

# Numerical Modeling of Effects of Geometrical Parameters on Amount of Torque Produced by a Floating Water Turbine in a Rectangular Open Channel


Ali asghar Bitarafan<sup>1</sup>, Ahmad Aghajani<sup>1</sup>, Mohammad Hossein Mirabi<sup>2</sup>, Foad Farhani<sup>3\*</sup>

1- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST).

2- PhD Student, Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST).

3- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST).

\* [f.farhani@irost.ir](mailto:f.farhani@irost.ir)

Received: 13 July 2020, Accepted: 23 September 2020  J. Hydraul. Homepage: [www.jhyd.iha.ir](http://www.jhyd.iha.ir)

## Abstract

**Introduction:** In this research work, the maximized transmitted torque due to the impulse from flowing water in an open channel has been studied for five types of cylindrical turbines to find the best water turbine in terms of maximum produced electrical energy. For this purpose, using numerical finite volume method, a set of turbine and blades, consisting of a 3-dimensional cylindrical water turbine of equal diameter and length (1 m), with five different blade configurations has been simulated. The simulations has been performed in a 10 m long and 3 m wide rectangular open channel with no inclination, subjected to a water flow of 2 m/s velocity. Considering the weight of various elements, the set of turbine and blades has been designed so that it remains floating in the channel at various immersion depths. Furthermore, with change in flow depth, the immersion depth remains constant. Considering the magnitude of the flowing water impulse in the channel, the corresponding torque transmitted from the water to the blades of the five types of turbines was determined and the maximum torque value was obtained.

**Methodology:** In the present research, five types of blades, attached to a 1 m length and 1 m diameter hollow cylindrical turbine have been used. The turbine floats on water at a particular depth in an open channel. The water speed in the open channel determines the torque due to the impulse from the flowing water. Considering the various blades, the resultant torque has been studied numerically using two-phase flow finite volume method. The material for the construction of the cylindrical turbine and the blades is dense polyethylene having a density of with 950 kg/m<sup>3</sup>. Moreover, the fluids considered in the finite volume numerical computations are water with a density of 998 kg/m<sup>3</sup>, and air with a density of 1 kg/m<sup>3</sup> at a constant temperature of 20° Celsius. The volume of hollow turbine cylinder is 0.78 m<sup>3</sup> and is filled with air. The three-dimensional flow channel, in which the turbine is placed, is a rectangular concrete channel of 10 m length and 3 m width, through which water flow at a depth of 35 cm. To avoid the effects of surrounding walls on the transfer of the flow impulse to the turbine, width of the channel has been considered slightly oversized. The roughness

values for the bottom surface of the concrete channel and the turbine walls and the blade set is 1 mm and 0.01 mm, respectively. The depth of the channel is constant at 1 m, which is equivalent to the average depth urban open channels.

**Results and Discussion:** The difference between type 1 and type 2 turbines is in the blade's angle along the turbine rotational axis. As a result, the produced torque by type 1 turbine is more than that of type 2. On one hand, increase in contact area between the blades and the flowing water in the channel results in higher torques. On the other hand, the angular shape of the blade increases the slip between the flow and the blades, which reduces the conversion of kinetic energy into static energy. Ultimately, the result of the above two phenomena in type 2 turbine is a reduction in the produced torque to about 15 N.m. In type 3 turbine, an increase in the produced torque was achieved through the increase in the number and shape of the turbine blades. Hence, the implementation of the aforementioned changes relative to type 2 turbine resulted in an increase in the produced torque to about 56 N.m. Therefore, increase in the number of blades and change in the blade shape in this type of turbine compensated for the effects of blade angle elongation in type 2 turbine. Furthermore, in type 4 turbine, the internal diameter of the blades was reduced. While the number of blades was increased, blades distribution angle was changed from  $45^\circ$  to a straight configuration, and the contact area also decreased. Consequently, the amount of flow slip along the blades also decreased. Specifically, the result of all the above mentioned changes in type 4 turbine was to reduce the produced torque to about 14 N.m compared to type 3 turbine. Therefore, the combined effects of reduction in the contact area and reduced internal diameter of the turbine blades is more dominant than the combined effect of increased number of blades and reduced flow slip on the blades. In type 5 turbine, number of blades was reduced by 10 and the blades internal diameter was tripled relative to type 4 turbine, which resulted in a significant increase in the produced torque. Therefore, type 5 turbine, as a floating turbine, may be recommended for production of electric energy in open channels.

**Conclusion:** Considering the results of the calculations, type 5 turbine with 21 semicircular shape blades, 11 cm in external diameter and 10.5 cm internal diameter, has a higher capacity to produce more torque compared to other types of turbine studied. The factors affecting the final produced torque include the contact area between the blades and the flowing water in the channel, the length of the blades along the turbine axis, the extent of slip of flow when facing the turbine blades and the number of blades. The produced torque by type 5 turbine is 458.96 N.m, which is the highest among the turbine types studied in this research.

**Keywords:** Hydraulic Turbine, Computational Fluid Dynamics, Open Channel Flow.



© 2021 Iranian Hydraulic Association, Tehran, Iran.  
This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

# مدل سازی عددی تاثیر پارامترهای هندسی توربین آبی شناور بر میزان گشتاور تولیدی در کانال روباز مستطیلی

علی اصغر بیطرفان<sup>۱</sup>، احمد آقاجانی<sup>۱</sup>، محمدحسین میرآبی<sup>۲</sup>، فواد فرحانی<sup>۳</sup>

۱- عضو هیات علمی پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران.

۲- دانشجوی دکترای تخصصی، پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران.

۳- عضو هیات علمی پژوهشکده مکانیک، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران.

\* f.farhani@irost.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲ و ب‌گاه نشریه هیدرولیک: www.jhyd.iha.ir

**چکیده:** در این تحقیق، میزان گشتاور انتقال یافته بهینه، از تکانه جریان آب جاری در یک کانال روباز، به پنج نوع توربین استوانه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته است. هدف از انجام پژوهش، یافتن توربین آبی مناسب، جهت تولید انرژی الکتریکی بیشینه می‌باشد. برای انجام این کار، یک توربین استوانه‌ای سه‌بعدی، به قطر و طول ۱ متر، با پنج نوع پره، به شکل‌های مختلف، با کمک روش عددی حجم محدود، شبیه‌سازی گردید. مجموعه توربین و پره‌ها، در یک کانال مستطیلی روباز بدون شیب، به طول ۱۰ متر و عرض ۳ متر، و سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه، قرار گرفته‌اند. مجموعه توربین و پره‌ها، به طریقی طراحی شده‌اند که با توجه به وزنشان، به صورت شناور در عمق‌های استغراق مختلف، داخل کانال قرار گیرند، و با تغییر عمق جریان، عمق استغراق مورد نظر ثابت بماند. با توجه به مقدار تکانه جریان آب جاری در کانال، میزان گشتاور انتقال یافته از جریان به پره‌های پنج نوع توربین مورد نظر، محاسبه شده و مقدار بیشینه آن بدست آمد. نتایج نشان می‌دهد که، بکارگیری توربین نوع پنج، با پره‌هایی گسترش یافته به شکل نیم‌دایره در امتداد محور توربین، به تعداد ۲۱ عدد، و قطر داخلی ۱۰.۵ سانتیمتر، بیشترین مقدار گشتاور، برابر ۴۵۸.۹۶ نیوتن در متر را، حاصل می‌آورد. لذا می‌توان به کمک آن، ضمن استفاده از یک مولد الکتریکی مناسب، انرژی الکتریکی بیشینه را تولید نمود. می‌باشد.

**کلید واژگان:** توربین آبی شناور، دینامیک سیالات محاسباتی، جریان کانال روباز.

## ۱- مقدمه

فناوری مولدهای انرژی الکتریکی، آن‌ها را به یکی از پسندیده و متداول‌ترین روش‌های تولید انرژی‌های سبز، تبدیل کرده است. مولدهای موجود، به سادگی با تبدیل انرژی مکانیکی دورانی، به انرژی الکتریکی، الکتریسیته لازم برای استفاده در زمینه‌های مختلف را فراهم می‌آورند. با توجه به وجود مسیرهای طولانی در سازه‌های انتقال آب، امکان استفاده از مولدهای یادشده در طول مسیر، امری تامل‌برانگیز است. استفاده عمده چنین آبراهه‌هایی، گردآوری آبهای سطحی، و یا بخش کشاورزی است. حتی مسیرهای پیش‌بینی شده در هنگام رخداد بارندگی‌های فصلی نیز، امکان استفاده موسمی را دارند. وجود شیب‌های مختلف در مسیر جریان، سرعت انتقال آب را در حد قابل

جریان آب‌های جاری، از جمله منابع‌های آزاد و در دسترس انرژی به‌شمار می‌آیند. با توجه به رشد جمعیت و تقاضای زیاد مصرف انرژی، و همچنین کمبود منابع فسیلی موجود، استفاده از منابع انرژی‌های نوین، می‌تواند کمک شایانی به شرایط کنونی کند. وجود مسیرها و آبراهه‌های روباز طویل در کشور، قابلیت (پتانسیل) بهره‌وری بالایی را برای استحصال انرژی ایجاد کرده است. با توجه به اینکه آبراهه‌ها و مسیرهای یادشده، کاربری خاصی غیر از سازوکار انتقال ندارند، لذا می‌توان با قرار دادن ادوات مناسب تبدیل انرژی، از آنها بهره‌برداری کرد. عمده انرژی حاصل از این جریان‌های آزاد، انرژی الکتریکی است. فراوانی و رایج بودن

تایید کرد. همچنین باتوجه به میزان گشتاور تولیدی و سرعت دورانی، انتقال فشار پویایی از آب جاری، روی پره‌ها، تابعی از عمق جریان است. (Yang et al. (2015) برپایه روش حالت- مکان، از معادله‌های ریاضی خطی، برای ارزیابی جریان گذرای آبراهه روباز پایین دست، بهره‌جستند. مدل ایشان یک مدل کشسانی خطی برای توضیح ضربه قوچ می‌باشد. برای بررسی درستی عملکرد، از چندین بنچ‌مارک به دست آمده از روش عددی اختلاف محدود، استفاده شد. سپس مدل ایشان، با توجه به نتایج، واسنجی (کالیبراسیون)، و اثرگذاری وجود مخزن موج‌گیر تحلیل شد. نتایج به دست آمده نشان می‌داد که اثرگذاری پایین دست جریان در آبراهه روباز، روی نوسان‌های سطح آب درون مخزن موج‌گیر، قابل توجه می‌باشد. از این موضوع می‌توان در بهبود عملکرد توربین‌های آبی، بهره‌جست. (Nakashima et al. (2016) توربین آبی داریوس را، با نصب سرریز و نازل در قسمت بالادست آن، بررسی کردند. هدف اصلی آنان از این پژوهش، ارزیابی شکل نازل‌ها، بر عملکرد توربین یادشده، در آبراهه روباز بود. نتایج نشان داد که شکل نازل با همگرایی بیشتر، توان بیشتری را برای توربین حاصل می‌کند. همچنین ایشان برای درک بهتر رفتار سیال در مجاورت توربین، از یک مدل سازی عددی دوبعدی نیز بهره‌جستند. (Talukdar et al. (2018) بر روی انتقال انرژی جنبشی جریان، به پره‌های مارپیچ توربین محور عمودی، بررسی و ارزیابی‌هایی را صورت دادند. هدف از این پژوهش، بررسی میزان انرژی الکتریکی تولیدی است. پس از انجام بررسی‌های روی توربین مستقر شده در یک آبراهه روباز، با انواع مختلف دبی جریان، مشخص شد که با کاهش سطح غوطه‌وری توربین، ضریب توان آن کاهش می‌یابد. با توجه به نوع پره توربین NACA0020، نسبت استحکام و نسبت سرعت نوع توربین، معیار قیاس قرار گرفتند. همچنین تغییرپذیری‌های آنها نسبت به یکدیگر، ارزیابی شد. (Pandey et al. (2019) تحقیقاتی را روی سازه‌های آبگیر پایین دست رودخانه‌ها، برای انتقال به توربین آبی انجام دادند. آنان دریافتند که رسوب‌های حمل شده توسط جریان آب در درون آبگیرهای همگرا شونده، از جمله بزرگترین کاستی‌های کنونی در توربین‌های آبی است. این موضوع

استحصالی، مستعد ایجاد تکانه می‌سازد. این تکانه و انرژی موجود جریان آب در مسیرهای طولیل انتقال، به‌طور عمده بدون استفاده و بهره‌برداری تبدیل انرژی، به مقصد می‌رسد. بنابراین، وجود چنین منابع انرژی جنبشی آزاد، از جمله توان بالقوه و قابلیت‌های استفاده مناسب، برای تولید انرژی الکتریکی است. طولانی بودن عمده مسیرهای انتقال، امکان نصب چندین، و گاهی چندصد مولد انرژی الکتریکی را فراهم می‌آورند. عملکرد همزمان آنها در قالب گروه‌های مجاور یکدیگر، می‌تواند انرژی الکتریکی قابل توجهی را فراهم کرده، و در مصرف‌های مختلف مورد نیاز، به‌کار گرفته شوند. شناخت فرآیند تبدیل انرژی جنبشی آزاد سیال جاری، به انرژی الکتریکی، مستلزم درک بهینه و بررسی رفتار سیال در مجاورت ادوات مکانیکی موجود است. یکی از رایج‌ترین ادوات مکانیکی تبدیل در مولدهای انرژی الکتریکی، توربین‌های آبی هستند. این توربین‌ها در انواع و شکل‌های مختلف تولید می‌شوند. نکته مهم، میزان توانایی انتقال تکانه سیال جاری، به شفت مولد الکتریکی است. در صورتی که این انتقال با بیشینه میزان ممکن صورت پذیرد، میزان سرعت دورانی توربین افزایش یافته و در پی آن میزان تولید انرژی الکتریکی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، هندسه و شکل توربین‌های آبی، نقش بسیار مهمی در میزان انتقال تکانه جریان را ایفا می‌کنند. بررسی‌های مختلفی پیرامون چگونگی طراحی توربین‌های آبی انجام پذیرفته است. (Pelz (2011) عملکرد توربین آبی شناور در آبراهه روباز مستطیلی را ارزیابی و دریافت که حد بالای معادله انرژی توان تولیدی، نمی‌تواند از یک میزان قابل پیش‌بینی، بیشتر باشد. این مقدار، در قالب یک معادله معرفی شد. باتوجه به محاسبات بدون بعد انجام پذیرفته، ضریب عملکرد این توربین، با توربین بادی بررسی شده توسط آلبرت وتز، مقایسه شد. (Shimomura et al. (2013) برای مدل سازی عددی میزان گشتاور تولیدی در توربین‌های جریان محوری ارشمیدسی، از روش شبیه سازی ذرات متحرک بهره‌جستند. آنان برای ارزیابی صحت مدل عددی، از جریان خروجی در پایین دست یک سد استفاده کردند. نتایج به دست آمده از تحلیل توربین پیچشی ارشمیدس در آبراهه روباز، در شرایط بی باری روی شفت، دقت مدل را

آبراهه روباز، میزان گشتاور ناشی از انتقال تکانه جریان را مشخص کرده و با توجه به انواع پره‌های مذکور، گشتاورهای حاصله، با کمک روش عددی حجم محدود جریان دو جزئی (فازی)، ارزیابی قرار شده‌است.

## ۲- معادلات حاکم بر جریان

برای بررسی میزان عمق استغراق توربین شناور توخالی، با ضخامت جداره مشخص در شکل‌های مختلف، می‌بایست حجم و جرم آن را محاسبه کرد. با توجه به ویژگی فیزیکی مواد به کار رفته در ساخت مجموعه توربین و پره‌های آن، میزان جرم آن قابل محاسبه است. جنس مواد به کار رفته در ساخت توربین، پلی اتیلن چگال ۱ بوده، و ضخامت دیواره آن نیز متغیر است. اهمیت این موضوع، در محاسبه میزان عمق استغراق می‌باشد. با توجه به این عمق، میزان تکانه انتقال یافته از جریان به پره‌های توربین، بهینه شده، و اصل شناوری اجسام با چگالی کمتر از چگالی آب، عمق مورد نیاز را تامین می‌کند. هرگاه جسمی به صورت شناور روی آب قرار گیرد، حجم آب جابه‌جا شده، از معادله شماره ۱ محاسبه می‌شود.

$$V = \int_{s_0} Z n_v ds \quad (1)$$

در اینجا  $s_0$  سطح خیس شده جسم درون آب،  $n_v$  بردار نرمال سطح مذکور و  $Z$  میزان عمق سطح خیس شده نسبت به سطح آزاد آب است. با محاسبه انتگرال بالا، می‌توان میزان نیروی وارد بر جسم شناور، از طرف آب را محاسبه کرد. با توجه به وزن توربین و نیروی یادشده، پس از برقراری تعادل، عمق استغراق مشخص می‌شود. نیروی شناوری و محل اعمال آن، از معادله‌های شماره ۲ و ۳ به دست می‌آیند.

$$F = \rho g V \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\rho g \int_{s_0} \bar{x} Z n_v ds}{F} \quad (3)$$

$X$  میزان عمق استغراق مرکز حجم توربین می‌باشد. جریان سیال در حال حرکت با سطح آزاد، پره‌های توربین یادشده را تحت اثر نیرو قرار داده و موجب چرخش آن می‌شود.

باعث کاهش قابل توجه بازدهی توربین می‌شود. ارزیابی میزان رسوب‌های، باتوجه به شکل آبراهه و میزان دبی جریان، صورت پذیرفت. ایشان برای ارزیابی نتایج پژوهش، از هر دو روش عددی و آزمایشگاهی، بهره‌جستند. این موضوع موید دقت نتایج نیز بود. (Nishi et al. (2019) روی توربین جریان محوری، در یک آبراهه روباز، تحقیقاتی را انجام دادند. پیچیدگی رفتار سیال در مجاورت توربین، به علت وجود شرایط سطح آزاد جریان، و همچنین نوع درونی و بیرونی جریان، پیش‌بینی میزان عملکرد توربین را تحت الشعاع قرار می‌دهد. هدف پژوهش ایشان، ارزیابی جریان مجاور توربین در آبراهه‌های روباز کم‌عمق، به کمک روش PIV و تحلیل چند جزئی (فازی) است. نتایج نشان می‌دهد که رفتار جریان، وابستگی زیادی به سطح آزاد و عمق بستر آبراهه داشته، و جریان‌های چرخشی ایجاد شده، می‌تواند تاثیرهای چندی روی عملکرد توربین داشته‌باشد. در این پژوهش، هدف اصلی و نوآورانه، بررسی و تحلیل اثرگذاری‌های تغییر شکل و شمار پره‌های توربین آبی استوانه‌ای، در ایجاد بیشترین گشتاور دورانی ممکن است. تغییر شکل پره‌ها شامل تغییر در ابعاد، راستای گسترش در طول توربین و رخ‌نمای (پروفیل) آنها می‌باشد. همچنین ایجاد عمق شناوری فراخور هر توربین، ضمن اعمال تغییرپذیری‌ها در چگالی کل توربین (شکل پره‌ها و ضخامت ورق به کار رفته)، بر ایجاد گشتاور بیشینه موثر است. لازم به توضیح است که به صورت انحصاری برای این نوع از توربین‌های استوانه‌ای به کار رفته در آبراهه‌های خاص انتقال آب، بررسی‌های و ارزیابی توانایی هیدرولیکی در تولید انرژی الکتریکی به شکل کنونی، انجام پذیرفته‌است. لذا ضرورت این موضوع ایجاب می‌کند که بررسی‌های پویایی (دینامیک) سیال‌های محاسباتی و در پی آن ساخت مدل فیزیکی در دستور کار این پژوهش قرار گیرد. در این پژوهش، از پنج نوع مختلف پره مستقر روی یک توربین استوانه‌ای توخالی، به طول و قطر ۱ متر، استفاده گردیده‌است. توربین مذکور به صورت شناور بر روی جریان آب درون آبراهه قرار گرفته و باتوجه به وزن مجموع، در عمق مشخصی شناور می‌شود. سرعت جریان آب درون

<sup>1</sup> HDPE

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial(-\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}'_k \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_k} = & -\frac{\partial}{\partial x_k} \left( \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j \bar{u}'_k + p(\delta_{kj} \bar{u}'_i + \delta_{ik} \bar{u}'_j) \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\bar{u}'_i \bar{u}'_j) \right) \\ & - \rho \left( \bar{u}'_i \bar{u}'_k \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + \bar{u}'_j \bar{u}'_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) \\ & + p \left( \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}'_j}{\partial x_k} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \\ & + \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} \left( -2\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

در معادله‌های بالا  $ui$  مولفه‌های بردار سرعت جریان،  $p$  مولفه فشار ایستایی جریان،  $u' u' j$  مولفه‌های تانسور تنش رینولدز و  $\varepsilon$  نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته می‌باشند. همچنین میزان‌های  $C_{\varepsilon 1}$ ،  $C_{\varepsilon 2}$  و  $\sigma_\varepsilon$  به ترتیب برابر ۱.۴۴، ۱.۹۲ و ۱ در نظر گرفته شده‌اند. میزان  $C_{\varepsilon 3}$  نیز تابعی از سرعت سیال است. برای مدل‌سازی عددی جریان در مجاورت دیواره نیز، از تابع دیواره استاندارد، و شرط مرزی متقارن استفاده شده. همچنین شرط نبود لغزش در مرزهای دیواره برقرار شده. برای گسسته‌سازی معادله‌های در دامنه محاسباتی سه‌بعدی، روش حجم محدود به کار رفته و هر یک از معادله‌های انتقال در حجم‌های کنترل دامنه، مولفه‌های مجهول را به کمک الگوریتم سیمپل ۳ تحلیل می‌کند. برای محاسبه میزان گشتاور انتقال یافته و در پی آن سرعت چرخش توربین، مجموعه توربین و پره‌ها به صورت صلب در نظر گرفته شده‌است. این موضوع بدین معناست که از تنش‌های کششی و فشاری اندک ایجاد شده در توربین، صرف‌نظر شده‌است. لازم به توضیح است که مدل‌سازی عددی به صورت جریان دوجزئی مشتمل بر هوا- آب

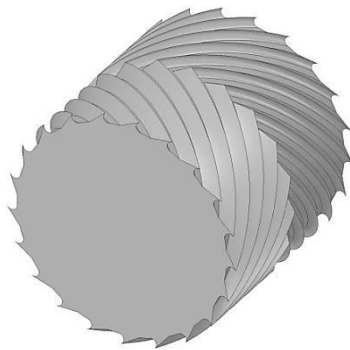
میزان بهینه این عمق، بیشینه گشتاور انتقال یافته را موجب شده، و فراسنجه هیدرودینامیکی جریان، با کمک معادله‌های انتقال حاکم بر آن، محاسبه می‌شوند. معادله‌های به کار گرفته شده برای شبیه‌سازی عددی جریان، معادله‌های دیفرانسیل انتقال برای فراسنجه‌های هیدرودینامیکی جریان هستند. معادله‌های حاکم بر جریان، شامل معادله پیوستگی جریان تراکم‌ناپذیر (معادله شماره ۴)، معادلات ناویر استوکس آشفته (معادله شماره ۵) و معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفته، و استهلاک انرژی جنبشی آشفته (معادله‌های شماره ۶ و ۷)، از نوع متوسط‌گیری رینولدز ۲ در دامنه هندسی سیال هستند. در این تحقیق از مدل ریاضی آشفته‌گی تنش رینولدز استفاده شده‌است. علت انتخاب مدل ریاضی آشفته‌گی یادشده، انتقال تک‌تک مولفه‌های تانسور تنش رینولدز جریان، در معادله‌های انتقال مجزاست. دیگر معادله‌های ریاضی آشفته‌گی، از فرض ساده‌سازی شده بوزینسک استفاده کرده، که ناهمروند (ناایزوتروپیک) بودن آشفته‌گی را محدود به ناحیه‌های خاصی می‌کنند. آشفته‌گی حاصل، توسط ترم تولید انرژی جنبشی آشفته ایجاد و توسط ترم‌های انتشار مولکولی، انتشار آشفته و کرنش فشاری جریان، گسترش می‌یابد. مولفه‌های تانسور تنش رینولدز نیز به صورت ناهمروند، نوسانات را در دامنه مدل ایجاد می‌نمایند. این نوسان‌ها در قالب تغییرپذیری‌های زمانی فراسنجه‌های هیدرودینامیکی جریان مانند فشار ایستایی (استاتیکی) ظاهر می‌شوند. از جمله مهم‌ترین ترم‌های موجود در معادله انتقال آشفته‌گی تنش رینولدز، ترم کرنش فشاری است. این ترم، فشار نوسانی در یک راستا را به راستای دیگر مختصاتی منتقل کرده و مانند آنچه در طبیعت رخ می‌دهد، جریان را مدل می‌کند. لذا معادله ریاضی آشفته‌گی هفت معادله‌ای تنش رینولدز، گزینه مناسبی برای پیش‌بینی رفتار تصادفی ناهمروند فراسنجه‌های هیدرودینامیکی، در شرایط جریان دوجزئی است.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

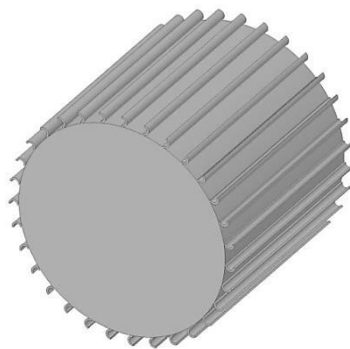
صورت پذیرفته است.

### ۳- ویژگی‌های هندسی دامنه و فیزیکی سیال

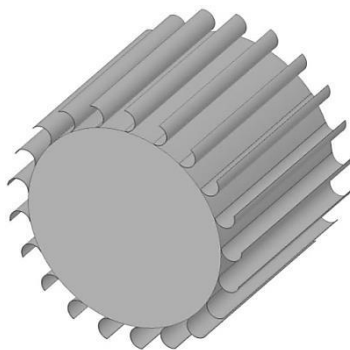
برای محاسبات میزان عمق استغراق توربین شناور، و همچنین میزان گشتاور انتقال یافته از تکانه جریان به توربین یادشده، پنج نوع مختلف از شکل پره، در نظر گرفته شده است. قطر توربین در تمامی آنها برابر ۱ متر، و طول آن نیز برابر ۱ متر بوده و توخالی است. هدف از انتخاب این طول، محاسبه میزان گشتاور حاصله، به ازاء یک متر طول است. همچنین توخالی بودن آن، کمک به شناوری، و استغراق عمق مد نظر می‌کند. میزان ضخامت جداره توربین‌ها با توجه به نوع ساخت، متغیر می‌باشد. این میزان متغیر ضخامت جداره با توجه به وزن مجموعه توربین، اثرگذاری مستقیم روی عمق استغراق آن دارد. شکل‌های شماره ۱ تا ۵، پره‌های به کاررفته روی استوانه توربین را نشان می‌دهند.



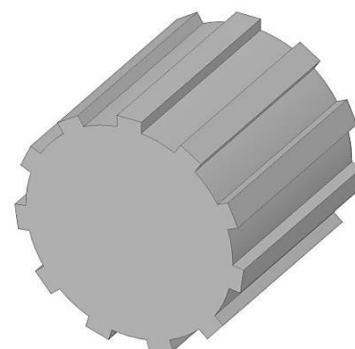
**Fig. 3** Type three turbine  
شکل ۳ توربین با پره نوع سه



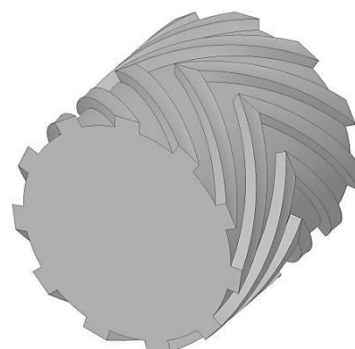
**Fig. 4** Type four turbine  
شکل ۴ توربین با پره نوع چهار



**Fig. 5** Type five turbine  
شکل ۵ توربین با پره نوع پنج



**Fig. 1** Type one turbine  
شکل ۱ توربین با پره نوع یک



**Fig. 2** Type two turbine  
شکل ۲ توربین با پره نوع دو

توربین نوع یک، دارای ۱۱ پره به ابعاد ۵.۴ سانتی‌متر در ۱۱.۶ سانتی‌متر است. همانطور که مشخص است، پره‌های این نوع توربین به صورت مستقیم در نظر گرفته شده‌اند. توربین نوع دو، دارای ۱۱ پره به ابعاد ۵.۴ سانتی‌متر در ۱۱.۶ سانتی‌متر بوده، با این تفاوت که طول پره‌ها از حالت مستقیم به حالت مورب با زاویه ۴۵ درجه تبدیل شده. توربین نوع سه، دارای ۲۱ پره است که از ترکیب یک نیم دایره به قطر ۵ سانتی‌متر و یال مورب به طول ۱۰ سانتی‌متر تشکیل یافته. طول این پره‌ها نیز به حالت مورب با زاویه ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند.

همچنین سیال به کار رفته در محاسبات عددی روش حجم محدود نیز، سیال آب با چگالی ۹۹۸ کیلوگرم بر مترمکعب، و سیال هوا با چگالی ۱ کیلوگرم بر مترمکعب، در دمای ثابت ۲۰ درجه سلسیوس می باشند. با توجه به ویژگی های فیزیکی مصالح به کار رفته در مدل، و همچنین هندسه هر یک از مجموعه توربین و پره ها، جدول شماره ۱ نشان دهنده میزان حجم، وزن و دیگر مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنهاست. راستای Z محور مختصات، موازی محور چرخش توربین می باشد. لازم به توضیح است که درونی استوانه استوانه ای توربین ها، خالی بوده (هوا به چگالی ۱ کیلوگرم بر مترمکعب) و حجم فضای خالی آن برابر ۰.۷۸ مترمکعب می باشد.

توربین نوع چهار، دارای ۳۱ پره بوده که شکل آن به صورت نیم دایره، و قطر بیرونی آن ۵ سانتی متر و قطر درونی ۳.۳۲ سانتی متر می باشد. طول پره ها به صورت مستقیم بوده و برابر طول توربین است. در نهایت توربین نوع پنج، دارای ۲۱ پره بوده که شکل آن مانند توربین نوع چهارم به صورت نیم دایره می باشد. قطر بیرونی این نیم دایره برابر ۱۱ سانتی متر و قطر درونی آن برابر ۱۰.۵ سانتی متر است. طول این پره ها نیز به صورت مستقیم در راستای طول توربین، توزیع شده است. برای محاسبه میزان عمق استغراق توربین شناور، می بایست ویژگی های فیزیکی مواد بکار رفته در ساخت مجموعه توربین و پره ها، مد نظر قرار گرفته شود. مصالح به کار رفته برای ساخت استوانه توربین و پره ها، پلی اتیلن چگال با چگالی برابر ۹۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است.

جدول ۱ ویژگی های فیزیکی و هندسی توربین با انواع پره های یاد شده

Table 1 Turbines physical and geometrical properties

Type	Solid Volume (10-2 m <sup>3</sup> )	Mass (kg)	Total Density (kg.m <sup>-3</sup> )	Ixx (kg.m <sup>2</sup> )	Iyy (kg.m <sup>2</sup> )	Izz (kg.m <sup>2</sup> )	Thickness (mm)
I	2.9837	28.345	36.15	6.371	6.371	6.324	5
II	3.3069	31.416	39.79	7.278	7.278	6.984	5
III	4.5834	43.542	53.86	9.809	9.809	9.137	7.5
IV	5.4069	51.366	62.71	12.475	12.475	12.243	8
V	5.4007	51.307	62.64	12.387	12.387	11.46	10

شرایط مرزی دیواره های مجاور، کاهش یابد. بر قسمت های کف آبراهه و دیواره توربین و مجموعه پره ها، شرایط مرزی دیواره استاندارد، و شرط بدون لغزش حاکم است. در قسمت ورودی جریان، شرط مرزی ورودی سرعت، و قسمت خروجی جریان، شرط مرزی خروجی فشار تعریف شده است. قسمت بالایی جریان نیز سطح مشترک با هوا، و شرط مرزی خروجی فشار است. راستای آبراهه نیز به صورت افقی، و بدون شیب در نظر گرفته شده است. شکل شماره ۶ چگونگی قرارگیری توربین در آبراهه مستطیلی را نشان می دهد.

شمار احجام کنترل در دامنه محاسباتی، برابر با ۱۵۰۰۰۰۰ عدد، و از نوع چهاروجهی هرمی است. نوع شبکه بندی به دلیل وجود انحنا در مجموعه توربین و پره ها، از نوع

دامنه آبراهه جریان روباز سه بعدی، که توربین یاد شده در درون آن قرار می گیرد، یک آبراهه مستطیلی بتنی، به طول ۱۰ متر و عرض ۳ متر است، که جریانی به عمق میانگین ۳۵ سانتی متر در آن جاری است. برای بدون تاثیر گذاری دیواره های جانبی روی انتقال تکانه جریان به توربین، عرض آبراهه، تا اندازه ای بزرگتر در نظر گرفته شده. زبری کف آبراهه بتنی برابر ۱ میلی متر، و زبری دیواره توربین و مجموعه پره ها برابر ۰.۰۱ میلی متر است. عمق آبراهه به صورت ثابت و برابر با ۱ متر، و معادل با عمق میانگین، در بیشتر آبراهه های روباز شهری لحاظ شده. برای جلوگیری از تاثیر دیواره های آبراهه بر هیدرودینامیک جریان توربین، شرایط مرزی دیواره ها به صورت متقارن تعریف شده، که با انجام این کار، اثر گذاری گرادیان سرعت ناشی از وجود



برابر چرخش، گشتاور بالاتر، توانایی بیشتری را برای چیره شدن بر آن خواهد داشت. بر مبنای محاسبات انجام شده، میزان عمق استغراق انواع پنج نوع توربین شناور، در جدول شماره ۲ نشان داده شده است. میزان این عمق، برابر است با فاصله پایین ترین لبه مستغرق شده پره توربین درون آب، تا سطح آزاد جریان است.

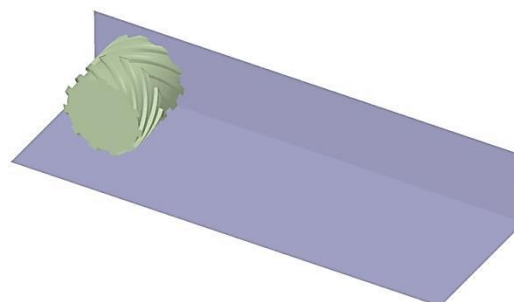
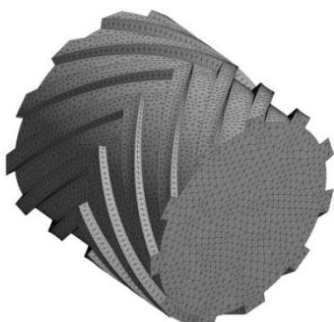


Fig. 6 Turbine place in open rectangular channel

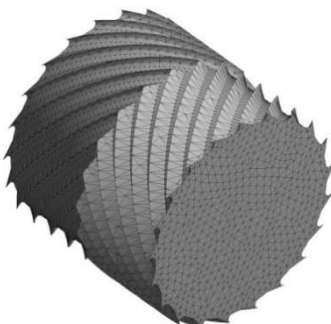
شکل ۶ محل قرارگیری توربین در آبراهه مستطیلی روباز



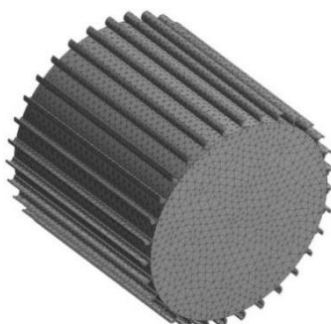
(a)



(b)



(c)



(d)

ناساختار یافته می باشد. دلیل این موضوع هماهنگی بهتر شبکه بندی روی سطح های منحنی هندسه مدل است. برای افزایش دقت، در قسمت های مجاور شرایط مرزی دیواره کف آبراهه و مجموعه توربین و پره ها، تراکم شبکه بندی بیشتری اعمال گردیده. با انجام این کار، محاسبه پارامترهای هیدرودینامیکی جریان نظیر سرعت و فشار استاتیکی، ضمن حساسیت بیشتری انجام می پذیرد. شکل های شماره ۷، شبکه بندی شرایط مرزی دیواره مجموعه توربین، و پره ها را نشان می دهد.

#### ۴- بحث و نتایج

همان گونه که بیان شد، برای محاسبه میزان گشتاور انتقال یافته از جریان آب آبراهه روباز، به مجموعه توربین چرخشی و پره های سه بعدی آن، از محاسبات روش حجم محدود استفاده شده است. پیش فرض های شکل توربین، مشتمل بر پنج نوع توربین با شمار و شکل پره های مختلف می باشد. هر کدام از توربین ها به صورت جدا در جریان قرار داده شده و با توجه به وزن و حجم آنها، میزان مشخصی درون آب جاری آبراهه، شناور گشته و عمق استغراقی را ایجاد می کنند. با توجه به سرعت ۲ متر بر ثانیه جریان آب آبراهه، هر کدام از توربین ها بنا به عمق استغراق مذکور، گشتاوری را از تکانه جریان دریافت کرده و توربین را به چرخش درمی آورند. میزان این گشتاور تولیدی در اثر انتقال تکانه جریان آب، از لحاظ تولید الکتریسیته توسط مولد انرژی الکتریکی متصل شده به شفت توربین، بسیار با اهمیت است. با ایجاد گشتاور بالاتر توسط جریان، توانایی چرخش مولد انرژی الکتریکی توسط توربین افزایش می یابد. بنابراین، در صورت ایجاد مقاومت توسط مولد یادشده در

برابر می‌باشند، لذا تغییر الگوی حرکتی جریان آب داخل آبراهه روباز، موثر از شکل و شمار پره‌های مستغرق توربین است. در توربین نوع یک نشان داده شده در شکل شماره ۸، به دلیل اینکه شکل پره‌ها به صورت مستقیم می‌باشند، جدایش جریان آب از آخرین پره مستغرق، به طور کامل مشهود است. این جدایش، باعث می‌شود که عمق جریان

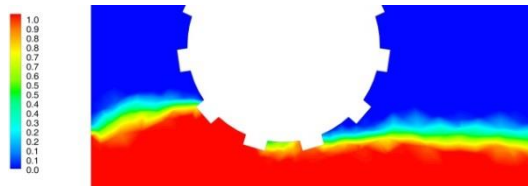


Fig. 8 VOF contour near type one turbine

شکل ۸ تراز حجم سیال آب در مجاورت توربین نوع یک

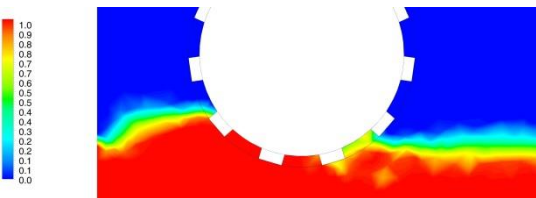


Fig. 9 VOF contour near type two turbine

شکل ۹ تراز حجم سیال آب در مجاورت توربین نوع دو

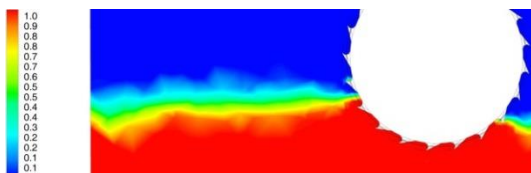


Fig. 10 VOF contour near type three turbine

شکل ۱۰ تراز حجم سیال آب در مجاورت توربین نوع سه

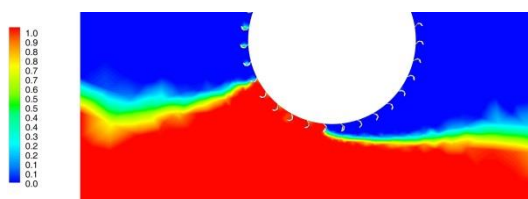


Fig. 11 VOF contour near type four turbine

شکل ۱۱ تراز حجم سیال آب در مجاورت توربین نوع چهار

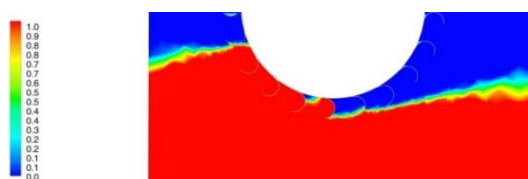
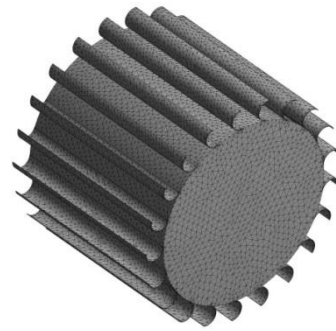


Fig. 12 VOF contour near type five turbine

شکل ۱۲ تراز حجم سیال آب در مجاورت توربین نوع پنج



(e)

Fig. 7 Meshed turbine (a) type one, (b) type two, (c) type three, (d) type four, (e) type five

شکل ۷ توربین شبکه‌بندی شده با پره (a) نوع یک، (b) نوع

دو، (c) نوع سه، (d) نوع چهار، (e) نوع پنج

جدول ۲ میزان عمق استغراق توربین شناور روی آب

Table 2 Turbine floating depth in water

Type	Floating Depth (cm)
I	12.55
II	14.1
III	15.64
IV	16.1
V	22.14

با توجه چگالی شکل توربین‌های مختلف، و اندازه و شکل پره‌ها، میزان عمق استغراق هر یک از آنها، با دیگری متفاوت می‌باشند. میزان این عمق به اندازه‌ای است که، جریان بتواند تکانه خود را با پره‌ها رد و بدل کرده و گشتاور دورانی ایجاد کند. جریان آب درون آبراهه مستطیلی، با سرعت ۲ متر بر ثانیه در حال حرکت می‌باشد. با توجه به میزان عمق استغراق توربین‌ها، میزان فشار پویایی جریان، در اثر برخورد به پره‌های توربین، تبدیل به فشار ایستایی می‌شود. در این حین، همه انرژی جنبشی جریان در مقابل پره‌ها، تبدیل به انرژی ایستایی شده و با پدید آوردن محدوده‌های ایستایی در برابر آنها، گشتاور لازم برای آغاز به چرخش توربین را، ایجاد می‌کند. شکل‌های شماره ۸ تا ۱۲، نشان دهنده برش عرضی از الگوی حرکت جریان آب، در زیر توربین با پره‌های مختلف است.

همان گونه که مشخص است، هر توربین با توجه به میزان عمق استغراق خود، باعث ایجاد تغییرپذیری‌هایی در الگوی حرکت جریان زیرین و مجاور خود، می‌شود. با عنایت به اینکه، سرعت جریان در همه پنج نوع توربین، با یکدیگر

شدت این پدیده در توربین نوع پنجم، بیشتر است. تفاوت‌های عمده موجود بین توربین نوع چهار و پنج، شمار سطوح پره‌ها می‌باشند. ضمن مقایسه بین دو شکل شماره ۱۱ و ۱۲، می‌توان این‌گونه برداشت کرد که شدت پرش هیدرولیکی ایجاد شده در توربین نوع پنج، در مقایسه با توربین نوع چهار، گواهِ انتقال تکانه بیشتر جریان، توسط سطوح بزرگتر پره‌های توربین نوع پنج است. اختلاف زیاد عمق جریان آب داخل آبراهه در قسمت بالادست، بعد از توربین و پایین‌دست، نشان می‌دهد که جریان آب پس از انتقال تکانه خود به پره‌های توربین، و ایجاد گشتاور لازم، از قسمت زیرین توربین عبور کرده و با توجه به اینکه دچار کاهش تکانه ناشی از انتقال بوده، پرش هیدرولیکی را ایجاد می‌کند. در حقیقت انتقال تکانه جریان به توربین، در نقش استهلاک انرژی برای جریان آب آبراهه ظاهر شده است. برای مشخص شدن میزان تکانه انتقال یافته، می‌بایست میزان فشارهای ایستایی ایجاد شده روی هر یک از پره‌های موجود در انواع پنج توربین مورد بررسی، ارزیابی شدند. شکل‌های شماره ۱۳ تا ۱۷ چگونگی توزیع فشار ایستایی، بر روی پره‌ها را نمایش می‌دهند.

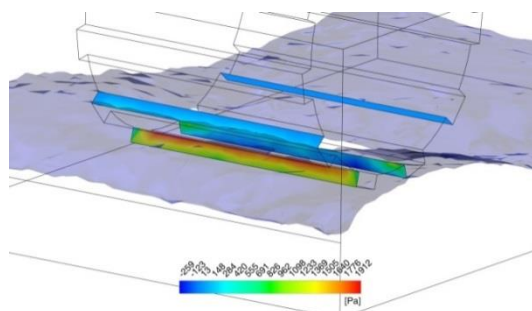


Fig.13 Static pressure on type one turbine's impellers

شکل ۱۳ فشار ایستایی روی پره‌های توربین نوع یک

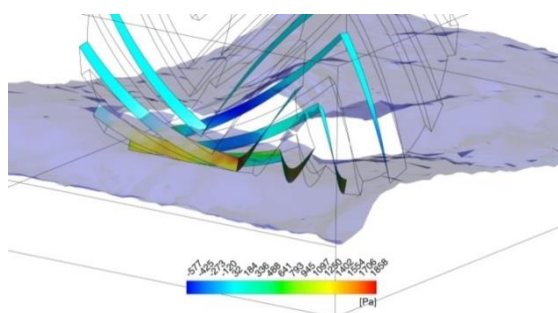
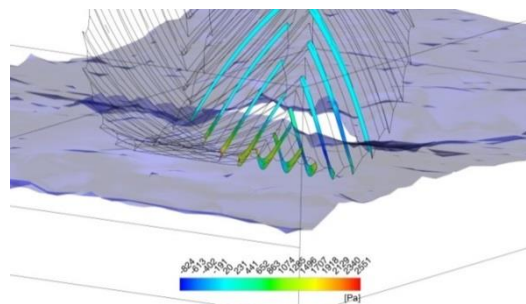


Fig.14 Static pressure on type two turbine's impellers

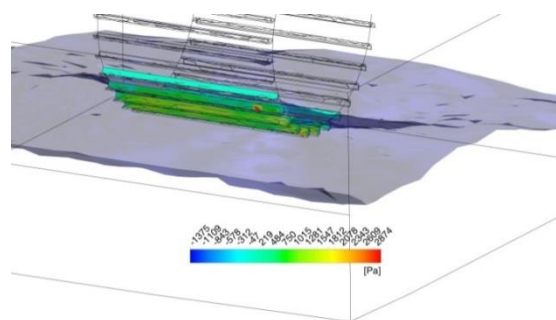
شکل ۱۴ فشار ایستایی روی پره‌های توربین نوع دو

در پایین‌دست کاهش یافته، و در نتیجه، عمق قسمت‌های بالادست جریان، تحت تاثیر وجود پره‌های توربین، افزایش یابد. این افزایش عمق، به علت انتقال تکانه از جریان آب به توربین بوده و مقاومت مجموعه توربین، الگوی حرکت آب را تغییر می‌دهد. توربین نوع دو، با توجه به شکل نامستقیم و زاویه‌دار پره‌های آن، جدایش کمتری را نسبت به توربین نوع اول ایجاد می‌کند. این الگو به‌طور کامل در شکل شماره ۹ مشخص است. به‌علت شکل زاویه‌دار پره‌ها، جریان تمایل پیوستگی بیشتری را به قسمت زیرین توربین، از خود نشان می‌دهد. هر دو توربین نوع یک و دو، به‌دلیل اینکه مقطع پره‌ها، به شکل مستطیل است، انتظار می‌رود بخشی از جریان سیال پس از برخورد به آنها، از لبه پره خارج شده و دوباره وارد جریان آزاد شود. این پدیده باعث می‌شود که همه تکانه سیال، به پره‌های توربین انتقال نیافته، و درصدی از آن صرف ایجاد گشتاور چرخشی توربین شود. در توربین نوع سه، ضلع عمود مستطیل مقطع پره، با شکل یک نیم‌دایره جایگزین شده. همان‌طور که در شکل شماره ۱۰ مشخص است، این انتظار وجود دارد که، با انجام چنین کاری و افزایش شمار پره‌های توربین مستغرق شده در آب آبراهه، میزان تکانه انتقال یافته از جریان، در مقایسه با توربین نوع دو، دستخوش افزایش شود. الگوی چسبندگی آب در پایین‌دست جریان، همانند توربین نوع دو، به‌علت شکل مورب امتداد پره‌های توربین، مشهود می‌باشد. زاویه ۴۵ درجه امتداد پره‌ها، باعث می‌شود که جریان گذرا در زیر توربین، به‌کلی در دام پره‌ها قرار نگیرد و مقداری هدررفت در انتقال تکانه جریان رخ دهد. از سوی دیگر به علت افزایش سطح پره‌ها، این امکان وجود دارد که مقداری از این هدر رفت، به‌صورت نسبی، جبران شود. لذا می‌بایست میزان فشار ایستایی روی پره‌ها بررسی شده و در نهایت میزان گشتاور تولیدی محاسبه شود. با انجام چنین کاری می‌توان دریافت که کدامیک از اثرگذاری‌های انحنا در شکل پره‌ها، و در پی آن افزایش سطح تماس جریان، می‌تواند عامل اثرگذار در انتقال تکانه، و تولید گشتاور چرخشی باشد. در توربین نوع چهار و پنج، شکل نیم‌دایره مستقیم و بدون زاویه پره‌ها، الگوی جریان را نسبت به سه نوع توربین پیشین، دستخوش تغییر می‌کند. در شکل‌های شماره ۱۱ و ۱۲، جریان در پایین‌دست آبراهه، دچار پرش هیدرولیکی شده و عمق آن افزایش یافته‌است. باتوجه به شکل شماره ۱۲،

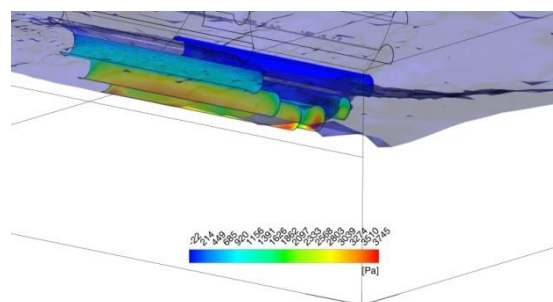
کرده، و امکان عبور جریان آب با مقاومت به نسبت کمتر، علت این موضوع می باشد. شایان یادآوری است که، به علت افزایش سطوح پره های توربین نوع دو، نسبت به توربین نوع یک، این موضوع بخشی از افت گشتاور تولیدی را جبران می کند. زیرا با افزایش سطح برخورد جریان آب به پره ها، میزان فشار ایستایی میانگین، و نهایتاً میزان گشتاور تولیدی، افزایش می یابد. انتظار می رود که میزان گشتاور تولیدی توربین نوع دو، از نوع یک کمتر بوده، اما میزان آنها به یکدیگر نزدیک باشد. در توربین نوع سه، با توجه به اینکه مقداری از سطح مقطع پره ها، کاسته شده، اما بر شمار آنها افزوده شده، لذا انتظار می رود میزان گشتاور تولیدی نسبت به توربین نوع یک و نوع دو، افزایش داشته باشد. شکل شماره ۱۵ توزیع فشار ایستایی را روی پره های توربین نوع سه را نشان می دهد. این توزیع به صورت متقارن روی پره های سمت دیگر نیز قرار دارد. هر دو فراسنجه شمار پره های توربین و سطح برخورد جریان، در ایجاد گشتاور دورانی موثرند. در دو توربین نوع دو و سه، در محل همگرایی پره های دوطرف، بیشترین توزیع فشار ایستایی تولید می شود. زیرا جریان گذر کرده بر سطح پره های توربین، در قسمت همگرایی یاد شده، تولید فشار ایستایی بیشتری را نموده، و در محل یاد شده، میزان انرژی جنبشی بیشتری به انرژی ایستایی، تبدیل می شود. شکل شماره ۱۶، نشان دهنده وضعیت توزیع فشار ایستایی روی پره های توربین نوع چهار است. در این حالت سطح تماس بین پره و جریان آب کاهش پیدا کرده، اما بر شمار پره های افزوده شده است. همچنین در شکل شماره ۱۷، با کاهش تعداد پره ها، و افزایش سطح تماس آن با جریان، انتظار می رود میزان گشتاور تولیدی، نسبت به توربین نوع چهار، افزایش یافته باشد. با توجه به شکل شماره ۱۷، میزان متوسط فشار ایستایی روی پره های مستغرق نیز، نسبت به سایر توربین ها، دارای افزایش است. میانگین فشار ایستایی توزیع شده بر روی پره ها از یک سو، و سطوح اعمال فشار استاتیکی از سوی دیگر، میزان گشتاور تولیدی را برای این نوع توربین را، مشخص می کند. جدول شماره ۳، نشان دهنده میزان گشتاور تولیدی، توسط هر کدام از توربین های نوع یک الی پنج می باشد. همان طور که مشخص است، تفاوت توربین نوع یک و نوع دو، در زاویه امتداد پره های توربین است. بنابراین، در پی آن گشتاور تولیدی توربین نوع یک، بیشتر از توربین نوع دو است. از



**Fig.15** Static pressure on type three turbine's impellers  
شکل ۱۵ فشار ایستایی روی پره های توربین نوع سه



**Fig.16** Static pressure on type four turbine's impellers  
شکل ۱۶ فشار ایستایی روی پره های توربین نوع چهار



**Fig.17** Static pressure on type five turbine's impellers  
شکل ۱۷ فشار ایستایی روی پره های توربین نوع پنج

به علت اینکه تکانه جریان آب جاری در آبراهه روباز، پس از اصابت به پره های توربین، تبدیل به فشار ایستایی شده، لذا توزیع فشار ایستایی موجود روی پره ها ایجاد می شود. این فشار ایستایی، با توجه به سطح مشخص پره ها و فاصله آنها از محور دوران توربین، ایجاد گشتاور چرخشی کرده. با توجه به شکل های شماره ۱۳ و ۱۴، میزان فشار ایستایی میانگین توزیع یافته روی پره های توربین نوع یک و نوع دو، محاسبه شده اند. با توجه به اینکه مقطع پره های توربین نوع دو، همانند پره های توربین نوع یک بوده، و تنها تفاوت آنها با یکدیگر، در زاویه امتداد پره ها است، لذا مقدار فشار ایستایی میانگین در توربین نوع دو، تا حدودی کاهش پیدا

در حدود ۳ برابر، نسبت به توربین نوع چهار، میزان گشتاور تولیدی، افزایش چشمگیری داشته است. این موضوع نشان دهنده اهمیت، میزان سطح برخورد جریان آب آبراهه، بدون لغزش، و تبدیل انرژی جنبشی به انرژی ایستایی است. همچنین میزان عمق استغراق توربین شناور نیز، دارای اهمیت زیادی می باشد. با توجه به جدول شماره ۲، میزان عمق استغراق توربین شناور نوع پنج، نسبت به دیگر توربین های دیگر، بیشتر است. لذا تاثیر یادشده، باعث افزایش مطلوب گشتاور تولیدی توسط توربین نوع پنج شده است. بنابراین می توان در تولید انرژی الکتریکی توسط توربین های شناور در مجاری روباز، از توربین نوع پنج استفاده کرد. همچنین بر میزان گشتاورهای مقاوم ایجاد شده، توسط دستگاه مولد الکتریکی و دیگر ادوات مکانیکی مرتبط به آن، با اطمینان بیشتری روبه رو شد.

## ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، پنج نوع مختلف از توربین های آبی شناور در آبراهه روباز مستطیلی، به عمق ۱ متر، عرض کف ۳ متر، برای تولید انرژی الکتریکی ارزیابی شده است. جریان آب درون آبراهه، از نوع کم عمق بوده و توربین ها به صورت شناور شده، در عمق مشخصی از جریان آب، مستغرق شده اند. این موضوع با توجه به حجم مجموعه توربین و پره ها، همچنین و جنس پلی اتیلن چگال به کاررفته در آنها، ایجاد می شود. توربین ها، از نظر شکل پره ها، زاویه امتداد گسترش آنها در راستای محور توربین، و همچنین شمار پره ها، با یکدیگر متفاوت می باشند. دیگر ویژگی های توربین مانند قطر ۱ متری، و همچنین طول ۱ متری استوانه توربین، در همه ی آنها یکسان است. با توجه به محاسبات انجام شده و نتایج به دست آمده، توربین نوع پنج، با ۲۱ پره به شکل نیم دایره، با قطر بیرونی ۱۱ سانتی متر، و قطر درونی ۱۰.۵ سانتی متر، نسبت به سایر توربین ها، قابلیت ایجاد گشتاور بالاتری را دارد. عامل های موثر بر گشتاور نهایی حاصله، شامل سطح تماس پره ها با جریان آب درون آبراهه، طول گسترش آنها در امتداد محور توربین، با لغزش و یا بدون لغزش جریان در رویارویی با پره های توربین، و همچنین، شمار پره ها می باشند. هرچه قطر درونی پره های توربین بیشتر باشد، میزان تبدیل انرژی جنبشی جریان آب آبراهه، به انرژی ایستایی

یک سو افزایش سطح تماس بین پره ها و جریان آب درون آبراهه، باعث افزایش گشتاور تولیدی خواهد شد. اما از سوی دیگر، شکل زاویه دار پره ها باعث می شود، لغزش جریان بر روی پره ها، افزایش یافته، و میزان تبدیل انرژی جنبشی به انرژی ایستایی، کاهش یابد. بنابراین در نهایت جمع اثرگذاری دو پدیده یادشده، باعث کاهش میزان گشتاور، به میزان حدود ۱۵ نیوتن در متر، در توربین نوع دو شده است. در توربین نوع سه، با افزایش شمار، و همچنین تغییر شکل پره ها، میزان گشتاور تولیدی افزایش یافته. این امر نشان دهنده آن است که، با اعمال تغییرپذیری های یادشده، میزان گشتاور تولیدی نسبت به توربین نوع دو، در حدود ۵۶ نیوتن در متر افزایش یافته. بنابراین افزایش شمار پره ها، و تغییر شکل آنها در این نوع توربین، باعث جبران اثرگذاری های ناشی از امتداد زاویه ای پره ها، در توربین نوع دو گردیده است.

جدول ۳ میزان گشتاور تولیدی توسط جریان آب، در

توربین های نوع یک الی پنج

Table 3 Flow generated torque in different types of turbines

Type	Torque (N.m)
I	75.92
II	60.43
III	116.23
IV	102.65
V	458.96

در توربین نوع چهار، قطر درونی پره ها کاهش یافته. از سوی دیگر، بر شمار آنها افزوده شده و با تغییر زاویه امتداد توزیع پره ها از حالت ۴۵ درجه، به حالت مستقیم، سطح تماس آنها نیز دچار کاهش شده است. به همین علت، میزان لغزش جریان در امتداد پره ها نیز، کاهش یافته. با توجه به جدول شماره ۳، جمع اثرگذاری فراسنجه های تغییر کرده در این نوع توربین، باعث کاهش گشتاور تولیدی به میزان حدود ۱۴ نیوتن در متر، نسبت به توربین نوع سه شده است. بنابراین، کاهش سطح تماس، و همچنین کاهش قطر درونی پره های توربین، نسبت به افزایش شمار پره ها و کاهش لغزش جریان روی آنها، تاثیر غالب را داشته است. در توربین نوع پنج، با کاهش ۱۰ عددی شمار پره ها، و همچنین افزایش قطر درونی پره ها



$S (m^2)$	سطح
$t (s)$	زمان
$u (ms^{-1})$	بردار سرعت
$V (m^3)$	حجم
$\bar{X} (m)$	عمق استغراق
$x (m)$	بردار مکان
$Z (m)$	عمق خیس شده
$\varepsilon (m^2s^{-3})$	نرخ استهلاک انرژی جنبشی آشفته
$\rho (Kgm^{-3})$	چگالی
$\mu (Kgm^{-1}s^{-1})$	لزجت پویایی
$\mu_s (Kgm^{-1}s^{-1})$	لزجت پویایی آشف

#### ۷- منابع ها

Nakashima, K., Watanabe, S., Matsushita, D., Tsuda, S. and Furukawa, A. (2016). Performance Prediction of Darrieus-Type Hydroturbine with Inlet Nozzle Operated in Open Water Channels. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 49(10), 102011.

Nishi, Y., Sato, G., Shiohara, D., Inagaki, T. and Kikuchi, N. (2019). A study of the flow field of an axial flow hydraulic turbine with a collection device in an open channel. Renewable energy, 130, 1036-1048.

Pandey, K.K., Abhash, A., Tripathi, R.P. and Dayal, S. (2019). Flow-field Near Forty-Five Degree Dividing Open Channel, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 8(3), 2768-2773.

Pelz, P.F. (2011). Upper limit for hydropower in an open-channel flow. J. Hydraulic Eng., 137(11), 1536-1542.

Shimomura, M. and Takano, M. (2013). Modeling and performance analysis of Archimedes screw hydro turbine using moving particle semi-implicit method. J. Computational Science and Technology, 7(2), 338-353.

Talukdar, P.K., Kulkarni, V. and Saha, U.K. (2018). Field-testing of model helical-bladed hydrokinetic turbines for small-scale power generation. Renewable Energy, 127, 158-167.

Yang, J., Wang, M., Wang, C. and Guo, W. (2015). Linear modeling and regulation quality analysis for hydro-turbine governing system with an open tailrace channel. Energies, 8(10), 11702-11717.

مکانیکی، بیشتر خواهد بود. همچنین افزایش میزان عمق استغراق توربین شناور نیز، بر میزان تبادل تکانه جریان و توربین، می افزاید. اثرگذاری افزایش امتداد طولی پره ها با ایجاد زاویه، از یک سو سطح تماس پره ها با جریان را افزایش داده، اما از سوی دیگر، امکان لغزش جریان را فراهم کرده، و از میزان کیفیت و توانایی انتقال انرژی جنبشی جریان آب، به انرژی ایستایی، می کاهد. به طور مشخص، با افزایش شمار پره های توربین، بر میزان گشتاور تولیدی، افزوده می شود. همچنین افزایش عمق استغراق نیز، باعث افزایش شمار پره های مستغرق در جریان، و در پی آن افزایش سطح تماس با جریان می شود. با توجه به توربین های نوع یک الی پنج، و بررسی انواع اثرگذاری یادشده در آنها، ترکیب میزان تاثیر هر یک از عامل های موثر، باعث تغییر در میزان گشتاور تولیدی نهایی شده است. بنابه محاسبات انجام شده و مدل سازی عددی به کمک روش حجم محدود، میزان گشتاور تولیدی توسط توربین نوع پنج، به میزان ۴۵۸/۹۶ نیوتن در متر، به عنوان بالاترین گشتاور تولیدی در میان دیگر توربین ها، مشخص شد. جمع اثرگذاری های افزایش سطح برخورد جریان آب درون آبراهه، در نتیجه افزایش قطر درونی پره های توربین نوع پنج، و با لغزش کمتر جریان آب در مجاورت امتداد طولی پره های بدون زاویه، و همچنین شمار پره های مستغرق با توجه به عمق استغراق توربین، باعث افزایش گشتاور نهایی این نوع توربین شده است. این موضوع نشان می دهد که توربین نوع پنج، در مقایسه با دیگر توربین های نوع یک الی چهار، توانایی تولید گشتاور بیشتری، برای اتصال به مولد انرژی الکتریکی، و در پی آن تولید الکتریسیته را، از خود نشان می دهد. لذا می توان برای تولید انرژی الکتریکی از توربین های شناور در آبراهه های کم عمق روبراز آب، از این نوع توربین ها استفاده کرد.

#### ۶- فهرست نشانه ها

$F (N)$	نیرو
$g (ms^{-2})$	شتاب جاذبه
$I (Kgm^2)$	گشتاور لختی
$k (m^2s^{-2})$	انرژی جنبشی آشفته
$n_p$	بردار نرمال سطح
$P(Pa)$	فشار ایستایی