حالت کمترین مقادیر را نسبت به سایر حالات دارد. میزان آشفته‌گی در پشت توربین با تعداد ۲ پره بیشتر از دو توربین دیگر است که باعث کاهش عملکرد توربین می‌شود و تأثیر منفی بر ضریب توان توربین دارد (شکل ۱۸).

برای توربین با تعداد ۳ پره در ناحیه داخلی توربین، آشفته‌گی کمتر از دو توربین دیگر است و با افزایش نسبت سرعت، ناحیه آشفته‌گی در قسمت پشتی توربین یک مقدار را نشان می‌دهد و مهم تر این که این آشفته‌گی به ناحیه بالایی توربین سرایت نکرده است، بر خلاف دو توربین با تعداد ۲ و



(الف)

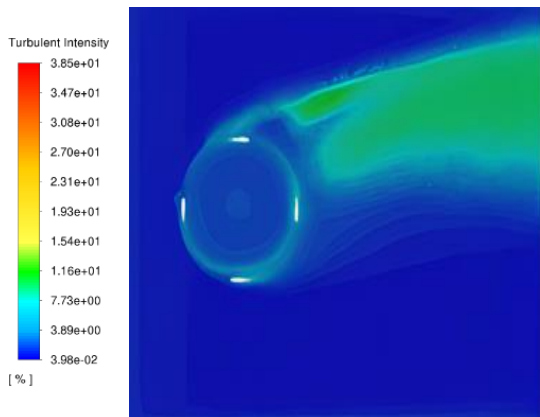


(ب)

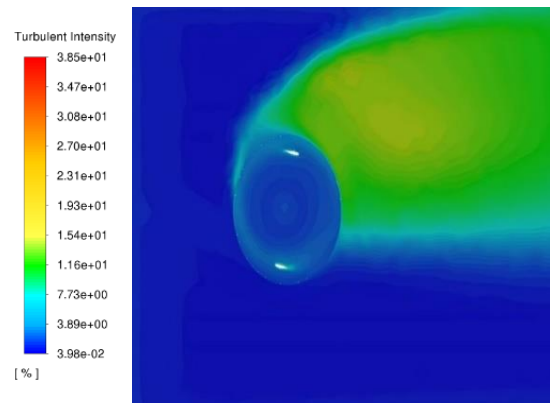


(ج)

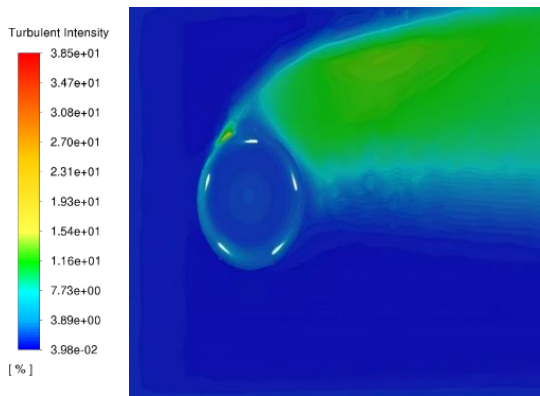
شکل ۱۶- الف) نمای توربین کروی لوسید با تعداد ۲ پره، ب) نمای توربین کروی لوسید با تعداد ۳ پره و ج) نمای توربین کروی لوسید با تعداد ۵ پره



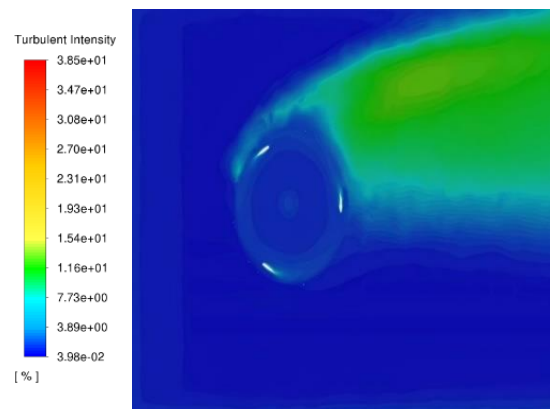
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱۹- کانتورهای شدت آشفتگی در توربین الف) با تعداد ۴ پره و ب) با تعداد ۵ پره، در نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 3.2$

شکل ۱۸- کانتور شدت آشفتگی در توربین الف) با تعداد ۲ پره و ب) با تعداد ۳ پره، در نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 3.2$

۴-۱-۳- تغییر نوع پره

در تحقیق تجربی باچانت و وزنیک [۱۳]، از ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ استفاده شده است. در این قسمت به بررسی تأثیر یک ایرفویل نامتقارن بر میزان بازدهی توربین پرداخته می‌شود. برای این منظور از ایرفویل Eppler 818 استفاده شده است. این دو مقطع ایرفویل جهت مقایسه در شکل ۲۰ ارائه شده است.

شکل ۲۱ نشان می‌دهد، در سرعت‌های کم برای توربین با پره‌های نامتقارن ضریب توان به مقدار ۰.۳٪ بیشتر از توربین با تعداد چهار پره متقارن است که دلیل آن شکل خاص پره-های هیدروفویل^۱ است؛ همچنین ضریب پسا با افزایش نسبت سرعت‌های نوک پره افزایش داشته است. ضریب توان توربین

۵ پره که آشفتگی با افزایش نسبت سرعت به ناحیه بالایی توربین رسیده و تأثیر منفی بر عملکرد توربین داشته است (شکل ۱۹). انرژی تلف شده جنبشی در حالت توربین با تعداد ۳ پره کمتر از دو حالت دیگر است. ضریب توان در نسبت سرعت‌های کم نوک پره در این حالت ۱۲/۵٪ بیشتر از نوع اصلی توربین است که دلیل آن شکل خاص قرارگیری توربین در جهت جریان است. این نوع شکل قرارگیری باعث افزایش دریافت نیروی برآ و کاهش نیروی پسا می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده آشفتگی جریان یکی از مهم‌ترین دلایلی است که باعث کاهش ضریب توان در توربین با تعداد ۲ و ۵ پره شده است.

^۱ Hydrofoil

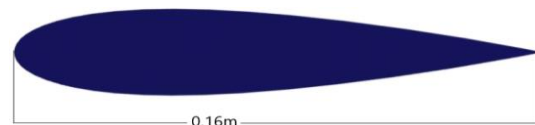
با ۴ پره نامتقارن برای ضریب سرعت‌های پایین بیشتر از توربین با ۴ پره متقارن است، اما با افزایش نسبت سرعت این مقدار کاهش یافته و در نسبت سرعت ۳/۲ این مقدار کمتر از توربین با ۴ پره متقارن است. با افزایش نسبت سرعت و با مقایسه نتایج به دست آمده از حل توربین با ۴ پره نامتقارن و توربین با ۴ پره متقارن مشاهده شد، اختلاف ضریب پسا در نسبت سرعت‌های کم حداکثر ۲۰٪ است. با افزایش نسبت سرعت این مقدار به حداکثر ۱۰٪ رسیده است.

همچنین شکل ۲۲ کانتورهای سرعت را برای مقطع نامتقارن پرها در نسبت سرعت‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت سرعت نوک پرها، نواحی دارای سرعت بالا بیشتر و نواحی دارای سرعت کم کوچکتر می‌شود.

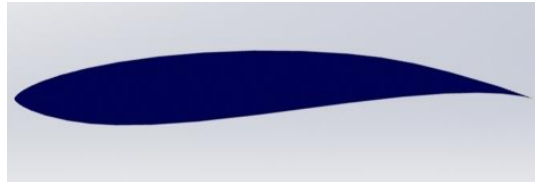
۵- جمع بندی

آنچه مشخص است، توربین کروی لوسید می‌تواند در آینده نقش مهمی در تولید انرژی تجدیدپذیر داشته باشد. این پژوهش در تولید انرژی الکتریسیته از لوله‌های انتقال آب از مخازن و سدها به نقاط شهری و همچنین در تولید انرژی از خطوط انتقال آب درون شهری و کانال‌های رودخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و توانایی شگرفی در تولید انرژی پاک در آینده خواهد داشت. در این تحقیق سعی بر این بود تا با مشخصات مختلف این توربین آشنایی بیشتری حاصل شود.

در نتایج به دست آمده می‌توان این موضوع را برداشت کرد که افزایش طول وتر پره توربین در نسبت سرعت‌های کم باعث افزایش ۱۵ درصدی ضریب توان می‌شود؛ همچنین در بررسی نتایج تغییر تعداد پرها، این نتیجه به دست آمد که افزایش تعداد پرها در نسبت سرعت‌های کم می‌تواند باعث بهبود عملکرد توربین شود، ولی در نسبت سرعت‌های بالا نمی‌تواند تاثیر مثبتی داشته باشد و باعث انسداد بیشتر جریان خواهد شد؛ همچنین از نتایج به دست آمده از کاهش تعداد پرها، در توربین با تعداد ۳ پره نتایج بسیار مثبت بود و ضریب توان در این حالت، ۱۲/۵ درصد نسبت به توربین اصلی افزایش پیدا کرد. عملکرد توربین در این حالت بسیار بهتر از عملکرد توربین با تعداد ۴ پره بود. همچنین عملکرد توربین با پره نامتقارن Eppler 818 باعث افزایش ۳ درصدی ضریب توان نسبت به حالت اصلی شد. در

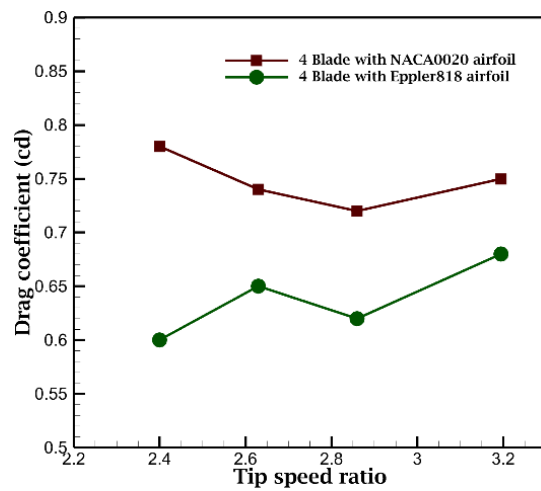


(الف)

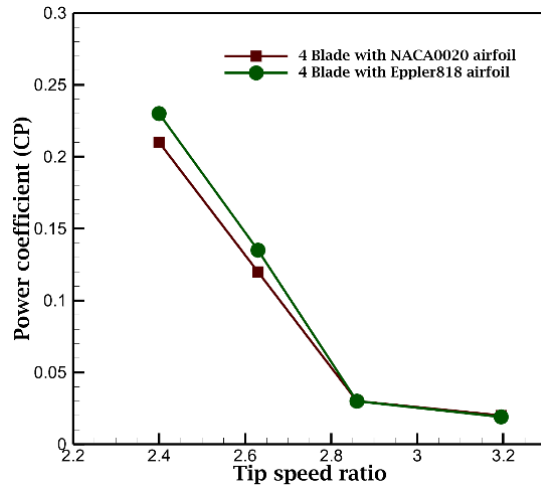


(ب)

شکل ۲۰- مقایسه الف) نمای ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ و ب) نمای ایرفویل Eppler 818



(الف)



(ب)

شکل ۲۱- الف) ضریب پسا و ب) ضریب توان برای توربین با ۴ پره با مقطع متقارن و نامتقارن

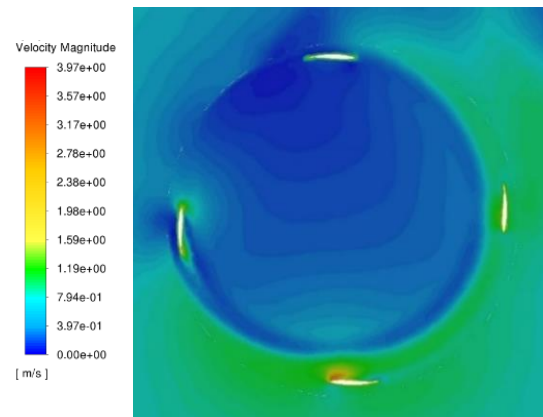
ادامه می توان اثر استفاده از پره های نامتقارن روی این نوع توربین را مورد بررسی بیشتر قرار داد.

۶- فهرست علائم

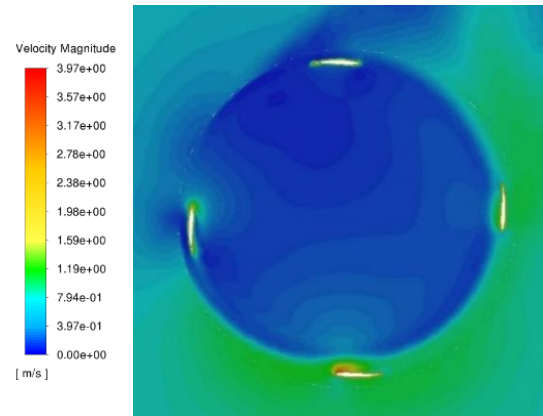
طول وتر توربین	C
نیروی پسا	D
نیروی برآ	L
تعداد پره توربین	N
توان نامی توربین	P
شعاع روتور	R
گشتاور توربین	T
سرعت جریان آزاد ، m/s	u
سرعت مماسی پره	V
علائم یونانی	
دانسیته	ρ
عدد پی	π
لزجت	μ
نسبت سرعت نوک پره	λ
سرعت زاویه ای پره ها	ω
صلبیت توربین	σ

۷- مراجع

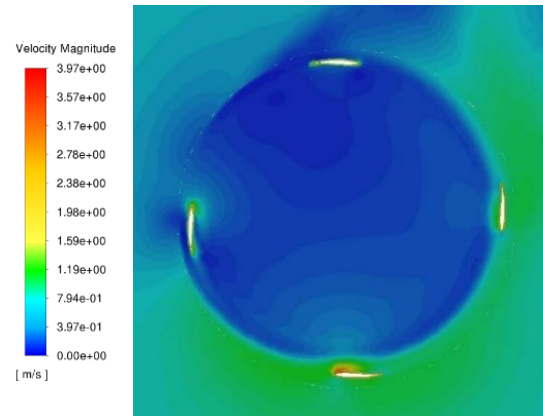
- [1] Mazharul-Islam D, Ting SK, Fartaj A (2007) Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. Department of Mechanical, Automotive and Materials Engineering, University of Windsor, Windsor, Ont., Canada N9B 3P4.
- [2] Guliver JS (1991) Hydropower engineerin handbook roger e. a.arndt mc graw-hil inc.
- [3] Antheaume S, Maitre T, Achard J (2008) Hydraulic darrieus turbines efficiency for free fluid flow conditions versus power farms conditions. Renewable Energy 33(10): 2186..
- [4] Templin RJ (1974) Aerodynamic performance for NRC vertical axis wind turbine. NAE report LTR-LA-160 June.
- [5] Glauert H (1948) The elements of airfoil and airscrew theory. 2nd edn. Cambridge University Press.
- [6] Brada K (1999) Wasserkraftschnecke ermöglicht Stromerzeugung über Kleinkraftwerke [Hydraulic screw generates electricity from micro hydropower stations]. Maschinenmarkt Würzburg, Mitteilung 14: 52-56.
- [7] Anders G, Olov Å (2013) Simulations of a vertical axis turbine in a channel. Uppsala University, Ångström Laboratory, Division of Electricity, Box 534, 751 21 Uppsala, Sweden.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۲۲- کانتورهای سرعت برای مقطع نامتقارن پره ها در (الف) نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 2.4$ (ب) نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 2.6$ (ج) نسبت سرعت بدون بعد $\lambda = 3.2$

- turbine for in-pipe hydro energy harvesting applications. *Energy Convers Manag* 203: 11223.
- [16] Gorlov AM (2014) Unidirectional helical reaction turbine operable under reversible fluid flow for power systems. Google Patents.
- [17] Council WWE (2002) Renewable energy sources: Opportunities and constraints 1990-2020. World Energy Council, London
- [۱۸] ساغریچی ا، مغربی م ج، عرب گلارچه ع (۱۳۹۵) بررسی جریان و ضریب گشتاور توربین بادی داریوس بر حسب تغییرات زاویه گام و نسبت سرعت نوک پره. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۱۹۱-۱۷۳: ۶(۴).
- [19] Paraschivoiu I (2002) Wind turbine design with emphasis on darreius concept handbook.
- [۲۰] روشن ا، مغربی م ج (۱۳۹۵) بهبود عملکرد توربین بادی ترکیبی داریوس-ساوانیوس. نشریه علمی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها ۲۱۲-۱۹۵: ۶(۳).
- [21] Nobile R, Vahdati M, Janet F. Barlow, Mewburn-Crook A (2014) Unsteady flow simulation of a vertical axis augmented wind turbine: A two-dimensional study. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 125 168-179.
- [22] Menter F (1994) Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J* 32: 1598.
- [23] Lima N, Vargas O, Patrícia L, Hallak H (2020) Study of mesh refinement on the aerodynamic coefficients for NACA2412 profile with different angle of attack and k-w turbulence model. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia E Gestão* 5(2): 216(01)-216(12).
- [8] Baker J (2012) Features to aid or enable self-starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines. In *Wind Engineering 1983 3C: Proceedings of the Sixth International Conference on Wind Engineering, Gold Coast, Australia, March 21-25, And Auckland, New Zealand.*
- [9] Kai Shimokawa A, Akinori Furukawa B, Kusuo Okuma B, Daisuke Matsushita B, Watanabe S (2012) Experimental study on simplification of Darrieus-type hydro turbine with inlet nozzle for extra-low head hydropower utilization. *Renew Energ* 41: 376-382.
- [10] Maître TA, Amet EB, Pellone C (2013) Modeling of the flow in a Darrieus water turbine: Wall grid refinement analysis and comparison with experiments. *Renew Energ* 51: 497-512.
- [11] McNaughton J, Billard FN, Revell A (2014) Turbulence modelling of low Reynolds number flow effects around a vertical axis turbine at a range of tip-speed ratios. *J Fluid Struct* 47: 124-138.
- [12] Pongduanga S, Kayankannaveeb C, Tiaple Y (2015) Experimental investigation of helical tidal turbine characteristics with different twists. *Enrgy Proced* 79: 409-414.
- [13] Bachant P, Wosnik M (2015) Performance measurements of cylindrical- and spherical helical cross-flow marine hydrokinetic turbines, with estimates of exergy efficiency. *Renew Energ* 74: 318-325.
- [14] Priegue L, Stoesser T (2017) The influence of blade roughness on the performance of a vertical axis tidal turbine. *Int J Mar Energy* 17: 136-146.
- [15] Tahadjodi-Langroudia A, Zare Afifia F, Heyrani Nobarib A, Najafia AF (2020) Modeling and numerical investigation on multi-objective design improvement of a novel cross-flow lift-based