

تامین هیدروژن و الکتریسیته مورد نیاز یک واحد تولید الفین با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر

فرید آل عزیز، نسیم طاهونی*، محمدحسن پنجه‌شاهی

دانشکده‌ی مهندسی شیمی، دانشکده‌گان فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده: در این پژوهش استفاده از انرژی‌های خورشیدی و بادی برای تولید هیدروژن سبز مورد بررسی قرار گرفت. هیدروژن تولیدی برای هیدروژناسیون دی‌اکسیدکربن و تولید الفین‌های سبک مصرف خواهد شد. دی‌اکسیدکربن مورد نیاز از یک کارخانه سیمان واقع در جنوب شرقی کشور تامین می‌شود. واحد تولید الفین مدنظر به 1420 kg/h هیدروژن برای هیدروژناسیون دی‌اکسیدکربن و 32 MW الکتریسیته برای گرمایش، سرمایش و پشتیبانی دستگاه‌های برقی نیاز دارد. برای تأمین این نیازها یک ابرساختار جامع شامل صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی، الکترولا یزرها، باتری‌های لیتیومی و وانادیومی، مبدل‌های الکتریکی، مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن، مولدهای برق و ... طراحی و توسط نرم‌افزار هومر شبیه‌سازی شد. نتایج بهینه‌سازی واحد نشان داد که بهترین ترکیب استفاده از انرژی‌های خورشیدی، بادی و مولدهای برق در تولید برق به ترتیب برابر $73/4$ ، 26 و $0/6$ درصد خواهد بود. همچنین برای ذخیره‌سازی این انرژی الکتریکی در سامانه‌ی بهینه، باتری‌های اکسایش-کاهش وانادیومی باصرفه‌تر از باتری‌های لیتیومی هستند. تحلیل اقتصادی مشخص نمود که هزینه‌ی خالص فعلی تولید هیدروژن و الکتریسیته‌ی مذکور $1/38$ میلیارد دلار و قیمت تراز شده‌ی آن‌ها $3/56$ دلار بر کیلوگرم و $0/12$ دلار بر کیلووات ساعت است. در پایان اثر تغییر قیمت دستگاه‌های مختلف سامانه بر اقتصاد و افق آینده‌ی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که قیمت پایه‌ی صفحات خورشیدی و الکترولا یزرها بیشترین تأثیر را بر متغیرهای اقتصادی دارند.

واژگان کلیدی: انرژی خورشیدی، انرژی بادی، تولید هیدروژن سبز، تولید الکتریسیته، شبیه‌سازی، نرم‌افزار هومر

KEYWORDS: Solar Energy, Wind Energy, Green Hydrogen Production, Electricity Generation, Simulation, HOMER Software

مقدمه

یافته است [۱]. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی، بادی، زمین‌گرایی و ... و همچنین ترکیب آن‌ها یکی از راه‌های جایگزین برای تولید انرژی بدون برجای‌گذاشتن آثار مخرب زیست‌محیطی است. اگر چه انرژی‌های تجدیدپذیر در زمینه‌های گوناگونی همچون تولید برق کشورها، خودروسازی و تأمین نیاز انرژی صنایع مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما همچنان بخش‌های

استفاده‌ی بی‌رویه از انرژی‌های تجدیدناپذیر در طول سالیان متمادی مشکلات بسیاری همچون آلودگی محیط زیست، آسیب به لایه‌ی اوزون و گرمای جهانی را به دنبال داشته است. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی^۱، میزان انتشار دی‌اکسیدکربن با وجود تأثیرات ناشی از شیوع ویروس کرونا بر اقتصادی جهانی همچنان سعودی بوده و به بیش از $36/8$ بیلیون تن در سال ۲۰۲۲ افزایش

* عهده‌دار مکاتبات

+E-mail: ntauni@ut.ac.ir

(۱) International Energy Agency (IEA)

آریان‌فر و همکاران [۵] با یک تحلیل فنی-اقتصادی-محیط زیستی عملکرد یک چرخه‌ی آلی رانکین را برای تولید همزمان توان و گرما در اردبیل ارزیابی کردند. در این پژوهش انرژی‌های خورشیدی، زمین‌گرایی و زیست‌توده به عنوان منابع تجدیدپذیر مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج بیانگر آن بود که سامانه با منبع انرژی زیست‌توده در صورت استفاده از ماده مناسب هزینه‌ی کمتری نسبت به دو گزینه‌ی دیگر دارد. همچنین تولید همزمان توان و گرما موجب صرفه‌جویی سالانه ۱۰۴۶۸ دلار در مصرف انرژی نسبت به حالت صرفاً تولید توان شد. موسوی و همکاران [۶] به بررسی تولید توان با به‌کارگیری چرخه‌ی آلی رانکین با محرک خورشیدی پرداختند. در این پژوهش گردآوری کننده‌های خورشیدی به عنوان دریافت‌کننده و مواد تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌ی انرژی به کار رفتند. نتایج نشان داد که بازده انرژی و اکسرژی این سامانه به ترتیب ۴۵/۲ و ۹/۷ درصد و میزان کار خروجی ۵۱/۵ کیلووات بود. همچنین مشخص شد با تغییر شار خورشیدی، عملکرد اقتصادی و بازده انرژی و اکسرژی بهبود می‌یابد.

چاوی^۵ و همکاران [۷] طرحی برای تولید متان مصنوعی با استفاده از دی‌اکسیدکربن خروجی از دودکش یک کارخانه‌ی سیمان ارائه کردند. در این پژوهش با استفاده از مازاد انرژی بادی و الکترولایزرهایی با غشاء تبادل پروتون^۶، هیدروژن تجدیدپذیر تولید شد. در نهایت بر اثر واکنش این دو ماده در مجموعه‌ای از راکتورهای کاتالیستی محصول موردنظر حاصل گردید. دو^۷ و کیم^۸ فرایندی را برای تولید الفین‌های سبک با استفاده از هیدروژناسیون مستقیم دی‌اکسیدکربن شبیه‌سازی کردند. آن‌ها یک نیروگاه زغال‌سنگ‌سوز را به‌عنوان منبع دی‌اکسیدکربن در نظر گرفتند. هدف استفاده از هیدروژن تجدیدپذیر بود اما مدل‌سازی دقیقی بر تولید آن با استفاده از انرژی‌های پاک صورت نگرفت.

لطفی و همکاران [۹] ۹ مرکز استان در ایران را به لحاظ پتانسیل انرژی خورشیدی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها از سه معیار اصلی شرایط آب و هوایی، محل نصب و ریسک و سه روش تصمیم‌گیری چندمعیاره‌ی تاپسیس فازی^۹، الکرته^{۱۰} و ترکیب خطی وزنی^{۱۱} برای مقایسه‌ی شهرها استفاده کردند. نتایج آشکار نمود که شهر زاهدان در هر سه روش نسبت به گزینه‌های دیگر برای احداث نیروگاه خورشیدی اولویت دارد. همچنین شهر تهران به عنوان

فراوانی وجود دارند که به شکل وسیعی از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند. یکی از این بخش‌ها صنایع پتروشیمیایی هستند که از مواد نفتی، گاز طبیعی، زغال‌سنگ و ... به صورت گسترده برای تولید محصولات مختلف استفاده می‌کنند. در این صنایع سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منبع انرژی برای تأمین سرویس‌های جانبی^۱ و همچنین به‌عنوان خوراک اصلی واحد برای تولید مواد پتروشیمیایی به‌کار گرفته می‌شوند [۲]. با توجه به این که در سال‌های آتی هیدروژن و الکتربسیته اصلی‌ترین انرژی‌های مورد استفاده در جهان خواهند بود، نیاز است تا صنایع مختلف استفاده از هیدروژن سبز را هم به‌عنوان منبع انرژی و هم خوراک فرایندی در دستور کار قرار دهند. در این راستا پژوهشگران مختلفی در سراسر دنیا به دنبال استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر برای پشتیبانی این واحدها و اصلاح تولید محصولاتی مانند متان، متانول، بنزین، گازوئیل و ... هستند. در این پژوهش‌ها از دی‌اکسیدکربن یا نیتروژن به‌عنوان مواد اولیه، از هیدروژن سبز برای انجام فرایند هیدروژناسیون و از برق تجدیدپذیر برای تأمین سرویس‌های جانبی استفاده می‌شود. این روش به این دلیل دارای اهمیت است که نه تنها از سوخت‌های فسیلی به‌عنوان خوراک استفاده نمی‌کند، بلکه با مصرف دی‌اکسیدکربن یک اقتصاد چرخشی را به وجود خواهد آورد. منبع این دی‌اکسیدکربن هم می‌تواند صنایع آلاینده باشد و هم به طور مستقیم از هوا به دست آید. در ادامه تعدادی از این پژوهش‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

سیتی^۲ و همکاران [۳] یک طرح مفهومی برای تولید الفین با استفاده از هیدروژناسیون دی‌اکسیدکربن ارائه کردند. در این طرح منبع تولید هیدروژن می‌توانست هر کدام از منابع خورشیدی، بادی، زمین‌گرایی و ... باشد. آن‌ها بدون شبیه‌سازی و با یک بررسی اقتصادی اجمالی دریافتند که تولید هیدروژن تجدیدپذیر، بخش اصلی قیمت محصول تولیدی را تشکیل می‌داد. مارتین^۳ [۴] فرایند تولید دی‌متیل‌اتر از دی‌اکسیدکربن و هیدروژن را ارزیابی کرد. در این پژوهش صفحات فتوولتاییک^۴ و توربین‌های بادی برای الکترولیز آب و تولید هیدروژن مقایسه شدند. با استفاده از برنامه‌نویسی ریاضی، متغیرهای مختلف این فرایند به ویژه تعداد توربین‌های بادی، صفحات خورشیدی و الکترولایزر بهینه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از صفحات خورشیدی برای تولید دی‌متیل‌اتر در نمونه‌ی پژوهشی موردنظر مناسب‌ترین گزینه بود.

(۱) Utilities

(۳) Martin

(۵) Chauvy

(۷) Do

(۹) Fuzzy Topsis

(۱۱) Weighted Linear Combination

(۲) Centi

(۴) Photovoltaic Panels (PVs)

(۶) Proton Exchange Membrane (PEM)

(۸) Kim

(۱۰) Electre

مانند انرژی بادی و خورشیدی به دلیل تغییرپذیری دارای محدودیت‌هایی برای تولید هیدروژن مورد نیاز هستند. در نتیجه استفاده‌ی مجزا از آن‌ها موجب می‌شود تا سامانه‌ی مورد نظر به لحاظ الکتریسیته مستقل نباشد و نیاز به دریافت برق از شبکه‌ی سراسری وجود داشته باشد. استفاده‌ی ترکیبی از انرژی‌های بادی و خورشیدی امکان تأمین پیوسته‌ی برق را تا حد زیادی فراهم خواهد کرد و همچنین هزینه‌ی لازم برای این امر را کاهش خواهد داد. این روش ترکیبی موجب خواهد شد تا وابستگی واحد تولیدی به سوخت‌های فسیلی به میزان چشمگیری کاهش یابد. در این پژوهش یک ابرساختار پیچیده متشکل از صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی، الکتروولایزرها، باتری‌های لیتیومی و وانادیومی، مبدل‌های الکتریکی، مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن، مولدهای برق و ... برای تأمین هیدروژن و برق مورد نیاز طراحی و با استفاده از نرم‌افزار هومر^۶ [۱۳] شبیه‌سازی و بهینه‌سازی خواهد شد. سامانه‌ی مذکور به لحاظ فنی و اقتصادی بررسی خواهد شد تا امکان‌پذیری و افق آینده‌ی این طرح مشخص گردد.

اصول نظری

انتخاب مسأله مورد مطالعه

برای انتخاب نمونه‌ی پژوهشی این طرح باید دو ویژگی اصلی را مدنظر قرار داد. نخست آن که مکان مدنظر به لحاظ میزان تابش انرژی خورشیدی و سرعت باد در وضعیت مطلوبی قرار داشته باشد تا امکان تولید الکتریسیته و هیدروژن سبز را با حداقل استفاده از منابع فسیلی فراهم کند. دومین ویژگی نمونه‌ی پژوهشی نزدیکی به یک منبع منتشرکننده‌ی دی‌اکسیدکربن به محیط زیست است. از آنجا که استفاده‌ی مستقیم از مقدار اندک دی‌اکسیدکربن موجود در اتمسفر بسیار هزینه‌بر است، به کارگیری گاز خروجی از دودکش یک کارخانه‌ی صنعتی در دستور کار این پژوهش قرار گرفته است. رضایی و همکاران [۱۴] پژوهشی پیرامون امکان‌سنجی تولید هیدروژن سبز در ایران با استفاده از انرژی‌های خورشیدی و بادی انجام دادند. در این پژوهش مراکز استان‌های ایران بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای مثبت و منفی مورد ارزیابی قرار گرفتند. متغیرهای مثبت شامل میزان تابش خورشیدی، جرم ویژه انرژی بادی، شاخص شفافیت آسمان، ارتفاع از سطح دریا، تعداد ساعات آفتابی، جمعیت و نرخ بیکاری بودند. همچنین دمای متوسط هوا، رطوبت متوسط هوا، میانگین بارش سالانه، حوادث طبیعی، فاصله تا جاده‌ی اصلی، تعداد روزهای غبارآلود در سال و قیمت زمین

بدترین گزینه معرفی گردید. ناظری‌فرد^۱ و همکاران [۱۰] طرح جدیدی برای تولید همزمان هیدروژن، متانول و الکتریسیته ارائه کردند. در این پژوهش گاز خروجی از دودکش یک کوره به عنوان منبع دی‌اکسیدکربن و انرژی خورشیدی به عنوان منبع تجدیدپذیر در نظر گرفته شد. با جداسازی دی‌اکسیدکربن از این جریان خروجی و واکنش آن با هیدروژن حاصل از الکترولیز آب، متانول تولید گردید. بخشی از متانول تولیدشده در این طرح در یک پیل سوختی^۲ به طور مستقیم مورد استفاده قرار گرفت و الکتریسیته تولید کرد.

صدیقی^۳ و دینسر^۴ [۱۱] استفاده از انرژی‌های خورشیدی و بادی را برای تولید همزمان هیدروژن و الکتریسیته بررسی کردند. در این سامانه، برق تجدیدپذیر همزمان برای الکترولیز آب و جداسازی نیتروژن موجود در هوا برای تولید آمونیاک به کار گرفته شد. همچنین در زمان‌های کمبود انرژی، بخشی از آمونیاک تولیدشده در یک پیل سوختی الکتریسیته تولید می‌کرد. شروین^۵ [۱۲] با استفاده از یک تحلیل فنی-اقتصادی بر تولید سوخت‌های الکتریکی و همچنین بهینه‌سازی آن، به بررسی آینده‌ی این صنعت در سال‌های آتی پرداخت. در این پژوهش از انرژی بادی و خورشیدی به صورت مجزا برای الکترولیز آب و تولید هیدروژن استفاده شد. بر اثر واکنش‌های متوالی این هیدروژن و دی‌اکسیدکربن حاصل از هوا، سوخت جت، نفتا و دیزل تولید شد. نتایج نشان داد که دستیابی به هزینه‌ی تولید پایین مشروط به کاهش قابل توجه قیمت‌های الکتروولایزر و الکتریسیته‌ی تجدیدپذیر بود.

تاکنون شبیه‌سازی جامعی پیرامون تولید هیدروژن سبز و الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر برای پشتیبانی فرایند تبدیل دی‌اکسیدکربن به الفین‌های سبک صورت نگرفته است. در اندک پژوهش‌های صورت گرفته نیز صرفاً شبکه‌ی واکنشی هیدروژناسیون شبیه‌سازی شده است. این در حالی است که در صورت استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تأمین مواد اولیه و سرویس‌های جانبی فرایند، واحد هیدروژناسیون دی‌اکسیدکربن به محلی برای انتشار این گاز گلخانه‌ای تبدیل خواهد شد. در نتیجه طراحی این سامانه‌ی پشتیبان تجدیدپذیر گام مهمی در برای اصلاح فرایندهای متداول و آلاینده‌ی محیط زیست هم‌چون کراکینگ کاتالیزوری بستر سیال برای تولید الفین‌های سبک خواهد بود.

هدف پژوهش حاضر آن است که تمام نیازهای هیدروژن و برق یک واحد تولید الفین‌های سبک از طریق انرژی‌های خورشیدی و بادی تأمین شود. علت این استفاده‌ی ترکیبی آن است که انرژی‌های تجدیدپذیر

(۱) Nazerifard

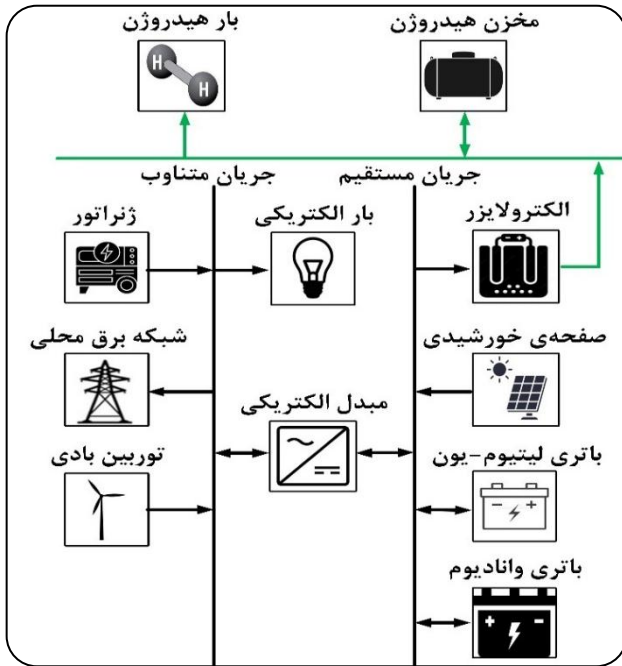
(۳) Siddiqui

(۵) Sherwin

(۲) Fuel Cell

(۴) Dincer

(۶) HOMER Pro



شکل ۱ - طرح‌واره واحد تولید الکتریسیته و هیدروژن تجدیدپذیر

بار الکتریکی تعریف‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد. هیدروژن تولیدشده نیز یا در مخازن پرفشار ذخیره می‌شود و یا هیدروژن موردنیاز را تأمین می‌کند. در ادامه نحوه محاسبات فنی هر کدام از بخش‌ها به تفکیک مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هم‌چنین در جدول ۱ مشخصات فنی و اقتصادی ابرساختار پیشنهادی ارائه شده است.

صفحات خورشیدی

این صفحات در طول روز انرژی خورشیدی جذب‌شده را با بازده مشخصی به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. توان خروجی از این صفحات طبق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد [۱۶]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,S}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,S})] \quad (1)$$

در رابطه ۱، Y_{PV} (kW)، f_{PV} (%)، \bar{G}_T ($\frac{kW}{m^2}$)، $\bar{G}_{T,S}$ ($\frac{kW}{m^2}$)، α_p ($\frac{\%}{^\circ C}$)، T_c ($^\circ C$) و $T_{c,S}$ ($^\circ C$) به ترتیب نمایانگر توان اسمی صفحات، ضریب کاهش توان، میزان تابش خورشید در بازه زمانی مدنظر، میزان تابش خورشید در شرایط استاندارد ($\frac{kW}{m^2}$)، ضریب دمایی، دمای سلول و دمای سلول در شرایط استاندارد ($^\circ C$) هستند. با موازنه انرژی و فرض تغییرات خطی بازده صفحات خورشیدی با دما، دمای سلول طبق رابطه ۲ و بر حسب متغیرهای استاندارد معرفی‌شده توسط سازنده تعیین می‌گردد:

$$T_c = \frac{T_a + (T_{c,N} - T_{a,N}) \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,N}} \right) \left(1 - \frac{\eta_{mp,S} (1 - \alpha_p T_{c,S})}{\tau \alpha} \right)}{1 + (T_{c,N} - T_{a,N}) \left(\frac{\bar{G}_T}{\bar{G}_{T,N}} \right) \left(\frac{\alpha_p \eta_{mp,S}}{\tau \alpha} \right)} \quad (2)$$

متغیرهای منفی را تشکیل می‌دادند. در این پژوهش با اختصاص یک وزن مشخص به هر کدام از این متغیرها و یک تحلیل ریاضی جامع، ۳۱ شهر موردنظر به لحاظ پتانسیل برای ترکیب انرژی‌های خورشیدی و بادی و تولید هیدروژن رتبه‌بندی شدند. نتایج آشکار نمود که شهرهای یزد، کرمان، اصفهان، کرج و زاهدان بهترین مکان‌ها برای این هدف هستند و می‌توانند گزینه‌های مناسبی برای این پژوهش باشند.

شهر زاهدان که به‌عنوان یکی از گزینه‌های احتمالی معرفی شد، در استان سیستان و بلوچستان یکی از قطب‌های تولید سیمان کشور واقع شده است. صنعت سیمان یکی از بزرگ‌ترین صنایع آلوده‌کننده محیط زیست در سراسر جهان است. این بخش به تنهایی ۷ درصد از انتشار جهانی ناشی از فعالیت انسانی و ۱۸ درصد از سامانه‌ی تجارت انتشار اتحادیه‌ی اروپا را تشکیل می‌دهد [۱۵]. در نتیجه این شهر به لحاظ منابع تجدیدپذیر و وجود منابع آلاینده نمونه‌ی پژوهشی مناسبی است. زاهدان با دارا بودن میانگین سالانه‌ی تابش خورشیدی افقی کل $5/42 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ ، شاخص شفافیت آسمان $61/8$ درصد، 3442 ساعت آفتابی در طول سال و جرم ویژه انرژی بادی 285 W/m^2 یکی از بهترین مکان‌ها در ایران برای ترکیب انرژی‌های بادی و خورشیدی است [۱۴].

با توجه به گران بودن هزینه‌ی تولید هیدروژن تجدیدپذیر، هیدروژناسیون تمام‌دی‌اکسیدکربن خروجی از کارخانه کاملاً غیرمنطقی است و هزینه بسیار زیادی خواهد داشت. در این پژوهش بخشی از گاز خروجی از دودکش یک کارخانه‌ی سیمان واقع در جنوب شرقی کشور برای خالص‌سازی در مراحل بعدی و فرایند هیدروژناسیون در نظر گرفته می‌شود. واحد الفین فرضی منتخب، با هیدروژناسیون دی‌اکسیدکربن خروجی از کارخانه‌ی سیمان، اتیلن، پروپیلن و بوتیلن تولید می‌کند. طبق محاسبات، واحد مذکور به 1420 kg/h هیدروژن برای فرایند هیدروژناسیون و 32 MW الکتریسیته برای تأمین گرمایش و سرمایش نیاز دارد. این نیاز باید در تمام روزهای سال به جز ماه‌های نوامبر و دسامبر که کارخانه فعالیت ندارد، برآورده شود.

طراحی سامانه

در شکل ۱ طرح‌واره اجزاء مختلف سامانه و نحوه‌ی ارتباط آن‌ها نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الکترولایزر، صفحات خورشیدی و باتری‌ها با شبکه‌ی مستقیم و مولدهای برق، توربین‌های بادی و سامانه‌ی برق محلی با شبکه‌ی متناوب تبادل الکتریسیته انجام می‌دهند. مبدل‌های الکتریکی نیز وظیفه‌ی تبدیل جریان متناوب به مستقیم و بالعکس را انجام می‌دهند. برق تولیدشده برای دو هدف الکترولیز آب و تولید هیدروژن سبز و هم‌چنین تأمین

۲۰	%	SOC _{min}
۰	\$(/kWh.y)	OM
۴۸۸	\$/kWh	CC
۴۳۵	\$/kWh	RC
باتری وانادیومی [۴۲،۴۱]		
۱۲۴۰	kWh	C _B
۲۵	y	LT
۰	%	SOC _{min}
۹	\$(/kWh.y)	OM
۴۲۶	\$/kWh	CC=RC
مخازن هیدروژن [۴۴،۳۱،۳۰،۱۸]		
۲۵	y	LT
۱۰	\$(/kg.y)	OM
۶۰۰	\$/kg	CC=RC
شبکه‌ی برق محلی [۴۵]		
۰/۰۳۱۴	\$/kWh	C _{elec}

در رابطه ۲، T_a (°C)، $T_{c,N}$ (°C)، $T_{a,N}$ (°C)، $\bar{G}_{T,N}$ ($\frac{kW}{m^2}$)، $\eta_{mp,S}$ (%)، τ (%) و α (%) به ترتیب معرف دمای محیط، دمای عملیاتی اسمی سلول، دمای محیط در شرایط معیار (۲۰ °C)، میزان تابش خورشید در شرایط معیار ($\frac{kW}{m^2}$ ، ۰/۸)، بازده صفحه در نقطه‌ی توان بیشینه و در شرایط استاندارد، ضریب عبوردهی پوشش صفحه و ضریب جذب صفحه‌ی خورشیدی هستند. با بررسی پژوهش‌های مختلف و مقایسه‌ی فرضیات آن‌ها، متغیرهای صفحات خورشیدی تعیین و در جدول ۱ خلاصه شده است [۱۷-۱۹]. در این جدول θ_s و θ_a به ترتیب نشان‌دهنده‌ی زاویه‌ی شیب و زاویه‌ی سمت هستند. این دو متغیر بر میزان انرژی خورشیدی دریافتی صفحات تأثیر می‌گذارند. زمانی که زاویه‌ی شیب تقریباً با عرض جغرافیایی برابر باشد، صفحات خورشیدی بیشترین توان الکتریکی خروجی را خواهند داشت. زاویه‌ی سمت نیز جهت‌گیری صفحات را نسبت به جنوب نشان می‌دهد. این مقدار برای کشورهایی مانند ایران که در نیمکره‌ی شمالی واقع شده اند، برابر صفر درجه است.

توربین‌های بادی

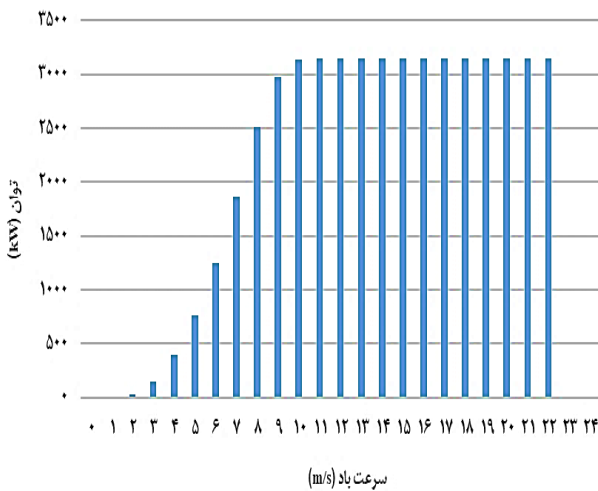
گام اول در شبیه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی تعیین سرعت باد در ارتفاع محور آن‌ها است. تغییرات سرعت باد با ارتفاع مطابق رابطه ۳ تخمین زده می‌شود [۲۰]:

$$U_{hub} = U_{anem} \times \frac{\ln(\frac{z_{hub}}{z_0})}{\ln(\frac{z_{anem}}{z_0})} \quad (3)$$

جدول ۱ - مشخصات ابرساختار پیشنهادی برای واحد تجدیدپذیر

مقدار	واحد	مشخصه
صفحات خورشیدی [۱۷-۱۹]		
۸۵	%	f_{PV}
-۰/۵	%/°C	α_p
۴۶	°C	$T_{c,N}$
۱۴/۷	%	$\eta_{mp,S}$
۲۹	°	θ_s
۰	°	θ_a
۲۵	y	LT
۱۰	\$(/kW.y)	OM
۱۰۰۰	\$/kW	RC = CC
توربین بادی زیمنس [۲۱]		
۳/۱۵	MW	P_{rated}
۱۰۹	m	Zhub
۲۰	y	LT
۹۴۰۰۰	\$/y	OM
۴/۷	M\$	RC = CC
مبدل الکتریکی [۲۵،۲۴،۱۸]		
۹۰	%	η_{inv}
۹۰	%	η_{rec}
۱۵	y	LT
۰	\$(/kW.y)	OM
۳۰۰	\$/kW	RC = CC
الکترولایزر [۳۱،۳۰،۲۳]		
۸۵	%	η_{elec}
۱۵	y	LT
۲۰	\$(/kW.y)	OM
۱۵۰۰	\$/kW	RC = CC
مولد برق گازی [۳۳-۳۵]		
J620-J01-60Hz	-	مدل
۳۳۳۱	kW	C _G
۶۰۰۰۰	h	LT
۰/۰۰۱۷	\$(/kW.h)	OM
۳۰۰	\$/kW	RC = CC
باتری لیتیوم-یون [۴۰،۳۹]		
۱۰۰۰	kWh	C _B
۳۰۰۰۰۰۰	kWh	Q _{LT}
۱۰	y	LT

(۱) Azimuth



شکل ۲ - مشخصه‌ی توربین بادی ۱۴۲-۳/۱۵-SWT [۲۲]

مدل الکتریکی

در بیشتر واحدهای ترکیبی تجدیدپذیر، صفحات خورشیدی جریان مستقیم و توربین‌های بادی جریان متناوب تولید می‌کنند. در نتیجه وجود مدل الکتریکی برای تبدیل این دو جریان به یکدیگر و تأمین برق برای مصارف مختلف امری ضروری است. بازده این دستگاه با رابطه ۵ تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\eta_c = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (5)$$

در رابطه ۵، η_c (%)، P_{out} (kW) و P_{in} (kW) به ترتیب معرف بازده مدل الکتریکی، توان خروجی و توان ورودی هستند. بیان این نکته ضروری است که این بازده می‌تواند متعلق به یکسوکننده^۴ برای تبدیل جریان متناوب به مستقیم یا معکوس‌کننده^۵ برای تبدیل جریان مستقیم به متناوب باشد. با مقایسه‌ی مشخصات مدل‌های الکتریکی مورد استفاده در پژوهش‌های گذشته، متغیرهای لازم تعیین و در جدول ۱ نشان داده شده است [۲۵، ۲۴، ۱۸].

الکترولایزر

الکترولایزرها بر حسب نوع الکترولیت، دما و فشار عملیاتی به سه دسته‌ی کلی آلکالین^۶، غشاء تبادل پروتون و اکسید جامد^۷ تقسیم‌بندی می‌شوند. در جدول ۲ مشخصات اصلی این الکترولایزرها با یکدیگر مقایسه شده است [۲۸-۲۶].

در رابطه ۳، U_{hub} (m/s)، U_{anem} (m/s)، Z_{hub} (m)، Z_{anem} (m) و Z_0 (m) به ترتیب نشان‌دهنده‌ی سرعت باد در ارتفاع محور توربین بادی، سرعت باد در ارتفاع اندازه‌گیری، ارتفاع محور توربین، ارتفاع اندازه‌گیری و زبری سطح هستند. در ادامه با توجه به منحنی مشخصه‌ی توربین که توسط سازنده ارائه می‌شود، توان خروجی در شرایط استاندارد دمایی و فشاری با توجه به سرعت تعیین شده محاسبه می‌گردد. در صورتی که سرعت باد از سرعت شروع به کار^۱ کمتر و یا از سرعت قطع^۲ بیشتر باشد، توان خروجی توربین صفر خواهد بود. در نهایت توان توربین در شرایط عملیاتی با استفاده از رابطه ۴ تعیین خواهد شد:

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) P_{WTG,STP} \quad (4)$$

در رابطه ۴، ρ (kg/m^3)، ρ_0 (kg/m^3) و $P_{WTG,STP}$ (kW) به ترتیب نمایانگر جرم ویژه هوا در شرایط عملیاتی، جرم ویژه هوا در شرایط استاندارد دمایی و فشاری ($1/225 kg/m^3$) و توان خروجی توربین در شرایط استاندارد دمایی و فشاری هستند. نکته‌ای که در انتخاب توربین اهمیت بالایی دارد این است که میزان نیاز به الکتریسیته در این پژوهش بسیار بالا (بیش از ۱۰۰ مگاوات) است. از این رو توربین بادی موردنظر باید تا حد امکان ظرفیت اسمی بالایی داشته باشد تا تعداد موردنیاز از آن عدد معقولی باشد. با بررسی ظرفیت‌ها، قیمت‌ها و اعتبار شرکت‌ها توربین زیمنس ۱۴۲-۳/۱۵-SWT برای این پژوهش انتخاب گردید. خلاصه‌ای از اطلاعات فنی و اقتصادی این توربین در جدول ۱ گزارش شده است [۲۱]. با توجه به بررسی پژوهش‌های مختلف، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری این توربین برابر با ۲ درصد هزینه‌ی اولیه‌ی آن در نظر گرفته شد. در شکل ۲ منحنی مشخصه‌ی توربین که مهم‌ترین ورودی شبیه‌سازی آن است، نمایش داده شده است [۲۲]. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت شروع به کار، سرعت مربوط به توان اسمی و سرعت قطع به ترتیب برابر ۲/۵، ۱۲ و ۲۲/۵ متر بر ثانیه هستند. آخرین متغیر موردنیاز برای شبیه‌سازی توربین بادی نوع جریان الکتریکی تولیدی است. مولد برق این توربین از نوع هماهنگ دائمی^۳ است؛ در نتیجه جریان برق تولیدی از نوع متناوب خواهد بود. اطلاعاتی که در این بخش ارائه شد، مربوط به یک توربین است و بهینه‌سازی تعداد توربین‌ها را تعیین خواهد کرد.

(۱) Cut-In Speed

(۳) Synchronous Permanent

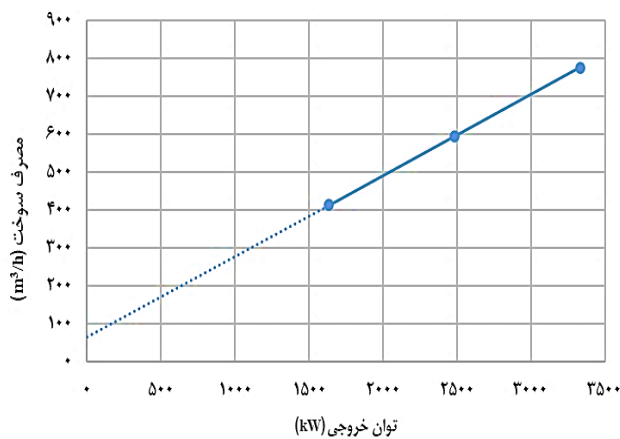
(۵) Inverter

(۷) Solid Oxide

(۲) Cut-Out Speed

(۴) Rectifier

(۶) Alkaline



شکل ۳ - منحنی مشخصه‌ی مولد برق گازی J620-J01-60Hz [۱۳]

مولد برق

به دلیل متغیر بودن انرژی‌های خورشیدی و بادی، استفاده از سامانه‌های پشتیبان امری ضروری است. مولدهای برق با سوزاندن سوخت‌های فسیلی در زمان‌های کمبود انرژی به پایداری واحد و همچنین تأمین مقدار ثابتی از الکتریسیته کمک می‌کنند. مولدهای برق گازی به دلیل انتشار آلاینده‌ی کمتر، قیمت پایین‌تر و همچنین انعطاف‌پذیری بیشتر برای ترکیب با انرژی‌های تجدیدپذیر انتخاب بهتری نسبت به مولدهای برق دیزلی هستند [۳۲]. با توجه به میزان آلاینده‌ی تولیدی، مصرف سوخت و همچنین تطابق ظرفیت با سامانه‌ی مورد نظر مولد برق گازی J620-J01-60Hz ساخته‌ی شرکت جنباخر^۲ انتخاب گردید. ظرفیت این دستگاه ۳۳۳۱ kW و نسبت بار کمینه‌ی آن ۵۰ درصد است. این به آن معناست که اگر نیاز به الکتریسیته‌ی سامانه کمتر از نصف ظرفیت اسمی باشد، مولد برق دقیقاً با نصف توان اسمی خود کار خواهد کرد. منحنی مشخصه‌ی این مولد برق در شکل ۳ نمایش داده شده است [۱۳]. در شکل ۳ میزان مصرف سوخت (گاز طبیعی) به ازای توان خروجی مشاهده می‌شود. دیگر مشخصات فنی و اقتصادی مولد برق در جدول ۱ خلاصه شده است [۳۳-۳۵]. هزینه‌ی تعمیر و نگهداری این دستگاه ۵ درصد هزینه‌ی اولیه‌ی آن در نظر گرفته شد.

باتری

یکی دیگر از سامانه‌ی پشتیبان برای پایداری واحد در زمان‌های کمبود باتری‌ها هستند. این دستگاه‌ها الکتریسیته‌ی مازاد بر نیاز را با کمترین اتلاف در خود ذخیره می‌کنند و تا حد امکان استفاده از مولدهای برق را کاهش می‌دهند. یکی از کاربردهای باتری‌ها ایجاد تعادل در سامانه از طریق انتقال انرژی مازاد

جدول ۲ - مقایسه‌ی ویژگی‌های الکترولایزرهای متداول [۲۸-۲۶]

مشخصه	الکترولایزر آلکالین	الکترولایزر با غشاء تبادل پروتون	الکترولایزر اکسید جامد
مشخصه فناوری	توسعه یافته	در حال توسعه	نوظهور
دمای عملیاتی (°C)	۶۰-۸۰	۵۰-۸۰	۵۰۰-۱۰۰۰
فشار عملیاتی (bar)	<۳۰	<۳۰	<۳۰
خوردگی	زیاد	کم	زیاد
تطبیق‌پذیری با نوسان	کم	زیاد	کم
طول عمر (y)	۲۰-۳۰	۱۰-۲۰	
هزینه‌ی نگهداری	بالا	پایین	بالا
هزینه‌ی اولیه (\$/kW)	۵۰۰-۱۴۰۰	۱۱۰۰-۱۸۰۰	۲۸۰۰-۵۶۰۰

یکی از مهم‌ترین متغیرها برای انتخاب نوع الکترولایزر توانایی آن برای هماهنگی با انرژی‌های تجدیدپذیر است. به دلیل متغیر بودن این انرژی‌ها، الکترولایزر مورد نظر باید زمان پاسخ کمی داشته باشد تا خود را با نوسانات ورودی تطبیق دهد. در این زمینه الکترولایزر با غشاء تبادل پروتون برتری محسوسی نسبت به دو گزینه‌ی دیگر دارد. این الکترولایزر همچنین دارای ویژگی‌های مثبت دیگری مانند هزینه‌ی نگهداری کم، خوردگی ناچیز و تولید آسان نیز هست؛ از این رو در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود آنکه قیمت آن در حال حاضر از آلکالین بیشتر است، لکن پژوهش‌های فراوانی با هدف بهبود فناوری و کاهش قیمت آن در دست انجام است. بنابراین در این پژوهش نیز به مانند پژوهش‌های مشابه در موضوع تولید هیدروژن سبز، الکترولایزر با غشاء تبادل پروتون انتخاب می‌گردد. بازده این دستگاه مطابق رابطه ۶ تعریف می‌گردد [۲۹]:

$$\eta_{\text{elec}} = \frac{m_{\text{H}_2} \text{HHV}_{\text{H}_2}}{P_{\text{elec}}} \quad (6)$$

در رابطه ۶ m_{H_2} (kg/s)، HHV_{H_2} (kJ/kg) و P_{elec} (kW) به ترتیب نمایانگر دبی هیدروژن تولیدی، ارزش گرمایی بالای هیدروژن^۱ (۱۴۲۰۰۰ kJ/kg) و الکتریسیته‌ی ورودی هستند. این رابطه برای تعیین میزان تولید این سوخت پاک در هر بازه‌ی زمانی به کار خواهد رفت. مشخصات الکترولایزرهای مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ خلاصه شده است [۳۱، ۳۰، ۳۳].

(۱) Higher Heating Value

(۲) Jenbacher

جدول ۳ - مقایسه‌ی ویژگی‌های باتری‌های اکسایش-کاهش و انادایوم و لیتیوم-یون [۴۰-۳۶]

مشخصه	لیتیوم-یون	اکسایش-کاهش و انادایوم
انرژی مخصوص (Wh/kg)	۱۰۰-۲۰۰	۳۰-۴۵
جرم ویژه انرژی (Wh/L)	۲۵۰-۶۹۳	۱۵-۲۵
نرخ تخلیه‌ی خودبه‌خود روزانه (%/d)	۰/۱-۰/۳	۰/۱۵
آثار زیست‌محیطی	متوسط	کم
بازده رفت و برگشتی (%)	۷۵-۹۷	۷۵-۹۰
طول عمر مفید (y)	۱۰-۲۰	>۲۰
بیشینه تعداد چرخه‌های شارژ و تخلیه	۳۰۰۰	۱۰۰۰۰-۱۶۰۰۰
زمان شارژ	دقیقه-روز	ساعت-ماه
زمان تخلیه	دقیقه-ساعت	ثانیه-۱۰ ساعت

یکی از مدل‌های مشهور برای شبیه‌سازی این دستگاه مدل باتری ایده‌آل است. این مدل برای انواع مختلفی از باتری‌ها از جمله لیتیوم-یون و اکسایش کاهش و انادایومی به کار می‌رود. مهم‌ترین فرض باتری ایده‌آل این است که ولتاژ باتری در طول تخلیه ثابت می‌ماند؛ در نتیجه نمودار تخلیه‌ی باتری خطی افقی خواهد بود. یکی از متغیرهای مهم این دستگاه‌ها طول عمر مفید است که تأثیر مستقیمی بر هزینه‌ی کل سامانه دارد. این متغیر بر حسب اینکه توان عملیاتی، طول عمر یا هر دو مشخص باشد، طبق رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۴۳]:

$$R_{\text{batt}} = \text{Min} \left(\frac{N_{\text{batt}} \times Q_{\text{LT}}}{Q_{\text{thrp}}}, R_{\text{batt},f} \right) \quad (7)$$

در رابطه ۷، N_{batt} ، Q_{LT} (kWh)، Q_{thrp} (kWh/y) و $R_{\text{batt},f}$ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی تعداد باتری‌ها، توان عملیاتی یک باتری، توان عملیاتی سالانه و طول عمر دستگاه هستند. بر اساس این رابطه عمر مفید باتری برابر با حداقل مقدار طول عمر اسمی و عملیاتی آن خواهد بود.

مخزن هیدروژن

در کنار استفاده از باتری‌ها، به‌کارگیری الکتروسیسته‌ی مازاد در الکترولیزر و ذخیره‌ی هیدروژن تولیدشده یکی دیگر از راه‌های مقابله با متغیر بودن انرژی‌های تجدیدپذیر است. مخازن گازی با فشار بالا رایج‌ترین فناوری موجود برای ذخیره‌سازی این سوخت پاک در سال‌های گذشته هستند. این مخازن جدید با وجود سبک بودن قادر به تحمل فشارهای بسیار بالا تا حدود ۸۰۰ bar هستند و امکان ذخیره‌سازی هیدروژن تا جرم ویژه 36 kg/m^3 را فراهم می‌سازند [۳۰]. نسبت هیدروژن اولیه‌ی موجود در این مخازن به ظرفیت اصلی آن‌ها از مهم‌ترین متغیرهایی است که باید تعریف شده باشد. با توجه به شبیه‌سازی‌های مختلفی که برای سامانه‌ی موردنظر انجام شد، عدد ۵۰ درصد برای این متغیر مقدار مناسبی است. با بررسی پژوهش‌های گذشته، متغیرهای مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن انتخاب و در جدول ۱ نشان داده شده است [۳۱، ۳۰، ۱۸، ۴۴]. پس از تعیین متغیرهای لازم، یک بهینه‌سازی جامع ظرفیت کل مخازن نگهداری هیدروژن (kg) را تعیین خواهد کرد.

شبکه‌ی برق محلی

در حالت کلی تبادل با شبکه‌ی محلی به صورت خرید برق در زمان‌های کمبود و همچنین فروش آن در زمان‌های مازاد انرژی و افزایش درآمد واحد است. بیشتر این شبکه‌ها از نیروگاه‌های فسیلی تغذیه می‌کنند؛ در نتیجه همواره خرید برق از آن‌ها برای یک واحد

در ساعت‌های بیشترین تابش خورشید به ساعت‌های کمترین تابش یعنی شب است.

اولین و مهم‌ترین گام در شبیه‌سازی این دستگاه انتخاب نوع آن است. در این زمینه باتری‌های اکسایش-کاهش و انادایوم و لیتیوم-یون توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند و در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. جدول ۳ مشخصات فنی این دو باتری را مقایسه می‌کند تا دیدی بهتر برای انتخاب گزینه‌ی مناسب فراهم شود [۴۰-۳۶].

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، هر کدام از این دو باتری مزایای مختص به خود را دارد. برای نمونه، باتری‌های لیتیوم-یونی دارای ظرفیت انرژی بالایی هستند و همچنین به سرعت شارژ می‌شوند. در نقطه‌ی مقابل باتری‌های انادایومی طول عمر و توان عملیاتی بالاتری نسبت به رقیب خود دارند. در نتیجه هیچکدام از این دو نوع باتری برتری کاملی نسبت به دیگری ندارند و نمی‌توان با یک تحلیل کیفی گزینه‌ی بهتر را انتخاب نمود. از این رو در این پژوهش هر دو باتری لیتیوم-یونی و انادایومی شبیه‌سازی خواهند شد تا با یک بهینه‌سازی جامع گزینه‌ی مطلوب برای این سامانه و تعداد موردنیاز از آن تعیین شود. برای این امر باتری‌های مختلف موجود در نرم‌افزار بررسی گردید و یک نماینده برای هر کدام از این دو نوع انتخاب شد. در انتخاب این دو نماینده سعی شد تا اولاً ظرفیت‌های آن‌ها به یکدیگر نزدیک باشد تا امکان مقایسه‌ی درست فراهم شود. ثانیاً این ظرفیت بالا باشد تا تعداد معقولی از باتری‌ها بتواند سامانه‌ای با این مقیاس را پشتیبانی کند. مشخصات فنی و اقتصادی این دو باتری در جدول ۱ قابل مشاهده است [۴۲-۳۹].

جدول ۴ - مجموعه‌ی پیشنهادی برای ظرفیت‌های دستگاه‌ها

متغیر	واحد	مقادیر پیشنهادی
ظرفیت کلی مخازن هیدروژن	ton	۳۰،۴۰،۵۰،۶۰،۷۰
ظرفیت کلی الکترولیزرها	MW	۱۳۵،۱۴۵،۱۵۵،۱۶۵،۱۷۵
تعداد مولدهای برق	-	۵،۶،۷،۸،۹

تمام حالات ممکن باشد. در این راستا برای هر شبیه‌سازی ابتدا هزینه‌ی خالص فعلی از تفاضل تمام هزینه‌ها و درآمدهای واحد در طول عمر پروژه محاسبه می‌شود. سپس هزینه‌ی سالانه‌ی کلی^۲ واحد مطابق رابطه ۸ تعیین می‌گردد [۴۴]:

$$C_{ann,tot} = CRF \times C_{NPC,tot} \quad (۸)$$

در رابطه ۸، CRF و $C_{NPC,tot}$ (\$) به ترتیب نمایانگر ضریب بازگشت سرمایه^۳ و هزینه‌ی خالص فعلی کل هستند. ضریب بازگشت سرمایه متغیری است که به کمک آن جریان‌های نقدی^۴ متفاوت در سال‌های مختلف به یک جریان نقدی واحد تبدیل می‌شود؛ این ضریب از رابطه ۹ تعیین می‌گردد:

$$CRF = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (۹)$$

در رابطه ۹، i (%) و N (y) به ترتیب معرف نرخ تنزیل یا بهره‌ی واقعی^۵ و تعداد سال‌ها هستند که i مطابق رابطه ۱۰ و بر اساس نرخ بهره‌ی اسمی (i') و نرخ تورم (f) تعریف می‌شود:

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (۱۰)$$

در پایان برای ارزیابی واحد طراحی شده هزینه‌های تراز شده‌ی انرژی^۶ و هیدروژن^۷ با استفاده از رابطه‌های ۱۱ و ۱۲ محاسبه می‌شوند:

$$LCOE = \frac{C_{ann,tot} - m_{H_2,ann} c_{H_2}}{E_{served}} \quad (۱۱)$$

$$LCOH = \frac{C_{ann,tot} - E_{served} c_{elec}}{m_{H_2,ann}} \quad (۱۲)$$

در رابطه‌های ۱۱ و ۱۲، E_{served} (kWh/y)، $m_{H_2,ann}$ (kg/y)، c_{H_2} (\$/kg) و c_{elec} (\$/kWh) به ترتیب بار الکتریکی اصلی سالانه، میزان هیدروژن تولیدی سالانه، قیمت متداول هیدروژن و قیمت متداول الکتریسیته را نشان دهند. متغیرهای لازم برای محاسبات اقتصادی فوق در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه بیشتر هزینه‌های واحد دلاری هستند، نرخ بهره‌ی اسمی و تورم نیز مطابق مقادیر بین‌المللی در تاریخ ۳۱ می ۲۰۲۲ محاسبه شده‌اند.

تجدیدپذیر با محدودیت‌هایی همراه است. بنابراین برق خریداری شده از شبکه نباید برای مصارف غیرضروری همچون شارژ باتری‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در نقطه‌ی مقابل نباید با هدف کسب سود بیشتر، از دستگاه‌های غیرتجدیدپذیر سامانه مانند مولدهای برق برای تولید برق مازاد و فروش به شبکه‌ی محلی استفاده نمود. باید توجه نمود که مبنای بهینه‌سازی سامانه محاسبات اقتصادی است. در نتیجه اگر محدودیتی بر تبادل انرژی با شبکه‌ی برق محلی اعمال نشود، سامانه تمام نیاز خود را از این طریق تأمین خواهد کرد. علت این مسئله پایین بودن قیمت الکتریسیته‌ی حاصل از سوخت‌های فسیلی در مقایسه با الکتریسیته‌ی تجدیدپذیر است. در این پژوهش تصمیم گرفته شد تا تبادل با شبکه فقط به صورت فروش الکتریسیته در زمان‌های مازاد باشد. قیمت واحد فروش این الکتریسیته در جدول ۱ قابل مشاهده است. این قیمت بر اساس تعرفه خرید تضمینی برق تجدیدپذیر در زمان انجام این پژوهش تعیین گردید [۴۵].

متغیرها و قیود

مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن، الکترولیزرها و مولدهای برق به لحاظ نحوه‌ی انجام محاسبات با بقیه‌ی دستگاه‌ها تفاوت دارند. شبیه‌سازی موارد مذکور مستلزم وارد کردن مجموعه‌ای از ظرفیت‌های پیشنهادی است تا مقدار بهینه از بین آن‌ها انتخاب شود.

هر چه مجموعه‌ی ظرفیت‌های پیشنهادی بزرگ‌تر باشد، زمان محاسبات نیز افزایش خواهد یافت. در این پژوهش با شبیه‌سازی‌های مختلف، ظرفیت‌های پیشنهادی مناسب برای الکترولیزرها، مولدهای برق و مخازن ذخیره‌ی هیدروژن به دست آمد. برای شناسایی نقطه‌ی بهینه ابتدا بازه‌های بزرگ‌تر انتخاب گردید تا حدود جواب مشخص گردد و در ادامه با انتخاب بازه‌های کوچک‌تر نقطه‌ی بهینه به طور دقیق مشخص شد. این مقادیر در جدول ۴ نشان داده شده است. همچنین بیشتر ظرفیت برآورده نشده‌ی مجاز برای هیدروژن و الکتریسیته به ترتیب ۵ و ۱ درصد در نظر گرفته شد. این مقادیر به نحوی انتخاب شدند تا هزینه‌ی خالص فعلی^۱ واحد و میزان استفاده از مولدهای برق در محدوده‌ای مناسب و منطقی باشند.

محاسبات اقتصادی

مبنای بهینه‌سازی واحد معرفی شده و همچنین تعیین ظرفیت‌ها یا تعداد مورد نیاز از هر دستگاه متغیرهای اقتصادی است. به بیان دیگر سامانه‌ی بهینه باید دارای کمترین هزینه‌ی خالص فعلی در بین

(۱) Net Present Cost (NPC)

(۲) Total Annualized Cost

(۳) Capital Recovery Factor

(۴) Cash Flows

(۵) Real Interest Rate

(۶) Levelized Cost of Energy (LCOE)

(۷) Levelized Cost of Hydrogen (LCOH)

جدول ۷ - مشخصات سامانه‌ی بهینه‌ی تولید هیدروژن و الکتریسیته

مقدار	واحد	مشخصه
۴۹۴/۶۲	MW	ظرفیت اسمی صفحات خورشیدی
۳۳	#	تعداد توربین‌های بادی زمینس
۲۵/۳۱	MW	ظرفیت کل مبدل‌های الکتریکی
۴۱۷ (وانادیوم)	#	تعداد باتری‌ها
۱۵۵	MW	ظرفیت کل الکترولایزرها
۵۰	t	ظرفیت کل مخازن هیدروژن
۷	#	تعداد مولدهای برق گازی
LF ^۱	-	نوع برنامه‌ی برق‌رسانی

نتیجه‌ها و بحث

نتیجه‌های فنی

سامانه‌ی بهینه دارای کمترین هزینه‌ی خالص فعلی و در نتیجه بهترین وضعیت اقتصادی است. در این پژوهش بهترین شرایط تولید از میان ۸۶۴،۴۰۸ شبیه‌سازی انجام‌شده تعیین گردید. در جدول ۷ مشخصات این سامانه‌ی بهینه به طور خلاصه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش عمده الکتریسیته در این مجموعه توسط صفحات خورشیدی تولید می‌گردد. علت این مسئله از یک سو فراوانی انرژی خورشیدی در شهر انتخابی و از سوی دیگر پایین بودن قیمت صفحات خورشیدی در مقایسه با توربین‌های بادی است. برای ذخیره‌ی این الکتریسیته در سامانه‌ی بهینه، باتری‌های اکسایش-کاهش و انادیوم به باتری‌های لیتیوم-یونی ترجیح داده شده‌اند. هم‌چنین در شیوه‌ی برق‌رسانی اتخاذشده، مولدهای برق صرفاً به اندازه‌ی میزان کمبود الکتریسیته تولید می‌کنند و برای شارژ باتری‌ها توان خروجی آن‌ها افزایش نمی‌یابد. در سامانه‌ی بهینه به طور متوسط ۹۹/۴ درصد از الکتریسیته‌ی تولیدی از طریق منابع تجدیدپذیر تأمین می‌شود. شکل ۴ سهم لحظه‌ای این انرژی‌ها از تولید برق در این واحد را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش عمده‌ی شکل را نواحی زرد رنگ تشکیل می‌دهند؛ این به آن معناست که میزان قابل توجهی از نیاز واحد در طول سال توسط انرژی‌های خورشیدی و بادی تأمین می‌شود. در فصول پاییز و زمستان که انرژی‌های تجدیدپذیر و به خصوص انرژی خورشیدی کمتر در دسترس است، استفاده از مولدهای برق و گاز طبیعی افزایش می‌یابد (نواحی تیره رنگ). در دو ماه نوامبر و دسامبر (سمت راست نمودار) به دلیل عدم تعریف بار هیدروژن و الکتریسیته، به هیچ وجه از مولد برق استفاده نمی‌شود. در نتیجه نواحی مشکی مربوط به زمان‌هایی است که هیچ‌گونه برقی تولید نمی‌شود و سهم انرژی‌های تجدیدپذیر نیز صفر خواهد بود.

جدول ۵ - متغیرهای اقتصادی کلی

متغیر	واحد	مقدار
i'	%	۴ [۴۶]
f	%	۸/۵۸ [۴۷]
N	y	۲۰

جدول ۶ - محدوده‌ی تغییرات متغیرهای انتخاب‌شده برای تحلیل حساسیت

متغیر	محدوده‌ی تغییرات
قیمت صفحات خورشیدی	± ۲۰٪، ± ۴۰٪، ± ۶۰٪
قیمت الکترولایزرها	± ۲۰٪، ± ۴۰٪، ± ۶۰٪
قیمت توربین‌های بادی	± ۲۰٪، ± ۴۰٪، ± ۶۰٪
قیمت باتری‌ها	± ۲۰٪، ± ۴۰٪، ± ۶۰٪
قیمت مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن	± ۲۰٪، ± ۴۰٪، ± ۶۰٪

تحلیل حساسیت

در این پژوهش تأثیر متغیرهای مختلف بر قیمت هیدروژن سبز و هم‌چنین هزینه‌ی خالص فعلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا پنج متغیر قیمت‌های صفحات خورشیدی، الکترولایزرها، توربین‌های بادی، باتری‌ها و مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن که بیشترین تأثیر را بر هزینه‌ی این واحد دارند، انتخاب گردیدند. محدوده‌ی تغییرات این متغیرها در جدول ۶ قابل مشاهده است. تغییر قیمت یک متغیر در این جدول به معنای تغییر هزینه‌های اولیه، تعویض و تعمیر و نگهداری آن به صورت همزمان است. هم‌چنین بیان این نکته ضروری است که برای تحلیل حساسیت، ظرفیت‌های الکترولایزرها، مولدهای برق گازی و مخازن هیدروژن در مقادیر بهینه‌ی حاصل‌شده از شبیه‌سازی اولیه ثابت فرض شدند. دلیل این تصمیم کاهش زمان موردنیاز برای تحلیل حساسیت از چندین روز به چند ساعت بود.

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، تأثیر افزایش و کاهش قیمت پایه‌ی این دستگاه‌ها بر سامانه ارزیابی خواهد شد. بررسی قیمت‌های بالاتر به این دلیل است که اگر به هر علتی دستگاه‌های موجود در بازار موردنظر قیمت بیشتری نسبت به مقادیر اعلام‌شده در این پژوهش داشتند، میزان افزایش قیمت هیدروژن سبز و توجیه‌پذیری طرح مشخص شود. در نقطه‌ی مقابل، ارزیابی قیمت‌های پایین‌تر افق آینده‌ی این طرح را مشخص خواهد کرد. به بیان دیگر، این بررسی مشخص خواهد کرد که برای رسیدن به قیمتی پایین برای هیدروژن چه مقدار کاهش قیمت و پیشرفت فناوری برای دستگاه‌های دیگر موردنیاز است.

(۱) Load Following

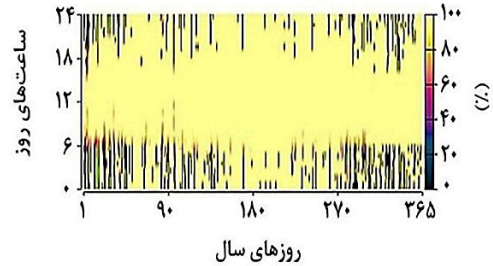
جدول ۸ - خلاصه‌ای از نتایج اقتصادی سامانه‌ی بهینه

مقدار	واحد	مشخصه
۱/۳۸	B\$	هزینه‌ی خالص فعلی ($C_{NPC,tot}$)
۴۲/۴۶	M\$/y	هزینه‌ی سالانه‌ی کلی ($C_{ann,tot}$)
۱/۱۵	B\$	هزینه‌ی اولیه خرید دستگاه‌ها
۱۵/۷۲	M\$/y	هزینه‌ی سالانه‌ی تعمیر و نگهداری
۰/۱۳	M\$/y	هزینه‌ی سالانه‌ی خرید سوخت
۰/۱۲	\$/kWh	هزینه‌ی تراز شده‌ی انرژی (LCOE)
۳/۵۶	\$/kg	هزینه‌ی تراز شده‌ی هیدروژن (LCOH)

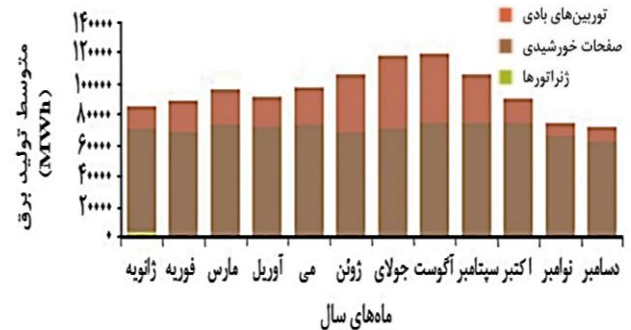
واحدهای تجدیدپذیر هستند، این طرح همزمان دارای هزینه و ارزش بالایی است. این قیمت‌ها در بخش اعتبارسنجی با پژوهش‌های دیگر مقایسه خواهند شد.

بدیهی است که برخی از اجزاء سامانه نقش پررنگ‌تری در هزینه‌های اولیه و جاری دارند. شکل ۶ هزینه‌های سالانه‌ی دستگاه‌ها و بخش‌های مختلف واحد را نمایش می‌دهد. صفحات خورشیدی و الکترولایزرها به ترتیب دارای بیشترین هزینه‌ی سالانه هستند. در این واحد صفحات خورشیدی ۷۳/۴ درصد از تولید انرژی را به خود اختصاص می‌دهند؛ از این رو نصب این صفحات با ظرفیت اسمی ۴۹۵ MW مستلزم صرف هزینه‌ی زیادی است. هزینه‌ی سالانه‌ی زیاد الکترولایزرها نیز به بالا بودن قیمت پایه‌ی این دستگاه به دلیل در حال توسعه بودن فناوری آن مرتبط است. شایان توجه است که در بیشتر پژوهش‌های مرتبط با تولید هیدروژن نیز کاهش قیمت تمام‌شده‌ی این گاز منوط به کاهش قیمت الکترولایزر و توسعه‌ی فناوری آن است. پس از این دو، باتری‌ها، توربین‌های بادی و مخازن ذخیره‌سازی به ترتیب دارای بیشترین سهم در هزینه‌ی سالانه‌ی کلی هستند. هزینه‌های مبدل‌های الکتریکی، مولدهای برق و موارد متفرقه مانند جریمه‌های انتشار کربن و خرید هیدروژن از خارج واحد در مقایسه با موارد بیان شده ناچیز هستند. هم‌چنین فروش الکتریسیته به شبکه‌ی برق محلی با هزینه‌ی منفی مشخص شده است؛ این به آن معناست که این فروش تا حدی موجب کاهش هزینه‌ها و قیمت نهایی هیدروژن می‌گردد.

یکی از مهم‌ترین نکاتی که پس از شبیه‌سازی این واحد باید مورد بررسی قرار بگیرد، درستی انتخاب ترکیب انرژی‌های بادی و خورشیدی در نمونه‌ی پژوهشی مورد نظر است. به بیان دیگر، باید مشخص شود که آیا استفاده‌ی همزمان از این دو انرژی موجب کاهش هزینه‌ها شده و یا صرفاً پیچیدگی بیشتری را به واحد تحمیل کرده است. جدول ۹ نتایج طراحی این سامانه را در سه حالت استفاده از انرژی‌های خورشیدی، بادی و خورشیدی- بادی نشان می‌دهد. هر کدام از این سه طراحی دارای حداقل هزینه در مقایسه با دیگر



شکل ۴ - سهم لحظه‌ای انرژی‌های تجدیدپذیر از تولید برق در سامانه‌ی بهینه



شکل ۵ - متوسط ماهانه‌ی تولید برق توسط صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی و مولدهای برق در سامانه‌ی بهینه

در شکل ۵ متوسط ماهانه‌ی تولید برق توسط صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی و مولدهای برق نشان داده شده است. متوسط سهم این دستگاه‌ها در تولید سالانه‌ی برق به ترتیب برابر ۷۳/۴، ۲۶ و ۰/۶ درصد است. همان‌طور که مشهود است، سهم انرژی بادی از تولید الکتریسیته در ماه‌های ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر در مقایسه با ماه‌های دیگر بیشتر است. علت این مسئله پدیده‌ی موسوم به بادهای ۱۲۰ روزه در استان سیستان و بلوچستان است. این پدیده تقریباً از اواخر اردیبهشت ماه آغاز می‌شود و تا انتهای شهریور ادامه دارد. شدت وزش باد در این بازه‌ی زمانی گاهی به بیشتر از ۱۰۰ km/h می‌رسد؛ در نتیجه در این مدت توربین‌های بادی خروجی بیشتری نسبت به ماه‌های دیگر سال دارند.

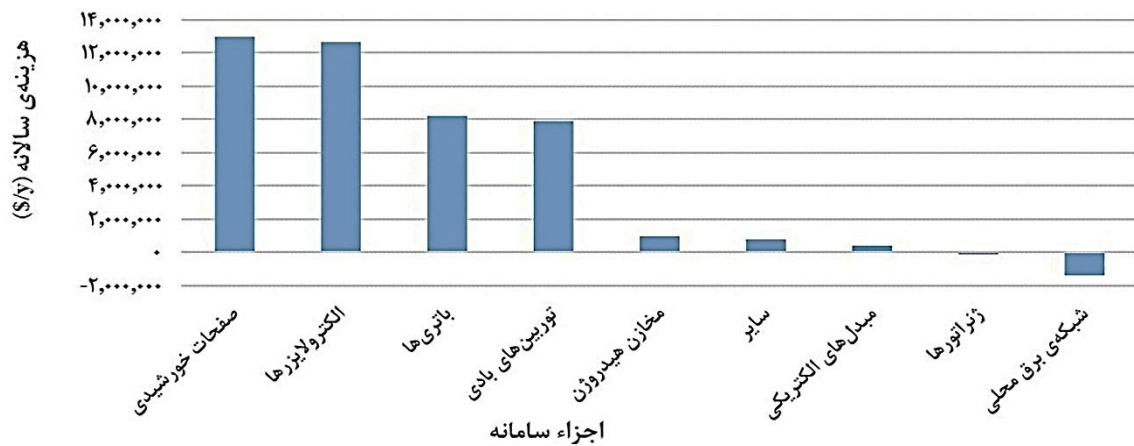
نتیجه‌های اقتصادی

سامانه‌ی بهینه‌ای که در بخش نتایج فنی ارائه شد دارای کمترین هزینه‌ی خالص فعلی در مقایسه با تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده است. خلاصه‌ای از اطلاعات اقتصادی این واحد بهینه در جدول ۸ ارائه شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت، این واحد دارای هزینه‌ی خالص فعلی و سالانه‌ی بالایی است. علت این مسئله ظرفیت بسیار زیاد هیدروژن و الکتریسیته‌ی تولید شده است. به بیان دیگر، از آن جایی که هزینه‌ی تراز شده‌ی انرژی و هیدروژن کاملاً در محدوده‌ی قابل قبول

جدول ۹ - مقایسه‌ی نتایج طراحی سامانه در سه حالت استفاده از انرژی‌های خورشیدی، بادی و خورشیدی-بادی

مشخصه	خورشیدی-بادی	خورشیدی	بادی
ظرفیت اسمی کل صفحات خورشیدی (MW)	۴۹۴/۶۲	۷۱۱/۸۹	-
تعداد توربین‌های بادی زمینس (#)	۳۳	-	۱۹۳
هزینه‌ی خالص فعلی (B\$)	۱/۳۸	۱/۴۴	۲/۴۳
هزینه‌ی سالانه‌ی کلی (M\$/y)	۴۲/۴۶	۴۴/۳۲	۷۵/۰۵
هزینه‌ی ترازشده‌ی انرژی (\$/kWh)	۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۲۶
هزینه‌ی ترازشده‌ی هیدروژن (\$/kg)	۳/۵۶	۳/۷۶	۶/۸۷



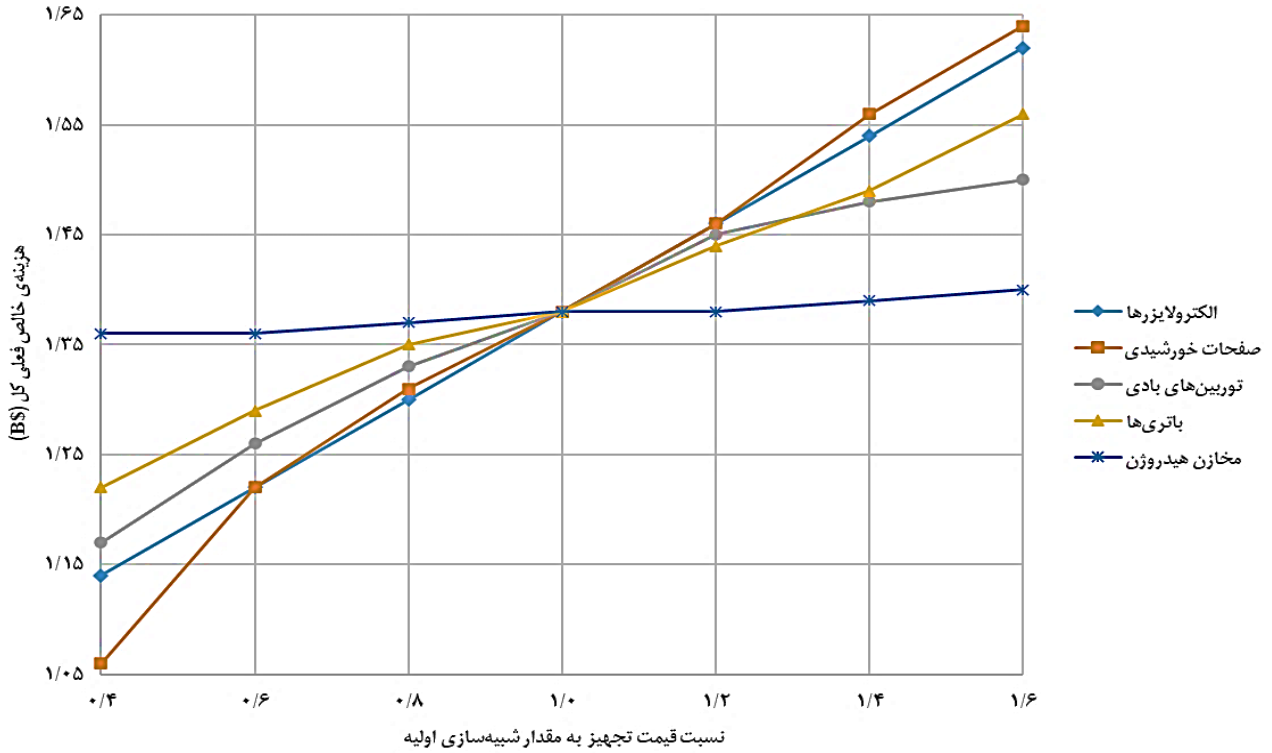
شکل ۶ - هزینه‌ی سالانه‌ی دستگاه‌های مختلف در واحد بهینه

مخازن ذخیره‌سازی هیدروژن نیز به دلیل قیمت پایین در مقایسه با قیمت سایر دستگاه‌ها در رتبه‌ی آخر بین این پنج مورد قرار دارند. مطابق با نمودار افزایش ۶۰ درصدی هزینه‌های صفحات خورشیدی و الکترو لایزرها می‌تواند هزینه‌ی خالص فعلی را به ترتیب به اندازه‌ی ۱۸/۸ و ۱۷/۴ درصد افزایش دهد. همچنین کاهش این هزینه‌ها موجب کاهش تابع هدف به اندازه‌ی ۲۳/۲ و ۱۷/۴ درصد می‌شود. به لحاظ قیمت تمام‌شده‌ی هیدروژن نیز روند تغییرات به همین شکل است؛ به طوری که افزایش ۶۰ درصدی هزینه‌ی صفحات خورشیدی و الکترو لایزرها و کاهش ۶۰ درصدی آن‌ها به ترتیب موجب افزایش ۳۳/۳ و ۲۱/۹ درصدی و کاهش ۲۷/۸ و ۲۱/۳ درصدی قیمت ترازشده‌ی هیدروژن می‌گردد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بر اثر تغییرات قیمت این دستگاه‌ها به صورت منفرد، قیمت هیدروژن سبز می‌تواند تا $2/6 \text{ $/kg}$ کاهش یابد. بدیهی است که کاهش همزمان هزینه‌ی این دو دستگاه یا مجموعه‌ی دستگاه‌ها اثر بسیار بالاتری خواهد داشت. همان‌طور که انتظار می‌رود، توسعه‌ی فناوری در زمینه‌ی بهبود عملکرد و کاهش قیمت صفحات خورشیدی و الکترو لایزرها نقش به‌سزایی در احداث این واحد تجدیدپذیر خواهد داشت. البته در پژوهش‌های دیگر ممکن است میزان تأثیر متغیرهای کلیدی بسته به منابع موجود متفاوت باشد؛ لکن در بیشتر این مطالعات همانند این پژوهش توجیه‌پذیری اقتصادی سامانه بستگی شدیدی به قیمت الکترو لایزرها دارد.

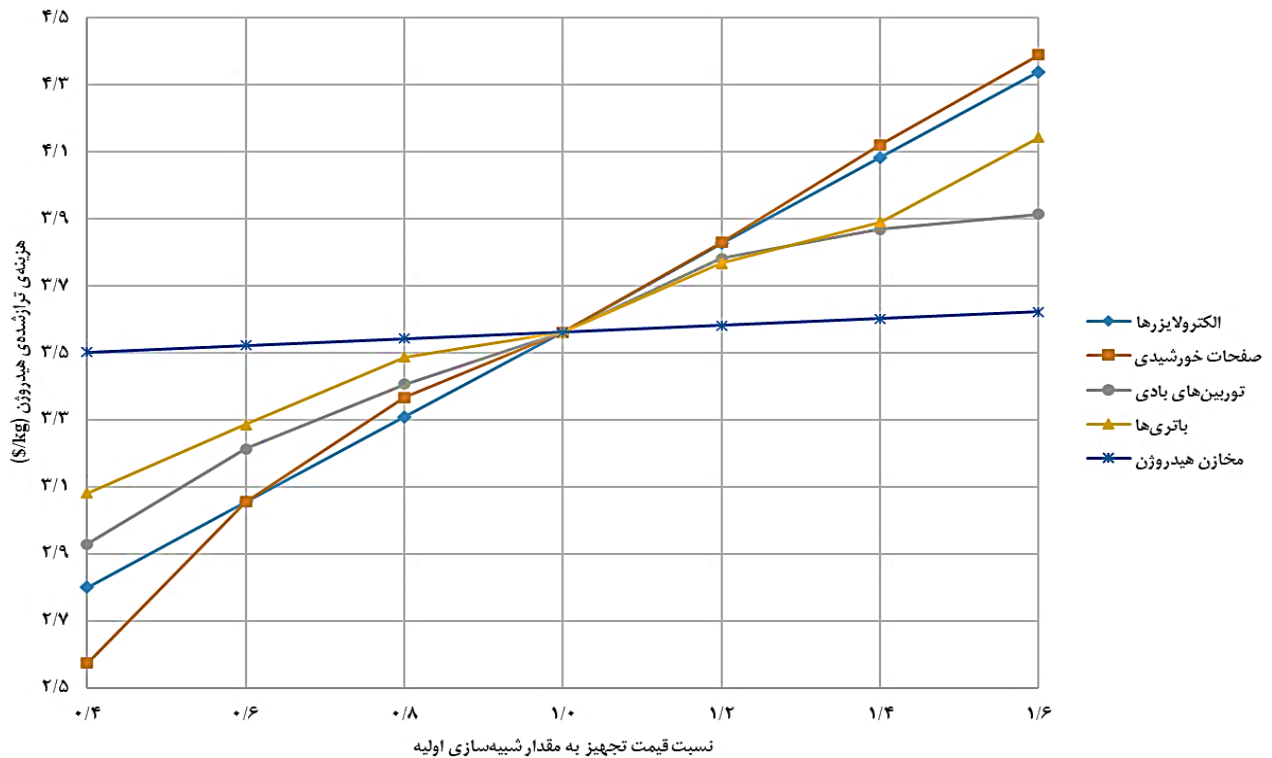
شبیه‌سازی‌های مشابه با خودشان هستند. همان‌طور که مشهود است، ترکیب انرژی‌های بادی و خورشیدی در مقایسه با استفاده‌ی جداگانه از هر کدام هزینه‌ی (خالص، سالانه، انرژی و هیدروژن) کمتری دارد؛ در نتیجه به کارگیری همزمان این دو منبع تجدیدپذیر در شهر موردنظر تصمیم درستی بوده است. با توجه به اینکه بخش اعظم (۷۳/۴ درصد) الکتریسیته در واحد ترکیبی بهینه توسط صفحات خورشیدی تأمین می‌شود، مورد انتظار است که نتایج این واحد به نتایج استفاده‌ی مجزا از انرژی خورشیدی نزدیک‌تر باشد. علت این مسئله از یک سو فراوانی انرژی خورشیدی در نمونه‌ی پژوهشی موردنظر و از سوی دیگر قیمت بالای توربین‌های بادی است. البته این فراوانی و تفاوت قیمت موجب نشده است تا استفاده‌ی مجزا از انرژی خورشیدی بهترین گزینه‌ی انتخابی باشد.

نتیجه‌های تحلیل حساسیت

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب تأثیر قیمت دستگاه‌های کلیدی بر هزینه‌ی خالص فعلی و هزینه‌ی ترازشده‌ی هیدروژن را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که هزینه‌های صفحات خورشیدی و الکترو لایزرها به ترتیب بیشترین اثر را بر هزینه خالص فعلی و قیمت هیدروژن دارند. پس از این دو، هزینه‌های باتری‌ها و توربین‌های بادی تقریباً به صورت برابر دارای بیشترین اهمیت در اقتصاد واحد هستند.



شکل ۷ - تحلیل حساسیت هزینه‌ی خالص فعلی به هزینه‌های الکترولایزرها، صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌ها و مخازن ذخیره‌سازی



شکل ۸ - تحلیل حساسیت هزینه‌ی ترازشده‌ی هیدروژن به هزینه‌های الکترولایزرها، صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌ها و مخازن ذخیره‌سازی

جدول ۱۰ - مقایسه‌ی نتایج اقتصادی سامانه‌ی بهینه با پژوهش‌های مشابه

ردیف	منبع انرژی	مکان نمونه‌ی پژوهشی	LCOH (\$/kg)	LCOE (\$/kWh)	مرجع
۱	خورشیدی-بادی	زاهدان	۳/۵۶	۰/۱۲	پژوهش حاضر
۲	خورشیدی-بادی	خوزستان	۴/۵۹	۰/۱۲	[۲۴]
۳	خورشیدی	عربستان	۴/۳۸	۰/۱۳	[۴۸]
۴	بادی	یزد	۳/۵۶	۰/۱۲	[۴۹]
۵	بادی	افغانستان	۳/۸۹	۰/۰۵	[۵۰]
۶	خورشیدی-بادی	بندرعباس	۲/۹۹	۰/۰۶	[۵۱]
۷	خورشیدی-بادی	مصر	۳/۷۳ - ۴/۶۶	۰/۱۴ - ۰/۲۲	[۵۲]

اعتبارسنجی

مشخص نمود که هزینه‌های خالص فعلی و اولیه‌ی این واحد تجدیدپذیر به ترتیب برابر ۱/۳۸ و ۱/۱۵ B\$ هستند؛ از این رو هزینه‌های ترازشده‌ی هیدروژن و الکتریسیته معادل ۳/۵۶ \$/kg و ۰/۱۲ \$/kWh خواهند بود. در پایان سهم دستگاه‌های مختلف سامانه بر اقتصاد و افق آینده‌ی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که قیمت پایه‌ی صفحات خورشیدی و الکترولایزرها بیشترین تأثیر را بر قیمت هیدروژن سبز دارند و اجرای صنعتی این طرح به توسعه‌ی فناوری آن‌ها وابسته خواهد بود.

فهرست نمادها

نمادهای یونانی

α	ضریب جذب صفحه‌ی خورشیدی، %
α_p	ضریب دمایی صفحات خورشیدی، %/°C
η_c	بازده مبدل الکتریکی، %
η_{elec}	بازده الکترولایزر، %
η_{inv}	بازده معکوس کننده، %
$\eta_{mp,S}$	بازده صفحات خورشیدی در نقطه‌ی توان بیشینه و در شرایط استاندارد، %
η_{rec}	بازده یک سوکننده، %
θ_s	زاویه‌ی شیب، °
θ_a	زاویه‌ی سمت، °
ρ	جرم ویژه هوا در شرایط عملیاتی، kg/m ³
ρ_0	جرم ویژه هوا در شرایط استاندارد، kg/m ³
τ	ضریب عبوردهی پوشش صفحات خورشیدی، %

نمادهای انگلیسی

$C_{ann,tot}$	هزینه‌ی سالانه‌ی کلی واحد، MS/y
C_B	ظرفیت اسمی باتری، kWh
CC	هزینه‌ی سرمایه یا اولیه‌ی دستگاه‌ها، \$
C_{elec}	قیمت فروش برق به شبکه‌ی محلی، \$/kWh

برای ارزیابی بهتر اقتصاد سامانه‌ی بهینه‌سازی شده، نتایج آن در جدول ۱۰ با پژوهش‌های مشابه مقایسه شده است. مکان نمونه‌های پژوهشی انتخاب شده مربوط به شهرهای مختلف ایران (خوزستان، یزد و بندرعباس) و کشورهای عربستان، افغانستان و مصر است. همچنین نتایج مربوط به استفاده‌ی ترکیبی و یا مجزا از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد. مشخص است که منبع انرژی و میزان استفاده از آن در هر پژوهش ارتباط مستقیمی با شرایط آب و هوایی و دسترسی به انرژی‌های خورشیدی و بادی دارد. مقایسه اعداد نشان می‌دهد که هزینه‌های ترازشده‌ی هیدروژن و انرژی در پژوهش حاضر در محدوده‌ی دیگر پژوهش‌های انجام شده هستند. با توجه به اینکه ورودی‌ها و خروجی‌های این پژوهش مشابه دیگر پژوهش‌ها هستند، صحت شبیه‌سازی تولید هیدروژن و الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر تأیید می‌گردد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش امکان‌سنجی فنی و اقتصادی تولید همزمان هیدروژن و الکتریسیته از انرژی‌های خورشیدی و بادی مورد بررسی قرار گرفت. هدف تأمین نیازهای یک واحد فرایندی فرضی در شهر زاهدان است که با هیدروژناسیون دی‌اکسیدکربن، الفین‌های سبک تولید می‌کند. واحد مذکور به ۱۴۲۰ kg/h هیدروژن برای فرایند هیدروژناسیون و ۳۲ MW الکتریسیته برای تأمین گرمایش و سرمایش نیاز دارد. در این راستا عملکرد یک سامانه‌ی تجدیدپذیر شامل صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌های لیتیومی، باتری‌های وانادیومی، الکترولایزرها، مبدل‌های الکتریکی و ... توسط نرم‌افزار هومر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی آشکار نمود که سامانه‌ای با ظرفیت‌های اسمی ۴۹۵، ۱۰۴ و ۲۳ MW از صفحات خورشیدی، توربین‌های بادی و مولدهای برق دارای بهترین شرایط اقتصادی است. در این راستا سهم دستگاه‌های مذکور در تولید انرژی به ترتیب برابر ۷۳/۴، ۲۶ و ۰/۶ درصد خواهد بود. در ادامه بهینه‌سازی اقتصادی

P_{rated}	توان اسمی توربین بادی، MW	C_G	ظرفیت اسمی مولد برق گازی، kW
P_{WTG}	توان خروجی توربین بادی، kW	c_{H_2}	قیمت متداول هیدروژن، \$/kg
$P_{WTG,STP}$	توان خروجی توربین بادی در شرایط استاندارد، kW	$C_{NPC,tot}$	هزینه‌ی خالص فعلی، B\$
Q_{LT}	توان عملیاتی یک باتری، kWh	CRF	ضریب بازگشت سرمایه
Q_{thrp}	توان عملیاتی سالانه‌ی باتری‌ها، kWh/y	E_{served}	بار الکتریکی اصلی سالانه، kWh/y
R_{batt}	عمر مفید مجموعه‌ی باتری‌ها، y	f	نرخ تورم، %
$R_{batt,f}$	طول عمر یک باتری، y	f_{PV}	ضریب کاهش توان صفحات خورشیدی، %
RC	هزینه‌ی تعویض دستگاه‌ها، \$	\bar{G}_T	تابش خورشید در بازه‌ی زمانی مدنظر، kW/m ²
SOC_{min}	سطح شارژ کمینه‌ی باتری، %	$\bar{G}_{T,N}$	تابش خورشید در شرایط معیار، kW/m ² / ۰.۸
T_a	دمای محیط، °C	$\bar{G}_{T,S}$	تابش خورشید در شرایط استاندارد، kW/m ² \ ۱
$T_{a,N}$	دمای محیط در شرایط معیار، °C ۲۰	HHV _{H₂}	ارزش گرمایی بالای هیدروژن، kJ/kg
T_c	دمای سلول خورشیدی، °C	i	نرخ تنزیل یا بهره‌ی واقعی، %
$T_{c,N}$	دمای اسمی سلول خورشیدی، °C	i'	نرخ بهره‌ی اسمی، %
$T_{c,S}$	دمای سلول در شرایط استاندارد، °C ۲۵	LCOE	هزینه‌ی تراز شده‌ی انرژی، \$/kWh
U_{anem}	سرعت باد در ارتفاع اندازه‌گیری، m/s	LCOH	هزینه‌ی تراز شده‌ی هیدروژن، \$/kg
U_{hub}	سرعت باد در ارتفاع محور توربین بادی، m/s	LT	عمر مفید دستگاه‌ها، y
Y_{PV}	توان اسمی صفحات خورشیدی، kW	m_{H_2}	دبی هیدروژن تولیدی در الکترولایزر، kg/s
Z_0	زبری سطح زمین، m	$m_{H_2,ann}$	هیدروژن تولیدی سالانه‌ی واحد، kg/y
Z_{anem}	ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد، m	N	عمر مفید کل پروژه، y
Z_{hub}	ارتفاع محور توربین بادی، m	N_{batt}	تعداد باتری‌ها
		OM	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری دستگاه‌ها، \$/y
		P_{elec}	برق اعمال شده به الکترولایزر، kW
		P_{in}	توان ورودی مبدل الکتریکی، kW
		P_{out}	توان خروجی مبدل الکتریکی، kW
		P_{PV}	توان خروجی صفحات خورشیدی، kW

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

مراجع

- [1] [CO₂ Emissions in 2022](#), International Energy Agency (IEA), Paris, France, Report (License: CC BY 4.0) (2023).
- [2] Su S.B., He C., Shu Y., Chen Q.L., Zhang B.J., [Total Site Modeling and Optimization for Petrochemical Low-Carbon Retrofits using Multiple CO₂ Emission Reduction Methods](#), *Journal of Cleaner Production*, **383**: 135450 (2023).
- [3] Centi G., Iaquaniello G., Perathoner S., [Can We Afford to Waste Carbon Dioxide? Carbon Dioxide as a Valuable Source of Carbon for the Production of Light Olefins](#), *ChemSusChem*, **4(9)**: 1265-1273 (2011).
- [4] Martin M., [Optimal Year-Round Production of DME from CO₂ and Water Using Renewable Energy](#), *Journal of CO₂ Utilization*, **13**: 105-113 (2016).

- [۵] آریان‌فر، لیلی؛ یاری، مرتضی؛ عبدی اقدم، ابراهیم، تحلیل فنی - اقتصادی چرخه‌ی تولید توان و گرما با منابع انرژی استان اردبیل، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳): ۳۶: ۱۶۵ تا ۱۸۵ (۱۳۹۶).
- [۶] موسوی، ولی‌اله؛ فرزانه‌گرد، محمود؛ احمدی، محمدحسین، تحلیل انرژی و انرژی - اقتصادی سیکل رانکین آلی با محرک انرژی خورشیدی با استفاده از مواد تغییر فاز در مخزن ذخیره‌سازی، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳): ۳۹: ۲۴۷ تا ۲۵۷ (۱۳۹۹).
- [7] Chauvy R., Dubois L., Lybaert P., Thomas D., De Weireld G., [Production of Synthetic Natural Gas from Industrial Carbon Dioxide](#), *Applied Energy*, **260**: 114249 (2020).
- [8] Do T.N., Kim J., [Green C2-C4 Hydrocarbon Production Through Direct CO₂ Hydrogenation with Renewable Hydrogen: Process Development and Techno-Economic Analysis](#), *Energy Conservation and Management*, **214**: 112866 (2020).
- [۹] لطفی، پوریا؛ ملکی، اکبر؛ شهرکی شهید آبادی، رضا؛ احمدی، محمدحسین، پتانسیل‌سنجی مزرعه‌های خورشیدی با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در ایران، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، (۳): ۴۰: ۲۵۱ تا ۲۷۱ (۱۴۰۰).
- [10] Nazerifard R., Khani L., Mohammadpourfard M., Mohammadi-Ivatloo B., Akkurt G.G., [Design and Thermodynamic Analysis of a Novel Methanol, Hydrogen, and Power Trigeneration System Based on Renewable Energy and Flue Gas Carbon Dioxide](#), *Energy Conversion and Management*, **233**: 113922 (2021).
- [11] Siddiqui O., Dincer I., [Optimization of a New Renewable Energy System for Producing Electricity, Hydrogen and Ammonia](#), *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **44**: 101023 (2021).
- [12] Sherwin E.D., [Electrofuel Synthesis from Variable Renewable Electricity: An Optimization-Based Techno-Economic Analysis](#), *Environmental Science and Technology*, **55(11)**: 7583-7594 (2021).
- [13] [HOMER Pro Software](#), HOMER Energy, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [14] Rezaei M., Khalilpour K.R., Jahangiri M., [Multi-Criteria Location Identification for Wind/Solar Based Hydrogen Generation: The Case of Capital Cities of a Developing Country](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **45(58)**: 33151-33168 (2020).
- [15] Strunge T., Naims H., Ostovari H., Olfe-Kräutlein B., [Priorities for Supporting Emission Reduction Technologies in the Cement Sector – A Multi-Criteria Decision Analysis of CO₂ Mineralisation](#), *Journal of Cleaner Production*, **340**: 130712 (2022).
- [16] Bhakta S., Mukherjee V., [Techno-Economic Viability Analysis of Fixed-Tilt and Two Axis Tracking Stand-Alone Photovoltaic Power System for INDIAN BIO-Climatic Classification Zones](#), *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **9(1)**: 015902 (2017).
- [17] Rezk H., Alghassab M., Ziedan H.A., [An Optimal Sizing of Stand-Alone Hybrid PV-Fuel Cell-Battery to Desalinate Seawater at Saudi NEOM City](#), *Processes*, **8(4)**: 382 (2020).

- [18] Pal P., Mukherjee V., [Off-Grid Solar Photovoltaic/Hydrogen Fuel Cell System for Renewable Energy Generation: An Investigation Based on Techno-Economic Feasibility Assessment for the Application of End-User Load Demand in North-East India](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **149**: 111421 (2021).
- [19] Salameh T., Sayed E.T., Abdelkareem M.A., Olabi A.G., Rezk H., [Optimal Selection and Management of Hybrid Renewable Energy System: Neom City as a Case Study](#), *Energy Conservation and Management*, **244**: 114434 (2021).
- [20] Elsaraf H., Jamil M., Pandey B., [Techno-Economic Design of a Combined Heat and Power Microgrid for a Remote Community in Newfoundland Canada](#), *IEEE Access*, **9**: 91548-91563 (2021).
- [21] Bhagat K., Ye S., Dai C., Lian J., Bhayo M.Z., [A Techno-Economic Investigation of Wind Power Potential in Coastal Belt of Sindh: Preventing Energy Crisis in Pakistan](#), *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **16**: 2893-2907 (2021).
- [22] [Siemens SWT-3.15-142](#), The Wind Power (Wind Energy Market Intelligence) (2018).
- [23] Vaziri Rad M.A., Ghasempour R., Rahdan P., Mousavi S., Arastounia M., [Techno-Economic Analysis of a Hybrid Power System Based on the Cost-Effective Hydrogen Production Method for Rural Electrification, a Case Study in Iran](#), *Energy*, **190**: 116421 (2020).
- [24] Xia T., Rezaei M., Dampage U., Alharbi S.A., Nasif O., Borowski P.F., Mohamed M.A., [Techno-Economic Assessment of a Grid-Independent Hybrid Power Plant for Co-Supplying a Remote Micro-Community with Electricity and Hydrogen](#), *Processes*, **9(8)**: 1375 (2021).
- [25] Gokcek M., Kale C., [Techno-Economical Evaluation of a Hydrogen Refuelling Station Powered by Wind-PV Hybrid Power System: A Case Study for Izmir-Cesme](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **43(23)**: 10615-10625 (2018).
- [26] Dincer I., ["Comprehensive Energy Systems"](#), *Elsevier Inc.*, **4**: 985-1025, (2018).
- [27] Maestre V.M., Ortiz A., Ortiz I., [Challenges and Prospects of Renewable Hydrogen-Based Strategies for Full Decarbonization of Stationary Power Applications](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **152**: 111628 (2021).
- [28] Carmo M., Fritz D.L., Mergel J., Stolten D., [A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **38(12)**: 4901-4934 (2013).
- [29] Chaichan W., Waewsak J., Nikhom R., Kongruang C., Chiwamongkhonkarn S., Gagnon Y., [Optimization of Stand-Alone and Grid-Connected Hybrid Solar/Wind/Fuel Cell Power Generation for Green Islands: Application to Koh Samui, Southern Thailand](#), *Energy Reports*, **8(9)**: 480-493 (2022).
- [30] Ayodele T.R., Mosetlhe T.C., Yusuff A.A., Ntombela M., [Optimal Design of Wind-Powered Hydrogen Refuelling Station for Some Selected Cities of South Africa](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **46(49)**: 24919-24930 (2021).

- [31] Hosseini Dehshiri S.S., [A New Application of Multi Criteria Decision Making in Energy Technology in Traditional Buildings: A Case Study of Isfahan](#), *Energy*, **240**: 122814 (2022).
- [32] Abdul-Wahab S.A., Charabi Y., Al-Mahruqi A.M., Osman I., [Design and Evaluation of a Hybrid Energy System for Masirah Island in Oman](#), *International Journal of Sustainable Engineering*, **13(4)**: 288-297 (2020).
- [33] Kasaeian A., Rahdan P., Vaziri Rad M.A., Yan W.M., [Optimal Design and Technical Analysis of a Grid-Connected Hybrid Photovoltaic/Diesel/Biogas Under Different Economic Conditions: A Case Study](#), *Energy Conversion and Management*, **198**: 111810 (2019).
- [34] Podder A.K., Supti S.A., Islam S., Malvoni M., Jayakumar A., Deb S., Kumar N.M., [Feasibility Assessment of Hybrid Solar Photovoltaic-Biogas Generator Based Charging Station: A Case of Easy Bike and Auto Rickshaw Scenario in a Developing Nation](#), *Sustainability*, **14(1)**: 166 (2022).
- [35] Umer Khan M., Hassan M., Nawaz M.H., Ali M., Wazir R., [Techno-Economic Analysis of PV/Wind/Biomass/Biogas Hybrid System for Remote Area Electrification of Southern Punjab \(Multan\), Pakistan using HOMER Pro](#), *Arth International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, Islamabad, Pakistan, 10-12 September (2018).
- [36] Huang Z., Mu A., [Research and Analysis of Performance Improvement of Vanadium Redox Flow Battery in Microgrid: A Technology Review](#), *International Journal of Energy Research*, **45(10)**: 14170-14193 (2021).
- [37] Das B.K., Hasan M., Das P., [Impact of Storage Technologies, Temporal Resolution, and PV Tracking on Stand-Alone Hybrid Renewable Energy for an AUSTRALIAN REMOTE AREA Application](#), *Renewable Energy*, **173**: 362-380 (2021).
- [38] Mviri F.S.M., [Battery Storage Systems In Electric Power Grid: A Review](#), *Journal of Physics: Conference series*, **2276**: 012016 (2022).
- [39] Kumar P., Pal N., Sharma H., [Techno-Economic Analysis of Solar Photo-Voltaic/Diesel Generator Hybrid System using Different Energy Storage Technologies for Isolated Islands of India](#), *Journal of Energy Storage*, **41**: 102965 (2021).
- [40] Kebede A.A., Coosemans T., Messagie M., Jemal T., Behabtu H.A., Mierlo J.V., Berecibar M., [Techno-Economic Analysis of Lithium-Ion and Lead-Acid Batteries in Stationary Energy Storage Application](#), *Journal of Energy Storage*, **40**: 102748 (2021).
- [41] Saini P., Gidwani L., [An Environmental Based Techno-Economic Assessment for Battery Energy Storage System Allocation in Distribution System using New Node Voltage Deviation Sensitivity Approach](#), *Electrical Power and Energy Systems*, **128**: 106665 (2021).
- [42] Gillessen B., Heinrichs H.U., Stenzel P., Linssen J., [Hybridization Strategies of Power-to-Gas Systems and Battery Storage using Renewable Energy](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **42(19)**: 13554-13567 (2017).

- [43] Asamoah S.S., Gyamfi S., Uba F., Mensah G.S., [Comparative Assessment of a Stand-Alone and a Grid-Connected Hybrid System for a Community Water Supply System: A Case Study of Nankese Community in the Eastern Region of Ghana](#), *Scientific African*, **17**: e01331 (2022).
- [44] Rezaei M., Dampage U., Das B.K., Nasif O., Borowski P.F., Mohamed M.A., [Investigating the Impact of Economic Uncertainty on Optimal Sizing of Grid-Independent Hybrid Renewable Energy Systems](#), *Processes*, **9(8)**: 1468 (2021).
- [45] [Guaranteed Electricity Purchase Tariff](#), *Satba: Renewable Energy and Energy Efficiency Organization of Iran, Iran's Ministry of Energy*, Progress Report 1400/15224/20/100 (2021).
- [46] [United States Bank Lending Rate](#), *CEIC data*, Progress Report 05/31/2022 (2022).
- [47] [US Inflation Rate](#), *Ycharts*, Progress Report 05/31/2022 (2022).
- [48] Rezk H., Kanagaraj N., Al-Dhaifallah M., [Design and Sensitivity Analysis of Hybrid Photovoltaic-Fuel-Cell-Battery System to Supply a Small Community at Saudi NEOM City](#), *Sustainability*, **12(8)**: 3341 (2020).
- [49] Almutairi K., Hosseini Dehshiri S.S., Hosseini Dehshiri S.J., Mostafaeipour A., Issakhov A., Techato K., [A Thorough Investigation for Development of Hydrogen Projects from Wind Energy: A Case Study](#), *International Journal of Hydrogen Energy*, **46(36)**: 18795-18815 (2021).
- [50] Almutairi K., Hosseini Dehshiri S.S., Hosseini Dehshiri S.J., Mostafaeipour A., Jahangiri M., Techato K., [Technical, Economic, Carbon Footprint Assessment, and Prioritizing Stations for Hydrogen Production using wind Energy: A Case Study](#), *Energy Strategy Reviews*, **36**: 100684 (2021).
- [51] Esmailion, F., Soltani M., Nathwani J., Al-Haq A., [Design, Analysis, and Optimization of a Novel Poly-Generation System Powered by Solar and Wind Energy](#), *Desalination*, **543**:116119 (2022).
- [52] Nasser M., Megahed T.F., Ookawara S., Hassan H., [Performance Evaluation of PV Panels/Wind Turbines Hybrid System for Green Hydrogen Generation and Storage: Energy, Exergy, Economic, and Enviroeconomic](#), *Energy Conversion and Management*, **267**:115870 (2022).