

تاریخ دریافت: ۱۴ آبان ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۷ آبان ۱۴۰۱ صفحات ۱ الی ۳۰

## نقش دیجیتالی شدن در ریزشکه ترکیبی شامل منابع انرژی تجدید پذیر

مصطفی اسماعیلی شایان

دکتری مهندسی انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[Mostafa.Esmacili@Modares.ac.ir](mailto:Mostafa.Esmacili@Modares.ac.ir)

غلامحسن نجفی\*

استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[g.najafi@modares.ac.ir](mailto:g.najafi@modares.ac.ir)

برات قبادیان

استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[ghobadian@modares.ac.ir](mailto:ghobadian@modares.ac.ir)

شیوا گرجیان

استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

[gorjian@modares.ac.ir](mailto:gorjian@modares.ac.ir)

**چکیده:** مدیریت و عملکرد بهینه ریزشکه‌های ترکیبی در حضور انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل سطح ولتاژ و انواع مختلف منبع تولید پراکنده و بار بر روی اجزای AC و DC یک تحقیق مورد نیاز است. به دلیل قیمت بالای تجهیزات سامانه توربین بادی، خورشیدی و باتری، تعیین ظرفیت بهینه تجهیزات ضروری است. در این پژوهش، یک الگوریتم بهینه‌سازی با استفاده از ترکیب الگوریتم تصمیم‌گیری پویا و تخمین مارکوف در زیرسامانه دیمانده، منبع غیر همگن بادی و همگن خورشیدی ارائه می‌شود. جهت تعیین تعداد بهینه‌ی اجزای سامانه ترکیبی در حضور عدم قطعیت سمت تقاضا و تولید توان منابع تجدیدپذیر، هزینه‌ی سالیانه‌ی سامانه با در نظر گرفتن احتمال هدررفت توان کمینه شده است و سناریوهای افزایش نفوذ انرژی تجدیدپذیر مورد مقایسه قرار می‌گیرد. با تحلیل حساسیت سناریوها در بعد سیاستگذاری، افزایش تعرفه خرید برق تجدیدپذیرها مهمترین عامل در اقتصادی بودن طرح‌ها و پس از آن کاهش هزینه‌های عملیاتی در رتبه دوم اهمیت است.

**واژه‌های کلیدی:** ریزشکه، انرژی‌های تجدیدپذیر، تولید پراکنده، بهینه‌سازی، تصمیم‌گیری پویا.

## ۱. مقدمه

در سال‌های گذشته، سوخت‌های فسیلی به‌عنوان منبع اصلی تولید برق مطرح بوده‌اند. همچنین مصرف غیر بهینه سوخت‌های فسیلی و مشتقات آن علاوه بر آسیب اقتصادی، خسارت‌های جبران‌ناپذیری ایجاد کرده است. انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییرات آب و هوایی همگان را بر آن داشته تا در راستای توسعه پایدار به سوی منابع جایگزین و تجدیدپذیر انرژی حرکت نموده، سبب انرژی خود را متنوع نمایند.

به منظور پاسخگویی به نیازهای روزافزون انرژی جهان، صنعت برق همچنان به مصرف تمام منابع موجود در آینده نزدیک ادامه می‌دهد. در سال ۲۰۲۰، مصرف انرژی جهان در مقایسه با سال ۲۰۱۹ به دلیل همه‌گیری ویروس کرونا و قرنطینه کامل در برق، ۵.۹ درصد کاهش یافته است. در دسترس بودن و تولید انرژی نسبتاً آسان و ارزان از منابع انرژی تجدیدپذیر، مزیت اصلی آن‌ها است. علاوه بر این، در رقابت با سوخت‌های فسیلی، این منابع وابستگی مستقیم به شرایط آب و هوایی دارند. پیش‌بینی شده است، تا سال ۲۰۳۰ جمعیت جهان به ۸/۵ میلیارد نفر رسیده و تا سال ۲۱۰۰ از ۱۱ میلیارد نفر عبور کند (Maiti et al. ۲۰۲۲). با این رشد بخشی از جمعیت جهان دسترسی به شبکه برق نخواهند داشت (IEA ۲۰۱۷) در حالی که، مصرف انرژی با توجه به رشد اقتصاد جهان و جمعیت، بیش از ۳۴ درصد افزایش خواهد یافت (Melrose et al. ۲۰۱۹). از این رو، دولت‌ها به دنبال راه‌های مقرون به صرفه برای افزایش ظرفیت تولید برق مبتنی بر منابع انرژی جایگزین هستند. چنانچه همزمان ویژگی‌های مطلوب زیست محیطی را فراهم کند (Shayan et al. ۲۰۲۲). تقاضای انرژی‌های تجدیدپذیر در سه ماهه اول سال ۲۰۲۰ حدود ۱.۵ درصد رشد کرد. تولید اضافی بادی و خورشیدی پروژه‌های جدید طی سال گذشته تکمیل شد. انرژی‌های تجدیدپذیر معمولاً در شبکه اولویت دارند و نیازی به تغییر تولیدشان برای پاسخگویی به تقاضا برای جداسازی آن‌ها از پیامدهای کاهش تقاضا برای انرژی نیست،

چنانچه انرژی‌های سبز و انرژی هسته‌ای ۲۵ درصد از بازار برق جهان را تا سال ۲۰۴۰ تشکیل می‌دهند (Esmaeili Shayan et al. ۲۰۲۲a). تامین انرژی با توجه به زیر ساخت‌های موجود و رفاه جامعه در شهر رو روستاها مسئله‌ای ضروری است (Esameili Shayan et al. ۲۰۲۱). هر ساله تقاضای برق با توجه به توسعه رفاه و فناوری بین ۱ درصد تا ۳ درصد افزایش می‌یابد (Ojovan et al. ۲۰۱۹).

امروزه بیش از ۲۵٪ کل انرژی مصرفی بشر ابتدا به انرژی الکتریکی تبدیل شده و سپس مورد استفاده قرار می‌گیرد و این رقم پیوسته روبه افزایش است. همزمان با رشد سریع فناوری، سامانه‌های قدرت و کنترل مکانیکی، هیدرولیک و نیوماتیک جای خود را به انواع الکتریکی می‌دهند (Bhatia et al. ۲۰۲۱).

کربن مونوکسید و هیدروکربن‌های ناشی از احتراق ناقص و ذرات معلق و دوده از جمله دیگر آلاینده‌های هوا هستند که در محیط زیست منتشر می‌گردد. همچنین رشد سریع سکونت‌گاه‌های تفریحی، انبارهای ذخیره مواد غذایی و کشاورزی، سردخانه‌ها، گلخانه‌ها و خانه‌های روستایی است. درحالی‌که، قابلیت انتقال شبکه برق برای برآورده کردن تقاضا انرژی وجود هزینه بالا داشته و عملاً موجب قطع برق و هزینه‌های وقفه خواهد شد (Esmaeili Shayan et al. ۲۰۲۲b). بزرگترین مزیت ریزشبکه کنترل پذیر بودن و عملکرد آن به صورت یک بخش مستقل کنترل شده در سیستم قدرت است. با توجه به ظرفیت پایین ریزشبکه‌ها اتصال آن‌ها به شبکه اصلی باعث تاثیر بر روی شبکه اصلی نمی‌شود (Skordoulis et al. ۲۰۲۰). منابع انرژی تجدیدپذیر ممکن است در نواحی جغرافیایی دارای نوسان و تناوب غیر قابل اعتماد باشند (Renjini and Devi ۲۰۲۲).

تأمین توان الکتریکی از طریق سامانه‌های فتوولتائیک<sup>۱</sup> در شب مقدور نبوده و ممکن است در ساعاتی از روز سامانه‌ی انرژی بادی<sup>۲</sup> فعال نباشد. بنابراین، طراحی و ادغام منابع مختلف انرژی‌های

<sup>۱</sup> Photo-Voltaic (PV)

<sup>۲</sup> Wind Energy

تجدیدپذیر به‌ویژه فتوولتاییک - باد تحت سامانه‌های ترکیبی و بهره‌گیری از سامانه‌های مطلوب ذخیره و پشتیبان می‌تواند موجب افزایش تمایل به بهره‌گیری از سامانه‌های تجدیدپذیر شده و مسئله‌ی ماهیت تناوب انرژی را مدیریت کند. این روش، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر را در سطح محلی یا خانگی افزایش داده و شرایط را برای تولید برق در مقیاس بزرگ‌تر فراهم می‌کند. از طرف دیگر، هزینه‌ی اولیه‌ی سرمایه‌گذاری در سامانه‌های خورشیدی و بادی در مقایسه با برق مبتنی بر سوخت فسیلی هنوز نسبتاً زیاد است. با استفاده از یک منبع انرژی مرسوم در ارتباط با منابع تجدیدپذیر، سامانه‌ی مقرون به صرفه و مطمئن‌تر می‌شود. ترکیبی از چنین سامانه‌ی تولید انرژی متفاوت اما مکمل مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر ترکیبی به‌عنوان یک راه حل مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های کوچک شناخته می‌شود. در این پژوهش از توربین بادی عمودی و سامانه‌ی فتوولتاییک به‌عنوان منابع اولیه‌ی انرژی و از دیزل ژنراتور به‌عنوان منبع انرژی پشتیبان، استفاده می‌شود. علاوه بر این، یک بانک باتری به‌عنوان منبع ذخیره انرژی استفاده شده است. باتری‌ها برای ذخیره‌ی انرژی مازاد در زمان تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر مورد نیاز هستند. مادامی که تولید برق از منابع تجدیدپذیر ناتوان در تامین تقاضای برق باشد، از برق پشتیبان‌ها استفاده می‌گردد.

## ۲. مرور منابع تحقیق

برای پاسخگویی به تقاضای رو به رشد سریع انرژی، همه منابع انرژی باید مورد بهره‌برداری قرار گیرند. انرژی‌های تجدیدپذیر نامحدود و پاک هستند اما بیشترین مشکل آن‌ها ماهیت تناوب آن‌ها است. با رشد جمعیت و صنعتی شدن سریع، تقاضا برای انرژی با سرعت خواهد یافت و منابع محدود موجود قابلیت تحقق این نیاز را نخواهد داشت (Esmacili Shayan et al. ۲۰۲۲). در این میان، سازمان جهانی انرژی پیش‌بینی کرده است، ذخایر سوخت‌های فسیلی که بیش از ۷۹٪ از انرژی اولیه‌ی جهان را تشکیل می‌دهند به سرعت در حال کاهش هستند (Kurek et al. ۲۰۲۱). منابع سوخت‌های فسیلی با ایجاد چالش‌های زیست محیطی، دارای ذخایر محدودی هستند و هم‌زمان با افزایش تقاضای

انرژی و کاهش منابع اقتصاد کشورها ناپایدار و در برخی از کشورهای دارای وابستگی، بحران ایجاد خواهند کرد. بنابراین، ایجاد نقشه راه تامین تقاضای برق و انرژی از طریق منابع انرژی محلی و تجدیدپذیر حیاتی است (Zhong et al. ۲۰۱۷; Menyeh ۲۰۲۱).

پژوهش‌های فراوان تحت موضوع طراحی سامانه‌های تبدیل انرژی تجدیدپذیر، با استفاده از مدیریت انرژی و رویکردهای اندازه‌گیری مختلف و بهینه‌سازی انجام شده است. منابع منفرد انرژی تجدیدپذیر به دلیل ماهیت تناوب قادر به تامین تقاضای انرژی به طور مداوم نیستند و سامانه‌های ترکیبی برای رفع این مشکل معرفی می‌شوند (Esmaceli Shayan et al. ۲۰۲۲c). این امکان، فرصت ویژه‌ای را ایجاد کرد تا بهره‌گیری از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر و بارگذاری افزایش یابد. محققان، هزینه‌های سامانه‌ی ترکیبی انرژی تجدیدپذیر را تجزیه و تحلیل کرده‌اند (Esan et al. ۲۰۱۹; Chang et al. ۲۰۱۹; Chidambaram et al. ۲۰۲۱).

بهینه‌سازی در هر سامانه می‌تواند عملکرد را بهبود بخشد، در بهینه‌سازی ممکن است یک رویکرد سنتی فرآیندهای سختگیرانه، از جمله برنامه‌ریزی خطی بکارگیری شود، در حالی که رویکردهای نسل جدید از ابزارهایی مانند الگوریتم‌های ژنتیک، بهینه‌سازی ازدحام ذرات و غیره استفاده می‌کنند. طی چند دهه‌ی گذشته، کنترل‌کننده‌ی سامانه‌های تجدیدپذیر ترکیبی از دغدغه‌های اساسی پژوهشگران حوزه‌ی انرژی بوده است (Girija and Joshi ۲۰۱۹; Esmaceli Shayan et al. ۲۰۲۲b).

سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی نسبت به سامانه‌های منفرد، دارای قابلیت‌های عمده‌ای هستند که در پژوهش‌های مختلف بررسی شده‌اند (Sinha and Chandel ۲۰۱۴; Sorensen ۲۰۱۵; Aghaei et ۲۰۲۰; Goop et al. ۲۰۲۱). در پژوهشی پروفایل تقاضای ساعتی انرژی الکتریکی از ۲۰۰۰ خانوار سوئدی اندازه‌گیری شد. بازخورد بین سامانه تولید برق مرکزی و سرمایه‌گذاری‌های خانگی در سامانه‌ی ترکیبی خورشیدی و باتری‌ها مثبت بود و بازار

به سرمایه‌گذاری این تکنولوژی در خانه‌های تک خانواری روی آورده است (Esmacili shayan et al. ۲۰۱۷).

در بسیاری از سامانه‌های مستقل از شبکه جهت تامین بار مورد نیاز متقاضی در برخی از ساعات، از سیستم پشتیبان دیزل ژنراتور استفاده می‌شود (Esmacili Shayan et al. ۲۰۲۱). با این حال، پژوهش‌هایی که اخیراً منتشر شده تمرکز بیشتری بر سامانه‌های ترکیبی متصل به شبکه و الگوریتم‌های زمان واقعی دارند. به عنوان مثال، در سال ۲۰۲۰، سلیمان و همکاران یک سامانه ترکیبی فتولتاییک خورشیدی متصل به شبکه را با استفاده از شبیه ساز دیجیتال در زمان واقعی ایجاد کردند (Sulaeman et al. ۲۰۲۱). همچنین، لی و همکاران در سال ۲۰۱۸ عملکرد سامانه ترکیبی انرژی خورشیدی و باتری در منازل مسکونی متصل به شبکه با هدف مدیریت مصرف و اصلاح اوج در ژاپن بررسی کرد (Li et al. ۲۰۱۸). پترولز و همکاران در سال ۲۰۱۸ همچنین کنترل هماهنگ برای ادغام شبکه یک آرایه فتولتاییک، ذخیره باتری و خازن را مطالعه کردند (Petrolese et al. ۲۰۱۸). در این پژوهش‌ها خوشه بندی و روند تکامل، باتری‌های خورشیدی نیز بررسی شده است. العرفی و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک سامانه‌ی کنترل هوشمند انرژی تجدیدپذیر ترکیبی را توسعه دادند. در این سامانه فرایند تولید برق برای به دست آوردن بیشینه‌ی قدرت سودآور با کمینه‌ی هزینه‌ی عملکرد سامانه‌ی قدرت کنترل می‌شد. سناریوی کنترل به شرایط محیطی متکی بود. سامانه‌ی تولید انرژی شرایط محیطی مناسب برای دستیابی به بیشینه‌ی سود را تجزیه و تحلیل کرده و توزیع بار را مدل‌سازی کرد. عملکرد سیستم پیشنهادی با استفاده از معیارهای سود عملیاتی، عامل عدم تعادل، پیش‌بینی موفقیت آمیز عملیات و تأخیر زمانی تجزیه و تحلیل شد (Alarifi et al. ۲۰۲۱).

یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ سامانه‌ی کنترل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با روش پیش‌بینی بیشترین بار را توسعه دادند. این سامانه جریان متناوب و تصادفی انرژی‌های تجدیدپذیر را به طوری که قابلیت اطمینان بار افزایش یابد کنترل می‌کرد. آن‌ها نشان دادند، خطای توان فعال در سامانه‌ی PID

کمینه است (Yang et al. ۲۰۲۰). اسماعیلی و همکاران در سال ۲۰۲۱ یک چارچوب برنامه ریزی و کنترل واکنشی برای ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر با یک سامانه‌ی پیل سوختی مبتنی بر اصلاح کننده و یک دستگاه ذخیره انرژی را طراحی کردند. نتایج نشان داد عملکرد سامانه‌ی کنترلی برنامه ریزی شده بار الکتریکی با تعادل مناسب برای منابع انرژی تجدیدپذیر ایجاد می‌کند (Esmacili Shayan et al. ۲۰۲۱). دانگ و همکاران در سال ۲۰۲۰ بهینه‌سازی یک سامانه‌ی ترکیبی قدرت از طریق منابع تجدیدپذیر را انجام دادند. روش آن‌ها توانست با بهینه‌سازی خروجی هر زیرسامانه در سامانه کل، هزینه کارکرد تحت حداکثر خطای پیش بینی به حداقل رسیده است (Dong et al. ۲۰۲۰). در پژوهشی دیگر کنترل توان سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی باد، فتوولتاییک و باتری با استفاده از استراتژی سامانه‌های سوئیچ شده بکارگیری شد (Bartczak et al. ۲۰۲۱). همچنین سامانه دیگری در واحد مسکونی با استفاده از کنترل زمان واقعی مبتنی بر روش بهینه‌سازی معرفی شد. در این سامانه مجموعه‌ای از پانل‌های فتوولتاییک، سلول سوختی و باتری برای تأمین بار مسکونی ادغام شدند. سامانه کنترلی مدیریت انرژی را انجام داد (Li et al. ۲۰۲۱). در پژوهشی تلاش شد سهم نفوذ منابع انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یابد. نتایج نشان داد اینرسی شبکه برای سناریوهای ترکیبی تولید بار در نیروگاه‌های بادی و فتوولتاییک از نظر استراتژی‌های کنترل فرکانس، قدرت نفوذ منبع تجدیدپذیر را تحت اثر قرار می‌دهد (Fernández-Guillamón et al. ۲۰۱۹).

ارمغان و همکاران در سال ۲۰۲۰ با بکارگیری نرم افزار هومر اقدام به طراحی سامانه‌ی کنترل ذخیره‌ساز انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با کنترل مبتنی بر یکپارچه‌سازی خطی کردند. نهایتاً در این پژوهش، شبیه‌سازی در سیمولینک متلب انجام شد و اثربخشی کنترل توسعه یافته از طریق سخت افزار کنترل کننده زمان واقعی تأیید شد (Armghan et al. ۲۰۲۰). در تحقیقات دیگری (Alabdul Salam et al. ۲۰۱۳; Tomar and Tiwari ۲۰۱۷; Esan et al. ۲۰۱۹; Ghasemzadeh and Esmacili ۲۰۲۰) از نرم افزار هومر برای اندازه‌گیری بهینه‌ی فنی و اقتصادی سامانه‌های ترکیبی

تجدیدپذیر استفاده کرده‌اند. الگوریتم‌های بهینه‌سازی و تحلیل دقیق هومر به کاربر این اجازه را داد تا امکان اقتصادی و فنی تعداد زیادی از گزینه‌های فناوری را ارزیابی کنند.

پژوهش‌های انجام شده در این حوزه به مطالعه و شبیه‌سازی سامانه‌های ترکیبی پرداخته‌اند و پیاده‌سازی و ارزیابی میدانی سامانه‌ها بر اساس نتایج به‌دست آمده از بهینه‌سازی و شبیه‌سازی انجام نشده است. همچنین در نظر داشتن قوه تصمیم‌گیری پویا در فرایند بهینه‌سازی متصور است. خلاء اصلی پژوهش‌های موجود، عدم تعیین اندازه‌ی اقتصادی سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با تاکید بر کنترل‌کننده انرژی و سامانه پشتیبان است. هدف از پژوهش حاضر نقش دیجیتالی شدن در ریزشبکه ترکیبی شامل منابع انرژی تجدیدپذیر با الگوریتم تصمیم‌گیری پویا جهت بهینه‌سازی نفوذ انرژی تجدیدپذیر محلی و هزینه تولید است.

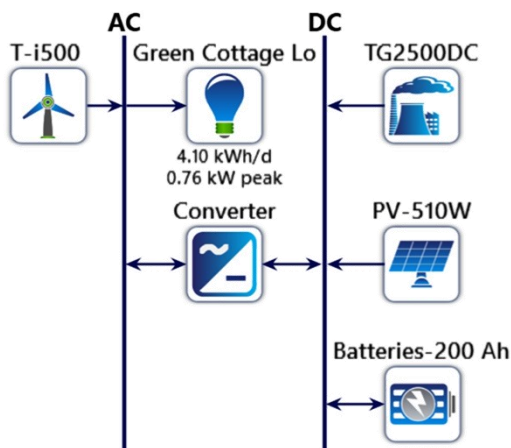
### ۳. مواد و روش‌ها

اجزا و ویژگی‌های مدار الکترونیکی سامانه‌ی هوشمند تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی از طریق شبیه‌سازی در زمان واقعی انجام می‌شود. در این مرحله، از کد نویسی زبان C برای توسعه الگوریتم تصمیم‌گیری استفاده شده و نهایتاً بر روی میکرو کنترلر نصب شده است. مدار الکترونیکی میکرو کنترلر PIC۱۶F۸۷۷A در نرم افزار پروتئوس مدل‌سازی و طراحی شده است. رویکرد خود مداخله‌ای مبتنی بر ولتاژ مفهومی از مدار تقسیم ولتاژ است که برای سنجش و اندازه‌گیری تغییرات ولتاژ در منابع انرژی تجدیدپذیر خورشید و باد و سیستم ذخیره انرژی باتری استفاده می‌شود. مدار توسعه میکرو کنترلر برای ادغام کلیه مدارهای الکترونیکی کنترل شده از طریق برنامه نرم‌افزاری بارگزاری شده در میکرو کنترلر، مدل‌سازی و طراحی شده است. مدارهای سوئیچینگ پایه رله به دو قسمت تقسیم شده‌اند:

- ماژول‌های سوئیچینگ و کنترل رله که برای انجام خود مداخله بین ولتاژهای خروجی تنظیم شده از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشید و باد هستند.

- مدارهای سوئیچینگ شارژ یا تخلیه که برای خود مداخله‌ای در طی فرآیند شارژ یا تخلیه استفاده می‌شوند. این پایه رله مدارها از طریق برنامه بارگذاری شده در میکروکنترلر PIC۱۶F۸۷۷A بکارگیری می‌شوند.

یکپارچه‌سازی و ساخت سخت افزار سامانه‌ی هوشمند تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم برای آزمایش سامانه در زمان واقعی انجام شده است. داده‌های هواشناسی همزمان توسط ابزار اندازه‌گیری دریافت و قابلیت تولید توان در هر زیر سامانه، پیش‌بینی می‌شود. این سامانه بار منبع تغذیه باتری را به بار متناوب متصل به مصرف‌کننده‌ی کلبه سبز به صورت بهینه می‌رساند. همچنین سامانه‌ی کنترلی انرژی تجدیدپذیر ترکیبی در زمان واقعی به طور مداوم فرآیند شارژ یا تخلیه منبع باتری را مدیریت کرده و ولتاژهای خروجی تنظیم شده ۷ تا ۱۲ ولت و ۱۲ تا ۱۵ ولت را از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی به ولتاژ ۲۳۰ ولت مصرف‌کننده بار در کلبه سبز می‌رساند. هواشناسی منطقه آزمون از طریق سامانه‌ی کنترلی، در بازه زمانی یکساله اندازه‌گیری شده و از طریق مبدل USB۴۷۱۱ در بازه زمانی هر ۱ ساعت به مجموع ۸۷۶۰ ساعت در LabVIEW و سپس در Excel ثبت شده است. شکل (۱) طرح‌واره سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی و شکل (۲) نمای بیرونی سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با اتصال زیر سامانه‌های خورشیدی و بادی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح‌واره‌ی سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی



شکل ۲. نمای بیرونی کلبه سبز به همراه نصب سامانه‌های خورشیدی و بادی

کنترل‌کننده‌ی شارژ، توان الکتریکی تولید شده توسط زیر سامانه‌های انرژی را ضمن ارسال به منبع ذخیره انرژی باتری، به منظور ارزیابی، به مدارهای کنترل‌کننده و سپس به مبدل آنالوگ به دیجیتال و کنترل‌کننده هوشمند انرژی تجدیدپذیر ترکیبی ارسال می‌کند. بانک باتری جبران‌کننده‌ی اختلاف توان ورودی به سامانه و متعادل‌کننده‌ی توان در خروجی است. در این بانک، از دو باتری سلید اسید با ظرفیت نامی ۱۰۰ آمپر ساعت به منظور ذخیره توان الکتریکی استفاده شده است. حسگرها داده‌های محیطی را به کنترل‌کننده هوشمند انرژی تجدیدپذیر ترکیبی ارسال می‌کند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه‌ی انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم ابتدا در نرم افزار متلب مدل‌سازی شده و الگوریتم تصمیم‌گیری طراحی و سخت افزار سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی مطابق با شکل (۳) ساخته شده است.

ساختار کنترل سامانه‌ی انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم در زمان واقعی به پارادایم-های کنترل تمرکز<sup>۱</sup>، توزیع<sup>۲</sup> و ترکیبی<sup>۳</sup> طبقه بندی شده است. در شکل (۳) ب، نمودار بلوکی خود مداخله مبتنی بر ولتاژ در میان منابع انرژی تجدیدپذیر و کنترل مرکزی برای مدیریت و بهینه سازی موثر نشان داده شده است. منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی به عنوان منبع اصلی تأمین انرژی و منبع ذخیره انرژی باتری به عنوان منبع ثانویه تامین بار کلبه سبز استفاده شده است. ولتاژهای خروجی از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی - بادی به ورودی‌های کنترل‌کننده شارژ ترکیبی<sup>۴</sup> متصل می - شوند. کنترل‌کننده شارژ ترکیبی ولتاژهای حاصل از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی - باد را قبل از ارسال به تقسیم‌کننده ولتاژ سامانه‌ی فتوولتائیک و تقسیم‌کننده ولتاژ توربین باد<sup>۵</sup> تنظیم و تثبیت

<sup>۱</sup> Centralization

<sup>۲</sup> Distribution

<sup>۳</sup> Hybridization

<sup>۴</sup> Hybrid Charge Controller (HCC)

<sup>۵</sup> Wind Turbine (WT)

می‌کند. مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) ولتاژ آنالوگ انرژی تجدیدپذیر خورشیدی - باد را به ولتاژ دیجیتال تبدیل می‌کند. این مقدار ولتاژ دیجیتال برای انجام خود مداخله مبتنی بر ولتاژ بین منابع انرژی تجدیدپذیر خورشید و باد با استفاده از الگوریتم تصمیم‌گیری پویا به کنترل کننده ولتاژ ارسال می‌شود. مفهوم تمرکز انرژی تجدیدپذیر شامل دو خود مداخله مبتنی بر ولتاژ و دو ADC و یک کنترل کننده ولتاژ است. هنگامی که منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی ولتاژ ۱۵ ولت DC تولید می‌کنند، کنترل کننده مبتنی بر ولتاژ یک سیگنال فعال HIGH به پایه ترانزیستور NPN ارسال می‌کند که سیم پیچ رله تحت اثر قرار می‌دهد. سپس، رله از حالت عادی بسته خارج شده و به حالت عادی باز سوئیچ می‌شود. این پیکر بندی برای سایر ترکیبات ولتاژ مانند ولتاژهای خروجی تنظیم شده نیز اعمال می‌شود.



الگوریتم تصمیم‌گیری پویا ۹ شرایط مختلف را بررسی می‌کند که به منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی اجازه می‌دهد منبع تقاضای الکتریکی کلبه سبز یا منبع ذخیره انرژی باتری برای فرآیند شارژ را متصل کند. در این پیکربندی‌ها، هنگامی که یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر قادر به تأمین ولتاژ خروجی باشد، از این ولتاژ برای شارژ منبع ذخیره باتری‌ها استفاده می‌شود که به عنوان منبع تغذیه ثانویه در هنگام در دسترس نبودن منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی-بادی برای تولید خروجی ولتاژ از آن یا دیزل ژنراتور استفاده می‌شود. هشت ماژول سوئیچینگ و کنترل رله به ولتاژهای خروجی تنظیم شده از منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و باد متصل هستند و هشت ماژول کنترل رله دیگر نیز برای انجام فرآیند شارژ یا تخلیه به منبع ذخیره انرژی باتری متصل هستند. اگرچه تمام ماژول‌های سوئیچینگ و کنترل رله به درگاه‌های ورودی یا خروجی میکروکنترلر PIC۱۶F۸۷۷A متصل هستند اما هر یک از آن‌ها براساس سیگنال فعال شده HIGH از الگوریتم تصمیم‌گیری پویا، به صورت جداگانه پیروی می‌کنند. هر یک از ماژول‌های سوئیچینگ و کنترل رله به عنوان یک درگاه خروجی در میکروکنترلر متصل شده‌اند. در زمان نبود منابع انرژی تجدیدپذیر، تخلیه شارژ از بانک باتری B و باتری A آغاز شده و تخلیه شارژ تا وضعیت ۴۰٪ به صورت متناوب ادامه می‌یابد. چنانچه شارژ بانک باتری به زیر ۴۰٪ برسد و منبع تجدیدپذیر برای اتصال نباشد، سامانه کنترلی دیزل ژنراتور را برای تأمین شارژ باتری‌ها وارد مدار می‌کند. پس از کامل شدن شارژ بانک باتری یا وارد شده منبع انرژی تجدیدپذیر، دیزل ژنراتور خاموش شده و فرایند تکرار می‌شود. جدول (۱) سوئیچینگ رله واحد کنترل تصمیم‌گیری سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم را نشان می‌دهد.

### جدول ۱. ترکیب ولتاژها در واحد سویچینگ رله تصمیم‌گیری سامانه

حالت	خروجی واحد کنترل مبتنی بر ولتاژ	ولتاژ ورودی آنالوگ (ولت)	اتصال
۱	S1۵۷۱	۱۲ الی ۱۵	F1 +SA1۵۷ -SA1۵۷
	W1۵۷۱	۱۲ الی ۱۵	F1 +WB1۵۷ -WB1۵۷
۲	S1۲۷۱	۷ الی ۱۲	F1 +SB1۲۷ -SB1۲۷
	W1۲۷۱	۷ الی ۱۲	F1 +WA1۲۷ -WA1۲۷
۳	S1۵۷۱	۱۲ الی ۱۵	F1 +SA1۵۷ -SA1۵۷
	W1۲۷۱	۷ الی ۱۲	F1 +WA1۲۷ -WA1۲۷
۴	W1۵۷۱	۱۲ الی ۱۵	F1 +WA1۵۷ -WA1۵۷
	S1۲۷۱	۷ الی ۱۲	F1 +SB1۲۷ -SB1۲۷

برای تعیین آمپر ساعت باتری ۱۲ ولت، چنانچه در بخش روشنایی ۲ عدد ۱۰۰ وات با مصرف ۱۰ وات و ۱ عدد ۷۵ وات با مصرف ۷/۵ وات که دارای مصرف مجموع ۲۷/۵ وات هستند استفاده شده است که می‌تواند با انواع به روز لامپ‌های روشنایی LED در محدوده‌ی توان ۵ تا ۱۰ وات تغییر کند. مصرف بخش روشنایی با ولتاژ باتری ۱۲ ولت قبل از اینورتر، معادل ۲/۲۹ آمپر ساعت در هر روز و اگر هر ۳ لامپ را به مدت ۵ ساعت روشن نگهداریم، آنگاه این زمان ۱۱/۴۵ آمپر ساعت نیاز به باتری ۱۲ ولتی دارد. جدول (۲) مصرف‌کننده‌های برقی کلبه‌ی سبز را نشان می‌دهد.

## جدول ۲. مصرف کننده‌های برقی کلبه‌ی سبز

بخش	بار مصرفی	مصرف (W)	جریان (A)	زمان (ساعت)	انرژی مصرفی (kWh)	آمپر ساعت روزانه (Ah)
تجهیزات اداری	رایانه همراه	۵۰	۴/۱۶	۸	۰/۴	۳۳/۲۸
یخچال	یخچال فریزر ۹ فوت (۱۲ ولت)	۲۰-۱۰۰	۳/۳۳	۲۴	۲/۴	۷۹/۹
	۱۰۰ وات سالن	۰/۸۳	۵	۵	۰/۰۵	۱۱/۴۵
روشنایی	۷۵ وات پخت و پز	۵-۱۰	۰/۶۲	۵	۰/۰۵	۱۱/۴۵
	۱۰۰ وات نمای بیرونی	۰/۸۳	۵	۵	۰/۰۵	۱۱/۴۵
پخت و پز	مایکروویو با چراغ هالوژنی	۴۰-۸۰	۸/۳۳	۱	۰/۸	۸/۳۳
	تلویزیون LED	۱۷-۱۰۰	۲/۵	۲	۰/۲	۵
جمع	-	۱۳۲-۱۰۶۰	۲۰/۶	-	۳/۸۵	۱۳۷/۹۶

در مجموع روزانه حدود ۱۳۸ آمپر ساعت تقاضای انرژی کلبه سبز خواهد بود. این مقدار در محدوده‌ی منطقی مصرف کلبه‌های کوچک (۱۰۰ تا ۲۰۰ آمپر ساعت) است. چنانچه مجموع توان مصرفی در حالت بحرانی ۲۴۷ وات و تخلیه کامل باتری‌ها ۲۰۰ آمپر ساعت در ولتاژ ۱۲ ولت ورودی اینورتر باشد، آنگاه حداقل زمانی پشتیبانی ۴۰۸/۱۰ دقیقه محاسبه می‌گردد. این شرایط زمانی رخ می‌دهد که منابع انرژی تجدیدپذیر موجود نبوده و دیزل ژنراتور به سامانه متصل نباشد. چنانچه الگوریتم کنترلی اجازه نخواهد داد ذخیره انرژی باتری به ۴۰٪ این مقدار برسد و سامانه‌ی پشتیبان وارد شبکه خواهد شد.

در ارزیابی اقتصادی سامانه، معیارهای خالص ارزش فعلی (NPV)، نرخ بازده داخلی (IRR) و دوره بازگشت سرمایه (PP) محاسبه شده است. ارزش فعلی مجموعه‌ای از جریان‌ات وجوه نقد آینده از طریق رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$NPV = NCF_0 + \frac{NCF_1}{(1+i)} + \frac{NCF_2}{(1+i)^2} + \frac{NCF_t}{(1+i)^t} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، NPV برابر خالص ارزش فعلی، NCF برابر خالص وجوه نقد،  $i$  برابر نرخ تنزیل و  $t$  برابر دوره‌ی مالی می‌باشد. NPV ممکن است یک عدد منفی (عدم انتخاب پروژه) یا یک عدد مثبت (انتخاب پروژه) باشد. در صورتی که خالص ارزش فعلی مساوی با صفر گردد، آنگاه طراح در انتخاب یا عدم انتخاب انجام پروژه بی‌تفاوت خواهد بود. IRR نرخ تنزیلی است که بر اساس آن، ارزش خالص فعلی پروژه (NPV) برابر صفر می‌شود. اگر NPV پروژه‌ای مثبت باشد، IRR آن پروژه از نرخ بازدهی که برای سرمایه‌گذاری به کار برده شده، بیش‌تر است. در محاسبه NPV فرض بر این است که نرخ تنزیل مشخص است و NPV پروژه تعیین می‌گردد. در محاسبه IRR، NPV پروژه معادل صفر قرار گرفته و نرخ تنزیل که همان IRR پروژه است، تعیین شده است. با استفاده از معیار دوره‌ی بازگشت سرمایه<sup>۱</sup> (PP)، دوره‌ای که در آن مجموع درآمدهای سالیانه با هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برابر (سربه‌سر) مشخص می‌گردد. آزمون آماری بر مبنای طرح آزمایشی فاکتوریل و تاگوجی برای چهار سطح و سه فاکتور (شدت تابش خورشیدی، دمای سطح سلول‌های خورشیدی، سرعت باد) انجام شده است. دریافت داده‌های متناظر ماتریس آزمایش از طریق طراحی داشبورد دینامیک داده‌های ذخیره شده اکسل، منتقل شده از لب‌ویو می‌باشد. جدول (۳) ماتریس و سطوح آزمایش سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Payback Period

### جدول ۳. ماتریس و سطوح آزمایش سامانه‌ی تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی

متغیر	شرح	محدوده	تعداد سطح	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴	واحد
شدت تابش		۱۲۰۰ -	۴	۰-۳۰۰	۳۰۰-	۶۰۰-	۹۰۰-	W.m <sup>-۱</sup>
				۶۰۰	۶۰۰	۹۰۰	۱۲۰۰	
مستقل	دما سلول	+۱۰۰ -	۴	۵- الی	۲۰-۵۰	۵۰-۸۰	۸۰-۱۱۰	°C
	خورشیدی			۲۰				
	سرعت باد	۱۵ - ۰	۴	۰-۴	۴-۸	۸-۱۲	۱۲-۱۵	m.s <sup>-۱</sup>
وابسته	توان	-	-	-	-	-	-	W

میزان انتشار گاز گلخانه‌ای با استفاده از نرخ انتشار حاشیه CO<sub>2</sub> و با میانگین وزنی ملی Ansi

برای تبدیل کاهش کیلووات ساعت به واحدهای انتشار دی‌اکسید کربن می‌باشد.

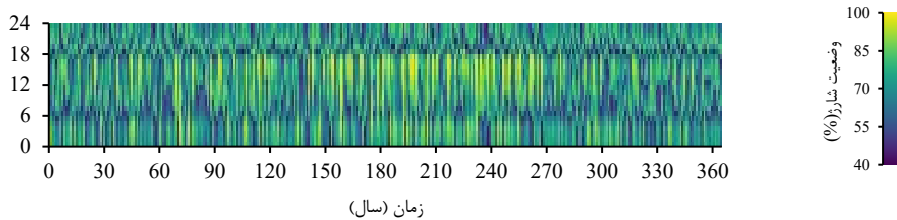
### ۴. نتایج

با در نظر گرفتن ترکیب انرژی خورشیدی، بادی و استفاده از پشتیبان باتری و دیزل ژنراتور، ۱۳ حالت منطقی برای آرایش زیر سامانه‌ها محاسبه می‌شود. ترکیبی که از همه زیر سامانه‌ها استفاده کند و هزینه تولید انرژی الکتریکی (COE) ۰/۳۸۱ دلار به ازای هر کیلو وات داشته باشد، دارای ۰/۲۰۵ کیلو وات زیر سامانه خورشیدی (با هزینه اولیه ۴۱۰ دلار) با ۱ توربین بادی مدل i۵۰۰ (هزینه اولیه ۱۰۰۰ دلار) و دیزل ژنراتور (موتور برق) مدل TG۲۵۰۰DC با ظرفیت اسمی ۰/۸۹۰ کیلو وات و ۲ عدد باتری ۱۰۰ آمپر ساعتی باشد. این سامانه دارای نفوذ ۵۴ درصدی انرژی تجدیدپذیر بوده و سالانه ۲۵۳ لیتر سوخت مصرف کرده است. همچنین موتور برق در این آرایش ۱۳۴۵ ساعت کار کرده تا ۶۷۵ کیلو وات ساعت انرژی تولید کند. توان جبران باتری در این آرایش ۷/۰۳ ساعت بوده و کل انرژی سالانه گذرا از منبع ذخیره انرژی باتری ۴۹۹ کیلو وات ساعت می‌باشد. نقاط بهینه ترکیب زیر سامانه‌ها در جدول (۴) گزارش شده است. نقاط بهینه شبیه‌سازی ۱۳ راه‌حل بوده که در اینجا تنها ۵ راه‌حل اول گزارش شده است.

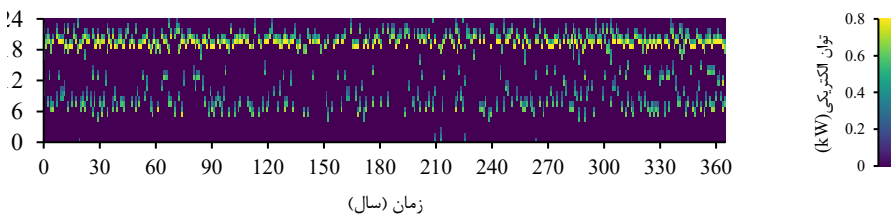
جدول ۴. ترکیب‌های بهینه سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی (یافته‌های پژوهش).

ترکیب	خورشیدی (kW)	بادی (i۵۰۰)	TG۲۵۰۰ (kW)	هزینه			سوخت (L)
				تعداد باتری (Ah)	تولید برق (COE-)	هزینه اولیه (\$)	
۱	۰/۳۶۸	۰	۰/۸۹۰	۲	۰/۳۷۹	۱۲۲۲	۲۳/۸
۲	۰/۲۰۵	۱	۰/۸۹۰	۲	۰/۳۸۱	۱۸۸۸	۵۴
۳	۰	۱	۰/۸۹۰	۳	۰/۴۰۲	۱۵۷۹	۲۹/۹
۴	۰	۰	۰/۸۹۰	۴	۰/۴۰۷	۶۹۵/۶	۰
۵	۰/۳۹۶	۲	۰	۴	۰/۴۴۶	۳۳۷۸	۱۰۰

نتایج مصرف برق کلبه سبز نشان می‌دهد، الگوی مصرف برق خانگی با پیک شبانه از غروب آفتاب تا ۳ ساعت پس از آن خواهد بود. بیشینه مصرف برق در برخی از روزهای سال به ۲/۰۹ کیلو وات رسیده است. کمینه مصرف در ساعات خاموشی و معادل ۰/۰۱ کیلو وات ثبت شد. در زمان طلوع خورشید، شروع مصرف برق در کلبه سبز ۰/۳۳ کیلو وات خواهد بود و تا زمان غروب آفتاب به صورت میانگین سالانه ۰/۴۷ کیلو وات اندازه‌گیری شد. همچنین از دید مهندسی برق ضریب بار کلبه سبز ۲۲ درصد محاسبه شد. اینورتر از مجموع ۷۲۳۹ ساعت کارکرد در سال توانست با دریافت ۹۱۷ کیلو وات ساعت انرژی ۸۷۱ کیلو وات ساعت انرژی در سال خارج کند. بنابراین با تبدیل بار AC به DC سامانه ۴۵/۸ درصد اتلاف انرژی داشته است. شکل (۴) وضعیت شارژ و تخلیه سامانه پشتیبان باتری و ژنراتور را نشان می‌دهد.



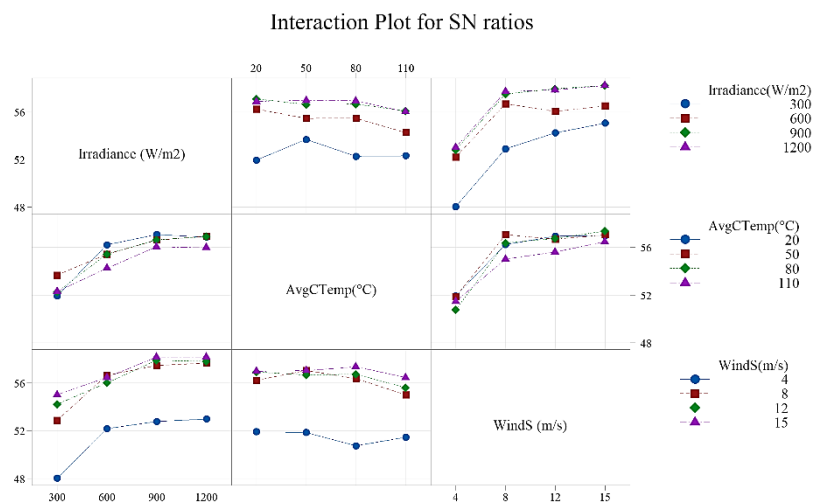
الف: باتری



ب: ژنراتور

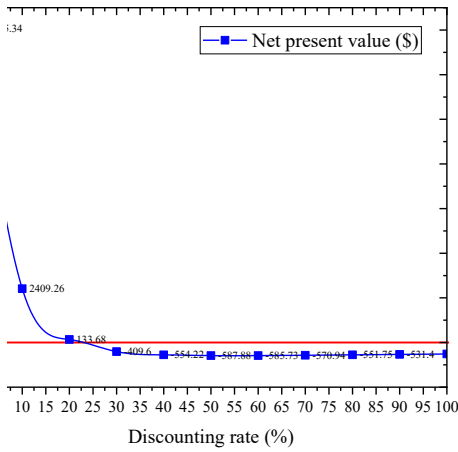
#### شکل ۴. شارژ و تخلیه سامانه‌های پشتیبان طی دوره یک ساله (نتایج پژوهش)

شکل (۵) میانگین اثر متغیرهای تابش خورشیدی، میانگین دمای سلول‌های خورشیدی و باد را نشان می‌دهد. تابش خورشیدی در محدوده ۰ تا ۱۲۰۰ وات بر متر مربع، همواره بر اثر مثبت بر روی توان سامانه خواهد داشت. چنانچه با طلوع خورشید و افزایش شدت تابش تا  $900 \text{ W.m}^{-2}$  اثر بسیار زیاد و از سطح ۹۰۰ تا  $1200 \text{ W.m}^{-2}$  اثر با شیب کمتر اما مثبت خواهد داشت. میانگین دمای سطح سلول‌های خورشیدی متأثر از دمای محیطی و جنس سلول‌های خورشیدی است. اثر دما بر عملکرد زیر سامانه‌ی فتوولتاییک منفی بوده و با افزایش مقاومت داخلی و خارجی، کاهش توان سامانه را موجب شده است. این فاکتور تأثیر محدودتر بر توان سامانه دارد. اما افزایش دما بیش از سطح ۴ ( $80^\circ \text{C}$  درجه سلسیوس) اثر بیشتری بر کاهش عملکرد سامانه خورشیدی دارد.

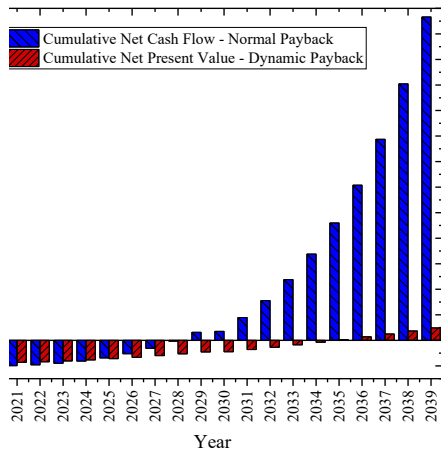


شکل ۵. میانگین اثر متغیرهای آزمون بر روی توان الکتریکی سامانه (نتایج پژوهش)

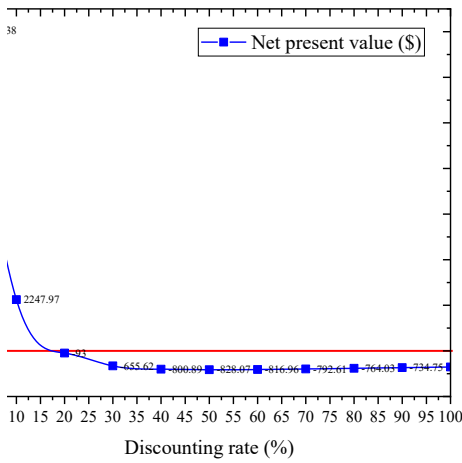
ارزیابی هزینه - فایده برای سه سناریوی جدول (۴) انجام شده است. پروژه‌ها برای دوره ۲۰ سال با فرض نرخ تنزیل ۱۶/۷، تعرفه فروش تجدیدپذیر ۰/۰۵ دلار، قیمت بنزین ۳۰۰۰۰ ریال (۰/۱۲ دلار) متوسط تورم حامل‌های انرژی ۱۰٪ می‌باشد. زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی پروژه‌ها ۱ ماه و از سال ۲۰۲۰ تا مستهلک در سال ۲۰۴۰ فرض شده است. سناریو اول به منظور تامین برق کلبه سبز با هدف «اقتصادی» می‌باشد. در این سناریو میزان نفوذ انرژی تجدیدپذیر ۲۳/۸ درصد و انرژی تجدیدناپذیر با مصرف ۴۰۷ لیتر سوخت بنزین می‌باشد. در سناریو دوم با مصرف سوخت ۲۵۳ لیتر میزان نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر (خورشیدی و بادی) ۵۴ درصد با هدف «تجدیدپذیر و اقتصادی» می‌باشد. سناریو سوم به دنبال تامین ۱۰۰ درصد انرژی کلبه سبز از طریق منابع انرژی تجدیدپذیر است. بنابراین سوخت-های فسیلی صفر بوده و از پشتیبان انرژی باتری تقاضای برق کلبه سبز تامین شده است. شکل (۶) جریانات نقدی اجرای ۳ سنارو را نشان می‌دهد.



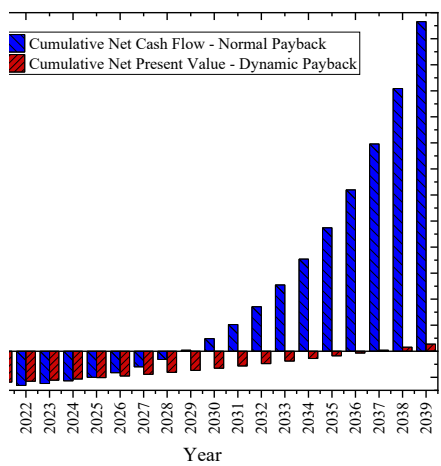
تغییر ارزش فعلی خالص در ازای تغییر نرخ  
تنزیل سناریو ۱



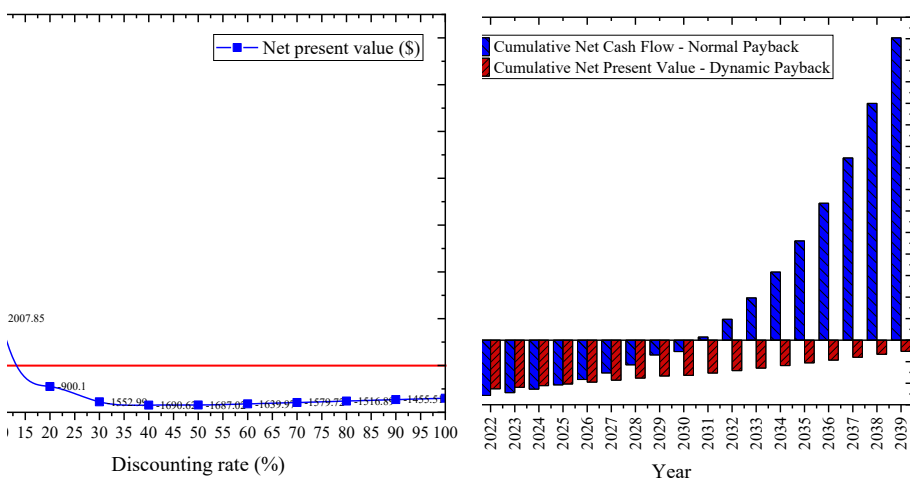
جریان‌ات نقدی اجرای سناریو ۱



تغییر ارزش فعلی خالص در ازای تغییر نرخ  
تنزیل سناریو ۲



جریان‌ات نقدی اجرای سناریو ۲



تغییر ارزش فعلی خالص در ازای تغییر نرخ

جریان‌های نقدی اجرای سناریو ۳

تجزیه سناریو ۳

شکل ۶. جریان‌های نقدی اجرای سناریوهای ۱ تا ۳ (نتایج پژوهش)

در سناریو اول کل انرژی تولیدی سالانه کلبه سبز معادل  $1697 \text{ kWh/yr}$  می‌باشد. همچنین ارزش فعلی خالص برابر  $553/68$  دلار و نرخ بازگشت سرمایه داخلی برابر  $21/49$  درصد است. در پایان برنامه فروش برق به کلبه سبز در سال  $2039$  مجموعاً  $2710/79$  دلار انرژی فروخته شده است. دوره بازگشت سرمایه در حالت طبیعی  $9/10$  سال (سال  $2029$ ) و در حالت دینامیک  $15/71$  سال است. تحلیل حساسیت پروژه تحت سناریو ۱ را نشان می‌دهد. بیشترین اثر مربوط به درآمد فروش و پس از آن مربوط به هزینه‌های عملیاتی است و نسبت هزینه - فایده معادل  $1/38$  می‌باشد. از لحاظ زیست محیطی، سناریو ۱ سالانه  $407$  لیتر سوخت بنزین معادل  $1065$  کیلوگرم در سال دی اکسید کربن برای تامین برق از طریق دیزل ژنراتور بکار گرفته است.

در سناریو دوم کل انرژی تولیدی سالانه سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی معادل kWh/yr ۱۶۵۲ می‌باشد. همچنین ارزش فعلی خالص برابر ۳۴۱/۴۷ دلار و نرخ بازگشت سرمایه داخلی برابر ۱۹/۵ درصد خواهد بود. در پایان برنامه فروش برق کلبه سبز در سال ۲۰۳۹ مجموعاً ۲۶۳۸/۹۰ دلار انرژی فروخته شده است. دوره بازگشت سرمایه در حالت طبیعی ۹/۸ سال (سال ۲۰۲۹) و در حالت دینامیک ۱۷/۶۱ سال است. تحلیل حساسیت پروژه نشان داد نسبت هزینه - فایده معادل ۱/۲۱ بوده و بیشترین اثر مربوط به درآمد فروش و پس از آن مربوط به افزایش دارایی‌های ثابت است. از لحاظ زیست محیطی، سناریو ۲ سالانه ۲۵۳/۴۴ لیتر سوخت بنزین معادل ۶۳۳ کیلوگرم در سال دی اکسید کربن برای تامین برق بکار گرفته است. در سناریو سوم انرژی تولیدی سالانه معادل kWh/yr ۱۹۳۳ می‌باشد. NPV برابر ۳۷۹/۰۹ - دلار و IRR برابر ۱۵/۰۸ درصد است. در پایان برنامه فروش برق کلبه سبز در سال ۲۰۳۹ مجموعاً ۳۰۸۷/۷۷ دلار انرژی فروخته شده است. چنانچه از منفی بودن NPV مشخص است، اجرای پروژه توجیه اقتصادی ندارد و دوره استهلاک و بازگشت سرمایه خارج از طول عمر پروژه است. بیشترین اثر مربوط به درآمد فروش و پس از آن مربوط به افزایش دارایی‌های ثابت بوده و اجرای این سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای ندارد.

## ۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این تحقیق به منظور طراحی، ساخت و ارزیابی سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی جریان مستقیم در زمان واقعی برای نظارت، مدیریت و منابع انرژی موجود با هدف بهینه‌سازی انرژی انجام شده است. الگوریتم کنترل پویا که در سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی بارگذاری شده است، با بهینه‌سازی درگاه‌های ورودی و خروجی اقدامات ذیل را انجام داده است.

- حس و اندازه‌گیری ولتاژ و انجام محاسبات ریاضی ولتاژ تنظیم شده منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی؛

- انجام محاسبات ریاضی جهت ارائه وضعیت و لتاژ اندازه‌گیری شده سامانه ذخیره انرژی باتری و گزارش آن به درصد بر روی صفحه نمایشگر؛
- نظارت، هماهنگی، مدیریت و کنترل مازول‌های تعویض رله برای منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی و بادی و مدارهای سوئیچینگ شارژ / تخلیه برای سامانه ذخیره انرژی باتری بر اساس وضعیت شارژ.

نتایج ارزیابی هزینه - فایده اجرای سناریوهای تامین برق کلبه سبز بیشترین اتلاف توان را مربوط به اثر دما با ۱۵/۸ درصد و کمترین را مربوط به سیم‌کشی زیر سامانه‌ها گزارش می‌کند. بیشترین مصرف برق کلبه سبز ۲/۰۹ کیلو وات و کمینه‌ی آن ۰/۰۱ کیلو وات ثبت شد. در زمان طلوع خورشید، مصرف برق کلبه آغاز و به ۰/۳۳ کیلو وات رسیده است. به صورت میانگین ضریب بار کلبه سبز ۲۲ درصد محاسبه شد. برای تامین برق کلبه سبز ۱۳ سناریو فرعی با هزینه‌ی ابتدایی ۲۲۱۰ دلار (میانگین سرعت باد ۷/۹۷ متر بر ثانیه) تا ۳۹۶۱ دلار (میانگین سرعت باد ۳ متر بر ثانیه) در نظر گرفته شده است. در بهره‌گیری از ۱۰۰ درصد منابع انرژی تجدید پذیر برای تامین برق کلبه سبز هزینه تولید انرژی COE برابر ۰/۴۴۶ دلار به ازای هر کیلو وات ساعت خواهد بود. درحالی که سامانه تبدیل انرژی تجدید پذیر ترکیبی با نفوذ انرژی ۲۳/۸ درصد و قبول مصرف سوخت ۴۰۷ لیتر، هزینه تولید برق را به ۰/۳۷۹ دلار به ازای هر کیلو وات ساعت رسانده است. در سناریو اول با نفوذ انرژی تجدیدپذیر ۲۳/۸ درصد و هدف «اقتصادی» میانگین مصرف سوخت روزانه ۱/۱۱ لیتر و کل انرژی سالانه تولیدی معادل kWh/yr ۱۶۹۷ بوده و ارزش فعلی خالص برابر ۵۵۳/۶۸ دلار و نرخ بازگشت سرمایه داخلی برابر ۲۱/۴۹ درصد با دوره بازگشت سرمایه ۱۵/۷۱ سال است. سناریو دوم با میانگین مصرف سوخت روزانه ۰/۶۹۴ لیتر کل انرژی تولیدی سالانه معادل kWh/yr ۱۶۵۲ و NPV برابر ۳۴۱/۴۷ دلار و IRR برابر ۱۹/۵ درصد با دوره بازگشت سرمایه ۱۷/۶۱ سال خواهد بود. در سناریو سوم نفوذ ۱۰۰ منابع انرژی تجدید پذیر،

کل انرژی تولیدی سالانه سامانه معادل  $1933 \text{ kWh/yr}$  با  $NPV$  معادل  $372/09$  دلار و  $IRR$  برابر  $15/08$  درصد محاسبه شد.

تحلیل آماری متغیرهای اثرگذار بر توان و عملکرد سامانه نشان داد: تابش خورشیدی در محدوده  $0$  تا  $1200$  وات بر متر مربع، همواره اثر مثبت بر روی توان سامانه خواهد داشت. با طلوع خورشید و افزایش شدت تابش تا  $900 \text{ W.m}^{-2}$  اثر زیاد و از سطح  $900$  تا  $1200 \text{ W.m}^{-2}$  اثر با شیب کمتر اما مثبت بر توان سامانه خواهد بود. اثر دما بر عملکرد سامانه‌های خورشیدی فتولتاییک منفی بوده و با افزایش مقاومت داخلی و خارجی، کاهش توان سامانه را موجب می‌شود. این فاکتور تاثیر محدودتر بر توان سامانه دارد. اما افزایش دمای سطح سلول‌های خورشیدی بیش از  $80$  درجه سلسیوس، اثر بیشتری بر کاهش توان سامانه خواهد داشت. فاکتور سرعت باد اثر مسقیم و مثبت بر عملکرد سامانه تبدیل انرژی تجدیدپذیر ترکیبی دارد. زیر سامانه بادی به وسیله توربین بادی در محدوده  $4$  تا  $8$  متر بر ثانیه به حد مطلوب تولید توان خواهد رسید. افزایش مجدد سرعت باد از  $8$  تا  $12$  متر بر ثانیه اثر مثبت با شیب کمتر بر توان داشت و تا سطح  $15$  متر بر ثانیه ادامه داشت. سرعت باد مطلوب برای استفاده از توربین‌های بادی مقیاس کوچک ( $400$  وات) بیش از  $4$  متر بر ثانیه و در محدوده  $8$  متر بر ثانیه ثبت شده است.

در بعد سیاستگذاری مطابق با تحلیل حساسیت سناریوها، افزایش قیمت فروش انرژی از منابع تجدیدپذیر مهمترین عامل در اقتصادی بودن طرح‌ها و پس از آن کاهش هزینه‌های عملیاتی است. کمترین اثر مربوط به عامل افزایش دارایی‌های ثابت است. آلاینده‌های زیست محیطی اجرای سناریو اول معادل  $1065$  کیلوگرم دی اکسید کربن در سال و اجرای سناریو دوم تولید سالانه  $633$  کیلوگرم دی اکسید کربن است. آلاینده‌های زیست محیطی اجرای سناریو سوم با نفوذ  $100$  درصد منابع انرژی تجدیدپذیر معادل صفر است.

نظر به نتایج تحقیق تامین برق کلبه سبز، جهت طراحی شهرهایی با الگوی توسعه پایدار مدیریت هزینه‌های انرژی و مصرف انرژی پیشنهادات ذیل ارائه می‌گردد:

۱. اثرات مخرب زیست‌محیطی حذف یا کمینه گردد.
۲. تعرفه خرید تضمینی برق از تجدیدپذیرها (در بخش خانگی) افزایش یابد. حد بحرانی این تعرفه ۰/۰۶ دلار محاسبه شده است.
۳. استفاده از توربین‌های بادی مقیاس کوچک (کمتر از ۴۰۰ وات) در سرعت باد بیش از ۴ متر بر ثانیه مناسب است.
۴. بر اساس الگوی بهینه دریافت انرژی تجدیدپذیر محیطی، بهترین زاویه شیب بام کلبه سبز ۳۰/۲ درجه و بهترین جهت گیری شهرها متناسب با این الگو ۱۹۵ درجه آزیموت می‌باشد. در بخش‌های گوناگون زیست‌محیطی از جمله مدیریت پسماند و انرژی در کشور، قوانین و مقررات مناسبی تصویب و ابلاغ شده است، اما مواد قانونی مشخصی برای رعایت استانداردهای شهرهایی با الگوی حداقل دریافت انرژی و بیشترین بهره‌وری از منابع تجدیدپذیر محیطی در محل ورود، در نظر گرفته نشده است. ضعف وجود قوانین و مقررات جامع در زمینه‌ی سازگاری شهرهای متناسب با الگوی توسعه پایدار و مدیریت انرژی و عدم وجود سامانه‌ی ملی رتبه‌بندی این مهم، توجه جدی دستگاه‌های مسئول و قانون‌گذار را می‌طلبد.

## منابع

- Aghaei J, Karami M, Muttaqi KM, et al (۲۰۱۵) MIP-Based Stochastic Security-Constrained Daily Hydrothermal Generation Scheduling. *IEEE Syst J* ۹:۶۱۵-۶۲۸. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2013.2289771>
- Alabdul Salam M, Aziz A, Alwaeli AHA, Kazem HA (۲۰۱۳) Optimal Sizing of Photovoltaic Systems using HOMER for Sohar, Oman. *Int J Renew ENERGY Res*
- Alarifi A, Ali AlZubi A, Alfarraj O, Alwadain A (۲۰۲۱) Automated control scheduling to improve the operative performance of smart renewable energy systems. *Sustain Energy Technol Assessments* ۴۵:۱۰۱۰۳۶. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101036>
- Armghan H, Yang M, Wang MQ, et al (۲۰۲۰) Nonlinear integral backstepping based control of a DC microgrid with renewable generation and energy storage systems.

- Int J Electr Power Energy Syst ۱۱۷:۱۰۵۶۱۳.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105613>
- Bartczak A, Budziński W, Gołębiowska B (۲۰۲۱) Impact of beliefs about negative effects of wind turbines on preference heterogeneity and valuation regarding renewable energy development in Poland. *Resour Conserv Recycl* ۱۶۹:۱۰۵۵۳۰.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105530>.
- Bhatia K, Mittal R, Varanasi J, Tripathi MM (۲۰۲۱) An ensemble approach for electricity price forecasting in markets with renewable energy resources. *Util Policy* ۷۰:۱۰۱۱۸۵. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2021.101185>
- Chang Z, Zhang Y, Chen W (۲۰۱۹) Electricity price prediction based on hybrid model of adam optimized LSTM neural network and wavelet transform. *Energy* ۱۸۷:۱۱۵۸۰-۱۱۵۹۰. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.07.134>
- Chidambaram PK, Thamilarasan K, Barath Kumar J, Auxilia Mary L (۲۰۲۱) A review on turbines in power production using wind and hydro energy. *Mater Today Proc*.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1242>
- Dong X, Lu J, Sun B (۲۰۲۰) Min-max Operation Optimization of Renewable Energy Combined Cooling, Heating, and Power Systems Based on Model Predictive Control. *IFAC-PapersOnLine* ۵۳:۱۲۸۰۹-۱۲۸۱۴.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1956>
- Esameili Shayan M, Najafi G, Esameili shayan S (۲۰۲۱) Design of an Integrated Photovoltaic Site: Case of Isfahan's Jarghouyeh photovoltaic plant. *J Energy Plan Policy Res* ۶:۲۲۹-۲۵۰.
- Esan AB, Agbetuyi AF, Oghorada O, et al (۲۰۱۹) Reliability assessments of an islanded hybrid PV-diesel-battery system for a typical rural community in Nigeria. *Heliyon* ۵:e۰۱۶۳۲. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01632>
- Esmacili Shayan M, Esmacili Shayan S, Nazari A (۲۰۲۱) Possibility of supplying energy to border villages by solar energy sources. *Energy Equip Syst* ۹:۲۷۹-۲۸۹.  
<https://doi.org/10.22059/EES.2021.2467079>
- Esmacili Shayan M, Ghasemzadeh F (۲۰۲۰) Nuclear Power Plant or Solar Power Plant. In: Awwad N (ed) *Nuclear Power Plants - The Processes from the Cradle to the Grave*. IntechOpen, London
- Esmacili Shayan M, Hayati MR, Najafi G, Esmacili Shayan S (۲۰۲۲a) The Strategy of Energy Democracy and Sustainable Development: Policymakers and Instruments. *Iran J Energy Environ* ۱۳:۱۸۵-۲۰۱. <https://doi.org/10.5829/IJEE.2022.13.02.10>
- Esmacili shayan M, Najafi G, Banakar A ahmad (۲۰۱۷) Power Quality in Flexible Photovoltaic System on Curved Surfaces. *J Energy Plan Policy Res* ۳:۱۰۵-۱۳۶
- Esmacili Shayan M, Najafi G, Ghobadian B, et al (۲۰۲۲b) Sustainable Design of a Near-Zero-Emissions Building Assisted by a Smart Hybrid Renewable Microgrid. *Int J Renew Energy Dev* ۱۱:۴۷۱-۴۸۰. <https://doi.org/10.14710/IJRED.2022.43838>
- Esmacili Shayan M, Najafi G, Ghobadian B, Gorjian S (۲۰۲۲c) Modeling the Performance of Amorphous Silicon in Different Typologies of Curved Building-integrated Photovoltaic Conditions. *Iran J Energy Environ* ۱۳:۸۷-۹۷.  
<https://doi.org/10.5829/IJEE.2022.13.01.10>
- Esmacili Shayan M, Najafi G, Lorenzini G (۲۰۲۲d) Phase change material mixed with

- chloride salt graphite foam infiltration for latent heat storage applications at higher temperatures and pressures. *Int J Energy Environ Eng* ۲۰۲۱ ۱-۱۱. <https://doi.org/10.1007/S40090-021-00462-0>
- Fernández-Guillamón A, Gómez-Lázaro E, Muljadi E, Molina-García Á (۲۰۱۹) Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renew. Sustain. Energy Rev.* ۱۱۰:۱۰۹۳۶۹
- Ghasemzadeh F, Esmaceli Shayan M (۲۰۲۰) Nanotechnology in the Service of Solar Energy Systems. In: *Nanotechnology and the Environment*. IntechOpen, London
- Girija S, Joshi A (۲۰۱۹) Fast Hybrid PSO-APF Algorithm for Path Planning in Obstacle Rich Environment. In: *IFAC-PapersOnLine*. Elsevier B.V., pp ۲۵-۳۰
- Goop J, Nyholm E, Odenberger M, Johnsson F (۲۰۲۱) Impact of electricity market feedback on investments in solar photovoltaic and battery systems in Swedish single-family dwellings. *Renew Energy* ۱۶۳:۱۰۷۸-۱۰۹۱. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.103>
- IEA (۲۰۱۷) *Energy Access Outlook ۲۰۱۷ (From Poverty to Prosperity-World Energy Outlook Special Report)*
- Kurek KA, Heijman W, van Ophem J, et al (۲۰۲۱) The contribution of the geothermal resources to local employment: Case study from Poland. *Energy Reports* ۷:۱۱۹۰-۱۲۰۲. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.092>
- Li WQ, Zhang TY, Li BB, et al (۲۰۲۱) Experimental investigation on combined thermal energy storage and thermoelectric system by using foam/PCM composite. *Energy Convers Manag* ۲۴۳:۱۱۴۴۲۹. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2021.114429>
- Li Y, Gao W, Ruan Y (۲۰۱۸) Performance investigation of grid-connected residential PV-battery system focusing on enhancing self-consumption and peak shaving in Kyushu, Japan. *Renew Energy* ۱۲۷:۵۱۴-۵۲۳. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.074>
- Maiti A, Syam P, Mukherjee K (۲۰۲۲) Alternate computation of the unit vectors synthesis towards synchronization of current-controlled grid-tie converter for renewable power system: An embedded outlook. *Eng Sci Technol an Int J* ۲۸:۱۰۱۰۲۳. <https://doi.org/10.1016/J.JESTCH.2021.06.003>
- Melrose J, Perroy R, Careas S (۲۰۱۹) *World population prospects*
- Menyeh BO (۲۰۲۱) Financing electricity access in Africa: A choice experiment study of household investor preferences for renewable energy investments in Ghana. *Renew Sustain Energy Rev* ۱۴۶:۱۱۱۳۲. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111132>
- Ojovan MI, Lee WE, Kalmykov SN (۲۰۱۹) *An introduction to nuclear waste immobilisation*
- Petrollese M, Cau G, Cocco D (۲۰۱۸) Use of weather forecast for increasing the self-consumption rate of home solar systems: An Italian case study. *Appl Energy* ۲۱۲:۷۴۶-۷۵۸. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.070>
- Renjini G, Devi V (۲۰۲۲) Artificial neural network controller based cleaner battery-less fuel cell vehicle with EF<sub>2</sub> resonant DC-DC converter. *Sustain Comput Informatics Syst* ۳۵:۱۰۰۶۶۷. <https://doi.org/10.1016/J.SUSCOM.2022.100667>

- Shayan ME, Najafi G, Ghobadian B, et al (۲۰۲۲) A novel approach of synchronization of the sustainable grid with an intelligent local hybrid renewable energy control. *Int J Energy Environ Eng* ۲۰۲۲ ۱-۱۲. <https://doi.org/10.1007/S40090-022-00003-7>
- Sinha S, Chandel SS (۲۰۱۴) Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* ۳۲:۱۹۲-۲۰۵. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.030>
- Skordoulis M, Ntanos S, Arabatzis G (۲۰۲۰) Socioeconomic evaluation of green energy investments: Analyzing citizens' willingness to invest in photovoltaics in Greece. *Int J Energy Sect Manag* ۱۴:۸۷۱-۸۹۰. <https://doi.org/10.1108/IJESM-12-2019-0010/FULL/XML>
- Sorensen B (۲۰۱۵) Solar energy storage. Academic Press
- Sulaeman S, Brown E, Quispe-Abad R, Müller N (۲۰۲۱) Floating PV system as an alternative pathway to the amazon dam underproduction. *Renew Sustain Energy Rev* ۱۳۵:۱۱۰۰۸۲. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110082>
- Tomar V, Tiwari GN (۲۰۱۷) Techno-economic evaluation of grid connected PV system for households with feed in tariff and time of day tariff regulation in New Delhi ??? A sustainable approach. *Renew Sustain Energy Rev* ۷۰:۸۲۲-۸۳۵. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.263>
- Yang B, Wang J, Zhang X, et al (۲۰۲۰) Control of SMES systems in distribution networks with renewable energy integration: A perturbation estimation approach. *Energy* ۲۰۲:۱۱۷۷۵۳. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117753>
- Zhong RZ, Cheng L, Wang YQ, et al (۲۰۱۷) Effects of anthelmintic treatment on ewe feed intake, digestion, milk production and lamb growth. SPRINGER Verlag.