

# امکان سنجی استفاده از مبدل موج OWC برای تامین بار الکتریکی مورد نیاز یک واحد پالایشگاهی (مطالعه ی موردی)

محمد حسین جهانگیر<sup>۱\*</sup>، افشین بدرلو<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار گروه انرژی های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، mh.jahangir@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی انرژی های تجدیدپذیر، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، afshinbadrloo1374@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>ناریخچه مقاله:</p> <p>تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۲۴</p> <p>تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰</p> <p>کلمات کلیدی:</p> <p>سیستم هیبریدی</p> <p>ارزیابی زیست محیطی</p> <p>مبدل انرژی امواج</p> <p>ترکیب بهینه</p>	<p>مطالعه حاضر بر امکان سنجی استفاده از مبدل انرژی موج OWC جهت تامین توان الکتریکی یک واحد پالایشگاهی در نزدیکی سواحل خلیج فارس طی یک افق ۲۰ ساله متمرکز شده است. با توجه به پتانسیل سایر منابع انرژی تجدیدپذیر در منطقه مورد مطالعه، یک سیستم ترکیبی از توربین بادی، پنل فتوولتائیک، مبدل امواج، الکتروولایزر، باتری و پیل سوختی پیشنهاد شده است. همچنین مقایسه بین استفاده از ریفورمر به جای الکتروولایزر نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر مبدل انرژی امواج OWC بر سیستم هیبریدی به عنوان یک رویکرد جدید در تولید توان مورد نیاز، ارزیابی شده است. نتایج نشان می دهد که سیستم ترکیبی شامل مبدل OWC با هزینه NPC و COE به ترتیب ۲۶٫۵ دلار و ۰٫۲۰۵ دلار در مقایسه با سیستم ترکیبی بدون مبدل OWC جهت پاسخ گویی به تقاضای توان واحد پالایشگاهی، مقرون به صرفه تر است. به گونه ای که حدود ۳۰٫۷ درصد از توان مورد نیاز توسط مبدل انرژی امواج تامین می شود. استفاده از مبدل انرژی امواج در ماه های با پتانسیل پایین انرژی موج کاهش می یابد و نقش سایر منابع انرژی تجدید پذیر پر رنگ تر می شود.</p>

## Feasibility study of using OWC wave converter to supply the required electric charge of a refinery unit (Case study)

Mohammad Hossain Jahangir<sup>1\*</sup>, Afshin Badrloo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Renewable Energies, University of Tehran; mh.jahangir@ut.ac.ir

<sup>2</sup> MSc Student, Department of Renewable Energies, University of Tehran; afshinbadrloo1374@ut.ac.ir

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received: 15 Mar 2022

Accepted: 31 May 2023

#### Keywords:

Hybrid system

Environmental Assessment

Wave energy converter

Optimal composition

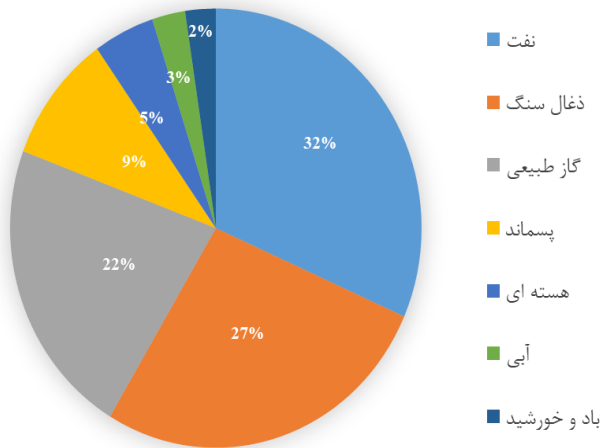
### ABSTRACT

The present study is for the feasibility of using the OWC wave energy converter to supply electrical power to a refinery unit near the shores of the Persian Gulf over a 20-year horizon. Considering the potential of other renewable energy sources in the study area, a combined system of wind turbine, photovoltaic panel, wave converter, electrolyzer, battery and fuel cell is proposed. A comparison between using a reformer instead of an electrolyzer has also been studied. The effect of OWC energy converters on the hybrid system has been evaluated as a new approach in generating the required power. The results show that the hybrid system including the OWC converter with NPC and COE costs \$ 26.5 and \$ 0.205, respectively, is more cost-effective than the hybrid system without the OWC converter to meet the refinery unit power demand. About 30.7% of the required power is supplied by the wave energy converter. The use of wave energy converters is reduced in the months with low wave energy potential and the role of other renewable energy sources becomes more colorful.

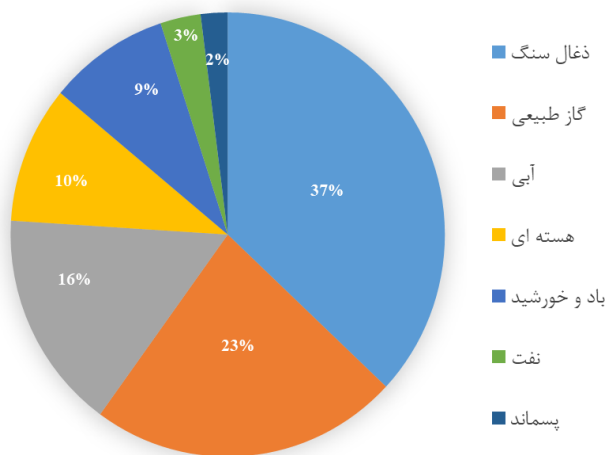
سهام انرژی های تجدید پذیر از تامین کل انرژی جهان مطابق آخرین گزارشات و شکل (۱) تقریباً ۱۴٫۵ درصد است که از این میزان، سهم انرژی های آبی در حدود ۲٫۶ درصد می باشد [1]. براساس شکل (۲) میزان تولید الکتریسته از انرژی های تجدید پذیر نیز در جهان تقریباً ۲۸ درصد است که نقش انرژی های آبی در این بخش در حدود ۱۵٫۹ درصد گزارش شده است [1]. به طور اختصاصی، انرژی امواج حاصله در مناطق ساحلی کره ی زمین چیزی در حدود ۲ تا ۳ میلیون مگاوات برآورد شده است و به طور تقریبی حداکثر ۲۰ درصد از این انرژی قابل استحصال است. به طور متوسط سالانه میزان تولیدی از این منبع تجدید پذیر در جهان حدود ۰٫۵ مگاوات بوده است. با وجود اینکه ایران یکی از ثروتمندترین کشورها در زمینه منابع تجدید پذیر است به طوری که ۱۲۵۹ کیلومتر مرز دریایی با خلیج فارس، ۷۸۴ کیلومتر مرز دریایی با دریای عمان و ۶۵۷ کیلومتر مرز دریایی با دریای خزر دارد. از این رو بحث استحصال انرژی امواج در این مناطق از اهمیت ویژه ای برخوردار است، اما متأسفانه در زمینه ی انرژی امواج هیچ گام عملی چشم گیری برداشته نشده و این پتانسیل تنها در محافل علمی شناخته شده تر است. به طور مثال توان بالقوه در بندر بوشهر ۲٫۲ و لنگه ۳٫۴ کیلو وات بر متر و در جزایر ابوموسی و سیری ۵٫۱ و ۵٫۳ کیلو وات بر متر می باشد [2] که توان قابل توجهی را شامل می شود. با توجه به این که میانگین سالانه تابش خورشیدی به میزان ۲۲۰۰ کیلو وات ساعت بر متر مربع (بالاتر از میانگین جهانی) است و از طرفی با توجه به پتانسیل خوب انرژی بادی، می توان از سیستم های ترکیبی جهت تامین توان واحد های پالایشگاهی استفاده کرد. به طوری که این کار هم موجب جلوگیری از توسعه نیروگاه های سوخت فسیلی و انتشار گازهای گلخانه ای می شود و هم از پتانسیل بالقوه انرژی های تجدید پذیر استفاده شده است. جهت بهره گیری از پتانسیل انرژی امواج محل مورد مطالعه از مبدل OWC دو جهته در HRES استفاده شده است به طوری که هم با بالا آمدن سطح آب و هم با پایین رفتن سطح آب توان الکتریکی تولید می شود. در سال های اخیر و با توجه به بحران انرژی مطالعات فنی و اقتصادی زیادی در مورد سیستم های تجدید پذیر هیبریدی انجام شد است که در ادامه به برخی از آنها اشاره خواهد شد. ضبیحیان و فونگ در قالب پژوهشی با هدف جمع آوری اطلاعات دریافتند که جزایر خلیج فارس و خط ساحلی خلیج عمان به ترتیب با میانگین توان موجی ۱۶٫۶ و ۱۲٫۶ کیلووات بر متر مناطق مناسبی برای مهار انرژی دریایی برای تامین انرژی مورد نیاز مردم ساکن در این مناطق روستایی محروم، دورافتاده، صعب العبور و خشک هستند [3]. دانیال و داوود خجسته طی یک ارزیابی انرژی امواج و جزر و مد در سواحل ایران دریافتند که دریای خزر با میانگین و حداکثر توان موجی به ترتیب ۱۴ کیلووات بر متر و ۳۰ کیلووات بر متر، منطقه ای با پتانسیل

انرژی امواج بسیار زیاد است [2]. روزه شفقت و همکاران طی پژوهش امکان سنجی استفاده از مبدل انرژی امواج در سواحل جنوبی ایران دریافتند که انرژی موج در بندر چابهار در فصل تابستان، حداکثر به ۱۷ کیلووات بر متر و در خلیج فارس و تنگه هرمز (جزیره کیش) در فصل زمستان، حداکثر به ۱۰ کیلووات بر متر می رسد. آنها به این نتیجه رسیدند که پارامترهای موج در نواحی مرکزی خلیج فارس در این فصل از مقادیر بالاتری نسبت به دریای عمان برخوردار است. در نهایت، بندر چابهار در دریای عمان و بندر کنگان، جزیره کیش و جزیره خارگ در خلیج فارس را به عنوان کانون های انرژی امواج و مناسب ترین محل برای سیستم های مبدل انرژی موج پیشنهاد دادند [4]. تابی و همکاران مروری بر وضعیت فعلی تکنولوژی های انرژی تجدید پذیر نوظهور با تمرکز بر تولید انرژی از امواج را انجام دادند. در این تحقیق پیشرفت های فعلی و سودمندی در سه زمینه تولید انرژی در ساحل، نزدیک و دور از ساحل بررسی شد [5]. پلامر و همکاران مروری بر انواع مبدل های انرژی امواج داشتند. انواع مبدل ها بررسی و ارزیابی شدند. شرکت ها و موسسات درگیر در توسعه WEC و همچنین پروژه های مشترک انرژی موج نیز شناسایی شدند [6]. میشل و همکاران طی مطالعه ای استخراج توان از مبدل امواج OWC را مورد بررسی قرار دادند. آنها یک نظریه خطی شده را برای OWC نصب شده در سیستم هیبرید انرژی موج و انرژی باد، توسعه دادند. مدل جدید OWC که ارائه شده است دارای یک ساختار یکپارچه با هدف افزایش بهره وری می باشد [7]. اوساوا و همکاران یک سیستم هیبریدی شامل یک مبدل انرژی موج وال بزرگ و سلول های خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش دادند که سیستم ترکیبی مذکور برای تولید توان در دریای ژاپن مناسب است [8]. ابنوی و همکاران طی یک ارزیابی فنی و اقتصادی، سیستم هیبریدی شامل PV، WT و BATT را برای تامین توان مسکونی یک روستا مورد مطالعه قرار دادند. آنها گزارش کردند که سیستم بهینه شامل تمام تکنولوژی های ذکر شده بوده و هزینه ی انرژی برابر ۰٫۱۱۹ دلار بر کیلووات و هزینه خالص فعلی برابر ۲۶۴۹۱۰ دلار است [9]. سینگ و همکاران سیستمی شامل PV، WT، دیزل ژنراتور، بایوگس ژنراتور و باتری را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج شبیه سازی نرم افزار با نتایج الگوریتم ABC و PSO مقایسه شدند. آنها گزارش کردند که هر سه روش مذکور ساختار بهینه همسانی دارند [10]. احمد و همکارانش یک سیستم هیبرید شامل PV، WT، BIOGAS و BATT را برای یک روستا در پاکستان طراحی کردند. آنها گزارش کردند که به دلیل حجم بالای تولید زباله در منطقه مذکور، با استفاده از سیستم زیستی در ترکیب با منابع دیگر، هزینه انرژی به طور چشم گیر کاهش می یابد [11]. حاجی زاده و همکارانش، کاربرد سیستم های مبتنی بر هیدروژن به صورت هیبرید در ساختار سیستم های تولید توان را مورد بررسی

قرار دادند. آنها گزارش کردند که سیستم های ذخیره سازی انرژی از نظر فنی در بسیاری از شرایط مختلف امکان پذیر هستند از جمله ساختمان های تجاری، عمومی بزرگ، خانه های مسکونی و همچنین سیستم های تلفن همراه در مقیاس میکرو [12]. حسن زاده و همکارانش یک شبکه هیبریدی متشکل از PV، WT، EL، RE و پیل سوختی طراحی کردند. انرژی تولیدی مازاد از منابع تجدید پذیر برای تولید هیدروژن در الکترولیزر استفاده شده است. آنها برای تایید کارایی الگوریتم ارائه شده چند تقاضای بار سالانه را مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان داد، الگوریتم قادر است تقاضا را به خوبی تامین کند [13]. کارلوس و همکاران یک تحلیل فنی، اقتصادی و زیست محیطی روی سیستم حمل و نقل عمومی انجام دادند که شامل ترکیب فناوری های PV، WT و BIOGAS بود، به صورتی که الکتریسته تولید شده در سیستم مذکور، فرآیند الکترولیز جهت تولید برق و هیدروژن در طول دوره ی استهلاك کاهش و با افزایش نرخ بهره افزایش می یابد. با در نظر گرفتن سیستم هیبریدی، بازه هزینه تولید برق و هیدروژن به ازای هر کیلو وات به ترتیب ۰،۱۱۰-۰،۸۹۸ دلار و ۰،۱۲۳-۱،۰۵۳ دلار شد. آنها نتیجه گرفتند که سیستم هیبریدی توانایی فنی، اقتصادی و زیست محیطی را در چهارچوب یک اقتصاد مبتنی بر هیدروژن ارائه می دهد [14]. سوفیا و همکارانش تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی یک سیستم توان-حرارتی را بر اساس ترکیب فناوری های الکترولیزر، پنل خورشیدی، پیل سوختی و بویلر انجام دادند. آنها گزارش کردند که با وجود بالا بودن هزینه های خالص سیستم پیشنهادی و هزینه عملیات، فناوری هیدروژن و پیل سوختی برای کاربرد های انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی امکان پذیر است. همچنین به لطف استفاده از فناوری های تجدیدپذیر مذکور، این سیستم در سطح زیست محیطی جالب توجه است چون انتشار تقریباً صفر را به همراه دارد [15]. شکل (۳) مدل پیشنهادی برای سیستم انرژی ترکیبی را نشان می دهد. در این راستا، هدف از این مطالعه، تحلیل فنی و اقتصادی برای سیستم ترکیبی است که شامل مبدل انرژی موج می باشد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه در فاصله بسیار کمی از ساحل قرار دارد استفاده از مبدل امواج OWC علاوه بر اینکه از هزینه های ایجاد یک شبکه ی برق مستقل و طولانی می کاهد بلکه در کنار ترکیب با سایر منابع تجدید پذیر پاسخ گوی مناسبی برای تامین توان واحد پالایشگاهی مورد مطالعه خواهد بود.



شکل ۱. تامین کل انرژی اولیه جهان [1].



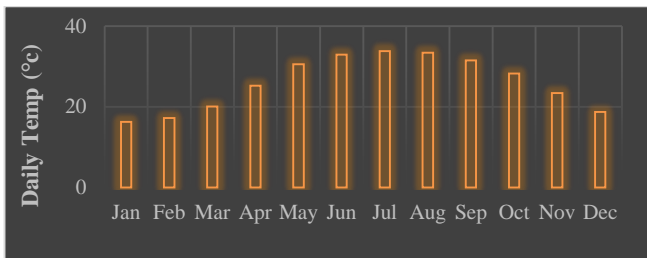
شکل ۲. الکتریسته ی تولیدی به کمک منابع مختلف انرژی در جهان [1]

## ۲- روش ها و مدل سازی

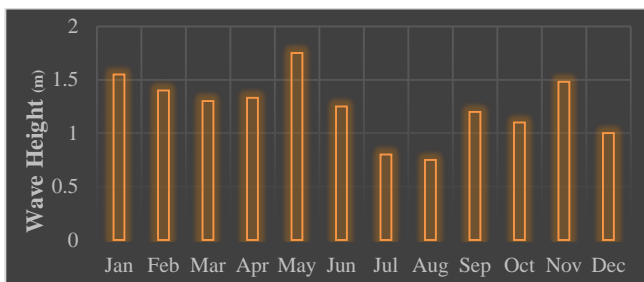
### ۲-۱- مدل سازی سیستم

طول عمر پروژه ۲۵ سال است. نرخ تورم و نرخ تنزیل سالانه به ترتیب ۱۰ و ۱۵ درصد در نظر گرفته شده اند. همان طور که در شکل (۳) نشان داده شده است اجزای سیستم عبارت اند از باتری، مبدل انرژی امواج، ماژول فتوولتائیک، توربین بادی، الکترولیزر، تانک هیدروژن و مبدل جریان الکتریکی. دو سناریو با الکترولیزر و ریفرمر بررسی می شود. در نهایت لیستی از ترکیب بهینه به عنوان نتیجه فراهم می شود. در این پروژه از نرم افزار برای بررسی تامین انرژی و تحلیل فنی، اقتصادی و زیست محیطی سیستم خارج از شبکه سراسری برق شامل PV، WT، OWC، EL، HT استفاده می شود و یک مقایسه بین تولید هیدروژن به کمک ریفرمر و الکترولیزر انجام می شود.

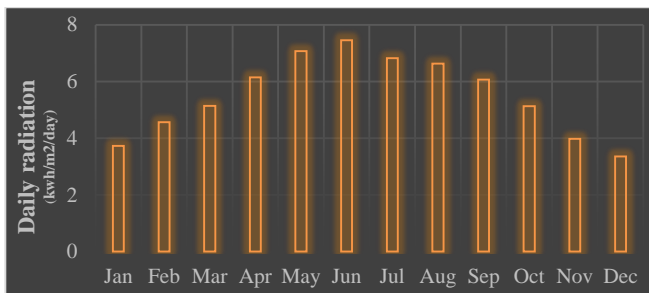
باد است. شکل (۷) نشان می دهد که بالاترین میانگین سرعت باد در ماه می ۶ متر بر ثانیه است.



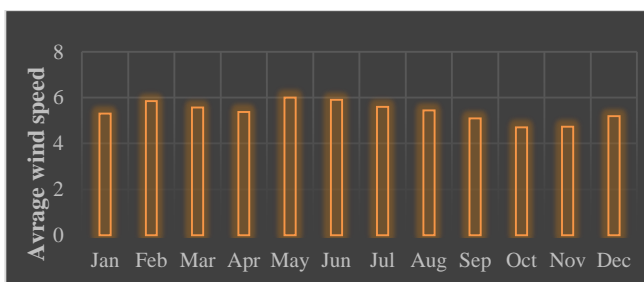
شکل ۴. دمای متوسط ماهانه محل پالایشگاه گاز.



شکل ۵. ارتفاع موج متوسط ماهانه خلیج فارس.



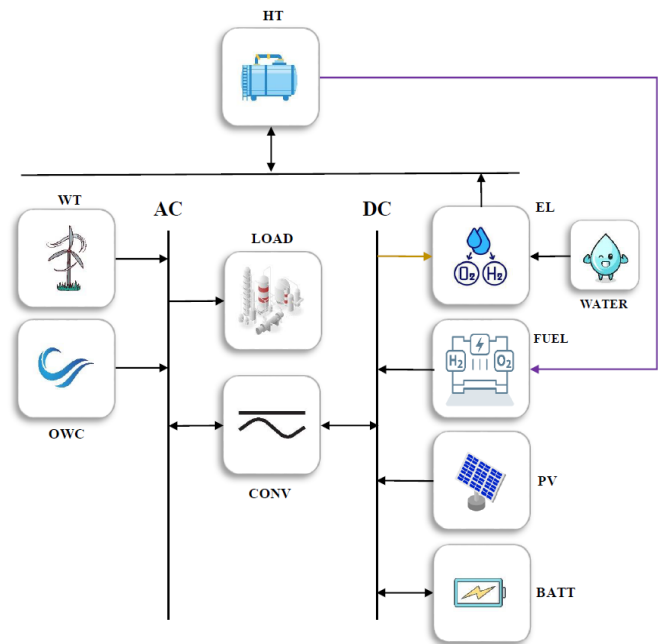
شکل ۶. تابش افقی جهانی (GHI) در محل مورد مطالعه.



شکل ۷. سرعت متوسط ماهانه باد در محل پالایشگاه گاز.

### ۲-۳- تکنولوژی مبدل انرژی امواج

ستون نوسانگرا ب (OWC) یک نوع مکانیزم مبدل انرژی موج است که از نوسان آب دریا در داخل یک محفظه توخالی انرژی تولید می کند. ستون آب نوسانی یک منبع انرژی تجدیدپذیر و سازه ای ثابت در ساحل می باشد (شکل ۸). در این مبدل امواج دریا باعث می شود ستون آب مانند یک پیستون عمل کند. با حرکت بالا و پایین



شکل ۳. مدل هومر از سیستم هیبریدی.

### ۲-۲- منطقه مورد مطالعه و منابع انرژی

واحد پالایشگاهی در منطقه پارس جنوبی، شهرستان کنگان، استان بوشهر با عرض جغرافیایی ۲۷,۴۱ و طول جغرافیایی ۵۲,۱۴ واقع است. ارتفاع این پالایشگاه ۵ متر بالاتر از سطح دریا است. توان مصرفی فعلی پالایشگاه توسط اتصال به شبکه سراسری برق کشور تامین می شود. بر اساس جدول (۱)، متوسط بار الکتریکی روزانه برای واحد احیای مونواتیلن گلاپکول تقریباً ۲۴۰۶۰ کیلو وات ساعت خواهد بود. داده های آب و هوایی از جمله GHI، میانگین سرعت باد ماهانه، و میانگین دمای ماهانه منطقه ی مورد نظر، از مازول مرکز داده های آب و هوایی ناسا در نرم افزار هومر استخراج شده است. شکل (۴) متوسط دمای ماهانه منطقه را نشان می دهد. با توجه به این داده ها، کمترین و بیشترین میانگین دما در ماه های ژانویه (۱۶,۳) درجه سانتی گراد) و جولای (۳۳,۸۵) درجه سانتی گراد) می باشد. شکل (۵) متوسط ارتفاع موج ماهانه منطقه پالایشگاه (خلیج فارس) را نشان می دهد. با توجه به داده های استخراج شده از سایت پژوهشگاه اقیانوس شناسی و علوم جوی [16]، کمترین و بیشترین میانگین ارتفاع موج که در یک بازه ۳۱ ساله (۲۰۱۱-۱۹۸۰) برابر ۰,۷۵ متر و ۱,۷۵ متر می باشد. شکل (۶) تغییرات GHI و شاخص وضوح منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد. متوسط سالانه و حداکثر GHI به ترتیب ۵,۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز و ۷,۴۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز برآورد می شود. سرعت متوسط باد منطقه ۵ متر بر ثانیه است که نشان دهنده پتانسیل مناسب انرژی

در اینجا  $y(x, t)$  جابه جایی عمودی ذرات آب می باشد. ارتفاع موج  $H$  دو برابر دامنه موج  $a$  می باشد. با تعریف عدد موج به صورت  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  و سرعت موج  $c = \frac{\omega}{k}$ ، که در آن  $\omega$  فرکانس زاویه ای نام دارد، معادله ی (۱) به صورت معادله ی (۲) نوشته می شود:

$$y(x, t) = \frac{H}{2} \sin(Kx - \omega t) \quad (2)$$

حجم هوا در هر زمان  $V(t)$  برابر است با کل حجم محفظه  $V_C$  منهای حجم اشغال شده توسط آب  $V_W(t)$ ، پس خواهیم داشت:

$$V(t) = V_C - \iint y(x, t) dA \quad (3)$$

انتگرال چندگانه روی سطح مقطع کانال محاسبه می شود. پروفایل سطح آب  $y(x, t)$  سینوسی تلقی می شود. فرض بر این بوده که سطح مقطع یک مستطیل به طول  $w$  و عمود بر جهت انتشار موج و عرض  $l$  موازی با جهت انتشار موج. بنابراین انتگرال چندگانه در معادله (۳) به یک انتگرال ساده تبدیل شده و می توان حجم هوا را به راحتی حساب کرد [1].

$$V(t) = V_C + \frac{wH}{2k} [\cos(\frac{kl}{2} - \omega t) - \cos(\frac{kl}{2} + \omega t)] \quad (4)$$

مقادیر موجود در براکت با استفاده از قانون تفاضل کسینوس ها ساده شده و معادله ی ساده تری برای حجم هوا حاصل می شود.

$$\cos(p + q) - \cos(p - q) = 2 \sin p \sin q \quad (5)$$

می توان موازنه ی جرم در حجم کنترلی با جرم  $m_{cv}$  را برای محفظه هوا به اینصورت نوشت:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (6)$$

بنابراین با فرض جریان مایع تراکم ناپذیر، دبی تغییر حجم هوا  $\dot{V}_a(t)$  همان دبی حجم هوای عبوری از توربین است.

$$\dot{V}_a(t) = \frac{wH\omega}{k} \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t = wHc \sin \frac{kl}{2} \cos \omega t \quad (7)$$

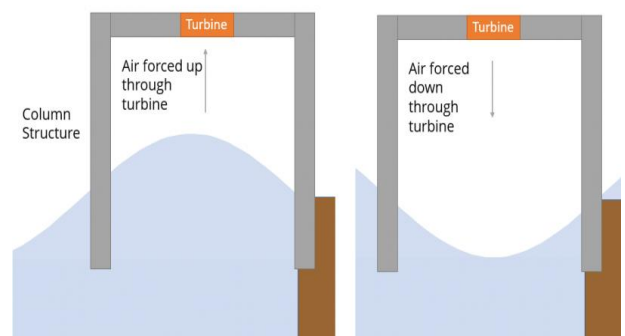
توربین انرژی جنبشی هوای جابه جا شده با سرعت  $v$  و دبی جرمی  $\dot{m}$  را استخراج می کند. ماکزیمم این میزان انرژی، طبق قانون Betz's برابر  $\frac{16}{27}$  انرژی جنبشی کل است.

$$\dot{E}_t = \frac{16}{27} (\frac{1}{2} \dot{m}_a v^2) = \frac{8\rho}{27Ac^2} \dot{V}_a(t)^3 \quad (8)$$

امواج (حرکت نوسانی) هوای به دام افتاده در بالای ستون آب از محفظه خارج می شود. این حرکت پیوسته، یک جریان از هوا با سرعت بالا را به وجود می آورد که باعث به حرکت درآمدن توربین در هر بار پر و خالی شدن کانال از هوا می شود و بدین ترتیب با چرخش توربین جریان الکتریسیته تولید می شود. در هر بار بالا یا پایین آمدن سطح آب در داخل محفظه ی مبدل، توربین دوجته به چرخش درآمده و تولید توان الکتریکی انجام می پذیرد. توربین مورد استفاده می بایست از نوع Wells Turbine باشد. دلیل این انتخاب به این جهت است که توربین مذکور یک توربین دو طرفه است که از پره های متقارن استفاده می کند به گونه ای که به رغم تغییر جهت سیال، فقط به یک سمت چرخیده و تولید جریان الکتریسته مد نظر را پشتیبانی می کند. همچنین در Wells Turbine به غیر از روتور اصلی توربین، قطعات حرکت نمی کنند که این امر سبب می شود نگهداری آن آسان تر و مقرون به صرفه تر باشد [17].

### ۲-۳-۱- استخراج معادله ی توان مبدل انرژی امواج

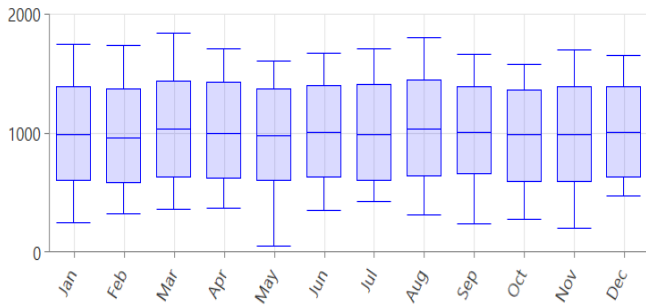
یک مدل ساده برای استخراج انرژی از حرکت بالا به پایین امواج، استفاده از مدل سیلندر و پیستون است که در شکل (۸) نشان داده شده است. پیستون شناور با حرکت موج به صورت عمودی حرکت می کند. مدل پیستونی که در اینجا در نظر گرفته شده، مدل پیستون سینوسی است که شکل پذیر است. برای دستیابی به حداکثر توان موجود از هرگونه تلفات صرف نظر می شود. برای تجزیه و تحلیل بیشتر فرض عدم تراکم پذیری هوا در محفظه برقرار است. به این معنی که چگالی هوا یکنواخت بوده و برابر چگالی فضای بیرون کانال است.



شکل ۸. عملکرد یک مبدل OWC یک طرفه.

مسیر استخراج معادله توان خروجی مبدل از معادله ی (۱) تا (۱۳) می باشد [18]. معادله عمومی انتقال موج با تعاریف پارامترهای دامنه  $a$ ، طول موج  $\lambda$  و سرعت موج  $c$  به صورت زیر است:

$$y(x, t) = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \quad (1)$$



شکل 9. پروفایل مصرف برق ماهانه واحد پالایشگاهی

مشخصات ماهیانه مصرف برق در جدول (1) نشان داده شده است. با توجه به این که پالایشگاه تمام وقت در مدار تولید قرار دارد بیشینه یا کمینه مصرف برق برای آن مطرح نمی باشد و تنها در بازه ی زمانی طلوع و غروب خورشید به علت عدم نیاز به روشنایی در طول روز مقدار کمی از توان مصرفی واحد کاسته می شود که در مقایسه با سایر عوامل مصرفی، مقدار ناچیزی محسوب می شود. با توجه به توان مصرفی هر یک از تجهیزات به کار رفته در واحد مذکور و مدت زمانی که تجهیز در سرویس است، توان مورد نیاز برای هر تجهیز به صورت زیر محاسبه می شود.

$$P_D = t \times N_e \times L_N \quad (14)$$

جدول 1. محاسبات بار الکتریکی برای واحد پالایشگاهی.

شماره تجهیز	مشخصات	تعداد	استفاده در روز (hr)	بار کل (kw.h)
۱	100w	25	12	30
۲	22kw	6	24	3168
۳	55kw	2	24	2640
۴	5.5kw	1	24	132
۵	5.5kw	1	24	132
۶	500kw	1	24	12000
۷	15kw	1	24	360
۸	11kw	1	24	264
۹	110kw	2	24	5280
۱۰	1.35kw	1	24	32.4
۱۱	0.55kw	2	24	13.2
۱۲	0.37kw	2	24	8.88
				<b>24060</b>

## ۲-۵- اجزاء سیستم انرژی

در این قسمت تجهیزات انتخابی برای استفاده در سیستم انرژی و همچنین مهم ترین فرمول محاسباتی نرم افزار HOMER برای هر یک از این دستگاه ها معرفی می شود. دستگاه ها بر اساس در

$$\dot{E}_t = \frac{8\rho}{27A_C^2} w^3 H^3 c^3 \sin^3\left(\frac{kl}{2}\right) \cos^3(wt) \quad (9)$$

در اینجا  $\rho$  دانسیته ی هوا و  $A_C$  سطح مقطع توربین است. کل انرژی تناوبی تحویل داده شده در طول یک پرپود از موج رخ داده شده، به صورت زیر بیان می شود.

$$E_t = 4 \int_0^T \dot{E}_t dt \quad (10)$$

در اینجا انتگرال به جای یک دوره تناوب در یک چهارم دوره تناوب محاسبه می شود و دلیل این امر علامت منفی در حجم به دلیل شکل سینوسی موج است که در آن سطح آب کمتر از حد متوسط سطح است. از آنجا که  $\omega T = 2\pi$  است، انرژی تناوب تحویل شده و میانگین توان مبدل به کمک روابط زیر محاسبه می شود [1].

$$E_t = \frac{32}{81\pi A_C^2} \rho T w^3 H^3 c^3 \sin^3\left(\frac{kl}{2}\right) \quad (11)$$

$$P_t = \frac{32}{81\pi A_C^2 T^2} \rho w^3 H^3 \lambda^3 \sin^3\left(\frac{\pi l}{\lambda}\right) \quad (12)$$

اگر عمق دریا از نظر ریاضی بی نهایت فرض شود، توان موج سینوسی کامل در حال حرکت قابل محاسبه است. در اهداف کاربردی فرض بر این است که عمق از نصف طول موج بزرگتر است. تحت شرایطی که ذکر شد، میانگین توان منتقل شده برای عرض پیش روی موج در جهت انتشار آن به ازای خروج یا ورود هوا به کانال به صورت زیر بیان می شود.

$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T w \quad (13)$$

## ۲-۴- بار الکتریکی

واحد پالایشگاهی مورد مطالعه در حال حاضر به شبکه برق سراسری متصل است. با این وجود هدف از این مطالعه، ارائه HRES در جهت استفاده از پتانسیل مناسب منابع تجدید پذیر منطقه و همچنین کاهش آلودگی زیست محیطی، با تاکید بر استفاده از پتانسیل انرژی امواج و تولید هیدروژن به عنوان جایگزینی برای شبکه می باشد. پروفایل برق مصرفی ماهیانه واحد پالایشگاهی مطابق شکل (۹) قابل مشاهده است.

نیز ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. تعداد ماژول های فتولتائیک به بار و شرایط خورشیدی بستگی دارد. توان خروجی پنل فتولتائیک نیز به شرایط ساختاری و محیطی مانند تابش خورشیدی، سرعت باد و دمای محیط بستگی دارد. در فرآیند شبیه سازی به کمک نرم افزار، توان خروجی PV توسط معادله (۱۵) محاسبه می شود [19].

$$P_{PV} = Y_{PV} \times f_{PV} \times \frac{I_r}{1000} \times [1 + \alpha(T_C - T_S)] \quad (15)$$

که  $Y_{PV}$  توان اسمی پنل های PV است.  $f_{PV}$  یک عامل برای اعمال اثر تلفات ناشی از فرسودگی بر روی پنل و اثر دمای محیط است که دائما در حال تغییر می باشد.  $I_T$  تابش خورشیدی جهانی بر روی پنل های PV بوده که از شکل (۹) قابل استخراج است.  $\alpha$  ضریب دما،  $T_C$  دمای سلول و  $T_S$  دمای سلول تحت STC است. دمای سلول از معادله (۱۶) محاسبه می شود.

$$T_C = T_a(t) + \left(\frac{NOCT-20}{0.8}\right) \times \frac{I_r}{I_S} \quad (16)$$

که در آن  $T_a$  دمای محیط و NOCT دمای اسمی عملیاتی سلول بوده و واحد آن درجه ی سانتی گراد است.

### ۲-۵-۳- توربین بادی

ارتفاع مرکز WT انتخابی ۴۸ متر و ظرفیت آن ۲۵۰ کیلووات است. هزینه های سرمایه گذاری، جایگزینی و تعمیر و نگهداری توربین بادی به ترتیب ۳۰۰۰۰۰ دلار / واحد، ۲۵۰۰۰۰ دلار / واحد و ۱۰۰ دلار / سال در نظر گرفته شده است. طول عمر توربین نیز ۲۰ سال در نظر گرفته می شود [20]. توان خروجی توربین بادی رابطه مستقیمی با سرعت باد دارد. با توجه به ظرفیت بار نسبتاً زیاد برای جریان الکتریسیته، یک توربین بادی با ظرفیت بالا انتخاب شده است. معادله (۱۷) معادله توان خروجی توربین بادی را نشان می دهد.

$$P_{WT} = \begin{cases} \beta \times P_{Rated}, & V_{Cut\ in} < V \leq V_R \\ P_{Rated}, & V_R < V \leq V_{Cut\ off} \\ 0, & V > V_{Cut\ off} \text{ or } V < V_{Cut\ in} \end{cases} \quad (17)$$

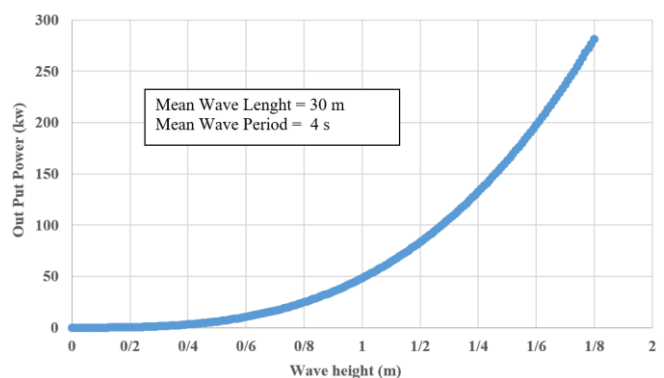
که در آن  $P_{Rated}$ ، توان نامی توربین بادی،  $V_{Cut\ in}$  سرعت باد مورد نیاز برای راه اندازی توربین و  $V_{Cut\ off}$  سرعتی است که توربین در آن سرعت متوقف می شود.  $V_R$  سرعت باد مورد نیاز برای تولید توان نامی توسط توربین،  $V$  سرعت باد و  $\beta$  با معادله ی (۱۸) محاسبه می شود.

$$\beta = \left(\frac{V^3 - V_{Cut\ in}^3}{V_{Rated}^3 - V_{Cut\ in}^3}\right) \quad (18)$$

دسترس بودن در مناطق مورد نظر انتخاب می شوند. لازم به ذکر است که قیمت ها با توجه به شرایط بازار محلی منطقه مورد مطالعه تغییر می کنند.

### ۲-۵-۱- مبدل انرژی امواج OWC

پس از انجام مدل سازی و بدست آوردن تابع مبدل مذکور، با قرار دادن اطلاعات مورد نیاز، توان تولیدی مبدل انرژی امواج به ازای ارتفاع موج های مختلف حاصل می شود. طبق ارتفاع امواج منطقه ای که واحد پالایشگاهی در آن قرار دارد مطابق شکل (5) و با در نظر گرفتن متوسط طول موج ۳۰ متر و دوره تناوب متوسط ۴ ثانیه نمودار توان به صورت شکل زیر خواهد شد، که این نمودار به عنوان مرجع انرژی جنبشی آب در شبیه سازی وارد می شود. فرضیات بر این است که طول مبدل که عمود بر جهت انتشار موج است برابر  $w = 8m$  و عرض مبدل که موازی با جهت انتشار موج است برابر  $l = 10m$  و سطح مقطع روتور  $A_C = 2m^2$  در نظر گرفته شده است.  $\lambda$  متوسط برابر ۳۰ متر و دانسیته ی هوا نیز برابر  $\rho = 1.225 \frac{kg}{m^3}$  جایگذاری می شود. ظرفیت مبدل موج با توربین دو جهته برابر ۲۸۰ کیلووات است. هزینه سرمایه گذاری، جایگزینی، و تعمیرات-نگهداری بترتیب ۵۰۰ هزار دلار/واحد، ۳۳۵ هزار دلار/واحد و ۰.۵٪ هزینه ی سرمایه گذاری در نظر گرفته شده است. با توجه به تابع توان مبدل انرژی موج (معادله ی ۱۳) و جایگذاری فرضیات و پارامتر های مورد نیاز در این معادله، نمودار توان مبدل به صورت شکل (۱۰) حاصل می شود. از آنجا که این مبدل با توربین دو جهته طراحی شده است، ماکزیمم توان مبدل با توجه به ارتفاع امواج در حدود ۲۸۰ کیلووات می باشد.



شکل ۱۰. نمودار توان مبدل OWC بر مبنای ارتفاع موج.

### ۲-۵-۲- پنل فتولتائیک (PV)

ماژول فتولتائیک یکی از تکنولوژی های استاندارد در زمینه طراحی HRES است. هزینه سرمایه گذاری، جایگزینی و تعمیر و نگهداری ماژول فتولتائیک به ترتیب ۱۴۰۰ دلار بر کیلووات، ۱۱۰۰ دلار بر کیلووات و ۱۲ دلار بر سال در نظر گرفته شده است. طول عمر ماژول



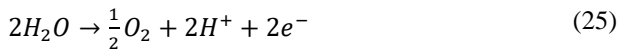
## ۲-۵-۴- باتری

خروجی مبدل را می توان با معادله (۲۳) محاسبه کرد که در آن  $P_{in}$  توان ورودی را نشان می دهد [22]:

$$P_{Out} = P_{in} \times \eta_{in} \quad (23)$$

## ۲-۵-۶- الکترولیزر و تانک هیدروژن

الکترولیزر به کمک الکتریسیته، از آب تولید هیدروژن می کند. از لحاظ تئوری بازده الکترولیزر PEM بر اساس ارزش حرارتی می تواند به ۹۵ درصد برسد اما در عمل ۱۰ درصد کمتر است. بعد از انجام واکنش، هیدروژن به صورت معادله (۲۴) در سمت کاتد و اکسیژن به صورت معادله ی (۲۵) در سمت آند ایجاد می شود [23].



نرخ تولید هیدروژن توسط الکترولیزر با معادله ی (۲۶) محاسبه می شود [19].

$$\eta_f = 96 e^{\left(\frac{0.09}{I_{El}} - \frac{75.5}{I_{El}^2}\right)} \quad (27)$$

پارامتر مهم دیگر که انرژی الکتریکی ورودی مورد نیاز الکترولیزر است، توسط معادله ی (۲۸) محاسبه می شود. که در آن  $Q_{N,E}$  نرخ جرمی اسمی هیدروژن،  $Q$  نرخ جرمی هیدروژن،  $B_E$  و  $A_E$  ضریب انحنای مصرف است [24].

$$Consumption_E = B_E \times Q_{N,E} + A_E \times Q \quad (28)$$

بدنه مخزن هیدروژن باید در برابر فشار داخلی بالا مقاومت کند. فشار هیدروژن در داخل تانک به کمک معادله ی زیر بدست می آید [19].

$$P_D = t \times N_e \times L_N P_{tank} = n_g \frac{RT}{V_{tank}} \quad (29)$$

که در این معادله  $n_g$  تعداد مول های گاز در مخزن و  $V_{tank}$  حجم تانک ها می باشد.

## ۲-۵-۷- ریفورمر گاز طبیعی

گاز طبیعی که عمدتا شامل متان است می تواند با کمک فرآیند ریفورمینگ برای تولید هیدروژن استفاده شود. فرآیند ریفورمینگ به دو روش مختلف انجام می شود. واکنش شیمیایی این روش ها در معادلات زیر نشان داده شده است [25].  
واکنش متان با آب:

با توجه به طبیعت متغیر انرژی های تجدیدپذیر در طول روزها و ماه های سال، واحد ذخیره سازی باتری برای این HRES در نظر گرفته شده است. افزودن یک واحد ذخیره سازی به HRES قابلیت اطمینان منبع تغذیه و ولتاژ ثابت مورد نیاز را تضمین می کند. ولتاژ و ظرفیت اسمی از جمله عواملی هستند که راندمان باتری را تحت تاثیر قرار می دهند. باتری انتخاب شده به جهت شبیه سازی در این پژوهش از مدل Generic100kwhLi-Ion است. بازدهی آن ۹۰ درصد در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که طول عمر آن ۱۵ سال است (۳۰۰۰۰۰ کیلووات ساعت در سال). هزینه های سرمایه گذاری، جایگزینی، تعمیر و نگهداری باتری به ترتیب برابر با ۲۰۰۰۰ دلار بر کیلووات، ۱۸۰۰۰ دلار بر کیلووات و ۳۰۰ دلار بر سال در نظر گرفته شده است. بازده باتری و ولتاژ را می توان از معادلات (19) و (20) محاسبه کرد. ظرفیت ذخیره باتری یک عامل مهم در بهینه سازی سیستم های تجدید پذیر به دست آمده از معادله (۲۱) است [21].

$$\eta_{batt} = 1 - \left(\frac{I_{nom} \times R_{int} \times I_{nom}}{V_{nom} \times I_{nom}}\right) \quad (19)$$

$$V_{batt} = E_0 - (R_{int} \times I_{batt}) \quad (20)$$

$$P_{max,b} = \frac{N_{batt} \times V_{batt} \times I_{max}}{1000} \quad (21)$$

که  $E_0$  نشان دهنده ولتاژ بدون بار،  $R_{int}$  مقاومت داخلی و  $I_{batt}$  جریان باتری است.  $V_{nom}$  ولتاژ اسمی و  $I_{nom}$  جریان اسمی آن است.  $N_{batt}$  تعداد باتری ها را نشان می دهد و  $I_{max}$  حداکثر جریان باتری است. ظرفیت باتری (کیلو وات ساعت) می تواند به صورت معادله (۲۲) محاسبه شود.

$$C_B = \frac{E_L \times AD}{DOD \times \eta_{int} \times \eta_{batt}} \quad (22)$$

$E_L$  تقاضای کل انرژی است. AD روزهای خود گردانی و DOD نشان دهنده عمق تخلیه الکتریکی است.  $\eta_{int}$  و  $\eta_{batt}$  راندمان اینورتر و بازده باتری هستند.

## ۲-۵-۵- مبدل جریان

تبدیل جریان مستقیم به متناوب برای تجهیزات واحد پالایشگاهی ضروری است. هزینه های سرمایه گذاری، جایگزینی مبدل ۲۵۰ دلار به ازای هر کیلووات برای هر کدام در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که طول عمر آن ۱۵ سال با بازدهی ۹۶ درصد است. توان



تبدیل می‌کند عبارتند از راندمان تبدیل انرژی بالاتر، آلاینده‌گی صفر،

ویژگی	CONV	PV	WT	BATT	OWC	HT	EL	REF	Fuel
طول عمر (سال)	۱۵	۲۰	۲۰	۱۵	۲۰	۲۰	۱۰	۲۰	۱۰
بازده (%)	۹۶	۱۵	۴۰	۹۰	۱۸	۹۵	۸۵	۶۸	۴۰
قدرت اسمی	1.15kw	250	4.2	100	280	1	1	1 kw	1
		w	kw	kwh	kw	kg	kw		kw
سرمایه (دلار)	250/kw	1400/	300000/	20000/	500000/	600/	1500/	3500/	2000/
		kw	unit	unit	unit	kg	kw	kw	kw
جایگزین (دلار)	250/kw	1100/	250000/	18000/	335000/	600/	1500/	3200	1860/
		kw	unit	unit	unit	kg	kw	/kw	kw
O&M (دلار)	-	12/	3000/	300/	25000/	10/	0.05/	200	0.05/
		kw	unit	\$	unit	year	hr	/year	hr
مرجع	[29]	[30]	[31]	[32]	[33]	[34]	[35]	[35]	[36]

عملکرد در دمای پایینتر، تعمیر و نگهداری ساده و ارزان، عملکرد بی‌صدا و انعطاف‌پذیری بالا. به طور کلی، پیل‌های سوختی پرهزینه هستند، اما آلودگی بسیار کمتری نسبت به واحدهای مبتنی بر سوخت فسیلی با ظرفیت مشابه ایجاد می‌کنند. جدول (۲) ویژگی‌های اقتصادی دستگاه‌های تولید برق در سیستم انرژی هیبریدی را نشان می‌دهد. این مقادیر بر اساس نزدیک‌ترین مقادیر به بازار محلی منطقه مورد مطالعه انتخاب شده‌اند.

جدول ۲. ویژگی‌های اقتصادی و فنی اجزای سیستم

## ۲-۶- پارامترهای اقتصادی

در این بخش، ابتدا مهمترین معادلات اقتصادی مورد استفاده در تحقیق معرفی و سپس فرضیات اقتصادی مورد استفاده برای سیستم انرژی ارائه می‌شود.

## ۲-۶-۱- معادلات اقتصادی

نرم‌افزار هومر براساس نیازهای جهان برای طراحی و شبیه‌سازی شبکه و سیستم‌های قدرت خارج از شبکه توسعه یافته است. این نرم‌افزار از داده‌های اقتصادی، داده‌های بار، داده‌های فنی و داده‌های محیطی به عنوان ورودی برای یافتن پیکربندی بهینه سیستم و تحلیل حساسیت استفاده می‌کند [26]. تابع هدف در بهینه‌سازی نرم‌افزار براساس حداقل NPC است. یک سیستم قدرت، به عنوان هزینه‌های ارزش فعلی سیستم در طول عمر سیستم، منهای ارزش فعلی خالص درآمد در طول عمر سیستم محسوب می‌شود. هزینه‌ها



واکنش متان با کربن دی‌اکسید یا ریفورمینگ خشک:



روش خشک مزایایی مانند دی‌اکسید کربن و مصرف آب کمتر و تولید آلودگی کمتر را به همراه دارد ولی نیاز به مصرف بالای انرژی به علاوه کاتالیست‌های صنعتی دارد. از آنجایی که فرآیند تولید هیدروژن نسبتاً گران است و به تجهیزات خاصی نیاز دارد، در صورتی که اندازه سیستم بیشتر از حداقل معینی باشد اجرای سلول پیل سوختی توصیه می‌شود [25].

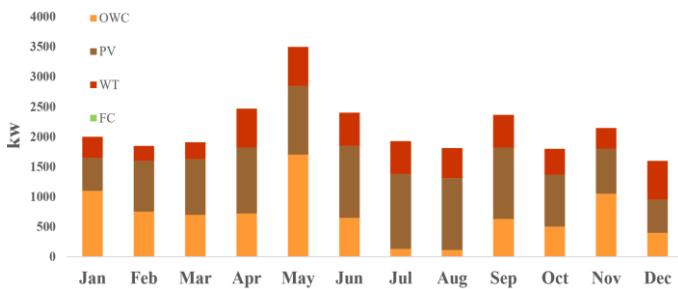
## ۲-۵-۸- پیل سوختی

واحد پیل سوختی می‌تواند به سیستم هیبریدی در رفع کمبودهای تولید برق و افزایش بازده کمک کند. ولتاژ خروجی از توده پیل سوختی توسط معادله (۳۲) محاسبه می‌شود.

$$V_{FC} = N_{cell} \cdot E_{cell} = E - V_{ac} - V_{ohm} - V_{con} \quad (32)$$

$V_{FC}$ ،  $E$ ،  $V_{act}$ ،  $V_{ohm}$  و  $V_{con}$  به ترتیب ولتاژ خروجی پیل سوختی، ولتاژ مدار باز، ولتاژ فعال سازی، ولتاژ اهمی و غلظت اضافه ولتاژ پیل سوختی را بیان می‌کند. ویژگی‌های پیل‌های سوختی PEM که آن‌ها را به یک کاندید واجد شرایط برای استفاده در سیستم‌های هیبریدی

در طول روز تامین می شود و باتری هایی که در طول روز شارژ می شوند، نیاز برق را در طول شب برآورده می کنند. توربین های بادی و مبدل انرژی امواج نیز با توجه شرایط جوی حاکم بر منطقه، در طول شبانه روز تامین کننده ی بخشی از نیاز الکتریکی هستند. در سناریو دوم، از توربین های بادی استفاده نمی شود و در عوض ظرفیت PV به ۱۰۳۷۴ کیلووات افزایش می یابد. اگرچه تولید برق توسط پانل های PV و ذخیره ی باتری ها انجام می شود، ولی حذف توربین های بادی افزایش اندک NPC و COE را به دنبال دارد. همچنان استفاده از مبدل امواج در این سناریو پیشنهاد شده است. سناریو سوم از ترکیب توربین بادی، PV و تعداد باتری بیشتر از حالت قبل استفاده می کند. این افزایش تعداد واحدهای باتری به همراه هزینه واحد پیل سوختی باعث افزایش NPC و COE می شود. در این سناریو سلول سوختی تنها به عنوان یک جزء پشتیبان استفاده می شود. سناریو چهارم مطلقاً هیبرید PV و باتری است که به عنوان ذخیره سازی مورد استفاده قرار می گیرد. تولید الکتریسیته ی ماهانه هر جز در شکل (۱۱) برای سناریو ۱ (بهینه) نشان داده شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، با توجه به هزینه بالای پیل سوختی، این تکنولوژی تنها مسئول بخش کوچکی از تولید برق است.



شکل ۱۱. میانگین تولید توان ماهانه برای سناریو بهینه ی یک.

لازم به ذکر است که برای انتخاب یک پیکربندی بهینه از جدول (3) عوامل دیگری غیر از NPC و COE باید در نظر گرفته شوند. از آنجایی که سناریو های ۱ و ۲ تنها تفاوت کمی در COE و NPC های خود دارند، در انتخاب بین این سیستم ها باید اساس دشواری نصب و تعمیر توربین های بادی در منطقه در نظر گرفته شود.

جدول ۳. سناریوهای مختلف با نتایج بهینه سازی برای سیستم مستقل با استفاده از الکترولایزر.

Scenario				Result
NO.4	NO.3	NO.2	NO.1	
0.299	0.284	0.242	0.205	COE(\$)
38.7M	36.7M	31.3M	26.5M	NPC(\$)
2427	1892	2222	2263	CONV(kw)

شامل جایگزینی، سرمایه و O&M هستند. طی شبیه سازی میزان NPC با توجه معادله ی (۳۳) محاسبه می شود [20].

$$C_{NPC} = \frac{C_{AT}}{CRF(i_r, N_{Proj})} \quad (33)$$

که در آن CNPC کل NPC (دلار) و  $C_{AT}$  کل هزینه سالانه (دلار / سال) است. CRF ضریب بازایی سرمایه معادله (۳۴)، نرخ تنزیل واقعی  $i_r$  و  $N_{proj}$  طول عمر پروژه است. از معادله (۳۵) برای محاسبه نرخ تنزیل واقعی [27] سالانه استفاده می شود.

$$CRF(i_r, N_{Proj}) = \frac{i_r(1+i_r)^{N_{proj}}}{(1+i_r)^{N_{proj}} - 1} \quad (34)$$

$$i_r = \frac{i-f}{1+f} \quad (35)$$

که  $f$  نرخ تورم سالانه و  $i$  نرخ تنزیل اسمی (نرخ بهره) می باشد. COE شاخص اقتصادی دیگری است که نرم افزار به عنوان خروجی فراهم می کند. این مقدار با توجه به معادله (۳۶) محاسبه می شود [28] که در آن  $E_{ser}$  بار الکتریکی کل (کیلو وات / سال) است.

$$C_{COE} = \frac{C_{AT}}{E_{ser}} \quad (36)$$

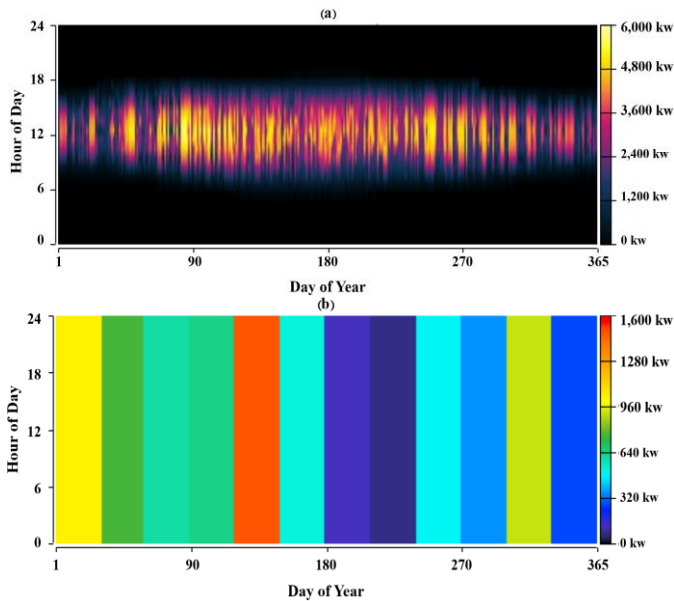
### ۳- نتایج و بحث

در این بخش، سیستم مجزا از شبکه از نظر فنی و اقتصادی تجزیه و تحلیل می شود. تاثیر فنی WEC بر روی سیستم هیبریدی مورد ارزیابی قرار میگیرد. سناریو های مختلف پیشنهادی تحت مدل سازی انجام شده، بررسی می شود. مقایسه ای بین استفاده از ریفورمر و الکترولایزر جهت تولید سوخت هیدروژن مورد نیاز سیستم هیبریدی انجام می گیرد. میزان آلودگی در سناریو های مختلف مورد بحث قرار می گیرد. در نهایت هزینه های انرژی بدست آمده در مطالعه حاضر با سایر سیستم ها مقایسه می شود.

#### ۳-۱- سیستم مستقل از شبکه شامل الکترولایزر

نتایج شبیه سازی برای این حالت در جدول (3) نشان داده شده است. از آنجایی که الکترولایزر و پیل سوختی هر دو جزء تکنولوژی های گران قیمت محسوب می شوند، اقتصادی ترین سیستم از این تکنولوژی های مذکور به صورت محدود برای تولید برق استفاده می شود. در سناریو شماره ۱ بیشتر انرژی الکتریکی توسط پنل های PV

محتوای انرژی حاصل از PV و مبدل انرژی امواج در طول سال در شکل (۱۲) نشان داده شده است. تولید الکتریسیته PV بیشتر از طلوع آفتاب تا غروب آفتاب اتفاق می افتد در حالی که باتری ها در طول روز توسط پنل های PV شارژ می شوند و از نیمه شب تا صبح تخلیه می شوند. بیشتر توان تولیدی توسط مبدل امواج نیز در ۵ ماه اول سال میلادی حاصل شده است که به اقتضای فصل پاییز و زمستان، امواج بلندتری نسبت به دیگر ایام سال دارد.



شکل ۱۲. محتوای پنل خورشیدی (a) و انرژی مبدل امواج (b) برای سناریو یک.

در جدول (۵) میزان سهم هر یک از تکنولوژی های تجدیدپذیر بیان شده است. پنل خورشیدی و مبدل امواج سهم بسزایی در تولید توان الکتریکی دارند. نشان می دهد ترکیب بهینه، گازهای آلوده کننده محیط زیست را منتشر نمی کند. شبیه سازی، تولید برق از برای حالت هیبرید تکنولوژی های مذکور را کربن خنثی در نظر می گیرد. مهم ترین عامل آلودگی زیست محیطی گاز کربن دی اکسید است. مقدار کل انتشار دی اکسید کربن از نیروگاه های برق مبتنی بر زغال سنگ ۱,۶۳ کیلوگرم به ازای هر کیلو وات ساعت است. با توجه به توان تولیدی ۲۴۰۰۰ کیلو وات ساعت در روز توسط ترکیب بهینه از انرژی های تجدید پذیر، این سیستم از انتشار روزانه ۴۰ تن کربن دی اکسید به محیط زیست جلوگیری می کند.

جدول ۵. مشارکت منابع انرژی تجدید پذیر در تامین توان مورد نیاز واحد پالایشگاهی.

Production	Kwh/year	%
PV	8384506	45.8

1.00	1.00	1.00	1.00	HT(kg)
1.00	1.00	1.00	1.00	EL(kw)
-	-	6	6	OWC(#)
301	301	268	229	BATT(#)
1.00	1.00	1.00	1.00	FC(kw)
-	3	-	11	WT(#)
16105	14427	10374	5928	PV(kw)

### ۳-۲- سیستم مستقل از شبکه شامل ریفرمر

نتایج این شبیه سازی در جدول (۴) نشان داده شده است. در سناریو شماره ۱ همانند سیستم با الکترولایزر، بیشتر انرژی الکتریکی توسط پنل های PV در طول روز تامین می شود و باتری هایی که در طول روز شارژ می شوند، نیاز برق را در طول شب برآورده می کنند. توربین های بادی و مبدل انرژی امواج نیز در طول شبانه روز تامین کننده ی بخشی از نیاز الکتریکی هستند. در واقع هیبرید اجزا به خوبی پاسخگو ی نیاز الکتریسیته است. در سناریو ۲ از توربین های بادی استفاده نمی شود که نتیجه آن افزایش ۱۸,۳۸ درصدی NPC نسبت به سناریو 1 است. در سناریو ۳ عدم استفاده از مبدل امواج و در عوض تامین بیشتر توان مورد نیاز به کمک PV، باتری ها و توربین بادی سبب افزایش COE و NPC شده است. در سناریو ۴ نیز تاثیر عدم استفاده از سیستم هیبرید به خوبی نمایان است. به گونه ای که با تامین بیشتر توان مورد نیاز توسط PV و باتری ها افزایش ۴۶ درصدی در NPC مشاهده می شود. در صورت استفاده از هیدروژن به عنوان منبع سوخت جهت سلول های سوختی مشابه با حالت الکترولایزر، بیشتر به عنوان پشتیبان مورد توجه قرار می گیرد. با این شرایط مقایسه بین جدول (۳) و جدول (۴) نشان می دهد که استفاده از الکترولایزر مقرون به صرفه تر از ریفرمر است.

جدول 4. سناریوهای مختلف با نتایج بهینه سازی برای سیستم مستقل با استفاده از ریفرمر.

Scenario				Result
NO.4	NO.3	NO.2	NO.1	
0.303	0.290	0.247	0.208	COE(\$)
39.3M	37.5M	31.9M	26.9M	NPC(\$)
2298	1856	2168	1735	CONV(kw)
1.00	1.00	1.00	1.00	HT(kg)
100	100	100	100	REF(kw)
-	-	6	6	OWC(#)
301	299	266	237	BATT(#)
10	12	12	15	FC(kw)
-	4	-	12	WT(#)
16041	14286	10382	5504	PV(kw)

مبدل انرژی امواج	WEC	دامنه ی موج	a
هزینه ی خالص فعلی	NPC	عدد موج	k
سیستم هیبرید	HRES	سرعت موج	c
توربین بادی	WT	فرکانس زاویه ای	$\omega$
موج			
پنل فتوولتائیک	PV	حجم هوا	V
تعمیرات و نگهداری	O&M	حجم کانال	$V_c$
مونو اتیلن گلیکول	MEG	جرم در حجم کنترل	$m_{cv}$
تابش افقی جهانی	GHI	دبی هوا	$\dot{V}_a$
نرم افزار بهینه ساز انرژی	HOMER	دانسیته هوا	$\rho$
دلار	\$	سطح مقطع توربین	$A_c$
مبدل جریان الکتریکی	CONV	دوره تناوب	T
باتری	BATT	انرژی جنبشی	$E_t$
لیتیوم-یون	Li-Ion	توان مبدل موج	$P_t$
هزینه برق	COE	توان موج	$P_w$
جریان برق متناوب	AC	عرض مبدل موج	l
جریان برق مستقیم	DC	طول مبدل موج	w
کیلو وات	kw	طول موج	$\lambda$
چند مولد	MG	الکترو لایزر	EL
تانک هیدروژن	HT	ریفورمر	RE

Fuel Cell	195	0.001
Wind Turbine	4305584	23.5
OWC	5633240	30.7
Total	18323526	100

#### ۴- جمع بندی

در این تحقیق یک سیستم ترکیبی متشکل از پنل های فتوولتائیک (PV)، توربین های بادی (WT)، مبدل انرژی امواج (WEC) و سلول سوختی برای تامین برق واحد پالایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. بهره برداری از این سیستم خارج از شبکه انتشار گازهای مضر و وابستگی به سوخت های فسیلی را کاهش می دهد به طوری که این ترکیب بهینه هیچ گونه انتشار گاز آلاینده به محیط ندارد و باعث کاهش میزان تولید آلاینده ها شده است. ترکیبات متفاوت برای بار الکتریکی درخواستی انجام شده و تاثیرات اقتصادی آن بررسی گردید. مشاهده شد که استفاده از مبدل انرژی امواج حدود ۳۰٫۷ درصد از توان مورد نیاز را تامین می کند که با توجه به اهداف مطالعه پاسخ گوی مناسبی برای تامین توان الکتریکی است. همچنین ضرورت استفاده از سلول سوختی با تامین هیدروژن مورد نیاز از دو روش الکترو لایزر و ریفورمر مورد تجزیه و تحلیل اقتصادی و فنی قرار گرفت. با توجه به هزینه های بالای تکنولوژی های تامین هیدروژن در مقایسه با میزان توان مورد نیاز و همچنین توانایی سایر تکنولوژی، استفاده از سلول سوختی در چهارچوب منبع پشتیبان قرار گرفت به گونه ای که بیشینه توان مورد نیاز توسط PV، مبدل انرژی امواج و توربین بادی تامین می شود. طی مقایسه انجام شده بین استفاده از سیستم الکترو لایزر و ریفورمر در کنار سایر منابع تجدید پذیر، سیستم شامل الکترو لایزر پیشنهاد مقرون به صرفه و بهینه تری است. بدین صورت هزینه خالص فعلی (NPC) برای ترکیب بهینه از منابع تجدید پذیر به ترتیب برابر ۰٫۲۰۵ دلار و ۲۶٫۵ میلیون دلار محاسبه شده است. نتایج مقایسه ترکیبات مختلف از انرژی های تجدید پذیر نشان می دهد که استفاده از هیبرید منابع انرژی تجدید پذیر در مقایسه با حالتی که فقط از انرژی خورشیدی شود، باعث کاهش هزینه ها می شود. سیستم بهینه به کمک ۱۱ توربین بادی، PV (۵۹۲۸ کیلو وات)، ۲۲۹ باتری و ۶ مبدل انرژی امواج، توان مورد نیاز واحد پالایشگاهی را تامین می کند. ارزیابی زیست محیطی ترکیب بهینه هم نشان داد که این سیستم علاوه بر این که انتشار گاز های آلوده کننده ندارد بلکه باعث کاهش آلودگی ناشی از تامین برق توسط نیروگاه های با سوخت فسیلی می شود.

#### کلید واژگان

علامت	توضیحات	علامت	توضیحات
H	ارتفاع موج	OWC	مبدل موج ستون نوسانگر

#### ۵- مراجع

- [1] G. E. Halkos and E. C. Gkampoura, "Reviewing usage, potentials, and limitations of renewable energy sources," *Energies*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/en13112906.
- [2] D. Khojasteh, D. Khojasteh, R. Kamali, A. Beyene, and G. Iglesias, "Assessment of renewable energy resources in Iran; with a focus on wave and tidal energy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. December 2016, pp. 2992–3005, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.110.
- [3] F. Zabihian and A. S. Fung, "Review of marine renewable energies: Case study of Iran," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 5, pp. 2461–2474, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.02.006.
- [4] S. P. Zalous, R. Shafaghat, R. Alamian, M. S. Shadloo, and M. Khosravi, "Feasibility study of wave energy harvesting along the southern coast and islands of Iran," *Renew. Energy*, vol. 135, pp. 502–514, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.12.027.
- [5] T. Wilberforce, Z. El Hassan, A. Durrant, J. Thompson, B. Soudan, and A. G. Olabi, "Overview of ocean power technology," *Energy*, vol. 175, pp. 165–181, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.068.

- various hydrogen production,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 55, pp. 30113–30128, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.040.
- C. H. S. Moura, J. L. Silveira, and W. de Q. Lamas, “Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: A technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 56, pp. 31585–31598, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.198.
- S. Peláez-Peláez, A. Colmenar-Santos, C. Pérez-Molina, A. E. Rosales, and E. Rosales-Asensio, “Techno-economic analysis of a heat and power combination system based on hybrid photovoltaic-fuel cell systems using hydrogen as an energy vector,” *Energy*, vol. 224, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120110.
- Http://www.inio.ac.ir/, “No Title”.
- J. Sarkar and S. Bhattacharyya, “Application of graphene and graphene-based materials in clean energy-related devices Minghui,” *Arch. Thermodyn.*, vol. 33, no. 4, pp. 23–40, 2012, doi: 10.1002/er.
- M. Sameti and A. Kasaeian, “Developing a formula for optimum power of an inverted piston-in-cylinder wave engine,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 471–476, 2014, doi: 10.1234/ijrer.v4i2.1258.
- D. N. Luta and A. K. Raji, “Optimal sizing of hybrid fuel cell-supercapacitor storage system for off-grid renewable applications,” *Energy*, vol. 166, pp. 530–540, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.10.070.
- D. N. Luta and A. K. Raji, “Decision-making between a grid extension and a rural renewable off-grid system with hydrogen generation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 20, pp. 9535–9548, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.04.032.
- M. S. Javed, A. Song, and T. Ma, “Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm,” *Energy*, vol. 176, pp. 704–717, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.03.131.
- A. Brka, Y. M. Al-Abdeli, and G. Kothapalli, “Predictive power management strategies for B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, 2009, doi: 10.1243/09576509JPE782.
- S. Michele, E. Renzi, C. Perez-Collazo, D. Greaves, and G. Iglesias, “Power extraction in regular and random waves from an OWC in hybrid wind-wave energy systems,” *Ocean Eng.*, vol. 191, no. October, p. 106519, 2019, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106519.
- H. Osawa and T. Miyazaki, “Wave-PV hybrid generation system carried in the offshore floating type wave power device ‘Mighty Whale,’” *Ocean ’04 - MTS/IEEE Techno-Ocean ’04 Bridg. across Ocean. - Conf. Proc.*, vol. 4, pp. 1860–1866, 2004, doi: 10.1109/oceans.2004.1406427.
- M. D. Abnavi, N. Mohammadshafie, M. A. Rosen, A. Dabbaghian, and F. Fazelpour, “Techno-economic feasibility analysis of stand-alone hybrid wind/photovoltaic/diesel/battery system for the electrification of remote rural areas: Case study Persian Gulf Coast-Iran,” *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 38, no. 5, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1002/ep.13172.
- S. Singh, M. Singh, and S. C. Kaushik, “Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 128, pp. 178–190, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.046.
- J. Ahmad *et al.*, “Techno economic analysis of a wind-photovoltaic-biomass hybrid renewable energy system for rural electrification: A case study of Kallar Kahar,” *Energy*, vol. 148, pp. 208–234, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.01.133.
- T. Egeland-Eriksen, A. Hajizadeh, and S. Sartori, “Hydrogen-based systems for integration of renewable energy in power systems: Achievements and perspectives,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 63, pp. 31963–31983, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.218.
- H. HassanzadehFard, F. Tooryan, E. R. Collins, S. Jin, and B. Ramezani, “Design and optimum energy management of a hybrid renewable energy system based on efficient

- S. Baek *et al.*, “Optimal renewable power generation systems for Busan metropolitan city in South Korea,” *Renew. Energy*, vol. 88, pp. 517–525, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.058. [31]
- M. H. Jahangir, A. Shahsavari, and M. A. Vaziri Rad, “Feasibility study of a zero emission PV/Wind turbine/Wave energy converter hybrid system for stand-alone power supply: A case study,” *J. Clean. Prod.*, vol. 262, p. 121250, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121250. [32]
- M. H. Jahangir, S. Fakouriyani, M. A. Vaziri Rad, and H. Dehghan, “Feasibility study of on/off grid large-scale PV/WT/WEC hybrid energy system in coastal cities: A case-based research,” *Renew. Energy*, vol. 162, pp. 2075–2095, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.09.131. [33]
- M. Gökçek and C. Kale, “Techno-economical evaluation of a hydrogen refuelling station powered by Wind-PV hybrid power system: A case study for İzmir-çeşme,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 23, pp. 10615–10625, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.082. [34]
- S. Rahimi, M. Meratizaman, S. Monadizadeh, and M. Amidpour, “Techno-economic analysis of wind turbine-PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system in stand-alone area,” *Energy*, vol. 67, pp. 381–396, 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.01.072. [35]
- N. M. Isa, H. S. Das, C. W. Tan, A. H. M. Yatim, and K. Y. Lau, “A techno-economic assessment of a combined heat and power photovoltaic/fuel cell/battery energy system in Malaysia hospital,” *Energy*, vol. 112, pp. 75–90, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.056. [36]
- stand-alone hydrogen systems: Operational impact,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 16, pp. 6685–6698, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.085. [23]
- H. Rezk *et al.*, “Fuel cell as an effective energy storage in reverse osmosis desalination plant powered by photovoltaic system,” *Energy*, vol. 175, pp. 423–433, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.167. [24]
- A. Singh, P. Baredar, and B. Gupta, “Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 145, pp. 398–414, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.014. [25]
- C. Y. Tung and N. A. Saidina Amin, “Analysis of Carbon Dioxide Reforming of Methane via Thermodynamic Equilibrium Approach,” *J. Teknol.*, vol. 43, no. 1, pp. 30–49, 2005, doi: 10.11113/jt.v43.785. [26]
- M. A. Baseer, A. Alqahtani, and S. Rehman, “Techno-economic design and evaluation of hybrid energy systems for residential communities: Case study of Jubail industrial city,” *J. Clean. Prod.*, vol. 237, p. 117806, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117806. [27]
- S. Mandal, B. K. Das, and N. Hoque, “Optimum sizing of a stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Bangladesh,” *J. Clean. Prod.*, vol. 200, pp. 12–27, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.257. [28]
- L. M. Halabi and S. Mekhilef, “Flexible hybrid renewable energy system design for a typical remote village located in tropical climate,” *J. Clean. Prod.*, vol. 177, pp. 908–924, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.248. [29]
- M. R. Akhtari and M. Baneshi, “Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co-supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 188, no. January, pp. 131–141, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.067. [30]
- L. Tribioli and R. Cozzolino, “Techno-economic analysis of a stand-alone microgrid for a commercial building in eight different climate zones,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 179, no. September 2018, pp. 58–71, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2018.10.061. [30]