



مدل سازی و تحلیل اقتصادی سامانه هیبریدی انرژی های تجدیدپذیر برای تولید همزمان برق، آب شیرین و محصولات کلر آلکالی در جزیره کیش

کیوان چراغی¹، مهدی صدیقی^{1*}، مجید محمدی²

1- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

1- دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

2- دانشیار، گروه مهندسی انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

* مسئول مکاتبات مقاله، sedighi@qom.ac.ir

چکیده

جزیره کیش، منطقه ای استراتژیک در خلیج فارس، در حال حاضر برای تأمین آب و برق خود به شیرین کن های اسمز معکوس و نیروگاه های فسیلی وابسته است. با توجه به افزایش قیمت سوخت های فسیلی و چالش های زیست محیطی، این پژوهش به ارزیابی فنی-اقتصادی یک سامانه هیبریدی مبتنی بر انرژی های تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) پرداخته که علاوه بر تأمین پایدار آب و برق 40 هزار نفر، از پساب آب شیرین کن اسمز معکوس برای تغذیه واحد الکترولیز کلر-آلکالی استفاده می کند. هدف، تولید همزمان برق مازاد، گاز کلر، کاستیک مایع 50٪ و هیدروژن به عنوان محصولات ارزشمند فرعی است. داده های آب و هوایی از پایگاه های NCC Tide، PVsyst و Wind Atlas استخراج شد. نتایج نشان داد که به دلیل اختلاف ارتفاع جزر و مد پایین (1.29 متر)، استفاده از انرژی جزرومدی در این منطقه از نظر اقتصادی توجیه پذیر نیست. بر اساس بهینه سازی انجام شده در متلب، نصب 14 توربین بادی 12 مگاواتی و 59/25 مگاوات نیروگاه خورشیدی بدون نیاز به سیستم ذخیره سازی، کافی است تا تقاضای سالانه آب و برق جزیره به طور کامل تأمین شود. در تحلیل اقتصادی ساده شده (بدون در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی)، هزینه سرمایه گذاری اولیه 17/36 هزار میلیارد تومان و سود سالانه 5/85 هزار میلیارد تومان برآورد شد که دوره بازگشت سرمایه را به 30 ماه می رساند. با احتساب هزینه های عملیاتی (شامل نمک، تعمیرات و نگهداری)، جریان نقدی خالص سالانه به 4,837 میلیارد تومان کاهش یافت، اما تحلیل مالی با نرخ تنزیل 18٪ همچنان ارزش خالص فعلی مثبت (8,537+ میلیارد تومان) و نرخ بازده داخلی بالای 27٪ را نشان می دهد.

کلیدواژگان: تجدیدپذیر، هیبریدی، کلر آلکالی، آب شیرین کن اسمز معکوس، فتوولتائیک، اقتصادی

Modeling and economic analysis of a hybrid renewable energy system for simultaneous production of power, freshwater, and chlor-alkali products in kish island

Keyvan Cheraghi¹, Mehdi Sedighi^{1*}, Majid Mohammadi²

1- M.Sc., Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

1- Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

2- Associate Professor, Department of Energy Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

* Corresponding author, sedighi@qom.ac.ir

Received: 31 August 2025 Accepted: 26 December 2025

Abstract

Kish Island, a strategic region in the Persian Gulf, currently relies on reverse osmosis desalination and fossil-fuel power plants for water and electricity supply. Given rising fuel prices and environmental concerns, this study presents a technical-economic evaluation of a hybrid renewable energy system integrating solar and wind resources to sustainably meet the water and electricity demands of 40,000 residents. The system utilizes RO brine as feedstock for a chlor-alkali electrolysis unit to co-produce valuable by-products: surplus electricity, chlorine gas, 50% liquid caustic soda, and hydrogen. Climate data was sourced from NCC Tide, PVsyst, and Wind Atlas. Results indicate that tidal energy is

economically unviable due to low tidal range (~1.29 m). MATLAB-based optimization determined that installing 14×12 MW wind turbines and a 59.25 MW photovoltaic plant—without energy storage—is sufficient to fully cover annual demand. In a simplified economic analysis (excluding operational costs), the initial investment is estimated at 17.36 trillion tomans, with an annual profit of 5.85 trillion tomans, yielding a payback period of 30 months. When operational expenditures (salt, maintenance, etc.) are included, the net annual cash flow decreases to 4,837 billion tomans. Nevertheless, financial analysis using an 18% discount rate reveals a positive NPV of +8,537 billion tomans and an IRR of ~27.25%, confirming strong economic viability.

Keywords: Renewable, Hybrid, Chlor-Alkali, Reverse Osmosis Desalination, Photovoltaic, Economic

1- مقدمه

زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی چندگانه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه ارائه دادند. سیستم مورد بررسی شامل اجزای کلیدی مانند: سیکل ارگانیک رانکین، سیکل تبرید جذبی لیتیوم برومید و سیستم الکترولیز غشای تبادل پروتون است. نتایج حاصل از فرایند بهینه‌سازی نشان‌دهنده بهره‌وری بالای این سیستم و تحقق بهترین نرخ بازده انرژی معادل 12/3 درصد و نرخ هزینه سیستم برابر با 367/16 دلار بر ساعت بود. جیانگ³ و همکاران [13] در سال 2021 میلادی باهدف افزایش عملکرد سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر و تولید توان در شرایط آب‌وهوایی متغیر، یک سیستم هیبریدی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی و یک سیستم انرژی آبی مدل‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده این بود که ادغام نیروگاه‌های فتوولتائیک و بادی به طور قابل توجهی توان سیستم را در مقایسه با منابع انرژی آبی در شرایط اقلیمی نامشخص بهبود می‌بخشد. در سال 2021، خانی⁴ و همکاران [14] بر روی طراحی و بهینه‌سازی یک سیستم هیبریدی تولید چندگانه انرژی مبتنی بر انرژی خورشیدی که دارای ذخیره‌ساز انرژی برای تأمین نیازهای پیک تقاضا در فصل تابستان بود، تحقیق کردند. این سیستم به‌منظور تولید برق، آب و سرمایش طراحی شد و با هدف بهینه‌سازی عملکرد آن در شرایط متفاوت هواشناسی و بار مصرفی بررسی گردید. از جمله توابع هدف این تحقیق می‌توان به حداکثر بازده انرژی، حداکثر بازده انرژی و حداقل سازی هزینه کل اشاره کرد. یافته‌ها نشان داد که در حالت بهینه، سیستم قادر است تولید توان خالصی برابر با 12 مگاوات، ظرفیت خنک‌کننده‌ای به میزان 15/74 کیلووات و تولید آب شیرین به مقدار 4/72 کیلوگرم در ثانیه را ارائه دهد [14]. در این پژوهش، یک سامانه یکپارچه مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین پایدار آب و برق جزیره کیش (جمعیت 40 هزار نفر) طراحی و تحلیل شده است. نوآوری اصلی، ترکیب آب‌شیرین‌کن، تولید برق تجدیدپذیر و واحد الکترولیز برای تولید همزمان گاز کلر، کاستیک مایع و هیدروژن است که علاوه بر تأمین نیازهای اساسی، ارزش اقتصادی افزوده ایجاد می‌کند. مراحل پژوهش شامل: ارزیابی پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر، طراحی سامانه چندمحصولی، تحلیل اقتصادی و محاسبه عملکرد سالانه تجهیزات است. این رویکرد ترکیبی، الگویی نوین برای توسعه پایدار و بهره‌برداری اقتصادی از منابع محدود جزایر ارائه می‌دهد.

2- شرح فرآیند

انرژی نیروی محرکه زندگی بشر است و با رشد جمعیت و پیشرفت فناوری، نیاز به آن روزبه‌روز افزایش می‌یابد. در حال حاضر، بیش از ۷۰ درصد برق جهان از سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود که با وجود نقش رو به رشد گاز طبیعی، باعث آلودگی‌های زیست‌محیطی و گرمایش زمین می‌شوند [1]. این چالش‌ها، ضرورت حرکت به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر را پررنگ کرده است [2]. انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، جزر و مدی و زمین‌گرمایی، مزایایی از جمله کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، پایداری، نبود آلودگی و امکان استفاده در مقیاس‌های مختلف دارند. با این حال، معایبی مانند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه بالا، وابستگی به شرایط جوی و نیاز به نیروی متخصص نیز وجود دارد [3]. پیش‌بینی می‌شود تا سال 2035 تولید انرژی پاک در جهان 31 درصد رشد کند [4]. در ایران، با وجود وابستگی به نفت و گاز و آلودگی بالا، پتانسیل خوبی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ویژه انرژی بادی و دریایی وجود دارد [5، 6]. همچنین بحران کم‌آبی در کشور، اهمیت شیرین‌سازی آب دریا را افزایش داده است، اگرچه این روش نیازمند انرژی زیاد و بررسی اثرات زیست‌محیطی است [7]. در سطح جهانی، کشورهایی مانند چین، آمریکا، اروپا و ژاپن به‌طور گسترده در توسعه منابع تجدیدپذیر سرمایه‌گذاری کرده‌اند [8]. یکی از رویکردهای نوین، استفاده از سیستم‌های هیبریدی است که با ترکیب چند منبع انرژی و روش‌های ذخیره‌سازی، پایداری و بهره‌وری سیستم را افزایش می‌دهند و نقش مهمی در تأمین انرژی مناطق دورافتاده دارند [9]. بداخانیان¹ و همکاران [10] در سال 2023، یک سیستم هیبریدی تجدیدپذیر برای تولید توان و هیدروژن، از جنبه‌های ترمودینامیکی و اقتصادی مورد بررسی قرار دادند. هدف‌های تحقیق شامل بازده انرژی و نرخ هزینه سیستم بود. بهترین نرخ بازده انرژی سیستم برابر با 31/7 درصد و نرخ هزینه سیستم 27/48 دلار بر ساعت در شرایط بهینه است. افزایش شدت تابش خورشیدی، مساحت کلکتور و نرخ دبی جرمی کلکتور، باعث افزایش اتلاف انرژی سیستم می‌شود، درحالی‌که افزایش دمای ورودی به توربین موجب کاهش اتلاف انرژی خواهد شد. در مقاله‌ای که تمز و دینسر² [11] در سال 2022 منتشر کردند، پژوهشی عمیق و جامع در مورد طراحی یک سیستم هیبریدی تولید چندگانه می‌باشد. این سیستم شامل جذب انرژی خورشیدی از طریق پنل‌های فتوولتائیک بود و هدف اصلی آن تحلیل ترمودینامیکی کارایی سیستم به‌منظور سنجش بازده انرژی و انرژی بود. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بازده انرژی سیستم به 16/28 درصد و بازده انرژی به 36/35 درصد می‌رسد. بداخانیان و همکاران [12] در سال 2022، تحقیقی جامع و دقیق در

³ Jiang

⁴ Khani

¹ Badakhian

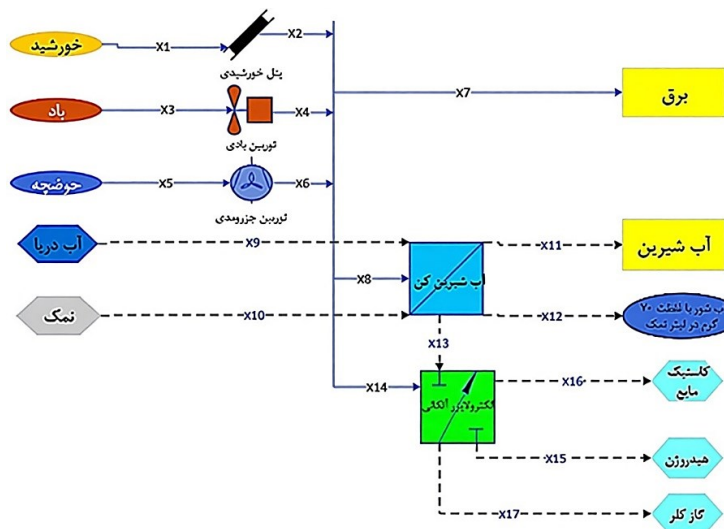
² Temiz and Dincer

شوری وارد واحد الکترولیز می‌شود. در نهایت، مازاد برق به شبکه اصلی فروخته می‌شود تا از اتلاف انرژی جلوگیری و درآمدزایی شود.

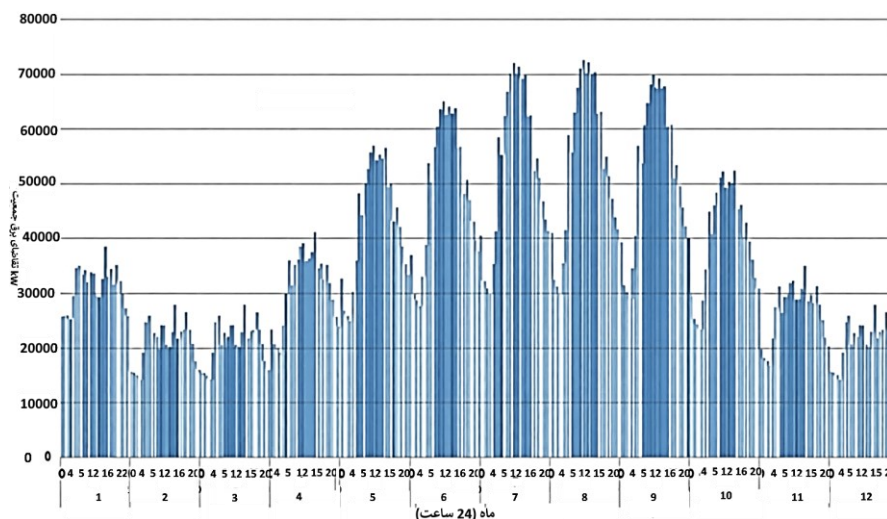
2-1- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی سیستم و تعیین مقادیر بهینه‌ی سود، نرخ بازگشت سرمایه و تعداد مورد نیاز هر یک از واحدهای فرآیندی، لازم است داده‌های پایهای جزیره شامل جمعیت، میانگین تقاضای ساعتی برق در طول سال (بر اساس الگوی 24 ساعته برای هر ماه) و سرانه‌ی آب شیرین مصرفی هر نفر به عنوان ورودی به مدل وارد شوند. این داده‌ها عبارتند از: جمعیت: 40,000 نفر. آب شیرین برای مصرف هر نفر در روز 15 لیتر. شکل 2 نمودار تقاضای برق جمعیت به صورت میانگین ساعتی در هر ماه را نشان می‌دهد.

برای مدلسازی و بررسی اقتصادی سامانه پیشنهادی، چند فرض در نظر گرفته شد؛ از جمله فرض کامل بودن واکنش‌ها، جریان متناوب برای همه سیستم‌ها، مصرف روزانه 2000 کیلوگرم نمک برای الکترولیز پساب، راندمان 40 درصدی توربین‌های بادی و جزرومدی، و برآورد تقاضای برق برای 40 هزار نفر. هزینه‌ها و درآمدها بر اساس قیمت‌های بازار جهانی و داخلی با نرخ دلار 60 هزار تومان محاسبه شد. شکل 1 شماتیک اولیه فرایند تولید توان و آب به همراه فرایند کلر آلکالی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی و جزرومدی برق تولید می‌کنند. این برق ابتدا برای تامین نیاز برق ساکنین و آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس¹ جهت تولید آب شیرین استفاده می‌شود. مازاد برق به واحد الکترولیز کلر آلکالی منتقل شده و مواد شیمیایی تولید می‌کند. همچنین پساب آب‌شیرین‌کن پس از تنظیم

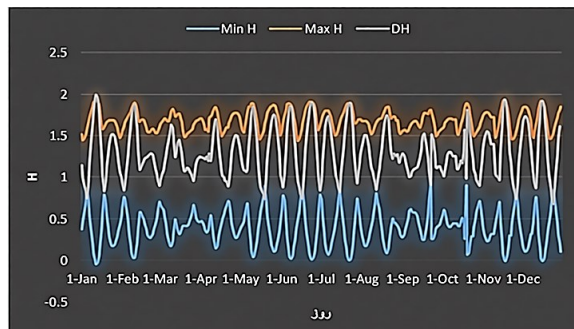


شکل 1 شماتیک اولیه فرایند تولید توان و آب به همراه فرایند کلر آلکالی.



شکل 2 نمودار متوسط برق درخواستی جمعیت در یک سال.

¹ RO



شکل 4 اختلاف ارتفاع روزانه‌ی سطح آب برای یک سال

انرژی پتانسیل اصلی‌ترین معادله ریاضی در طراحی توربین‌های جزرومدی است که در معادله 1 بیان گردید:

$$E = mgh \quad (1)$$

E انرژی پتانسیل (kJ), m جرم آب ذخیره شده (kg), g شتاب گرانش برابر با $9/8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ و h میزان ارتفاع (m) را نشان می‌دهند. جرم آب برابر است با چگالی در حجم و همچنین حجم برابر با ارتفاع در سطح محصور شده است. با جایگذاری این روابط در رابطه (1)، روابط زیر به دست می‌آید.

$$dE = \rho g h dV_{\text{water}} \quad (2)$$

$$dE = \rho g A h dh \quad (3)$$

با انتگرال‌گیری از طرفین، رابطه (4) حاصل می‌شود [19]:

$$E = \frac{1}{2} \rho g A h^2 \Big|_0^h \quad (4)$$

برای مساحت یک مترمربع و چگالی 1027 کیلوگرم بر مترمکعب رابطه (5) حاصل می‌گردد:

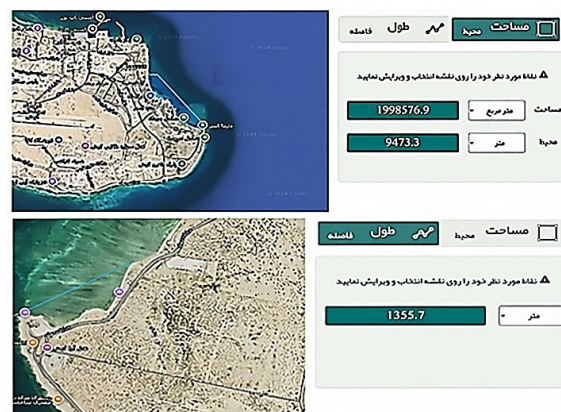
$$E = 5.0332 \cdot h^2 \quad (5)$$

توان کلی قابل استحصال [19]:

$$P = \frac{E}{t} \quad (6)$$

که در آن P توان قابل‌تولید با واحد کیلووات (kW), E انرژی پتانسیل گرانشی آب (kJ) و t زمان آزادشدن انرژی جزرومد با واحد ثانیه است [20]. برای تولید انرژی، یک توربین جزرومدی با راندمان 40٪ و قطر 10 متر از نوع لامپی یک‌طرفه (در زمان پر شدن حوضچه) در نظر گرفته شد. همچنین برای شبیه‌سازی نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک در جزیره کیش، از نرم‌افزار PVsyst استفاده گردید و داده‌های 24 ساعته حاصل به متلب⁵ وارد شد. منطقه‌ای به وسعت 700 هکتار در جنوب‌غربی کیش به‌عنوان محل احداث نیروگاه انتخاب شد که علاوه بر تولید پایدار برق، پتانسیل تبدیل‌شدن به جاذبه گردشگری را دارد. سه نیروگاه با ظرفیت‌های 1، 3 و 5 مگاوات مدل‌سازی شدند و بر اساس نسبت توان تولیدی به ظرفیت اسمی، ظرفیت 1 مگاوات به‌عنوان گزینه بهینه

در مورد حوضچه جزرومدی، مکانیزم تبدیل در این گونه توربین‌ها همانند توربین‌های بادی است؛ با این تفاوت که چگالی آب حدود 800 برابر بیشتر از هوا می‌باشد و این امر موجب تولید توان با چگالی انرژی بالاتر در توربین‌های جزرومدی می‌شود [15]. به‌منظور احداث یک حوضچه، مکان پارامتری تأثیرگذار است. شکل هندسی مناسب، دهانه‌ی احداث سد را حداقل می‌کند با این شرط که بیشترین حجم آب را بتواند در خود جای دهد [16]. برای این منظور دو محل در جزیره کیش شناسایی شد که در شکل 3 به نمایش گذاشته شده است؛ این دو حوضچه از ساخت دو سد 3271 و 1355 متر در مجموع مساحتی به مقدار 232 هکتار را در بر می‌گیرند. با به دست آوردن اختلاف ارتفاع جزرومد می‌توان میزان ذخیره آب در هر روز از سال را در حوضچه‌ها محاسبه کرد [17].



شکل 3 مکان حوضچه‌های جزرومدی پیشنهادی باتوجه نقشه ماهواره‌ای.

اصلی‌ترین پارامتر در توربین‌های جزرومدی میزان تغییر سطح آب در طول روز است [18]. برای پایش تراز آب از نرم‌افزار سازمان نقش برداری¹ استفاده شد. در طول روز هر 12/4 ساعت یک بار جزرومد اتفاق می‌افتد. در 24/8 ساعت روزانه سطح آب دارای بیشترین و کمترین تراز خواهد بود. این تغییرات در هر نقطه ساحلی در روز متفاوت می‌باشد. بیشترین مد² و کمترین جزر³ برای یک سال در شکل 4 قابل مشاهده است، نمودار از داده‌های نقشه‌برداری به دست آمد و اختلاف ارتفاع روزانه‌ی سطح آب⁴ حاصل شد. متوسط بیشترین و کمترین ارتفاع به ترتیب 1/68 و 0/388 متر به دست آمد. به طور متوسط در هر 24/8 ساعت، تراز جابه‌جایی سطح آب 1/294 متر برای جزیره کیش در نمودار گزارش گردید.

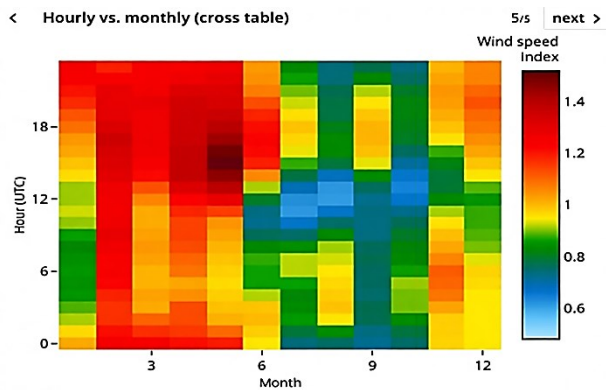
⁴ DH

⁵ Matlab

¹ NCC Tide

² Max H

³ Min H



شکل 5 نمودار سرعت باد متوسط برای 24 ساعت در 12 ماه.

همان گونه که ذکر شد سرعت جزء پارامترهای اساسی در تولید توان از انرژی باد است. رابطه (7) مقدار انرژی جنبشی را محاسبه می کند [23]:

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho A V_{air}^3 \quad (7)$$

P_{wt} توان تولیدی (kW)، ρ چگالی هوا برابر با $1/149 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ، A مساحت جاروب شده توسط پره ها (m^2) و V_{air} سرعت جابه جایی هوا (m/s) است.

$$P_{tot-wt} = P_{wt} \cdot \eta_{wt} \quad (8)$$

$$\eta_{wt} = C_p \cdot \eta_{gb} \cdot \eta_g \quad (9)$$

در دو رابطه بالا P_{tot-wt} توان تولیدی کل، η_{wt} راندمان کلی توربین، η_{gb} راندمان گیربکس توربین، η_g راندمان ژنراتور و C_p راندمان عملیاتی توربین را نشان می دهد [24]. C_p (حداکثر بیشینه نظری برای یک توربین باد) به ضریب یا حد بتز^۴ مشهور است و برابر با 0/593 در نظر گرفته می شود. در توربین های بادی دو سرعت قطع رتور بالا و پایین و یک سرعت نامی تعریف می شود. طبق رابطه (10) سرعت باید بین بازه قطع بالا و پایین باشد همچنین در سرعت های بیشتر از سرعت نامی تولید توان در ظرفیت خود باقی می ماند [25].

$$P_{wt} = \begin{cases} 0 & \text{قطع بالا } V \geq V_{\text{قطع بالا}} \\ aV_{air}^3 - bPr & \text{در ظرفیت نامی } V_{\text{قطع پایین}} \leq V_{air} \leq V \\ Pr & \text{قطع بالا } V_{air} \leq V_{\text{قطع پایین}} \end{cases} \quad (10)$$

$$a = \frac{Pr}{V_{\text{قطع پایین}}^3 - V_{\text{نامی}}^3} \quad (11)$$

$$b = \frac{V_{\text{قطع پایین}}^3}{V_{\text{قطع پایین}}^3 - V_{\text{نامی}}^3} \quad (12)$$

$$V_{air} = V_{ref} \cdot \left(\frac{H}{H_{ref}}\right)^a \quad (13)$$

رابطه (13) برای به دست آوردن سرعت در ارتفاع مورد نظر H برای مدل سازی است که از سرعت V_{ref} و ارتفاع H_{ref} در مرجع استفاده می شود. توان a در این رابطه مقداری تجربی است که به آن ضریب پایداری اتمسفری نیز گفته می شود و مقدار آن تقریباً برابر 7 می باشد [26]. از روش اسمز معکوس برای تأمین روزانه ۱۵ لیتر آب شیرین به ازای هر نفر استفاده شده است [27].

انتخاب شد. داده های بهینه شده این ظرفیت برای تحلیل نهایی به نرم افزار متلب منتقل گردید. جدول 1 داده های ورودی به نرم افزار جهت مدل سازی را نشان می دهد. پنل های خورشیدی با مدل خاص^۱ از شرکت سان پرو پاور، با راندمان مناسب انتخاب شدند و با زاویه ۲۴ درجه رو به جنوب نصب شده اند. ابتدا با استفاده از متلب، ظرفیت مورد نیاز نیروگاه برای تأمین مداوم برق مشخص شد. سپس در مرحله دوم، با شبیه سازی در نرم افزار PVsyst، میزان تولید سالانه برق، تعداد تجهیزات و مساحت مورد نیاز محاسبه گردید.

جدول 1 اطلاعات ورودی نرم افزار PVsyst برای مدل سازی.

5 مگاوات	3 مگاوات	1 مگاوات	
516	310	104	تعداد خطوط نصب سری پنل (هر ردیف 14 پنل)
5057	3038	1019	ظرفیت نامی (kW)
40	24	8	تعداد اینورتر
%2	%2	%2	درصد تلفات برای هر درجه افزایش دمای محیط
0/94	1/6	4/7	تلفات سیم کشی DC ($m\Omega$)
22,406	13,461	4,516	مساحت مورد نیاز برای احداث m^2

در این پژوهش، از توربین های بادی محور افقی فراساحلی برای تولید برق استفاده شده است که قابلیت نصب بر روی سدهای جزرومدی یا دریا را دارند و محدودیت فضایی مانند نیروگاه های خورشیدی ندارند. این توربین ها با برج های بلند و رتورهای بزرگ، توان تولید چندین مگاوات برق را دارند و عملکرد آن ها وابسته به سرعت باد است. برای برآورد توان تولیدی، از داده های سالانه سرعت باد جزیره کیش از منبع ویند اطلس^۲ استفاده شد [21]. در مدل سازی، از توربین بادی^۳ با ظرفیت ۱۲ مگاوات بهره گرفته شده است. ویژگی های آن شامل قطر رتور ۲۲۰ متر، ارتفاع برج ۱۵۰ متر، مساحت جاروب شده ۳۸۰۰۰ متر مربع، ولتاژ ژنراتور ۳۲۲۰ ولت، و وزن ۵۵ تن است. سرعت عملکرد بهینه 10/5 متر بر ثانیه، و بازه کاری آن بین ۳ تا ۳۴ متر بر ثانیه است. اگرچه راندمان اسمی 6۰٪ است، در این پژوهش با در نظر گرفتن تلفات و خطای داده ها، راندمان نهایی ۴۰٪ لحاظ شده است [22].

³ GE Haliade-X

⁴ Betz

¹ SPDG700-N132M12

² Wind atlas

می‌توان مقدار دبی ورودی آب‌نمک را نیز به دست آورد. شکل 7 شماتیک جریان‌های ورودی و خروجی به سلول غشا پلیمری را نشان می‌دهد.



شکل 7 شماتیک ورودی و خروجی یک سلول کلر آلکالی.

اهداف اقتصادی شامل بررسی هزینه اولیه احداث، سود حاصل از فروش محصولات (برق، آب، کاستیک، گاز کلر، هیدروژن) و مدت‌زمان بازگشت سرمایه است. برای این منظور، قیمت فروش محصولات و هزینه‌های ساخت به‌صورت فرضی در نرم‌افزار اکسل وارد شده‌اند. جدول 2 هزینه‌های احداث هر یک از سیستم‌های مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد. هزینه‌های احداث بر اساس داده‌های جهانی و با در نظر گرفتن نرخ تبدیل دلار (۶۰ هزار تومان) محاسبه شده‌اند، هرچند هزینه‌های داخلی ایران معمولاً کمتر است [31]. درآمد فرآیند براساس قیمت فروش محصولات خروجی و تنها هزینه خرید خوراک (نمک برای الکترولیز آلکالی) برآورد شده است. قیمت فروش برق از منابع رسمی مانند ساتبا و بورس انرژی گرفته شده و با ضریب تعدیل سالانه 1/3 در تحلیل لحاظ شده است [32، 33]. در نهایت، قیمت‌ها و سوددهی در بازه زمانی یک سال به‌صورت میانگین ساعتی محاسبه می‌گردد. جدول 3 قیمت فروش محصولات و نمک ورودی به سامانه را نشان می‌دهد. این قیمت‌ها از بازار داخلی ایران بوده که در منابع مختلف داخلی گزارش داده می‌شوند.

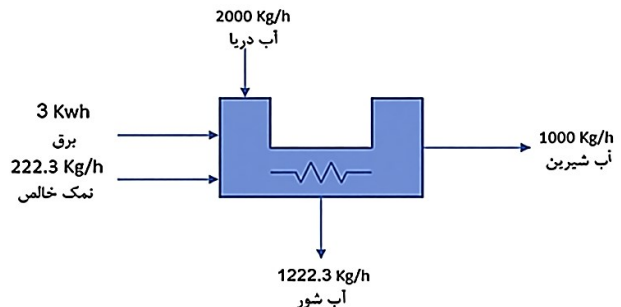
جدول 2 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (احداث) تجهیزات

سیستم	هزینه احداث (تومان)
توربین بادی هر مگاوات	90 میلیارد
پنل خورشیدی هر مگاوات	24/6 میلیارد
حوضچه جزرومدی هر مگاوات	60 میلیارد
اسمز معکوس با ظرفیت هزار کیلوگرم در ساعت	30 میلیارد
الکترولیز غشایی کلر آلکالی هر مگاوات	62 میلیارد

جدول 3 داده‌های قیمت خرید و فروش خوراک و محصولات

کالا	قیمت (تومان)
هر کیلووات برق تولیدی از نیروگاه خورشیدی با ظرفیت 1 مگاوات	4,745
هر کیلووات برق نیروگاه بادی با ظرفیت 10 مگاوات	4,135
هر کیلووات برق توربین‌های آبی جریان با ظرفیت 10 مگاوات	2,500
هر کیلوگرم آب شیرین در جایگاه عرضه	150

این فرایند با راندمان 50٪، نیمی از آب دریای ورودی را تصفیه و به شبکه توزیع منتقل می‌کند. برای تولید ۱۰۰۰ کیلوگرم در ساعت آب شیرین، سیستم به ۳ کیلووات ساعت برق و ۲۰۰۰ کیلوگرم آب دریا با شوری ۳۵ گرم بر لیتر نیاز دارد. همچنین، نمک با غلظت نهایی ۳۱۰ گرم بر لیتر به پساب اضافه می‌شود تا خوراک مناسب برای واحد کلر آلکالی فراهم شود. به دلیل محدودیت منابع، ۲۰۰۰ کیلوگرم نمک در روز در نظر گرفته شده و برای رسیدن به غلظت مورد نیاز، 222/3 کیلوگرم نمک در ساعت به پساب تزریق می‌شود [28].



شکل 6 شماتیک ورودی و خروجی واحد RO

برای طراحی ابرساختار سامانه هیبریدی، یک واحد الکترولیز غشایی کلر آلکالی در نظر گرفته شد. محصولات این فرآیند (کلر، سود سوزآور، هیدروژن) کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند و تولید آن‌ها در محل مصرف مانند جزایر، موجب کاهش هزینه، افزایش پایداری و حذف نیاز به حمل‌ونقل پرخطر و پرهزینه می‌شود. بر اساس نمونه‌های صنعتی، سلولی با مساحت غشای فعال 2/7 متر مربع، چگالی جریان 5/7 کیلوآمپر بر متر مربع و ولتاژ 3/2 ولت برای تحلیل انتخاب شده و مقدار برق مصرفی آن با استفاده از روابط مربوطه محاسبه شده است [29].

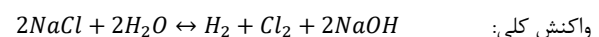
$$I = A \cdot i \quad (14)$$

در رابطه (14) شدت جریان (A)، مساحت فعال غشا (m^2) و چگالی جریان (A/m^2) می‌باشد.

$$P_{cell} = I \cdot V \quad (15)$$

P_{cell} توان مصرفی سلول (kWh) و V ولتاژ غشا (v).

برای مدل‌سازی سلول الکترولیز غشایی کلر آلکالی از رابطه (16) برای محاسبه مقدار هر محصول باتوجه به واکنش کلی انجام شده در آند و کاتد استفاده می‌گردد [30].



$$\eta_{cell} = \frac{I \cdot \eta_{cell} \cdot t}{N \cdot F} \quad (16)$$

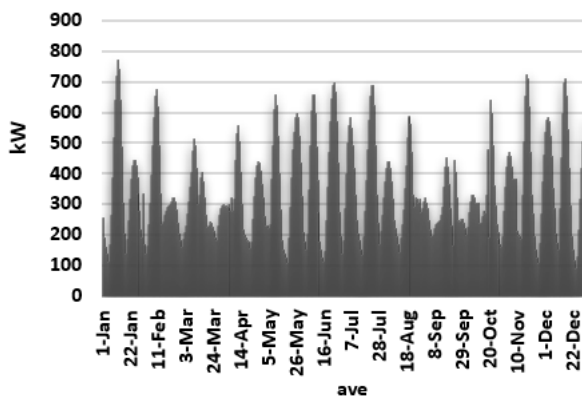
η_{cell} راندمان الکتریکی سلول برابر با 96٪، t زمان با واحد ثانیه، N ضریب استوکیومتری محصول، F ثابت فارادی برابر 96500 در نظر گرفته شد. با محاسبه مقدار دبی محصولات خروجی از سلول غشایی طبق قانون بقای جرم

پس از تکمیل مدل سازی سامانه هیبریدی تجدیدپذیر بر اساس داده های ورودی، نتایج به دو دسته اصلی تقسیم شدند:

نتایج اولیه: نمودارهای تولید انرژی هر یک از واحدهای تجدیدپذیر (خورشیدی، بادی و جزر و مدی). تعداد بهینه سلول های الکترولیز کلر-آلکالی مورد نیاز. دبی تولید محصولات جانبی (گاز کلر، هیدروژن و کاستیک مایع 50٪). نتایج نهایی: میزان تولید واحدهای تجدیدپذیر در ظرفیت مورد نیاز. هزینه سرمایه گذاری اولیه برای تجهیزات. درآمد و سود سالانه حاصل از فروش محصولات. دوره بازگشت سرمایه پروژه.

3-1- نتایج اولیه: ارزیابی عملکرد اجزای سیستم

باتوجه به شکل 3 اختلاف ارتفاع محاسبه و سپس از انرژی پتانسیل به وجود آمده در هنگام پر شدن حوضچه، نمودار تولید توان برای یک سال به صورت روزانه حاصل گردید (شکل 9). به دلیل اختلاف ارتفاع کم جزر و مد در جزیره کیش و محدودیت در ساخت حوضچه ها، تولید توان سیستم جزر و مدی کم (میانگین 300 تا 400 کیلووات) و غیرمقرون به صرفه ارزیابی شد؛ بنابراین، این منبع از مدل حذف و سامانه هیبریدی تنها با انرژی خورشیدی و بادی طراحی شد.



شکل 9 نمودار توان تولیدی روزانه حوضچه های جزر و مد.

جدول 4 در PVsyst نتایج شبیه سازی سه نیروگاه خورشیدی 1، 3 و 5 مگاواتی را مقایسه می کند، شامل پارامترهای تولید انرژی ماهانه² و نسبت عملکرد نیروگاه³. با تقسیم نتایج بر ظرفیت طراحی، نیروگاه 1 مگاواتی به عنوان گزینه بهینه برای مدل سازی در متلب انتخاب شد. شکل 10 نمودار متوسط تولید ساعتی انرژی در 24 ساعت را برای هر ماه نشان می دهد که به عنوان ورودی متلب برای بهینه سازی تجهیزات استفاده می شود. با تقسیم تولید ماهانه بر تعداد روزهای ماه، متوسط تولید ساعتی محاسبه شد. تحلیل نمودار نشان می دهد که تولید انرژی در ساعات 7 صبح تا 17 عصر رخ می دهد و اوج تولید بین 11 صبح تا 14 بعدازظهر است.

جدول 4 نتایج مدل سازی نیروگاه 1، 3 و 5 مگاواتی در PVsyst

PR ratio	E_Grid kWh	PR ratio	E_Grid kWh	PR ratio	E_Grid kWh
----------	------------	----------	------------	----------	------------

هر کیلوگرم گاز کلر [34]	16,500
هر کیلوگرم کاستیک مایع 50٪ [34]	11,000
هر کیلوگرم هیدروژن [34]	300,000
هر کیلوگرم نمک صنعتی [34]	800

پس از ورود داده ها به نرم افزار متلب و تعریف روابط خطی میان سیستم ها، تابع هدف با هدف ماکزیمم سازی سود و با محدودیت پاسخ گویی دائمی به تقاضا تعریف و بهینه سازی شد. روابط (17) و (18) بیانگر این مدل سازی هستند [35].

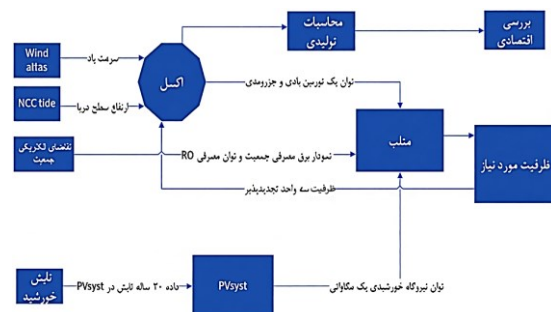
$$\text{Max } Z = \text{sell} - \text{buy}$$

$$\text{sell} = 4745X_2 + 4135X_4 + 2500X_6 + 150X_{11} + 11000X_{15} + 16500X_{16} + 300000X_{17}$$

$$\text{buy} = 800 \cdot X_{10} \quad (17)$$

$$X_2 + X_4 + X_6 = X_7 + X_8 \quad (18)$$

معادله خطی (17) برای تعیین تعداد تجهیزات مورد نیاز مدل سازی، با تابع ماکزیمم سازی سود است. محدودیت (18) برای پاسخ همیشگی به برق درخواستی ساکنین و برق مصرفی آب شیرین کن اسمز معکوس است. پس از تعیین ظرفیت هر واحد، هزینه اولیه سرمایه گذاری محاسبه می گردد. در نرم افزار متلب، بر اساس میزان تقاضا و تولید، تعداد تجهیزات و سود سالانه محاسبه می شود. در نهایت، با محاسبه سود سالانه، دوره بازگشت سرمایه¹ تعیین می شود. شکل 8 فلوچارت حل مسئله را نشان می دهد. روند حل مسئله به شرح زیر است: 1- جمع آوری و پردازش داده ها: اطلاعات باد از ویند اتلس و داده های جزر و مدی از داده های نقشه برداری در اکسل وارد و توان تولیدی محاسبه می شود. 2- مدل سازی سیستم خورشیدی: با داده های تابش خورشیدی، نیروگاه 1 مگاواتی در PVsyst شبیه سازی می شود. 3- بهینه سازی سیستم: نتایج اکسل و PVsyst همراه با نیاز مصرف به متلب منتقل شده و تعداد تجهیزات برای ماکزیمم سود و تأمین دائم تقاضا بهینه می گردد. 4- تحلیل اقتصادی: در اکسل شاخص های اقتصادی نظیر هزینه اولیه، سود سالانه و زمان بازگشت سرمایه محاسبه می شود.



شکل 8 چارت حل مسئله در نرم افزارهای مورد استفاده.

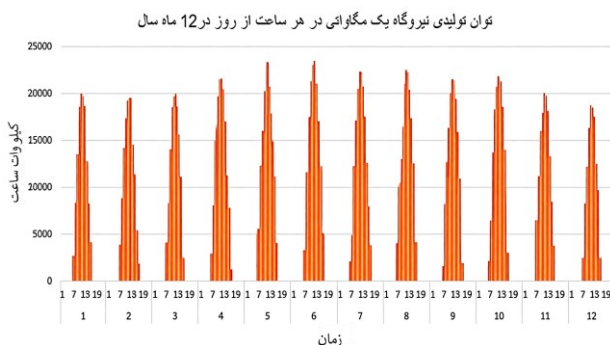
3- نتایج و بحث

³ Performance Ratio (PR)

¹ Payback Period

² E-Grid

۰/۸۴	۶۱۷۰۴	۰/۸۸	۳۸۵۸۷۳	۰/۸۸	129623	Dec
۰/۸۲	88429 50	0/86	557535	۰/۸۶	1872193	Year



شکل 10 نمودار توان تولیدی نیروگاه خورشیدی 1 مگاوات به صورت متوسط 24 ساعته در ماه.

۰/۸۵	۴۸۷۷۸ ۱	۰/۸۸	۴۲۹۳۵۱	۰/۸۸	144203	Jan
۰/۸۴	۶۲۵۶۹ ۰	۰/۸۸	۳۹۲۵۲۱	۰/۸۸	131791	Feb
۰/۸۳	۷۰۱۴۸ ۸	۰/۸۷	۴۴۱۳۷۸	۰/۸۷	148212	Mar
۰/۸۲	۷۸۲۶۴ ۱	۰/۸۶	۴۹۴۱۱۹	۰/۸۶	165903	Apr
۰/۸۱	۸۱۹۳۰ ۱	۰/۸۵	۵۲۱۱۳۷	۰/۸۵	174977	May
۰/۸۰	۸۰۸۳۹ ۸	۰/۸۵	۵۱۶۲۶۷	۰/۸۵	173345	Jun
۰/۸۰	۷۹۸۲۵ ۳	۰/۸۵	۵۰۹۰۸۱	۰/۸۵	170942	Jul
۰/۸۰	۷۸۴۱۵ ۹	۰/۸۵	۴۹۶۸۵۴	۰/۸۵	166835	Aug
۰/۸۱	۷۷۴۳۹ ۸	۰/۸۴	۴۸۶۴۴۷	۰/۸۴	163317	Sep
۰/۸۱	۷۶۳۳۹ ۱	۰/۸۵	۴۷۷۶۱۶	۰/۸۵	160360	Oct
۰/۸۳	۶۸۰۴۱ ۱	۰/۸۶	۴۲۴۹۰۹	۰/۸۶	142683	Nov

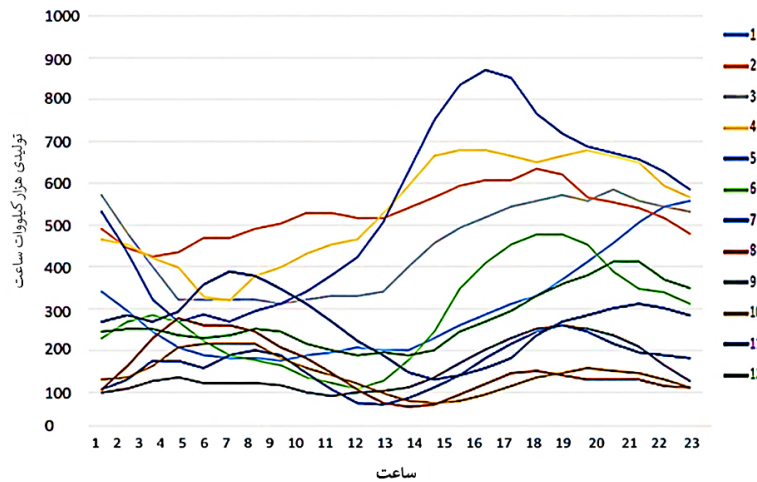
شکل 11 نمودار میزان تولید برق از یک توربین 12 مگاوات را نشان می‌دهد. از بررسی نمودار نتیجه می‌گردد که در ماه‌های مختلف، مجموع توان تولیدی در هر ساعت متغیر می‌باشد. دلیل این امر سرعت متغیر باد در منطقه مورد بررسی است. در پنج ماه اول سال میلادی بیشترین تولید حاصل می‌شود. ماکزیمم توان تولیدی این واحد در ساعت 14 بعد از ظهر تا 18 رخ می‌دهد. این نتایج برای یافتن تعداد توربین مورد نیاز برای تأمین تقاضا (محاسبه‌ی هزینه اولیه) و همچنین درآمد حاصل از فروش برق (ماکزیمم سود) به نرم افزار متلب داده می‌شود. واحدهای اسمز معکوس و الکترولیز کلر آلکالی مانند سه سیستم تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و جزرومدی متغیر نیستند؛ زیرا آب شیرین درخواستی شبکه مقدار ثابتی در روز است و محدودیت نمک به عنوان خوراک ورودی (2 تن در روز) باعث گردید که تولید الکترولیز نیز ثابت گردد. با یک الکترولیز 9 سلول آلکالی می‌توان به صورت 24 ساعته 2 تن نمک در روز مصرف کرد و محصولات جانبی گاز کلر، کاستیک مایع 50٪ و سوخت هیدروژن برای سودآوری سامانه هیبریدی در 364 روز تولید کرد. همچنین از واحد آب شیرین کن با ظرفیت تولید 25 تن در ساعت برای تأمین آب مورد نیاز شبکه استفاده گردید.

3-2- نتایج نهایی: تحلیل جامع اقتصادی-عملیاتی

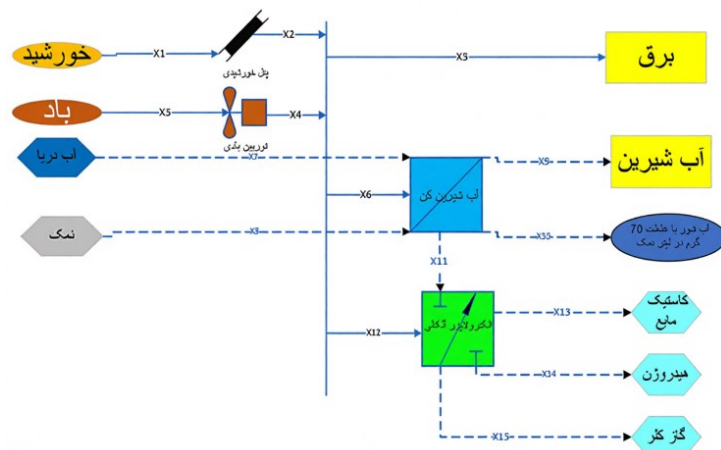
همان گونه که در نتایج اولیه ذکر گردید توربین جزرومدی به دلیل اختلاف ارتفاع کم (میانگین 1/29 متر) توان تولیدی کمی نسبت به هزینه‌ی سرمایه‌گذاری دارد. شکل 12 ابرساختار نهایی برای مدل‌سازی در متلب را نشان می‌دهد. پس از محاسبه ظرفیت بهینه توربین‌های بادی (12 مگاوات) و نیروگاه خورشیدی و تحلیل مصرف انرژی شبکه و آب شیرین‌کن، یک مدل بهینه‌سازی با تابع هدف حداکثرسازی سود و 8 متغیر تصمیم‌گیری توسعه یافت. نتایج نشان داد با محدودیت 14 توربین بادی و 100 مگاوات

می‌باشد که برای کسب درآمد به فروش می‌رسد. با مشخص نمودن ظرفیت نیروگاه خورشیدی در بهینه‌سازی متلب، نیروگاه خورشیدی با ظرفیت 59/25 مگاوات در نرم‌افزار PVsyst براساس داده‌های 20 ساله منطقه شبیه‌سازی گردید. مدل‌سازی در مساحتی به اندازه 262,617 متر مربع، 474 اینورتر و تلفات صفر درصد اینورتر به پیل انجام گرفت.

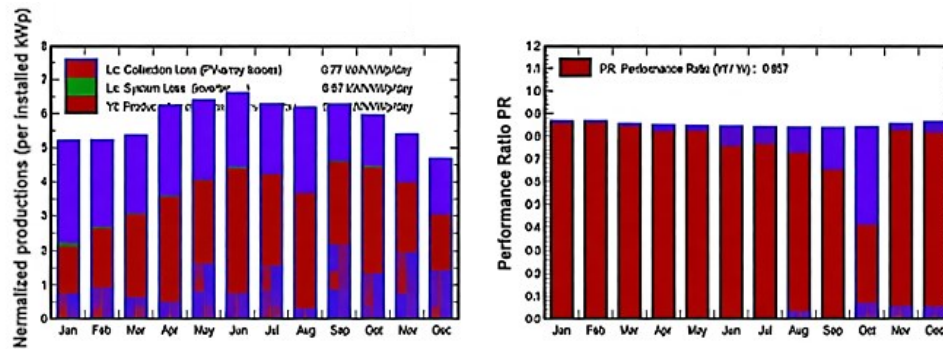
خورشیدی، بهترین ترکیب برای پاسخ دائمی به تقاضا (بدون نیاز به ذخیره‌سازی) 14 توربین بادی (12 مگاواتی) و 59/25 مگاوات نیروگاه خورشیدی است که به دلیل پتانسیل بادی بالاتر، سود فروش برق را در یک سال حداکثر می‌کند. مازاد تولیدی برق با کسر برق مورد نیاز 9 سل الکترولیز (3942 مگاوات ساعت در سال)، 1,047,876 مگاوات ساعت برق در سال



شکل 11 نمودار تولید توان 24 ساعته توربین 12 مگاوات در هر ماه.



شکل 12 ابرساختار نهایی سامانه هیبریدی.

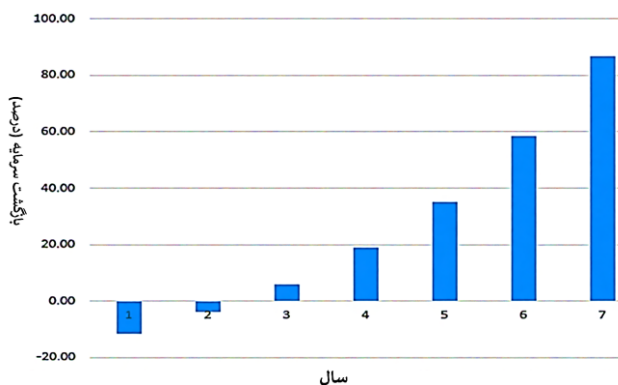


Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	GlobHor kWh/m²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m²	GlobEff kWh/m²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	118.9	44.2	19.18	162.2	153.8	8338907	8225595	0.876
February	121.8	59.8	20.46	147.4	139.7	7783227	7677171	0.879
March	152.6	79.1	23.72	187.6	159.4	8728674	8504746	0.855
April	185.3	85.8	27.69	188.8	178.3	9740413	9607584	0.859
May	210.5	85.0	31.94	200.1	188.8	10262402	10107209	0.852
June	215.5	86.0	33.40	198.3	185.7	10146585	9992240	0.851
July	210.2	101.8	35.54	196.7	155.2	10014457	9965714	0.848
August	194.8	89.6	35.39	192.9	182.0	9783380	9551232	0.844
September	176.6	76.1	33.29	189.9	179.7	9611319	9479632	0.842
October	155.5	62.0	30.75	186.0	176.5	9464948	9337380	0.847
November	122.8	43.9	25.37	183.3	155.1	8448639	8333537	0.851
December	106.9	46.4	21.11	146.2	138.2	7673760	7589774	0.873
Year	1570.3	890.7	28.19	2139.5	2021.9	110108733	108554613	0.857

شکل 13 گزارش مدل سازی نیروگاه خورشیدی 59/25 مگاوات در نرم افزار PVsyst.

۲۱/۷۶	۱,۷۳۱/۱	۱,۵۳۴/۳	۲۱۹,۰۰۰	۱,۰۴۷,۸۷۶	میزان تولید سالانه
					درآمد حاصل از فروش (میلیارد تومان)
۶/۵۲۸	۱۹/۴۲	۲۵/۳۱۶	۳۲/۸۵	۵,۷۷۰/۹۹	



در شکل 13 نمودارهای تولید، عملکرد سیستم و جدول اطلاعات تولیدی سالیانه در فضای نرم افزار را گزارش می دهد. با نتایج متلب و اکسل درآمد فروش کل محصولات (برق، آب شیرین، گاز، کلا، کاستیک مایع 50٪ و هیدروژن) محاسبه گردید و در جدول 5 به صورت سالانه گزارش گردید. مجموع کل درآمد با کسر 581/9 میلیون تومان هزینه نمک در هر سال 5/85 هزار میلیارد تومان می باشد که رقمی چشم گیر است. الکترولیز آلکالی با هزینه احداث 28 میلیارد تومان سالانه، 51 میلیارد تومان درآمد کسب می کند. دلیل این بازگشت سرمایه، رایگان بودن برق ورودی به الکترولیز است. با مشخص شدن تعداد اجزاء سامانه هیبریدی هزینه سرمایه گذاری اولیه 17/36 هزار میلیارد تومان محاسبه شد. طبق شکل 14 با سود سالانه 5/85 هزار میلیارد تومان و ضریب تعدیل 1/3 دوره بازگشت سرمایه بین سال های دوم و سوم اتفاق می افتد. با این گزارشات نتیجه می شود که این سیکل از لحاظ اقتصادی (دوره بازگشت سرمایه) منطقی است زیرا از منابع رایگان درآمد کسب می کند اما نیازمند هزینه ی اولیه بسیار بالایی می باشد. با پیشرفت فناوری هزینه احداث نیروگاه های تجدیدپذیر نسبت به ظرفیت تولید و راندمان سیستم ها روند نزولی به خود گرفته است که آینده ای روشن را نشان می دهد.

جدول 5 نتایج تولید و درآمد سامانه هیبریدی تجدیدپذیر

برق (مگاوات ساعت)	آب (تن)	گاز کلا (تن)	کاستیک مایع ۵۰٪ (تن)	گاز هیدروژن (تن)
-------------------------	------------	-----------------	----------------------------	------------------------

شکل 14 نمودار بازگشت سرمایه سامانه هیبریدی تجدیدپذیر (بدون در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی)^۱.

همانطور که در مقاله اشاره شده است، "قیمت فروش برق از منابع رسمی مانند ساتبا و بورس انرژی گرفته شده و با ضریب تعدیل سالانه 1/3 در تحلیل ها لحاظ شده است." این ضریب می تواند جایگزینی غیرمستقیم برای افزایش قیمت ها یا تورم آینده باشد، به ویژه در بخش فروش برق. به عبارت دیگر، فرض شده که قیمت فروش برق در سال های آینده با ضریب 1/3 افزایش می یابد. این می تواند ناشی از: (الف) افزایش نرخ خرید برق تجدیدپذیر توسط دولت، (ب) تورم عمومی در بخش انرژی، و (ج) پیش بینی افزایش ارزش انرژی های پاک باشد. با این حال، این ضریب فقط بر قیمت فروش برق اعمال شده و بر سایر هزینه های عملیاتی اعمال نشده است. به همین دلیل، تحلیل اقتصادی با نظر گرفتن شاخص های ارزش خالص فعلی^۲ و نرخ بازده داخلی^۳ مجدداً محاسبه و دوره بازگشت سرمایه جدید به دست آورده شد.

این دو پارامتر از روابط زیر بدست می آیند. نرخ بازده داخلی نرخ است که ارزش خالص فعلی را صفر می کند [36]:

$$NPV = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+r)^t} \quad (19)$$

$$0 = -C_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF}{(1+r)^t} \quad (20)$$

که C_0 هزینه اولیه^۴، r نرخ تنزیل و t طول عمر پروژه است که مقادیر آن در جدول 6 آورده شده است. همانطور که در جدول 6 مشاهده می کنید، مقادیر نرخ بازده داخلی و ارزش خالص فعلی مثبت و بسیار بالا هستند که نشان می دهد از منظر اقتصادی، پروژه سودآور و کاملاً باصرفه است.

همچنین با مقایسه جدول 6 و شکل 14، این نکته قابل توجه است که دوره بازگشت سرمایه با نظر گرفتن هزینه های عملیاتی و با احتساب نرم تورم و بهره بانکی، حدود 43 ماه است که کمی بیشتر از 30 ماهی است که در حالت قبلی (بدون در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی) گزارش شده بود.

جدول 6 نتایج اقتصادی با در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی

شاخص اقتصادی	قیمت (میلیارد تومان)
هزینه اولیه	17,360
درآمد ناخالص سالانه	5,855
هزینه عملیاتی سالانه	1,018
جریان نقدی خالص سالانه	4,837
عمر پروژه	20
نرخ تنزیل (شامل نرخ بهره، ریسک و تورم)	18%
ارزش خالص فعلی	+8,537
نرخ بازده داخلی	27/25%
دوره بازگشت سرمایه	3/6 سال (43 ماه)

4- نتیجه گیری

این مطالعه به ارزیابی پتانسیل انرژی های تجدیدپذیر (جزرומدی، خورشیدی و بادی) در جزیره کیش برای تأمین پایدار آب و برق جمعیت ۴۰ هزار نفری پرداخته و با ادغام فرآیند کلر-آلکالی، بهینه ترین ظرفیت سامانه هیبریدی را تعیین نموده است. مهم ترین یافته ها به شرح زیر است:

- جزیره کیش به دلیل اختلاف ارتفاع جزر و مد کم (میانگین ۱,۲۹۴ متر) و محدودیت های فضایی، از نظر اقتصادی برای پیاده سازی نیروگاه های جزرומدی مناسب نیست؛ بنابراین این منبع در مدل نهایی حذف شد.

- واحد الکترولیز پساب آب شیرین کن علاوه بر تولید درآمد سالانه از طریق محصولات ارزشمند (کلر، کاستیک مایع و هیدروژن)، روزانه از ورود ۹ تن آب شور به دریا جلوگیری کرده و اثرات زیست محیطی فرآیند اسمز معکوس را کاهش می دهد.

- با مصرف ۲ تن نمک در روز، یک واحد الکترولیز غشایی متشکل از ۹ سلول به صورت ۲۴ ساعته در ۳۶۴ روز سال فعالیت دارد. عدم فعالیت در یک روز ناشی از اوج تقاضای شبکه است که تمام توان تجدیدپذیر را مصرف می کند. - تولید سالانه هر توربین بادی ۱۲ مگاواتی (با راندمان ۴۰٪) بر اساس داده های ویند اتلس برابر با ۹۰,۵۸۶ مگاوات ساعت برآورد شد که بیشترین تولید در ساعات ۱۴ تا ۱۸ رخ می دهد.

- نتایج بهینه سازی در نرم افزار متلب نشان داد که با نصب ۱۴ عدد توربین بادی و ۵۹,۲۵ مگاوات نیروگاه خورشیدی، بدون نیاز به سیستم ذخیره سازی، تقاضای سالانه آب و برق جمعیت جزیره به طور کامل پوشش داده می شود.

- در بحث اقتصادی و در تحلیل ساده شده بدون در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی، هزینه سرمایه گذاری اولیه سامانه ۱۷,۳۶۰ میلیارد تومان و سود سالانه 5,855 میلیارد تومان برآورد شد که دوره بازگشت سرمایه را به ۳۰ ماه می رساند.

- در بحث اقتصادی و با احتساب هزینه های عملیاتی (شامل هزینه نمک، نگهداری، تعمیرات و سایر مصارف جاری، جمعاً حدود ۱,۰۱۸ میلیارد تومان در سال)، جریان نقدی خالص سالانه به ۴,۸۳۷ میلیارد تومان کاهش یافت؛ با این حال، تحلیل مالی با نرخ تنزیل ۱۸٪ نشان می دهد که ارزش خالص فعلی برابر با ۸,۵۳۷+ میلیارد تومان و نرخ بازده داخلی برابر 27/25٪ است که نشان از سودآوری بالا و جذابیت اقتصادی پروژه دارد.

- دوره بازگشت سرمایه با نظر گرفتن هزینه های عملیاتی و با احتساب نرم تورم و بهره بانکی، حدود 43 ماه است که کمی بیشتر از 30 ماهی است که در حالت قبلی (بدون در نظر گرفتن هزینه های عملیاتی) گزارش شده بود. در مطالعات آینده، شبیه سازی مبتنی بر داده های ساعتی واقعی (مثلاً از ایستگاه های سنجش انرژی سازمان انرژی های تجدیدپذیر ایران) می تواند دقت و قابلیت اطمینان نتایج را افزایش دهد. همچنین، ساخت یک پایلوت کوچک مقیاس از سیستم هیبریدی پیشنهادی می تواند به عنوان ابزاری برای اعتبارسنجی تجربی عمل کند. این سامانه یکپارچه، الگویی نوین برای توسعه پایدار جزایر ایران ارائه می دهد که ضمن کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی، از طریق تولید همزمان چندمحصولی، ارزش اقتصادی قابل توجهی ایجاد می کند.

³ IRR

⁴ CAPEX

¹ OPEX

² NPV

5- مراجع

- [17] M. Kadiri, R. Ahmadian, B. Bockelmann-Evans, W. Rauen, and R. Falconer, A review of the potential water quality impacts of tidal renewable energy systems, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 329-341, 2012.
- [18] Z. Sadeghi, M. Ranjbar, and M. Iranmanesh, The comparison of tidal power plants with solar and combined cycle power plants in the southern coast of Iran, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 40, No. 5, p. e13670, 2021.
- [19] T. O'Doherty, D. M. O'Doherty, and A. Mason-Jones, Tidal Energy Technology, in *Wave and Tidal Energy*, pp. 105-150, 2018.
- [20] S. Falahat, J. Nycander, F. Roquet, and M. Zarroug, Global calculation of tidal energy conversion into vertical normal modes, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 44, No. 12, pp. 3225-3244, 2014.
- [21] *Global Wind Atlas (GWA)*, *Wind speed data*, Accessed 2024; <https://globalwindatlas.info/en>.
- [22] *Wind turbine models, GE Vernova GE Haliade-X 12 MW*, Accessed 2024; <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1809-ge-vernova-ge-haliade-x-12-mw>.
- [23] W. Tong, *Fundamentals of wind energy*. WIT press Southampton, UK, 2010.
- [24] R. J. Barthelmie and L. Jensen, Evaluation of wind farm efficiency and wind turbine wakes at the Nysted offshore wind farm, *Wind Energy*, Vol. 13, No. 6, pp. 573-586, 2010.
- [25] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, Evaluation of different turbine concepts for wind power, *renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 12, No. 5, pp. 1419-1434, 2008.
- [26] R. R. Tan, K. B. Aviso, D. C. Foo, J.-Y. Lee, and A. T. Ubando, Optimal synthesis of negative emissions polygeneration systems with desalination, *Energy*, Vol. 187, p. 115953, 2019.
- [27] Y. Cohen, R. Semiat, and A. Rahardianto, A perspective on reverse osmosis water desalination: Quest for sustainability, *AIChE Journal*, Vol. 63, No. 6, 2017.
- [28] T. M. Mogashane, J. P. Maree, M. Mujuru, and M. M. Mphahlele-Makgwane, Technologies that can be Used for the Treatment of Wastewater and Brine for the Recovery of Drinking Water and Saleable Products, *Recovery of byproducts from acid mine drainage treatment*, pp. 97-156, 2020.
- [29] P. Millet, Chlor-alkali technology: fundamentals, processes and materials for diaphragms and membranes, in *Handbook of Membrane Reactors*, pp. 384-415: Elsevier, 2013.
- [30] F. Hine, B. Tilak, and K. Viswanathan, Chemistry and chemical engineering in the chlor-alkali industry, *Modern Aspects of Electrochemistry: Volume 18*, pp. 249-302, 1986.
- [31] R. Derakhshanlavijeh and J. M. C. Teixeira, Cost overrun in construction projects in developing countries, Gas-Oil industry of Iran as a case study, *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 23, No. 1, pp. 125-136, 2017.
- [32] H. Yahyazadeh, Legal Analysis of Renewable Energy in reference to the Iranian Legal System, *Renewable Energy Law and Policy Review*, Vol. 10, No. 1, pp. 31-38, 2020.
- [33] *Iran Energy Exchange*, Accessed 2025; <https://iee.ir/>.
- [34] *Iran Mercantile Exchange (IME)*, Accessed 2025; <https://en.ime.co.ir/>.
- [35] X. Wang, A. Palazoglu, and N. H. El-Farra, Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems, *Applied Energy*, Vol. 143, pp. 324-335, 2015.
- [36] L. Keča, N. Keča, and D. Pantić, Net Present Value and Internal Rate of Return as indicators for assessment of cost-efficiency of poplar plantations: a Serbian case study, *International Forestry Review*, Vol. 14, No. 2, pp. 145-156, 2012.
- [1] M. Jaccard, *Sustainable fossil fuels: the unusual suspect in the quest for clean and enduring energy*. Cambridge University Press, 2006.
- [2] J. Saldaña, M. Yurukcu, N. Boppana, S. Arbabi, J. Henry, and S. Ziyank, Conventional and Fossil Fuels, in *Energy Transition in the Oil and Gas Industry*, pp. 70-111: CRC Press, 2025.
- [3] U. Bello, C. M. Agu, D. A. Ajiya, A. A. Mahmoud, L. Udopia, N. M. Lawal, A. A. Abdullahi, and M. Muhammad, renewable energy: A review on its potentials and production strategies, *Journal of Chemical Reviews*, Vol. 4, No. 3, p. 114015, 2022.
- [4] Q. Hassan, P. Viktor, T. J. Al-Musawi, B. M. Ali, S. Algburi, H. M. Alzoubi, A. K. Al-Jiboory, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, The renewable energy role in the global energy Transformations, *Renewable Energy Focus*, Vol. 48, p. 100545, 2024.
- [5] H. Dargahi and M. Bahrami Gholami, The GHGs emissions determinants in selected OECD and OPEC countries and the policy implications for Iran:(Panel data approach), *Iranian Energy Economics*, Vol. 1, No. 1, pp. 73-99, 2011.
- [6] S. Karimian and S. S. Saham, Wind Energy potential evaluation and customizing a H-rotor Turbine based on Tehran, Zahedan and Manjil climate, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 12, No. 5, pp. 267-281, 2022.
- [7] J. Yoon, H. J. Kwon, S. Kang, E. Brack, and J. Han, Portable seawater desalination system for generating drinkable water in remote locations, *Environmental Science & Technology*, Vol. 56, No. 10, pp. 6733-6743, 2022.
- [8] R. A. Almasri and S. Narayan, A recent review of energy efficiency and renewable energy in the Gulf Cooperation Council (GCC) region, *International Journal of Green Energy*, Vol. 18, No. 14, pp. 1441-1468, 2021.
- [9] I. E. Atawi, A. Q. Al-Shetwi, A. M. Magableh, and O. H. Albalawi, Recent advances in hybrid energy storage system integrated renewable power generation: Configuration, control, applications, and future directions, *Batteries*, Vol. 9, No. 1, p. 29, 2022.
- [10] A. Badakhanian and A. Maleki, Optimization of a Hybrid Renewable Energy System for Power and Hydrogen Production, *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, Vol. 42, No. 3, pp. 319-339, 2023.
- [11] M. Temiz and I. Dincer, A unique ocean and solar based multigenerational system with hydrogen production and thermal energy storage for Arctic communities, *Energy*, Vol. 239, p. 122126, 2022.
- [12] A. Bedakhanian, A. Maleki, and S. Haghighat, Utilizing the multi-objective particle swarm optimization for designing a renewable multiple energy system on the basis of the parabolic trough solar collector, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 47, No. 86, pp. 36433-36447, 2022.
- [13] J. Jiang, B. Ming, Q. Huang, J. Chang, P. Liu, W. Zhang, and K. Ren, Hybrid generation of renewables increases the energy system's robustness in a changing climate, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 324, p. 129205, 2021.
- [14] L. Khani, F. Jabari, M. Mohammadpourfard, and B. Mohammadi-Ivatloo, Design, evaluation, and optimization of an efficient solar-based multi-generation system with an energy storage option for Iran's summer peak demand, *Energy Conversion and Management*, Vol. 242, p. 114324, 2021.
- [15] L. Evans, I. Ashton, and B. Sellar, Tidal turbine power performance assessments following IEC TS 62600-200 using measured and modelled power outputs, *Renewable Energy*, Vol. 212, pp. 138-150, 2023.
- [16] I. Q. A'yun and D. Anggrayni, Determinants of CO2 Emission: Evidence from United States, *Journal of Economics Research and Social Sciences*, Vol. 7, No. 2, pp. 175-191, 2023.