



## Design and Analysis of a Hybrid System of Clean Coastal Energy in Qeshm Island

Nima Amirshkari<sup>1</sup> | Ahmad Nohegar<sup>2\*</sup> | Zeinab Sazvar<sup>3</sup>

1. PhD student of Energy Systems Engineering Department, Kish International Campus, University of Tehran, Kish, Iran. Email: [Nima.amirshkari@gmail.com](mailto:Nima.amirshkari@gmail.com)
2. Corresponding Author, Professor of Disaster Engineering, Education and Environmental Systems Department, Environment Faculty, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [nohegar@ut.ac.ir](mailto:nohegar@ut.ac.ir)
3. Associate Professor of School of Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: [sazvar@ut.ac.ir](mailto:sazvar@ut.ac.ir)

### ARTICLE INFO

**Article type:**  
Research Paper

**Article History:**  
Received 25 January 2024  
Revised 25 February 2024  
Accepted 10 September 2024  
Published Online 26 August 2024

**Keywords:**  
*Clean Energy,*  
*Hybrid,*  
*Hydro Turbine,*  
*Qeshm Island,*  
*Energy Basket.*

### ABSTRACT

The main goals of this research are to investigate energy extraction from renewable sources and design a hybrid system in Qeshm Island. To achieve this approach, first, using wind speed data, the Weibull distribution function and the gamma function, the probability density of wind speed, force power, and the amount of energy extraction from the wind turbine were calculated. Next, the speed of water flow in Laft Port (Qeshm Island) was obtained and the power of tidal waves and energy extraction from the hydro turbine were calculated. Finally, used by HOMMER software, a hybrid model of 3 MW solar panel, 100 kW wind turbine, and 100 kW tidal hydro turbine with converter and battery was designed and the amount of clean energy that can be extracted from the system and its cost were calculated. The results of the wind power showed that the practical power of the turbine by diameter of 4 m at 10 m above ground is 375 watts and at 50 m is 982 watts, which can produce electricity in the 4176 hours/year. Calculations related to tides showed that 206 MWh of electricity can be produced annually, but if a 100-kW turbine is installed, more than 900 MW can be obtained. The results of the hybrid system showed that is possible to produce 2.6 GWh/year and provide the energy consumption of 575 households per year. By the implementation of this hybrid project, the cost price of 1 kWh of renewable energy will be about 2.3 \$, and the current net cost will be 13,769,120 \$.

**Cite this article:** Amirshkari, N.; Nohegar, A. & Sazvar, Z. (2024). Design and Analysis of a Hybrid System of Clean Coastal Energy in Qeshm Island. *Journal of Sustainable Energy Systems*, 3 (3), 249-269. DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.379701.1080>



© Nima Amirshkari, Ahmad Nohegar, Zeinab Sazvar  
DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.379701.1080>

**Publisher:** University of Tehran Press.

### 1. Introduction

This research provides a comprehensive look at the issue of clean energy on Qeshm Island. It considers a diverse combination of energy sources, referred to as coastal clean energy, which includes tidal hydro turbines, wind turbines, and photovoltaic panels, supported by the thermal power plant. Therefore, this research aims to evaluate the feasibility of extracting renewable energy using a hybrid system, determining the amount of energy produced and the final cost per kWh.

### 2. Materials and methods

The case study is Qeshm Island. First, the potential for wind energy extraction was determined using the Weibull distribution function and calculations of energy density and the theoretical-practical power of wind turbines. Next, the average power density in sea waves was calculated using the height of the tide, wave, and water speed. Then, mathematical relations were used to calculate the power of

electricity generated from the tide. After completing the calculations related to wind and tidal energies on Qeshm Island, the hybrid energy system, which combines clean coastal energies, was designed and implemented using HOMER software.

### **3. Result**

The results of the wind energy parameters showed that at a height of 10 m above ground on Qeshm Island, the wind power is about 121 W/m<sup>2</sup>. At an altitude of 120 m above ground, the wind power is about 350 W/m<sup>2</sup>. The wind is present in Qeshm for 6,425 hours per year. For about 4,176 hours per year, the wind speed is within the range of the turbine's starting and stopping speed. For wind turbines with a blade diameter of 4 m and a sweeping surface of 12.56 m<sup>2</sup>, the theoretical power of the turbine is 2,672 watts. The practical power of the turbine with a diameter of 4 m is 982 watts at a height of 50 m. At a height of 10 m, the theoretical power of the turbine is 1,020 watts, and the practical power is 375 watts for a turbine diameter of 4 m.

The energy produced annually by a tidal hydro turbine device on the coast of Bandar Laft was calculated by multiplying the number of hours in a year (8,760) by the annual average electricity energy (47.2), resulting in 413,641 kWh. Considering an efficiency of 50%, the production power is evaluated at 206,820 kWh (equal to 206 MWh). Taking into account the width of the range and the diameter of the device, and maintaining a distance of 2.5 times the diameter of the turbine between each device, it is possible to design a power plant where, if 10 turbines are implemented, the annual production power is equal to 4,136,416 kWh. With an efficiency of 50%, the production power is estimated to be 2,068,208 kWh (2 GWh).

The results showed that from the implementation of the hybrid model, about 6.2 GWh of electricity can be produced annually, of which 82.8% will be from the solar energy system. Additionally, about 0.96 GWh of electricity (964,197 kWh) can be extracted from tides by installing a 100 kW turbine on the shores of Bandar Laft. With a 100 kW wind turbine, about 119,370 kWh of electricity can be generated per year. The cost of 1 kWh of clean energy on Qeshm Island was estimated at \$3.22.

### **4. Conclusion**

It can be concluded that Qeshm Island has the potential to harness energy from natural and renewable sources. By investing in the solar energy sector and particularly in tidal hydroturbines at Laft Port on the northern shores of Qeshm Island, along with pilot wind turbines, it is possible to obtain clean and reliable energy. Additionally, electricity from the thermal power plant can be considered a supporting and backup source for renewable energies.



## طراحی و تحلیل سیستم هیبریدی از انرژی‌های پاک ساحلی در جزیره قشم

نیما امیرشکاری<sup>۱</sup> | احمد نوحه‌گر<sup>۲\*</sup> | زینب سازور<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی سیستم‌های انرژی - گرایش انرژی و محیط‌زیست، پردیس بین‌المللی کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران. رایانامه: [nima.amirshकारी@gmail.com](mailto:nima.amirshकारी@gmail.com)
۲. نویسنده مسؤل، استاد گروه مهندسی سوانح، آموزش و سیستم‌های محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [nohegar@ut.ac.ir](mailto:nohegar@ut.ac.ir)
۳. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: [sazvar@ut.ac.ir](mailto:sazvar@ut.ac.ir)

## اطلاعات مقاله

## چکیده

## نوع مقاله:

پژوهشی

## تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۲۰

## کلیدواژه:

انرژی پاک،

سیستم هیبریدی،

هیدروتوربین،

جزیره قشم،

سید انرژی.

هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی استحصال انرژی از منابع تجدیدپذیر و طراحی سیستم هیبریدی از آن‌ها در جزیره قشم است. برای دستیابی به این رهیافت، ابتدا با استفاده از داده‌های سرعت باد و تابع توزیع ویبول و تابع گاما، چگالی احتمال وقوع سرعت باد، توان نیروی باد و میزان استحصال انرژی از توربین بادی محاسبه شد. سپس، سرعت جریان آب در بندر لافت در سواحل شمالی قشم به دست آمد و توان نیرو از امواج جزر و مد و استحصال انرژی از هیدروتوربین محاسبه شد. در نهایت، با نرم‌افزار HOMER، مدل هیبریدی از ۳ مگاوات پنل خورشیدی، توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی، هیدروتوربین جزر و مدی ۱۰۰ کیلوواتی به همراه مبدل و باتری طراحی شد و میزان انرژی پاک قابل استحصال از سیستم و هزینه آن محاسبه شد. نتایج بررسی توان باد نشان داد قدرت عملی توربین با قطر ۴ متر در ارتفاع ۱۰ متری حدود ۳۷۵ وات و در ارتفاع ۵۰ متری ۹۸۲ وات است که در ۴۱۷۶ ساعت از سال توربین می‌تواند الکتریسیته تولید کند. محاسبات مربوط به جزر و مد نشان داد می‌توان سالانه ۲۰۶ مگاوات برق تولید کرد، ولی اگر توربین ۱۰۰ کیلوواتی نصب شود، می‌توان بیش از ۹۰۰ مگاوات برق استحصال کرد. نتایج سیستم هیبریدی نشان داد می‌توان سالانه ۶/۲ گیگاوات ساعت انرژی در سال تولید کرد و انرژی مصرفی ۵۷۵ خانوار را در سال تأمین کرد. با اجرای این پروژه هیبریدی، قیمت تمام‌شده هر کیلووات انرژی تجدیدپذیر حدود ۳/۲ دلار و هزینه خالص ۱۳،۷۶۹،۱۲۰ دلار خواهد بود.

استناد: امیرشکاری، نیما؛ نوحه‌گر، احمد و سازور، زینب (۱۴۰۳). طراحی و تحلیل سیستم هیبریدی از انرژی‌های پاک ساحلی در جزیره قشم. فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار، ۳ (۳)

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.379701.1080> . ۲۶۹-۲۴۹

© نیما امیرشکاری، احمد نوحه‌گر، زینب سازور ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ses.2024.379701.1080>



## مقدمه

بیشتر کشورهای در حال توسعه که هدفشان ریشه‌کنی فقر است، با چالش‌های کسب انرژی به‌صرفه برای جمعیت خود در مناطق دورافتاده و شهری مواجه هستند. کمبود انرژی و الکتریسیته نقش مهمی در طولانی شدن فقر در کشورهای در حال توسعه دارد. در دستور کار ۲۰۳۰ آمده است که بیش از ۳ میلیارد نفر برای پخت‌وپز و گرم کردن به چوب، زغال سنگ یا فضولات حیوانی متکی هستند [۱]. انرژی عامل اصلی تغییرات اقلیمی است که حدود ۶۰ درصد از کل انتشار گازهای گلخانه‌ای جهان را به‌خود اختصاص می‌دهد؛ از سال ۱۹۹۰، انتشار جهانی CO<sub>2</sub> بیش از ۴۶ درصد افزایش یافته است. هدف ۷ از اهداف ۱۷ گانه توسعه پایدار، انرژی پاک و به‌صرفه است که اهداف فرعی آن شامل: اطمینان از دسترسی همگانی به انرژی ارزان؛ افزایش سهم انرژی‌های پاک در ترکیب انرژی جهانی؛ دو برابر شدن بهره‌وری از انرژی و توسعه زیرساخت‌ها برای تأمین خدمات انرژی پایدار به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه است [۲]. ایران در قلب خاورمیانه، بزرگ‌ترین مخازن سوخت‌های هیدروکربنی جهان را دارد و ذخایر آن معادل ۱۲۰۰ میلیارد بشکه نفت خام است و مشکلی در تولید انرژی حاصل از سوخت‌های فسیلی ندارد؛ اما مشکل اصلی آن، تجدیدنپذیر بودن این منابع انرژی و انتشار آلودگی از سوزاندن این منابع برای تولید برق است که هزینه محیط زیستی آن بیشتر از صرفه‌جویی اقتصادی و کوتاه‌مدت آن است [۳]. یکی از اولویت‌های کلیدی نقشه راه دولت ایران با دستور کار ۲۰۳۰ اهداف توسعه پایدار برای انرژی (SDG7) سازمان ملل متحد مرتبط است. در نتیجه، دولت ایران تأکید بیشتری بر توسعه یک جهت استراتژیک و راه‌حلی برای انرژی پاک و قابل اعتماد برای مردم داشته است.

برق تولیدشده در ایران از نیروگاه‌های حرارتی که با گاز و مازوت کار می‌کنند، تأمین می‌شود. بر اساس گزارش‌های توانیر در ایران هزینه پایین تولید برق (۰/۲۵ دلار در کیلووات ساعت) و در دسترس بودن ذخایر عظیم سوخت باعث شده تا در ایران کمتر به مسئله انرژی‌های پاک پرداخته شود؛ در حالی که ایران دارای میانگین تابش خورشیدی روزانه ۴/۵ تا ۵/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع و دسترسی به آب‌های ساحلی و همچنین، مکان‌های بادخیز فراوانی دارد که محل بالقوه‌ای برای کسب انرژی پاک، ارزان و پایدار هستند [۴]. جزیره قشم در آب‌های خلیج فارس، بزرگ‌ترین جزیره در جنوب ایران است. این جزیره ۵/۳ کیلووات ساعت بر مترمربع تابش خورشیدی روزانه دریافت می‌کند. بیش از ۱۴۳۰ کیلومترمربع وسعت دارد و دسترسی فراوانی به آب‌های ساحلی و امواج دریایی دارد؛ میانگین سرعت باد نیز تا ۳ متر بر ثانیه می‌رسد. پتانسیل‌های محیطی متعددی برای کسب انرژی‌های تجدیدپذیر در این جزیره وجود دارد.

امروزه، ریزش شبکه‌هایی با منابع انرژی تجدیدپذیر در حال افزایش هستند که یک راه‌حل امیدوارکننده برای برق‌رسانی به مناطق دورافتاده است، اما گسترش شبکه سراسری توزیع برق در این مکان‌ها پرهزینه است. پژوهشگران برای تأمین برق مورد نیاز این مناطق، سیستم‌های ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر را مورد ارزیابی قرار می‌دهند تا بهترین سیستم را بر اساس نیاز منطقه و شرایط محیط آن طراحی کنند. نرم‌افزار HOMER برای طراحی و محاسبات مربوط به این سیستم‌ها که ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر است، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای مصرف‌کنندگان خانگی در مناطق دورافتاده که از شبکه اصلی خدمات‌رسانی نمی‌شود، دیزل ژنراتورها انتخاب معمولی برای تأمین برق هستند. در نتیجه، خدمات و نگهداری زیادی باید روی این ژنراتورها انجام شود. بنابراین، محققان ایده‌های معرفی توربین بادی را با ژنراتورهای دیزلی برای تشکیل یک سیستم قدرت هیبریدی مطرح کرده‌اند و سیستم بهینه با توجه به تقاضای بار الکتریسیته طراحی شد. یک مطالعه موردی از یک سیستم هیبریدی بادی-دیزلی ژنراتور ارائه شد. نشان داده شد که کاهش هزینه‌های عملیاتی به‌دست‌آمده با استفاده از ذخیره‌سازی را می‌توان به طور قابل توجهی با استفاده از نرم‌افزار HOMER افزایش داد [۵].

پژوهشگران با استفاده از الکتریسیته اضافی تولیدشده توسط توربین‌های بادی را برای تولید هیدروژن در یک کنترولیز قلیایی (AEL) ارزیابی کردند. مخزن، هیدروژن تولیدشده را ذخیره می‌کند و هیدروژن را به پیل سوختی غشای مبادله پروتون (PEMFC) برای تولید الکتریسیته پس از افزایش تقاضای برق از برق تولیدشده توسط توربین‌های بادی، تأمین می‌کند. هدف پژوهش، استفاده از نیمرخ باد در منطقه کوهن در ایران، برای تحلیل عملکرد سیستم یکپارچه پیشنهادی در مقیاس خرد بود. نتایج خروجی این مطالعه می‌تواند به عنوان یک مطالعه موردی برای ساخت‌وساز در آینده بر اساس مشخصات دقیق توربین‌های بادی NTK300 مورد استفاده

قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد با حداقل منبع تغذیه ۳۰ کیلووات از توربین‌های بادی در مقیاس آزمایشگاهی، توان تولیدشده توسط PEMFC ۱۰۰۸ وات خواهد بود، در حالی که حداکثر هیدروژن تولیدشده ۳۰۴ میلی‌لیتر در ساعت خواهد بود [۶].

پژوهشگران یک سیستم هیبریدی مبتنی بر انرژی خورشیدی، توربین‌های باد، دیزل، زیست‌توده، توربین آبی و باتری طراحی کردند و از نرم‌افزار HOMER برای اندازه‌گیری، ارزیابی فنی، مالی، عوامل تجدیدپذیر، برآورد انتشارات مضر و تحلیل حساسیت استفاده کردند. برای انتخاب سیستم بهینه، کمترین هزینه انرژی به عنوان معیار اصلی در نظر گرفته شد. چهار معماری مختلف از منابع انرژی تجدیدپذیر طراحی شد که نتایج نشان داد سیستم هیبریدی  $PV^1-WT^2-MH^3-CT^4-BT^5-DG^6-BG^7$  اقتصادی‌تر از سایر سناریوهای ترکیبی بود، زیرا کمترین هزینه انرژی آن ۰/۱۹۶ دلار، هزینه عملیاتی ۳۶/۱۸ دلار و هزینه خالص فعلی ۸۳۱/۲ دلار به دست آمد. همچنین، این سیستم هیبریدی سازگار با محیط زیست است، چون گازهای گلخانه‌ای کمتری منتشر می‌کند و عامل تجدیدپذیری<sup>۸</sup> آن بیش از ۸۱ درصد است [۷]. پژوهشگران در پردیس دانشگاه فنی قبرس شمالی سیستم هیبریدی از انرژی‌های تجدیدپذیر را اجرا کردند. سیستم پیشنهادی متشکل از ۱/۷۹ مگاوات پنل خورشیدی، ۲ مگاوات توربین بادی و ۰/۹۲ مگاوات زیست‌توده با سیستم ذخیره‌سازی هیدرولیک پمپ‌شده ۲۴/۳۹ مگاوات ساعت و باتری‌های ۱۴۸ کیلووات ساعت بود. هزینه برق برابر با ۰/۱۷ دلار در کیلووات ساعت محاسبه شد [۸]. پژوهشگران سیستم هیبریدی از انرژی تجدیدپذیر برای یک منطقه روستایی دورافتاده در ایالت کارناتاکا (هند) انجام دادند. معماری پنل‌های فتوولتائیک، توربین بادی، هیدروتوربین، دیزل ژنراتور و باتری با استفاده از مدل بهینه‌سازی ترکیبی مورد مطالعه قرار گرفت. هزینه انرژی و هزینه خالص فعلی به‌دست‌آمده برای سیستم در محدوده ۰/۱ تا ۰/۱۶۲ دلار در کیلووات ساعت و ۴/۶۵ و ۷/۱۶ میلیون دلار به دست آمد [۹]. پژوهشگران برای ۱۰ خانه روستایی در مراکش، ترکیب‌های مختلفی از سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر را از نظر فنی و مالی ارزیابی کردند. منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته شده خورشیدی، بادی و زیست‌توده بود. یافته‌ها نشان می‌دهد برای میانگین انرژی مورد نیاز ۹۱ کیلووات ساعت در روز و بار پیک ۶/۴ کیلووات، هزینه انرژی واحد سناریوی پیکربندی بهینه ۰/۲ دلار در کیلووات ساعت است و بنابراین، طراحی، توسعه و اجرای سیستم پیشنهادی بیانگر راه حلی امیدوارکننده برای امنیت تأمین انرژی است که ۱۱ درصد انرژی از باد، ۴۱ درصد از خورشید و ۴۸ درصد از زیست‌توده تأمین خواهد شد [۱۰].

هزینه برق تولیدشده توسط نیروگاه‌های حرارتی در جمهوری جیبوتی نسبتاً بالا است (۰/۳۲ دلار برای کیلووات ساعت) که دلیل اصلی آن وابستگی به نفت وارداتی همراه با نوسان قیمت نفت است. با این حال، جیبوتی دارای منابع انرژی تجدیدپذیر مانند تابش خورشیدی ۵/۹۲ کیلووات ساعت در متر مربع در روز، انرژی زمین گرمایی بالقوه تا ۱۰۰۰ مگاوات و سرعت باد بالاتر از ۶ متر بر ثانیه است. پژوهشگران سیستم انرژی تجدیدپذیر هیبریدی متصل به شبکه در یک خانه شهری مسکونی واقع در شهر تجوره را ارزیابی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار HOMER نشان داد ترکیب اقتصادی مناسب از سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر هیبریدی، سیستم متصل به شبکه PV-Wind است. هزینه خالص فعلی، هزینه تراز شده (LCOE) هزینه عملیاتی آن به ترتیب ۳۳۷ دلار و ۰/۰۰۲ دلار در هر کیلووات ساعت و ۱۰۲۵ دلار در سال محاسبه شد [۱۱]. در شهر غزه، منابع اولیه انرژی تجدیدپذیر، زیست‌توده حاصل از پسماند است که آسیب‌های زیست‌محیطی و بهداشتی زیادی وارد می‌کند. سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (HRES<sup>۹</sup>) خورشیدی و زیست‌توده برای این منطقه پیشنهاد شده است که برق‌رسانی پایدار را برای جوامع پُرجمعیت فراهم می‌کند. آزمایش‌های شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار HOMER Pro انجام شد که میانگین تقاضای روزانه منطقه مسکونی حدود ۱۰۷۴ کیلووات ساعت در روز و پیک ۸۴/۵ کیلووات بر ثانیه است. سیستم متصل به شبکه، از منابع تجدیدپذیر از

1. Photovoltaic
2. Wind Turbine
3. Micro Hydro
4. Converter
5. Battery Storage
6. Diesel Generator
7. Biodiesel Generator
8. Renewable factor
9. Hybrid Renewable Energy Systems

طریق پنل‌های فتوولتائیک و یک ژنراتور بیوگاز استفاده می‌کند. مدل ریاضی برای ارزیابی ظرفیت سیستم با بارهای مختلف برای دستیابی به راه حل بهینه از سهم زیست‌توده ارائه شده است که نتایج آن حداقل ۲/۳۰ میلیون دلار هزینه خالص فعلی (NPC) و ۰/۴۳۸ دلار برای هر کیلووات ساعت برق را نشان می‌دهد [۱۲].

پژوهش حاضر یک نگاه جامع به مسئله انرژی‌های پاک در جزیره قشم دارد و ترکیب متنوعی از انرژی‌ها با نام انرژی‌های پاک ساحلی شامل هیدروتوربین‌های جزر و مدی، توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک را در قالب یک مکان خاص از جزیره قشم و حتی با حمایت نیروگاه تولید برق حرارتی در نظر گرفته است. بنابراین پژوهش حاضر، سعی در ارزیابی امکان استحصال انرژی تجدیدپذیر با یک سیستم هیبریدی دارد که میزان انرژی تولیدشده و هزینه نهایی هر کیلووات ساعت را نیز به دست آورد. سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق (ساتبا) که در سال ۱۳۹۵ به تصویب رسید، دارای ۱۳ ماده است که به وزارت نیرو ابلاغ شده است. ارتقای سهم انرژی‌های تجدیدپذیر به حداقل ۱۵ درصد از ظرفیت منصوبه برق کشور و سازمان مرجع و محوری در حوزه بهره‌وری و کاهش هدررفت انرژی الکتریکی در زنجیره تولید تا مصرف معادل ۲۵ هزار مگاوات در افق ۱۴۱۰، چشم‌انداز این سازمان است. مأموریت این سازمان، ارتقای میزان تولید و به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک در حوزه انرژی برق و ارتقای بهره‌وری انرژی الکتریکی در سطح کشور از طریق سیاست‌گذاری، تنظیم‌گری، تسهیل و مدیریت اجرای طرح‌های مرتبط است. به همین دلیل، پژوهش حاضر نیز در راستای اهداف ساتبا قرار دارد و ارزیابی امکان اجرا و پیاده‌سازی سیستم هیبریدی از انرژی پاک را در قشم بررسی کرد.

## مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی در این پژوهش، جزیره قشم است. این جزیره ۱۴۳۰ کیلومتر مربع وسعت دارد و در آب‌های خلیج فارس در محدوده سیاسی- اداری استان هرمزگان قرار دارد. فاصله شمالی‌ترین نقطه جزیره قشم (بندر لافت) تا جنوبی‌ترین نقطه سرزمین خشکی فلات ایران در جنوب (بندر پهل)، دو کیلومتر فاصله است که رفت‌وآمد دریایی به جزیره قشم، در بین این بنادر که دو کیلومتر فاصله دارند، با شناورهای دریایی- باری انجام می‌شود (شکل ۱). در سرشماری سال ۱۳۹۵، جزیره قشم دارای ۱۴۸ هزار نفر جمعیت داشته است و چهار شهر و حدود ۷۸ روستا دارد. بزرگ‌ترین شهر جزیره، قشم است که در شرقی‌ترین نقطه جزیره احداث شده است. شرکت آب و برق مپنا، مسئول تأمین برق جزیره قشم است و مشترکان آن شامل مشترکان خانوار شهری- روستایی، مراکز تجاری، مراکز صنعتی و بنادر است. اقلیم آن گرم و خشک بیابانی است که بارش سالانه در آن ۱۸۶ میلی‌متر و اما تبخیر آن حدود ۳ هزار میلی‌متر است. میانگین دمای هوای سالانه ۲۷/۳ درجه سانتی‌گراد است که تابستان‌های بسیار گرم و همراه با رطوبت نسبی بیش از ۷۵ درصد را دارد که باعث رخداد پدیده شرجی در ماه‌های گرم می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی جزیره قشم

## محاسبه توان انرژی بادی

در اولین گام از این پژوهش، پتانسیل استحصال انرژی از باد در جزیره قشم با تابع توزیع ویبول و محاسبه چگالی انرژی و قدرت نظری- عملی توربین‌های بادی به دست آمد. در بررسی مطالعات انجام‌شده، نشان داده شده است که تابع توزیع آماری ویبول، انطباق خوبی با داده‌های سرعت و چگالی باد دارد که برای محاسبه قدرت و انرژی از توربین بادی مورد قبول پژوهشگران است. در این مطالعه نیز از این تابع استفاده شد که معادله آن به شرح ذیل است (معادله ۱) [۱۳]:

$$p(v) = \left[ \frac{k}{c} \right] \left[ \frac{v}{c} \right]^{k-1} - \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

در این رابطه، باید پارامترهای  $K$  و  $C$  را محاسبه کرد و سپس، در معادله جای‌گذاری کرد. برای محاسبه آن‌ها، از معادله برآزش حداقل مربعات با تابع  $y=ax+b$  استفاده شد. رابطه خطی بین  $x_i$  و  $y_i$  برای تعیین مقادیر  $a$  و  $b$  به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$Y = \text{Ln} \{-\text{Ln} [1-P(v)]\} \quad X = \text{Ln}(vi) \quad (2)$$

در این رابطه،  $v_i$  میانگین طبقه‌های سرعت باد و  $p(v)$  درصد فراوانی تجمعی سرعت‌های باد در هر طبقه است. با محاسبه  $x$  و  $y$ ، مقادیر  $a$  و  $b$  از معادله رگرسیون محاسبه می‌شود [۱۴]. با محاسبه  $a$  و  $b$ ، مقادیر  $k$  و  $c$  از طریق معادله ۳ محاسبه می‌شود:

$$C = \text{Exp}(-B/A) \quad K = A \quad (3)$$

با به دست آوردن، متغیرهای  $k$  و  $c$ ، تابع احتمال ویبول محاسبه می‌شود. برای صحت‌سنجی تابع، از آزمون کای-دو بین مقادیر مشاهده‌ای داده‌های سرعت باد (ایستگاه سینوپتیک ساحلی قشم) و مقادیر تابع ویبول استفاده شد. چگالی باد نیز نقش زیادی در تولید انرژی از توربین‌های بادی دارد. در این پژوهش از تابع گاما (رابطه ۴) برای محاسبه آن استفاده شد. با داشتن پارامترهای  $k$  و  $c$  تابع ویبول و چگالی هوا ( $\rho$ )، چگالی باد قابل محاسبه است.

$$p = \frac{1}{2} \rho \cdot C^3 \cdot \Gamma \left[ 1 + \frac{3}{K} \right] \quad (4)$$

ارتفاع محور توربین‌های بادی، حدود ۳۰ تا ۸۰ متر از سطح زمین است. با افزایش ارتفاع و کاهش اثر ناهمواری‌های سطحی، بر میزان سرعت و قدرت باد افزوده می‌شود. در این پژوهش، ارتفاع ۱۰ تا ۱۲۰ متری برای استفاده از توربین‌های بادی در نظر گرفته شد. برای برآورد سرعت باد در این ارتفاعات، از مدل توان یک‌هفتم نیرو استفاده شد:

$$\frac{C_2}{C_1} = \left( \frac{Z_2}{Z_1} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (5)$$

در این رابطه،  $C_1$  و  $C_2$  مقادیر مقیاس تابع ویبول، در ارتفاع‌های  $Z_1$  و  $Z_2$  هستند. با توجه به اینکه سرعت راه‌انداز و سرعت توقف اکثر توربین‌های بادی به ترتیب ۴ و ۲۵ متر در ثانیه است، لذا احتمال وقوع سرعت‌های باد بین مقادیر یادشده را می‌توان با استفاده از رابطه ۶ به دست آورد. لذا ۴ برابر با  $V_1$  سرعت ۴ متر در ثانیه و  $V_2$  حدود ۲۵ متر در ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

$$P(v_2 < v < v_2) = \exp \left( - \left( \frac{v_1}{c} \right)^k \right) - \exp \left( - \left( \frac{v_2}{c} \right)^k \right) \quad (6)$$

قدرت نظری توربین بادی (برحسب وات) با داشتن چگالی هوا ( $\rho$ )، سرعت باد ( $V$ ) و سطح ( $A$ ) مورد نظر (سطح جاروب توسط پره‌های توربین بادی)، به صورت رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (7)$$

قدرت عملی توربین بادی نیز با داشتن بازده واقعی پره‌های توربین به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} e \cdot K \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (8)$$

که در آن،  $e$  بازده واقعی پره‌های توربین بادی است که ۳۰ درصد در نظر گرفته می‌شود.  $k$  ضریب مربوط به واحدهای انتخاب

شده است. چنانچه در محاسبه قدرت عملی توربین بادی، سرعت و سطح جاروشده توسط پره‌های توربین بادی برحسب مترمربع بیان شود، K معادل  $\frac{1}{2} \rho$  در نظر گرفته می‌شود.

### محاسبه توان انرژی جزر و مد

گرفتن انرژی از جزر و مد، در مواردی قابل اجرا است که بتوان آب زیادی از جزر و مد ذخیره کرد و با آزاد کردن آن، انرژی کسب کرد. هنگام مد یعنی بالا آمدن سطح آب دریا، مقدار زیادی از آب وارد مخزن مصنوعی می‌شود. قبل از اینکه جزر اتفاق بیفتد و سطح آب پایین برود، دریچه کانال ورودی بسته شده و آب در مخزن جمع می‌شود. سپس، دریچه خروجی باز شده و آب، توربین‌های نصب‌شده روی دریچه خروجی را به گردش درآورده و انرژی هیدرودینامیکی تولید می‌کند.

پتانسیل انرژی در جزر و مد که با دامنه R (برحسب متر) وارد حوضچه‌ای به مساحت A (برحسب کیلومتر مربع) می‌شود برابر است با:

$$W = \rho AR \times \frac{R}{2} \quad (9)$$

$$\Rightarrow W = \frac{1}{2} \rho g AR^2$$

که در آن، g شتاب جاذبه زمین (متر در ثانیه)؛  $\rho$ : دانسیته آب (کیلوگرم در مترمکعب)؛ A: مساحت حوضچه (کیلومتر مربع) و R: دامنه جزر و مد (متر) است [۱۵]. از آنجا که جزر و مد طی هر روز، آب دوبار وارد مخزن می‌شود، بنابراین شبانه‌روز، ۴ حالت جزر و مد وجود دارد و بیشترین انرژی که می‌توان کسب کرد، در رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$P_{\max} = \frac{4 \times \frac{1}{2} \rho g AR^2}{24.8 \times 3600} \Rightarrow \quad (10)$$

$$P_{\max} = 0.22 AR^2 \quad (\text{MW})$$

اما چون که افت‌های زیادی در تولید انرژی بهینه وجود دارد، انرژی واقعی قابل دسترس حدود ۲۵ درصد از انرژی به‌دست‌آمده از رابطه ۱۱ خواهد بود:

$$P_{\text{actual}} = \frac{P_{\max}}{4} = 0.055 AR^2 \quad (11)$$

بر اساس استانداردهای ارائه‌شده و نتایج پژوهشگران، حداقل دامنه جزر و مدی مناسب برای احداث نیروگاه جزر و مدی، ۵ متر است.

میانگین چگالی نیرو (APD) در واحد سطح مقطع بر اساس رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$ADP = \frac{1}{2} \times \rho \times \sum_{i=1}^{nb} (U_i^3 \times f(u)_i) (kw/m^2) \quad (12)$$

که در آن،  $U_i^3$  سرعت طبقات موج،  $\rho$  چگالی آب و  $f(u)_i$  درصد فراوانی طبقات سرعت موج است. میانگین چگالی نیرو با استفاده از سری زمانی به‌دست‌آمده از سرعت موج نیز به دست می‌آید:

$$ADP = \frac{1}{2} \times \frac{1}{N} \times \rho \times \sum_{i=1}^N (V_j^3) (kw/m^2) \quad (13)$$

انرژی موجود در جزر و مد از روش جریان به دست می‌آید که با محاسبه انرژی جنبشی در سطح مقطع محاسبه می‌شود و مقدار آن برابر است با حاصل ضرب میانگین چگالی نیرو (ADP) در کل سطح مقطع. نیروی استحصالی برای هر توربین، در هر گام سرعت از رابطه ۱۴ به دست می‌آید:

$$P_{av(i)} = \frac{1}{2} \times \rho \times U_i^3 \quad (14)$$

برای به دست آوردن توان الکتریکی متوسط سالانه از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود:

$$P_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^{N_b} P(U)_i \times f(U)_i \quad (15)$$



سپس، برای محاسبه انرژی تولید شده سالانه از رابطه ۱۶ استفاده می‌شود. عدد ۸۷۶۰ مجموع ساعات یک سال است.

$$AEP = 8760 \times P_{mean} \quad (16)$$

### طراحی سیستم هیبریدی از انرژی‌های پاک ساحلی

پس از اینکه، محاسبات مربوط به انرژی‌های بادی و جزر و مدی در جزیره قشم انجام شد، سیستم انرژی هیبریدی که ترکیبی از انرژی‌های پاک ساحلی (توربین بادی، پنل‌های فتوولتائیک و هیدروتوربین و انرژی شبکه) است، در نرم‌افزار HOMER طراحی و پیاده‌سازی شد. ابتدا مشخصات ذیل برای سیستم در نظر گرفته شد:

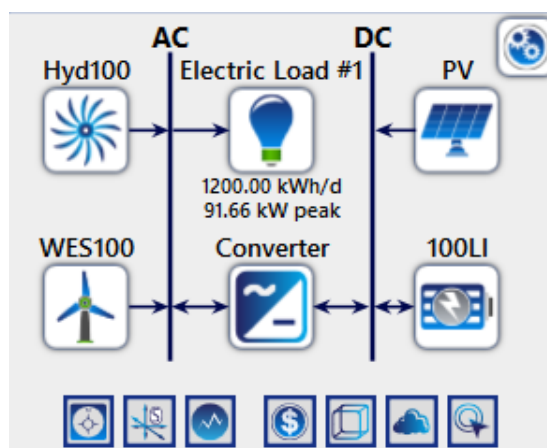
۱. سواحل شمالی جزیره قشم (در نزدیکی بندر لافت) به عنوان مکان پیشنهادی انتخاب شد.
۲. تعداد مشترکین خانگی برق در جزیره قشم ۲۰۷۸ مشترک است.
۳. شرکت تولید آب و برق قشم مینا و نیروگاه سیکل ترکیبی، برق اصلی مشترکین را تولید می‌کند.
۴. مصرف انرژی در جزیره قشم حدود ۹۶۵/۴ هزارمگاوات ساعت است.
۵. متوسط مصرف سرانه خانگی ۱۰۳۴۶ کیلووات ساعت است.

نرم‌افزار HOMER به ماهواره هواشناسی NASA متصل است و داده‌های هواشناسی شامل: ساعات آفتابی و شدت نور خورشید، دمای هوا و سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری از سطح زمین برای محدوده بندر لافت در جزیره قشم، از این ماهواره به دست آمد؛ اما سرعت جریان آب از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مشاهداتی به دست آمد.

برای اجرای مدل، ابتدا معماری طرح تهیه شد (جدول ۱) که شامل بار مصرفی، منابع انرژی، میدل و باتری است (شکل ۲). هدف از اجرای این مدل، تأمین بار مصرفی مشخصی نیست، بلکه این است که با اجرای سیستم هیبریدی، انرژی قابل استحصال و هزینه آن محاسبه شود. برای احداث مزرعه خورشیدی ۳ مگاواتی، نیاز به ۵۴۵۴ پنل خورشیدی ۵۵۰ وات مونوکریستال دوطرفه است. سازه استراکچر آن، دو ردیف تیپ سنگین ۱۲ عدد پنل خورشیدی تا ۵۵۰ وات از جنس فولاد با پوشش گالوانیزه گرم نیاز است.

جدول ۱. مشخصات اجزای سیستم هیبریدی از انرژی‌های پاک ساحلی

ردیف	اجزای معماری	مدل	ظرفیت	تعداد
۱	پنل خورشیدی	Generic flate plate PV	۳۰۰۰ کیلووات	۱
۲	توربین بادی	WES 18 [100 KW]	۱۰۰ کیلووات	۱
۳	هیدروتوربین جزر و مدی	Generic hdro 100 kw	۱۰۰ کیلووات	۱
۴	میدل	Generic system Converter	۱۰۰ کیلووات	۱
۵	باتری	Generic 100 kwh Li-Ion	۱۰۰ کیلووات-۶۰۰ ولت	۲
۶	بار مصرفی	Load	۵۰ کیلووات در ساعت	-



شکل ۲. معماری اجزای مدل هیبریدی انرژی پاک ساحلی در جزیره قشم

مشخصات مربوط به هزینه‌های سیستم به شرح جدول ۲ ارائه شده است. قیمت باتری نیز ۳۰۰ دلار، تعمیر و نگهداری ۱۰ دلار و طول عمر آن ۵ سال است.

جدول ۲. قیمت هر یک از اجزای سیستم هیبریدی

ردیف	اجزا	ویژگی	اجزا	ویژگی
	پانل خورشیدی		هیدروتوربین	
۱	هزینه خرید اولیه (کیلووات ساعت / دلار)	۳۹۷۵	هزینه خرید اولیه (کیلووات ساعت / دلار)	۵۵۰
۲	هزینه جایگزینی (کیلووات ساعت / دلار)	۳۳۷۸	هزینه جایگزینی (کیلووات ساعت / دلار)	۰
۳	هزینه تعمیر و نگهداری (کیلووات ساعت / دلار)	۱۰	هزینه تعمیر و نگهداری (کیلووات ساعت / دلار)	۵۰۰
۴	طول عمر (سال)	۲۰	طول عمر (سال)	۲۵
	توربین باد		مبدل	
۱	هزینه خرید اولیه (کیلووات ساعت / دلار)	۳۵۶۰	هزینه خرید اولیه (کیلووات ساعت / دلار)	۳۰۰
۲	هزینه جایگزینی (کیلووات ساعت / دلار)	۳۰۲۰	هزینه جایگزینی (کیلووات ساعت / دلار)	۳۰۰
۳	هزینه تعمیر و نگهداری (کیلووات ساعت / دلار)	۱۰	هزینه تعمیر و نگهداری (کیلووات ساعت / دلار)	۱۰
۴	طول عمر (سال)	۲۰	طول عمر (سال)	۱۵

در نرم‌افزار HOMER، برای محاسبه ارزش بازیافتی هر مؤلفه در پایان عمر پروژه، از رابطه ۱۷ استفاده می‌شود.

$$S = C_{rep} \frac{R_{rem}}{R_{comp}} \quad (17)$$

که  $S$  ارزش بازیافتی،  $C_{rep}$  هزینه جابه‌جایی مؤلفه،  $R_{rem}$  عمر باقی‌مانده مؤلفه و  $R_{comp}$  طول عمر مؤلفه است. برای هر مؤلفه، هزینه‌های سرمایه، جابه‌جایی، تعمیر و نگهداری و سوخت با ارزش بازیافتی و هر هزینه یا درآمد دیگر برای یافتن هزینه سالانه مؤلفه‌ها ترکیب می‌شود. رابطه ۱۸ برای ضریب بازیابی سرمایه و رابطه ۱۹ هزینه ترازشده انرژی به کار می‌رود:

$$CRF(i, N) = \frac{i(i+1)^N}{(i+1)^{N-1}} \quad (18)$$

که  $i$  نرخ بهره واقعی سالانه و  $N$  تعداد سال‌ها است.

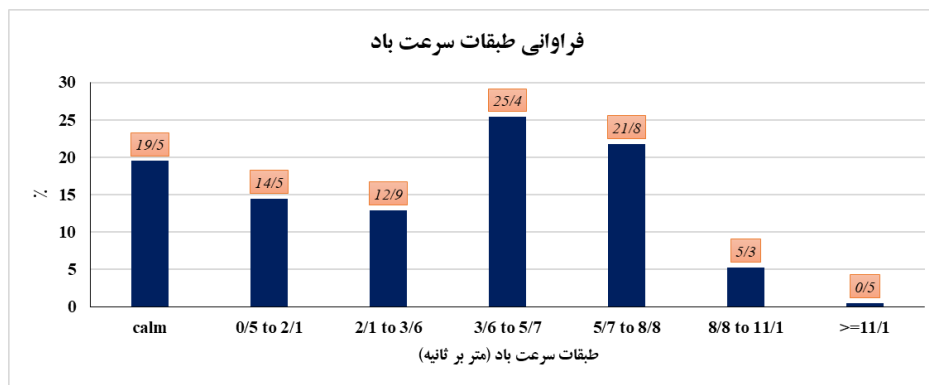
$$LCOE = \frac{C_{inv,ann} + C_{rep,ann} + C_{O\&M}}{E} \quad (19)$$

که در آن،  $E$  خروجی انرژی سالانه سیستم (کیلووات ساعت در سال) است.  $C_{inv,ann}$  سرمایه‌گذاری سالانه سیستم است.  $C_{rep,ann}$  هزینه جایگزینی است.  $C_{O\&M}$  هزینه عملیاتی و نگهداری سیستم است. برای سیستم هیبریدی مورد مطالعه، طول عمر ۲۰ سال، نرخ تنزیل نامی ۲۰ درصد، نرخ تورم مورد انتظار ۱۰ درصد در نظر گرفته شد.

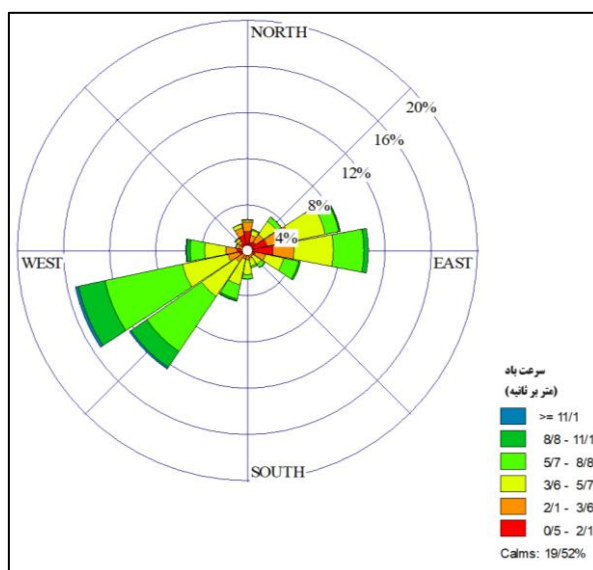
## یافته‌ها

### توان انرژی بادی

به منظور درک نمای کلی و وضعیت باد در جزیره قشم، جهات و فراوانی‌های سرعت باد در دوره ۲۱ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰) به صورت سه ساعت در روز، بررسی شد. از مجموع ۶۱۲۲۸ برداشت باد، تعداد ۱۶۲۵۲ مورد یا به بیانی ۱۹/۵ درصد از کل موارد برداشت مربوط به باد آرام بوده است که سرعتی کمتر از یک متر در ثانیه دارند. بیشترین درصد سرعت باد مربوط به طبقه ۳/۶ تا ۵/۷ متر در ثانیه بوده است (۲۵/۴ درصد) و پس از آن، طبقه ۵/۸ تا ۸/۸ با فراوانی ۲۱/۸ درصد قرار دارند (شکل ۳). باد آرام در نیمه سرد سال (فصل پاییز و زمستان) نسبت به نیمه گرم سال (فصل بهار و تابستان) حدود ۱۰ درصد بیشتر است. سرعت‌های باد بیشتر از ۳/۶ متر در ثانیه در بهار و تابستان افزایش می‌یابد و فراوانی آن‌ها بیشتر از ماه‌های سرد سال است. باد غالب در جزیره قشم، جنوب غربی است که حدود ۴۸ درصد از بادها را شامل می‌شود. حدود ۲۵ درصد نیز از سمت شرق و شمال شرقی است.



شکل ۳. نمودار ستونی فراوانی طبقات سرعت باد در جزیره قشم

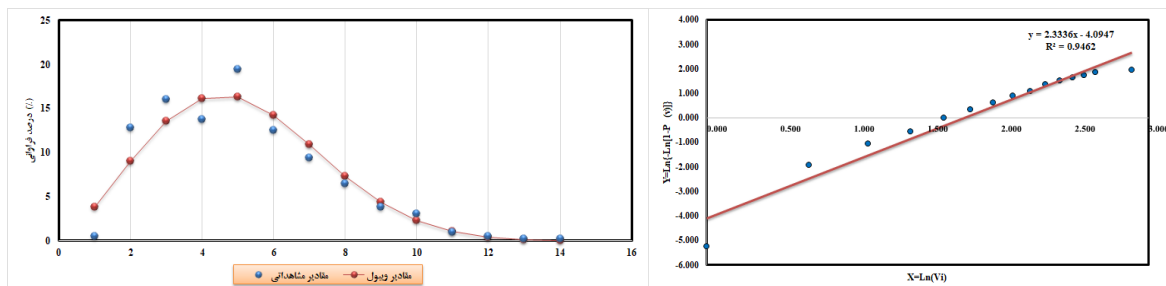


شکل ۴. گلباد سالانه جزیره قشم

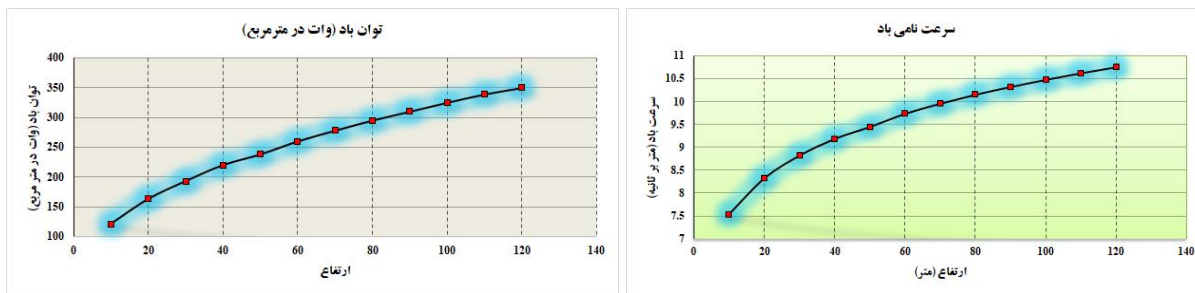
بر اساس نتایج معادله رگرسیون خطی و طبقات سرعت باد، پارامترهای  $x$  و  $y$  به دست آمد که با داشتن پارامترهای  $a$  و  $b$  منتج از معادله، پارامترهای  $K$  و  $C$  نیز محاسبه شد (جدول ۳). نتایج حاصل از روابط ریاضی محاسبه پارامترهای تابع توزیع ویبول بیانگر این است که پارامتر شکل ( $K$ ) و مقیاس ( $C$ ) برای جزیره قشم به ترتیب  $۲/۳۳$  و  $۵/۷۸$  برآورد شد. با داشتن این پارامترها و با استفاده از میانه طبقات سرعت باد، مقادیر تابع احتمال پیوسته ویبول محاسبه شد. مقادیر مشخص شده برای احتمال وقوع سرعت‌های باد در جزیره قشم از طریق مقادیر تابع ویبول و احتمال واقعی سرعت‌های باد، ترسیم و جهت مقایسه نمایش داده شد (شکل ۵). اعتبارسنجی تابع ویبول برای داده‌های باد با آزمون کای دو ارزیابی شد و معناداری در سطح ۹۹ درصد تأیید شد. نتایج حاصل از روابط مربوط به محاسبه پارامترهای انرژی باد نشان داد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین در جزیره قشم، توان باد حدود ۱۲۱ وات بر مترمربع است. با توجه به این که ارتفاع محور بیشتر توربین‌های بادی تجاری، حدود ۳۰ تا ۱۲۰ متر از سطح زمین است، در این پژوهش، چگالی و قدرت باد تا ارتفاع ۱۲۰ متری که ارتفاع نهایی توربین‌های بادی است، محاسبه شده و در شکل ۶ ارائه شده، به گونه‌ای که در ارتفاع ۱۲۰ متری، قدرت باد حدود ۳۵۰ وات بر مترمربع است. سرعت نامی باد که در محاسبات انرژی بسیار مهم است، سرعتی است که توربین بیشترین انرژی را طی سال، در این سرعت تولید می‌کند. نتایج نشان داد در جزیره قشم، در ارتفاع ۱۰ متری، سرعت نامی ۷/۵ متر در ثانیه است، اما در ارتفاع ۱۲۰ متری، به ۱۰/۷۵ متر در ثانیه می‌رسد.

جدول ۳. نتایج آماری طبقات سرعت باد در جزیره قشم در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱

طبقات سرعت	میان‌ه طبقات	فراوانی	درصد فراوانی	درصد	ساعت در سال	ساعت در سال	$X_i$	$Y_i$	مقادیر تابع ویبول
۱/۵ تا ۲/۵	۱	۲۳۳	۰/۵	۰/۵	۳۳/۳	۳۳/۳	۰	-۰/۵۲۶	۳/۸۴
۲/۵ تا ۳/۵	۲	۵۷۸۰	۱۲/۹	۱۳/۴	۸۲۵/۷	۸۲۵/۷	۰/۶۹۳	-۱/۹۴۱	۹/۰۳
۳/۵ تا ۴/۵	۳	۷۲۰۵	۱۶	۲۹/۴	۱۰۲۹	۱۰۲۹	۱/۰۹	-۱/۰۵۶	۱۳/۵۶
۴/۵ تا ۵/۵	۴	۶۱۸۴	۱۳/۷	۴۳/۱	۸۸۳	۸۸۳	۱/۳۸۶	-۰/۵۷۲	۱۶/۱۶
۵/۵ تا ۶/۵	۵	۸۷۴۶	۱۹/۴	۶۲/۶	۱۲۴۹	۱۲۴۹	۱/۶۰۹	-۰/۱۰۷	۱۶/۲۸
۶/۵ تا ۷/۵	۶	۵۶۵۲	۱۲/۶	۷۵/۲	۸۰۷	۸۰۷	۱/۷۹۲	-۰/۳۳۱	۱۴/۲۳
۷/۵ تا ۸/۵	۷	۴۲۲۶	۹/۴	۸۴/۵	۶۰۳	۶۰۳	۱/۹۴۶	-۰/۶۲۵	۱۰/۹
۸/۵ تا ۹/۵	۸	۲۹۱۶	۶/۵	۹۱	۴۱۶	۴۱۶	۲/۰۷۹	-۰/۸۸	۷/۳۶
۹/۵ تا ۱۰/۵	۹	۱۷۲۹	۳/۸	۹۴/۹	۲۴۷	۲۴۷	۲/۱۹	۱/۰۸۹	۴/۳۹
۱۰/۵ تا ۱۱/۵	۱۰	۱۳۷۳	۳/۱	۹۷/۹	۱۹۶	۱۹۶	۲/۳۰۳	۱/۳۵۵	۲/۳۱
۱۱/۵ تا ۱۲/۵	۱۱	۴۳۶	۱	۹۸/۹	۶۲/۳	۶۲/۳	۲/۳۹۸	۱/۵۰۶	۱/۰۷
۱۲/۵ تا ۱۳/۵	۱۲	۲۳۰	۰/۵	۹۹/۴	۳۳	۳۳	۲/۴۸۵	۱/۶۳۵	۰/۴۴
۱۳/۵ تا ۱۴/۵	۱۳	۱۱۵	۰/۳	۹۹/۷	۱۶/۴	۱۶/۴	۲/۵۶۵	۱/۷۴	۰/۱۵
۱۴/۵ تا ۱۵/۵	۱۴	۸۰	۰/۲	۹۹/۸	۱۱/۴	۱۱/۴	۲/۶۳۹	۱/۸۶	۰/۰۵
بزرگتر از ۱۴/۵	۱۵	۷۱	۰/۲	۱۰۰	۱۰/۱	۱۰/۱	۲/۸۹	۱/۹۳۳	۰/۰۳



شکل ۵. نمودار سمت چپ: معادله رگرسیونی و نمودار سمت راست: تابع توزیع ویبول و داده‌های مشاهده‌ای سرعت باد



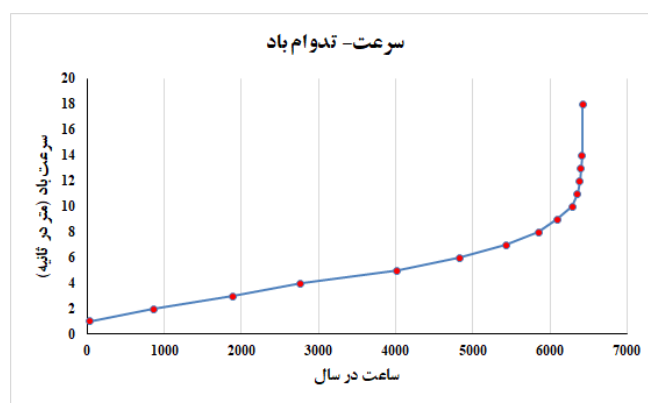
شکل ۶. توان باد و توانی نامی باد در ارتفاعات مختلف نصب توربین‌های بادی در جزیره قشم

نتایج نشان داد در جزیره قشم، حدود ۶۵ درصد از ساعات موجودیت باد، سرعت باد بین ۴ تا ۲۵ متر در ثانیه است. ساعات موجودیت باد در قشم ۶۴۲۵ ساعت در سال است. بنابراین، حدود ۴۱۷۶ ساعت از سال، سرعت باد در بازه سرعت راه‌انداز و توقف توربین قرار دارد. یعنی اینکه توربین می‌تواند در ۴۱۷۶ ساعت از سال، انرژی تولید کند (شکل ۷).

با در نظر گرفتن بازده ۳۰ درصد برای توربین‌های بادی و توان و چگالی به‌دست‌آمده برای باد، قدرت توربین‌های بادی با قطر پره‌های ۴ متر و سطح جاروب (۱۲/۵۶ مترمربع) که حاصل از ضرب ۴ در عدد پی (۳/۱۴) است، قدرت نظری توربین ۲۶۷۲ وات خواهد بود. در حالی که قدرت عملی توربین برای قطر توربین ۴ متر برابر با ۹۸۲ وات در ارتفاع ۵۰ متری خواهد بود. در

ارتفاع ۱۰ متری، قدرت نظری توربین ۱۰۲۰ وات و قدرت عملی توربین برای قطر توربین ۴ متر برابر با ۳۷۵ وات خواهد بود (شکل ۷).

این حقیقت که قدرت با توان سوم سرعت متناسب است، باد را به عنوان اولین عامل مورد نظر جهت طراحی توربین بادی معرفی می‌کند. از این رو، سرعت متوسط و توزیع سالیانه باد و یا تغییرات و تداوم وزش آن حائز اهمیت است. منحنی سرعت - تداوم باد محدوده سرعت باد در محور قائم و تعداد ساعاتی که باد با سرعت مساوی یا بیشتر از مقدار مشخصی که از روی محور قائم وزیده است در محور افقی است را نشان می‌دهد. این منحنی نشان می‌دهد ۲۲۴۹ ساعت از ساعات سال توربین‌های بادی مفروض در جزیره قشم یا در حال سکون بوده و یا در صورت چرخش، تولید انرژی نخواهد کرد، اما در ۴۱۷۶ ساعت از سال، توربین در حال تولید انرژی خواهد بود.

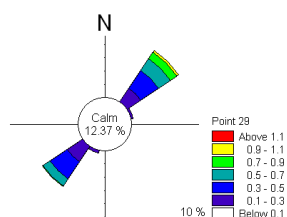


شکل ۷. منحنی سرعت و تداوم باد در جزیره قشم

### توان انرژی جزر و مدی

نتایج بررسی‌های هیدرودینامیکی، ورودی مبحث استحصال انرژی است و بررسی آن در این پژوهش بر مبنای دستورالعمل‌های مرکز انرژی‌های دریایی اروپا مبتنی بر «سرعت جریان» است. سرعت‌های جریانی که کمتر از ۰/۵ متر در ثانیه باشد، توان چرخاندن پره‌های توربین را ندارد و بنابراین، در محاسبات وارد نمی‌شود [۱۶ و ۱۷].

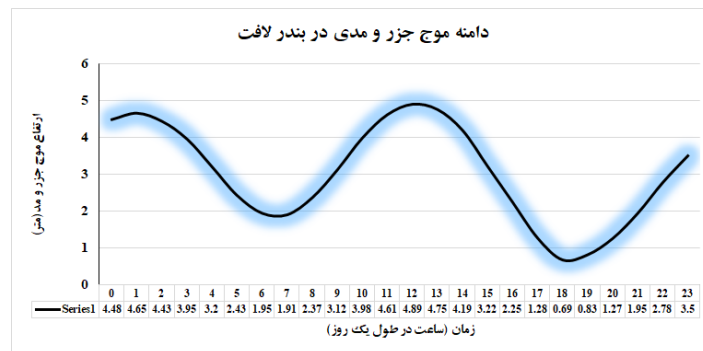
بندر لافت در شمالی‌ترین نقطه جزیره قشم قرار دارد و ایستگاه اندازه‌گیری جزر و مد و جریان‌های دریایی در آن وجود دارد. گل جریان که سمت و سرعت جریان دریا را ارائه می‌دهد، نشان می‌دهد در بندر لافت، مسیر جریان آب دریا، شمال شرقی و جنوب غربی است (شکل ۸).



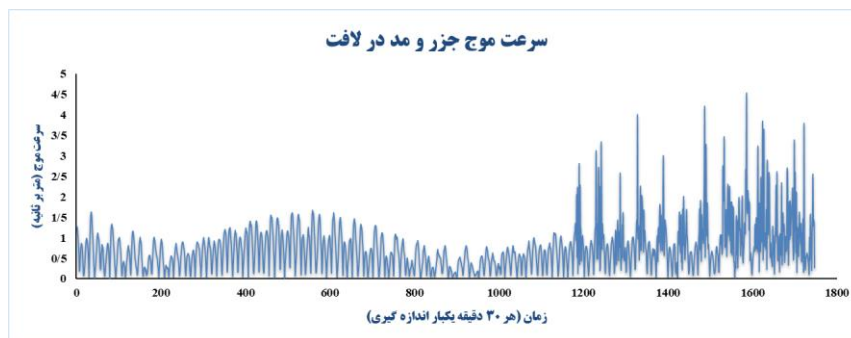
شکل ۸. گل جریان سواحل شمالی جزیره قشم (بندر لافت)

در این پژوهش از داده‌های ثبت‌شده چهار ایستگاه دریایی برای دامنه موج جزر و مدی و جریان‌های دریایی استفاده شد و نشان می‌دهد بیشترین ارتفاع موج مربوط به «بندر لافت» است ۲/۹ متر است که بسیار بیشتر از سایر نقاط است و سپس در بندر درگهان، اسکله بهمین در شهر قشم، بندر سوزا در سواحل جنوبی جزیره و باسعیدو در نقطه غربی جزیره قشم به ترتیب با ارتفاع موج ۲/۲۸، ۲/۰۷، ۱/۸۰ و ۱/۶۹ متر در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به همین دلیل، در این مطالعه، پتانسیل استحصال انرژی از جزر و مد، در این ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت.

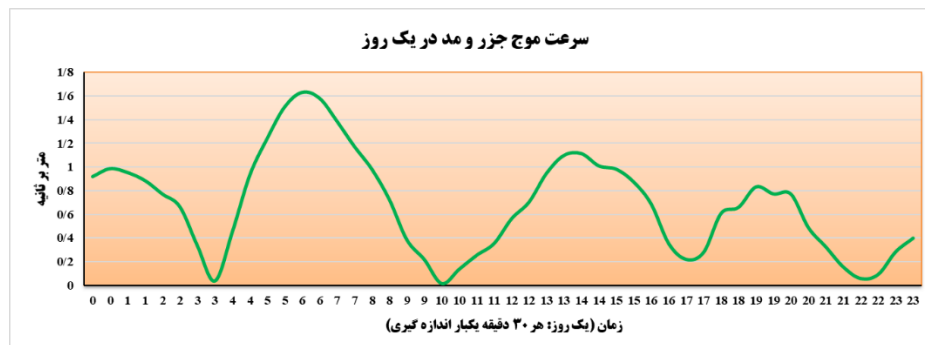
نتایج بررسی ارتفاع جزر و مد که حاصل اندازه‌گیری ۱۰ دقیقه‌ای پارامترهای هیدرومتری آب دریا در بندر لافت توسط سازمان منطقه آزاد قشم است که یک نمونه از سیکل ۲۴ ساعته آن در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد از ساعت ۱ بامداد، جزر دریا شروع می‌شود و آب دریا پسروی می‌کند تا ساعت ۶:۳۰ صبح این روند ادامه دارد؛ اما از این ساعت تا ۱۲ ظهر، مد دریا اتفاق می‌افتد و طی این پنج‌ونیم ساعت، آب تا حدود ۴/۹ متر بالا می‌آید؛ دوباره جزر دریا اتفاق می‌افتد و آب پسروی کرده و تا ساعت ۱۸:۳۰ ادامه دارد و دوباره اوج گرفته و مد دریا اتفاق می‌افتد. این یک سیکل روزانه است که دو بار مد و دو بار جزر اتفاق می‌افتد. بیشینه ارتفاع موج در ایستگاه لافت به ۵ متر می‌رسد که بسیار بیشتر از دیگر نقاط ساحلی جزیره قشم است. علاوه بر ارتفاع، سرعت موج جزر و مد نیز در ایستگاه لافت اندازه‌گیری شده و نشان می‌دهد سرعت موج بین ۰/۲ تا ۱/۶ متر بر ثانیه در نوسان است که البته در بعضی مواقع به ۴/۵ متر بر ثانیه نیز می‌رسد (شکل ۱۰). به طور کلی، سرعت موج طی ۲۴ ساعت حدود ۳ مرتبه افزایش می‌یابد و به ۱/۶ متر بر ثانیه می‌رسد (شکل ۱۱).



شکل ۹. دامنه ارتفاعی جزر و مد بندر لافت طی یک شبانه‌روز



شکل ۱۰. سرعت موج در جزر و مد در بندر لافت (منبع: ایستگاه هیدرومتری بندر لافت)



شکل ۱۱. سرعت موج در جزر و مد در بندر لافت طی یک روز

چگالی نیرو در جزر و مد نیز محاسبه شد و مقدار آن برابر با ۰/۳۱۲ کیلووات در مترمربع به دست آمد.

$$ADP_{\max \text{ speed}} = 0.5 \times 1 \times \frac{689}{1104} = 0.312 (kw / m^2) \quad (20)$$

عدد ۶۸۹ مجموع مکعب سرعت‌ها، عدد ۱۱۰۴ تعداد گام‌های استخراج‌شده در هر ۱۰ دقیقه و در حدود ۲۳ روز انجام شده است. انرژی موجود در جزر و مد از روش جریان به دست آمد که با محاسبه انرژی جنبشی در سطح مقطع (۱۶×۳۷۵) و مقدار آن برابر است با حاصل ضرب میانگین چگالی نیرو در کل سطح مقطع مورد نظر. در ناحیه مورد نظر در بندر لافت، با عمق حدود ۱۶ متر و عرض ۳۷۵ متری محل، انرژی موجود در جزر و مد ۱۸۷۲ کیلووات به دست آمد. توربین انتخاب‌شده در این پژوهش، یک توربین با قطر ۱۹ متر است که در مکانی از بندر لافت با تردد بسیار کم شناورها، امکان بارگزاری وجود دارد. پس مساحت مقطع دستگاه برابر ۲۸۳/۵ مترمربع است. بالاترین سرعتی که در طراحی در نظر گرفته می‌شود، ۷۱ درصد بیشترین سرعت در محل مورد نظر است. از آنجا که میانگین بالاترین سرعت برابر ۲ متر بر ثانیه است، بالاترین سرعت در نظر گرفته‌شده در طراحی از حاصل ضرب ۰/۷۱ در عدد ۲ برابر ۱/۴۲ حاصل می‌شود. بر اساس دستورالعمل یادشده،  $n_R$  راندمان توربین‌ها در سرعت‌های زیر ۰/۵ متر بر ثانیه برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و برای سرعت‌های برابر ۰/۵ متر بر ثانیه و بیش از آن، راندمان مورد نظر از ۳۸ درصد شروع و به طور پله‌ای با نرخ ۱ درصد افزایش کرده و حداکثر این راندمان برابر ۴۵ درصد در بالاترین سرعت طراحی در نظر گرفته می‌شود. در طراحی ناحیه مورد مطالعه، از آنجا که بالاترین سرعت طراحی ۱/۴۲ است، ملاحظه می‌شود که بیشترین آن به ۴۴ درصد می‌رسد. برای هر گام یک ضریب کاهشدهنده دیگر با نام راندمان میانگین قطار نیرو که با  $n_{PT}$  نمایش داده می‌شود، لحاظ می‌شود که مقدار آن ۹۰ درصد است که در ستون آخر جدول (۴) و (۵) اعمال شده است.

جدول ۴. پتانسیل انرژی الکتریسیته در توربین بادی در جزیره قشم

انرژی الکتریسیته برای هر توربین	بازدهی روتور	انرژی در دسترس	میانگین سرعت توربین
$P(U_i) = P_{av(i)} \times n_R$	$n_R$	$P_{av(i)} = \frac{1}{2} \times \rho \times U_i^3$	$u_i$
0	0	0.02	0.05
0	0	2.21	0.25
6.059813	38	17.72	0.5
20.99007	39	59.80	0.75
51.03	40	141.75	1
102.1597	41	276.86	1.25
180.8376	42	478.41	1.5
180.8376	0	759.69	1.75
180.8376	0	1134.00	2
180.8376	0	1614.62	2.25
180.8376	0	2214.84	2.5
180.8376	0	2947.96	2.75
180.8376	0	3827.25	3
180.8376	0	4866.01	3.25
180.8376	0	6077.53	3.5
180.8376	0	7475.10	3.75
180.8376	0	9072.00	4
180.8376	0	10881.53	4.25
180.8376	0	12916.97	4.5
180.8376	0	15191.61	4.75
180.8376	0	17718.75	5

جدول ۵. استحصال انرژی الکتریسیته از هیدروتوربین جزر و مدی در جزیره قشم

$P(U)_i \times f(U)_i$ کیلووات	$P(U)_i$ کیلووات	$f(U)_i$ درصد	$(U)_i$ متر بر ثانیه
0.00	0.00	0.00	0.05
0.00	0.00	0.00	0.25
1.25	1.25	1.25	0.5
4.79	4.79	4.79	0.75
7.77	7.77	7.77	1
8.51	8.51	8.51	1.25
9.99	9.99	9.99	1.5
4.26	4.26	4.26	1.75
4.10	4.10	4.10	2
1.31	1.31	1.31	2.25
1.31	1.31	1.31	2.5
1.64	1.64	1.64	2.75
0.33	0.33	0.33	3
0.49	0.49	0.49	3.25
0.66	0.66	0.66	3.5
0.16	0.16	0.16	3.75
0.16	0.16	0.16	4
0.33	0.33	0.33	4.25
0.00	0.00	0.00	4.5
0.16	0.16	0.16	4.75
0.00	0.00	0.00	5

میانگین سالانه انرژی الکتریسیته  $47/2 = P_{mean}$

انرژی تولیدشده سالیانه توسط یک دستگاه توربین در ساحل بندر لافت با ضرب تعداد ساعات سال (۸۷۶۰) در میانگین سالانه انرژی الکتریسیته (۴۷/۲) به دست آمد که ۴۱۳/۶۴۱ کیلووات است. با احتساب کارایی و بازده ۵۰ درصد، مقدار توان تولیدی برابر ۲۰۶۸۲۰ کیلووات (برابر ۲۰۶ مگاوات) ارزیابی می‌شود. با توجه به عرض محدوده و قطر دستگاه، با احتساب فاصله ۲/۵ برابر قطر توربین مابین هر دستگاه، قابلیت طراحی نیروگاه وجود دارد که اگر ۱۰ توربین اجرا شود، توان تولیدی سالانه برابر با ۴,۱۳۶,۴۱۶ کیلووات است. با احتساب کارایی و بازده ۵۰ درصد، مقدار توان تولیدی برابر ۲,۰۶۸,۲۰۸ کیلووات (۲ گیگاوات) ارزیابی می‌شود.

### توان انرژی از سیستم هیبریدی

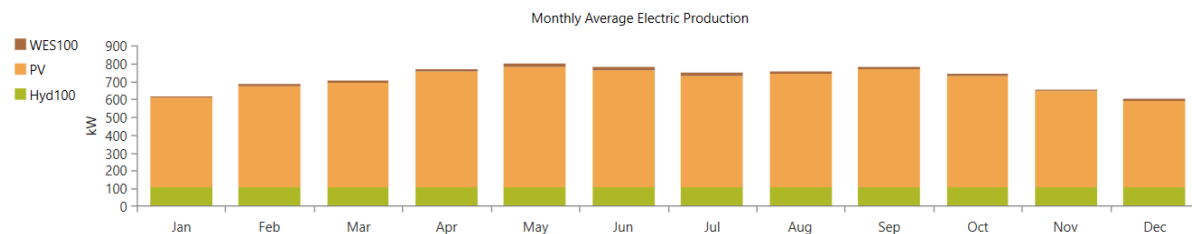
همان‌طور که بیان شد، سیستم هیبریدی از انرژی‌های پاک ساحلی در جزیره قشم در نزدیکی بندر لافت مشتمل بر ۳ مگاوات پنل فتوولتائیک، توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی و هیدروتوربین جزر و مدی ۱۰۰ کیلوواتی است که با مبدل و باتری مدیریت می‌شود و بار مصرفی نیز ۵۰ کیلووات ساعت در جزیره قشم است. نرم‌افزار HOMER برای طراحی معماری مدل و پیاده‌سازی آن و همچنین، میزان تولید انرژی و محاسبه هزینه تمام‌شده برق استفاده شد.

نتایج نشان داد از اجرای مدل هیبریدی، می‌توان سالانه حدود ۶/۲ گیگاوات برق تولید کرد که ۸۲/۸ درصد آن از سیستم انرژی خورشیدی خواهد بود. همچنین، حدود ۰/۹۶ گیگاوات برق (۹۶۴۱۹۷ کیلووات ساعت) می‌توان با نصب توربین ۱۰۰ کیلوواتی در سواحل بندر لافت، انرژی از جزر و مد استحصال کرد. با توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی نیز می‌توان حدود ۱۱۹۳۷۰ کیلووات ساعت برق در سال کسب کرد (جدول ۶). همچنین، مجموع انرژی که ماهانه از سیستم هیبریدی استحصال می‌شود در شکل ۱۲ نشان داده شده که بیشترین میزان انرژی در ماه‌های گرم از آوریل تا اکتبر (فروردین تا مهر) قابل استحصال است.

جدول ۶. مشخصات انرژی‌های تولیدشده از اجزای سیستم هیبریدی در جزیره قشم

ردیف	تولید انرژی	کیلووات ساعت در سال	گیگاوات ساعت در سال	درصد فراوانی
۱	پنل خورشیدی	۵,۲۱۵,۶۷۱	۵/۲	۸۲/۸
۲	توربین بادی ۱۰۰ کیلوواتی	۱۱۹,۳۷۰	۰/۱۱	۱/۸۹
۳	توربین جزر و مدی	۹۶۴,۱۹۷	۰/۹۶	۱۵/۳
۴	مجموع انرژی تولیدشده	۶,۲۹۹,۲۳۸	۶/۲	۱۰۰



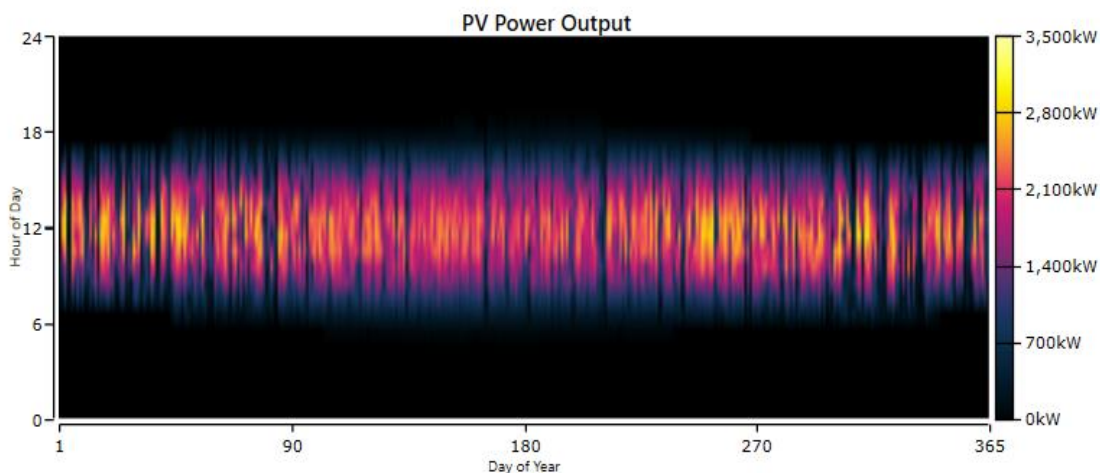


شکل ۱۲. انرژی قابل استحصال ماهانه از سیستم هیبریدی پاک ساحلی

ویژگی‌های مربوط به هر بخش از تولید انرژی از اجزای سیستم هیبریدی مورد نظر، در جدول‌های ۷ تا ۹ و شکل ۱۳ ارائه شده است. نشان می‌دهد از ۳ مگاوات پنل‌های فتوولتائیک، روزانه ۱۴/۲۹ مگاوات ساعت برق تولید کرد (جدول ۷). از زمان طلوع خورشید که عمدتاً ساعت ۶ صبح تا زمان غروب آفتاب در ساعت ۱۸، پنل‌ها انرژی تولید خواهند کرد و هسته بیشینه آن در ساعت ۱۰:۰۰ تا ۱۴:۰۰ خواهد بود که در این ساعات از روز، می‌توان ۳۵۰۰ کیلووات ساعت انرژی (الکتریسیته) استحصال کرد؛ اما هنگام طلوع و غروب خورشید، هسته کمینه به وجود می‌آید که حدود ۷۰۰ کیلووات ساعت است (شکل ۱۳).

جدول ۷. ویژگی‌های انرژی خورشیدی در سیستم هیبریدی

واحد	ارزش	کمیت
کیلووات	۳۰۰۰	نرخ ظرفیت
کیلووات	۵۹۵	میانگین تولید انرژی
کیلووات ساعت در روز	۱۴۲۹۰	میانگین تولید انرژی
درصد	۱۹٫۸	فاکتور ظرفیت
کیلووات ساعت در سال	۵۲۱۵۶۷۱	کل تولید انرژی



شکل ۱۳. نمودار زمانی تولید انرژی خورشیدی در سیستم هیبریدی

نتایج بررسی‌ها برای توربین بادی با ظرفیت ۱۰۰ کیلووات نشان داد سالانه می‌توان حدود ۱۱۹/۳ مگاوات ساعت انرژی از این توربین استحصال کرد. همچنین، برای هیدروتوربین‌های ۱۰۰ کیلوواتی در سواحل بندر لافت در شمال جزیره قشم، سالانه ۹۶۴/۲ مگاوات ساعت انرژی قابل استحصال است (جدول ۸). در نهایت، پارامترهای اقتصادی نیز برای سیستم هیبریدی محاسبه شد و نتایج به شرح جدول ۹ ارائه شده است. به طور کلی، هزینه هر کیلووات ساعت انرژی پاک در جزیره قشم ۳/۲۲ دلار برآورد شد.

**جدول ۸.** ویژگی‌های توربین بادی و هیدروتوربین جزر و مدی در سیستم هیبریدی

کمیت	ارزش	واحد
توربین بادی		
نرخ ظرفیت	۱۰۰	کیلووات
میانگین تولید انرژی	۱۳/۶	کیلووات
فاکتور ظرفیت	۱۳/۶	درصد
کل تولید انرژی	۱۱۹۳۷۰	کیلووات ساعت در سال
هیدروتوربین جزر و مدی		
نرخ ظرفیت	۱۲۹	کیلووات
میانگین تولید انرژی	۱۱۰	کیلووات
فاکتور ظرفیت	۸۵	درصد
کل تولید انرژی	۹۶۴۱۹۷	کیلووات ساعت در سال

**جدول ۹.** پارامترهای اقتصادی و جدول هزینه از سیستم هیبریدی انرژی‌های پاک ساحلی

ردیف	پارامتر	مقدار (دلار)	مقدار (ریال)
۱	NPC	۱۳۷۶۹۱۲۰	۶۸۸۴۵۶۰۰۰۰۰۰
۲	COE	۳/۲۲	۱۶۱۰۰۰۰
۳	Operation Cost	۱۲۵۴۳۹	۶۲۷۱۸۰۰۰۰۰۰

### بحث و نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، اطمینان از تحقق تقاضای انرژی پاک از منابع طبیعی جزیره قشم برای مشترکین است. در نگاه اول، این سؤال به وجود آمد که جزیره قشم یکی از منابع اصلی سوخت‌های فسیلی است و نیروگاه آب و برق مینا نیز از هیدروکربن‌ها برای تولید برق استفاده می‌کند، پس چه لزومی برای سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر در آن وجود دارد. پژوهش حاضر در پاسخ به این سؤال مطرح شد و پتانسیل‌های استحصال انرژی از جزر و مد و توان کسب انرژی از بادهای ساحلی با روش‌های ریاضی مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت با نرم‌افزار هومر، ترکیبی از این منابع تجدیدپذیر و پنل‌های خورشیدی طراحی شد. این روش در دنیا مرسوم شده است و پژوهشگران زیادی برای ارزیابی تولید انرژی به‌صرفه و پایدار برای مناطق دورافتاده و روستایی از این سیستم هیبریدی با منابع مختلف تولید انرژی و سناریوهای مختلف در نوع ترکیب آن‌ها استفاده می‌کنند. در پژوهش حاضر، ابتدا توان و انرژی حاصل از باد با تابع ویبول و گاما محاسبه شد که نشان داد در ارتفاع ۱۰ متری از زمین، قدرت باد حدود ۱۲۱ وات بر مترمربع و در ارتفاع ۱۲۰ متری حدود ۳۵۰ وات بر مترمربع است. با توربین‌هایی با قطر پره‌های ۴ متر، قدرت عملی توربین در ارتفاع ۱۰ متری از زمین ۳۷۵ وات است. با توجه به موجودیت باد در ۶۴۲۵ ساعت از سال، سرعت باد در ۶۵ درصد از این ساعات (۴۱۷۶ ساعت) در بازه سرعت راه‌انداز و توقف توربین باد قرار دارد و می‌تواند انرژی تولید کند. در منطقه اورات در مغولستان، چگالی و توان باد ۹۴۱ وات بر مترمربع با بیش از ۷ هزار ساعت موجودیت باد است [۱۸]. در محوطه دانشگاه کایالی، تابع رایله به جای ویبول برای چگالی احتمال سرعت باد استفاده شد و نتایج آن قابل اعتماد است و نشان دادند چگالی توان باد ۳۲۲ وات در مترمربع است و سالانه می‌توان ۷/۲ گیگاوات انرژی از باد استحصال کرد [۱۹]. در یزد، چگالی و توان باد در ارتفاع ۱۰ متری، حدود ۵۴ وات در مترمربع، در شیراز حدود ۳۳/۵ وات در مترمربع [۲۰]، در زابل حدود ۵۱۳ وات در مترمربع [۲۱]، در ایلام حدود ۶۴/۸۷ وات در مترمربع [۲۲]، در ایستگاه هزارکانیان در کردستان در ارتفاع ۵۰ متری حدود ۷۴۵ وات در مترمربع [۲۳] و در اسفراین در خراسان شمالی در ارتفاع ۳۰ متری حدود ۲۰۰ وات در مترمربع [۲۴] است. صلاحی و بهروزی (۲۰۲۰) برای ۲۰ سال آینده اردبیل نیز توان باد را ارزیابی کردند و نشان دادند در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متری، توان باد حدود ۵۰۰ و ۱۰۰۰ وات بر مترمربع خواهد بود [۲۵]. بنابراین چگالی توان باد در جزیره قشم بیشتر از یزد، شیراز و ایلام است، اما نسبت به مناطق بادخیز مانند اردبیل، کردستان و زابل، توان باد کمتری دارد.

مطالعات مربوط به استحصال انرژی از طبیعت عمدتاً مربوط به انرژی بادی و محاسبات اقتصادی انرژی خورشیدی است و کمتر به کسب انرژی از امواج و یا جزر و مد پرداخته شده است. در این پژوهش، میزان استحصال انرژی از جزر و مد در سواحل شمالی جزیره قشم در نزدیکی بندر لافت محاسبه شد. چگالی نیرو در جزر و مد قشم حدود  $0/312$  کیلووات در مترمربع است. با احداث مخزن مصنوعی با ابعاد  $375$  در  $16$  متر، انرژی موجود در آن حدود  $1782$  کیلووات خواهد بود. انرژی و توان یک هیدروتوربین در سواحل شمالی قشم در بندر لافت از مخزن جزر و مدی  $206$  مگاوات ارزیابی شد و با نصب  $10$  توربین می‌توان سالانه  $2$  گیگاوات الکتریسیته استحصال کرد. در گذرگاه غربی خلیج پاساماکودی- کابسکوک، توان انرژی از جزر و مد حدود  $446$  مگاوات است [۲۶]. در تنگه کلارنس در شمال استرالیا، شرایط برای کسب انرژی از جزر و مد مناسب است و با نصب دو توربین با قطر  $10$  و  $20$  متر، می‌توان در مجموع  $108$  گیگاوات ساعت برق در سال استحصال کرد [۲۷]. در تنگ خوران قشم، مزرعه توربین جزر و مدی با مدل فیزیکی بررسی و استحصال انرژی جنبشی موج با توان تولید  $1/1$  کیلووات برق طراحی شد. در خور دورق در شمال خور موسی در خوزستان، سد احداث شده و حوضچه‌هایی به مساحت  $60$  و  $110$  کیلومتر مربع به وجود آمده است که می‌توان از آن‌ها به ترتیب  $74/36$  و  $136$  مگاوات الکتریسیته تولید کرد [۲۸].

یکی از نکات کلیدی این پژوهش، تحلیل مجزای منابع استحصال انرژی و همچنین ترکیب آن‌ها در سیستم هیبریدی همراه با پنل‌های فتوولتائیک است که در نرم‌افزار هومر اجرا شد. نتایج این سیستم با ترکیب  $3$  مگاوات پنل خورشیدی، توربین بادی  $100$  کیلوواتی و هیدروتوربین  $100$  کیلوواتی جزر و مدی، می‌توان سالانه  $6/2$  گیگاوات ساعت الکتریسیته پاک و تجدیدپذیر برای جزیره قشم تولید کرد؛ اما هزینه آن نسبت به الکتریسیته حاصل از نیروگاه حرارتی گران‌تر است؛ به گونه‌ای که قیمت هر کیلووات ساعت انرژی پاک از سیستم هیبریدی  $3/22$  دلار و از نیروگاه حرارتی  $0/11$  دلار است. اما هزینه زیست‌محیطی و تخریب ناشی از نیروگاه حرارتی و استفاده از سوخت‌های فسیلی محاسبه نشده است که در آن صورت، این اختلاف قیمت بسیار کاهش خواهد یافت. در قبرس، سیستم هیبریدی متشکل از  $1/79$  مگاوات پنل خورشیدی،  $2$  مگاوات توربین بادی و  $0/92$  مگاوات زیست‌توده با سیستم ذخیره‌سازی هیدرولیک پمپ‌شده، هزینه برق برابر با  $0/17$  دلار در کیلووات ساعت است [۸]. در هند در محدوده  $0/1$  تا  $0/162$  دلار در کیلووات ساعت [۹]، در مراکش  $0/2$  دلار در کیلووات ساعت [۱۰] و در جیبوتی  $0/002$  دلار در هر کیلووات ساعت است [۱۱]. در این مطالعات هزینه زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شده است، ولی در پژوهش حاضر به دلیل عدم دسترسی نرم‌افزاری به محاسبات مربوط به هزینه خسارت زیست‌محیطی و اعمال در آن هزینه برق، قیمت هر کیلووات ساعت بیشتر از سایر سیستم‌های هیبریدی مطالعه‌شده، محاسبه شد.

جزیره قشم، بزرگ‌ترین جزیره در خلیج فارس است که بیش از  $80$  درصد پهنا آن، اراضی بایر با شیب کمتر از  $15$  درصد است. طول ساحلی جزیره قشم حدود  $135$  کیلومتر و عرض آن نیز  $40$  کیلومتر است که پتانسیل بسیار بالایی برای پیاده‌سازی طرح‌های نیروگاهی دارد. بندر لافت در شمال جزیره قشم که فاصله‌ای به طول  $2$  کیلومتر از خط ساحلی جنوب کشور ایران دارد، منطقه مناسبی برای بارگذاری توربین‌های هیدرومتری و بادی است. با سرمایه‌گذاری در بخش انرژی خورشیدی و به‌ویژه هیدروتوربین‌های جزر و مدی در بندر لافت، به همراه توربین‌های بادی به صورت پایلوت، امکان کسب انرژی پاک و قابل اعتماد وجود دارد و الکتریسیته حاصل از نیروگاه حرارتی به عنوان منبع حمایت‌کننده و شارژکننده برای انرژی‌های تجدیدپذیر در نظر گرفته شود. می‌توان با اجرای طرح، بخش بزرگی از بار مصرفی الکتریسیته مشترکین جزیره قشم را تأمین کرد. اما قبل از آن باید ارزیابی و پتانسیل‌سنجی آن در بخش‌های مختلف استحصال انرژی و سیستم ترکیبی از انرژی‌های تجدیدپذیر صورت بگیرد. بنابراین پیشنهاد می‌شود که سیستم پایلوت برای انرژی جزر و مدی، میکروتوربین و پنل‌های خورشیدی در مقیاس آزمایشگاهی در سواحل بندر لافت انجام شود و سپس، هزینه تمام‌شده برای آن محاسبه شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران هزینه زیست‌محیطی و تخریب اکوسیستم را نیز برای اجرای سیستم‌های هیبریدی در نرم‌افزارهای پیشرفته‌تر اعمال کنند.

## منابع

- [1]. Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., Salman, H. M., & Jaszczur, M., A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, 2023; 101621.
- [2]. Zebra, E. I. C., van der Windt, H. J., Nhumaio, G., & Faaij, A. P., A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021; 144, 111036.
- [3]. Asakereh, A., Soleymani, M., & Ardebili, S. M. S., Multi-criteria evaluation of renewable energy technologies for electricity generation: A case study in Khuzestan province, Iran. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022; 52, 102220.
- [4]. Solaymani, S., A review on energy and renewable energy policies in Iran. *Sustainability*, 2021; 13(13), 7328.
- [5]. Phyu, M. Z., & Ya, A. Z., Optimum Design of Wind-Diesel Hybrid System for Remote Area. *International Journal of Scientific Engineering and Technology Research*, 2014; 3(10), 2445-2452.
- [6]. Pourrahmani, H., Zahedi, R., Daneshgar, S., & Van Herle, J., Lab-scale investigation of the integrated backup / storage system for wind turbines using alkaline electrolyzer. *Energies*, 2023; 16(9), 3761.
- [7]. Sawle, Y., Jain, S., Babu, S., Nair, A. R., & Khan, B., Prefeasibility economic and sensitivity assessment of hybrid renewable energy system. *Ieee Access*, 2021; 9, 28260-28271.
- [8]. Al-Ghussain, L., Ahmad, A. D., Abubaker, A. M., & Mohamed, M. A., An integrated photovoltaic/wind/biomass and hybrid energy storage systems towards 100% renewable energy microgrids in university campuses. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021; 46, 101273.
- [9]. Ramesh, M., & Saini, R. P., Dispatch strategies based performance analysis of a hybrid renewable energy system for a remote rural area in India. *Journal of Cleaner Production*, 2020; 259, 120697.
- [10]. El-Houari, H., Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M. S., Kousksou, T., Jamil, A., & El Amrani, B., Feasibility evaluation of a hybrid renewable power generation system for sustainable electricity supply in a Moroccan remote site. *Journal of Cleaner Production*, 2020; 277, 123534.
- [11]. Guelleh, H. O., Patel, R., Kara-Zaitri, C., & Mujtaba, I. M., Grid connected hybrid renewable energy systems for urban households in Djibouti: An economic evaluation. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2023; 43, 215-231.
- [12]. Al-Najjar, H., El-Khozondar, H. J., Pfeifer, C., & Al Afif, R., Hybrid grid-tie electrification analysis of bio-shared renewable energy systems for domestic application. *Sustainable Cities and Society*, 2022; 77, 103538.
- [13]. Sukkiramathi, K., & Seshaiyah, C. V., Analysis of wind power potential by the three-parameter Weibull distribution to install a wind turbine. *Energy Exploration & Exploitation*, 2020; 38(1), 158-174.
- [14]. Salahi, B., Potential measurement of wind energy and fitting of real wind occurrence probabilities using Weibull probability density distribution function in synoptic stations of Ardabil province. *Geographical research*, 2004; 19(1), 87-104. [In Persian].
- [15]. Sadeghinejad, M., Ghaffarzadeh, N., Investigation and Comparison of Different Types of Electric Power Extraction from Tidal Energy. *Journal of Renewable and New Energy*, 2021; 8(2), 50-62.
- [16]. The European Marine Energy Centre Ltd., Assessment of Tidal Energy Resource, First published in the UK in 2009 by BSI, 389 Chiswick High Road, London W4 4AL 2009.
- [17]. Kouchian Sabour, SH., Kolahdoza, M., Moeini, M.H., Evaluating the energy of tidal currents in Khoran Strait. *Maritime industry*, 2015; 2(2):60-73. [In Persian].
- [18]. Wan, J., Zheng, F., Luan, H., Tian, Y., Li, L., Ma, Z.,... & Li, Y., Assessment of wind energy resources in the urat area using optimized weibull distribution. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021; 47, 101351.
- [19]. Adem Çakmakçı, B., & Hüner, E., Evaluation of wind energy potential: a case study. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2022; 44(1), 834-852.
- [20]. salahi, B., Behruzi, M., Ebrahimi, M., Jemes, H. Assessment of wind energy potential and feasibility of its use in the Synoptic stations of Fars province. *Journal of Applied Climatology*, 2015; 2(1): 1-16. [In Persian].
- [21]. Kakhka Moghaddam, P., Delbari, M. Evaluation of the feasibility of wind energy utilization in Sistan and Baluchestan Province. *Physical Geography Research*, 2017; 49(3): 441-455. doi: 10.22059/jphgr.2017; 218706.1006952 [In Persian].
- [22]. Falah ghalheri GH.A, Rostamian M. Evaluation of wind energy utilization in Ilam city. *Nivar*, 2016; 40(92-93): 43-52. doi: 10.30467/nivar.2016.40806 [In Persian].
- [23]. Byzeidi M, Gholizadeh B, Adib Abbasi M. Analysis of wind energy potential to set up wind power plants in Kurdistan province using the Wiebull distribution model. *J.Env. Sci. Tech*. 2017; 19(4): 115-126.

- [24]. Saedi, D., Nematollahi, O., Alemrajabi, A. A. Assessing the wind energy potential of North Khorasan province in Iran. *Energy Engineering and Management*, 2023; 1(1): 49-56.
- [25]. salahy, B., Behrozi, M. Wind energy estimation in Ardabil plain based on the output of climate models and RCP scenarios over the next decades. *Researches in Earth Sciences*, 2020; 11(1): 169-188. doi: 10.52547/esrj.11.1.169
- [26]. Yang, Z., Wang, T., Xiao, Z., Kilcher, L., Haas, K., Xue, H., & Feng, X. Modeling assessment of tidal energy extraction in the western passage. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020; 8(6), 411.
- [27]. Marsh, P., Penesis, I., Nader, J. R., Couzi, C., & Cossu, R., Assessment of tidal current resources in Clarence Strait, Australia including turbine extraction effects. *Renewable Energy*, 2021; 179, 150-162.
- [28]. Ashtari Larki, A., Sadri Nasab, M., Tomchek, M., Chegini, V., Kabi, A. Estimation of tidal electric energy potential of Khowr Doragh estuary. *Journal of Marine Science and Technology*, 2014; 12(2): 16-24. [In Persian].