

Research Paper

Design and Analysis of a Diffuser Augment Horizontal Axis Tidal Turbine for Green Power Production

Mojtaba Tahani, Mohammadjavad Ziabakhsh Ganji, Mobina Simaee*

Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 04 May 2022

Revised 04 June 2022

Accepted 05 July 2022

Keywords:

Tidal Stream Turbine

Diffusers

CFD

Momentum theory of the blade element

ABSTRACT

With the gradual reduction of available fossil fuel reserves and environmental impacts, the rate of use of renewable energy in the world has increased. One of the advantages of finite fuels is the constant availability of their use, to achieve sustainability in the supply of energy carriers. Subsequently, to meet the demand in various sectors, it is necessary. Develop technologies to use new energy. One of these renewable energy sources is the offshore energy of the seas and oceans, which has significant potential in the Persian Gulf of Iran. There are many ways to achieve kinetic energy due to the Stream of fluid created by the gravitational pull of the moon on the open waters, such as the use of horizontal axis turbines. Since these types of turbines have the same technology as the horizontal wind turbine built in different parts of Iran, they can be a good option for the construction of a power plant in Iran. In this paper, the effect of current amplifier diffusers on the tidal turbine and its impact on increasing the received power by the numerical method has been investigated. To investigate the numerically the turbine Stream, the confusion model of the two SST equivalents is used in the Ansys CFX fluid dynamics software. The geometry of the diffuser and turbine has been studied separately. And the proposed model includes a turbine with a channel, in which the increase in power is about four times that of the no channels mode.

Introduction

Forecasts indicate that the amount of energy demand in the coming years will continue to rise due to the further increase in global prosperity, economic growth and population growth, especially in developing countries. Renewable energy technologies are increasingly popular to ensure future energy supply and environmental importance. tide is a great source of renewable energy. According to their rotation axis, turbines are divided into two types of turbines, horizontal axis and vertical axis. Tidal energy refers to the energy that is created by the relative motion of the earth, sun and moon. With the difference that it is a renewable source of electricity and does not have the consequences of the use of fossil fuels by humans for many years, such as the emission of greenhouse gases and subsequent global warming.

Model description

Tide turbine blades are made of several NACA 6_series profiles with different chord, width and pitch angle at different radius. In this article, the effect of using a Stream -enhancing diffuser on a full laboratory-scale horizontal axis tidal Stream turbine, including 3 blades, a hub and a base, is simulated numerically with the $K\omega$ SST turbulence model. This model presents the correct behavior pattern of the Stream encountering the turbine and its walls.

Results and discussions

The geometry of the Tidal horizontal axis turbine is divided into two parts, the rotating domain and the fixed domain. The rotary range is repeatable every 120 degrees. Therefore, only the networking potential of one-third of the domain is available. The fixed domain is made up of one part and separate from the rotating domain, but with the

* Corresponding Author, Email: mobina.simaee@ut.ac.ir

control of the compatibility of the disk in contact. The transition SST model can be presented to combine the $k-\omega$ model with the $k-\varepsilon$ model. In this article, to combine these two formulation models, the $k-\varepsilon$ model has been transformed into the $k-\omega$ model. For this reason, the SST two-equation turbulence model has been used in the Ansys CFX fluid dynamics software to numerically investigate the horizontal axis tidal Stream turbine. In order to validate the numerical results, the power and thrust factor for the blade tip speed ratio equal to 5 are the parameters that have been evaluated on the numerical solution to evaluate the number of different networks. The number of 7058772 grids is a suitable grid for numerical solution in terms of time and accuracy, for this purpose, modeling with this number of cells has been used in this study. The fluid used in the numerical simulation is water with

a density of 997 kg/m^3 and a kinematic viscosity of $6-10 \text{ m}^2/\text{s}$ at a temperature of 25°C , which experimentally has a turbulence intensity of 5% at the entrance. At the turbine outlet boundary, the open channel boundary condition with zero relative pressure is used. The upper and side walls of the domain have a symmetry boundary condition. Figure 1 shows the full CFD domain of the tidal Stream turbine.

When the fluid Stream hits the turbine, the pressure drops to 0.1, which is the largest pressure change in front of the turbine blade, and this is due to the first stage of pressure drop and the high level of the rotor sweep. According to Figure 2, the thrust force applied to the turbine blade has increased by about 2.5 times and its torque power has increased by about 4 times due to the increase in speed due to the addition of the diffuser on the turbine.

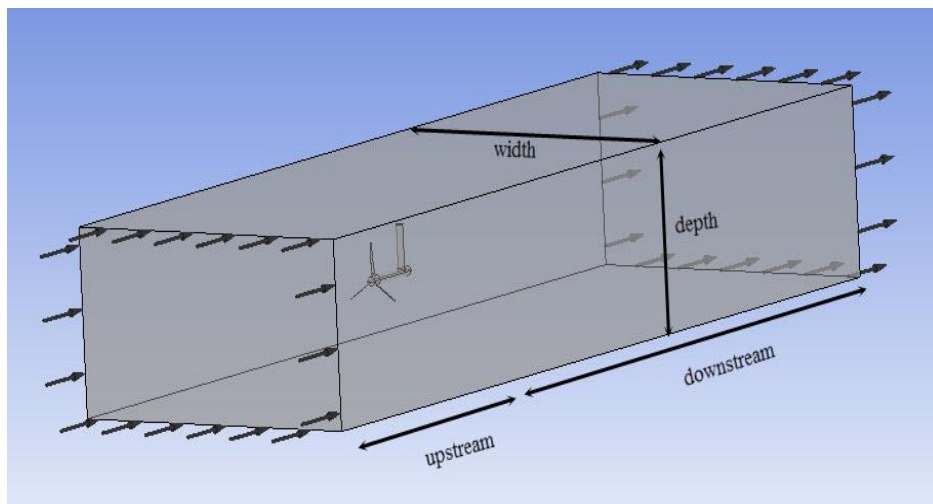


Figure 1. full CFD domain of the tidal Stream turbine.

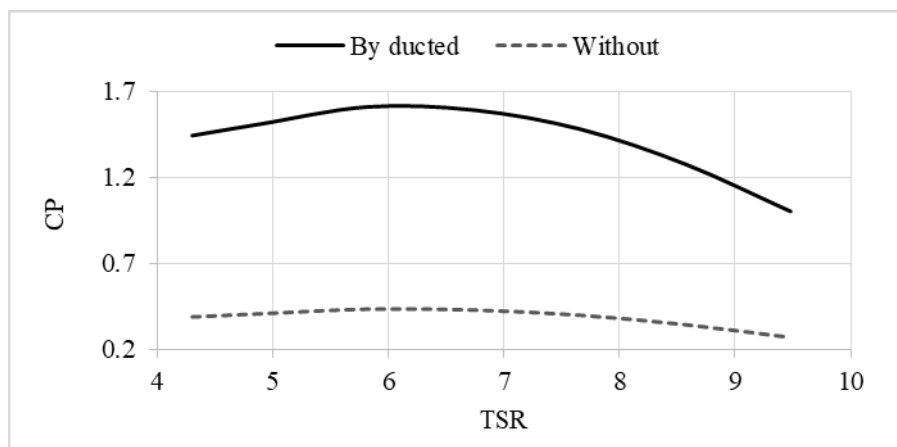


Figure 2. Changes in power factor for the mode with/without channel in terms of TSR.

فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

طراحی و تحلیل عملکرد توربین محور افقی جزرومدی دارای دیفیوزر تقویت‌کننده برای تولید انرژی سبز از جریان‌های دریایی

مجتبی طحانی^۱، محمدجواد ضیابخش گنجی^۲، مبینا سیمائی^{*۲}

^۱ استاد، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

^۲ کارشناس ارشد، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ‌های مقاله: تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۲/۱۴ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۳/۱۴ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۴/۱۴	با کاهش تدریجی ذخایر در دسترس سوخت‌های فسیلی و اثرات زیست‌محیطی، نرخ استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان افزایش یافته است. یکی از مزیت‌های سوخت‌های پایان‌ناپذیر، دسترس‌پذیری مداوم برای استفاده از آن‌ها است. یکی از این منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی جزرومدی دریاها و اقیانوس‌ها است، که پتانسیل آن به میزان قابل توجهی در خلیج فارس ایران وجود دارد. برای دستیابی به انرژی جنبشی ناشی از جریان سیال به‌وجودآمده از اثر گرانش قمر بر آب‌های آزاد، راه‌های بسیاری مانند استفاده از توربین‌های محور افقی جزرومدی وجود دارد. از آنجا این نوع توربین‌ها دارای فناوری مشابه توربین بادی محور افقی احداث‌شده در نقاط مختلف ایران هستند، می‌توانند گزینه مناسبی برای احداث نیروگاه جزرومدی در ایران باشند. در این مقاله اثر دیفیوزرهای تقویت‌کننده جریان بر توربین جزرومدی و تأثیر آن بر افزایش توان دریافتی به روش عددی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی عددی جریان توربین، از مدل آشفتگی دومعادله‌ای اس اس تی، در نرم‌افزار دینامیک سیالات ANSYS CFX استفاده شده است. هندسه دیفیوزر و توربین، به طور جداگانه بررسی شده و مدل ارائه‌شده شامل توربین همراه با کانال بوده، که افزایش توان در آن حدود ۴ برابر حالت بدون کانال است.
کلیدواژه: توربین جریانی جزرومدی دیفیوزر دینامیک سیالات محاسباتی تئوری تکانه المان پره	

۱. مقدمه

پایان‌پذیر روبه‌رو خواهد شد و شرایط حاکم، ایجاب می‌کند از فناوری‌های جایگزین، برای تأمین تقاضا بهره‌برداری شود. برخی از منابع انرژی تجدیدپذیر مانند بادی و خورشیدی، به‌خوبی در کل دنیا توسعه پیدا کرده‌اند و با توجه به اینکه انرژی باد در آینده، یک عامل مهم در سبد انرژی کل جهان است، انتظار می‌رود که مزارع بادی، گسترش بیشتری پیدا کرده و به طور فزاینده‌ای مناطق سطحی بزرگ‌تر را پوشش دهند [۱]. سایر فناوری‌ها که هنوز در مرحله توسعه بوده، نویدبخش تأمین نیازهای آینده برق دنیا خواهند بود. اقیانوس دارای پتانسیل انرژی

طبق آمارهای ثبت‌شده در ۳۰ سال گذشته، تقاضای انرژی کل دنیا به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. پیش‌بینی‌ها بیانگر آن است که میزان تقاضای انرژی در سال‌های آینده به دلیل افزایش بیشتر رفاه جهانی، رشد اقتصادی و افزایش جمعیت، به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه، همچنان روند صعودی خواهد داشت. بنابراین، با توجه به افزایش مصرف انرژی و از همه مهم‌تر تغییرات آب‌وهوا، به‌تدریج جهان با کاهش ذخایر سوخت‌های

* نویسنده مسئول

Email: mobina.simaee@ut.ac.ir

تجدیدپذیر گسترده‌ای مانند موج^۱، جزرومد^۲، اختلاف دما^۳ میان آب‌های سرد عمیق و آب‌های گرم سطحی، اختلاف شوری^۴ در دهانه‌های رودخانه‌ها است. انرژی جزرومد به انرژی‌ای گفته می‌شود که با حرکت نسبی زمین، خورشید و ماه ایجاد می‌شود. با این تفاوت که یک منبع تجدیدپذیر الکتریسیته بوده و پیامدهای استفاده از سوخت‌های فسیلی توسط بشر در سال‌های متمادی همچون، انتشار گازهای گلخانه‌ای و به دنبال آن، گرم شدن کره زمین یا باران اسیدی را به همراه ندارد، درواقع به کمک توربین‌های جزرومدی^۵، انرژی جزرومد دریاها و اقیانوس‌ها به برق یا سایر اشکال مفید قدرت تبدیل می‌شود. انگلیس و اسکاتلند به ترتیب تولید توان ۸۶ مگاوات و ۱۰ مگاوات را از توربین‌های جزرومدی توسعه داده‌اند [۲].

توربین‌ها بر اساس محور دوران خود به دو دسته توربین‌های جزرومدی محور افقی و محور عمودی تقسیم می‌شوند. پدیده کاویتاسیون یکی از مشکلات این فناوری است، که با کم شدن فشار سیال، باعث به وجود آمدن حفره‌های توخالی در آن می‌شود. این پدیده می‌تواند به عنوان عامل مزاحم، عملکرد توربین‌ها را تحت تأثیر قرار دهد و هرچه توربین دارای سرعت کمتری باشد، احتمال وقوع این پدیده در پره‌های توربین کاهش می‌یابد [۳]. جریان‌های دریایی یک منبع بزرگ و نسبتاً قابل پیش‌بینی از انرژی را ارائه می‌دهند، طراحی پیشنهادی توربین جریان دریایی شباهت‌های زیادی با توربین بادی، دارای پره‌هایی با قطر و ابعاد بزرگ دارد اما با یک تفاوت که تیغه توربین جریان دریایی بسته به سرعت جریان ورودی محلی، نیروها (کاهش فشار) و عمق غوطه‌وری، می‌تواند دچار کاویتاسیون شود. برای مقابله با این عامل، توربین توسط روش‌های مختلفی طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. آزمایش‌های کاویتاسیون و پیش‌بینی‌های عددی با استفاده از روش پانل^۶ و سری‌های NACA انجام شده است که می‌تواند متوسط توان و نیروی رانش را در اعماق و زاویه‌های مختلف پره و هاب در هر دو تونل‌های کاویتاسیون و مخزن یدک محاسبه کند [۴].

شبیه‌سازی توربین‌ها، با استفاده از کدها و روش‌های مختلف، تحت محیطی شبیه به محیط واقعی انجام می‌شود. به عنوان مثال، هندسه یک توربین بادی توسط نیروهای کشش^۷ متمرکز، با استفاده از ابزارهای دینامیک سیالات محاسباتی^۸ و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۹ انجام می‌گیرد، سپس برای ارزیابی قابلیت اطمینان مدل به دست‌آمده لازم است نتایج ناشی از شبیه‌سازی، با مقادیر تجربی، مقایسه شوند تا بتوان در محیط واقعی مدل به دست‌آمده را معتبر دانست [۵]. برای استخراج حداکثر توان در توربین‌ها، می‌توان آیرودینامیک تیغه و بهینه‌سازی یک توربین را مورد بررسی قرار داد. مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های گردابه‌ای بزرگ، که در آن توربین‌های بادی با استفاده از مفهوم کلاسیک «دیسک درگ» مدل‌سازی می‌شوند، در این پژوهش انجام شده است. برای چیدمان‌های مختلف توربین بادی، عوامل بارگذاری توربین و مقادیر زبری سطح اجرا می‌شود. یک گام ضروری و پرهزینه برای درک بهتر فیزیک جریان، اندازه‌گیری ویک^{۱۰} و جریان ورودی در مجموعه‌ای از توربین‌ها است. ابزارهای دینامیک سیالات محاسباتی این اندازه‌گیری‌ها را تکمیل می‌کنند و تصویر کاملی از میدان جریان ارائه می‌دهند. در برخی روش‌ها، توربین‌ها با معادلات ناویر-استوکس به روش میانگین‌گیری رینولدز^{۱۱} به صورت صفحه‌ای مدل‌سازی می‌شوند [۳]. تئوری تکانه‌المان پره^{۱۲}، برای پیش‌بینی عملکرد توربین جریان جزرومدی از روش‌های دیگر مدل‌سازی محسوب می‌شود. مدل‌های عددی، برای پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی توربین‌های جریان جزرومدی مفید هستند. یک مزیت کلیدی شبیه‌سازی عددی، ریسک و هزینه کمتر است، اگرچه به‌وضوح نیاز به اعتبارسنجی در برابر داده‌های اندازه‌گیری شده وجود دارد و این مدل‌های آزمایشگاهی نمی‌توانند شرایط پیچیده ساحلی را تقلید کنند، اما به دلیل هزینه‌های بسیار کمتر در مقایسه با توسعه‌های دریایی و برای امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق و قابل تکرار، بسیار مناسب هستند [۶]. فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر به طور فزاینده‌ای برای

7. Drag
8. CFD
9. Large-Eddy Simulation (LES)
10. wake
11. Rans
12. BEM

1. Wave
2. Tidal
3. Temperature Gradient
4. Salinity Gradient
5. Tidal-stream turbine(TST)
6. Panel method

اطمینان از تأمین انرژی در آینده و اهمیت محیط زیست محبوب هستند. با توجه به کاهش منابع سوخت فسیلی، افزایش هزینه آن‌ها و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی، جهان باید به سرعت منابع انرژی جایگزین را توسعه دهد. این منابع انرژی جایگزین در حالت ایده‌آل باید قابل تجدید با حداقل اثرات زیست‌محیطی باشند. جزرومد منبع عظیم و دست‌نخورده‌ای از انرژی‌های تجدیدپذیر است. نیروگاه‌های جزرومدی که در اوایل دهه ۱۹۹۰ روی کار آمدند، در ساعت‌های خاصی می‌توانند برق تولید کنند. از جمله موانعی که باعث عدم سرمایه‌گذاری عظیم در این روش تولید انرژی می‌شود، هزینه‌های سطح بالای تجهیزات و زمان‌بر بودن ساخت آن‌ها است. به طوری که حداکثر ظرفیت قابل دسترس انرژی حاصل از جزرومدی در جهان ۳ هزار گیگاوات است که تا کنون ۱۶۶,۳۶۵ گیگاوات استحصال شده است. تقاضای برق طی روز متفاوت است و تأمین نیاز مشترکان با استفاده از این نیروگاه امکان‌پذیر نیست، اما به دلیل چرخه گران‌ش، از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار هستند و از نظر انتشار آلاینده‌ها نیز کمک بسیاری به محیط زیست خواهند کرد [۳].

صنعت انرژی جزرومدی در حال تغییری فزاینده به سمت توربین‌های تقویت‌شده دیفیوزر است. دلیل آن، قدرت خروجی بالاتر توربین‌های تقویت‌شده دیفیوزر در مقایسه با توربین‌های معمولی است. توربین جریان جزرومدی تقویت‌شده دیفیوزر، یک فناوری محبوب انرژی جزرومدی است. ادغام دیفیوزر بر این اصل استوار است که توان تولیدی به طور مستقیم با مکعب سرعت جریان متناسب است. از این رو، نصب دیفیوزر در اطراف توربین معمولی قابلیت‌های توان خروجی آن را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد [۱].

مهمود و همکاران [۷] شبیه‌سازی CFD دیفیوزر برای توربین جریان جزرومدی تقویت‌شده دیفیوزر را ارائه کردند. ایرفویل NACA 0016 در طول‌ها و زوایای مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا پتانسیل آن برای طراحی یک دیفیوزر بررسی شود. شبیه‌سازی نشان داد با افزایش طول یا زاویه حمله، سرعت افزایش می‌یابد. از آنجا که توان تولیدی با مکعب سرعت نسبت مستقیم دارد، توان تولیدشده توسط دیفیوزر به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. امبریتا و همکاران [۸] یک مطالعه عددی در مورد

تأثیر تغییرات زاویه دیفیوزر بر ضریب توان ارائه داده‌اند، نتایج نشان می‌دهد، در دیفیوزر با زاویه ۲۰/۰۴ درجه، از نظر تجربی حداکثر بازده توربین جزرومدی ۴۳/۶ درصد با ۱۲۰ دور در دقیقه است، در حالی که از نظر عددی حداکثر بازده می‌تواند به کمتر از ۴۸/۵ درصد با ۱۳۳ دور در دقیقه برسد. تفاوت بین نتایج عددی و تجربی برای زاویه دیفیوزر با زاویه ۱۰/۴۳ درجه ۳/۱ درصد است. کرس ول و همکاران [۹] روش بهینه‌سازی مبتنی بر مدل جایگزین کریجینگ و الگوریتم ژنتیک را معرفی کردند. مجموعه‌ای از داده‌ها برای مطالعه توربین‌های جریان جزرومدی با دیفیوزر تقویت‌شده و اعتبارسنجی مدل عددی آن استفاده شده و نتایج نشان داده‌اند که روتور ساده در زیر جریان‌های انحرافی ضعیف عمل کرده اما توربین با دیفیوزر تقویت‌شده عملکرد را در نزدیک به سطح اوج در زوایای انحراف تا ۳۰ درجه حفظ می‌کند. گادن و همکاران [۱۰] استفاده از یک شroud برای افزایش تولید توان توربین را مورد بررسی قرار داده‌اند. آزمایش‌ها نشان داد توان خروجی را می‌توان با ضریب ۳/۱ با یک دیفیوزر نصب‌شده در لبه عقب افزایش داد. براتچی و همکاران [۱۱] روش خط محرک را برای در نظر گرفتن توربین‌های تقویت‌شده با دیفیوزر اصلاح کرد و نتایج را با آزمایش‌های تجربی تأیید کرد. این روش بر اساس به اصطلاح فاکتور طرح‌ریزی، یک پارامتر موردی است که باید کالیبره شود. بونتیمپو و همکاران [۱۲] از تئوری تکانه‌محوری برای مدل‌سازی یک توربین تقویت‌شده با دیفیوزر ایده‌آل، با در نظر گرفتن ماهیت دوبعدی جریان و شکاف نوک تیغه استفاده کردند. سیوالیر و همکاران [۱۳] اثرات ایرفویل‌های مختلف را روی یک توربین شناور، سبک‌تر از هوا، با دیفیوزر تقویت‌شده آزمایش کردند. آن‌ها چهار نوع مختلف از نمایه NACA را با اهداف ایجاد بالابر بالاتر و دیگری برای یک ضریب توان بالاتر مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله اثر به کارگیری دیفیوزر تقویت‌کننده جریان بر یک توربین جریان جزرومدی محور افقی مقیاس آزمایشگاهی کامل، شامل ۳ پره، هاب و پایه، به روش عددی با مدل آشفتگی توربالانسی کی-امگا اس اس تی^۱، شبیه‌سازی شده است.

1. k- ω SST

۲. مواد و روش

در این بخش، هندسه کانال و توربین طراحی شده ارائه می‌شود. پره توربین جریان جزرومدی از تعدادی پروفیل NACA سری ۶ با وتر، ضخامت و زاویه گام متفاوت در شعاع‌های مختلف ساخته شده است. مدل تجربی توربین مشابه در آزمایشگاه تحت شرایط کالیبره مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس اجزای توربین طراحی شده آزمایش می‌شود.

۱.۲. هندسه

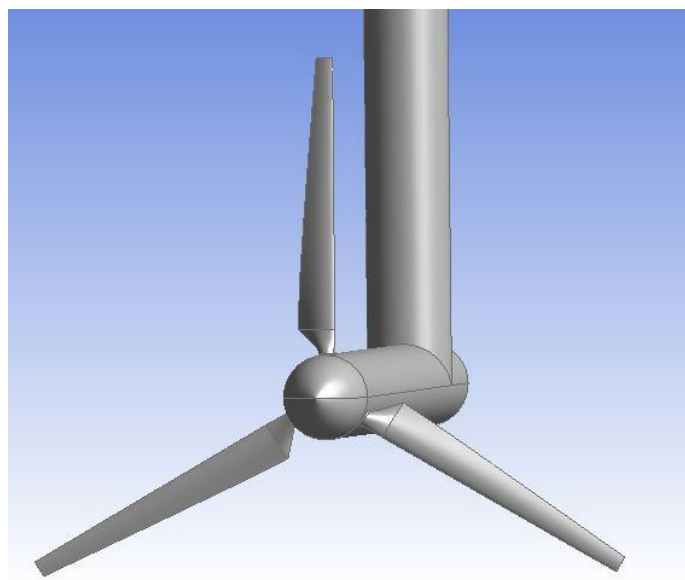
در این مقاله اثر به‌کارگیری دیفیوزر تقویت‌کننده جریان بر یک توربین جریان جزرومدی محور افقی مقیاس آزمایشگاهی کامل، شامل ۳ پره، هاب و پایه، به روش عددی با مدل آشفتگی توربالانسی کی_امگا اس اس تی،

شبیه‌سازی شده است. این مدل الگوی رفتاری صحیحی از برخورد جریان با توربین و دیواره‌های آن را ارائه می‌دهد. برای شبیه‌سازی توربین‌های جزرومدی در آزمایشگاه که یک مدل تجربی از طراحی توربین را ارائه می‌دهد، می‌تواند از این مدل آشفتگی استفاده کرد [۶]. هندسه مختص پره با رسم پروفیل در شعاع‌های مختلف با توجه به پارامترهای جدول ۱ تولید شده است. پروفیل به‌کاربرده شده در پره، از نوع ایرفویل سری NACA63-8xx است.

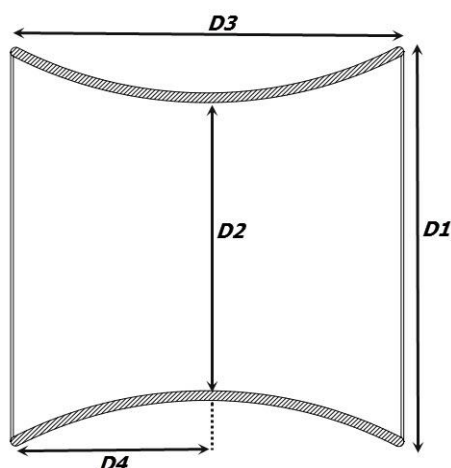
در شکل ۱ نمایی از توربین طراحی شده آورده شده است. شکل ۲ نمای دوبعدی از هندسه کانال یا دیفیوزر است و در آن نسبت‌های $\frac{D_2}{D_1}$ برابر ۰/۷۵، $\frac{D_4}{D_1}$ برابر ۰/۵ و $\frac{D_3}{D_1}$ برابر ۱ است [۷].

جدول ۱. پارامترهای طراحی پره توربین

r/R	r(mm)	C/R	pitch(deg)	t/c%
۰/۲	۸۰	۰/۱۲۵	۲۰	۲۴
۰/۳	۱۲۰	۰/۱۱۵۶	۱۴/۵	۲۰/۷
۰/۴	۱۶۰	۰/۱۰۶۳	۱۱/۱	۱۸/۷
۰/۵	۲۰۰	۰/۰۹۶۹	۸/۹	۱۷/۶
۰/۶	۲۴۰	۰/۰۸۷۵	۷/۴	۱۶/۶
۰/۷	۲۸۰	۰/۰۷۸۱	۶/۵	۱۵/۶
۰/۸	۳۲۰	۰/۰۶۸۸	۵/۹	۱۴/۶
۰/۹	۳۶۰	۰/۰۵۹۴	۵/۴	۱۳/۶
۱	۴۰۰	۰/۰۵۰۰	۵	۱۲/۶



شکل ۱. نمایی از توربین طراحی شده



شکل ۲. نمای دوبعدی از هندسه کانال

۲.۲. شبکه‌بندی

هندسه توربین محور افقی جزرومدی، جهت شبکه‌بندی به دو قسمت، حوزه دوار^۱ و حوزه ثابت^۲ تفکیک می‌شود. بخش دامنه دوار که دامنه باریک استوانه‌ای شامل پره‌های توربین است، با نسبت سرعت نوک پره مشخصی، شروع به دوران می‌کند. این بخش، پس از تقسیم‌بندی به دو قسمت شش‌وجهی و بخش بیرونی به صورت کاملاً سازمان‌یافته شبکه‌بندی می‌شود تا علاوه بر دقت زیاد در جواب، سرعت همگرایی بالایی نیز حاصل شود. شکل ۳ نمای کاملی از شبکه‌بندی دامنه دوار را نمایش می‌دهد.

دامنه دوار به ازای هر ۱۲۰ درجه تکرارپذیر و متقارن است. بنابراین، تنها پتانسیل شبکه‌بندی یک‌سوم دامنه موجود است. دامنه ثابت از یک قسمت و جدا از دامنه دوار ولی با کنترل تطابق^۳ صفحه‌های در تماس^۴ تشکیل شده است. این دامنه به صورت چهاروجهی و به گونه‌ای که بتوان اندازه المان آن را با قطری دو برابر قطر پره مشخص کرد، شبکه‌بندی شده است. در جدول ۲ تعداد و نوع المان‌ها را برای دامنه‌ای با هر سه پره نمایش داده شده است.

۳. یافته‌ها

مدل آشفتگی SST می‌تواند برای ترکیب مدل $k-\omega$ ، با مدل $k-\epsilon$ ارائه شود. این مدل به طور هم‌زمان می‌تواند از توانایی مدل $k-\omega$ برای احتساب نواحی رینولدز پایین و

توانایی مدل $k-\epsilon$ برای احتساب نواحی رینولدز بالا بهره گیرد [۱۰]. بنابراین، در این مقاله برای ترکیب این دو مدل، فرمول‌بندی مدل $k-\epsilon$ به شکل مدل $k-\omega$ تبدیل شده است. به همین دلیل، برای بررسی عددی جریان توربین جزرومدی محور افقی، از مدل آشفتگی دومعادله‌ای SST، در نرم‌افزار دینامیک سیالات Ansys CFX استفاده شده است.

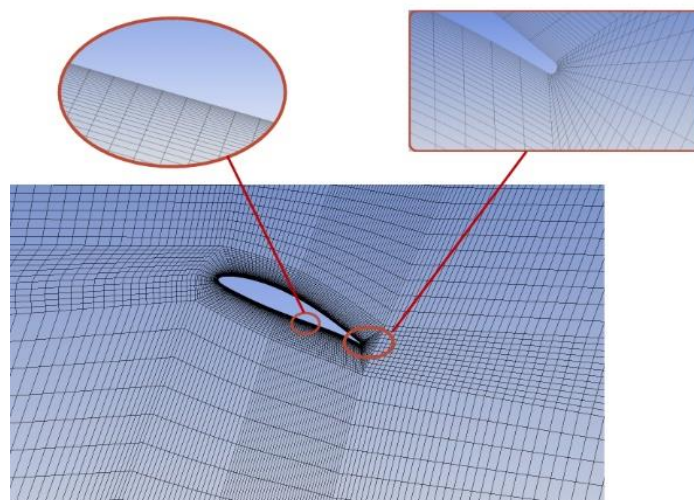
۳.۱. استقلال از شبکه

برای اعتبارسنجی نتایج عددی، بررسی حساسیت نتایج به دست‌آمده حل به شبکه، از اهمیت بسیاری برخوردار است. به این منظور، ضرایب توان و رانش^۵ برای نسبت سرعت نوک پره^۶ برابر ۵ پارامتره‌ایی هستند که برای ارزیابی تعداد شبکه‌های متفاوت روی حل عددی ارزیابی شده‌اند. جدول ۳ تغییرات ضریب توان و رانش و ضریب کیفیت شبکه‌بندی لایه‌مرزی^۷ را با افزایش تعداد المان‌های شبکه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنیم، شبکه با تعداد ۷۰۵۸۷۷۲ یک شبکه مناسب برای حل عددی از نظر زمان و دقت است. به همین منظور، در این مطالعه از مدل‌سازی با این تعداد سلول استفاده شده است.

شکل ۴ تغییرات ضریب توان و رانش و ضریب کیفیت را با افزایش تعداد المان‌های شبکه نشان می‌دهد.

1. Rotationaly
2. Stationary
3. Control matching
4. Interface

5. Thrust (CT)
6. TSR
7. Y^+



شکل ۳. شبکه‌بندی سازمان یافته

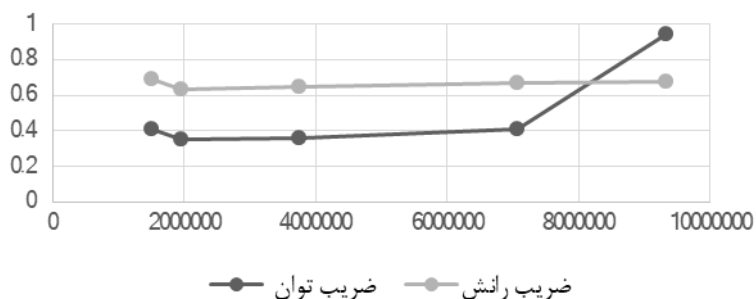
جدول ۲. نوع المان به کاررفته در شبکه‌بندی

ناحیه	تعداد گره	تعداد المان	چهاروجهی	شش‌وجهی
پره	۶۰۱۳۳۷۶	۵۸۵۷۶۸	۰	۵۸۵۷۶۸۶
حول پره	۹۴۰۸۰۰	۸۸۹۷۵۸	۰	۸۸۹۷۵۸
دامنه	۱۰۴۶۹۶	۴۸۰۷۸۸	۴۸۰۷۸۸	۰
کل	۷۰۵۸۷۷۲	۷۲۲۸۲۳۲	۴۸۰۷۸۸	۶۷۴۷۴۴

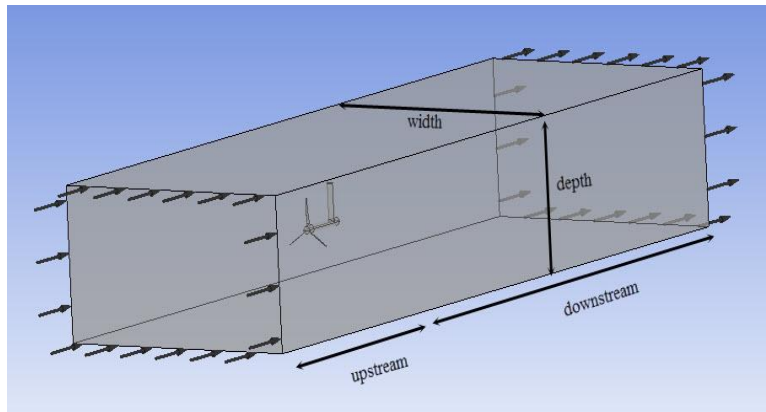
جدول ۳. حساسیت حل به تعداد شبکه

تعداد المان	کیفیت شبکه‌بندی لایه‌مرزی	ضریب توان	ضریب رانش
۱۵۱۰۷۹۰	۱۵-۲	۰/۴۱۴	۰/۶۹۲
۱۹۴۷۹۲۰	۲۰-۵۰	۰/۳۵۶	۰/۶۳۶
۳۷۴۲۵۴۴	۱۵۰-۳۰	۰/۳۶۳	۰/۶۵۱
۷۰۵۸۷۷۲	۱۵-۲	۰/۴۱۳	۰/۶۷۰
۹۳۳۶۷۴۹	۱۵-۲	۰/۹۴۲۰	۰/۶۷۷

حساسیت حل به شبکه



شکل ۴. تغییرات ضریب توان و رانش و ضریب کیفیت با افزایش تعداد المان‌های شبکه



شکل ۵. دامنه کامل CFD توربین جریان جزرومدی

۲.۳. شرایط مرزی و مشخصات فیزیکی سیال

در مرز ورودی دامنه تحلیل جریان سیال، حول توربین جزرومدی محور افقی، سرعت خطی که با توجه به سیستم آزمایشگاهی موجود محاسبه می‌شود، به عنوان شرط مرزی ورودی قرار داده شده است. سیال مورد استفاده در شبیه‌سازی عددی آب با چگالی ۹۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب و لزجت^۱ سینماتیکی 10^{-6} متر مربع بر ثانیه در دمای 25°C است که به صورت تجربی شدت آشفتگی آن در ورود برابر ۵ درصد در نظر گرفته می‌شود. در مرز خروجی توربین، شرط مرزی کانال باز با فشار نسبی برابر صفر به کار رفته است. دیواره کناری و بالایی دامنه دارای شرط مرزی تقارن^۲ است. برای اتصال بین مرزهای قسمت دوار یعنی دامنه متحرک و قسمت ثابت از روش فروزن روتور^۳ که یک روش میانگین‌گیری نسبت به زمان است، برای شبیه‌سازی استفاده شده است. در اینجا منطقه محاسباتی به نواحی ثابت و متحرک تقسیم شده و جریان غیر پایا به دو جریان پایا و میانگین‌گیری شده نسبت به زمان تقسیم می‌شود. دیواره‌های ساکن و متحرک توربین دارای شرط عدم لغزش با زبری نسبی ۱۰۰ میکرومتر هستند. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، ابعاد دامنه دارای طول بالادست جریان^۴ معادل $4D$ ، پایین دست جریان^۵ معادل $10D$ ، در راستای پهنا^۶ $5D$ و در راستای عمق^۷ $2/5D$ است.

1. Viscosity
2. Symmetry
3. Frozen Rotor
4. Upstream
5. Downstream
6. Width
7. Depth

۳.۳. فرمول‌بندی مسئله

معادلات سرعت به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$K_V = \frac{V_{ave}}{V_1} \quad (1)$$

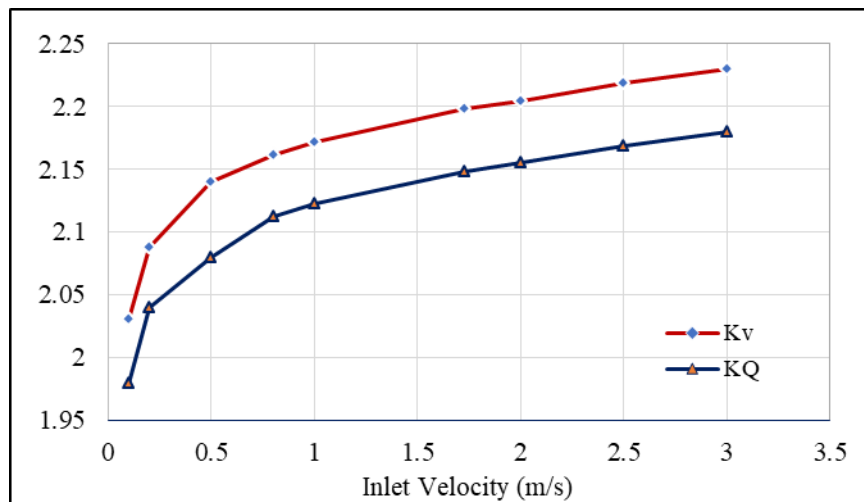
$$K_Q = \frac{Q}{Q_0} \quad (2)$$

$$Q_0 = \rho V_1 A_0 \quad (3)$$

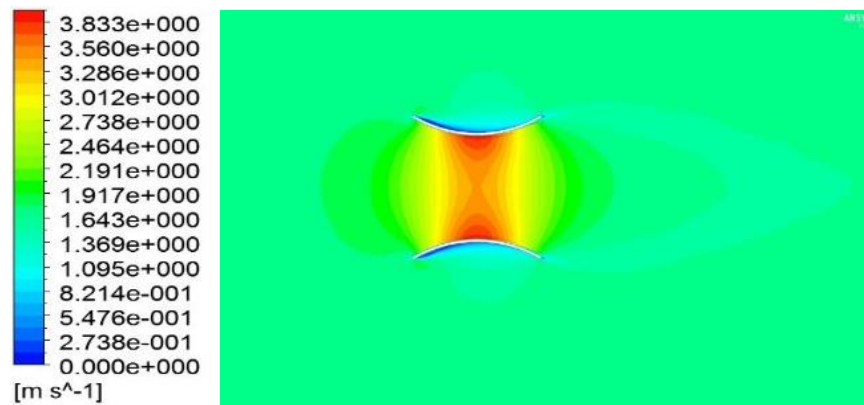
$$A_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \quad (4)$$

معادله ۱ بیان‌کننده نسبت سرعت، معادله ۲ نسبت جریان، معادله ۳ حداقل دبی سیال جریان یافته در طول کانال و معادله ۴ مساحت حداقل سطح مقطع کانال است. متغیرهای V_{ave} سرعت متوسط سیال جریان یافته در حداقل سطح مقطع کانال، V_1 سرعت جریان آزاد، Q دبی واقعی جریان سیال در کانال، D_0 قطر کانال در حداقل سطح مقطع آن، D_{in} و D_{out} به ترتیب قطر مقطع‌های ورودی و خروجی است. شکل ۶ تغییرات K_V و K_Q را در سرعت‌های مختلف را نشان می‌دهد.

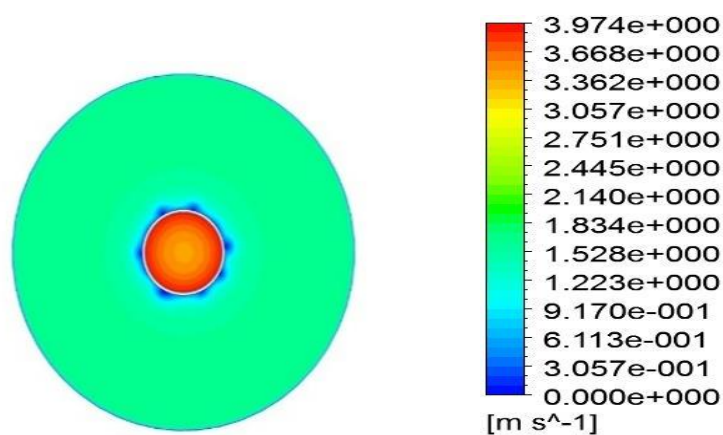
در شکل‌های ۷ و ۸ کانتور سرعت در عبور از کانال دو صفحه میانی و صفحه مقطع نصب توربین نمایش داده شده است. در این دو شکل به روشنی افزایش سرعت در مقطع نصب توربین و کاهش سرعت در برخورد و گذر از کانال مشهود است. در شکل ۹ کانتور تغییرات فشار برای توربین با سرعت ورودی $1/23 \text{ m/s}$ مشاهده می‌شود. طبق کانتورها، دیفیوزر سبب افزایش سرعت و کاهش فشار در مینیمم مقطع آن می‌شود.



شکل ۶. نمودار تغییرات K_v و K_Q در سرعت‌های مختلف

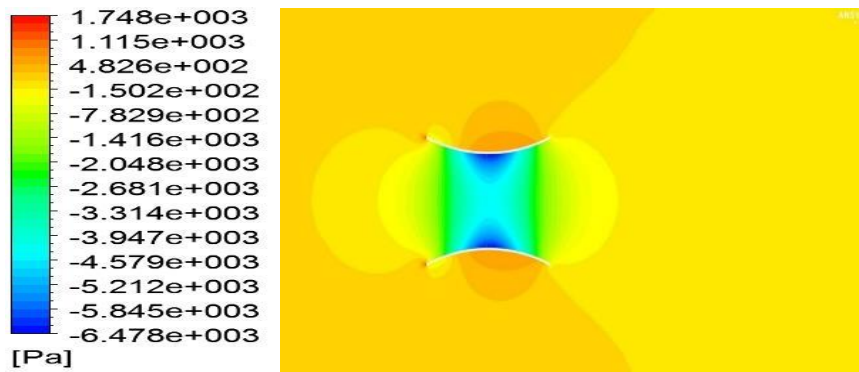


شکل ۷. کانتور تغییرات سرعت کانال از نمای جانبی با سرعت ورودی $1/73 \text{ m/s}$

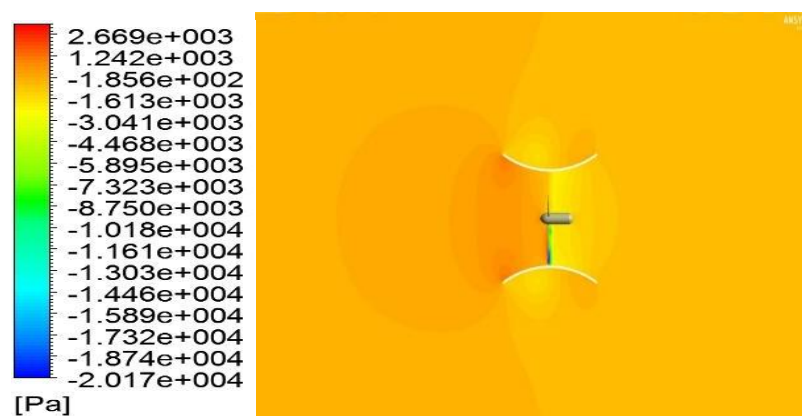


شکل ۸. کانتور تغییرات سرعت کانال در مقطع نصب توربین با سرعت ورودی $1/73 \text{ m/s}$

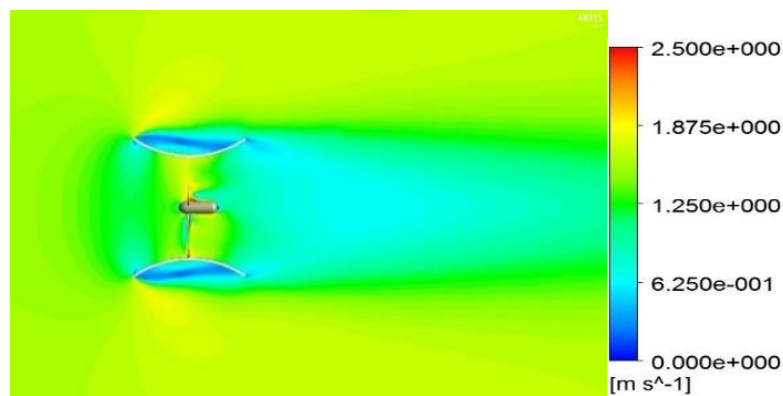
طحانی و همکاران: طراحی و تحلیل عملکرد توربین محور افقی جزرومدی دارای دیفیوزر ...



شکل ۹. کانتور تغییرات فشار کانال از نمای جانبی



شکل ۱۰. کانتور تغییرات فشار از نمای جانبی



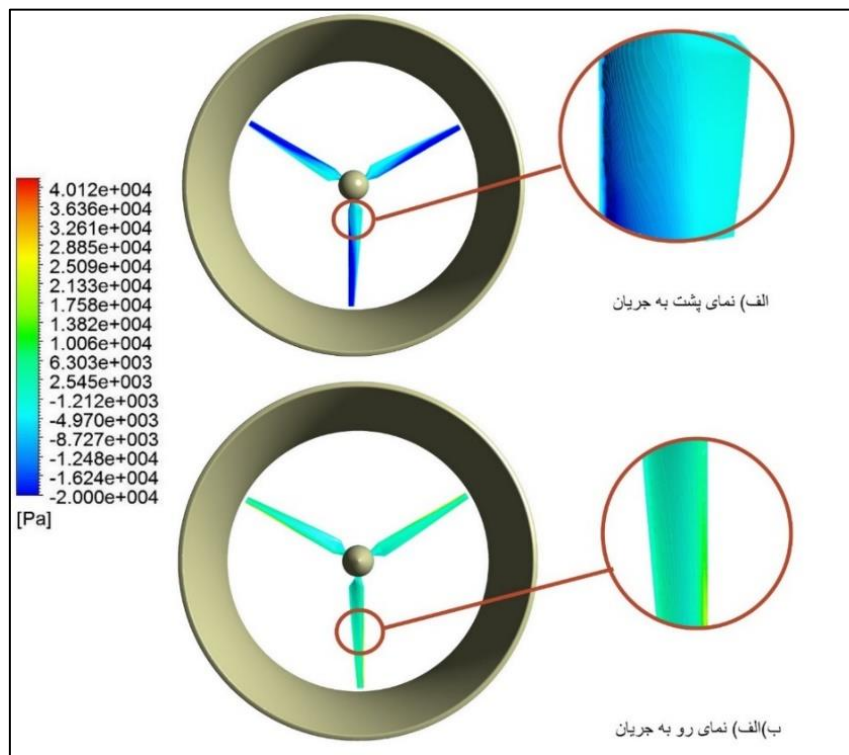
شکل ۱۱. کانتور اندازه سرعت از نمای جانبی

فشار در مقابل پره توربین است و این به دلیل اولین مرحله افت فشار و بالا بودن سطح جاروب روتور است. علت به وجود آمدن فشار منفی نیز ویک یا گردش جریان و به بیانی، بازگشت جریان است. این تغییرات زیاد فشار روی پره توربین، نشان دهنده اعمال نیروی زیاد تراست روی پره است. این یکی از نیروهای است که در طراحی سازه پره توربین در نظر گرفته می شود. در ادامه با عبور جریان

در تحلیل دینامیک سیالات دو پارامتر بسیار مهم، تغییرات فشار و سرعت هستند، که با محاسبه تغییرات این دو پارامتر، سایر پارامترها به دست می آیند. شکل های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تغییرات فشار و تغییرات اندازه سرعت را در برخورد با توربین از دو نمای جانبی و بالا نشان می دهد. همان گونه که انتظار می رود، با برخورد جریان سیال با توربین، فشار به ۰/۱ افت می کند که بیشترین تغییرات

ضربه برخورد سیال با دیواره توربین است. شکل ۱۲ گرادین فشار روی سطح دیواره پره را از نمای روبه‌رو نمایش می‌دهد. این نتایج و دیتاها برای تحلیل سازه به کار می‌رود.

سیال از پایه یا دکل توربین نیز فشار به نسبت کمتر افت می‌یابد. اثر ویک و افت فشار تا ۷D ادامه دارد. این اثر برای تحلیل مزرعه توربین اهمیت بسیار دارد. در جلوی توربین نیز یک کاهش سرعت دیده می‌شود، که به علت موج



شکل ۱۲. تغییرات فشار روی سطح پره

از این کانتور می‌توان جهت دوران و تغییرات سرعت خطی با افزایش شعاع محلی را به دست آورد.

شکل ۱۵ خطوط جریان در صفحات موازی صفحه پره از بالادست جریان تا پایین دست را نشان می‌دهد. مطابق شکل، تغییرات آشفتگی بر اثر برخورد با پره دوار پیش از برخورد تا فواصل بعد آن وجود دارد.

در شکل ۱۶ تغییرات ضریب نیروی رانش روی توربین‌های دارای کانال و فاقد کانال با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

در شکل ۱۷ طبق این نتایج نیروی رانش وارد شده به پره توربین، با افزایش سرعت ناشی از افزودن دیفیوزر بر توربین حدود ۲/۵ برابر و توان گشتاوری آن حدود ۴ برابر افزایش یافته است، که مقدار چشمگیری است.

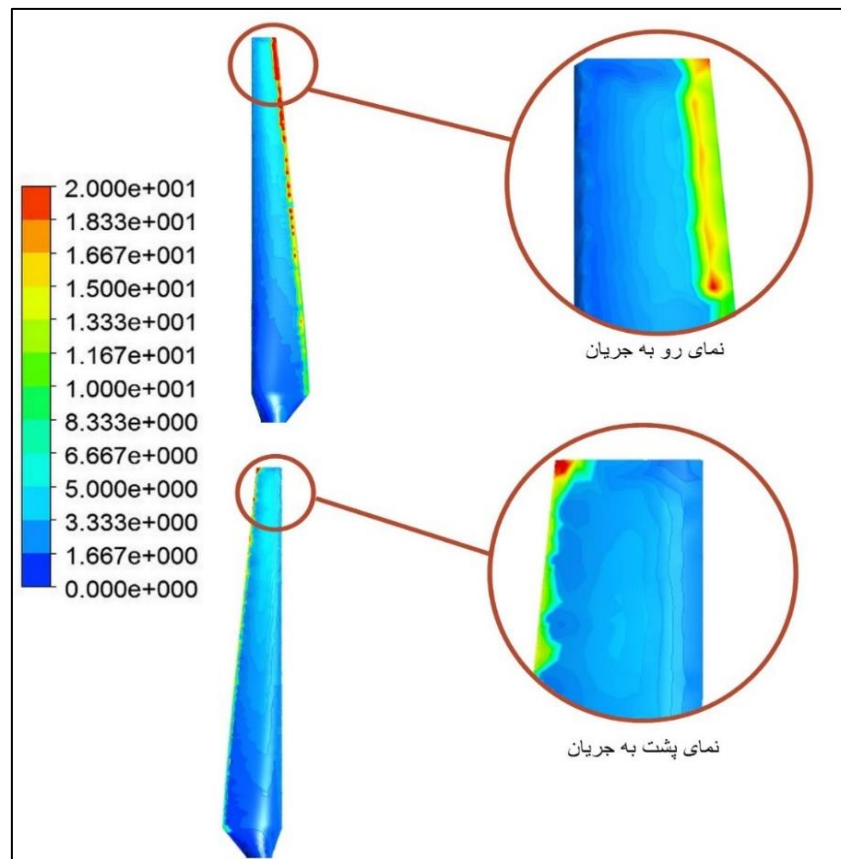
شکل ۱۸ توربین طراحی شده با کانال تقویت‌کننده جریان را نشان می‌دهد.

در دینامیک سیالات محاسباتی و در روش حل‌هایی مانند SST، همچون معادلات حاکم در نزدیکی دیواره‌ها نیز حل می‌شود، پس مش لایه‌مرزی بسیار پراهمیت است، این مش کیفیت شبکه‌بندی در دیواره را نمایش می‌دهد و به صورت سازمان‌یافته و با ارتفاع لایه‌هایی متناسب با رینولدز جریان برای تشخیص صحیح و اثر تغییر سرعت است. برای مشخص کردن کیفیت شبکه‌بندی در لایه‌مرزی از پارامتر Y^+ استفاده می‌شود. برای این روش حل دینامیک سیالات محاسباتی، پارامتر ۲-۳۰ مقدار مناسبی است. شکل ۱۳ کانتور مقدار Y^+ را که روی دیواره پره بیشترین حساسیت دارد، نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیش از ۹۰ درصد پره دارای Y^+ کمتر از ۸ است.

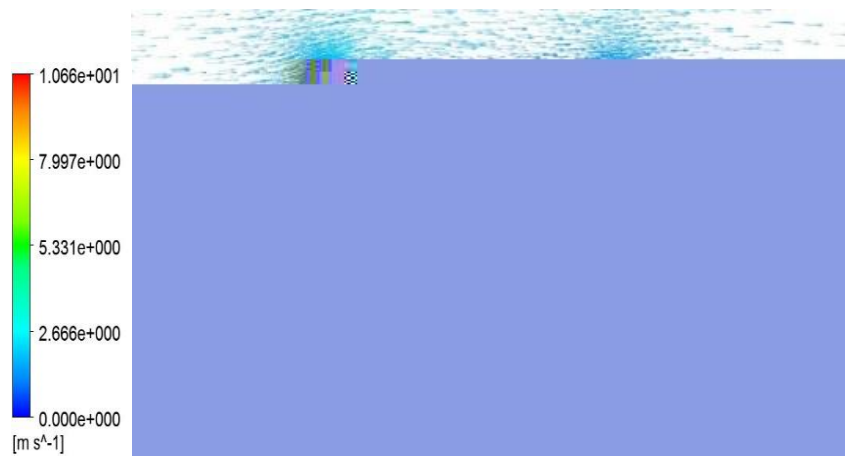
Error! Reference source not found. شکل ۱۴

کانتور جهت سرعت را در صفحه میانی جریان نشان می‌دهد.

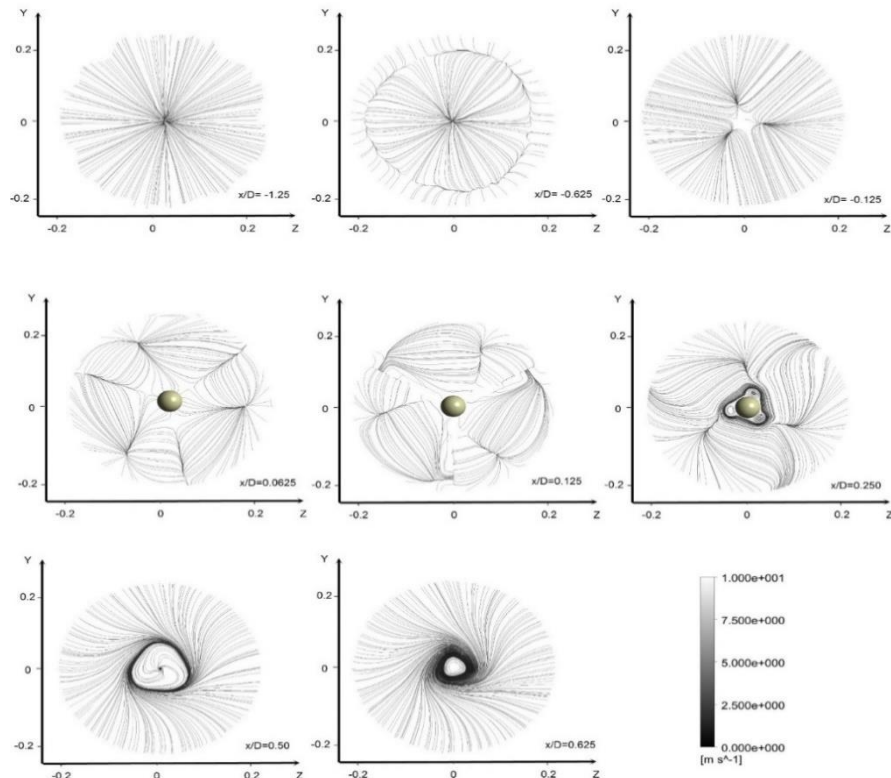
طحانی و همکاران: طراحی و تحلیل عملکرد توربین محور افقی جزرومدی دارای دیفیوزر ...



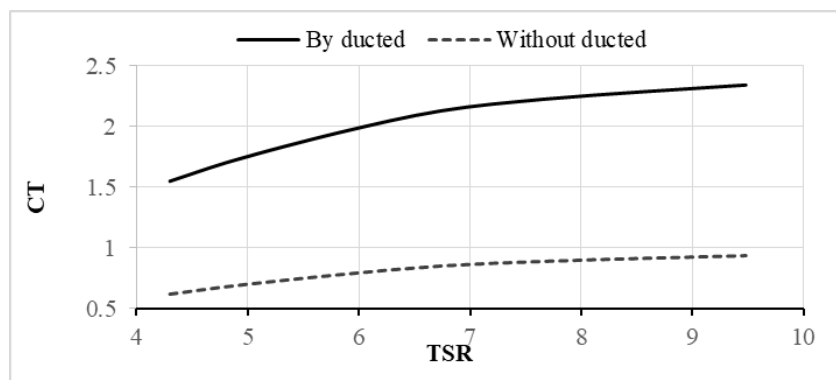
شکل ۱۳. کانتور نمایش Y^+ روی سطح دیواره بره توربین



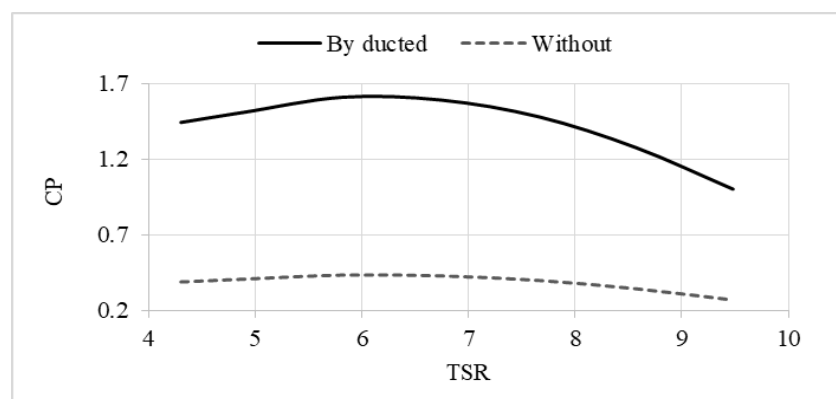
شکل ۱۴. کانتور جهت سرعت برای توربین با کانال از نمای جانبی



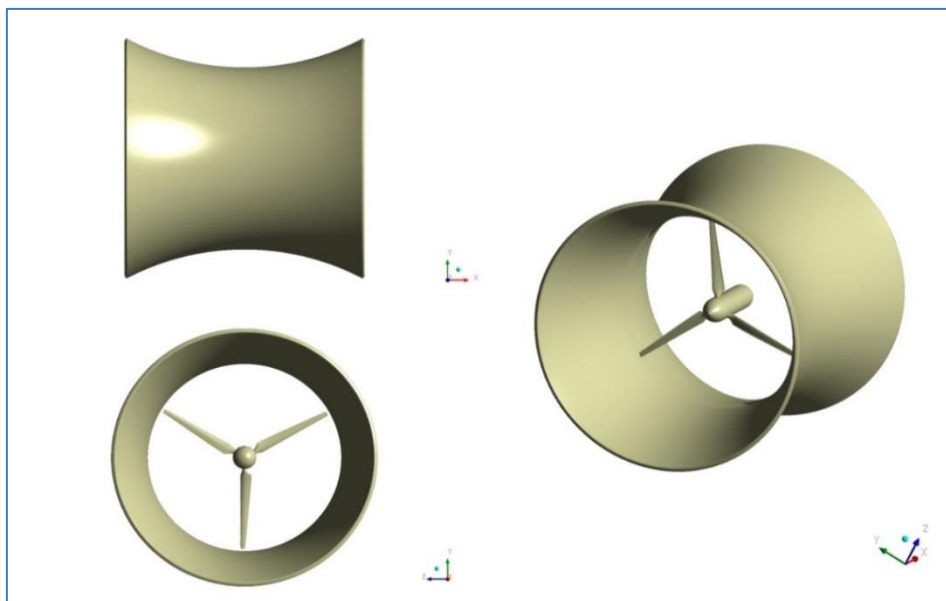
شکل ۱۵. نمودار خطوط جریان سرعت در صفحاتی قبل و بعد از ورود به کانال



شکل ۱۶. نمودار تغییرات ضریب رانش برای حالت با/ بدون کانال بر حسب TSR



شکل ۱۷. نمودار تغییرات ضریب توان برای حالت با/ بدون کانال بر حسب TSR



شکل ۱۸. طراحی توربین با کانال تقویت‌کننده جریان

چشمگیری است. همچنین سعی شده است، در پژوهش‌های آینده می‌توان اثر موج روی یک مدل مقیاس کامل توربین‌های اقیانوسی، با مقایسه با اطلاعات مرکز انرژی اقیانوسی اروپا را محاسبه کرد. سپس، پارامترهای هندسه پره توربین و پارامترهای مختلف هندسه کانال برای دریافت توان بالاتر در شرایط آبی مختلف، و از نظر هزینه و صرفه اقتصادی برای ساخت، بهینه‌سازی شود.

منابع

- [1]. M. Calaf, C. Meneveau, and J. Meyers, "Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers," *Phys. Fluids*, vol. 22, no. 1, p. 015110, 2010, doi: 10.1063/1.3291077.
- [2]. "No TitleLafta F, Hashim A, Power Production using Tidal Energy, *British Journal of Science*, 2012."
- [3]. A. F. Molland, A. S. Bahaj, J. R. Chaplin, and W. M. J. Batten, "Measurements and predictions of forces, pressures and cavitation on 2-D sections suitable for marine current turbines," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ.*, vol. 218, no. 2, pp. 127–138, 2004, doi: 10.1243/1475090041651412.
- [4]. A. Jimenez, A. Crespo, E. Migoya, and J. Garcia, "Advances in large-eddy simulation of a wind turbine wake," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 75, no. 1, 2007, doi: 10.1088/1742-6596/75/1/012041.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

طبق این مطالعه عددی، اثر افزایش دیفیوزر بر توربین جزرومدی به روش دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار گرفت. شبیه‌سازی برای اثر به کارگیری دیفیوزر تقویت‌کننده جریان بر یک توربین جریان جزرومدی محور افقی مقیاس آزمایشگاهی کامل، شامل ۳ پره، هاب و پایه، به روش عددی با مدل آشفتگی توربولانسی کی-امگا اس تی در نرم‌افزار دینامیک سیالات Ansys CFX به طور کامل انجام شد. ضرایب توان و رانش برای نسبت سرعت نوک پره برابر ۵ پارامترهایی هستند که برای ارزیابی تعداد شبکه‌های متفاوت روی حل عددی مورد ارزیابی قرار گرفته شده‌اند. طبق بررسی‌های صورت گرفته، روش اسلادینگ مش^۱ با موفقیت و درصد خطای اندک، توانست یک توربین جریان جزرومدی دوار را شبیه‌سازی کند و روش دینامیک سیالات محاسباتی، یک روش مناسب و معتبر برای بررسی اثر پارامترها بر توربین‌ها است. روش ناویر - استوکس رینولدز برای محاسبه گذرا جریان تورولانسی ناپایدار و پیش‌بینی اثر ویک که در چیدمان مزرعه توربین مؤثر است، پیش‌بینی کند. مطابق نتایج نیروی رانش وارد شده به پره توربین، با افزایش سرعت ناشی از افزودن دیفیوزر بر توربین حدود ۲/۵ برابر و توان گشتاوری آن حدود ۴ برابر افزایش یافته است، که مقدار

1. Sliding-Mesh

- [5]. R. Malki, A. J. Williams, T. N. Croft, M. Togneri, and I. Masters, "A coupled blade element momentum - Computational fluid dynamics model for evaluating tidal stream turbine performance," *Appl. Math. Model.*, vol. 37, no. 5, pp. 3006–3020, 2013, doi: 10.1016/j.apm.2012.07.025.
- [6]. Y. Bazilevs, M. Hsu, J. Kiendl, R. Wüchner, and K. Bletzinger, "3D Simulation of Wind Turbine Rotors at Full Scale. Part II: Fluid – Structure Interaction Modeling with Composite Blades," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, vol. 65, no. October 2010, pp. 236–253, 2011, doi: 10.1002/fld.
- [7]. N. Mehmood, Z. Liang, J. Khan, "Diffuser Augmented Horizontal Axis Tidal Current Turbines," *Engineering and Technology*, pp. 3522–3532, 2012.
- [8]. E. E. Ambarita, R. Azhari, and R. Irwansyah, "Experimental study on the optimum design of diffuser- augmented horizontal-axis tidal turbine," vol. 6, no. 5, pp. 776–786, 2022.
- [9]. N. W. Cresswell, G. L. Ingram, and R. G. Dominy, "The impact of diffuser augmentation on a tidal stream turbine," *Ocean Engineering*, vol. 108, pp. 155–163, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.033.
- [10]. D. L. F. Gaden and E. L. Bibeau, "A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydro kinetic turbines using a validated momentum source turbine model," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1152–1158, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.11.023.
- [11]. F. Baratchi, T. Jeans, L. A. Gerber, "A modified implementation of actuator line method for simulating ducted tidal turbines," *Ocean Engineering*, 2019, doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106586.
- [12]. R. Bontempo and M. Manna, "On the potential of the ideal diffuser augmented wind turbine: an investigation by means of a momentum theory approach and of a free-wake ring-vortex actuator disk model," *Energy Conversion and Management*, vol. 213, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112794.
- [13]. G. Civalier et al., "Aerostat Based Electrical Power Generation System," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, no. September, 2011.