

شبهه سازی و بهینه سازی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر جهت تامین انرژی الکتریکی و گرمایی

دانشکده فنی و مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان

محمدشکی^۱، سیدمحمد جواد حسینی^{۲*}، و مهدی عیسی پور^۳^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان؛ ایران^۲ دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان؛ ایران^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه کلگری، کلگری، آلبرتا؛ کانادا

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

چکیده

امروزه با توجه به افزایش جمعیت، مصرف روزافزون برق و استفاده گسترده از تجهیزات پیشرفته، نیاز به انرژی روز به روز در حال افزایش است. آسیب‌های زیست محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی، به همراه پیامدهای اقتصادی و سیاسی مرتبط در کشورهای سراسر جهان، منجر به یافتن منابع انرژی جایگزین شده است. یکی از مهمترین مزایای منابع انرژی تجدیدپذیر این است که می‌توانند دیگر منابع انرژی ترکیب شده و سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی را ایجاد کنند. سیستم‌های ترکیبی تجدیدپذیر تجهیزاتی هستند که بیش از یک منبع تولید انرژی کار می‌کنند تا بار الکتریکی و گرمایی مورد نیاز را تامین نمایند. در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار هومر برای تامین انرژی دانشکده فنی دانشگاه گلستان واقع در شهر گرگان یک سیستم ترکیبی تجدیدپذیر طراحی شده است. این سیستم با استفاده از پنل خورشیدی، توربین بادی، دیزل ژنراتور و با مشارکت شبکه برق مورد نیاز مجموعه را تامین می‌کند؛ همچنین با استفاده از بویلر و کنترل‌کننده گرما، گرمایش مورد نیاز سیستم تامین می‌شود. نتایج حاکی از آن است که سیستم بهینه دارای هزینه فعلی کل ۲۱۴۲۶۶ دلار، هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت انرژی برابر با ۰/۰۱۵۹ دلار، سهم مشارکت منابع تجدیدپذیر ۷۱/۷٪ است؛ همچنین نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که با افزایش نرخ تورم به ۲۰٪ مقدار هزینه فعلی کل پروژه نیز ۱۶٪ افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: سیستم ترکیبی تجدیدپذیر؛ انرژی خورشیدی؛ انرژی پاک؛ تامین همزمان برق و گرما؛ انرژی تجدیدپذیر

Simulation and Optimization of a Hybrid Renewable System for Providing Electrical and Thermal Energy at the Faculty of Engineering, Golestan University

Mohammad Shakki¹, Seiyed Mohamad Javad Hosseini^{2,*}, Mehdi Eisapour³

¹ M.S. Student, Mech. Eng., Golestan Univ., Gorgan, Iran

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Golestan Univ., Gorgan, Iran

³ Ph.D. Student, Chemi. and Petrol. Eng., University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada

Abstract

The energy demand is growing daily due to the growing population, rising electricity consumption, and widespread usage of advanced equipment. The environmental damage caused by fossil fuels and their economic and political implications in countries worldwide has prompted a quest for alternative energy sources. One of the key advantages of renewable energy sources is their ability to combine with other energy sources to create hybrid renewable energy systems. Hybrid renewable systems are devices that utilize more than one energy generation source to fulfill the required electrical and thermal loads. In this study, a hybrid renewable energy system has been designed for the Faculty of Engineering of Golestan University located in Gorgan City, utilizing Homer software. This system, which includes solar panels, wind turbines, diesel generators and grid power integration, fulfills the energy needs of the facility. Additionally, heating needs are supplied using a boiler and heat controller. The results indicate that the optimized system has a total current cost of \$214,266, with a cost of energy production per kilowatt-hour amounting to 0.0159 \$ and the renewable resource contribution is 71.7%. Moreover, the sensitivity analysis reveals that when the inflation rate surges to 20%, the current cost of the whole project ascends to 16 %.

Keywords: Hybrid Renewable System; Solar Energy; Clean Energy; Simultaneous Electricity and Heat Supply; Renewable Energy

۱- مقدمه

امروزه انرژی یک منبع کلیدی برای توسعه اجتماعی و اقتصادی هر کشوری است. در واقع توجه به مسئله انرژی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل برای جامعه جهانی ضروری است. یکی از چالش‌هایی که در دهه‌های آینده با آن مواجه خواهیم بود، گذار اقتصاد جهانی و انرژی به سمت پایداری است. در سال‌های اخیر، توسعه انرژی در کشورها و صنایع مختلف به سمت صرفه‌جویی در انرژی و کاهش کربن حرکت می‌کند [۱، ۲].

کربن زدایی از شبکه برق با دور شدن از سوخت‌های فسیلی و حرکت به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مبارزه با تغییرات آب و هوایی امری ضروری است. انرژی که عمدتاً از سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید، حدود ۸۰ درصد از مصرف جهانی را تشکیل می‌دهد. در مقابل، تنها ۱۶ درصد از جایگزین‌های کم کربن مانند انرژی‌های تجدیدپذیر و انرژی هسته‌ای سرچشمه می‌گیرد. احتراق سوخت فسیلی مسئول انتشار حدود ۳۴ گیگاتن دی اکسید کربن در سال است؛ در نتیجه به طور قابل توجهی به گرمایش جهانی کمک می‌کند [۳-۵]. علاوه بر این، انرژی مصارف تولیدی مانند کسب و کارهای کوچک مقیاس، کشاورزی و صنعت را پشتیبانی می‌کند که منجر به افزایش بهره‌وری و بهبود معیشت می‌شود.

پس از انقلاب صنعتی، در دهه‌های اخیر مصرف انرژی به طور چشمگیری افزایش یافت که این امر منجر به اتمام منابع فسیلی مانند نفت و گاز طبیعی می‌شود. با توجه به افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، ذخایر این سوخت‌ها رو به اتمام است و پیش‌بینی می‌شود که عمر این ذخایر برای ذغال سنگ ۱۱۴ سال، برای گاز طبیعی ۵۲ و برای نفت ۵۰ سال باشد. اگرچه که این پیش‌بینی‌ها به عوامل مختلفی از جمله، میزان تقاضا انرژی، الگوی مصرف، تکنولوژی استخراج و در دسترس بودن منابع بستگی دارد؛ لذا بعنوان پایه و اساس فعالیت‌های انسانی، انرژی بمانند پیشرفت‌های علمی و فناوری توسعه اقتصاد جهانی را پشتیبانی می‌کند. در حال حاضر، روش تولید برق تحت سلطه تولید برق حرارتی است، در این میان روش‌های دیگر تولید برق مانند تولید برق خورشیدی، تولید برق

بادی، تولید برق آبی، تولید انرژی زیست توده و غیره پدیدار شده است [۶-۸].

سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی^۱ که از دو یا چند منبع انرژی بهره می‌برد، به عنوان راه‌حلی نویدبخش جهت دستیابی به تولید انرژی پایدار و قابل اعتماد شناخته می‌شود. این سیستم‌ها مزایای بی‌شماری را در مقایسه با سیستم‌های انرژی مستقل، از جمله افزایش بهره‌وری انرژی، افزایش امنیت انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. یکی از مزایای کلیدی سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی توانایی آنها در ارائه انرژی ثابت و پایدار است. با ترکیب چند منبع انرژی می‌توان محدودیت‌های مربوط به منابع انرژی را کاهش داده و منبع تولید انرژی قابل اعتمادی را ایجاد نمود. مثلاً یک سیستم ترکیبی متشکل از انرژی باد و خورشید می‌تواند انرژی را در زمان‌های باد کم و یا تابش کم خورشیدی فراهم کند.

برنامه هومر به طور گسترده‌ای به عنوان یک ابزار مناسب برای طراحی و ارزیابی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی در نظر گرفته می‌شود. این نرم‌افزار به کاربران اجازه می‌دهد تا مشخصاتی مانند قیمت‌گذاری قطعات، پروفیل بار الکتریکی، اطلاعات منابع انرژی و محدودیت‌های اقتصادی را برای به دست آوردن خروجی‌های مفید را وارد کنند. بر اساس مشخصات بار منحصر به فرد، این خروجی‌ها شامل اندازه ایده-آل اجزا مختلف مانند پنل‌های فتوولتائیک، توربین بادی، باتری، دیزل ژنراتور و مبدل‌های جریان الکتریکی هستند. هومر همچنین آمارهای مهمی مانند هزینه کل پروژه، تولید و مصرف انرژی، هزینه تولید انرژی، انرژی مازاد، و بهره‌وری انرژی را می‌دهد. قابلیت‌های برنامه تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا با انتخاب آگاهانه و بهینه‌سازی طرح سیستم‌های ترکیبی، راه‌حل‌های مقرون به صرفه و کارآمدی را اتخاذ نمایند [۹].

۱-۱- پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر مطالعات متعددی برای بررسی و طراحی بهینه و امکان‌سنجی مالی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی انجام شده است. وندوتی و همکاران [۱۰] به شبیه‌سازی نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر بصورت مستقل از شبکه جهت تامین برق سه روستا در هند پرداختند. مهم‌ترین اهداف مطالعاتی آنان کاهش هزینه کلی پروژه، بار برآورده نشده،

¹ Hybrid Renewable Energy System (HRES)

پذیرفت و خروجی‌های آن از جمله هزینه انرژی تولیدی به ازای هر کیلووات‌ساعت، بازگشت سرمایه و کمبود بار مورد بررسی قرار گرفت. سیستم ترکیبی تجدیدپذیر مورد نظر از پنل خورشیدی، توربین بادی و باتری تشکیل می‌شود. میانگین بار مصرفی روزانه برابر با $3580.75/44$ کیلووات‌ساعت در روز و اوج بار برابر با $18637/35$ کیلووات است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم بهینه متشکل از $17/4$ مگاوات پنل خورشیدی، ۴ عدد توربین بادی $4/2$ مگاواتی و باتری ذخیره‌سازی به ظرفیت $67/4$ مگاوات‌ساعت می‌باشد. این سیستم دارای هزینه کلی ۳۶۷ میلیون دلاری و هزینه تولید انرژی 0.565 دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت است؛ همچنین بازگشت سرمایه آن $12/79$ سال و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ۲۴۵ میلیون دلار است. ریاحت سیاح و همکاران [۱۴] با هدف تامین الکتریسیته دانشکده‌ای واقع در اندونزی به طراحی و بهینه‌سازی نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر متصل به شبکه با استفاده از پنل خورشیدی و توربین بادی پرداختند. در این روش ابتدا مشخصات مکان مورد نظر و سپس متوسط تقاضای بار، تابش روزانه، شاخص شفافیت، دمای روزانه و ترکیب منابع تجدیدپذیر بررسی شد. در شبیه‌سازی‌های اولیه ابتدا سیستم ذخیره‌سازی در نظر گرفته شد، ولی بعلاوه بالا رفتن شاخص‌های مالی، سیستم بدون ذخیره‌سازی شبیه‌سازی گردید. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که 62% برق موردنیاز از پنل خورشیدی و 20% آن از توربین بادی تامین می‌گردد. سیستم بهینه متشکل از 682 کیلووات پنل خورشیدی، ۱ عدد توربین 100 کیلوواتی و 431 کیلووات مبدل الکتریکی است. هزینه کلی این سیستم برابر با 829692 دلار و هزینه انرژی تولیدی برابر با 0.44 دلار به ازای هر کیلووات‌ساعت و بازگشت سرمایه $16/9$ سال است. هیام النجار و همکاران [۱۵] جهت تامین برق بخشی از واحدهای مسکونی غزه با استفاده از پنل‌های خورشیدی، دیزل ژنراتور و زیست‌توده به شبیه‌سازی نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر پرداختند. بار مصرفی واحدهای مسکونی دارای مقدار میانگین روزانه به اندازه 1074 کیلووات ساعت در روز و اوج بار $84/5$ کیلوواتی است. نتایج حاکی از آن است که سیستم بهینه متشکل از 150 کیلووات پنل خورشیدی، 50 کیلووات مبدل الکتریکی، یک ژنراتور بیوگاز 25 کیلوواتی و یک ژنراتور بیوگاز 50 کیلوواتی به‌همراه 400000 کیلووات برق شبکه است. این سیستم دارای ارزش

هزینه انرژی تولیدی و انتشار آلاینده‌ها با استفاده از نرم افزار هومر و الگوریتم ژنتیک است؛ همچنین روی بهینه‌ترین حالت آنالیز حساسیت صورت پذیرفت تا تاثیرات سرعت باد و هزینه سوخت زیست‌توده بر روی پاسخ بررسی شود. در نهایت مقایسه‌ای بین پاسخ بدست آمده از شبیه‌سازی هومر و پاسخ الگوریتم ژنتیک صورت پذیرفت. مطابق با نتایج بدست آمده ترکیب پنل خورشیدی، زیست توده، بیوگاز، پیل سوختی و باتری بهترین حالت برای نیروگاه است که در این شرایط مقدار بار برآورده نشده برابر با 0.16% و هزینه انرژی برابر با 0.16 دلاربرکیلووات‌ساعت محاسبه گردید. ژانگ و همکاران [۱۱] نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر جهت تامین انرژی الکتریکی یک کارگاه صنعتی واقع در ایران با استفاده از پنل خورشیدی، توربین بادی، دیزل ژنراتور و باتری را شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان می‌دهد با توجه به بادخیز بودن منطقه مورد مطالعه، انرژی بادی سهم بسزایی در تامین برق دارد. مطابق با نتایج بدست آمده بهینه‌ترین ترکیب نیروگاه متشکل از 13 کیلووات دیزل ژنراتور، 1 کیلووات پنل خورشیدی، 2 عدد توربین بادی 3 کیلووات، $6/13$ کیلووات مبدل الکتریکی و 27 رشته باتری 1 کیلوواتی می‌باشد که با این شرایط هزینه انرژی تولیدی برابر با 0.46 دلاربرکیلووات‌ساعت به دست می‌آید. کمال شارما و همکاران [۱۲] بمنظور تامین برق یک روستا با 450 خانوار واقع در هند به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر پرداختند. در ابتدا به بررسی پتانسیل منابع تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، زیست توده و ضایعات کشاورزی پرداخته شد و سپس با استفاده از نرم‌افزار هومر نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر شبیه‌سازی گردید؛ همچنین تدابیری جهت تامین انرژی پمپ خورشیدی جهت آبیاری و تامین آب شرب روستا و همچنین تامین روشنایی معابر با استفاده از پنل خورشیدی اندیشیده و ارایه گردید. نتایج حاکی از آن است که در بهینه‌ترین حالت هزینه کلی پروژه برابر با 76837 دلار و هزینه انرژی تولیدی برابر با 0.32 دلار بر کیلووات‌ساعت است. آنا ترزا و همکاران [۱۳] به بررسی تامین برق شهرکی در شرق برزیل با استفاده از نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر مستقل از شبکه پرداختند. روش آنان شامل انتخاب منابع انرژی، مکان‌یابی، اکتساب داده‌های تولید و عملیاتی، مدل سازی و شبیه‌سازی سیستم در سناریوهای مختلف و تحلیل مالی است. شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار هومر صورت

سیستم با ترکیب ۵۲۲ کیلووات پنل خورشیدی، ۱۵۰ کیلووات الکترولایزر، ۲۰ کیلووات پیل سوختی، مخزن هیدروژن با ظرفیت ۲۰۰ کیلوگرم، ۱۸/۶ کیلووات مبدل و ۱۵۹ باتری بهینه‌ترین حالت برای واحد مسکونی است. پائول و همکاران [۱۹] جهت تامین برق یک واحد درمانی در کشور عمان، به شبیه‌سازی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر با استفاده از پنل فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری پرداختند. نتایج حاکی از آن است که سیستم بهینه متشکل از پنل فتوولتائیک و باتری بوده که ارزش کلی آن ۷۰۲۸۲۸ دلار و هزینه انرژی تولیدی آن ۱/۰۱ دلار به ازای هر کیلووات ساعت است. این در حالی است که سیستم متشکل از پنل خورشیدی، دیزل ژنراتور و باتری دارای ارزش کلی ۷۳۹۳۳۹ و هزینه انرژی تولیدی ۱/۰۶ دلار به ازای هر کیلووات ساعت است.

در مطالعه حاضر تامین گرما و برق دانشکده فنی دانشگاه گلستان با ترکیب منابع تجدیدپذیر و فسیلی بررسی می‌شود. یکی از نوآوری‌های این مطالعه استفاده از نرم‌الایز کرو مصرفی روز تعطیل و روز کاری برای کاربرد خاص مورد نظر است که منجر به افزایش دقت محاسبه بار مصرفی ساعتی برق و گرما می‌شود. از طرفی تامین همزمان گرما با بویلر و انرژی الکتریکی مازاد نیز دیگر نوآوری مطالعه حاضر بود. از طرفی طرح تشویق حذف آلاینده و در نظر گرفتن تاثیر آن بر پارامترهای اقتصادی دیگر نوآوری طرح حاضر است.

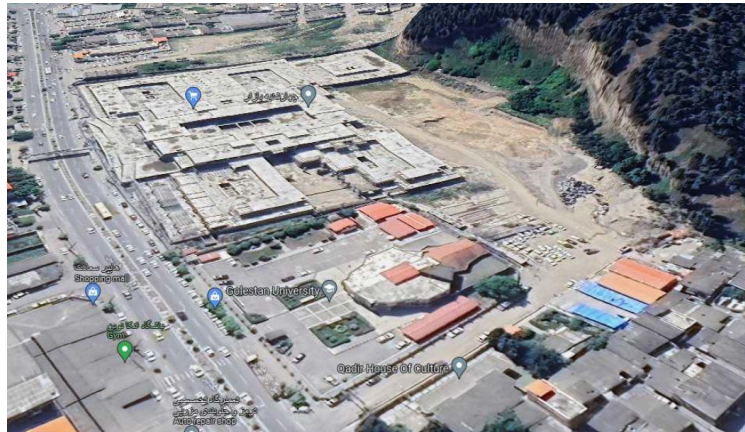
۲- مواد و روش‌ها

در این بخش به بررسی مشخصات مورد مطالعاتی، بار الکتریکی مصرفی، پتانسیل منابع تجدیدپذیر و محاسبه و روش مدلسازی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر پرداخته می‌شود.

۲-۱- مورد مطالعاتی

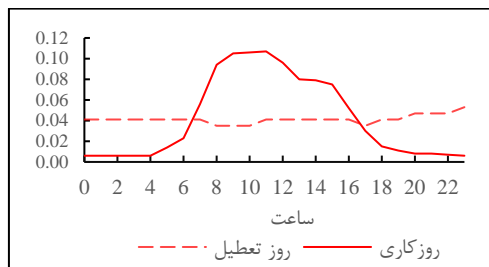
دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه گلستان در شهر گرگان به مختصات جغرافیایی $36/83^{\circ}$ شمالی و $54/48^{\circ}$ شرقی واقع شده‌است. دانشکده مورد نظر شامل یک ساختمان سه طبقه متشکل از دفاتر، کلاس، آزمایشگاه، نمازخانه و سالن همایش است. ساعت کاری دانشکده با توجه به کاربرد آن از ساعت ۸ صبح الی ۱۸ عصر است. همانطور که در شکل-۱

کلی ۲/۳ میلیون دلار و هزینه برق تولیدی ۰/۴۳۸ دلار بر کیلووات ساعت است. پوجاری هریش کومار و همکاران [۶] به شبیه‌سازی نیروگاه ترکیبی تجدیدپذیر برای تامین برق روستایی واقع در هند پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم بهینه متشکل از ۴ توربین باد ۸۰۰ کیلوواتی، الکترولایزر ۱۰۰ کیلوواتی، مخزن هیدروژن ۱۰۰ کیلوگرمی، ۷۳۴ کیلووات مبدل الکتریکی و ۵۰۰ واحد باتری ۵۰۰ واتی است. این سیستم که ۱۰۰٪ از منابع تجدیدپذیر تامین می‌شود، دارای ارزش کلی ۵/۲۱ میلیون دلار و هزینه انرژی تولیدی ۰/۲۵ دلار در هر کیلووات ساعت است. نیهات [۱۶] به بررسی تامین برق منطقه‌ای مسکونی در استان ازبکستان ترکیه با استفاده از توربین بادی و پنل خورشیدی بصورت متصل به شبکه پرداخت. بار مصرفی مورد نظر دارای مقدار میانگین ۲۴۴۶۰۰ کیلووات ساعت در روز و اوج بار ۶۲۷۲۶/۹ کیلووات است. نتایج حاکی از آن است که سیستم بهینه دارای ۹۵۴ کیلووات پنل خورشیدی و ۳۴ عدد توربین بادی و بدون محدودیت فروش به شبکه بوده و دارای ارزش کلی به مقدار ۵۲/۳ میلیون دلار است. منصور و همکاران [۱۷] به بررسی تامین برق یک واحد آموزشی در پاکستان با ترکیب‌های متفاوت از صفحات فتوولتائیک، توربین بادی و پیل سوختی به صورت متصل به شبکه و مستقل از شبکه پرداختند. همچنین بمنظور دستیابی به شرایط اقتصادی بهینه جهت تامین بار مصرفی ۰/۹ مگاوات ساعت در روز، آنالیز حساسیت صورت پذیرفت. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که در سیستم متصل به شبکه مقدار ارزش کلی پروژه بین ۱/۵ تا ۶/۸ میلیون دلار و ارزش انرژی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳۷ دلار در هر کیلووات ساعت است. عبدالمالکی و همکاران [۱۸] به بررسی و طراحی یک سیستم ترکیبی تجدیدپذیر برای تامین بار الکتریکی مصرفی یک واحد مسکونی و یک آپارتمان واقع در آمریکای شمالی با استفاده از صفحات فتوولتائیک، الکترولایزر و پیل سوختی پرداختند. در این مطالعه سه سیستم صفحات فتوولتائیک/باتری، صفحات فتوولتائیک/هیدروژن و صفحات فتوولتائیک/باتری/هیدروژن با استفاده از نرم‌افزار هومر شبیه سازی و بهینه سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد که می‌توان باتری با ظرفیت بالا را جایگزین الکترولایزر و پیل سوختی نمود، اما ارزش کلی پروژه با توجه به هزینه اولیه بالای باتری‌ها، افزایش چشمگیری خواهد داشت. مطالعات نشان می‌دهد که

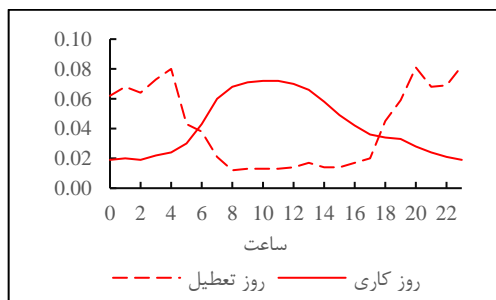


شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دانشکده فنی دانشگاه گلستان

برای محاسبه بار گرمایی دانشکده در بازه‌های ساعتی، مطابق محاسبه بار الکتریکی عمل می‌شود با این تفاوت که منحنی نرمالایز روز کاری و منحنی نرمالایز روز تعطیل مطابق با شکل ۴- بوده (۲۱) و در نهایت منحنی مصرف سالانه بار گرمایی مطابق با شکل ۵- که در ضمیمه-ب درج گردیده بدست می‌آید.



شکل ۲- منحنی نرمالایز مصرف برق



شکل ۴- منحنی نرمالایز مصرف گرما

نشان داده شده‌است، این دانشکده در مجاورت شهر و در منطقه‌ای کوهپایه‌ای قرار دارد.

۲-۲- پروفیل بار الکتریکی و گرمایی

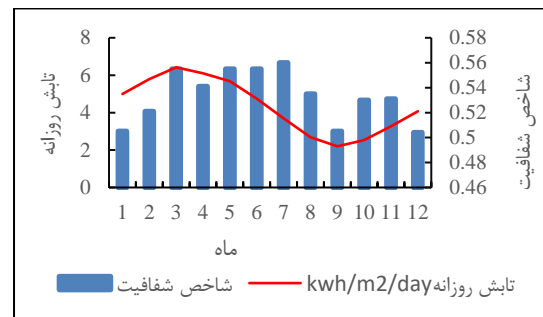
نرم‌افزار هومر قابلیت شبیه‌سازی پروفیل بار الکتریکی سالانه در بازه‌های زمانی ساعتی را دارد؛ لذا ابتدا باید بار الکتریکی ساعتی را محاسبه نمود. برای اینکار ابتدا مصرف ماهانه برق از قبوض ماهیانه استخراج می‌شود و سپس با توجه به شرایط و فرضیات، ساده‌سازی انجام شده و مقادیر روزانه به دست می‌آید. سپس با اعمال نرمالایز کرو^۱ در مقدار روزانه می‌توان پروفیل بار ساعتی را محاسبه نمود. نرمالایز کرو نموداری است که نشان می‌دهد، در هر ساعت چه نسبتی از بار روزانه مصرف می‌شود [۲۰].

با توجه به اینکه ساختمان دانشکده تنها کاربری آموزشی دارد، ساعت کاری از ۸ صبح شروع شده و در ساعت ۱۸ به پایان می‌رسد؛ لذا بخش قابل توجه مصرف انرژی در این ساعت بوده و در باقی ساعات مصرف انرژی کاهش چشمگیری دارد. همچنین مقدار مصرف در روزهای کاری بسیار بیشتر از روزهای تعطیل است که تاثیر بسزایی در الگوی مصرف دارد، از این رو منحنی نرمالایز روز تعطیل با منحنی نرمالایز روز کاری متفاوت است. شکل ۲- بیانگر نرمالایز کرو روز کاری و نرمالایز کرو روز تعطیل است. روز کاری و روز تعطیل با توجه به تقویم سال ۱۴۰۲ تعیین گردید و در نهایت از جمع اطلاعات روزهای کاری و تعطیل مصرف سالانه برق در بازه زمانی ساعتی مطابق با شکل ۳- در ضمیمه-الف مشخص گردید.

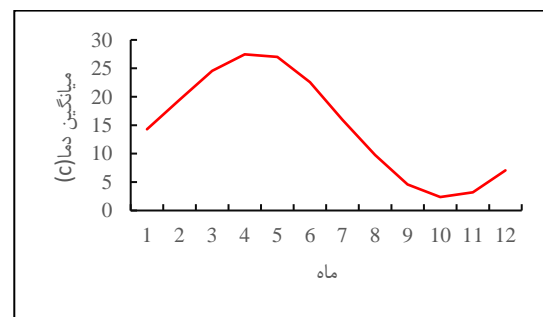
^۱ Normalize Curve

۳-۲- تابش خورشیدی

پایگاه داده هواشناسی سطحی ناسا^۱ می تواند اطلاعات مورد نیاز انرژی خورشیدی را فراهم کند [۲۲]. تابش خورشیدی روزانه، شاخص شفافیت و دمای منطقه مورد نظر برای مطالعه پتانسیل انرژی خورشیدی برای دیدن اینکه آیا استفاده از این انرژی تجدیدپذیر مقرون به صرفه است یا خیر مورد نیاز است [۲۳]. شکل ۶- تابش روزانه و شاخص شفافیت ناحیه انتخاب شده را نشان می دهد و شکل ۷- اطلاعات دمایی آن را نشان می دهد. قابل ذکر است که این اطلاعات مقادیر میانگین ماهانه در ۲۲ سال گذشته است که ناسا آنرا ثبت نموده است.



شکل ۶- نمودار تابش روزانه و شاخص شفافیت

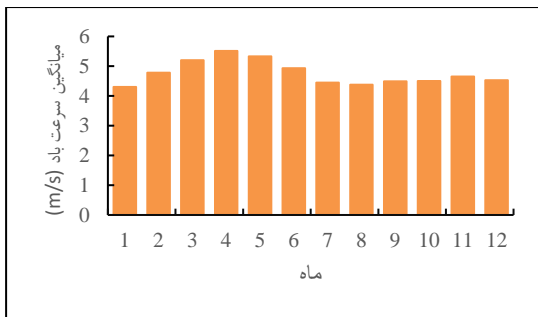


شکل ۷- نمودار دمای میانگین ماهانه

پنل خورشیدی Jinko JKM275-60 برای برداشت انرژی خورشیدی موجود استفاده شده است.

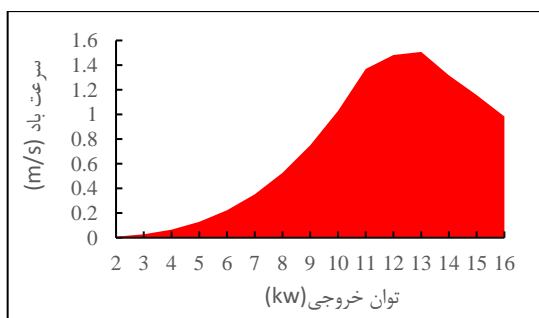
۴-۲- انرژی بادی

با استفاده از ماژول منابع نرم افزار HOMER و پایگاه داده هواشناسی ناسا، اطلاعات مربوط به انرژی باد مطابق با شکل ۸ به دست می آید. با توجه به اطلس انرژی بادی که در ضمیمه ۳- قید شده است و داده های هواشناسی سطحی ناسا، محل مورد مطالعه دارای ۱۵ ساعت اوج سرعت باد و میانگین سالانه سرعت باد این مکان در ارتفاع ۴۰ متری برابر ۴/۷۵ متر بر ثانیه است. قابل ذکر است که شکل ۸- میانگین سرعت باد به تفکیک هر ماه را نشان می دهد.



شکل ۸- نمودار میانگین سرعت باد

در این مقاله از توربین بادی مدل Aeolos-V1kW بمنظور بهره برداری از انرژی باد استفاده شد. ارتفاع هاب این توربین ۹/۹ متر بوده و منحنی توان-سرعت مطابق با شکل ۹- است.



شکل ۹- منحنی توان-سرعت باد

با توجه به اطلس انرژی خورشیدی که در ضمیمه ۳- درج شده است، ایران با توجه به موقعیت قرارگیری در عرض جغرافیایی ۲۵-۴۰ درجه شمالی دارای پتانسیل مناسبی در دریافت تابش خورشیدی است. تابش خورشیدی سالانه در ایران حدوداً ۱۸۰۰-۲۰۰۰ کیلووات ساعت بر مترمربع بوده که بالاتر از میانگین جهانی تابش خورشیدی است [۲۴]. در این مقاله از

^۱ NASA

۲-۵- شبکه

فتوولتائیک و توربین بادی را به جریان الکتریکی متناوب جهت مصرف تبدیل می‌کند و جریان الکتریکی متناوب را جهت ذخیره‌سازی در باتری به جریان الکتریکی مستقیم تبدیل می‌کند [۲۸].

۲-۸- مبدل گرمایی

کنترلر بار گرمایی^۱ به عنوان یک دیگ بخار الکتریکی عمل می‌کند و اجازه می‌دهد تا برق اضافی تولیدی به بار حرارتی تبدیل شود. کنترل کننده بار حرارتی می‌تواند نقش مهمی در تقویت بخش تجدیدپذیر در HRES ایفا کند و در نتیجه زمینه را برای آلاینده‌گی کمتر و مصرف گازوئیل فراهم کند. متأسفانه هومر جزئیات TLC را پشتیبانی نمی‌کند و تنها پارامترهای قابل تعریف هزینه و اندازه هستند که جهت دستیابی به بهینه سازی بهتر نیاز به بهبود دارند [۲۹].

۲-۹- استراتژی توزیع

استراتژی توزیع، عملیات جریان انرژی را کنترل می‌کند. مسئولیت اولیه استراتژی توزیع، تعیین زمان عملیات و توان مرجع هر جزء از سیستم یکپارچه است. دو استراتژی پیگیری بار^۲ و شارژ کردن سیکل^۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۴]. در استراتژی LF ژنراتور تنها برای تامین بار موردنیاز روشن می‌شود ولی در استراتژی CC علاوه بر تامین بار موردنیاز باتری‌ها را نیز تا مقدار موردنظر شارژ می‌نماید.

۲-۱۰- شاخص‌های اقتصادی

پس از آنکه که تمامی اجزاء معرفی و انتخاب شدند، نرم افزار هومر نیاز به هزینه اولیه، هزینه جایگزینی و هزینه نگهداری هر جزء برای شروع تجزیه و تحلیل اقتصادی پروژه و تعیین هزینه خالص فعلی و هزینه تولید انرژی به عنوان پارامترهای اقتصادی دارد. جدول-۲ تمام اطلاعات اقتصادی استفاده شده اجزا به همراه طول عمر آنها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که قیمت تجهیزات ذکر شده در جدول-۲ از سایت آمازون استحصال شده است. کل هزینه خالص فعلی یک سیستم، ارزش فعلی تمام هزینه‌هایی است که سیستم در طول عمر خود متحمل می‌شود، منهای ارزش فعلی تمام درآمدهای که در

هنگامی که سیستم به شبکه متصل است، نه تنها مازاد انرژی تولیدی خود را می‌تواند بفروشد، همچنین سیستم هر زمان که از تامین برق مورد نیاز خود ناتوان باشد، می‌تواند از برق شبکه استفاده کند. شکل-۱۰ جدول تعرفه‌های شبکه در ایران را نشان می‌دهد و جدول-۱ قیمت‌های شبکه را بیان می‌کند. قابل ذکر است که باتری‌ها مجاز به فروش برق ذخیره شده خود به شبکه و سیستم مجاز به شارژ باتری‌ها با استفاده از شبکه قدرت نیست [۲۵]. به طور متوسط ۱۰ بار قطعی برق در طول یک سال با میانگین زمان ۲ ساعت در هر قطعی وجود دارد.

جدول ۱- نرخ تعرفه‌های شبکه

تعرفه	قیمت (\$)	رنگ
کم باری	۰/۰۰۳۵	سبز
میان باری	۰/۰۰۷۰	زرد
اوج مصرف	۰/۰۱۴۰	قرمز

۲-۶- دیزل ژنراتور

در طول شب که انرژی خورشیدی در دسترس نیست یا در هر شرایطی که انرژی‌های تجدیدپذیر نمی‌توانند به اندازه کافی تولید کنند برق برای سیستم باشند، امکان استفاده از سوخت دیزل وجود دارد و می‌توان از دیزل ژنراتور برای جلوگیری از کمبود ظرفیت بهره برد، اما اینکار منجر به تولید گازهای گلخانه‌ای می‌شود [۲۶]. دیزل ژنراتور از یک موتور دیزل و یک ژنراتور برق تشکیل شده است که معمولاً به عنوان یک سیستم پشتیبان در سیستم تجدیدپذیر ترکیبی عمل می‌کند. قیمت گازوئیل برای هر لیتر در ایران برابر با ۶۰۰۰ ریال است

۲-۷- مبدل الکتریکی و باتری

باتری‌ها به سیستم کمک می‌کند تا انرژی مازاد را در زمان اوج تولید برق ذخیره کند و از آن در هنگام نیاز استفاده کند، بخصوص در سیستم‌های خارج از شبکه که پشتیبانی از برق شبکه وجود ندارد [۲۷]. مبدل جریان الکتریکی نیز برای تبدیل جریان الکتریسیته به جریان مناسب مورد نیاز استفاده می‌شود. مبدل‌ها جریان الکتریکی مستقیم تولید شده از پنل

³ Cycle Charging (CC)

¹ Thermal Load Controller

² Load Following (LF)

گلخانه‌ای و هزینه‌های خرید برق از شبکه است. درآمدها نیز شامل درآمد حاصل از اسقاط و درآمد حاصل از فروش برق به شبکه است.

طول عمر خود به دست می‌آورد. هزینه‌ها شامل هزینه‌های سرمایه اولیه، هزینه‌های جایگزینی، هزینه‌های تعمیر و نگهداری، هزینه‌های سوخت، جریمه‌های انتشار گازهای

فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
۰											
۱											
۲											
۳											
۴											
۵											
۶											
۷											
۸											
۹											
۱۰											
۱۱											
۱۲											
۱۳											
۱۴											
۱۵											
۱۶											
۱۷											
۱۸											
۱۹											
۲۰											
۲۱											
۲۲											
۲۳											

شکل ۱۰- برنامه زمانی تعرفه‌های برق شبکه

علاوه بر پارامترهای اقتصادی اجزاء، شرایط اقتصادی مانند نرخ تورم^۱ و نرخ تنزیل^۲ مهم بوده و بر نتایج تأثیر می‌گذارند. نرخ تورم و نرخ تنزیل به ترتیب برابر با ۱۵٪ و ۱۸٪ در نظر گرفته می‌شود [۲۸].

۲-۱۱- شاخص‌های فنی

اهداف توسعه پایدار^۳ اهدافی هستند که توسط سازمان ملل بمنظور دستیابی به توسعه پایدار و رویارویی با چالش‌های جهانی تعریف شدند. ۴ شاخص از ۱۷ شاخص تعریف شده در حوزه شاخص‌های فنی بهینه‌سازی انرژی می‌باشند [۳۲].
جدول ۳- بیانگر این شاخص‌ها است.

هومر کل NPC را با جمع کردن کل جریان‌های نقدی تنزیل شده در هر سال از طول عمر پروژه محاسبه می‌کند. همچنین هومر هزینه تولید انرژی را به صورت هزینه متوسط به ازای هر کیلووات‌ساعت انرژی الکتریکی مفید تولید شده توسط سیستم تعریف می‌کند [۳۰]. از طرفی هومر بازگشت سرمایه را با مقایسه یک سیستم با سیستم دیگر محاسبه می‌کند. به طور کلی، بازپرداخت بیانگر این است که چند سال طول می‌کشد تا یک سرمایه‌گذاری بازیابی شود. در ابتدای هر پروژه مقدار مشخصی پول سرمایه‌گذاری می‌شود و سپس از آن سرمایه‌گذاری درآمد کسب می‌شود. بازگشت سرمایه تعداد سال‌هایی است که طول می‌کشد تا درآمد انباشته با ارزش سرمایه‌گذاری اولیه برابر شود [۳۱]. از دیگر شاخص‌های اقتصادی می‌توان به هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پروژه نام برد که برابر با کل هزینه اجزای نصب شده در ابتدای پروژه است.

³ Sustainable Development Goals (SDG)

¹ Inflation Rate

² Discount Rate

جدول ۲- مشخصات اقتصادی تجهیزات

تجهیز	مدل	ظرفیت	هزینه اولیه	هزینه جایگزینی	تعمیر و نگهداری	طول عمر
پنل خورشیدی	Jinko JKM275- 60	۰/۴۴۵ kw	\$ ۱۵۰	\$ ۱۲۵/۵	\$ ۲۵ در سال	۲۰ سال
توربین بادی	Aeolos- V1kW	۱ kw	\$ ۴۲۰۰	\$ ۳۵۰۰	\$ ۱۴۰ در سال	۲۰ سال
ژنراتور	Generic 10kW	۱۰ kw	\$ ۲۱۰۰	\$ ۲۱۰۰	\$ ۰/۰۲ در ساعت	۱۵۰۰۰ ساعت
باتری	EnerSys PowerSafe SBS 170F	۲/۳ kwh	\$ ۶۸۵	\$ ۶۸۵	\$ ۰	۱۰ سال
مبدل	Fronius Symo 4.5- 3-S	۴/۵ kw	\$ ۱۶۴۶	\$ ۱۶۴۶	\$ ۱۷ در سال	۲۰ سال

جدول ۳- شاخص های فنی

شاخص	تعریف
الکتريسيته اضافی	برقی که مازاد بر مصرف و ذخیره سازی تولید می شود
گرمای اضافی	گرمایی که مازاد بر مصرف و ذخیره سازی تولید می شود
سهم منابع تجدیدپذیر	کسری از انرژی مصرفی است که توسط منابع تجدیدپذیر تولید می شود

۱۲-۲- شاخص محیط زیستی

از شاخص های زیست محیطی تعریف شده توسط سازمان ملل متحد تحت عنوان اهداف توسعه پایدار می توان به میزان صرفه جویی در انتشار دی اکسید کربن (CO₂)، نیتروژن اکسید (NO_x) و سولفور دی اکسید (SO₂) اشاره کرد [۳۲].

مقدار مجاز استفاده از برق شبکه برابر با ۵ کیلووات و صفر تعیین شد. مقدار صفر بیانگر شبیه سازی شبکه بصورت مستقل از شبکه است. ظرفیت کنترلر گرمایی برابر با ۰ و ۱۰۰ کیلووات در نظر گرفته شد؛ همچنین ظرفیت مورد نیاز باتری، مبدل جریان الکتریکی و بویلر نیز توسط نرم افزار مشخص می گردد.

۱۳-۲- شبیه سازی نیروگاه

بمنظور تامین انرژی الکتریکی و انرژی گرمایی مصرفی دانشکده فنی دانشگاه گلستان، با توجه به پتانسیل منطقه از منابع خورشیدی و بادی و همچنین دیزل ژنراتور استفاده گردید. مطابق با شکل-۱۱ پنل های خورشیدی و توربین بادی در تولیدکننده جریان مستقیم و دیزل ژنراتور تولیدکننده جریان متناوب می باشند. ظرفیت پنل های خورشیدی و همچنین تعداد توربین های بادی توسط نرم افزار هومر محاسبه می شود و ظرفیت دیزل ژنراتور برابر با ۱۰ کیلووات و صفر مقرر گردید. ظرفیت صفر برای دیزل ژنراتور به معنی عدم استفاده از دیزل ژنراتور در سیستم است.

۱۴-۲- آنالیز حساسیت

با استفاده از قابلیت آنالیز حساسیت نرم افزار هومر می توان تاچندین مقدار را شبیه سازی کرده و اثر نوسانات را پیش بینی کرد.

از رابطه (۱) بمنظور محاسبه الکتریسیته تولید شده توسط صفحات فتوولتائیک استفاده می شود [۳۳]:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (1)$$

در معادله بالا $G_{T,STC}$ ، $G_T (W/m^2)$ ، $f_{PV}(\%)$ ، $Y_{PV} (kW)$ و $T_{c,STC} (C^\circ)$ و $T_c (C^\circ)$ ، $\alpha_p (\%/C^\circ)$ ، (W/m^2) به ترتیب بیانگر ظرفیت صفحات فتوولتائیک، عامل کاهنده^۱، شدت تابش خورشید در آرایه فتوولتائیک، شدت تابش خورشیدی در شرایط استاندارد آزمایشی، ضریب دمایی صفحات، دمای سلول ها، دمای سلول فتوولتائیک تحت شرایط تست استاندارد می باشند.

۳-۲- توربین بادی

به منظور محاسبه سرعت باد که با پره های توربین بادی در تماس است، نرم افزار هومر از معادله (۲) استفاده می کند [۳۴]:

$$U_{hub} = U_{anem} \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \quad (2)$$

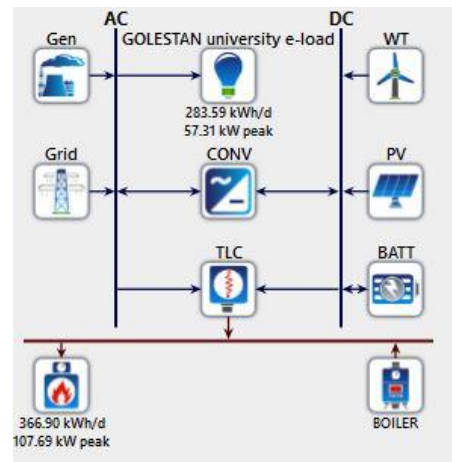
$U_{anem} (m/s)$ سرعت باد اندازه گیری شده در ارتفاع بادسنج، $Z_{hub} (m)$ ارتفاع توبی^۲ توربین، $Z_{anem} (m)$ ارتفاع بادسنج و Z_0 طول زبری سطح^۳ است. پس از محاسبه سرعت باد در ارتفاع توبی، توان توربین بادی از رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right) P_{WTG,STP} \quad (3)$$

جایی که توان خروجی توربین بادی، چگالی واقعی هوا، چگالی هوا در شرایط استاندارد و توان خروجی در شرایط استاندارد بترتیب برابر با $\rho_0 (kg/m^3)$ ، $\rho (kg/m^3)$ ، $P_{WTG} (kW)$ و $P_{WTG,STP} (kW)$ است.

۳-۳- دیزل ژنراتور

انرژی خروجی دیزل ژنراتور بصورت زیر محاسبه می شود:



شکل ۱۱- پیکربندی نیروگاه مورد نظر

با در نظر گرفتن مقادیر متعدد نرخ تورم و نرخ تنزیل، توسعه دهندگان میکرو شبکه ها می توانند پیش بینی کنند که در صورتی که این پارامترهای اقتصادی در طول عمر پروژه تغییر کنند، چه اتفاقی خواهد افتاد. همچنین با اعمال طرح تشویقی عدم انتشار کربن می توان تغییر پارامترهای اقتصادی پروژه را بررسی نمود. جدول ۴- نشان دهنده پارامترهایی است که تحت آنالیز حساسیت قرار گرفتند.

جدول ۴- پارامترهای آنالیز حساسیت

پارامتر	مقدار پایه	مقادیر آنالیز حساسیت
نرخ تورم (%)	۱۵	۱۰، ۲۰
نرخ تنزیل (%)	۱۸	۱۴، ۲۲
طرح تشویقی کربن (\$/kg)	.	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰

۳- روابط ریاضی

در این بخش معادلات حاکم مورد نیاز جهت شبیه سازی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر بررسی می شود.

۳-۱- پنل های فتوولتائیک

از صفحات فتوولتائیک بمنظور تبدیل انرژی خورشیدی به الکتریسیته در طی مدت روشنائی روز استفاده می شود؛ لذا این تجهیز برای تولید انرژی در شب کارایی ندارد. در نرم افزار هومر

³ Surface Roughness Length

¹ Derating Factor

² Hub

در روابط بالا I_{max} و N_{bat} ، V_{nom} ، R_{int} ، I_{nom} ، R_{int} ، I_{nom} و N_{bat} بیانگر جریان نامی، مقاومت درونی، ولتاژ نامی، تعداد باتری و بیشترین جریان می‌باشند [۳۵].

همچنین توان خروجی مبدل جریان از رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

$$P_{out} = P_{in} \times \eta_{inv} \quad (10)$$

در رابطه بالا P_{in} بیانگر توان ورودی و η_{inv} بیانگر راندمان مبدل است [۳۶].

۳-۵- شاخص‌های اقتصادی

تابع هدف بهینه‌سازی هزینه‌های تبدیل شده سیستم را نشان می‌دهد. این هزینه‌های تبدیل شده شامل هزینه‌های سرمایه اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه تعویض تجهیزات در طی عمر پروژه که به ارزش زمان حال تبدیل می‌شوند. به این هزینه، هزینه فعلی کل پروژه گفته می‌شود. مقدار این شاخص از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۷]:

$$NPC(i, n) = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (11)$$

در رابطه بالا i (%) نرخ تنزیل واقعی^۱، n طول عمر پروژه برحسب سال، t سال موردنظر و C_t (\$) کل هزینه در سال موردنظر را نشان می‌دهد؛ همچنین نرخ تنزیل واقعی از رابطه زیر بدست می‌آید [۳۷]:

$$i = \frac{i' + f}{1 + f} \quad (12)$$

در رابطه بالا f (%) و i' (%) بترتیب بیانگر نرخ تنزیل نامی و نرخ تورم می‌باشند که مقادیر ۱۵٪ و ۱۸٪ در نظر گرفته می‌شوند.

هزینه تولید یک کیلووات‌ساعت انرژی دیگر شاخص اقتصادی مهم می‌باشد که بصورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_T} \quad (13)$$

$$E_{DG} = P_{DG} \times \eta_{DG} \times t \quad (4)$$

در رابطه (۴) P_{DG} توان خروجی نامی دیزل ژنراتور و η_{DG} بیانگر راندمان آن است. نرم‌افزار هومر از رابطه (۵) جهت محاسبه مصرف سوخت دیزل ژنراتور در هر بازه زمانی استفاده می‌کند:

$$F_D(t) = A \times P_R + B \times P(t) \quad (5)$$

در رابطه (۵) P_i بیانگر توان خروجی قطعه در یک گام زمان، A و B مقادیر ثابتی بین ۰/۰۸ و ۰/۲۴ بوده و P_R توان نامی دیزل ژنراتور است [۲۶].

۳-۴- باتری و مبدل جریان

باتری‌ها بعنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی شناخته می‌شوند. انرژی الکتریکی مازاد تولیدی در هنگام پیک بار را می‌توان ذخیره‌سازی کرد و در زمان‌های بحرانی استفاده نمود. منظور از زمان‌های بحرانی زمانی است که بعلت کمبود منابع تجدیدپذیر، سیستم قادر به تامین بار مصرفی نمی‌باشد. توان ورودی به باتری توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$\Delta P(t) = P_{ren}(t) - P_L(t) \quad (6)$$

در رابطه بالا P_{ren} توان تجدیدپذیر تولیدی و P_L از رابطه (۷) به دست می‌آید:

$$(12)$$

$$P_L(t) = \frac{P_{Load}(t)}{\eta_i} \quad (7)$$

در رابطه (۷) P_{Load} بیانگر توان مصرفی و η بیانگر راندمان مبدل است؛ همچنین راندمان باتری و ظرفیت باتری بترتیب از روابط (۸) و (۹) بدست می‌آیند:

$$\eta_{bat} = 1 - \left(\frac{I_{nom} \times R_{int} \times I_{nom}}{V_{nom} \times I_{nom}} \right) \quad (8)$$

$$P_{bat,max} = \frac{N_{bat} \times I_{max} \times V_{bat}}{1000} \quad (9)$$

^۱ Real Discount Rate

گسترده‌ای است که با توجه به محدودیت‌های محیطی، استفاده از توربین بادی با تعداد زیاد امکان پذیر نمی‌باشد.

۴-۲- شاخص‌های فنی

همانطور که بیان شد، میزان الکتریسیته تولیدی اضافی، گرمای تولیدی اضافی و سهم منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی شاخص‌های فنی مورد بررسی می‌باشند که در **جدول ۶-۶** مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۳- شاخص‌های محیط زیستی

استفاده از منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی منجر به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. فروش این انرژی به شبکه منجر به کاهش انتشار آلاینده‌هایی مانند کربن دی‌اکسید، نیتروژن اکسید و سولفور دی‌اکسید می‌شود. **جدول ۷-۷** نشان‌دهنده میزان انتشار هر آلاینده برای سناریوهای مختلف است. علامت منفی مقادیر نشان‌دهنده عدم انتشار آلاینده است.

۴-۴- شاخص‌های اقتصادی

نرم‌افزار هومر پس از شبیه‌سازی، چندین پارامتر اقتصادی را محاسبه می‌کند تا بتوان سناریوهای مختلف را باهم مقایسه نمود. از جمله پارامترهایی که محاسبه می‌شود، می‌توان به هزینه خالص فعلی پروژه، هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت انرژی، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و بازگشت سرمایه اشاره نمود. **جدول ۸-۸** نشان‌دهنده شاخص‌های اقتصادی و مقادیر آن برای سناریوهای مختلف است.

کل هزینه سالیانه، $C_{ann,tot} (\$/yr)$ از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$C_{ann,tot} = CRF_{(i,n)} \times NPC \quad (14)$$

بطوریکه CRF عامل بازبایی سرمایه بوده و به روش زیر بدست می‌آید (۳۷):

$$CRF(i,n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

۴- نتایج

در این بخش نتایج محاسبات و تحلیل‌های فنی-اقتصادی و بهینه سازی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر می‌پردازیم. ابتدا نتایج بهینه‌سازی مورد بحث قرار گرفته و سپس تحلیل فنی-اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی

پس از شبیه‌سازی ساعتی، پیکربندی‌های مختلف از اندازه و پارامترهای اقتصادی همانطور تولید می‌شود که در **جدول ۵-۵** نشان داده شده‌است. از بین بسیاری، پنج ترکیب برگزیده شد و نتایج هر ترکیب در زیر مورد بحث قرار می‌گیرد.

همانطور که در نتایج پیداست، توربین بادی مورد نظر بعلت توان تولیدی کم، نیاز است که تعداد قابل توجهی مورد استفاده قرار بگیرد. با بالا رفتن تعداد توربین‌های بادی، هزینه کلی پروژه افزایش می‌یابد و پروژه را با چالش اقتصادی روبرو می‌کند؛ همچنین تعداد زیاد توربین بادی نیاز به فضای

جدول ۵-۵- نتایج حاصل از شبیه‌سازی

سناریو	پنل خورشیدی (kw)	توربین بادی (kw)	ژنراتور (kw)	باتری	شبکه	کنترلر گرما (kw)	مبدل (kw)	توزیع
۱	۲۸۴	۰	۱۰	۰	۰	۱۰۰	۲۳۱	CC
۲	۱۴۲	۰	۰	۸۸	۵	۱۰۰	۸۹/۶	CC
۳	۲۴۰	۰	۱۰	۵۵	۵	۱۰۰	۲۴۵	LF
۴	۵۶۸	۰	۰	۰	۵	۱۰۰	۵۸۵	CC
۵	۱۴۲	۱۴۲	۱۰	۰	۵	۱۰۰	۲۵۸	CC

جدول ۸- شاخص‌های اقتصادی سناریوها

سناریو	بازگشت سرمایه (سال)	هزینه سرمایه گذاری (\$)	هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی (\$)	هزینه کل فعلی پروژه (\$)
۱	۴/۸۹	۲۰۲۳۷۱	۰/۰۱۵۹	۲۱۴۲۶۶
۲	۰	۱۶۰۹۱۳	۰/۰۵۹۸	۲۹۳۹۶۱
۳	۱۸/۵	۲۴۱۵۳	۰/۰۲۹۶	۳۱۰۰۹۱
۴	۱۹/۸	۴۲۵۳۶۸	۰/۰۱۸۹	۳۶۹۹۲۸
۵	ندارد	۷۶۰۷۳۶	۰/۱۵۶	۱۷۰۰۰۰۰

سناریو ۱ بعلت اینکه دارای کمترین هزینه کل فعلی پروژه است، لذا بعنوان بهینه‌ترین سناریو توسط نرم افزار معرفی می‌شود؛ همچنین این سیستم دارای کمترین مقدار هزینه تولید انرژی به ازای هر کیلووات ساعت را دارد؛ همچنین بخاطر اینکه بین تمامی سناریوها، سناریو ۱ نزدیک‌ترین مقدار هزینه سرمایه‌گذاری را به سیستم مرجع دارد؛ لذا سریع‌ترین بازگشت سرمایه را نیز نسبت به دیگر سیستم‌ها دارد.

۴-۵- عملکرد تجهیزات در سیستم بهینه

در این بخش به بررسی عملکرد تجهیزات در سناریو ۱ پرداخته می‌شود که بهینه‌ترین سناریو برگزیده شد. در این سناریو مقدار تولیدی توسط پنل خورشیدی برابر با ۵۶۶۴۱۱ کیلووات در سال بوده و مقدار ۸۷۶۰۰ کیلووات در سال نیز توسط ژنراتور تامین می‌شود؛ لذا ۸۶/۶٪ برق تولیدی توسط پنل خورشیدی و ۱۳/۴٪ توسط ژنراتور تولید می‌شود. این برق تولیدی توسط منابع بصورت بار الکتریکی مصرفی و فروش به شبکه استفاده شده و بخشی از آن در مبدل جریان در هنگام تبدیل جریان مستقیم به جریان متناوب تلف شده و مابقی آن بصورت برق تولیدی مازاد مورد استفاده کنترلر گرمایی قرار می‌گیرد. شکل-۱۲ نشان‌دهنده محل استفاده از انرژی الکتریکی تولیدی است.

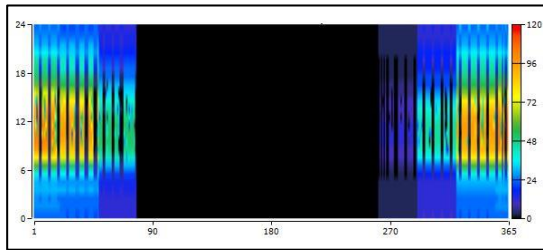
جدول ۶- شاخص‌های فنی سناریوها

سناریو	سهم منابع تجدیدپذیر (%)	گرمای اضافی (kwh/yr)	الکتریسیته اضافی (kwh/yr)
۱	۷۱/۷	۵۴۱۸	۱۱۵۰۴
۲	۶۴/۶	۲۰۰۲۹	۳۰۶۹۲
۳	۶۷/۶	۳۸/۴	۲۳۷
۴	۸۸/۲	۹۶/۹	۴۳۲
۵	۶۵	۷۰۳	۷۷۱

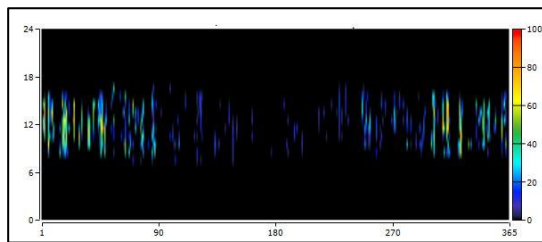
جدول ۷- شاخص‌های زیست محیطی سناریوها

سناریو	نیتروژن اکسید (کیلوگرم در سال)	سولفور دی اکسید (کیلوگرم در سال)	کربن دی اکسید (کیلوگرم در سال)
۱	-۴۷/۱	-۱۲۵۲	-۲۲۶۱۳۶
۲	-۱۹۳	-۳۹۴	-۶۲۴۴۸
۳	۵۶	-۱۰۴۲	-۱۷۶۱۴۹
۴	-۱۳۳۹	-۲۷۳۹	-۶۰۰۷۸۴
۵	۱۲۴	-۹۰۳	-۱۴۴۰۵۰

جهت محاسبه بازگشت سرمایه، باید یک سناریو را بعنوان سناریوی مرجع در نظر گرفته و هزینه سناریوهای دیگر با آن مقایسه شود تا مدت بازگشت سرمایه مشخص گردد. نرم‌افزار هومر این قابلیت را دارد که هر سناریو دلخواهی را بعنوان سناریوی مرجع در نظر بگیرد، اما منطقی است که سناریویی که کمترین هزینه سرمایه‌گذاری را دارد، بعنوان سناریوی مرجع در نظر گرفته شود. سپس دیگر سناریو ها با این سناریو مقایسه می‌شوند و بازگشت سرمایه آنها محاسبه می‌گردد. با توجه به اینکه سناریو ۲ دارای کمترین هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است؛ لذا بعنوان سیستم مرجع انتخاب می‌شود و دیگر سیستم‌ها با آن قیاس می‌شوند. لذا بازگشت سرمایه برای سناریو ۲ برابر صفر است؛ زیرا این سناریو بعنوان سناریو مرجع انتخاب شده‌است. همچنین سناریو ۵ دارای بازگشت سرمایه در طی عمر پروژه نمی‌باشد.



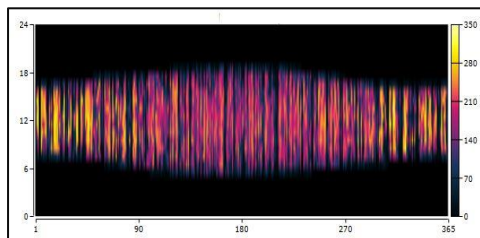
شکل ۱۴- عملکرد بویلر



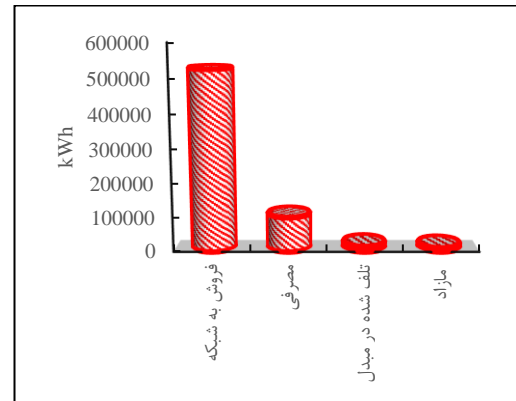
شکل ۱۵- عملکرد کنترلر گرما

مصرف سوخت در این سیستم توسط ژنراتور دیزلی و بویلر گاز سوز صورت می‌پذیرد. مطابق با نتایج جهت تامین انرژی مورد نیاز سیستم ۱۵۲۲۹ متر مکعب گاز طبیعی سالانه توسط بویلر مصرف می‌شود و ژنراتور نیز مقدار ۲۹۲۵۸ لیتر گازوئیل مصرف می‌کند.

پنل‌های خورشیدی بطور سالانه ۴۳۸۴ ساعت کار می‌کنند که مجموعاً ۵۶۶۴۱۱ کیلووات ساعت توان تولید می‌کنند. شکل-۱۶ عملکرد پنل خورشیدی در سال را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل-۱۶ پیداست با افزایش طول روز در تابستان، بازه زمانی تولید انرژی الکتریکی از پنل خورشیدی افزایش می‌یابد؛ لذا تولید برق خورشیدی در تابستان بیشتر از زمستان است.

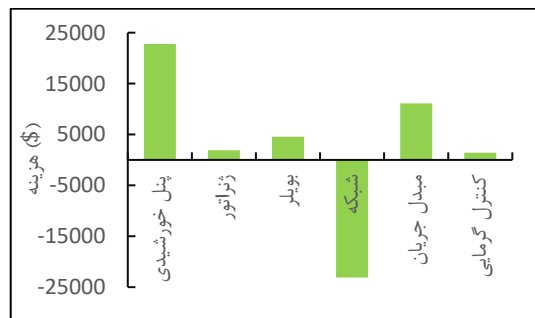


شکل ۱۶- عملکرد پنل خورشیدی



شکل ۱۲- مصارف انرژی الکتریکی سیستم

همانطور که در شکل-۱۲ پیداست ۸۰٪ برق تولیدی به شبکه فروخته می‌شود و ۵٪/۱۵ توسط مصرف‌کننده مصرف می‌شود. لذا از این طریق درآمد جاری برای سیستم پدید می‌آید. شکل-۱۳ نمودار هزینه‌های اجزای سیستم در سال است. مطابق با این شکل فروش برق به شبکه منجر به درآمد زایی برای سیستم شده است و هزینه‌های سالیانه را کاهش می‌دهد. جمع هزینه سالیانه اجزا برابر با ۴۱۷۷۵ دلار بوده که با درآمدزایی ۲۳۱۲۲ دلاری از فروش برق، هزینه سالانه برابر با ۱۸۶۵۳ دلار است.



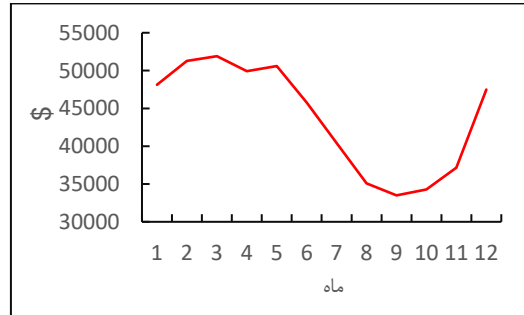
شکل ۱۳- هزینه اجزای سیستم

بویلر تامین می‌شود. مقدار تولد سالیانه گرما از کنترلر گرمایی و بویلر به ترتیب برابر با ۱۱۵۰۴ و ۱۲۷۸۳۱ بوده که سهم کنترلر گرمایی در تامین گرما را برابر با ۸٪/۲۶ نشان می‌دهد. شکل-۱۴ نشان‌دهنده عملکرد بویلر در سال است؛ همچنین شکل-۱۵ عملکرد کنترلر گرمایی را نشان می‌دهد.

دارند. با توجه به شکل-۱۸ هزینه فعلی کل پروژه با نرخ تورم رابطه مستقیم و با نرخ تنزیل رابطه عکس دارد. این در حالی است که با توجه به شکل-۱۹ میزان قیمت هر کیلووات انرژی تولیدی با نرخ تورم رابطه عکس و با نرخ تنزیل رابطه مستقیم دارد.

همچنین اعمال طرح تشویقی عدم انتشار کربن باعث کاهش مقدار هزینه فعلی کل پروژه و هزینه تمام شده هر کیلووات ساعت انرژی می‌شود؛ زیرا با صرفه جویی در انتشار کربن و جلوگیری از انتشار آن، طرح تشویقی نیز منبع درآمدی برای سیستم بهینه می‌شود. شکل-۲۰ بیانگر تاثیر طرح تشویقی کربن بر پارامترهای اقتصادی را نشان می‌دهد. همچنین رابطه نرخ تورم و نرخ تنزیل با مقدار هزینه کل فعلی پروژه در حالتی طرح تشویقی کربن وجود نداشته باشد، در شکل-۲۱ نشان داده شده است.

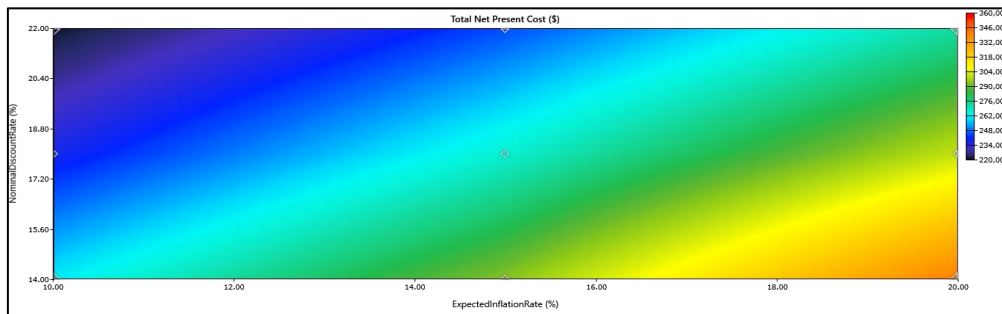
شکل-۱۷ بیانگر مقدار برق فروخته شده به شبکه به تفکیک هر ماه است. همانطور که در شکل پیداست، بیشترین فروش برق به شبکه مربوط به نیمه اول سال است.



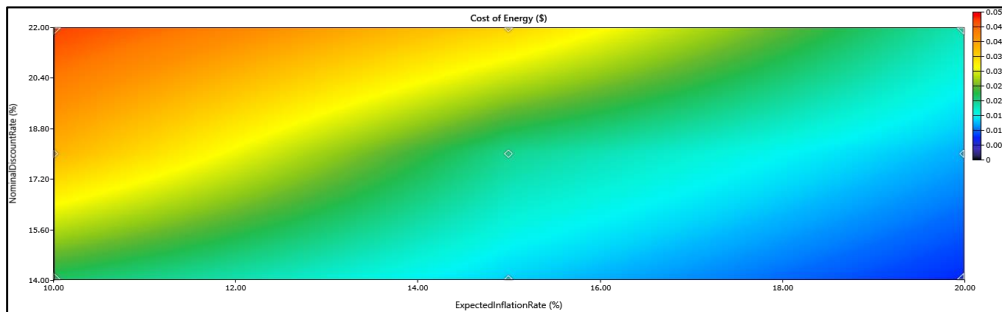
شکل ۱۷- میزان برق فروخته شده به شبکه در سال

۴-۶- نتایج آنالیز حساسیت

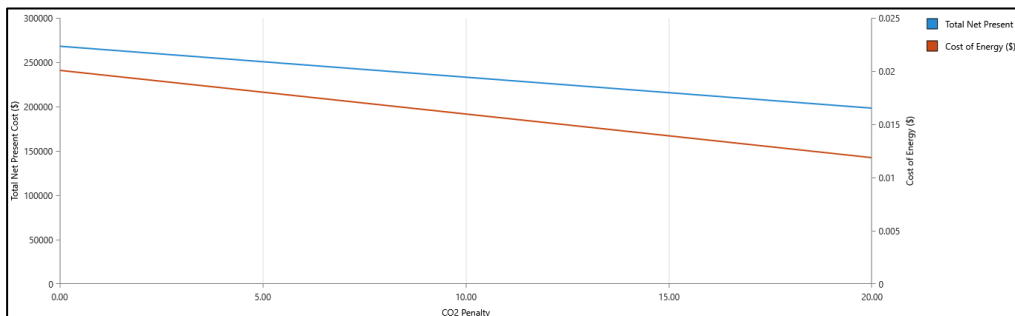
با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز حساسیت، تغییر نرخ تورم و نرخ تنزیل تاثیر قابل توجهی بر شاخص‌های اقتصادی



شکل ۱۸- تاثیر تغییرات تورم و نرخ تنزیل بر NPC



شکل ۱۹- تاثیر تغییرات تورم و نرخ تنزیل بر LCOE



شکل ۲۰- تاثیر طرح تشویقی کربن بر NPC و LCOE

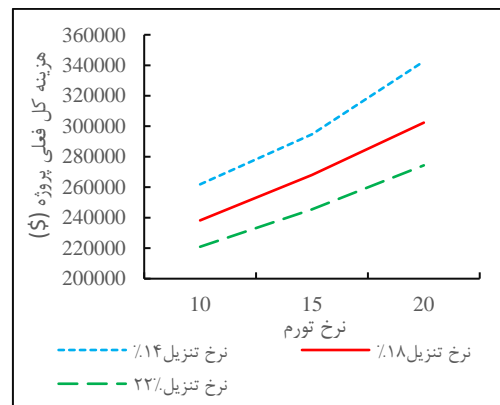
استراتژی توزیع شارژ کردن سیکل و مبدل الکتریکی است. در این سیستم ظرفیت پنل خورشیدی، دیزل ژنراتور، مبدل گرمایی و مبدل الکتریکی بترتیب برابر با ۲۸۴، ۱۰، ۱۰۰ و ۲۳۱ کیلووات است.

• با توجه به هزینه بالای توربین بادی نسبت به دیگر منابع انرژی، استفاده از توربین بادی توجیه اقتصادی نداشته و در سیستم بهینه در نظر گرفته نشد. کما اینکه در سناریو ۵ با تامین ۱۴۲ کیلووات انرژی الکتریکی از توربین بادی منجر به ۸ برابر شدن هزینه فعلی کل پروژه شده و از طرفی جانمایی این تعداد از توربین بادی امری غیرممکن است.

• بمنظور احداث سیستم ترکیبی تجدیدپذیر در دانشکده فنی دانشگاه گلستان نیاز به ۲۰۲۳۷۱ دلار سرمایه اولیه است؛ همچنین هزینه تولید هر کیلووات ساعت انرژی برابر با ۰/۱۵۹ دلار و هزینه کل فعلی پروژه ۲۱۴۲۶۶ دلار است.

• در حال حاضر انرژی الکتریکی و گرمایی دانشکده مورد نظر بترتیب از برق شبکه و شبکه گازرسانی تامین می شود. در صورت احداث سیستم ترکیبی تجدیدپذیر سالانه از انتشار ۲۲۶۱۳۶ کیلوگرم کربن دی اکسید جلوگیری می شود که این کار کمک قابل توجهی به حفظ محیط زیست و کاهش انتشار آلاینده می کند.

• در صورتی که طرح تشویقی کربن به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دلار بر تن اجرایی گردد، هزینه فعلی کل پروژه بترتیب به میزان ۰/۱۳، ۰/۱۹/۵، ۰/۲۶ و ۰/۲۶ کاهش می یابد.



شکل ۲۱- رابطه هزینه کل فعلی پروژه با نرخ تورم و نرخ تنزیل

۵- نتیجه گیری

جهت طراحی سیستم ترکیبی تجدیدپذیر بمنظور تامین انرژی الکتریکی و گرمایی دانشکده فنی دانشگاه گلستان، ابتدا با استفاده از قبوض برق و گاز و همچنین اعمال نرمالایز گروهها بر این مقادیر، مصرف ساعتی برق و گرمایش این مجموعه محاسبه گردید. سپس با بررسی و انتخاب منابع انرژی در دسترس، نیروگاه مورد نظر شبیه سازی شد. در نهایت پس از بهینه سازی، سیستمی با کمترین هزینه فعلی کل بعنوان بهینه ترین سیستم انتخاب گردید. سپس بمنظور بررسی عدم قطعیت در ورودی های مسئله، آنالیز حساسیت روی پارامترهای اقتصادی مسئله صورت پذیرفت. مهم ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

• سیستم ترکیبی تجدیدپذیر معرفی شده در این پژوهش متشکل از پنل خورشیدی و دیزل ژنراتور بمنظور تامین انرژی الکتریکی و مبدل گرمایی و بویلر بمنظور تامین گرمایش سیستم به همراه

۶- پیشنهادات

پژوهش حاضر بمنظور کاهش انتشار آلاینده‌ها و حفظ محیط زیست و کاهش مصرف منابع فسیلی با در نظر گرفتن شاخص‌های اقتصادی بمنظور حرکت به سمت توسعه پایدار است. در انتها پیشنهادات زیر بمنظور افزایش کیفیت و دقت طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های ترکیبی تجدیدپذیر ارائه شده‌است:

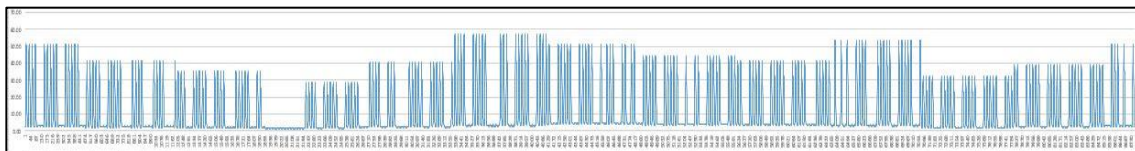
- در این پژوهش می‌گردد، نرمالایز کرو مناسب هر فصل بصورت مجزا در نظر گرفته شود تا دقت محاسباتی بار مصرفی افزایش یابد.
- در این پژوهش جهت بهینه‌سازی، تابع هدف کمترین مقدار هزینه فعلی کل پروژه در نظر گرفته شد. پیشنهاد می‌گردد از بهینه‌سازی چند هدفه بمنظور بهینه‌سازی دقیق‌تر استفاده گردد.
- در این پژوهش از باتری بمنظور ذخیره‌سازی استفاده گردید. پیشنهاد می‌گردد، استفاده از دیگر سیستم‌های ذخیره‌سازی مانند هیدروژن یا ذخیره‌سازی توسط سیستم هیدروپمپ بررسی گردد.
- در این پژوهش سیستم بصورت متصل به شبکه شبیه‌سازی گردید. پیشنهاد می‌گردد، سیستم بصورت مستقل از شبکه شبیه‌سازی شده و تاثیر آن بر شاخص‌ها بررسی گردد.

- در این پژوهش از استراتژی‌های توزیع شارژکردن سیکل و پیگیری بار استفاده شد؛ لذا پیشنهاد می‌گردد، استراتژی‌های توزیع هوشمند و دیگر استراتژی‌ها مورد بررسی قرار گیرند.
- در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که افزایش تقاضا بار و تاثیر آن بر ظرفیت تجهیزات نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- در این پژوهش نرمالایز کرو روزکاری و روز تعطیل بصورت مجزا در نظر گرفته شد.

ضمایم

ضمیمه الف

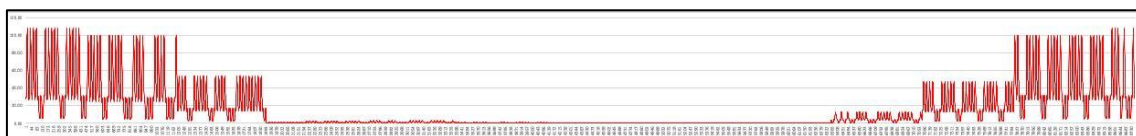
پس از محاسبه مصرف ساعتی برق در روزهای کاری و تعطیل می‌توان مصرف ساعتی سیستم مورد نظر در طی سال را مطابق با شکل-۳ به دست آورد.



شکل ۳- مصرف ساعتی برق در طی سال

ضمیمه ب

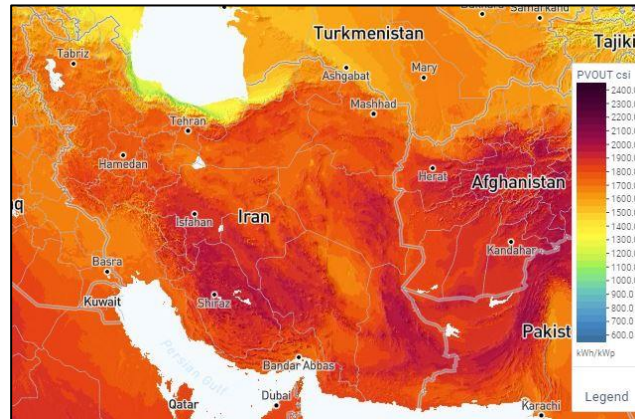
پس از محاسبه مصرف ساعتی گرما در روزهای کاری و تعطیل می‌توان مصرف ساعتی سیستم مورد نظر در طی سال را مطابق با شکل-۵ به دست آورد.



شکل ۵- مصرف ساعتی گرما در طی سال

ضمیمه ج

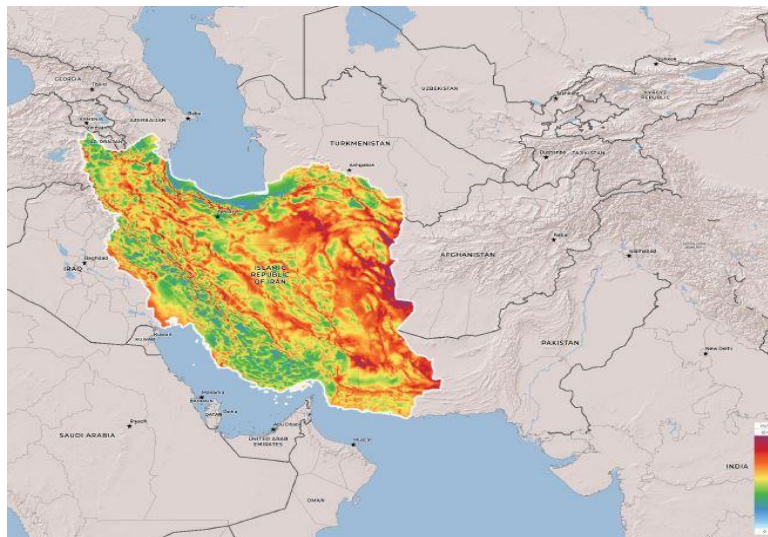
شکل ۲۲ نشان دهنده اطلس انرژی خورشیدی ایران است. مطابق با شکل ۲۲ مناطق جنوبی ایران از نظر تابش خورشیدی دارای شرایط مناسب تری نسبت به مناطق شمالی هستند. بطور دقیق تر تابش سالانه در شهر گرگان در محدوده ۱۳۰۰ کیلووات بر مترمربع در سال (۳/۵ کیلووات بر متر مربع در روز) است.



شکل ۲۲- اطلس انرژی خورشیدی [۲۸]

ضمیمه د

شکل ۲۲ نشان دهنده اطلس بادی ایران است. میانگین سرعت باد در شهر گرگان در ارتفاع ۱۰ متر در یک دوره ۱۰ ساله برابر با $4/26 \text{ m/s}$ و میانگین چگالی توان برابر با 216 w/m^2 است. از طرفی مطابق با داده‌های نرم‌افزار هومر، توربین بادی مورد نظر با حداقل سرعت باد 3 m/s قادر به تولید توان است و در سرعت $4/26 \text{ m/s}$ قادر به تولید توان به مقدار 72 وات است؛ همچنین در سرعت 5 m/s توانی به اندازه 128 وات و در سرعت 6 m/s توانی به اندازه 222 وات تولید می‌کند.



شکل ۲۳- اطلس انرژی بادی در ایران (۲۹)

- evaluation of a hybrid renewable energy system (HRES) using hybrid optimization model for electric renewable (HOMER) software—a case study of rural India. *Int. J. Low-Carbon Tech.*;16(3):814-21.
- [13] Borba ATA, Simões LJM, de Melo TR, Santos AÁB. (2024) Techno-Economic Assessment of a Hybrid Renewable Energy System for a County in the State of Bahia. *Energies*;17(3):572.
- [14] Riayatsyah T, Geumpana T, Fattah IR, Rizal S, Mahlia TI. (2022) Techno-Economic Analysis and Optimisation of Campus Grid-Connected Hybrid Renewable Energy System Using HOMER Grid. *Sustainability*;14(13):7735.
- [15] Al-Najjar H, El-Khozondar HJ, Pfeifer C, Al Afif R. (2022) Hybrid grid-tie electrification analysis of bio-shared renewable energy systems for domestic application. *Sustainable Cities and Society*;77:103538.
- [16] Pamuk N. (2024) Techno-economic feasibility analysis of grid configuration sizing for hybrid renewable energy system in Turkey using different optimization techniques. *Ain Shams Eng. J.*;15(3):102474.
- [17] Manoo MU, Shaikh F, Kumar L, Arıcı M. (2024) Comparative techno-economic analysis of various stand-alone and grid connected (solar/wind/fuel cell) renewable energy systems. *Int. J. Hydro. Energ.*;52:397-414.
- [18] Abdolmaleki L, Berardi U. (2024) Hybrid solar energy systems with hydrogen and electrical energy storage for a single house and a midrise apartment in North America. *Int. J. Hydro. Energ.*;52:1381-94.
- [19] Okonkwo PC, Barhoumi EM, Al Housni FK, Agyekum EB, Emori W, Ayodele BV, et al. (2024) Techno-economic feasibility analysis of hybrid renewable energy sources for a health clinic: A case study. *MRS Energy & Sustainability*:1-14.
- [20] Molina MT, Prodanovic M, editors. (2013) Profitability assessment for self-sufficiency improvement in grid-connected non-residential buildings with on-site PV installations. 2013 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP): IEEE.
- [21] Norén C, Pyrkó J. (1998) Typical load shapes for Swedish schools and hotels. *Energy and Buildings*. 1998;28(2):145-57.
- [22] Mokhtara C, Negrou B, Settou N, Bouferrouk A, Yao Y. (2021) Design optimization of grid-connected PV-Hydrogen for energy prosumers considering sector-coupling paradigm: Case study of a university building in Algeria. *Int. J. Hydro. Energ.*;46(75):37564-82.
- [23] Ghenai C, Salameh T, Merabet A. (2020) Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region. *Int. J. Hydro. Energ.*;45(20):11460-70.
- مراجع
- [1] Afonaa-Mensah S, Odoi-Yorke F, Majeed IB. (2024) Evaluating the impact of industrial loads on the performance of solar PV/diesel hybrid renewable energy systems for rural electrification in Ghana. *Energy Conversion and Management*: X.;21:100525.
- [2] He W, Xu Q, Liu S, Wang T, Wang F, Wu X, et al. (2024) Analysis on data center power supply system based on multiple renewable power configurations and multi-objective optimization. *Renewable Energy*;222:119865.
- [3] Farah S, Andresen GB. (2024) Investment-based optimisation of energy storage design parameters in a grid-connected hybrid renewable energy system. *Applied Energy*;355:122384.
- [4] Abdin Z, Al Khafaf N, McGrath B. (2024) Feasibility of hydrogen hybrid energy systems for sustainable on-and off-grid integration: An Australian REZs case study. *Int. J. Hydro. Energ.*;57:1197-207.
- [5] Qi X, Kochan O, Ma Z, Siarry P, Królczyk G, Li Z. Energy, (2024) exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of a hybrid renewable energy system with hydrogen fuel cells. *Int. J. Hydro. Energ.*;52:617-34.
- [6] Kumar PH, Gopi RR, Rajarajan R, Vaishali N, Vasavi K, Kumar S. (2024) Prefeasibility techno-economic analysis of hybrid renewable energy system. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*;7:100443.
- [7] Ennemiri N, Berrada A, Emrani A, Abdelmajid J, El Mrabet R. (2024) Optimization of an off-grid PV/biogas/battery hybrid energy system for electrification: A case study in a commercial platform in Morocco. *Energy Conversion and Management*: X;21:100508.
- [8] Li Z, Wang Y, Xie J, Cheng Y, Shi L. Hybrid multi-criteria decision-making evaluation of multiple renewable energy systems considering the hysteresis band principle. *Int. J. Hydro. Energ.*. 2024;462-9:45.
- [9] Zebra EIC, van der Windt HJ, Nhumaio G, Faaij AP. (2021) A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*;144:111036.
- [10] Suresh V, Muralidhar M, Kiranmayi R. (2020) Modelling and optimization of an off-grid hybrid renewable energy system for electrification in a rural areas. *Energy Reports*. 2020;6:594-604.
- [11] Zhang G, Xiao C, Razmjoooy N. (2022) Optimal operational strategy of hybrid PV/wind renewable energy system using homer: a case study. *Int. J. Amb. Energ.*;43(1):3953-66.
- [12] Sharma KK, Gupta A, Kumar R, Chohan JS, Sharma S, Singh J, et al. (2021) Economic

- [31] Zhang C, Wang Z, Xu Y. (2023) Application, planning, and techno-economic analysis of the multi-renewable energy complementary system in rural economic development zones: an empirical study in China. *Environmental Science and Pollution Research*.;30(11):31676-95.
- [32] Toopshekan A, Rahdan P, Rad MAV, Yousefi H, Astarai FR. (2022) Evaluation of a stand-alone CHP-Hybrid system using a multi-criteria decision making due to the sustainable development goals. *Sustainable Cities and Society*.;87:104170.
- [33] Mandal S, Das BK, Hoque N. (2018) Optimum sizing of a stand-alone hybrid energy system for rural electrification in Bangladesh. *J. Cleaner Product*.;200:12-27.
- [34] Gualtieri G, Secci S. (2012) Methods to extrapolate wind resource to the turbine hub height based on power law: A 1-h wind speed vs. Weibull distribution extrapolation comparison. *Renewable Energy*.;43-200:183.
- [35] Singh A, Baredar P, Gupta B. (2017) Techno-economic feasibility analysis of hydrogen fuel cell and solar photovoltaic hybrid renewable energy system for academic research building. *Energy Conversion and Management*.;145:398-414.
- [36] Kopp M, Coleman D, Stiller C, Scheffer K, Aichinger J, Scheppat B. *Energiepark Mainz*: (2017) Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. *Int. J. Hydro. Energ.*;42(19):13311-20.
- [37] Jahangir MH, Cheraghi R. (2020) Economic and environmental assessment of solar-wind-biomass hybrid renewable energy system supplying rural settlement load. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.;42:100895.
- [38] <https://solargis.com/> (accessed Jan 3, 2019).
- [39] <https://globalwindatlas.info/> (accessed Jan 15, 2019).".
- [24] Eisapour AH, Jafarpur K, Farjah E. (2021) Feasibility study of a smart hybrid renewable energy system to supply the electricity and heat demand of Eram Campus, Shiraz University; simulation, optimization, and sensitivity analysis. *Energy Conversion and Management*;248:114779.
- [25] Kasaeian A, Rahdan P, Rad MAV, Yan W-M. (2019) 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.
- [26] Sawle Y, Gupta S, Bohre AK. (2018) Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*;81:2217-35.
- [27] Jahangir MH, Mousavi SA, Rad MAV. (2019) A techno-economic comparison of a photovoltaic/thermal organic Rankine cycle with several renewable hybrid systems for a residential area in Rayen, Iran. *Energy Conversion and Management*.;195:244-61.
- [28] Jahangir MH, Javanshir F, Kargarzadeh A. (2021) Economic analysis and optimal design of hydrogen/diesel backup system to improve energy hubs providing the demands of sport complexes. *Int. J. Hydro. Energ.*;46(27):14109-29.
- [29] Akhtari MR, Baneshi M. (2019) 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 Conversion and Management*.;188:131-41.
- [30] Baneshi M, Hadianfard F. (2016) Techno-economic feasibility of hybrid diesel/PV/wind/battery electricity generation systems for non-residential large electricity consumers under southern Iran climate conditions. *Energy Conversion and Management*.;127:233-44.