

# بررسی عملکرد توربین هیدروسینتیک جهت تولید برق در کانالهای انتقال آب و ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی

امید رسولی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران،  
omid.rasooli1997uok@gmail.com

مسعود ابراهیمی\*

دانشیار، عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران، ma.ebrahimi@uok.ac.ir

## چکیده

این تحقیق، به امکان‌سنجی استفاده از انرژی جریان آب در کانالهای انتقال آب سد گاوشان جهت تولید پراکنده برق با توربین‌های هیدروسینتیک که با سرعت‌های جریان آب کمتر از ۲ متر بر ثانیه کار می‌کنند می‌پردازد. دلیل این مساله پتانسیل بالای تولید توان در این نوع جریانها می‌باشد. ابتدا مشخصات هیدرولیکی جریان استخراج و سپس پروفیل پره‌های توربین بوسیله نظریه اشمیتز محاسبه شده‌اند. سپس با مدلسازی در نرم افزار Solidworks و تحلیل در نرم افزار Ansys مقدار توان محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی توربین هیدروسینتیک برای سه کانال و چهار حالت از یک تونل انتقال آب طراحی گردید. نتایج نشان می‌دهد که بازده این توربین‌ها حدود ۹۰ درصد خواهد بود. در صورت استفاده از توربین با قطر ۴ متر و سرعت آب ۲ متر بر ثانیه می‌توان علاوه بر تامین برق مورد نیاز یک روستای نزدیک تونل، می‌توان سالانه ۳۹۳۶۶ کیلووات‌ساعت برق را به شبکه فروخت. همچنین دوره بازگشت سرمایه ۳/۴ سال و مقدار ارزش حال خالص پروژه مثبت می‌باشد و سالانه ۱۰۹ تن کاهش تولید کربن‌دی‌اکسید رخ خواهد داد. **واژه‌های کلیدی:** کانال انتقال آب، توربین‌های هیدروسینتیک، اقتصادی، زیست‌محیطی، سد گاوشان.

## Designing of hydrokinetic turbine for electricity generation in water transfer canals and technical, economic, and environmental evaluation

O. Rasooli  
M. Ebrahimi

Mechanical engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran  
Mechanical Engineering Department, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

### Abstract

Present research investigates the feasibility of using hydropower in water transfer canals of Gavshan dam to generate distributed electricity with hydrokinetic turbines which operate at water velocity of less than 2 m/s. The reason for this is the high potential for power generation in this type of currents. For this purpose, first the hydraulic characteristics of water flow were extracted. Then, the turbine blade profiles were first calculated by Schmitz theory, then by modeling in SolidWorks and analysis in ANSYS-FLUENT, the amount of power is obtained. The results were validated and a turbine was designed for each canal/tunnel. The results show that the efficiency of hydroturbines will be about 90%. By using a hydrokinetic turbine with a diameter of 4 m and a water velocity of 2 m/s, the electricity demand of a village near the tunnel would be supplied and annually 39366 kWh of electricity can be sold to the public grid. Furthermore, the payback period is 3.4 years and the net present value of the project is highly positive. The reduction in carbon dioxide production is 109 tons/year.

**Keywords:** Water transfer canals, hydrokinetic turbine, economic, environmental, Gavshan dam.

تا سال ۱۴۰۰ به ۲۱۴ مورد می‌رسد. [۲] این سدها همواره از کانالهایی طولانی برای انتقال آب استفاده می‌کنند که در بسیار از مناطق پتانسیل بالایی برای نصب توربین‌های هیدروسینتیک دارند. لذا ارزیابی پتانسیل این کانالها به هدایت سرمایه‌گذاری در این حوزه می‌تواند کمک زیادی بکند.

جو و همکاران (۲۰۰۸) [۳] نتایج یک تحقیق تجربی را در مورد کاربرد سیستم‌های قدرت جریان جزر و مدی در سرریز آب منتشر کردند. آنها نتیجه گرفتند که با توجه به محدود بودن نواحی جریان متمرکز، چیدمان دستگاه‌ها برای به حداکثر رساندن کارایی و صرفه اقتصادی نیروگاه بسیار مهم است. بهینه‌سازی آرایش در شکل گیری چند آرایه‌ای ضروری است. جو و همکاران (۲۰۰۷) [۴] نرخ تداخل آرایش محوری، عرضی و مورب روتورها را برای تغییر سرعت جریان ورودی ارائه کردند. داس و همکاران [۵] یک بهینه‌سازی هزینه برای برق‌رسانی یک ایستگاه رادیویی واحد در مناطق روستایی هند انجام دادند. راجانا و ساینی [۶] یک الگوریتم ژنتیک را برای استهلاک کل هزینه خالص فعلی با بهینه‌سازی فتوولتایی خورشیدی، میکرو توربین

### ۱- مقدمه

امروزه یکی از مهمترین مشکلات مناطق روستایی تامین نیاز انرژی آنها می‌باشد. در حال حاضر، استفاده گسترده از منابع تجدید ناپذیر انرژی، عمدتاً سوخت فسیلی، علاوه بر آلوده ساختن محیط زیست منجر به اتمام سریع آن می‌شود. این مساله زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که بدانیم ایران تنها حدود ۱٪ از انرژی مصرفی خود را از منابع تجدیدپذیر تامین می‌کند. [۱] منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی آبی، بادی، خورشیدی، زیستی، جزر و مدی و حتی زمین گرمایی در ایران در دسترس هستند. با مدیریت استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر هم به کاهش آلاینده‌های زیست محیطی کمک می‌شود و هم دسترسی به منابع انرژی پایدار و دائمی برای مصرف‌کنندگان فراهم می‌شود. نکته دیگر در استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر، تنوع بخشی به منابع انرژی استفاده شده در کشور است که قابلیت اطمینان سیستم انرژی را بالاتر می‌برد. براساس آمارها و طبق اعلام وزارت نیرو تعداد سدهای ملی ایران

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: ma.ebrahimi@uok.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۱۱/۲۷

تاریخ پذیرش: ۰۱/۰۴/۰۶

آبی، توربین بادی، ژنراتور بیوگاز، ژنراتور زیست توده و باتری اتخاذ کردند. چاوهران و ساینی [۷] یک سیستم هیبریدی متشکل از فتولتایی، میکروتوربین آبی، زیست توده و باد برای روستاهای ایالت اوتاراکند هندوستان را مدل سازی کردند. بیان می شود که متغیرهای حساس مطالعه تأثیر عمیقی بر شاخص های اصلی دارند. موراندی و همکاران [۸] یک توربین مقیاس ۱/۲۵ را در یک کانال آب در گردش را آزمایش کرد و ضریب توان توربین را در سرعت های جریان مختلف مقایسه کردند. بهاج و همکاران [۹] یک مطالعه ضریب رانش و توان را بر روی یک توربین با قطر ۰/۸ متر در یک مخزن و در یک تونل حفزه- ای انجام دادند که داده های جامع با کیفیت بالا را برای اعتبارسنجی محاسبات عددی ارائه می دهد. آچسون و همکاران [۱۰] آزمایش های ارائه شده برای اندازه گیری عملکرد و ویژگی های گردابه ای یک توربین مقیاس ۱/۱۰ در یک مخزن و حداکثر ضریب توان ۰/۳۵ در سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه به دست آمد. لائوسون و همکاران [۱۱] یک توربین جزر و مدی ۲۰ متری را با سرعت های جریان متفاوت با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مدل سازی کردند، و گشتاور توربین را محاسبه کردند. شلیچر و همکاران [۱۲] یک توربین میکرو هیدروسینتیک قابل حمل جدید طراحی کردند و عملکرد توربین را با روش RANS مشخص کردند. لی و همکاران [۱۳] اثر فاصله بین روتورهای دوگانه بر عملکرد و کارایی یک توربین جزر و مدی ضد چرخش را با استفاده از دو روش دینامیک سیالات محاسباتی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. لیو و همکاران [۱۴] نتایج یک توربین جریان اقیانوسی محور افقی را با سه روش RANS مختلف مطالعه کردند، نتایج نشان داد که روش مش لغزشی دقیق تر از قاب مرجع متحرک و مدل دیسک متحرک است. تاووم و همکاران [۱۵] عملکرد یک توربین جذر و مدی محور افقی را که در معرض جریان پروفایل و امواج گرانشی سطحی قرار گرفته بود مورد مطالعه قرار دادند. خان و همکاران [۱۶] دریافتند که توربین های هیدروسینتیک می توانند کمک مهمی با توجه به حجم زیاد رودخانه ها و کانال های ساحلی با عمق سنجی مناسب در نزدیکی جوامع کوچک باشند که می توانند از چنین مقیاس کوچکی، خارج از شبکه برق کم هزینه تولید کنند. کومار و همکاران [۱۷] دریافتند که انرژی هیدروسینتیک دارای مزایایی نسبت به سایر فناوری های خارج از شبکه، با مزایای اجتماعی مهم، مانند هزینه های توزیع انرژی پایین و ایجاد فرصت های شغلی محلی است. با این حال، هنوز موانع فنی مهمی وجود دارد که باید قبل از رسیدن به امکان سنجی فنی، اقتصادی و اجتماعی بر طرف شوند. تراشر و همکاران [۱۸] بیان کردند که فناوری های هیدروسینتیک اقیانوس ها و رودخانه ها به سرعت در حال ظهور هستند، و تخمین زده می شود که بین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۳۰ به یک مرحله تجاری در مقیاس مگاوات برای جریان های جزر و مدی برسند.

کومار و همکاران [۱۹] نشان دادند که تأثیر سدها و حوضه های آبریز آن در مقیاس های مختلف نیازمند یک سیاست فوری در مقیاس جهانی برای مقابله با انتشار گازهای گلخانه ای از مخازن برق آبی است. در نتیجه، فناوری هیدروسینتیک در مقایسه با فناوری برق آبی مبتنی بر سد، گزینه مناسبی برای تولید برق در مقیاس کوچک مانند کاربرد خانگی در تولید برق خارج از شبکه است. دهاکال و همکاران [۲۰] نشان دادند که HKT های گرانشی را می توان به راحتی در زیرساخت

های آبی موجود با هزینه های ۱۰۲۱ تا ۱۲۶۱ دلار با ظرفیت ژنراتور ۱/۶ کیلووات نصب کرد. مولوکن تمسگن نیگابو و همکاران [۲۱] به بررسی اقتصاد توربین های هیدروسینتیک (HKT) پرداختند تا امکان استفاده در مناطق روستایی را بررسی کنند، جایی که شبکه در دسترس نیست. محمد شهنساری فرد و همکاران [۲۲] دریافتند که در طول عملیات، توربین های هیدروسینتیک رودخانه و جزر و مد با تغییراتی در جهت جریان مواجه می شوند که عملکرد آنها را کاهش می دهد. آبتونیس و همکاران [۲۳] به بررسی ارزیابی و بهبود عملکرد توربین های هیدروسینتیک محور افقی چندگانه (HAHkTs) نصب شده بر روی یک محور پرداختند. در این تحقیق عملکرد هیدروپنایمی پیکربندی های مختلف HAHkTs تک و چند با تیغه های ساخته شده از کامپوزیت های پلیمری فیبر کربن در یک تونل آب مورد ارزیابی قرار گرفت.

کاظم شاهوردی و همکاران [۲۴] عملکرد توربین پیچ ارشمیدس به صورت عددی با استفاده از معادلات ناپیر-استوکس متوسط زمانی (RANS) در محیط Flow3D با بررسی اثر تعداد پره ها و سرعت های زاویه ای مختلف بر آن را بررسی کرده است. جهت مدل سازی آشفتگی از مدل و جهت شبیه سازی سطح سیال از روش کسر حجمی سیال (VOF) استفاده شد. مدل عددی تهیه شده با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، اعتبارسنجی شد. کاظم شاهوردی [۲۵] اثر عمق پایاب در کانال بعد از استقرار توربین پیچ ارشمیدس بر روی آن بررسی کرده است. برای این منظور، توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از FLOW-3D مدل سازی و اعتبارسنجی و عملکرد آن برای نسبت استغراق های مختلف در پایاب کانال بررسی شده است.

براساس پژوهش های انجام بعمل آمده، بیشتر کشورها بهره برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر بویژه انرژی برق آبی را در صدر برنامه های خود جهت تقویت منابع انرژی، کم کردن وابستگی به سوخت فسیلی، تنوع بخشی به منابع تامین انرژی قرار داده اند [۲۶]. استفاده از توربین های هیدروسینتیک در جریان های کانالی و رودخانه آبی مزیت های قابل توجهی نسبت به نیروگاه های برق آبی بزرگ دارد. این توربین ها به پراکنده سازی تولید برق کمک می کنند. تولید برق به شکل پراکنده و در محل مصرف مزیت های قابل توجهی مانند حذف تلفات شبکه، کاهش هزینه های ساخت، تقویت پدافند غیرعامل و آسیب پذیری کمتر ایجاد می کنند. این مزیت ها باعث شده است که توربین های هیدروسینتیک در مقیاس کوچک مورد توجه محققین قرار گیرند و در سالیان اخیر تحقیقات مهمی بر روی آنها انجام بشود. یکی از مسایل مهم در مورد توربین های هیدروسینتیک کمترین سرعت جریان آب است که توربین می تواند با استفاده از آن برق تولید کند. هرچه بتوان کمترین سرعت جریان مورد نیاز کمتر کنیم، پتانسیل بهره برداری از جریان های کانالی و رودخانه ایی افزایش می یابد.

در این تحقیق به بررسی هیدرولیکی تونل و نیز سه کانال انتقال آب از سد گاوشان و طراحی توربین هیدروسینتیک براساس ویژگی های هیدرولیکی پرداخته شده است. حداکثر سرعت جریان آب ۲ متر بر ثانیه و نیز کمترین سرعت ۰/۹ متر بر ثانیه است. برای این چهار مسیر پروفیل های مختلفی برای طراحی توربین مورد ارزیابی قرار گرفتند و برای هر مسیر ابتدا با استفاده از تئوری اشمیتز مشخصات هندسی ابرفویل و مقاطع آن استخراج شد. سپس با مدل سازی مجموعه روتور



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (6)$$

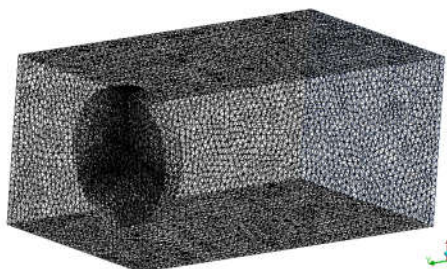
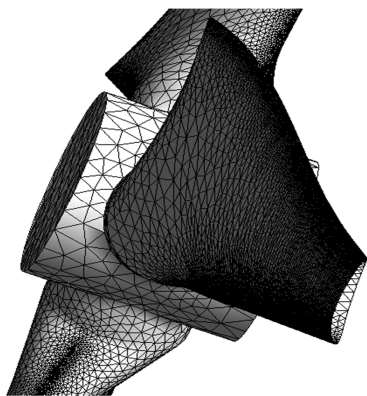
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i}[\mu(\frac{\partial u_i}{\partial x_i})] \quad (7)$$

که  $\rho$  چگالی و  $\mu$  لزجت دینامیکی آب می باشد. همچنین  $u_i$  مولفه های سرعت در سه جهت و P فشار می باشد.

فرضیات صورت گرفته عبارتند از:

- ۱- جریان سیال سه بعدی، گذار، تراکم ناپذیر، و همدمای- باشد.
- ۲- خواص فیزیکی آب مانند چگالی و لزجت ثابت می باشند.
- ۳- اثر گرانش با توجه اختلاف ارتفاع ناچیز ورودی و خروجی توربین، صرف نظر شده است.
- ۴- جریان با توجه به مقدار عدد رینولدز که در همه کانالها و تونل بزرگتر از  $10^6$  است، آشفتگی می باشد.
- ۵- پره های توربین کاملاً در آب مغروق بوده، لذا اثرات کشش سطحی صرف نظر شده است.
- ۶- جریان با توجه به مقدار عدد فرود محاسبه شده که کمتر از ۱ می باشد، زیر بحرانی است.

میدان حل بایستی بوسیله تولید مش گسسته سازی شود. یک مش با ساختار نامنظم، و چهار وجهی استفاده شده است. شکل ۲ شبکه بندی توربین مسیروتونل ۲۵ درصد را نشان می دهد. در این شبکه بندی از مش چهار وجهی با تعداد المان  $3382806$  و گره  $605590$  استفاده شده است. مش در نواحی نزدیک توربین و روی پرها با مقیاس  $1:3$  ریز شده است و در نواحی دورتر به دلیل کاهش حساسیت و کاهش زمان محاسبات اندازه المانها بزرگتر می باشد.



شکل ۲- توربین (بالا) و میدان حل (پایین) مش بندی شده در تونل ۲۵ درصد و سه کانال

بدست آمده است. به این ترتیب با داشتن ضریب برآ و زاویه حمله های که در آن نسبت ضریب برآ به پسا پروفیل بیشترین مقدار است با جایگذاری در روابط (۴) و (۵) به ترتیب زاویه پیش در مقاطع مختلف و همچنین توزیع طول وتر در مقاطع مختلف پره توربین بدست خواهد آمد.

با توجه به اینکه از یک پروفیل با ضریب برآ و زاویه حمله یکسان برای طراحی توربین های مورد نظر استفاده شده است و همچنین با توجه به اینکه توربین های مسیر های بیلوار، رودخانه رازآور، الک و تونل ۲۵ درصد دارای قطر ۱ متر هستند برای طراحی توربین این مسیر ها از یک طراحی و یک هندسه استفاده می شود. و برای تونل ۵۰ درصد، ۷۵ درصد و ۱۰۰ درصد نیز با توجه به شعاع توربین طراحی خواهند شد.

با توجه به توزیع طول وتر و زاویه پیش در مقاطع مختلف با استفاده از نرم افزار Solidworks توربین هیدروسینتیک مدل سازی خواهد شد. شکل (۲) مدل سه بعدی توربین که در نرم افزار Solidworks ایجاد شده و در نرم افزار Ansys Mesh زده شده است را برای تونل ۲۵ درصد، و سه کانال مسیره های رازآور، بیلوار و الک نشان می دهد.

### ۳-۲- مدل سازی هیدرودینامیکی

برای شبیه سازی جریان حول توربین در نرم افزار Ansys-Fluent بایستی میدان جریانی که بایستی حل شود مشخص گردد. مشخصات میدان حل مکعبی برای تونل در چهار حالت، و نیز کانالهای سه مسیر مذکور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- چارچوب مرجع برای توربین کانال های مختلف

ارتفاع (میلی متر)	عرض (میلی متر)	طول (میلی متر)	
۱۷۰۰	۱۶۰۰	۳۰۰۰	تونل ۲۵ درصد
۳۳۰۰	۳۰۰۰	۵۵۰۰	تونل ۵۰ درصد
۵۵۰۰	۵۰۰۰	۹۵۰۰	تونل ۷۵ درصد
۶۵۰۰	۶۰۰۰	۱۲۰۰۰	تونل ۱۰۰ درصد
۱۷۰۰	۱۶۰۰	۳۰۰۰	رودخانه رازآور
۱۷۰۰	۱۶۰۰	۳۰۰۰	مسیر بیلوار
۱۷۰۰	۱۶۰۰	۳۰۰۰	مسیر الک

شکل ۲ میدان حل تونل ۲۵٪ و نیز کانالهای سه مسیر رازآور، بیلوار و الک را همراه با یک توربین نشان می دهد. همچنین شرایط مرزی اعمالی بر سطوح مختلف در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲- شرایط مرزی برای کانال ها و تونل انتقال آب

شرایط مرزی	سطوح مختلف کانال و تونل
شرایط مرزی ورودی	شرایط مرزی سرعت
شرایط مرزی خروجی	شرایط مرزی فشار
دیواره و کف	شرایط مرزی عدم لغزش
سقف کانال رو باز	شرایط مرزی سطح آزاد

معادلات حاکم بر مساله شامل معادله بقای جرم و معادله ناویر-استوکس می باشند.

خواهند شد. شبیه سازی با سیستم ویندوز با رم ۱۶ و CPU ۱۲ و دیسک ۴۰ انجام شد و با نرم افزار Ansys-Fluent به صورت گذرا و حالت جریان مغشوش با مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است. گام زمانی در این شبیه سازی ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.



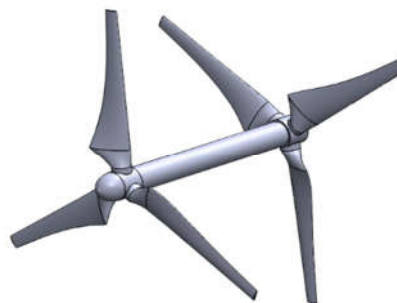
شکل ۴- فلوچارت مراحل انجام مدلسازی

#### ۴-۱- استقلال از مش

برای بررسی مستقل بودن نتایج از مش تولید شده، تعداد المانها و گرهها در حدود ۵۰٪ افزایش داده شده است و با رسیدن تعداد گرهها و المانها از ۶۰۵۵۹۰ و ۳۳۸۲۸۰۶ به ۹۴۴۰۷۱ و ۵۳۱۴۲۱۵ توان تولیدی از ۱۱۴۶/۲ وات به ۱۱۶۲/۲ رسیده است که معادل ۱/۳٪ اختلاف است. با توجه به اینکه مقدار اختلاف در مقایسه با مقدار تغییر تعداد المانها بسیار کم می باشد لذا می توان گفت نتایج ارائه شده مستقل از مش می باشد. شکل ۵ نمودار استقلال از مش مدل را برای تعداد مش های مختلف نشان می دهد.

#### ۳-۳- طراحی توربین دو مرحله ای

در مسیرهایی که آب با مقدار دبی و سرعت مشخص جریان دارد و مسیر عبور جریان نیز در یک کانال مصنوعی با سطح مقطع یکسان و مشخص است می توان از توربین چند مرحله ای استفاده کرد. استفاده از توربین چند مرحله ای می تواند باعث کاهش هزینه ها بخاطر کاهش تعداد تجهیزات مهارسازی، فونداسیون، کاهش اتصالات الکتریکی، کابل کشی و تجهیزات جانبی گردد. لذا جهت بررسی این مساله از نظر تولید توان در این تحقیق یک توربین دو مرحله ای در دو حالت با فاصله بین مراحل ۰/۵ متر و ۱ متر در کانال مسیر الک مورد ارزیابی قرار گرفته است. توربین های هر دو مرحله کاملا شبیه همدیگر می باشند (شکل ۳).



شکل ۳- مدل سه بعدی توربین های دو مرحله ای در Solidworks با فاصله ۰/۵ متر بین مراحل

مشخصات میدان حل مکعبی برای توربین های دو مرحله ای با فاصله ۰/۵ متر و ۱ متر بصورت آرایه (ارتفاع، عرض، طول) بر حسب میلی متر بصورت (۲۵۰۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰) و (۲۵۰۰، ۲۰۰۰، ۶۰۰۰) می باشد.

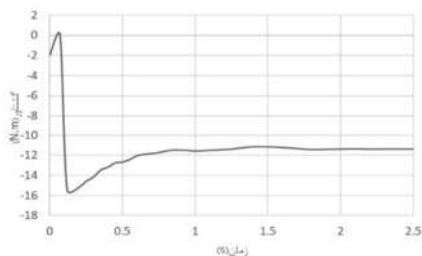
همانند توربین های یک مرحله ای از مش چهاروجهی نامنظم با نسبت ۱:۳ بر روی توربین استفاده شده است. تعداد المانها برای توربین دو مرحله ای با فاصله ۰/۵ متر ۵۰۵۲۵۶۷ و تعداد گرهها ۹۰۴۳۸۱ می باشد. برای توربین با فاصله ۱ متر بین مراحل نیز تعداد المانها ۴۲۹۰۹۵۴ و تعداد گرهها ۷۶۸۳۳۸ می باشد.

در شبیه سازی جریان حول توربین هیدروسینتیک از جریان گذرا با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه استفاده شده است. همچنین جهت مدلسازی آشفتگی از مدل  $k-\epsilon$  استاندارد استفاده شده است، و معیار همگرایی نیز گشتاور توربین بعنوان خروجی اصلی مدلسازی می باشد. فلوچارت مراحل انجام مدلسازی در شکل ۴ آورده شده است. عدد کورانت که نشان دهنده زمان حضور یک ذره در داخل یک المان است در نرم افزار Ansys-Fluent در حل صریح بصورت اتوماتیک ۱ می باشد، که می توان آنرا تغییر داد. در این مدلسازی مقدار عدد کورانت همان مقدار پیش فرض در نظر گرفته شده است.

#### ۴- نتایج

در این قسمت ابتدا استقلال نتایج از مش تولید شده بررسی خواهد شد، سپس مدلسازی انجام شده اعتبار سنجی می شود. بعد از آن همگرایی نتایج ارائه و در نهایت نتایج مربوط به مدلسازی در تونل و کانالها برای توربین تک مرحله ای و نیز توربین دو مرحله ای ارائه

ایجاد نیروی برآ و در نتیجه چرخش توربین می‌شود.

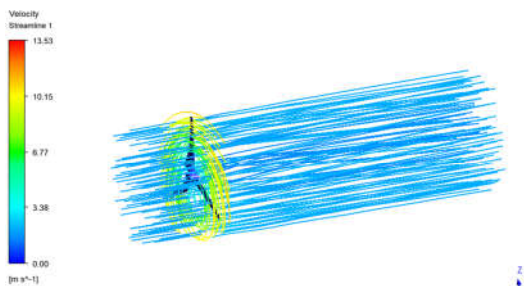


شکل ۷- همگرایی نتایج بر اساس شاخص گشتاور در کانال مسیر الک

همچنین شکل ۹ خطوط جریان حول توربین را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود جریان در ورودی توربین به صورت صاف وارد صفحه توربین شده و در آنجا به دلیل چرخش توربین شروع به چرخش می‌کند و در نهایت از صفحه توربین خارج می‌شود که در هنگام خروج از توربین به دلیل چرخشی که در توربین وجود داشته با حالت منبسط شده‌ای خارج می‌شود.



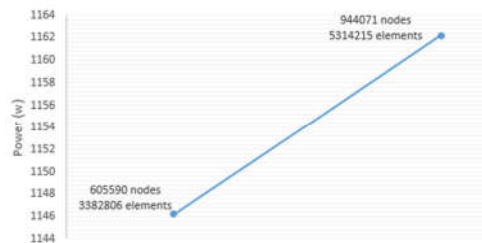
شکل ۸- فشار روی توربین در تونل ۲۵ درصد



شکل ۹- خطوط جریان در تونل ۲۵ درصد

کانتور فشار و خطوط جریان بعنوان نمونه برای تونل با درصد جریان ۲۵٪ ارائه شدند. مدل‌های مختلف توربین برای حالت‌های دیگر تونل و کانال‌ها حل و خلاصه نتایج مربوط به گشتاور، توان و بازده توربین در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

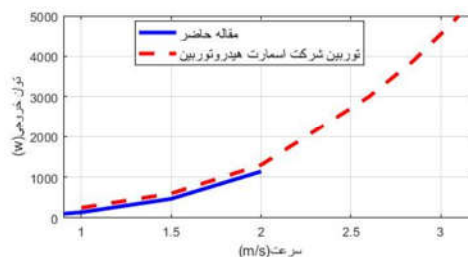
نتایج نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن ضریب فشار ۰/۴ مقدار بازدهی توربین‌های طراحی شده در محدوده ۸۹ تا ۹۰٪ می‌باشد. همچنین با افزایش قطر توربین (و ثابت نگه داشتن سرعت در ۲ متر



شکل ۵- منحنی توان براساس تعداد مش‌های مختلف

#### ۲-۴-۲- اعتبارسنجی

جهت انجام اعتبارسنجی، نتایج را با توان تولیدی توربین ۵ کیلو وات شرکت اسمارت هیدرو توربین [۲۷] که قطر روتور آن نیز ۱ متر می‌باشد در سرعت‌های ۰/۹ تا ۲ متر بر ثانیه مقایسه شده است. هدف از انجام اعتبار سنجی مقایسه نتایج بدست آمده از مدل طراحی شده با یک منبع معتبر جهت رضایت بخشی مدل است. که نشان می‌دهد نتایج بدست آمده در این پژوهش و نتایج تجربی ارائه شده توسط شرکت اسمارت هیدرو توربین در حد رضایت بخشی به هم نزدیک می‌باشند (شکل ۶).



شکل ۶- توان خروجی توربین هیدروسینتیک و مرجع [۲۷]

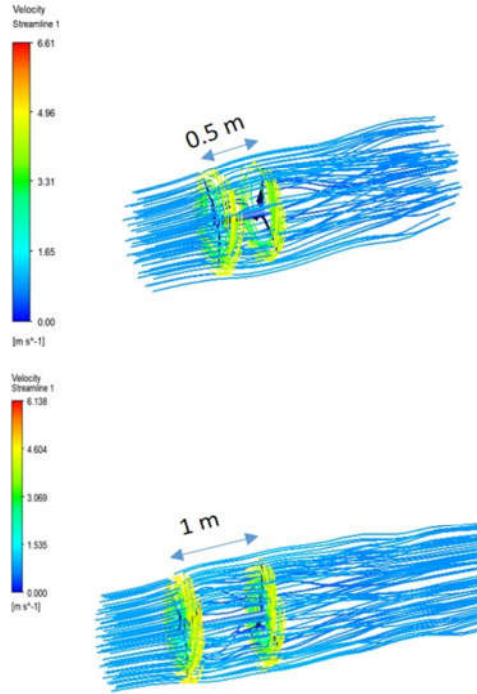
#### ۳-۴-۳- همگرایی

جهت بررسی همگرایی مدل‌سازی انجام شده، گشتاور که مهمترین خروجی مورد نیاز مدل‌سازی می‌باشد، بعنوان شاخص همگرایی انتخاب شده است. هدف از همگرایی این است که نشان دهیم نتایج شبیه سازی برای پارامتر گشتاور به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود و از این لحظه به بعد همین مقدار را برای گشتاور نشان خواهد داد و نیازی به ادامه شبیه سازی نیست. همه پارامترها از جمله سرعت و فشار در محاسبه گشتاور موثر هستند، لذا همگرایی این پارامتر می‌تواند همگرایی کل مدل‌سازی را تایید کند. شکل ۷ همگرایی را برای کانال مسیر الک نشان می‌دهد که مقدار گشتاور به مقدار ۱۱/۴ نیوتن‌متر همگرا شده است.

#### ۴-۴-۴- نتایج توربین تک مرحله‌ای

شکل ۸ توزیع فشار روی توربین را نشان می‌دهد. نیروی فشاری که سیال به پره‌های توربین وارد می‌کند به دو نیروی پسا و نیروی برا تقسیم می‌شود. در توربین نیرویی که موجب چرخش می‌شود نیروی برا است و این نیرو از اختلاف فشار در دو سمت پره توربین حاصل می‌شود. همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود در قسمت جلو و عقب توربین یک اختلاف فشار ایجاد شده است که این اختلاف فشار موجب

می‌کند. همچنین با بررسی کانتورهای فشار مشخص است که همانند آنچه در توربین های یک مرحله مشاهده شد اختلاف فشار عقب و جلوی پره های توربین عامل اصلی ایجاد چرخش و تولید توان می باشد.



شکل ۱۱- خطوط جریان حول توربین دو مرحله‌ای

نتایج نشان می‌دهد که در حالتیکه فاصله دو توربین ۱ متر باشد (توان تولیدی ۲۰۳/۲ وات) مقدار توان تولیدی اندکی از حالتیکه فاصله دو مرحله از هم ۰/۵ باشد (توان تولیدی ۲۰۱/۶ وات) بیشتر است. این مسئله احتمالاً به این دلیل است که جریان بعد از خروج از مرحله اول با زاویه نامناسب وارد توربین مرحله دوم می‌شود و این مساله باعث کاهش توان تولیدی می‌شود. در صورتیکه فاصله مراحل افزایش یابد بخاطر مومنتم خطی جریان، جریان حالت محوری در خواهد آمد و با زاویه حمله مناسب وارد توربین خواهد شد. این مساله با بررسی دقیق خطوط جریان و انحنای آنها در قسمتهای مختلف جریان نیز قابل اثبات است.

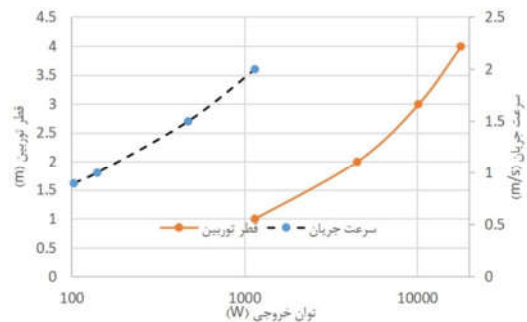
در مقایسه با توربین یک مرحله ایی که مقدار توان تولیدی در این حالت برابر ۱۰۳ وات بود مدل دو مرحله ای مقداری کمتر در حدود ۳ تا ۵ وات از ۲ برابر مدل یک مرحله ای توان تولید می‌کند. دلیل این مساله نیز می‌توان افت‌های ناشی از اصطکاک در مرحله اول باشد.

اما دلیل اینکه پس از عبور جریان از توربین اول مقدار تولید توان کاهش چندانی ندارد، به مشخصه توربین‌های هیدروسینتیک بر می‌گردد که در آنها توان خروجی با سرعت ورودی سیال رابطه مستقیم و توان سوم (معادله (۹)) دارد و با توجه به اینکه طبق قانون پیوستگی، دبی جرمی ورودی و خروجی از توربین یکسان است و سطح مقطع ورودی و خروجی نیز برابر است در نهایت سرعت های ورودی و خروجی از توربین ها با توجه به تراکم ناپذیری جریان نیز برابر خواهد

برثانیه) و نیز افزایش سرعت جریان (و ثابت نگه داشتن قطر توربین در ۱ متر)، مقدار توان با نرخهای متفاوتی تغییر می‌کند. جهت بررسی نحوه تغییر توان با این دو متغیر اصلی نمودارهای تغییر توان با تغییرات سرعت و تغییرات قطر توربین در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۳- گشتاور، توان و بازده توربین های کانال های مختلف

$V$ ( $\frac{m}{s}$ )	$D$ (m)	$\omega$ ( $\frac{rad}{s}$ )	$T$ (N.m)	$P$ (kw)	$\eta$ (%)	
۲	۱	۲۰	۵۷/۰۵	۱/۱۴	۹۰	تونل ۲۵٪
۲	۲	۱۰	۴۴۶/۵	۴/۴۶	۸۹	تونل ۵۰٪
۲	۳	۶/۶۶	۱۵۱۸/۲	۱/۱۲	۹۰	تونل ۷۵٪
۲	۴	۵	۳۵۷۰	۱۷/۸۵	۸۹	تونل ۱۰۰٪
۱/۵	۱	۱۵	۳۱/۳	۰/۴۷	۸۹	رازآور
۱	۱	۱۰	۱۴/۰۱	۰/۱۴	۸۹	بیلوار
۰/۹	۱	۹	۱۱/۴	۰/۱۰۳	۹۰	الک



شکل ۱۰- تغییرات توان برحسب تغییرات قطر توربین و سرعت جریان

با استخراج معادله برازش شده به نتایج فوق روابط زیر برای توان برحسب قطر توربین و سرعت می‌آید:

$$P(w) = 1137.2D(m)^{1.9857}, \quad \text{at } V = 2(m/s) \quad (8)$$

$$P(w) = 140.43V(m/s)^{3.0102}, \quad \text{at } D = 1(m)$$

لذا:

$$P(w) \propto D(m)^{1.9857} \quad (9)$$

$$P(w) \propto V(m/s)^{3.0102}$$

#### ۴-۵- توربین دو مرحله‌ای

مدل ارائه شده برای توربین دو مرحله ایی که در شکل ۳ ارائه شد در مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱۱ خطوط جریان را برای دو حالت که مراحل ۰/۵ متر و ۱ متر باشد نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که میزان انحراف خطوط جریان در حالتیکه فاصله مراحل از همدیگر کمتر است، بیشتر می‌باشد. همچنین کانتورهای سرعت بر روی سطح پره نشان می‌دهد که هرچه به نوک پره نزدیک میشویم سرعت افزایش پیدا

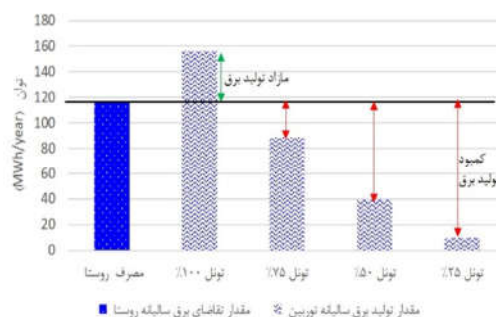
بود. اما آنچه باعث می شود امکان نصب توربین های متوالی فراهم شود بدون اینکه افت قابل توجهی در توان تولیدی رخ دهد این است که در کانال و لوله های شیدار که بر اساس نیروی ثقلی آب را انتقال می دهند، آب بعد از عبور از توربین اول پس از طی یک مسافت در داخل کانال شیب دار مجدداً سرعت خود را بازیابی می کند و مقدار افت فشار ایجاد شده توسط توربین را جبران می نماید.

## ۵- ارزیابی تامین برق روستای کچله در نزدیک تونل

باتوجه به واقع بودن روستای کچله در نزدیک یکی از دریچه های منتهی به تونل انتقال آب سد گاوشان به حوضچه کامیاران برای تامین برق روستا میتوان از توربین های هیدروسینتیک واقع در تونل بر اساس میزان دبی عبوری از تونل استفاده کرد.

### ۵-۱- ارزیابی فنی

برای ارزیابی فنی تامین برق روستا با استفاده از بررسی قبوض صادره شرکت برق در یکسال کامل شمسی مقدار مصرف کل محاسبه شده است. سپس براساس توربین های طراحی شده برای تونل در ۴ حالت مختلف ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ مقدار برق تولیدی در طول سال ارزیابی شده است. شکل ۱۲ میزان مصرف برق روستای کچله در طول سال و میزان برق تولیدی از توربین داخل تونل در صورتی که ۱۰۰ درصد تونل، ۷۵ درصد تونل، ۵۰ درصد تونل و ۲۵ درصد تونل آب داشته باشد، و همچنین مقدار مازاد یا کمبود برق تولیدی برای هر چهار حالت را نشان می دهد.



شکل ۱۲- مقدار تقاضای برق روستای کچله، مقدار برق تولیدی از توربین در چهار حالت، و مقدار کمبود یا مازاد برق تولیدی در طول سال

برق مصرفی روستای کچله در طول سال حدود ۱۱۷۰۰۰ کیلووات ساعت است. اگر تونل انتقال آب پر از آب باشد و از توربین هیدروسینتیک با قطر ۴ متر استفاده شود مقدار برق تولیدی سالیانه ۱۵۶۳۶۶ کیلووات ساعت خواهد بود که این مقدار ۲۹۳۶۶ کیلووات ساعت بیشتر از مقدار برق مصرفی روستا می باشد. همچنین اگر از توربین با قطر ۳ متر استفاده شود ۸۸۵۶۲/۵ کیلووات ساعت در طول سال برق تولید می کند که در این حالت ۲۸۴۳۷/۵ کیلووات ساعت کمبود برق ایجاد می شود که بایستی از طریق شبکه توزیع برق جبران شود. همچنین اگر از توربین با قطر ۲ متر استفاده شود در این حالت ۳۹۱۱۳ کیلووات ساعت برق در طول سال تولید می شود که در این

حالت ۷۷۸۸۷ کیلووات ساعت برق در طول سال کمبود برق ایجاد می شود که برای جبران این کمبود نیز بایستی از شبکه توزیع برق کمک گرفت. همچنین در حالتی که از توربین با قطر ۱ متر استفاده شود ۹۹۹۵/۱۶ کیلووات ساعت برق در طول سال تولید می کند که در این حالت ۱۰۷۰۰۴/۸۴ کیلووات ساعت در طول سال کمبود برق خواهیم داشت که برای جبران این کمبود نیز بایستی از شبکه توزیع برق کمک گرفت.

با توجه به بحث فوق، در حالتی که کمبود برق با استفاده از یک تک توربین وجود دارد می توان از چند توربین و یا توربین های چند مرحله ای استفاده نمود. در صورتیکه منحنی تغییرات سطح جریان آب درون تونل در کل سال مشخص باشد (که متأسفانه برای محققین مشخص نیست) می توان ترکیب های بهینه از توربین را نیز پیشنهاد داد.

### ۵-۲- ارزیابی اقتصادی

معیارهای اقتصادی استفاده شده در این تحقیق شامل دوره بازگشت سرمایه و نیز ارزش حال خالص پروژه است. هزینه ها شامل هزینه اولیه، و هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه می باشد. طول عمر برای این توربین ها ۲۵ سال در نظر گرفته شده است، اگرچه میانگین عمر نیروگاه های آبی عموماً بالاتر از این عدد است اما در اینجا محاسبات اقتصادی بصورت محافظه کارانه ای ارائه شده است. درآمد های حاصل شده از این طرح شامل فروش برق و کاهش دی اکسید کربن می باشد. براساس برآوردها و گرفتن قیمت از تولید کنندگان این توربین ها، هزینه سرمایه گذار اولیه  $4500 (\frac{\$}{kW})$  می باشد و هزینه تعمیر و نگهداری آن در حدود ۱/۵ تا ۶٪ هزینه اولیه لحاظ می شود. [۲۸]

درآمد حاصل از فروش برق به شبکه براساس براساس متوسط جهانی نرخ برق مصرفی خانگی تقریباً حدود ۰/۱۷۳ دلار بر کیلووات-ساعت محاسبه شده است. [۲۹] جدول ۴ درآمدهای حاصل از تولید برق با استفاده از توربین های هیدروسینتیک محورافقی را در مسیرهای مختلف نشان می دهد. با توجه به اینکه تولید برق تجدیدپذیر به معنی کاهش مصرف سوخت فسیلی خواهد بود، لذا این مساله باعث کاهش تولید گازهای گلخانه ای نیز خواهد شد. برای محاسبه کاهش انتشار معمولاً از ضریب انتشار کربن دی اکسید شبکه سراسری استفاده می شود. مقدار این ضریب برای شبکه برق حدود ۰/۷ تن کربن دی اکسید به ازای یک مگاوات ساعت است؛ [۳۰] که مقدار این درآمد حدود ۱۰ دلار به ازای هر تن کاهش کربن دی اکسید است. [۳۱] جدول (۴) درآمد حاصل از کاهش گاز کربن دی اکسید را در طول سال نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که مقدار کاهش تولید کربن دی اکسید در سال از ۱۰۹ تن برای تونل ۱۰۰٪، پر از آب با سرعت جریان ۲ متر بر ثانیه و توربین با قطر ۴ متر تا ۰/۶۳ تن برای کانال الک با سرعت جریان ۰/۹ متر بر ثانیه و قطر توربین ۱ متر متغیر می باشد.

جهت محاسبه دوره بازگشت سرمایه (PB)، بایستی جریان نقدینگی سالیانه (CF) و نیز هزینه سرمایه گذاری اولیه (I) محاسبه شوند. با تقسیم I بر CF مقدار دوره بازگشت پروژه بدست خواهد آمد.

$$PB = \frac{I}{CF} \quad (10)$$



در صورتی که از توربین با قطر ۴ متر استفاده شود علاوه بر تامین برق مصرفی روستای کچله در طول سال میتوان ۳۹۳۶۶ کیلووات ساعت برق در به شبکه توزیع برق فروخت.

#### جدول ۵- محاسبات اقتصادی برای چهار حالت مختلف تامین انرژی روستای کچله

NPV (\$)	PB year	درآمدها (\$)	هزینه تعمیر و نگهداری (\$)	I (\$)	
۲۴۸۵۱۶	۳/۴	۲۸۱۵۱/۸	۴۰۱۶/۲	۸۰۳۲۵	تونل ۱۰۰ درصد
۱۴۰۶۲۵	۳/۴	۱۵۹۴۱/۲	۲۲۷۷	۴۵۵۴۰	تونل ۷۵ درصد
۷۹۱۳۳	۳/۴	۷۰۴۰/۳	۱۰۰۴/۶	۲۰۰۹۲	تونل ۵۰ درصد
۲۰۲۳۵	۳/۴	۱۷۹۹/۱	۲۵۶/۲۲	۵۱۳۴/۵	تونل ۲۵ درصد
۶۵۴۱	۳/۴	۷۴۱۰/۷	۱۰۵۷/۵	۲۱۱۵	رودخانه رازآور
۱۹۴۷	۳/۴	۲۲۰/۶۶	۳۱/۵	۶۳۰	مسیر بیلوار
۱۴۳۲	۳/۴	۱۶۲/۳	۲۳/۱۷	۴۶۳/۵	مسیر الک

در صورتی که از توربین با قطرهای ۳ متر، ۲ متر و ۱ متر استفاده شود به ترتیب در طول سال ۸۸۵۶۲/۵، ۳۹۱۱۳ و ۹۹۹۵/۱۶ کیلووات ساعت برق تولید خواهد شد. که در این سه حالت با کمبود برق برای مصرف روستای کچله در طول سال روبه‌رو خواهیم شد که برای جبران این کمبود می توان از شبکه توزیع برق سراسری کمک گرفت و یا اینکه از توربین‌های دو مرحله‌ای استفاده نمود.

محاسبات اقتصادی نشان داد که در حالت تونل ۱۰۰ درصد به ازای ۸۰۳۲۵ دلار سرمایه‌گذاری اولیه ۲۸۱۵۱ دلار در سال درآمد ایجاد می‌شود و دوره بازگشت سرمایه نیز ۳/۴ سال است. ارزش حال خالص پروژه در تمامی حالات مثبت می‌باشد که به معنی اقتصادی بودن پروژه می‌باشد.

همچنین مقدار کاهش تولید کربن دی‌اکسید در سال از ۱۰۹ تن برای تونل ۱۰۰٪ تا ۰/۶۳ تن در سال برای کانال الک متغیر می‌باشد، که نشان میدهد هرچه سرعت آب در کانال بیشتر باشد و یا قطر توربین بزرگتر باشد در نتیجه توان تولیدی توربین نیز بیشتر بوده و مقدار کاهش کربن دی‌اکسید نیز افزایش پیدا خواهد که پیشنهاد می شود برای کانال‌های با پتانسل توربین بزرگتر و سرعت آب بیشتر توربین‌های هیدروسینتیک طراحی شوند. همچنین پیشنهاد می شود جهت ادامه تحقیقات موارد زیر مورد نظر قرار بگیرد:

طراحی توربین هیدروسینتیک با پروفیل NACA4412 در زاویه حمله و ضریب برآ متفاوت جهت رسیدن به بازده بیشتر.

بررسی توربین هیدروسینتیک با استفاده پروفیل‌هایی دیگر مانند S814, NACA0018, NACA4424 و... جهت دستیابی به بازده بالاتر و تولید توان بیشتر از آب عبوری در کانال‌ها.

استفاده از توربین‌های هیدروسینتیک محور عمودی مانند توربین عمودی داریوس و مارپیچ گورولوو در کانال‌های انتقال آب به جای توربین‌های محور افقی

$$CF = er - ex \quad (11)$$

که  $er$  درآمد یا جریان مالی مثبت و  $ex$  هزینه یا جریان مالی منفی در طول یکسال می باشد.

#### جدول ۴- درآمد‌های سالانه حاصل از تولید برق و کاهش کربن- دی‌اکسید توربین‌های هیدروسینتیک

درآمد ناشی از فروش برق (دلار)	کاهش سالیانه- کربن دی‌اکسید (تن)	درآمد ناشی از کاهش کربن دی-اکسید (دلار)	
۲۷۰۵۷/۳	۱۰۹/۴۵	۱۰۹۴/۵۶	تونل ۱۰۰ درصد
۱۵۳۲۱/۳	۶۱/۹	۶۱۹/۹۳	تونل ۷۵ درصد
۶۷۶۶/۵	۲۷/۳	۲۷۳/۸	تونل ۵۰ درصد
۱۷۲۹/۱۶	۷	۷۰	تونل ۲۵ درصد
۷۱۳/۲۷	۲/۸	۲۸/۸	رودخانه رازآور
۲۱۲/۱۶	۰/۸۵	۸/۵	مسیر بیلوار
۱۵۶	۰/۶۳	۶/۳	مسیر الک

ارزش حال خالص پروژه (NPV) نیز که در طول عمر پروژه محاسبه می‌شود، نشانگر ارزش افزوده ایجاد شده در کل طول عمر پروژه می‌باشد. این مقدار بایستی مثبت باشد. منفی بودن NPV به معنی غیر اقتصادی بودن طرح می باشد.

$$NPV = \sum_{y=1}^n \frac{CF_y}{(1+r)^y} - I \quad (12)$$

که در این رابطه  $n$  طول عمر پروژه،  $y$  شمارشگر و  $r$  نرخ تورم است که برای این پروژه ۵٪ در نظر گرفته شده است. جدول (۵) محاسبات اقتصادی برای توربین‌های طراحی شده را نشان می‌دهد. دوره بازگشت سرمایه ۳/۴ سال است مقدار NPV در تمام حالات مثبت می‌باشد. عبارت دیگر این پروژه از نظر اقتصادی کاملاً توجیه‌پذیر است. نتایج محاسبات اقتصادی در جدول ۵ نشان می‌دهد که با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری در طول سال و همچنین درآمد ناشی از فروش برق به شبکه و درآمد ناشی از کاهش گازهای کربن دی‌اکسید دوره بازگشت سرمایه برای همه حالت‌ها ۳/۴ سال خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه مقدار NPV یا ارزش خالص پروژه برای همه حالت‌ها مثبت است در نتیجه این مدل‌ها از نظر اقتصادی به صرفه خواهند بود. همچنین طراحی توربین دو مرحله‌ای با سطح مقطع یکسان و فاصله‌های ۰/۵ و ۱ متر انجام شد که میزان توان خروجی از توربین اول و دوم در هر دو حالت تقریباً برابر شد.

#### ۶- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق حداکثر سرعت آب ۲ متر بر ثانیه و حداقل سرعت هم ۰/۹ متر بر ثانیه بوده است. طراحی توربین‌هایی که بتوانند در سرعت کم جریان توان تولید کنند به دلیل اینکه مکانهای متعددی با جریان آب کم سرعت وجود دارند بسیار اهمیت دارد. در این راستا، یک پروفیل استاندارد برای توربین انتخاب شد و با استفاده از تئوری اشمیتز، نرم افزار XFOIL، نرم افزار Solidworks و نرم افزار Ansys-Fluent مدل‌های مختلفی طراحی و از نظر هیدرودینامیکی حل شدند. در نهایت توربین طراحی شده مورد ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد که:

- Research and Applications (ICRERA), pp. 1001–1006. (Conference paper), 2016
- [21] Muluken Temesgen Tigabu, Dawit Diriba Guta, Bimrew Tamrat Admasu Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Bahirdar Energy Centre, BahirDar Institute of Technology, BahirDar University, Bahirdar P.O.BOX 26, Ethiopia Centre for Environment and Development Studies, College of Development Studies, Addis Ababa University, Addis Ababa P.O.BOX 1176, Ethiopia Corresponding Author; Muluken Temesgen Tigabu, P.O.BOX 26, Bahirdar, Ethiopia, received: 06.06.2019 Accepted:13.08, 2019.
- [22] Shahsavari M., Bibeau L. Department of Mechanical Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, R3T 5V6, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106916>
- [23] Experimental evaluation of coaxial horizontal axis hydrokinetic composite turbine system A. Abutunis , G. Taylor , M. Fal , K. Chandrashekara , <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.010>
- [۲۴] شاهرودی، ک. (۱۴۰۰). بررسی اثر عمق پایاب بر روی عملکرد توربین پیچ ارشمیدس در تولید انرژی از جریان آب در کانالها. مجله مدیریت آب و آبیاری دانشگاه تهران، ۱۱(۱): ۶۷۷-۶۵۹.
- [۲۵] شاهرودی، ک. (۱۳۹۹). مدل سازی توربین پیچ ارشمیدس با استفاده از نرم افزار FLOW3D و بررسی اثر تعداد پره ها بر روی عملکرد آن. نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران، ۷(۲۶): ۷۹-۷۰.
- [26] [WWW.ourworldindata.org](http://WWW.ourworldindata.org)
- [27] SMART HYDRO POWER, SMART MONOFLOAT TURBINE. [https://www.smart-hydro.de/wp-content/uploads/2015/12/Datasheet\\_SMART\\_Monofloat.pdf](https://www.smart-hydro.de/wp-content/uploads/2015/12/Datasheet_SMART_Monofloat.pdf)
- [28] Economics of Hydro-Kinetic Turbine for off-grid Application: A Case Study of Gumara River, Upper Blue Nile, Amhara, Ethiopia, Muluken Temesgen Tigabu, received: 06.06.2019 Accepted:13.08.2019
- [29] [https://www.globalpetrolprices.com/electricity\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/electricity_prices/)
- [۳۰] سلمانی، ف؛ امیری راد،؛ سلیمی، م. ۱۳۹۳ امکانسنجی احداث دو واحد همزمان تولید حرارت و برق با بیوگاز در تصفیه خانه فاضلاب شهری مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، دوره ۴۷، شماره ۳، صص ۳۲۵-۳۳۱
- [31] Hope, C. and Newbery, D. Calculating the social cost of carbon. University of Cambridge, 2007.
- [1] <https://www.isna.ir/news/1400091007998>
- [2] <https://eghtesaad24.ir/fa/news/55059/%D8%A7%DB%8C%D8%B1%D8%A7%D9%86-%DA%86%D9%86%D8%AF-%D8%B3%D8%AF-%D8%AF%D8%A7%D8%B1%D8%AF>
- [3] Jo CH, Par KK and Im SW. Interaction of multi arrayed current power generations. International offshore and polar engineering conference, Lisbon, pp. 302e306, 2007.
- [4] Jo CH, Lee CH, Rho YH and Yim JY. Floating tidal current power application in cooling water channel. The Korean Association of Ocean Science and Technology Societies conference, Jeju, pp. 2184e2187, 2008.
- [5] Das M., Singh M.A.K., Biswas A., Techno-economic optimization of an off-grid hybrid renewable energy system using metaheuristic optimization approaches e case of a radio transmitter station in India, Energy Convers. Manag. 185 339e352, 2019.
- [6] Rajanna S., Saini R.P., Development of optimal integrated renewable energy model with battery storage for a remote Indian area, Energy 111- 803e817, 2016.
- [7] Chauhan A., Saini R.P., Techno-economic feasibility study on integrated renewable energy system for an isolated community of India, Renew. Sustain. Energy Rev. 59 (2016) 388e405,
- [8] Morandi, B., Felice, F.D., Costanzo, M.. Experimental investigation of the near wake of a horizontal axis tidal current turbine. Int. J. Mar. Energ 14, 229e247, 2016.
- [9] Bahaj, A.S., Molland, A.F., Chaplin, J.R. Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank. Renew. Energy 32 (3), 407e426, 2007.
- [10] Atcheson, M., Mackinnon, P., Elsaesser, B. A. large scale model experimental study of a tidal turbine in uniform steady flow. Ocean. Eng. 110, 51e61, 2015.
- [11] Lowson, M.J. Li, Y., Sale, D.C. Development and Verification of a Computational Fluid Dynamics Model of a Horizontal-Axis Tidal Current Turbine. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2011.
- [12] Schleicher, W.C., Riglin, J.D., Oztekin, A. Numerical characterization of a preliminary portable micro-hydrokinetic turbine rotor design. Renewable. Energy 76, 234e241, 2014.
- [13] Lee N.J., Kim I.C., Chang, G.K. Performance study on a counter-rotating tidal current turbine by CFD and model experimentation. J. Mech. Sci. Technol. 30 (2), 519e524, 2016.
- [14] Liu J., Lin H., Purimitla, S.R. Wake field studies of tidal current turbines with different numerical methods. Ocean. Eng. 117, 383e397, 2016.
- [15] Tatum S., Allmark M., Frost, C. CFD modelling of a tidal stream turbine subjected to profiled flow and surface gravity waves. Int. J. Mar. Energ 15, 156e174, 2016.
- [16] Khan MJ, Iqbal MT, Quaicoe JE. River current energy conversion systems: progress, prospects and challenges. Renewable & Sustainable Energy Review. Elsevier; 2007.
- [17] Kumar B, Hiremath R, Balachandra P, Ravindranath N, Raghunandan B. Decentralised renewable energy: scope, relevance and applications in the Indian context. Energy Sustain Dev:4-10, 2009.
- [18] Thresher R. Commercialization path and challenges for marine hydrokinetic renewable energy. IEEE PES (Power and Energy Society) General Meeting: The Electrification of Transportation and the Grid of the Future, 24–28 July 2011, Detroit, Michigan. Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). [8 pp.; NREL Report No. CP-5000-49959, 2011.
- [19] Kumar A., Sharma M. P., and Kumar A., Green House Gas emissions from Hydropower Reservoirs: Policy and Challenges, Int. J. Renew. Energy Res. IJRER, vol. 6, no. 2, pp. 472–476, Jun. 2016.
- [20] Dhakal R., Nepal A., Acharya A., Kumal, B., Aryal, T., Williamson, S.J., Khanal, K. and Devkota, L., “Technical and economic prospects for the site implementation of a gravitational water vortex power plant in Nepal.” in 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy