

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۶/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۴/۲۲

## رویکردی اثربخش برای کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی از طریق جایگزینی سوخت زیستی با سوخت فسیلی با اعمال هزینه‌های اجتماعی و حد مجاز انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در یک سیستم تولید برق ترکیبی در کشور ایران (مطالعه موردی)

رضا بهبود<sup>۱</sup>، مینا ملاصالحی<sup>۲\*</sup>، گئورگ قره‌پتیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دکتری مدیریت صنعتی گرایش مدیریت سیستم‌ها، دانشکده اقتصاد، مدیریت و علوم اداری، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران  
rezabehboud@semnan.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش برنامه‌ریزی و مدیریت سیستم‌های انرژی، دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

m.salehi\_mina@yahoo.com

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
grptian@aut.ac.ir

**چکیده:** افزایش روزافزون دمای کره زمین و نیاز حیاتی به کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از گازهای گلخانه‌ای تولیدشده در اثر مصرف سوخت‌های فسیلی از یک سو و تجدیدناپذیری این نوع سوخت‌ها از سوی دیگر، منجر به تغییر رویکرد و استفاده از فناوری‌های پیشرفته و منابع تجدیدپذیر انرژی به‌عنوان سوخت‌های جایگزین در تجهیزات تولیدکننده انرژی الکتریکی شده است. با این حال طبیعت نامتناوب منابع انرژی تجدیدپذیر سبب شده است تا از دیزل ژنراتور به‌عنوان یک منبع پشتیبان برای پوشش بار در شرایط حساس و اضطراری استفاده شود. در این میان استفاده از سوخت زیستی به‌عنوان جایگزین سوخت فسیلی در دیزل ژنراتورها، نه تنها از انتشار خالص کربن دی‌اکسید و سایر آلاینده‌های سمی در هوا جلوگیری می‌کند، بلکه از لحاظ اقتصادی نیز می‌تواند از صرف هزینه‌های بسیار در آینده جلوگیری کند. در این پژوهش سعی شده است تا علاوه بر حفظ مشخصات فنی و افزایش قابلیت اطمینان سیستم ناشی از افزودن نیروگاه برق آبی به سایر سیستم‌های بادی و خورشیدی، از سوخت بایو دیزل (سوخت زیستی) به‌عنوان جایگزین سوخت فسیلی در دیزل ژنراتور استفاده و بهینه‌ترین ترکیب سیستم به‌لحاظ اقتصادی با اعمال هزینه‌های اجتماعی و حد مجاز انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در حالت مستقل از شبکه با کمک نرم‌افزار هومر برای مطالعه موردی روستای ونایی در استان لرستان در کشور ایران شناسایی شود.

**واژه‌های کلیدی:** بایو دیزل ژنراتور، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی، انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم ترکیبی مستقل از شبکه، قابلیت اطمینان، نرم‌افزار هومر.

## ۱. مقدمه

کنار توسعه فناوری‌های مرتبط منجر به افزایش تحقیقات درباره به‌کارگیری منابع تجدیدپذیر شده است [۷]. برای مثال کشور نروژ در راستای تعهد به پروتکل کیوتو به‌منظور کاهش ۳۰ درصدی انتشار کربن دی‌اکسید تا سال ۲۰۲۰، توانسته است به‌واسطه دسترسی به منابع تجدیدپذیر بیش از ۹۵٪ از انرژی برق مورد نیاز خود را از نیروگاه‌های برق آبی تأمین کند [۸ و ۹]. همچنین وزارت محیط‌زیست ژاپن مطابق با برنامه‌ای بلندمدت، کاهش ۸۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای با استفاده از سوخت‌های پاک برای وسایل نقلیه تا سال ۲۰۵۰ را هدف‌گذاری کرده است [۱۰]. این مثال‌ها بیانگر گرایش روزافزون به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سوخت‌های جایگزین در سال‌های اخیر است.

در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، بایو دیزل ژنراتور و سیستم‌های فتوولتائیک، محبوب‌ترین‌ها هستند [۱۱]. سوخت زیستی<sup>۱</sup> که به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزلی کاربرد دارد، از روغن گیاهان و حیوانات بر پایه چربی تولید می‌شود.

ماتسورا و همکاران چهار مزیت اصلی برای سوخت زیستی را معرفی می‌کنند: ۱. بی‌اثری کربن<sup>۲</sup>، ۲. پتانسیل تولید تاب‌آور<sup>۳</sup>، ۳. مشارکت مثبت در نرخ خودکفایی انرژی<sup>۴</sup>، ۴. جلوگیری از آلودگی هوا<sup>۵</sup> [۱۲].

با توجه به مزایای ذکرشده برای سوخت زیستی، استفاده خالص از این سوخت یا استفاده ترکیبی آن با سوخت دیزل، توسط اتحادیه اروپا به کشورهای عضو این اتحادیه توصیه شده است [۱۳]. توجه همزمان به افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و اقدام برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای نیز عاملی برای افزایش تقاضا برای جایگزینی سوخت زیستی به‌جای سوخت دیزل، در سیستم‌های تولید برق در مناطق مستعد با دسترسی مناسب به منابع تولید سوخت زیستی است [۶]. این افزایش تقاضا در تأمین برق مناطق روستایی دورافتاده با دسترسی مناسب به منابع انرژی تجدیدپذیر توسط سیستم‌های تولید برق ترکیبی مجزا از شبکه برق نیز مشاهده می‌شود [۱]؛ به‌نحوی که اکثر جوامع روستایی در کشورهای در حال توسعه به شبکه برق متصل نیستند و تولید انرژی ترکیبی از منابع تجدیدپذیر موجود به‌عنوان یک گزینه اقتصادی مناسب و سازگار با محیط‌زیست برای برق در این مناطق در نظر گرفته می‌شود [۱۴].

کشف ماشین بخار و شکل‌گیری انقلاب صنعتی در اوایل قرن نوزدهم در اروپا، منجر به افزایش ناگهانی انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید روزافزون این پدیده به‌دلیل استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی در فرایندهای تولید شده است. انتشار این نوع گازها در پنجاه سال گذشته به‌دلیل توسعه صنایع با شدت بیشتری افزایش یافته که این مهم منجر به تغییرات قابل ملاحظه در شرایط آب‌وهوایی جهان شده است [۱]. افزایش انتشار گازهایی چون کربن دی‌اکسید، از دلایل اصلی گرم شدن کره زمین با اثرات سوء زیست‌محیطی مانند افزایش سطح دریاها، سیل، خشکسالی و ... است [۲]. جامعه بین‌المللی در پاسخ به افزایش ناگهانی دمای کره زمین ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، اقدام به ایجاد چهارچوب حقوقی زیست‌محیطی دقیقی در زمینه نظارت بر رفتار دولت‌ها کرده است [۳]. امضای توافق‌نامه پاریس درباره تغییرات اقلیمی جهان، تلاشی در این راستاست. پس از امضای این توافق‌نامه با هدف تقویت پاسخ جهانی به تهدید تغییرات اقلیمی در زمینه توسعه پایدار و تلاش برای ریشه‌کن کردن فقر، مطالعات فراوانی توسط دولت‌ها، دانشگاه‌ها، مؤسسات تحقیقاتی و محققان آزاد در قالب پروژه‌های تحقیقاتی انجام شده یا در حال انجام است.

طبق معاهده پاریس، ۱۹۵ کشور جهان در بیست‌ویکمین اجلاس کنوانسیون تغییرات آب‌وهوایی سازمان ملل متحد به سندی دست یافتند که مبتنی بر آن تمامی کشورهای عضو موظف شدند برنامه خود را برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص کربن دی‌اکسید ارائه دهند. کشور ایران با انتشار سالانه ۵۳۰ میلیون تن گاز کربن دی‌اکسید ناشی از احتراق سوخت، رتبه هفتم در بین کشورهای دنیا در انتشار گازهای گلخانه‌ای را به خود اختصاص داده است [۴]. بر اساس پروتکل کیوتو نیز مقرر شد ایران تا سال ۲۰۱۵ مکانیزم توسعه پاک را ایجاد کند و تا سال ۲۰۳۰ به میزان ۴٪ از گازهای گلخانه‌ای را کاهش دهد. یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش گازهای گلخانه‌ای، بهره‌گیری از منابع انرژی تجدیدپذیر است. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر همچون باد، خورشید و بایومس به افزایش قابلیت اطمینان در زنجیره تأمین انرژی الکتریکی می‌انجامد [۵]؛ چراکه امروزه انرژی یک عامل مهم در اقتصاد کشورها بوده و با رفاه مردم نیز در ارتباط است [۱]. مطابق با مطالعاتی که در سال‌های اخیر انجام شده است، تولید و دسترسی به انرژی در دهه‌های آتی به‌صورت چشمگیری با کمبود روبه‌رو خواهد شد [۶]. این افزایش قابل توجه تقاضای انرژی در

1. Biofuel
2. Carbon Neutrality
3. Potential for Sustainable Production
4. Positive Contribution to the Energy Self-Sufficiency Rate
5. Prevention of Air Pollution

دورافتاده مستعد در استان لرستان است که در انتخاب آن معیارهای مهمی مانند میزان دسترسی منطقه به منابع انرژی تجدیدپذیر و سوخت زیستی در نظر گرفته شد. همچنین لزوم به‌کارگیری نیروگاه برق‌آبی کوچک در هر سه پیکره‌بندی ترکیبی مورد مطالعه به‌دلیل مزایای چشمگیر این نیروگاه از جمله قابلیت اطمینان بالا، طول عمر زیاد، هزینه تعمیرات و نگهداری کم و نیز حداکثر استفاده بهینه از منبع آب در دسترس در منطقه مورد مطالعه در کنار سایر فناوری‌های تجدیدپذیر همچون بایو دیزل ژنراتور، نیروگاه‌های خورشیدی و بادی، یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش است که تحقیق حاضر را از سایر مطالعات متمایز می‌سازد.

برای نیل به این هدف، از نرم‌افزار هومر<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی استفاده شده است. با توجه به اولویت و حساسیت دسترسی به انرژی برق، بارهای برقی در سه خوشه بارهای عادی، اضطراری و حیاتی افراز شده‌اند. از دیزل ژنراتور برای تأمین برق مورد نیاز در زمان اوج مصرف و همچنین برای تأمین برق بارهای اضطراری و از باتری برای تأمین مصارف بارهای حیاتی استفاده شده است.

بخش‌های مقاله به این ترتیب سازمان‌دهی شده است: بخش ۲ مروری بر مطالعات گذشته؛ بخش ۳ بررسی مطالعه موردی؛ بخش ۴ مدل‌سازی اقتصادی سیستم؛ بخش ۵ آنالیز و تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی؛ بخش ۶ آلاینده‌های زیست‌محیطی؛ بخش ۷ آنالیز حساسیت؛ بخش ۸ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری؛ بخش ۹ پیشنهادات.

## ۲. مروری بر مطالعات گذشته

تاکنون در سراسر دنیا مطالعات مختلفی در مورد به حداقل رساندن مضرات سیستم‌های ترکیبی و افزایش بهره‌وری آن‌ها انجام شده است. برای مثال مختارا و همکاران در سال ۲۰۲۰، با تلفیق مدیریت تقاضای تأمین با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات و به‌کارگیری آن برای طراحی بهینه یک سیستم ترکیبی شامل خورشیدی، دیزل و باتری برای تأمین برق ساختمان‌های مسکونی در یک ناحیه آب‌وهوایی خشک، رویکرد جدیدی را ارائه دادند و با استفاده از نرم‌افزار هومر، به آنالیز اقتصادی و تحلیل حساسیت سیستم پرداختند [۲۰]. در سال ۲۰۱۰ کتسیانیس و همکاران، به بررسی یک سیستم ترکیبی مشکل از توربین بادی، نیروگاه فتوولتائیک، دیزل ژنراتور با انواع سوخت، سلول‌های سوختی، باتری‌ها و مبدل‌ها برای تعیین اندازه بهینه سیستم در حالت مستقل از شبکه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. طی این مطالعه، منابع انرژی قابل

سیستم‌های تولید برق هیبریدی<sup>۱</sup>، ترکیبی از منابع انرژی تجدیدپذیر متفاوت همچون باد، خورشید، برق‌آبی، بایومس و سوخت هیدروژنی به‌همراه سوخت‌های فسیلی برای تولید انرژی الکتریکی هستند [۱۵]. این نوع سیستم‌ها، زنجیره تأمین برق قابل اعتماد، امن، کارآمد و پایدار را تشکیل می‌دهند [۱۶]. تعداد زیادی از پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه سیستم‌های تولید برق ترکیبی بر پایه استفاده از منابع تجدیدپذیر همچون فتوولتائیک، باتری، باد و برق‌آبی به‌همراه دیزل ژنراتور برای تأمین برق در زمان اوج مصرف یا عدم دسترسی به منابع تجدیدپذیرند [۱۷ و ۱۸]. از این رو دغدغه اصلی در ارتباط با کاهش یا حذف انتشار گاز کربن دی‌اکسید ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی برای تأمین انرژی لازم برای دیزل ژنراتورها همچنان وجود دارد. در این راستا سوخت زیستی به‌عنوان یک سوخت پایدار به‌صورت موفق جایگزین سوخت فسیلی مورد نیاز برای دیزل ژنراتورها در سیستم‌های تولید برق ترکیبی شده است [۱۹]. با این حال، طراحی سیستم‌های تولید برق ترکیبی بر پایه سوخت‌های بایومس به‌جای سوخت‌های فسیلی به‌دلیل اختلاف قیمت قابل توجه به‌ویژه در کشورهای نفت‌خیز همچون ایران، دغدغه اصلی پژوهشگران است. بنابراین طراحی بهینه سیستم و ارائه برآورد مالی مناسب در استفاده از سوخت زیستی از اهمیت فراوان برخوردار است.

تا آنجا که توسط تیم پژوهش بررسی شد، مطالعات متعددی با موضوع تحلیل فنی و اقتصادی یک سیستم انرژی تجدیدپذیر صورت پذیرفته، اما تاکنون هیچ‌کدام درصد ارائه رویکردی مؤثر با استفاده از سوخت زیستی و مقایسه آن با سیستمی متشکل از هر دو سوخت فسیلی و زیستی یا فقط فسیلی نبوده است. از این رو پژوهش حاضر در تلاش است چگونگی استفاده بهینه از سوخت زیستی در چرخه فرایند تولید برق را در سیستم‌های تولید برق ترکیبی برای کشور ایران به‌نحوی تبیین کند که در آن تمامی المان‌های مؤثر همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با اعمال هزینه‌های اجتماعی و تعیین حد مجاز انتشار آن‌ها و همچنین ایجاد زنجیره تأمین انرژی الکتریکی پایدار در مقایسه با سیستم‌های مبتنی بر سوخت فسیلی مورد بررسی قرار گیرد و جداول ارزیابی فنی، مالی و زیست‌محیطی برای هریک از مدل‌ها جهت ارائه تصویری شفاف برای تصمیم‌گیری بر مبنای توجیه اقتصادی انتخاب طرح بهینه ارائه گردد. برای این منظور از استراتژی مطالعه موردی در انجام پژوهش استفاده شد. منطقه مورد مطالعه یک روستای

2. Homer (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources)

1. Hybrid Power System (HPS)

توسعه روستا و انجام فعالیت‌هایی نظیر کشاورزی، پیاده‌سازی یک ریزشکه می‌تواند مزایای فراوانی را هم برای مصرف‌کنندگان و هم برای شرکت برق به‌همراه داشته باشد. به استناد سرشماری در سطح آبادی مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۰، روستای ونایی دارای جمعیت ۴۶۹۸ نفر با تعداد ۱،۳۵۳ خانوار است که در ۹۹۴ واحد مسکونی با متوسط متراژ ۱۰۰ مترمربع سکونت یافته‌اند. نوسازی یا احداث خط انتقال جدید برق برای این روستا به‌دلیل هزینه بسیار بالا و عدم دسترسی آسان از نظر اقتصادی، مقرون‌به‌صرفه نیست. بنابراین پیاده‌سازی یک سیستم تأمین برق پایدار ترکیبی با توجه به شرایط جغرافیایی و آب‌وهوایی ویژه این منطقه به‌دلیل سطح بالای دسترسی به منابع انرژی تجدیدپذیر مانند آب‌های سطحی فراوان، بادهای فصلی و سطح تابش مناسب خورشید، که در ادامه به‌صورت کامل به بیان هر یک از این پتانسیل‌های موجود برای تولید برق پرداخته می‌شود، مزایای فراوانی مانند ایجاد یک زنجیره تأمین انرژی برق پایدار و دستیابی به مفهوم تفکر تولید انرژی سبز را برای مصرف‌کنندگان خانگی و صنعتی و متولیان شبکه برق در بخش دولتی به‌همراه خواهد داشت.

### ۲.۳. ارزیابی بار مصرفی<sup>۲</sup> منطقه

به‌دلیل گذرا بودن منابع انرژی در سیستم‌های تولید، برآورد دقیق تقاضای انرژی ساعتی مصرف‌کننده‌های متصل به سیستم‌های تولید انرژی الکتریکی ترکیبی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. عموماً، سبد بار مصرفی خانوارهای روستایی محدودتر از خانوارهای شهری است؛ بنابراین میزان تقاضای انرژی الکتریکی مصرفی به‌ازای هر خانوار در مناطق روستایی کمتر از نواحی شهری است. اطلاعات میزان بار مصرفی منطقه مورد مطالعه به‌صورت مشخصات بار واقعی مصرفی ساعت به ساعت در یک دوره زمانی یک‌ساله با اندازه‌گیری بار مصرفی در هر یک از ماه‌های سال شامل ۷۶۰٫۸ ردیف داده برای مشترکین برق این منطقه از شرکت توزیع برق منطقه ۲ شهرستان بروجرد دریافت شده است. بر اساس اطلاعات دریافتی، در سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت، حداکثر جریان اندازه‌گیری‌شده خط انتقال توان روستای مذکور در فصول گرم سال برابر با ۱۱۰ آمپر است و حداقل جریان ۸۰ آمپری در فصول سرد سال اندازه‌گیری و ثبت شده است. در این پژوهش به‌منظور تخمین صحیحی از میزان تقاضای انرژی الکتریکی و رفتار بار مصرفی در طول شبانه‌روز به‌ازای هر خانوار، پرسشنامه‌های مناسب طراحی و

تجدید مثل باد و خورشید در اولویت تأمین بار الکتریکی است و بار الکتریکی باقی‌مانده باید توسط ژنراتورها یا باتری‌ها تأمین شود [۲۱]. سن و همکار در سال ۲۰۱۳، یک سیستم ترکیبی با منابع تجدیدپذیر در هند در حالت مستقل از شبکه را با استفاده از نرم‌افزار هومر شبیه‌سازی کردند. طی این مطالعه، ایجاد یک سیستم ترکیبی متشکل از نیروگاه آبی، خورشیدی، بادی و دیزل ژنراتور می‌تواند به‌لحاظ اقتصادی نسبت به گسترش شبکه، بسیار مقرون‌به‌صرفه باشد. همچنین سیستم مورد مطالعه، از نظر فنی و زیست‌محیطی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲]. پژوهش انجام‌شده توسط آزاده و همکار در سال ۲۰۰۰، به بهینه‌سازی زنجیره تأمین سوخت زیستی با استفاده از سیستم دینامیکی هیبریدی از طریق برنامه‌نویسی پرداخته و نتایج به‌صورت جداگانه برحسب مصرف بایو دیزل در بازار ایران ارائه شده است [۲۳]. در سال ۲۰۱۹، کسانیان و همکاران به تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی دو سیستم مختلف تجدیدپذیر در بندر دیر با استفاده از نرم‌افزار هومر پرداختند و اثبات کردند این منطقه پتانسیل مناسب برای نصب تکنولوژی‌های تجدیدپذیر را دارد و سرمایه‌گذاری در این زمینه در آینده نزدیک توجیه اقتصادی خواهد داشت [۲]. مک هنری در سال ۲۰۱۲، به بررسی فنی و تجزیه و تحلیل اقتصادی یک سیستم ترکیبی شامل نیروگاه بادی در مقیاس کوچک (۶ کیلووات)، سیستم فتوولتائیک، هیدروالکتریک، دیزل و گازی و مقایسه آن‌ها در دو حالت مستقل و متصل به شبکه برای مناطق روستایی استرالیای غربی پرداخته است [۲۴]. اوبرویس و همکار در سال ۲۰۱۰، به تعیین عملکرد مجموعه ژنراتورهای مختلف با استفاده از سوخت‌های بایو دیزل و ترکیب آن‌ها با سوخت‌های نفتی پرداخته‌اند [۲۵]. بلاکو و همکار در سال ۲۰۱۴ نیز، افزودن بایو دیزل و ماژول‌های خورشیدی به یک سیستم ترکیبی بادی جهت تأمین بار الکتریکی یک مزرعه کوچک در برزیل را مورد بررسی قرار دادند [۲۶].

### ۳. مطالعه موردی روستای ونایی<sup>۱</sup>

#### ۱.۳. معرفی منطقه

منطقه مورد مطالعه، روستای ونایی از توابع شهرستان بروجرد در استان لرستان واقع در کشور ایران است. سیستم برق‌رسانی به روستا قدیمی است و متناسب با توان مصرفی مورد نیاز این منطقه نیست. همچنین با توجه به پتانسیل‌های طبیعی بسیار بالای منطقه برای

جدول (۱): محاسبه توان مصرفی هر واحد مسکونی

ردیف	شرح	توان (وات)	مدت زمان (ساعت/روز)	دیماند انرژی موجود (کیلووات ساعت/روز)
۱	سیستم روشنایی	۳۰۰	۵	۵۰۰،۱
۲	یخچال و فریزر	۱۸۰	۲۴	۳۲۰،۴
۳	ماشین لباسشویی	۵۰۰	۰/۲۵	۱۲۵
۴	ماکروویو	۱،۲۰۰	۰/۵	۶۰۰
۵	جاروبرقی	۱،۴۰۰	۰/۱۷	۲۳۳/۲۴
۶	پنکه سقفی	۶۵	۳	۱۹۵
۷	اتو	۱،۱۰۰	۰/۲۵	۲۷۵
۸	تلویزیون و ضبط	۱۵۰	۵	۷۵۰
۹	کامپیوتر	۱۰۰	۶	۶۰۰
۱۰	شارژر گوشی همراه	۵	۳	۱۵

جدول (۲): محاسبه مجموع توان واقعی مصرفی ۱۰۰ خانوار

کل توان جذب شده <sup>۵</sup> (کیلووات)	ضریب همزمانی <sup>۴</sup>	توان کل (کیلووات)
۲/۵	۰/۵	۵
کل دیماند انرژی موجود (کیلووات ساعت/روز)	توان کل مورد نیاز (کیلووات)	دیماند انرژی موجود <sup>۴</sup> (کیلووات ساعت/روز)
۸۶۱/۳۲	۲۵۰	۸/۶۱

### ۳.۳. ارزیابی منابع طبیعی منطقه

#### ۱.۳.۳. منبع انرژی آبی

منطقه ونایی به دلیل قرار گرفتن در کوهپایه ارتفاعات گرین از رشته کوه‌های زاگرس دارای چشمه‌های آبی فراوان است که این منابع آبی سطحی پس از پیوستن به یکدیگر رودخانه گله‌رود را تشکیل می‌دهند. مجاورت این روستا با رودخانه گله‌رود، پتانسیل پیاده‌سازی نیروگاه‌های برق آبی از نوع مجاورت با رودخانه<sup>۷</sup> در مقیاس تولید میکرو و مینی را دارا است. جریان متوسط ماهیانه به‌طور دقیق بر اساس میزان متوسط بارش، متوسط دما و نقشه‌برداری منطقه برآورد شده است. جریان از ماه فروردین تا ماه شهریور به رودخانه وارد می‌شود. اطلاعات دبی اندازه‌گیری شده رود گله‌رود (حوضه دز) در ماه‌های مختلف سال در ایستگاه هیدرومتری ونایی از واحد هواشناسی و هیدرولوژی شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان لرستان دریافت شده است. با توجه به متغیر بودن جریان آب رودخانه در ماه‌های مختلف سال، تولید برق از یک منبع برق آبی بسته به دسترس بودن آب در طول سال متفاوت است.

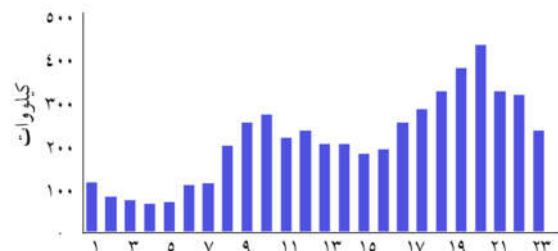
سپس با استفاده از رابطه (۱) معروف به کوکران<sup>۱</sup> به تعیین حجم جامعه نمونه پرداخته شده است که در نهایت منجر به انتخاب ۷۹ خانوار گردید.

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{d^2} \quad (1)$$

$$n = \frac{Z^2 \times p \times q}{d^2 \left(1 + \frac{1}{N} \times \left(\frac{Z^2 \times p \times q}{d^2} - 1\right)\right)}$$

که در آن،  $n$  حجم نمونه،  $N$  حجم جمعیت آماری،  $Z$  مقدار متغیر نرمال واحد استاندارد،  $p$  نسبتی از جمعیت دارای صفت معین،  $d$  مقدار اشتباه مجاز یا درصد خطا و  $q = (1-p)$  نسبتی از جمعیت فاقد صفت معین است.

همان طور که گفته شد، اطلاعات پایه‌ای پس از حضور در منطقه به‌صورت مصاحبه سازمان‌یافته با ۷۹ خانوار به‌عنوان جامعه نمونه گردآوری شد. در این مقاله، حجم جامعه آماری برابر با ۱۰۰ خانوار جهت اجرای طرح به‌صورت پایلوت در نظر گرفته شده است. پس از ورود ۷۶۰۸ داده به نرم‌افزار، میانگین تقاضای انرژی الکتریکی مصرفی این منطقه برابر با ۶۲۲۸/۱۵ کیلووات-ساعت در روز و بیشینه بار مصرفی برابر با ۶۲۵/۸۷ کیلووات محاسبه شد. پروفیل بار روزانه<sup>۲</sup> مصرفی منطقه مطابق با نمودار شکل (۱) است.

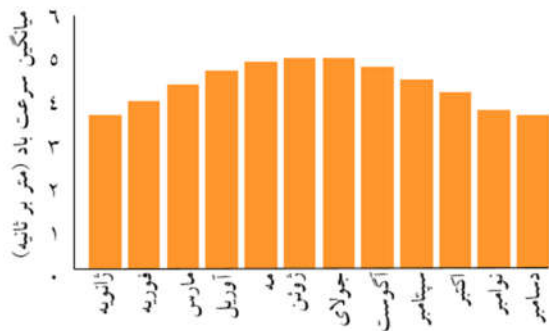


شکل (۱): پروفیل بار روزانه مصرفی

اصلی‌ترین مصارف برقی هر خانوار مطابق با داده‌های جمع‌آوری شده از طریق مصاحبه به‌همراه متوسط توان مصرفی و مدت‌زمان مصرف روزانه هریک از بارها بر اساس وب‌سایت محاسبه میزان مصرف انرژی،<sup>۳</sup> در جدول (۱) آورده شده است. مجموع توان مصرفی نصب‌شده به‌ازای هر ساختمان برابر با ۵ کیلووات است. برای محاسبه توان مصرفی واقعی باید به‌ازای هر مشترک برق، ضریب همزمانی بار را نیز مبنا قرار داد. بر اساس مطالعه انجام‌شده توسط کنستانتلوس و همکاران در سال ۲۰۱۴، مقدار ضریب همزمانی برای مصارف خانگی برابر با ۰/۵ است [۲۷]. بنابراین مجموع توان واقعی مصرفی برای هر ساختمان و کل منطقه مورد مطالعه (روستای ونایی) مطابق با جدول (۲) محاسبه می‌شود.

4. Coincidence Factor  
5. Total Absorbed Power  
6. Existing Energy Demand (EED)  
7. Run of River

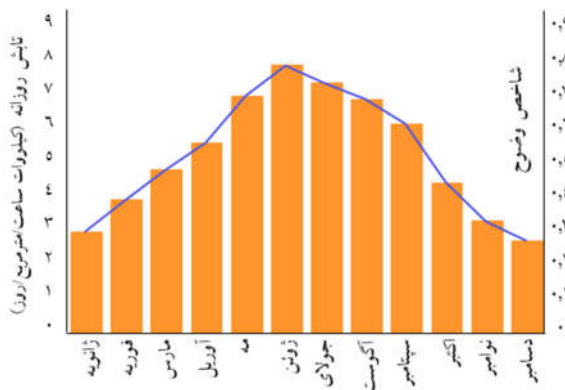
1. Cochran Formula  
1. Daily Load Profile  
3. www.energyusecalculator.com



شکل (۳): منحنی سرعت باد سالانه منطقه ونایی

### ۳.۳.۳. منبع انرژی خورشیدی

منبع خورشیدی برای منطقه مورد مطالعه ونایی در مکان به عرض جغرافیایی  $33^{\circ}54' N$ ، طول جغرافیایی  $48^{\circ}35' E$  و ارتفاع ۱۵۱۹ متر از سطح دریا قرار دارد که اطلاعات مربوط به تابش روزانه برحسب کیلووات ساعت بر مترمربع در روز در جدول (۳) آمده است. در این منطقه میانگین تابش خورشیدی سالانه به اندازه  $5/14$  کیلووات ساعت بر مترمربع در روز مقیاس شده است. بیشترین میزان شدت تابش مربوط به ماه ژوئن (خرداد) و کمترین میزان آن مربوط به ماه دسامبر (آذر) است. با توجه به اینکه تابش خورشید در طول سال در دسترس است، پیشینه توان خروجی از سیستم فتوولتائیک به دست می‌آید. مطابق با پتانسیل سنجی‌های انجام‌شده برای این منطقه از شهرستان بروجرد، منحنی تابش روزانه خورشید به صورت شکل (۴) است.

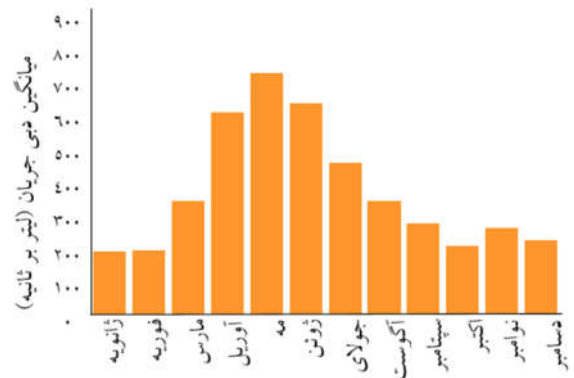


شکل (۴): منحنی تابش روزانه خورشید منطقه ونایی

### ۴.۳. ارزیابی تکنولوژی‌های ترکیبی مورد استفاده

در این مقاله، سه سیستم ترکیبی شامل نیروگاه بادی، نیروگاه فتوولتائیک، نیروگاه برق‌آبی و دیزل ژنراتور با سوخت‌های زیستی، دیزل، و ترکیب دیزل و سوخت زیستی به‌عنوان منابع اصلی و باتری به‌عنوان منبع پشتیبان و ذخیره‌کننده انرژی و مبدل<sup>۲</sup> برای تبدیل

دبی جریان ماهانه رود گِله‌رود، به صورت نمودار شکل (۲) است.



شکل (۲): نمودار دبی جریان ماهانه رودخانه گله‌رود

### ۲.۳.۳. منبع انرژی بادی

همان‌طور که در بخش ۱.۳ (معرفی منطقه) توضیح داده شد، شهر بروجرد واقع در دامنه ارتفاعات زاگرس و در حالت پایکوهی قرار دارد. میانگین سالانه داده‌های مربوط به انرژی باد اندازه‌گیری شده در منطقه از سامانه درخواست داده‌های هواشناسی مطابق با جدول (۳) دریافت و مقادیر با اطلاعات ذکر شده در پایگاه اطلاعاتی ناسا نیز مقایسه شد.

جدول (۳): داده‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

ردیف	سرعت باد (متر/ثانیه)	میزان تابش روزانه انرژی خورشیدی بر سطح افق <sup>۱</sup> (کیلووات ساعت/مترمربع/روز)	ماه
۱	۳/۵	۲/۹۱	ژانویه
۲	۳/۸	۳/۸۳	فوریه
۳	۴/۲	۴/۶۹	مارس
۴	۴/۵	۵/۴۹	آوریل
۵	۴/۷	۶/۸۴	مه
۶	۴/۸	۷/۷۳	ژوئن
۷	۴/۸	۷/۲۲	جولای
۸	۴/۶	۶/۷۵	اگوست
۹	۴/۳	۶/۰۴	سپتامبر
۱۰	۴	۴/۳۳	اکتبر
۱۱	۳/۶	۳/۲۱	نوامبر
۱۲	۳/۵	۲/۶۴	دسامبر

میانگین سرعت سالانه باد در این مکان  $4/2$  متر بر ثانیه است. مطابق با پتانسیل سنجی‌های انجام‌شده برای این منطقه از شهرستان بروجرد، منحنی سرعت باد سالانه به صورت نمودار شکل (۳) است.

در ادامه مشخصات فنی و اقتصادی هریک از تکنولوژی‌های ترکیبی به‌کاررفته در ساختار سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۱.۴.۳. نیروگاه برق آبی کوچک

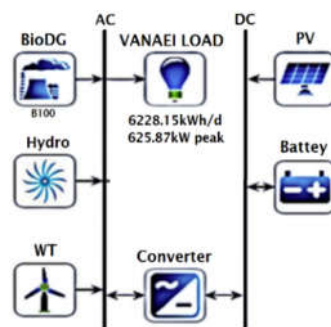
مطابق با پژوهش انجام‌شده توسط قدیمی و همکاران در سال ۲۰۱۱ و به‌طور مشابه پژوهش انجام‌شده توسط ترابی و همکاران در سال ۱۳۸۸، دو عدد نیروگاه برق آبی ۵۰ و ۱۸۰ کیلوواتی هریک با میانگین دبی ۲۵۰ و ۳۵۰ لیتر بر ثانیه و ارتفاع ریزش آب ۲۵ و ۸۵ متر پیشنهاد شد [۲۸ و ۲۹]. با توجه به اینکه نرم‌افزار هومر قادر به شبیه‌سازی همزمان دو نیروگاه برق آبی مجزا برای یک سیستم ترکیبی نیست، در این مقاله یک نیروگاه معادل ۲۳۰ کیلوواتی برای شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. متوسط هزینه اجرای پروژه‌های نیروگاهی میکروهیدرو در ایران برابر با ۳۰۰۰ دلار به‌ازای هر کیلووات برق تولیدی و یا ۶۹۰۰۰۰ دلار به‌ازای یک عدد نیروگاه ۲۳۰ کیلوواتی در نظر گرفته شده است [۳۰]. همچنین متوسط هزینه ۲/۵٪ از میزان هزینه احداث اولیه برای هریک از نیروگاه‌ها معادل با ۱۷۲۵۰ دلار به‌عنوان هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه آن‌ها در نظر گرفته شده است. یکی از مزایای مهم نیروگاه‌های برق آبی، طراحی طول عمر این پروژه‌ها برابر یا بیشتر از ۳۰ سال برای تجهیزات الکترومکانیکی و نزدیک به ۵۰ سال برای سایر اقلام و تأسیسات مانند دریچه مخصوص تنظیم جریان آب<sup>۳</sup> و اتاق تولید برق است. لذا با توجه به در نظر گرفتن طول عمر ۲۵ ساله برای پروژه مورد مطالعه، در عمل هزینه جایگزینی برای منبع نیروگاه برق آبی در این مقاله برابر با صفر است.

### ۲.۴.۳. نیروگاه بادی

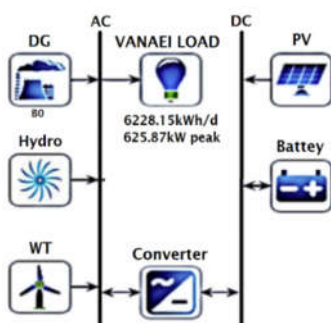
از آنجا که پراکندگی سرعت‌های باد در منطقه ونایی بین ۳/۵ تا ۴/۸ متر بر ثانیه است، استفاده از توربین‌های با توان بالا که از سرعت بالاتر از ۵ متر بر ثانیه شروع به حرکت می‌کنند، پیشنهاد نمی‌شود. مطابق با اطلاعات آمده در جدول (۳)، متوسط سالانه سرعت باد در ارتفاع ۵۰ متری سطح زمین (محل نصب توربین) در منطقه ونایی ۴/۲ متر بر ثانیه است. پس از بررسی نمودارهای توان-سرعت توربین‌های بادی، توربین مدل WES250 با توان نامی ۲۵۰ کیلووات انتخاب شد. این توربین بادی با حداقل وزش باد ۳ متر بر ثانیه شروع به حرکت می‌کند و در سرعت‌های ۱۲/۵ تا ۱۶ متر بر ثانیه، بیشترین توان خروجی را دارد و در سرعت‌های بیشتر از ۱۶ متر بر ثانیه متوقف می‌شود. ارتفاع هاب این توربین ۵۰ متر و قطر

خروجی DC<sup>۱</sup> به AC<sup>۲</sup> یا برعکس مدل‌سازی شده است. ساختار سیستم‌های ترکیبی مورد مطالعه در شکل (۵) نشان داده شده است.

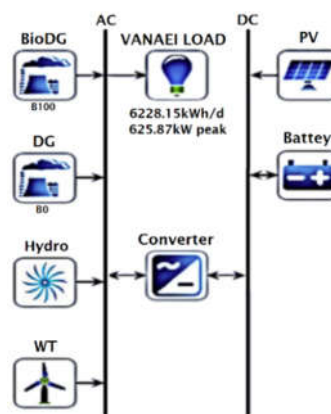
طول عمر پروژه با توجه به طول عمر تجهیزات، ۲۵ سال و نرخ بهره واقعی سالانه برابر با ۷/۸۴٪ در نظر گرفته شده است. هزینه ثابت سرمایه‌گذاری اولیه سیستم برابر با ۳۵۰۰ دلار برای کل پروژه در نظر گرفته می‌شود و هزینه ثابت تعمیرات و نگهداری برای طول عمر این پروژه برابر با ۷۰۰ دلار در سال تخمین زده شده است. هزینه ثابت سرمایه‌گذاری اولیه شامل عملیات عمرانی، خرید کالا، دستمزد نیروی کار، هزینه صدور مجوزهای لازم، مدیریت، کسورات قانونی و سایر هزینه‌های متفرقه است.



الف. سیستم هیبرید با بایو دیزل ژنراتور



ب. سیستم هیبرید با دیزل ژنراتور



ج. سیستم هیبرید با بایو دیزل و دیزل ژنراتور

شکل (۵): ساختار سیستم‌های ترکیبی مورد مطالعه

1. Direct Current
2. Alternative Current

ژنراتور با سوخت ترکیبی ۲۰٪ زیستی (B20)، ۷۰٪ دیزل (D70) و ۱۰٪ بوتانول (A10) پرداخته شده است. مشخصات فنی سوخت‌های مورد استفاده به شرح جدول (۴) است [۳۵]. سوخت زیستی به دلیل کاهش انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی در مقایسه با سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یک سوخت دوست‌دار محیط‌زیست می‌تواند به‌عنوان سوخت جایگزین برای دیزل مورد استفاده قرار گیرد. دانه‌های گیاهی بزرگ‌ترین تأمین‌کننده منابع روغنی تولید سوخت زیستی هستند.

مشخصات	دیزل ۱۰۰٪	بایو ۲۰٪	بایو ۱۰۰٪	D70B20A10
چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)	۸۳۷	۸۴۴	۸۸۶	۸۴۰
ارزش حرارتی پایین <sup>۱</sup> (کیلوژول بر کیلوگرم)	۴۵/۸۵	۴۱/۴۳	۳۹/۰۴	۴۳/۲۸

مطابق با پژوهش انجام‌شده توسط نجفیان و همکاران در سال ۱۳۹۴ و به‌طور مشابه پژوهش انجام‌شده توسط بهاتیا و همکاران در سال ۲۰۲۱، به دلیل نزدیک بودن خواص سوخت زیستی به دیزل، سوخت زیستی می‌تواند به‌تنهایی یا به‌صورت ترکیبی با سوخت دیزل و یا روغن در موتورهای دیزلی مورد استفاده قرار گیرد، بدون آنکه نیاز به ایجاد تغییراتی در موتور باشد [۳۶ و ۳۷]. وجود (۱۰ تا ۱۲٪ وزنی) اکسیژن در ساختار سوخت زیستی موجب احتراق کامل شده و از ایجاد و انتشار ذرات معلق کربن در هوا جلوگیری می‌کند. همچنین سوخت زیستی فاقد گوگرد بوده و مواد سمی مانند اکسیدگوگرد تولید نمی‌کند. طبق این پژوهش، دانه‌های کانولا، کتان و سویا مطلوب‌ترین منابع تولید سوخت زیستی در ایران هستند که در میان مناطق مختلف، استان لرستان ۳٪ از سهم کاشت کانولا در ایران را به خود اختصاص می‌دهد. روغن کانولا از طریق یک فرایند پالایشی به نام ترانس اکسیداسیون<sup>۵</sup> به سوخت زیستی تبدیل می‌شود، سپس روغن برای حذف گلیسرین با الکل مخلوط می‌شود. سوخت زیستی خالص کانولا می‌تواند در هر نسبت با سوخت دیزل مخلوط گردد. یکی از متداول‌ترین سوخت‌های ترکیبی مورد استفاده B20 است که از ۲۰٪ سوخت زیستی و ۷۰٪ سوخت دیزل به‌صورت مخلوط تشکیل می‌شود. تولید سوخت زیستی به‌طور کلی در شکل (۶) نشان داده شده است.

با توجه به بیشینه بار مصرفی ۶۲۵/۸۷ کیلووات برای ۱۰۰ خانوار (طرح پایلوت) مورد مطالعه در این مقاله، برای پشتیبانی تأمین توان اضطراری از یک دستگاه بایو/دیزل ژنراتور با ظرفیت

روتور آن ۳۰ متر است. توربین بادی به باس AC متصل است و انرژی الکتریکی تولیدشده توسط آن می‌تواند به‌صورت مستقیم و بدون انتقال به باس DC و بدون نیاز به اجزای ذخیره‌کننده، بار را تأمین کند. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه توربین بادی با طول عمر ۲۵ سال، حدود ۲۲۵۰۰۰ دلار است [۳۱]. هزینه بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه بادی برابر با ۲٪ سرمایه‌گذاری اولیه و معادل با ۴۵۰۰ دلار در سال در نظر گرفته شده است. هزینه جایگزینی توربین معادل با ۷۰٪ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه است [۳۲]. در این پژوهش با توجه به اینکه طول عمر پروژه مورد مطالعه، ۲۵ سال و طول عمر توربین بادی انتخابی نیز ۲۵ سال است، در عمل هزینه جایگزینی برای منبع برق بادی در این مقاله برابر با صفر است.

### ۳.۴.۳. نیروگاه خورشیدی

برای این منظور، آرایه‌های فتوولتائیک یک کیلوواتی مدل فلت پلنت<sup>۱</sup> ساخت شرکت جنریک<sup>۲</sup> با طول عمر ۲۵ سال و بدون سیستم ردیاب با اتصال سری و شیب نصب ۴۵ درجه و ضریب DF<sup>۳</sup> برابر با ۹۰٪ انتخاب شد. پنل‌های فتوولتائیک که به‌طور مستقیم تابش خورشید را به الکتریسیته تبدیل می‌کنند، صرف‌نظر از دما و ولتاژی که در معرض آن هستند، برق مستقیم یا DC تولید می‌کنند. هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه جایگزینی برای آرایه‌های فتوولتائیک به‌ازای هر کیلووات سیستم انرژی خورشیدی در بازار ایران برابر با ۳۵۰۰ دلار است [۳۳]. در این پژوهش به دلیل یکسان بودن طول عمر پروژه با طول عمر این آرایه‌ها، در عمل هزینه تعویض آن‌ها برابر با صفر است. هزینه بهره‌برداری چنین سیستمی برابر با ۲۵ دلار در سال به‌ازای هر کیلووات تعریف شده است [۳۴]. با توجه به اینکه طول عمر پروژه مورد مطالعه، ۲۵ سال در نظر گرفته شده و طول عمر سیستم فتوولتائیک انتخابی نیز ۲۵ سال است، در عمل هزینه جایگزینی برای این سیستم برابر با صفر است.

### ۴.۴.۳. بایو/دیزل ژنراتور

در سیستم‌های تولید توان ترکیبی، از دیزل ژنراتور به‌عنوان منبع اصلی تأمین توان پایدار برای مصرف‌کننده‌ها و همچنین جهت شارژ کردن باتری‌های منبع ذخیره‌کننده انرژی به‌هنگام عدم تغذیه بار توسط سایر منابع تولید انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود.

در این مقاله به مقایسه فنی و اقتصادی ژنراتور با سوخت دیزل خالص (D100)، ژنراتور با سوخت زیستی خالص (B100) و

4. Lower Heating Value  
5. Transesterification

1. Flat Plate  
2. Generic  
3. Derating Factor



هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای این باتری برابر با ۳۵۰/۸۴ دلار، هزینه جایگزینی برابر با ۳۱۵/۷۶ دلار و هزینه تعمیرات و نگهداری آن معادل ۱/۱ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و برابر با ۳/۵ دلار در سال در نظر گرفته شده است [۳۴].

### ۶.۴.۳. مبدل (کانورتر)

در یک سیستم ترکیبی، از مبدل برای تبدیل جریان مستقیم از یک منبع مانند باتری، پنل خورشیدی یا در برخی مواقع توربین‌های بادی به برق جریان متناوب استفاده می‌شود (اینورتر<sup>۳</sup>) یا برعکس (یکسوساز<sup>۴</sup>). در این مقاله، یک مبدل DC به AC با توان ۳۰۰ کیلووات و طول عمر ۱۰ سال در نظر گرفته شده است. برای این منظور، مبدل ساخت شرکت لئونیکس<sup>۵</sup> مدل MTP-4117 انتخاب شد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه جایگزینی برای این مبدل، برابر با ۶۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه برای مبدل، برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود.

### ۴. مدل‌سازی اقتصادی سیستم

#### روش تحلیل

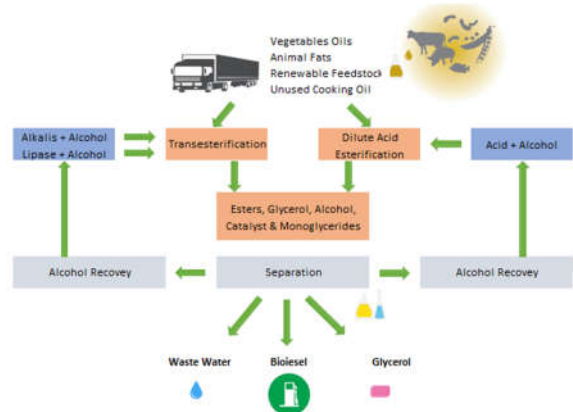
در این مقاله برای مدل‌سازی سیستم، از نرم‌افزار هومر که یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارها در ارزیابی و طراحی سیستم‌های ترکیبی و محصول کمپانی انرژی تجدیدپذیر آمریکاست<sup>۶</sup>، استفاده شده است. این نرم‌افزار دارای سه قابلیت اساسی شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و تحلیل حساسیت است. نرم‌افزار هومر عملکرد یک سیستم را با محاسبه معادلات تعادل انرژی در تمام گام‌های زمانی، در دوره زمانی یک‌ساله شبیه‌سازی می‌کند و سپس امکان‌پذیر بودن هر کدام از ساختارها را به لحاظ تأمین بار الکتریکی ارزیابی و برای تمامی سیستم‌های شبیه‌سازی شده، عملیات بهینه‌سازی را انجام می‌دهد. در انتها نتایج حاصل را بر اساس محدودیت‌های تعریف‌شده توسط طراح، به صورت لیستی از پیکره‌بندی‌های ممکن که بر اساس هزینه خالص فعلی<sup>۷</sup> مرتب شده‌اند، به صورت جداول و نمودار نمایش می‌دهد [۳۹].

نرم‌افزار هومر برای محاسبه توان خروجی آرایه‌های خورشیدی از معادله (۲) استفاده می‌کند:

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} (G_T | G_{T,STC}) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})] \quad (2)$$

3. Inverter
4. Rectifier
5. Leonics
6. National Renewable Energy Laboratory
7. Net Present Cost

۵۵۰ کاوا برابر با ۴۴۰ کیلووات استفاده شده است. قیمت سوخت زیستی انتخاب‌شده برابر با ۷۰ سنت یا ۰/۷ دلار به‌ازای هر لیتر است [۳۸]. قیمت سوخت دیزل برابر با ۳۲ سنت و یا ۰/۳۲ دلار به‌ازای هر لیتر<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است [جولای-۲۰۱۹].



شکل (۶): مراحل تولید سوخت بایو دیزل

این قیمت‌ها می‌تواند بر اساس منطقه، هزینه حمل‌ونقل و شرایط اقتصادی متفاوت باشد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برای تأمین هریک از دیزل ژنراتورهای ۴۴۰ کیلوواتی ساخت شرکت جنریک برابر با ۱۰۸۰۰۰ دلار، هزینه جایگزینی برابر با ۹۰۰۰۰ دلار و هزینه تعمیرات و نگهداری برابر با ۰/۱ دلار در سال در نظر گرفته شده است [۳۴]. این هزینه از مجموع هزینه تعویض فیلترهای مصرفی، هزینه روغن و سوخت مصرفی در یک سال (۸۷۶۰ ساعت) محاسبه شده است.

### ۵.۴.۳. باتری

برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی تولیدی توسط سیستم هیبریدی، تنظیم ولتاژ سیستم و همچنین برای تأمین بار مورد نیاز در شرایط عدم تولید برق توسط سیستم خورشیدی یا بادی به دلیل کاهش سرعت باد یا شرایط متغیر تابشی خورشید، عموماً از باتری‌های سرب-اسید استفاده می‌شود. در مدتی که انرژی الکتریکی تولیدی کل توسط سیستم هیبریدی بیش‌تر از تقاضای بار باشد، مازاد انرژی تولیدشده به بانک باتری تزریق شده و باتری در حالت شارژ قرار می‌گیرد. در طی زمانی که انرژی الکتریکی تولیدی کل توسط سیستم هیبریدی کم‌تر از تقاضای بار باشد، این کمبود توان، توسط دشارژ انرژی باتری جبران می‌شود. در این مقاله، برای میزان انرژی مصرفی روزانه ۶۲۲۸/۱۵ کیلووات-ساعت، از باتری‌های ۱۲ ولتی با حداقل طول عمر ۸ تا ۱۲ سال مدل UB4D ساخت شرکت یونیورسال<sup>۲</sup> استفاده شده است.

1. www.Globalpetrolprices.com
2. Universal

نرم‌افزار هومر در هر مرحله زمانی با استفاده از معادله (۵) توان الکتریکی توربین آبی را محاسبه می‌کند:

$$P_{hyd} = \frac{\eta_{hyd} \times \rho_{water} \times g \times h_{net} \times \dot{Q}_{turbine}}{1000W/kW} \quad (5)$$

که در آن،  $P_{hyd}$  توان خروجی توربین آبی (کیلووات)،  $\eta_{hyd}$  بازده توربین آبی (درصد)،  $\rho_{water}$  چگالی آب (۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب)،  $g$  شتاب ناشی از گرانش (۹/۸۱ متر بر مربع ثانیه)،  $h_{net}$  رأس موثر (متر)،  $\dot{Q}_{turbine}$  نرخ جریان توربین آبی (مترمکعب بر ثانیه) است.<sup>۳</sup>

## ۵. آنالیز و تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی

هومر مجموع هزینه خالص فعلی را برای بیان هزینه چرخه عمر به کار می‌برد. مجموع هزینه خالص فعلی تمامی هزینه‌ها و درآمدهایی را که در طول عمر شبکه اتفاق می‌افتد، با بازگشت مبلغ تنزیل‌شده پرداخت‌ها و هزینه‌های آتی به حال و با استفاده از نرخ نزول، به یک مبلغ کل به دلار خلاصه می‌کند. هزینه خالص فعلی شامل هزینه‌های ساخت، جابه‌جایی اجزاء، تعمیر و نگهداری، سوخت، به‌علاوه هزینه‌های خرید توان از شبکه و هزینه‌های متفرقه همچون جریمه‌های ناشی از انتشار آلاینده‌هاست. هزینه جریمه یا هزینه اجتماعی<sup>۴</sup> ناشی از انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای<sup>۵</sup> بر اساس مطالعه بانک جهانی و سازمان حفاظت از محیط‌زیست از ترانزنامه انرژی سال ۱۳۹۱ استخراج و به شرح جدول (۵) در محاسبه هزینه‌های سیستم لحاظ شده است [۴۰]. حد مجاز انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای سولفور دی‌اکسید، اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق بر اساس سازمان حفاظت از محیط‌زیست آمریکا به ترتیب برابر با ۲۰، ۴۰ و ۴۰ میکروگرم در سال در مترمکعب در نظر گرفته شده است.<sup>۶</sup>

جدول (۵): هزینه اجتماعی انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای (دلار بر تن)

نوع گاز	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	PM	CO <sub>2</sub>
هزینه	۶۰۷/۵۹	۱۸۴۸/۱۰	۱۸۹/۸۷	۴۰۳۵۴/۴۳	۱۰/۱۳

هومر فرض می‌کند که تمامی هزینه‌ها با نرخ یکسانی در طول عمر پروژه افزایش پیدا می‌کند. تمامی هزینه‌ها در هومر، هزینه‌های واقعی هستند؛ بدین معنا که در ارتباط ثابت با دلار است. بهینه‌ترین سیستم پیشنهادی به‌لحاظ اقتصادی توسط نرم‌افزار در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نشان داده شده است.

که در آن،  $Y_{PV}$  ظرفیت نامی آرایه فتوولتائیک یا توان خروجی آن در شرایط آزمایش استاندارد (کیلووات)،  $f_{PV}$  ضریب کاهشی آرایه فتوولتائیک (درصد)،  $G_T$  تابش تصادفی خورشید روی آرایه فتوولتائیک در مرحله زمان فعلی (کیلووات ساعت بر مترمربع)،  $G_{T,STC}$  تابش تصادفی در شرایط آزمایش استاندارد (یک کیلووات ساعت بر مترمربع)،  $\alpha_p$  ضریب دما (درصد بر درجه سانتی‌گراد)،  $T_c$  دمای آرایه فتوولتائیک در مرحله زمان فعلی (درجه سانتی‌گراد)،  $T_{c,STC}$  دمای آرایه فتوولتائیک در شرایط آزمایش استاندارد (۲۵ درجه سانتی‌گراد) است. هومر در هر ساعت از سال، میزان تابش تصادفی خورشید برخورد کرده به سطح، جهت و موقعیت آرایه فتوولتائیک را تعیین می‌کند.

نرم‌افزار هومر با استفاده از یک فرایند سه‌مرحله‌ای، خروجی توربین بادی را در هر مرحله از زمان محاسبه می‌کند. ابتدا هومر سرعت باد را در ارتفاع دماغه<sup>۱</sup> توربین بادی محاسبه می‌کند، سپس به محاسبه میزان توان تولیدی توربین بادی در آن سرعت باد در چگالی هوای استاندارد برابر با ۱۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب می‌پردازد. سرانجام، مقدار خروجی برق را برای چگالی واقعی هوا تنظیم می‌کند.

### محاسبه سرعت باد در ارتفاع دماغه

در هر مرحله از زمان، هومر سرعت باد در ارتفاع دماغه توربین بادی را با استفاده از اطلاعات آمده در جدول (۳) محاسبه می‌کند. اگر قانون لگاریتمی اعمال گردد، هومر سرعت باد در ارتفاع دماغه را با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌کند:

$$U_{hub} = U_{anem} \times \frac{\ln(Z_{hub}/Z_0)}{\ln(Z_{anem}/Z_0)} \quad (3)$$

که در آن،  $U_{hub}$  سرعت باد در ارتفاع دماغه توربین بادی (متر بر ثانیه)،  $U_{anem}$  سرعت باد در ارتفاع بادسنج (متر بر ثانیه)،  $Z_{hub}$  ارتفاع دماغه توربین بادی (متر)،  $Z_{anem}$  ارتفاع بادسنج (متر)،  $Z_0$  طول زبری سطح (متر) است. اگر قانون توان اعمال گردد، هومر سرعت باد در ارتفاع دماغه را با استفاده از معادله (۴) محاسبه می‌کند:

$$U_{hub} = U_{anem} \times \left( \frac{Z_{hub}}{Z_{anem}} \right)^\alpha \quad (4)$$

که در آن،  $U_{hub}$  سرعت باد در ارتفاع دماغه توربین بادی (متر بر ثانیه)،  $U_{anem}$  سرعت باد در ارتفاع بادسنج (متر بر ثانیه)،  $Z_{hub}$  ارتفاع دماغه توربین بادی (متر)،  $Z_{anem}$  ارتفاع بادسنج (متر)،  $\alpha$  قانون توان نمایشی<sup>۲</sup> است.

3. www.homerenergy.com  
4. Social Cost (Penalty Cost)  
5. Green House Gases  
6. www.epa.gov/naaqs

1. Hub  
2. Power Law Exponent

- بایو دیزل ژنراتور به ظرفیت ۴۴۰ کیلووات
- دیزل ژنراتور به ظرفیت ۴۴۰ کیلووات
- ۳۶۰ عدد باتری ۲۰۰ آمپر-ساعت
- مبدل به ظرفیت ۳۵۸ کیلووات

طبق محاسبات انجام شده توسط نرم افزار هومر، مجموع هزینه خالص فعلی و هزینه انرژی الکتریکی این سیستم به ترتیب برابر با ۶۶۱۵۸۳۴ دلار و ۰/۲۶۹۰ دلار است.

گردش نقدینگی<sup>۲</sup> سه سیستم نیز در شکل های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است (رجوع به ضمیمه). در این نمودارها، هزینه ها با علامت منفی و درآمدها با علامت مثبت مشخص شده اند. بنابراین هزینه های سرمایه گذاری اولیه و هزینه های سالانه شامل تعمیرات و نگهداری و هزینه های جایگزینی تجهیزات که با توجه به طول عمر تجهیزات مورد استفاده در سیستم، هر چند سال یک بار اتفاق می افتند، با علامت منفی نشان داده شده است و تنها درآمد حاصل از فروش برق و همچنین ارزش اسقاط<sup>۳</sup> که در پایان طول عمر پروژه (سال ۲۵ام) از فروش تجهیزاتی که هنوز از عمر آنها باقی مانده حاصل می گردد، با علامت مثبت نشان داده شده است. برای محاسبه ارزش اسقاط هریک از تجهیزات، به عنوان نمونه مطابق با شکل (۱۰)، بانک باتری که دارای هزینه اولیه ۴۹۱۱۷۶ دلار در سال صفر است و از سال یکم به بعد دارای هزینه سالانه ۴۹۰۰ دلار برای بهره برداری است، مورد تحلیل قرار می گیرد. بانک باتری از سال دوازدهم، هر دوازده سال یک بار نیاز به هزینه جایگزینی ۴۴۲۰۶۴ دلار دارد. در نتیجه باتری هایی که در ابتدای سال ۲۴ جایگزین قبلی شده است، فقط یک سال از عمر مفیدشان در پایان طول عمر پروژه گذشته و هنوز یازده سال از عمر مفید آنها با به پایان رسیدن پروژه باقی مانده است. نرم افزار هومر با در نظرگیری یک استهلاک خطی، مقدار ۹۱٪ را برای پیدا کردن ارزش اسقاط از هزینه جایگزینی<sup>۴</sup> نظر می گیرد؛ به عبارت دیگر اگر هزینه جایگزینی برابر با ۴۴۲۰۶۴ دلار است، مقدار ۴۰۵۲۲۵ دلار، درآمد حاصل از فروش بانک باتری یا به عبارتی ارزش اسقاط آن در سال آخر عمر پروژه خواهد بود. نیروگاه برق آبی با هزینه اولیه ۶۹۰۰۰۰ دلار، تا انتهای طول عمر پروژه (۲۵ سال) نیاز به جایگزینی ندارد؛ در نتیجه ارزش اسقاط این نیروگاه برابر با صفر است. همچنین نیروگاه از انتهای سال یکم هر سال دارای ۱۷۲۵۰ دلار بابت هزینه بهره برداری است. بایو دیزل ژنراتور با هزینه اولیه

Architecture									
	PV (kW)	WT	BIODG (kW)	DG (kW)	Battery	Hydro (kW)	Converter (kW)		
	234	3	440		1,400	230	416		

شکل (۷): سیستم بهینه هیبرید شامل بایو دیزل ژنراتور

Architecture									
	PV (kW)	WT	BIODG (kW)	DG (kW)	Battery	Hydro (kW)	Converter (kW)		
	1,038	3		440	360	230	279		

شکل (۸): سیستم بهینه هیبرید شامل دیزل ژنراتور

Architecture									
	PV (kW)	WT	BIODG (kW)	DG (kW)	Battery	Hydro (kW)	Converter (kW)		
	687	3	440	440	360	230	358		

شکل (۹): سیستم بهینه هیبرید شامل بایو دیزل ژنراتور و دیزل ژنراتور

جزئیات سیستم های بهینه به صورت زیر خلاصه شده است:

❖ سیستم هیبرید بهینه شامل بایو دیزل ژنراتور:

- نیروگاه برق آبی به ظرفیت ۲۳۰ کیلووات
  - ۳ عدد توربین بادی هریک به ظرفیت ۲۵۰ کیلووات
  - آرایه فتوولتائیک به ظرفیت ۲۳۴ کیلووات
  - بایو دیزل ژنراتور به ظرفیت ۴۴۰ کیلووات
  - ۴۰۰۱ عدد باتری ۲۰۰ آمپر-ساعت
  - مبدل به ظرفیت ۴۱۶ کیلووات
- طبق محاسبات انجام شده توسط نرم افزار هومر، مجموع هزینه خالص فعلی و هزینه انرژی الکتریکی<sup>۱</sup> این سیستم به ترتیب برابر با ۴۸۲۴/۵۲۷ دلار و ۰/۱۹۶۲ دلار است.

❖ سیستم هیبرید بهینه شامل دیزل ژنراتور:

- نیروگاه برق آبی به ظرفیت ۲۳۰ کیلووات
  - ۳ عدد توربین بادی هریک به ظرفیت ۲۵۰ کیلووات
  - آرایه فتوولتائیک به ظرفیت ۱۰۳۸ کیلووات
  - دیزل ژنراتور به ظرفیت ۴۴۰ کیلووات
  - ۳۶۰ عدد باتری ۲۰۰ آمپر-ساعت
  - مبدل به ظرفیت ۲۷۹ کیلووات
- طبق محاسبات انجام شده توسط نرم افزار هومر، مجموع هزینه خالص فعلی و هزینه انرژی الکتریکی این سیستم به ترتیب برابر با ۶۳۳۳۷۹۶ دلار و ۰/۲۵۷۵ دلار است.

❖ سیستم هیبرید بهینه شامل بایو دیزل ژنراتور و دیزل ژنراتور:

- نیروگاه برق آبی به ظرفیت ۲۳۰ کیلووات
- ۳ عدد توربین بادی هریک به ظرفیت ۲۵۰ کیلووات
- آرایه فتوولتائیک به ظرفیت ۶۸۷ کیلووات

2. Cash Flow  
3. Salvage  
4. Replacement Cost

1. Cost of Energy

پاییز و زمستان، به دلیل کاهش سرعت باد و جریان فصلی رودخانه با سهم تولید ۵۶۴۳۶ کیلووات-ساعت در سال یا ۱/۷۲٪ به خود اختصاص داده است. همچنین آرایه‌های فتوولتائیک به میزان ۳۶۷۳۹۲ کیلووات یا ۱۱/۲٪ انرژی تولید می‌کنند. مطابق با شکل (۱۳) مشاهده می‌شود نیروگاه برق‌آبی با سهم تولید ۴۲/۲٪ در تمامی ماه‌های سال در مدار قرار دارد. دیزل ژنراتور با سهم تولید ۲/۵۸٪ و آرایه‌های فتوولتائیک با ۳۵/۴٪ و توربین‌های بادی با ۱۹/۹٪ در تولید انرژی مشارکت دارند. همچنین مطابق با شکل (۱۴)، نیروگاه برق‌آبی با ۴۷/۴٪، آرایه‌های فتوولتائیک با ۲۶/۳٪ و بایو دیزل ژنراتور با ۱/۹۵٪ و دیزل ژنراتور با ۲/۰۱٪، توربین‌های بادی با ۲۲/۴٪ در تولید انرژی الکتریکی مشارکت دارند.

## ۶. آلاینده‌های زیست‌محیطی

میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی منتشرشده ناشی از سه سیستم بهینه مورد مطالعه برحسب کیلوگرم در سال، در جداول (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. منابعی که آلودگی تولید می‌کنند عبارتند از سوخت‌های فسیلی و زیست‌توده در مولدها، بویلرها، ریفورمرها و مصرف‌کننده‌ها. همان طور که در جدول (۶) ملاحظه می‌شود در سیستم بهینه شامل بایو دیزل ژنراتور، میزان تولید آلاینده‌های کربن دی‌اکسید، هیدروکربن‌های سوخته‌نشده آزادشده، ذرات معلق آزادشده و دی‌اکسید گوگرد آزادشده برابر با صفر کیلوگرم در سال است و تنها آلاینده‌های تولیدی مربوط به کربن مونوکسید و نیتروژن اکسید ناشی از سوزاندن روغن کانولا به‌عنوان سوخت برای بایو دیزل ژنراتور است.

نام آلاینده	مقدار	واحد
دی‌اکسید کربن <sup>۱</sup>	-۴۰۷	کیلوگرم در سال
مونوکسید کربن <sup>۲</sup>	۲۵۹	کیلوگرم در سال
هیدروکربن‌های سوخته نشده <sup>۳</sup>	۰	کیلوگرم در سال
ذرات معلق <sup>۴</sup>	۰	کیلوگرم در سال
دی‌اکسید گوگرد <sup>۵</sup>	۰	کیلوگرم در سال
اکسید نیتروژن <sup>۶</sup>	۱۶۲	کیلوگرم در سال

در جدول‌های (۷) و (۸) نیز میزان آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از سوزاندن سوخت در دو سیستم دیگر نشان داده شده است.

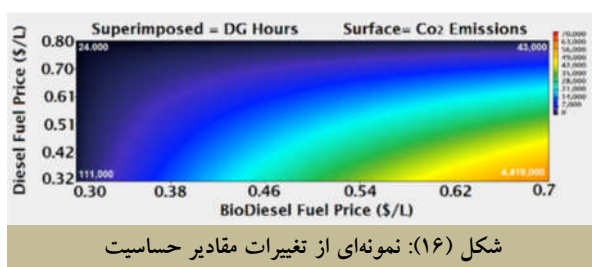
۱۰۸۰۰۰ دلار، از سال یکم سالانه دارای هزینه ۹۱۴۶۶ دلار بابت سوخت زیستی است. ارزش اسقاط بایو دیزل ژنراتور در پایان طول عمر پروژه برابر با ۸۰۵۰۰ دلار خواهد بود. مبدل دارای هزینه اولیه ۲۴۹۴۲۲ دلار بوده و در پایان سال دهم و بیستم نیز ۲۴۹۴۲۲ دلار صرف جایگزینی آن می‌شود. ارزش اسقاط مبدل جایگزین‌شده در سال بیستم که هنوز ۵ سال از عمر مفید آن باقی است، برابر با ۱۲۴۷۱۱ دلار است. مطابق با شکل (۱۱) نیز ملاحظه می‌شود دیزل ژنراتور از سال یکم، سالانه دارای هزینه ۹ دلاری برای بهره‌برداری و هزینه ۱۱۲۴۱ دلار بابت سوخت دیزل است. ارزش اسقاط آن نیز، ۶۷۰۷۵ دلار است. مطابق با شکل (۱۲) نیز مشاهده می‌شود بایو دیزل ژنراتور از سال یکم، سالانه دارای هزینه ۱۳۶۰۴۶ دلار بابت سوخت زیستی و ۷ دلار سالانه بابت بهره‌برداری و ارزش اسقاط ۷۱۷۵۰ دلار است و دیزل ژنراتور نیز از سال یکم، سالانه دارای هزینه ۷۸۴۷ دلار بابت سوخت دیزل و ۷ دلار سالانه بابت بهره‌برداری و ارزش اسقاط ۷۳۶۵۰ دلار است. در انتها نیز هزینه ثابت اولیه ۱۵۰۰۰ دلاری و هزینه سالانه ۷۰۰ دلاری بابت بهره‌برداری برای کل سیستم که در ابتدای بخش ۳.۴ توضیح داده شد، به مجموع هزینه‌ها اضافه می‌شود. مقدار انرژی الکتریکی اضافی کل در مدت یک سال که برحسب درصدی از تولید انرژی الکتریکی کل بیان می‌شود، برای سیستم با سوخت زیستی برابر با ۹۲۴۲۸۲ کیلووات-ساعت در سال یا ۲۸/۱٪ و برای سیستم با سوخت دیزل برابر با ۲۲۸۹۳۲۳ کیلووات-ساعت در سال یا ۶۹/۶٪ و برای سیستم با هر دو سوخت زیستی و دیزل برابر با ۱۷۸۷۷۸۵ کیلووات-ساعت در سال یا ۴۳/۵٪ است. مازاد این انرژی الکتریکی تولیدشده می‌تواند جهت برق‌رسانی به نواحی اطراف به فروش رسد. میزان بار تأمین‌نشده در طول سال نیز برای هر سه سیستم برابر با صفر است. توزیع ماهانه انرژی الکتریکی تولیدی (جزئیات تولید-مصرف سالیانه انرژی الکتریکی) توسط سه سیستم مطابق با شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) است (رجوع به ضمیمه). در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود نیروگاه برق‌آبی به دلیل وجود میزان قابل قبولی از جریان رودخانه در تمام ماه‌های سال به‌ویژه فروردین تا تیر، با ماکزیمم توانی که می‌تواند تولید کند، با سهم تولید ۱۹۴۷۳۵۹ کیلووات-ساعت در سال یا ۵۹/۲٪ در مدار قرار دارد (در بار کامل کار می‌کند). ۳ عدد توربین بادی ۲۵۰ کیلوواتی نیز در سراسر سال بسته به سرعت باد موجود در منطقه به میزان ۹۱۷۸۷۳ کیلووات-ساعت در سال یا ۲۷/۹٪ در تولید انرژی نقش دارند. بایو دیزل ژنراتور نیز بیشترین مشارکت را در فصل

1. Carbon Dioxide
2. Carbon Monoxide
3. Unburned Hydrocarbons
4. Particulate Matter
5. Sulfur Dioxide
6. Nitrogen Oxides

نباشد، مقادیر زیادی که محدوده احتمالی را پوشش دهد وارد کرده، چگونگی تغییرات را در سراسر محدوده مشاهده می‌کند. در این مطالعه، پارامترهای آمده در جدول (۹) برای تحلیل حساسیت در نظر گرفته شده‌اند.

جدول (۹): پارامترهای مورد نیاز جهت تحلیل حساسیت	
نرخ سوخت زیستی (دلار/لیتر)	نرخ سوخت دیزل (دلار/لیتر)
۰/۷	۰/۳۲
۰/۳	۰/۸

هر سه سیستم فوق متناسب با متغیرهای حساسیت نرخ سوخت زیستی ۰/۷ دلار بر لیتر و نرخ سوخت دیزل ۰/۳۲ دلار بر لیتر طراحی شده‌اند. برای مثال، مطابق با نمودار نشان داده شده در شکل (۱۶) ملاحظه می‌شود با کاهش نرخ سوخت زیستی از ۰/۷ به ۰/۳ دلار در هر لیتر و همچنین افزایش نرخ سوخت دیزل، میزان ساعات کارکرد دیزل ژنراتور کم می‌شود و در نتیجه میزان انتشار سالانه گاز کربن دی‌اکسید کاهش می‌یابد. بنابراین به دلیل تأثیر هزینه‌های اجتماعی ناشی از انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای در برآورد هزینه خالص فعلی سیستم و هزینه انرژی، میزان آن‌ها نیز به مقدار چشمگیری کاهش می‌یابد.



شکل (۱۶): نمونه‌ای از تغییرات مقادیر حساسیت

جدول (۷): آلاینده‌های زیست محیطی سیستم شامل دیزل ژنراتور		
نام آلاینده	مقدار	واحد
دی‌اکسید کربن	۹۴۶۵۵	کیلوگرم در سال
مونوکسید کربن	۱۳۷	کیلوگرم در سال
هیدروکربن‌های سوخته نشده	۱/۰۵	کیلوگرم در سال
ذرات معلق	۳/۱۶	کیلوگرم در سال
دی‌اکسید گوگرد	۲۳۵	کیلوگرم در سال
اکسید نیتروژن	۸۰۰	کیلوگرم در سال

جدول (۸): آلاینده‌های زیست محیطی سیستم شامل بایو دیزل ژنراتور		
نام آلاینده	مقدار	واحد
دی‌اکسید کربن	۶۵۷۰۸	کیلوگرم در سال
مونوکسید کربن	۴۸۱	کیلوگرم در سال
هیدروکربن‌های سوخته نشده	۰/۷۳۶	کیلوگرم در سال
ذرات معلق	۲/۲۱	کیلوگرم در سال
دی‌اکسید گوگرد	۱۶۵	کیلوگرم در سال
اکسید نیتروژن	۷۹۹	کیلوگرم در سال

همان طور که مشاهده می‌شود میزان انتشار آلاینده‌های زیست محیطی در دو سیستم شامل سوخت فسیلی نسبت به سیستم شامل سوخت زیستی به مقدار قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. نیروگاه آبی، آرایه‌های فتوولتائیک و نیروگاه بادی نیز ۱۰٪ از منابع تجدیدپذیر است و گاز گلخانه‌ای تولید نمی‌کنند. نرم افزار هومر میزان فروش توان به شبکه را نیز در کاهش یا افزایش آلودگی تولیدی توسط شبکه در نظر می‌گیرد. فروش توان الکتریکی ناشی از منابع با آلودگی کم، می‌تواند دلیلی بر منفی درآمدن میزان آلودگی کربن دی‌اکسید باشد [۳۹].

## ۷. آنالیز حساسیت

این قسمت یک گام اختیاری است که قابلیت مدل‌سازی تأثیر متغیرهایی که تحت کنترل نیستند، مانند سرعت باد، هزینه سوخت و امثال آن را به طراح می‌دهد؛ به عبارتی دیگر، آنالیز حساسیت تأثیر تغییرات در برخی پارامترهای منابع همچون تغییر در متوسط سرعت سالیانه باد، تغییر در متوسط سالیانه تابش خورشید یا تغییر در قیمت سوخت بر روی طراحی بهینه سیستم را بررسی می‌کند و نشان می‌دهد که چطور خروجی نسبت به تغییرات در ورودی حساس است. از نتایج تحلیل حساسیت برای تعیین و شناسایی عواملی که بیشترین تأثیر را بر طراحی و بهره‌برداری سیستم دارند یا به منظور برنامه‌ریزی و تصمیم درباره انواع فناوری موجود در سیستم استفاده می‌شود. یکی از کاربردهای آنالیز حساسیت، برخورد با عدم قطعیت است. وقتی طراح سیستم در مورد مقدار یک متغیر خاص مطمئن

## ۸. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این پژوهش تبیین چگونگی استفاده بهینه از سوخت زیستی در چرخه فرایند تولید برق در سیستم‌های تولید برق ترکیبی برای کشور ایران بود و در آن تمامی المان‌های مؤثر همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با اعمال هزینه‌های اجتماعی و تعیین حد مجاز انتشار آن‌ها و همچنین ایجاد زنجیره تأمین انرژی الکتریکی پایدار در مقایسه با سیستم‌های مبتنی بر سوخت فسیلی بررسی شد. همچنین جداول ارزیابی فنی، مالی و زیست محیطی برای هریک از مدل‌ها جهت ارائه تصویری شفاف برای تصمیم‌گیری بر مبنای توجیه اقتصادی انتخاب طرح بهینه، با استراتژی مطالعه موردی روستای ونایی در استان لرستان ارائه شد. در فرایند انجام این پژوهش تلاش شد تا علاوه بر حداکثر به‌کارگیری فناوری‌های تجدیدپذیر ضمن حفظ قابلیت اطمینان سیستم، از طریق افزودن

جدول (۱۰): مقایسه پارامترهای فنی و اقتصادی و زیست‌محیطی

سه سیستم ترکیبی مورد مطالعه			
سیستم	آبی/بایو/بادی / خورشیدی/باتری	آبی/دیزل/بادی / خورشیدی/باتری	آبی/بایو/دیزل/بادی / خورشیدی/باتری
هزینه خالص فعلی	۴۸۲۴۵۲۷	۶۳۳۳۷۹۶	۶۶۱۵۸۳۴
هزینه انرژی	۰/۱۹۶۲	۰/۲۵۷۵	۰/۲۶۹۰
هزینه سرمایه‌گذاری اولیه	۳۰۰۴۶۱۵۴	۵۰۴۱۵۱۴۵	۴۳۴۳۱۸۵
هزینه تعمیرات و نگهداری	۴۵۸۰۵۹	۶۵۵۵۷۵	۵۵۶۸۲۰
هزینه عملیات (بهره‌برداری) (دلار/سال)	۱۶۴۳۶۹	۸۴۹۰۷	۲۱۰۰۵۳
درصد بار تأمین نشده <sup>۱</sup>	.	.	.
میزان کربن دی‌اکسید تولید شده (کیلوگرم/سال)	-۴۰۷	۹۴۶۵۵	۶۵۷۰۸

\* هزینه‌ها بر حسب واحد دلار است.

## ۹. پیشنهادها

برای ادامه این پژوهش پیشنهاد می‌شود تا سیستم مفروض در حالت متصل به شبکه، مدل‌سازی شده و اطلاعات خروجی شبیه‌سازی نرم‌افزاری مبتنی بر فروش مازاد برق تولیدی با دستاوردهای پژوهش حاضر مقایسه شوند. همچنین می‌توان از روش‌های دیگری همچون پیاده‌سازی الگوریتم در سایر نرم‌افزارها به‌جای نرم‌افزار هومر استفاده و نتایج حاصل را با این مقاله مقایسه کرد. اضافه کردن سایر فناوری‌های تولیدکننده انرژی یا سایر منابع ذخیره‌کننده به مدل نیز، از دیگر پیشنهاداتی است که می‌تواند در آینده مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.

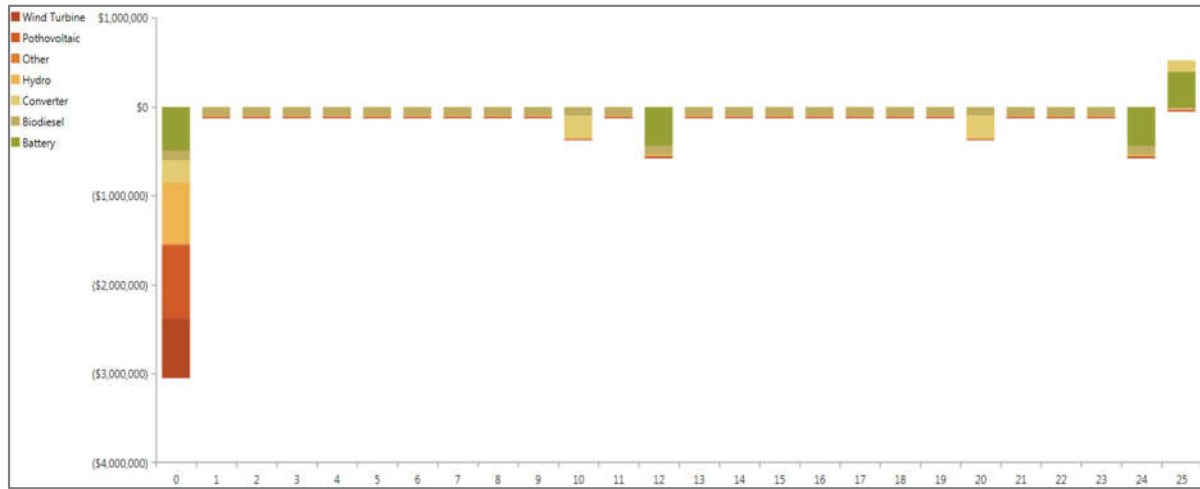
## سپاسگزاری

قسمتی از این مقاله توسط صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران برای پروژه ۹۶۰۰۵۹۷۵ حمایت شده است. نویسندگان مایل‌اند قدردانی خود را در این خصوص ابراز کنند. همچنین نویسندگان این مقاله از همراهی و مساعدت شرکت مدیریت طرح‌های صنعتی ایران کمال سپاسگزاری را دارند.

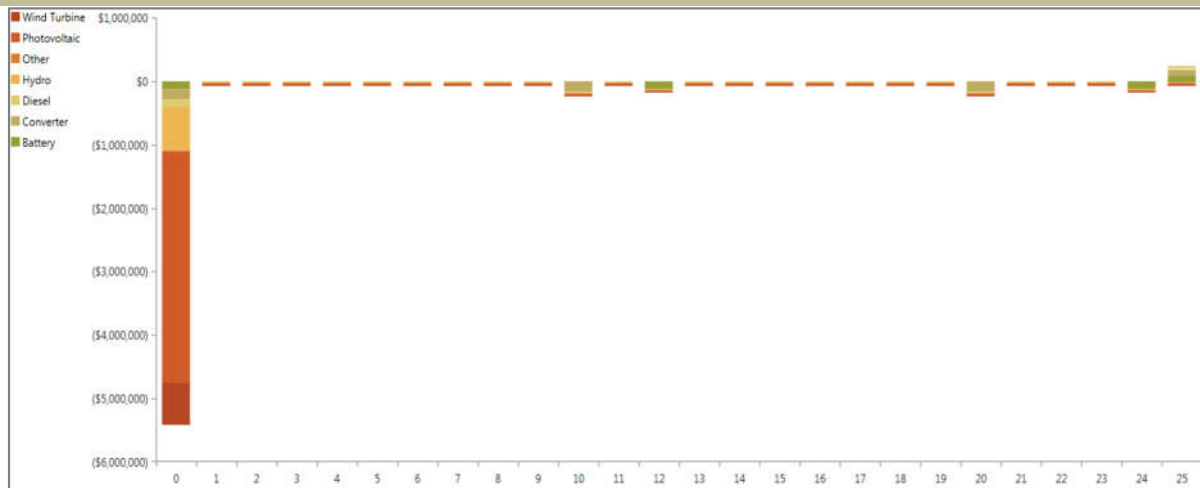
نیروگاه برق‌آبی، و استفاده از پتانسیل‌های طبیعی منطقه همچون انرژی‌های باد، خورشید و نیز کاشت و پرورش دانه‌های روغنی مانند کانولا، به کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و گازهای گلخانه‌ای منتشرشده از دیزل ژنراتورها که عضو جدایی‌ناپذیر از سیستم‌های ترکیبی هستند، پرداخته شود. پس از شبیه‌سازی سه سیستم ترکیبی متشکل از سوخت زیستی، دیزل و هر دو نوع سوخت، نتایج به‌صورت جدول (۱۰) گردآوری شد. انتخاب سیستم شامل بایو دیزل ژنراتور منجر به کاهش ۱۵۰۹۲۶۹ دلاری در هزینه خالص فعلی نسبت به سیستم شامل دیزل ژنراتور و هم ۱۷۹۱۳۰۷ دلاری نسبت به سیستمی که هم دارای بایو دیزل و هم دیزل است می‌گردد. این در حالی است که مطابق با نتایج به‌دست‌آمده هزینه متوسط به‌ازای هر کیلووات-ساعت از برق تولیدی برای این سیستم نیز از دو سیستم دیگر کمتر است. ضمن آنکه می‌توان مازاد انرژی الکتریکی تولیدشده توسط این سیستم را نیز به فروش رساند. همچنین ارزش افزوده‌ای که از بابت کاهش بسیار چشمگیر انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی مانند کربن دی‌اکسید در هوا به وجود می‌آید (کاهش ۹۵۰۶۲ کیلوگرم در سال نسبت به سیستم شامل دیزل ژنراتور و ۶۶۱۱۵ کیلوگرم در سال نسبت به سیستم دارای بایو دیزل و دیزل ژنراتور)، بسیار حائز اهمیت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سیستم شامل بایو دیزل ژنراتور، کاهش نرخ سوخت زیستی از ۰/۷ دلار به ۰/۳ دلار بر لیتر، منجر به کاهش ۹۵۸۴۰۰ دلار در هزینه خالص فعلی سیستم می‌گردد. به‌طور مشابه در سیستم شامل بایو دیزل ژنراتور و دیزل ژنراتور نیز کاهش نرخ سوخت بایو دیزل سبب کاهش ۸۵۵۰۶۸ دلار در هزینه خالص فعلی سیستم می‌شود. لذا اگر تمهیداتی دیده شود تا کشت دانه روغنی کانولا در منطقه مورد مطالعه به‌صورت انبوه انجام شود و از حمل‌ونقل و سایر هزینه‌های دیگر تا حدودی کاسته شود، قیمت نهایی تولید سوخت زیستی و در نتیجه هزینه خالص فعلی سیستم ترکیبی متشکل از بایو دیزل ژنراتور، به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین اگر نرخ سوخت فسیلی با قیمت بالاتری عرضه گردد، اختلاف هزینه خالص فعلی سیستم شامل سوخت زیستی نسبت به سیستم‌های شامل دیزل ژنراتور به مقدار قابل توجهی افزایش خواهد یافت.

ضمائم

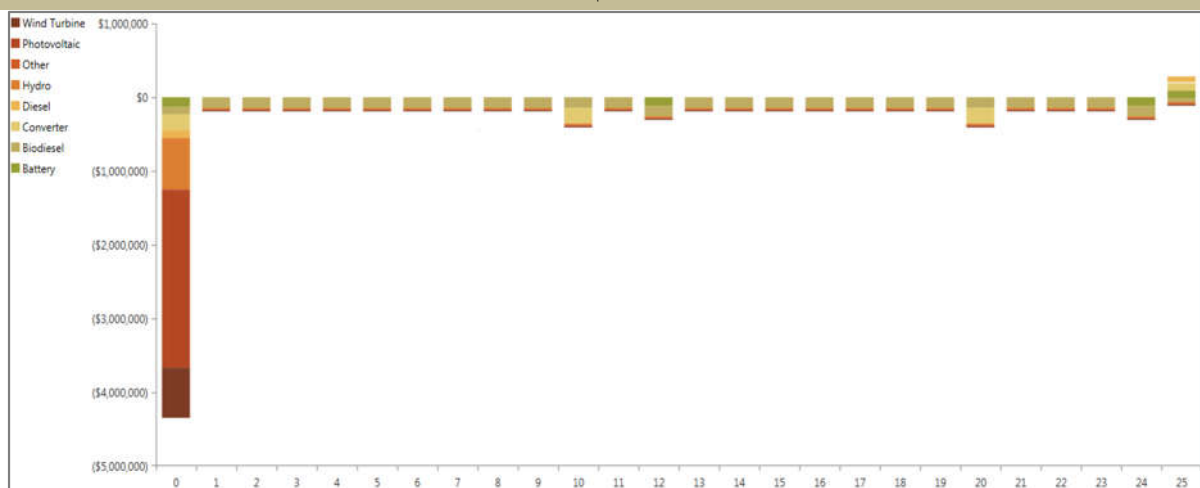
شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) مربوط به بند ۵ به صورت زیر است:



شکل (۱۰): گردش نقدینگی سیستم هیبرید بهینه شامل بایو دیزل ژنراتور

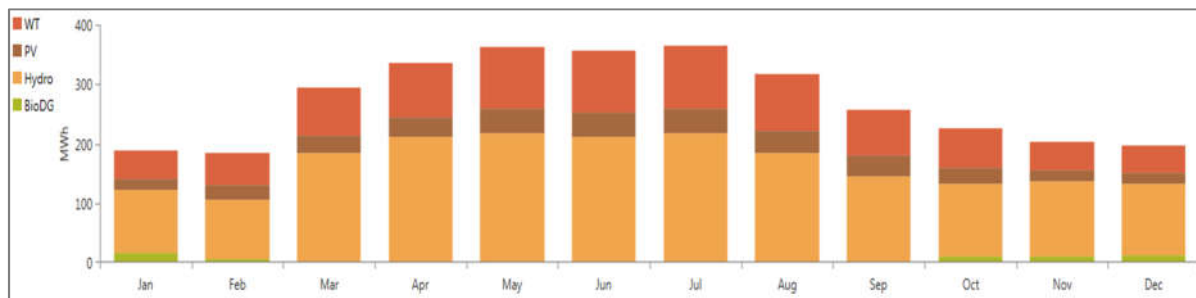


شکل (۱۱): گردش نقدینگی سیستم هیبرید بهینه شامل دیزل ژنراتور

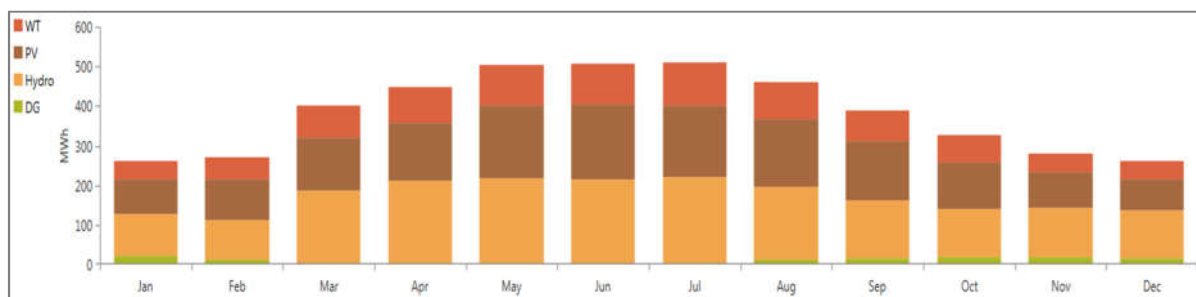


شکل (۱۲): گردش نقدینگی سیستم هیبرید بهینه شامل بایو دیزل ژنراتور و دیزل ژنراتور

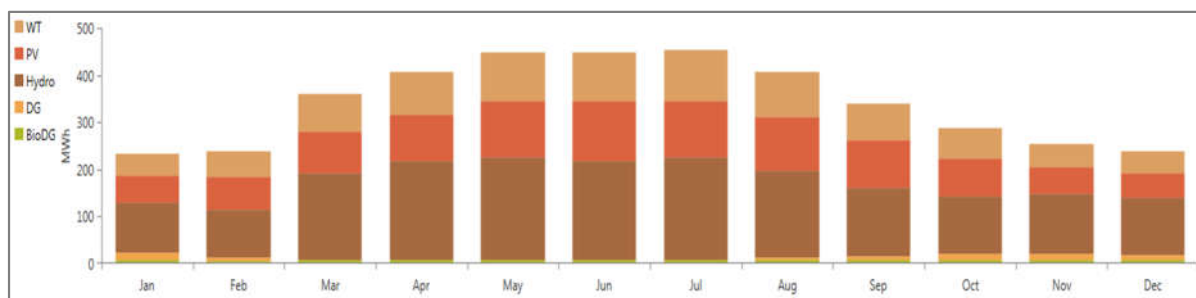
شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) مربوط به بند ۵ به صورت زیر است:



شکل (۱۳): توزیع انرژی الکتریکی ماهانه سیستم شامل بایو دیزل ژنراتور



شکل (۱۴): توزیع انرژی الکتریکی ماهانه سیستم شامل دیزل ژنراتور



شکل (۱۵): توزیع انرژی الکتریکی ماهانه سیستم شامل بایو دیزل ژنراتور و دیزل ژنراتور

## مراجع

- [1] Maleki, A., Hajinezhad, A., & Rosen, M. A., "Modeling and optimal design of an off-grid hybrid system for electricity generation using various biodiesel fuels: a case study for Davarzan, Iran". *Biofuels*, Vol. 7, No.6, PP. 699–712, 2016.
- [2] Kasaeian, A., Razmjoo, A., Shirmohammadi, R., Pourfayaz, F., Sumper, A., "Deployment of a stand-alone hybrid renewable energy system in coastal areas as a reliable energy source". *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 39, No. 3, 2019.
- [3] Bodansky, D., "The history of the global climate change regime", *International relations and global climate change*, PP. 23-40, 2001.
- [4] Kholdebarin, A., Farahmand, P., "A Review of NAMAs and CDM Kyoto Protocol projects by SWOT management model", *International Conference on New Research in Agricultural and Environmental Sciences*, Vol. 3, Singapore, 2016.
- [5] Sarker, Sh., "Feasibility analysis of a renewable hybrid energy system with producer gas generator fulfilling remote household electricity demand in Southern Norway", *Renewable Energy*, Vol. 87, PP. 772–781, 2016.
- [6] Ma, T., Yang, H., & Lu, L., "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island", *Applied Energy*, Vol. 121, PP. 149-158, 2014.
- [7] Baysal, Z., Uyar, F., Saydut, A., Kaya, C., Kafadar, A. B., & Hamamci, C., "Pistacia terebintus L. Seed Oil: A New Possible Source of Biodiesel", *Energy Sources, Part A*, Vol. 36, No. 16, PP. 1827-1834, 2014.
- [8] Bekken, S. G., Schöffel, K., Aakenes, S., Hatlen, T., Slagtern, A., & Øi, L. E., "The CLIMIT program and its strategy for Norwegian research, development and demonstration of CCS technology", *Energy Procedia*, Vol. 37, PP. 6508-6519, 2013.
- [9] Hagos, D. A., Gebremedhin, A., & Zethraeus, B., "Towards a flexible energy system– A case study for Inland Norway", *Applied Energy*, Vol. 130, PP. 41-50, 2014.



- [10] Eguchi, Sh., Kagawa, Sh., & Okamoto, Sh., "Environmental and economic performance of a biodiesel plant using waste cooking oil", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 101, PP. 245-250, 2015.
- [11] Ismail, M. S., Moghavvemi, M., & Mahlia, T. M. I., "Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power systems for remote houses in a tropical climate", *Energy Conversion and Management*, Vol. 69, PP. 163-173, 2013.
- [12] Matsuura, M., Illustration on biodiesel, Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd., Tokyo, 2006.
- [13] Borugadda, V. B., & Goud, V. V., "Biodiesel production from renewable feedstocks: status and opportunities", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, PP. 4763-4784, 2012.
- [14] Rinaldi, F., Moghaddampoor, F., Najafi, B., Marchesi, R., "Economic feasibility analysis and optimization of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Peru", *Energy Conversion and Management*, 2020.
- [15] Kumari, J., Subathra, P., Moses, J. E., & Shruthi, D., "Economic analysis of hybrid energy system for rural electrification using HOMER", *International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*, PP. 151-156, 2017.
- [16] Mohammadi, M., Hosseinian, S. H., & Gharehpetian, G. B., "Optimization of hybrid solar energy sources/wind turbine systems integrated to utility grids as microgrid (MG) under pool/bilateral/hybrid electricity market using PSO", *Solar Energy*, Vol. 86, PP. 112-125, 2012.
- [17] Belfkira, R., Zhang, L., & Barakat, G., "Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit", *Solar Energy*, Vol. 85, PP. 100-110, 2011.
- [18] Kaabeche, A., & Ibtouen, R., "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system", *Solar Energy*, Vol. 103, PP. 171-182, 2014.
- [19] Avami, A., "A model for biodiesel supply chain: A case study in Iran", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, PP. 4196-4203, 2012.
- [20] Mokhtara, Ch., Negrou, B., Bouferrouk, A., Yao, Y., Settou, N., Ramadan, M., "Integrated supply-demand management for the optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems for residential electrification in arid climates", *Energy Conversion and Management*, Vol. 221, 2020.
- [21] Katsigiannis, Y., A., Georgilakis, P., S., & Karapidakis, E., S., "Genetic Algorithm Solution to Optimal Sizing Problem of Small Autonomous Hybrid Power Systems", PP. 327-332, 2010.
- [22] RohitSen, A., Subhes C., Bhattacharyya, B., "Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER", *Renewable Energy*, Vol. 62, PP. 388-398, 2014.
- [23] Azadeh, A., & Vafa Arani, H., "Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics mathematical programming approach", *Renewable Energy*, Vol. 93, PP. 383-403, 2016.
- [24] McHenry, M., P., "Small-scale ( $\leq 6kWe$ ) stand-alone and grid-connected photovoltaic, wind, hydroelectric, biodiesel, and wood gasification system's simulated technical, economic, and mitigation analyses for rural regions in Western Australia", *Renewable Energy*, Vol. 38, PP. 195-205, 2012.
- [25] Oberweiss, S. and Al-Shemmeri, T.T., "Effect of biodiesel blending on emissions and efficiency in a stationary diesel engine", *Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Vol. 1, No. 8, PP. 304-310, 2010.
- [26] Beluco, A., Ponticelli, F., "Inclusion of biodiesel and PV modules in a wind-diesel hybrid system supplying electrical loads on a small farm", *International Renewable Energy Technology*, Vol. 5, No. 3, PP. 229-247, 2014.
- [27] Konstantelos, I., Sun, M., Strbac, G., "Quantifying demand diversity of households", Report for the low carbon London (LCNF) project, 2014.
- [28] Ghadimi, A. A., Razavi, F., Mohammadian, B., "Determining optimum location and capacity for micro-hydropower plants in Lorestan province in Iran", Vol. 15, PP. 4125-4133, 2011.
- [29] Torabi, Gh., Khoshnavaz, M., Safari, A., & Ghadimi, A.A., "Determining optimum location and capacity for micro-hydropower plants in Lorestan province in Iran", *International Power System Conference*, Vol. 24, 2009.
- [30] Haghparast, A., Adl, M., "Technical-economic evaluation of micro-scale hydropower projects with a case study in the catchment area of Kordan River", *International Power System Conference*, Vol. 19, 2004.
- [31] Singh, G., Baredara, P., Singh, A., "Optimal sizing and location of PV, wind and battery storage for electrification to an island: A case study of Kavaratti, Lakshadweep", *Journal of Energy Storage*, Vol. 12, PP. 78-86, 2017.
- [32] Mudasser, M., Yiridoe, E. K., & Corscadden, K., "Cost-benefit analysis of grid-connected wind-biogas hybrid energy production, by turbine capacity and site", *Renewable Energy*, Vol. 80, PP. 573-582, 2015.
- [33] Asrari, A., Ghasemi, A., Javidi, M.H., "Economic evaluation of hybrid renewable energy systems for rural electrification in Iran- A case study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, PP. 3123-3130, 2012.
- [34] Rahman, Md., M., Khan, MD., M., & Ahsan Ullah, M., "A hybrid renewable energy system for a North American off-grid", *Energy*, Vol. 97, PP. 151-160, 2016.
- [35] Atakan Akbar, M., "Performance and emission characteristics of compression ignition engine operating with false flax biodiesel and butanol blends", *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 2, PP. 1-7, 2016.
- [36] Najafian, A., Sari, Gh., Dalvand, P., & Gorji, R., "A Review of Biodiesel Production Potential from Plant Seeds in Iran and the World", 1404 National Conference on Vision and Technological Advances in Engineering Sciences, 2015.
- [37] Sh. Kant Bhatia, R. Kant Bhatia, J. Jeon, "An overview on advancements in biobased transesterification methods for biodiesel production: Oil resources, extraction, biocatalysts, and process intensification technologies", *Fuel*, Vol. 285, 2021.
- [38] Zahedi, A., Mirabdoli, M., Shayan Nezhad, A., "Commercial optimization of biodiesel production from rapeseed oil as a clean fuel for thermal power plants", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 9, PP. 135-142, 2016.

- [39] Gharehpetian, G.B., Karimi, H., Ahmadi, A., *"Optimal design and evaluation of hybrid energy systems using Homer software"*, Vol. 1, First Edition, Tehran, Nahr Danesh Publications, 2017.
- [40] Energy Balance Sheet of 2012, Tehran, Ministry of Energy, Deputy Minister for Electricity and Energy, 2013.