

Implementation of Smart Fuzzy Logic Strategy to Manage Energy Resources of a Residential Power System Integrating Solar Energy and Storage System Using Arduino Boards**Mehdi Zangeneh, M.Sc, Ebrahim Aghajari, Assistant Professor, Mehdi Forouzanfar, Assistant Professor**Department of Electrical Engineering- Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
m.zangeneh.au@gmail.com, aghajari@iauahvaz.ac.ir, m.forouzanfar@iauahvaz.ac.ir**Abstract**

With increasing environmental concerns and reducing fossil fuels, the significance of producing electricity via renewable energy resources and replacing it with conventional fuels is increasing day by day. At the same time, the dependency of renewable energies on environmental conditions makes it challenging. One of these challenges has been managing the energy resources of the hybrid power system. Hence, in this research, a fuzzy intelligent controller has been designed and implemented to manage the energy resources of a grid-tied hybrid power system including solar energy and battery storage in laboratory dimensions. In the present study, by using the Arduino board as an energy management unit in the hybrid power system, tried to provide a basis for the use of renewable energy resources in real dimensions and mass production. The mathematical modeling of the system's equipment is presented and the hybrid power system is simulated using MATLAB software. Moreover, the ability of real-time data monitoring has also been added to the system. Eventually, the capabilities of the proposed smart fuzzy logic controller have been assessed by applying a usual day in springtime. The outcomes indicate that the suggested hybrid power system and the controller can save energy about 60 percent.

Keywords: hybrid energy system, energy management control, renewable energy, fuzzy control**Received:** 24 April 2021**Revised:** 21 June 2021**Accepted:** 17 August 2021**Corresponding Author:** Dr. Ebrahim Aghajari**Citation:** M. Zangeneh, E. Aghajari, M. Forouzanfar, "Implementation of smart fuzzy logic strategy to manage energy resources of a residential power system integrating solar energy and storage system using arduino boards", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 49, pp. 105-120, June 2022 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.49.8.7>

مقاله پژوهشی

پیاده‌سازی روش هوشمند مبتنی بر منطق فازی برای مدیریت منابع انرژی سیستم قدرت خانگی شامل انرژی خورشیدی و منبع ذخیره با استفاده از بردهای آردوینو

مهدی زنگنه، کارشناسی ارشد، ابراهیم آقاجری، استادیار، مهدی فروزانفر، استادیار

گروه مهندسی برق - واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
m.zangeneh.au@gmail.com, aghajari@iauhvaz.ac.ir, m.forouzanfar@iauhvaz.ac.ir

چکیده: با افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و کاهش سوخت‌های فسیلی، اهمیت تولید الکتریسیته توسط انرژی‌های تجدیدپذیر و جایگزینی آن با سوخت‌های مرسوم روز به روز بیشتر احساس می‌شود. از طرفی وابستگی انرژی‌های تجدیدپذیر به شرایط محیطی باعث شده استفاده از این انرژی‌ها با چالش‌هایی همراه باشد. یکی از این چالش‌ها مدیریت منابع انرژی بوده که در این تحقیق با طراحی یک کنترل‌کننده هوشمند فازی، مسئله‌ی مدیریت انرژی سیستم قدرت ترکیبی خانگی شامل انرژی خورشید، باتری و برق شبکه مورد توجه قرار گرفته و پیاده‌سازی آن در ابعاد آزمایشگاهی انجام شده است. در مطالعه‌ی پیش‌رو با به کار بردن برد آردوینو جهت مدیریت انرژی در سیستم قدرت ترکیبی، سعی بر آن بوده تا زمینه‌ی استفاده از این منابع در ابعاد واقعی و به صورت انبوه فراهم گردد همچنین مدل ریاضی اجزای سیستم قدرت ارائه شده، شبیه‌سازی سیستم با نرم افزار متلب انجام شده و توانایی مانیتورینگ زمان واقعی اطلاعات نیز به آن افزوده شده است. در انتها با اعمال شرایط آب و هوایی یک روز عادی بهاری تأثیر گذاری کنترل‌کننده هوشمند فازی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی نسبت به عدم استفاده از آن باعث کاهش ۶۰ درصدی استفاده از برق شبکه می‌گردد.

کلمات کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، سیستم انرژی ترکیبی، کنترل مدیریت انرژی، کنترل فازی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۲/۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۳/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۵/۲۶

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر ابراهیم آقاجری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اهواز - بزرگراه گلستان - فرهنگ شهر - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

آلودگی های زیست محیطی ایجاد شده توسط سوخت های فسیلی و خطرات احتمالی استفاده از انرژی هسته ای از یک سو و بی ضرری و پایان ناپذیری انرژی های تجدیدپذیر از سوی دیگر باعث شده تا در سال های اخیر این انرژی ها هر چه بیشتر مورد توجه پژوهشگران قرار گیرند [۱]. با این وجود، انرژی های مذکور دارای معایبی نیز هستند که استفاده از آن ها را با مشکلاتی همراه کرده است. اصولاً در سیستم های قدرت ترکیبی شامل انرژی های تجدیدپذیر سه چالش اصلی وجود دارد که توسط محققان مورد بررسی قرار می گیرد. اول از همه وابستگی این انرژی ها به شرایط آب و هوایی بوده که مسئله مدیریت انرژی را مطرح کرده است. دیگری هزینه اولیه بالای این انرژی هاست که موضوع تعیین اندازه سیستم را مطرح کرده و در نهایت راندمان پایین این منابع همواره مورد توجه پژوهشگران بوده و روش های مختلفی برای بهبود آن ارائه شده است [۲-۴].

در سال های اخیر، مدیریت انرژی سیستم های قدرت ترکیبی شامل انرژی های تجدیدپذیر بر اساس روش های مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. روش های بیشتر به کار گرفته شده در ارتباط با این موضوع شامل برنامه نویسی خطی [۵-۷]، کنترل انفعال [۸]، روش های هوشمند مصنوعی [۹] و بعضی اوقات روش کنترل می تواند بر اساس یک فلوجارت منطقی انجام شود [۱۰]. بر این اساس مرجع [۱۱] مروری بر روش های موجود برای مدیریت انرژی در سیستم های قدرت ترکیبی انجام داده است. در این بین عملکرد قابل قبول کنترل کننده فازی به عنوان واحد مدیریت انرژی باعث شده تا در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گیرد. مرجع [۱۲] با هدف کاهش انتشار دی اکسید کربن (CO_2) و کاهش هزینه های برق مصرفی از این کنترل کننده استفاده نموده است. مراجع [۱۳] و [۱۴] نیز از منطق فازی به منظور تضمین تغذیه بار و جلوگیری از خاموشی بهره برده اند. علاوه بر این اهداف، در بعضی تحقیقات شرایطی فراهم شده که نیروی تولید شده اضافه بر نیاز سیستم نیز مورد استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال، سیستم قدرت ترکیبی خانگی پیشنهاد شده در مرجع [۱۵] مجهز به الکتروایزر است تا با انرژی مازاد تولید شده توسط منابع تجدیدپذیر آب را به هیدروژن تبدیل نموده و در فصل های سرد سال برای تولید گرما مورد استفاده قرار گیرد. مرجع [۱۶] نیز شرایطی فراهم نموده تا قدرت مازاد تولید شده به شبکه برق شهری فروخته شود.

روش دیگری که اخیراً برای مدیریت انرژی در سیستم های قدرت ترکیبی خانگی شامل انرژی های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است اعمال برنامه ریزی زمانی برای استفاده از لوازم برقی بر اساس تعرفه های برق مصرفی است. از این رو مرجع [۱۷] از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات [۱۸] مرجع [۱۸] از ترکیب الگوریتم یاد شده و ژنتیک برای این منظور استفاده نموده و مرجع [۱۹] نیز روش کنترل مدل پیش بین را به کار برده است. نوآوری دیگری که در این زمینه در مرجع [۲۰] ارائه شده بر اساس استفاده از دو منبع ذخیره انرژی است که یکی از نوع باتری و دیگری از نوع منبع ذخیره نیروگاه برق-آبی است، که در این طرح با استفاده از الگوریتم ژنتیک میزان برق مصرفی و تولید گاز CO_2 کمینه می شود. همچنین با توجه به پیشرفت های چشم گیر در زمینه تولید خودروهای الکتریکی در سال های اخیر و در نظر گرفتن باتری این خودروها به عنوان یک منبع ذخیره در کنار سیستم های قدرت خانگی شامل انرژی های تجدیدپذیر و باتری منجر به طراحی روش های متعددی در زمینه مدیریت انرژی چنین سیستم های قدرتی شده است [۲۱-۲۳].

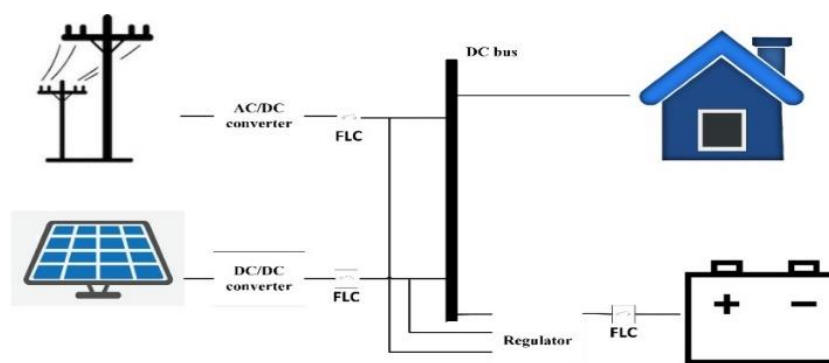
مسئله اساسی تعیین اندازه سیستم های قدرت ترکیبی وابسته به پارامترهای متعددی است که باعث شده الگوریتم های هوش مصنوعی به عنوان روشی مؤثر برای یافتن پاسخ این مسائل به کار برده شوند [۲۴]. به عنوان مثال می توان به الگوریتم ژنتیک [۲۵]، بهینه سازی ازدحام ذرات [۲۶]، بهینه سازی مبتنی بر آموزش-یادگیری [۲۷] و الگوریتم جستجوی فاخته [۲۸] اشاره نمود. همچنین موضوعات و روش های متعددی نیز جهت افزایش بهره وری انرژی های تجدیدپذیر توسط پژوهشگران ارائه شده، به عنوان مثال برای به حداکثر رساندن توان خروجی در سلول های خورشیدی، مبحث ردیابی نقطه حداکثر توان به شیوه های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۹-۳۲]. موضوع افزایش بهره وری تبدیل انرژی باد به الکتروسیسته نیز همواره مورد توجه محققان بوده و روش های متعددی برای افزایش راندمان توربین های بادی ارائه شده است، مانند رویکردهای مبتنی بر منطق فازی که برای کنترل ژنراتور القایی تغذیه دوگانه [۳۳] و ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم [۳۴-۳۶] استفاده شده است. مطالعه پیش رو به پیاده سازی یک سیستم قدرت ترکیبی مسکونی در ابعاد آزمایشگاهی پرداخته که شامل انرژی خورشیدی، منبع ذخیره سازی و اتصال به شبکه برق شهری است. مدیریت انرژی این سیستم قدرت ترکیبی توسط یک

کنترل‌کننده هوشمند فازی- سوگنو^۱ انجام شده که با ایجاد بار محاسباتی اندک و کمترین میزان نیاز به فضای برنامه نویسی، امکان اجرا توسط سخت‌افزاری با قدرت محاسباتی پایین را نیز فراهم می‌سازد. در عین حال، در این تحقیق از برد قدرتمند اردینو مگا ۲۵۶۰ استفاده شده که علاوه بر هزینه اندک در سرتاسر جهان در دسترس همگان است. همچنین به منظور بهبود کارآمدی کلی سیستم قدرت ترکیبی روشی جدید برای مدیریت هوشمند منابع ارائه شده که در آن بار نیز به عنوان یک ورودی مکمل در نظر گرفته شده تا از پاسخ‌گویی سیستم به صورت لحظه‌ای در شرایط مختلف آب و هوایی اطمینان حاصل شود. علاوه بر این، میزان کاهش مصرف انرژی با استفاده از روش پیشنهادی در مقایسه با یک سیستم قدرت معمولی بدون استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

سیستم قدرت ترکیبی ارائه شده در این تحقیق به نحوی طراحی شده تا در طیف وسیعی از مناطق جغرافیایی معتدل و گرمسیری که به میزان کافی از انرژی خورشیدی بهره‌مند هستند قابل استفاده باشد [۳۷]. لازم به ذکر است که این مطالعه به بررسی اولین گام‌های اساسی برای گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و مخصوصاً انرژی خورشیدی به صورت عملی پرداخته و بیشترین تمرکز خود را بر روی بسط مفاهیم نظری کنترل و ضروریات بستر سخت‌افزاری قرار داده است. این مقاله به بخش‌های زیر دسته‌بندی شده است: بخش دوم اجزای سیستم قدرت ترکیبی، روش کنترل و مدل ریاضی سخت‌افزار را بررسی نموده. بخش سوم به معرفی و طراحی کنترل‌کننده هوشمند فازی پرداخته و بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی را تجزیه و تحلیل می‌نماید. در انتها، بخش پنجم نتیجه‌گیری و نگاهی به آینده تحقیق را ارائه خواهد داد.

۲- مدل سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی

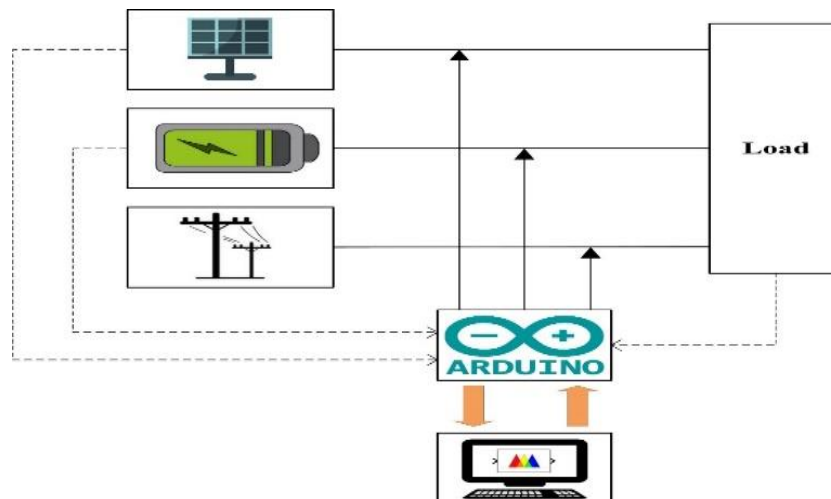
سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی شامل یک صفحه خورشیدی، جعبه باتری شامل چهار باتری قابل شارژ لیتیوم-یون، دسترسی به شبکه برق شهری برای جلوگیری از خاموشی در شرایط خاص و یک بار اهمی متغیر است. شکل (۱) اجزای این سیستم را نشان می‌دهد. برق مورد نیاز برای تغذیه بار ۵ ولت مستقیم است لذا شبکه برق شهری و پنل خورشیدی با تجهیزات مناسب (مبدل) به باس DC وصل می‌شوند و برای محافظت باتری در برابر شارژ بیش از حد از یک تنظیم‌کننده جریان استفاده شده است.



شکل (۱): ساختار سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی

Figure (1): The structure of the proposed hybrid power system

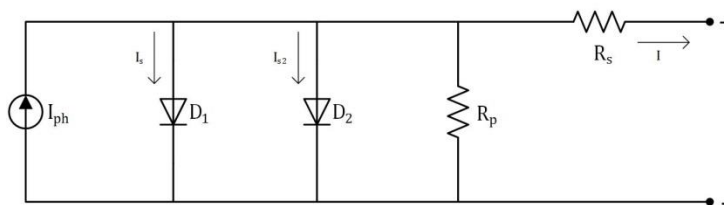
ساختار سیستم قدرت ترکیبی ارائه شده در شکل (۱) دارای منابع تولید الکتریسیته متعدد شامل شبکه، پنل خورشیدی و باتری، همچنین مصرف‌کنندگان مختلف بار و باتری (در حالت شارژ) است لذا این سیستم به یک واحد مدیریت نیرو نیاز دارد تا در هر لحظه تعیین نماید مورد نیاز مصرف‌کنندگان توسط کدام منابع انرژی تأمین شود. بر اساس روش پیشنهادی تصمیم‌گیری توسط کنترل‌کننده هوشمند فازی انجام شده و برد آردوینو تصمیمات اتخاذ شده را به سیستم اعمال می‌نماید. شکل (۲) نحوه عملکرد سیستم کنترل پیشنهادی را نمایش می‌دهد.



شکل (۲): روش کنترل سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی
Figure (2): The proposed control method for the hybrid power system

۱-۲- پنل خورشیدی

مدل ریاضی ارائه شده برای سلول خورشیدی شامل یک معادله نمایی دوتایی^۱ است که بر اساس شکل فیزیکی محل اتصال پیوند p-n در این سلولها ارائه شده است. شکل (۳) مدار معادل استفاده شده برای این قطعه را به تصویر کشیده و معادله (۱) مرتبط با این مدار را نشان می‌دهد. مدار مذکور بر اساس رفتار سلولهای خورشیدی به ویژه سلولهای ساخته شده از جنس سیلیکون پلی کریستالین^۲ معرفی شده است [۳۸].



شکل (۳): مدار معادل سلول خورشیدی [۳۸]
Figure (3): The solar cell equivalent circuit [38]

$$I = I_{ph} - I_s * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{N*V_t}} - 1 \right) - I_{s2} * \left(e^{\frac{V+I*R_s}{N_2*V_t}} - 1 \right) - (V + I * R_s) / R_p \quad (1)$$

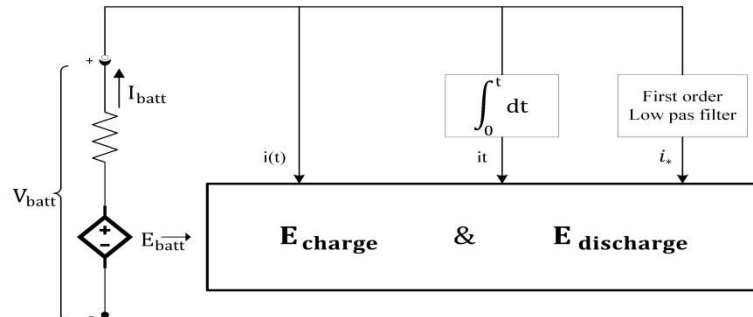
در معادله (۱)، I_s جریان اشباع دیودها، V_t ولتاژ حرارتی^۳ و ضریب کیفیت سلول خورشیدی (N) برای نوع پلی کریستالین برابر با ۲ است. K ، T و Q به ترتیب ثابت بلتزن، دمای سلول خورشیدی و واحد بنیادین بار^۴ هستند. I_{ph} نیز جریان القا شده توسط خورشید^۵ است که از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$I_{ph} = I_{ph0} * \frac{I_r}{I_{r0}} \quad (2)$$

در معادله (۲) I_r شدت نور تابش شده به سلول خورشیدی برحسب وات بر متر مربع و I_{ph0} جریان تولید شده توسط سلول در تابش I_{r0} است. پنل‌های خورشیدی پلی کریستالین در دسترس‌ترین نوع سلول خورشیدی بوده و بیشترین کاربرد تجاری را دارند لذا صفحه خورشیدی انتخاب شده در این تحقیق نیز از همین نوع با ابعاد ۱۲×۷ سانتی‌متر است [۳۹]. حداکثر توان تولید شده توسط این سلول خورشیدی برابر با یک وات و جریان اتصال کوتاه آن ۲۵۰ میلی-آمپر است.

۲-۲- منبع ذخیره سازی انرژی

در این مطالعه برای شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی از مدل ریاضی فرآیند شارژ و دشارژ موجود در کتابخانه نرم‌افزار سیمولینک متلب استفاده شده است. شکل (۴) نمودار بلوکی مدار معادل این قطعه و معادله‌های (۳) و (۴) روابط شارژ و تخلیه منبع ذخیره را نشان می‌دهند [۴۰].



شکل (۴): مدار معادل منبع ذخیره‌سازی انرژی ساخته شده از جنس لیتیوم-یون [۴۰]
Figure (4): The equivalent circuit of the lithium-ion type energy storage source [40]

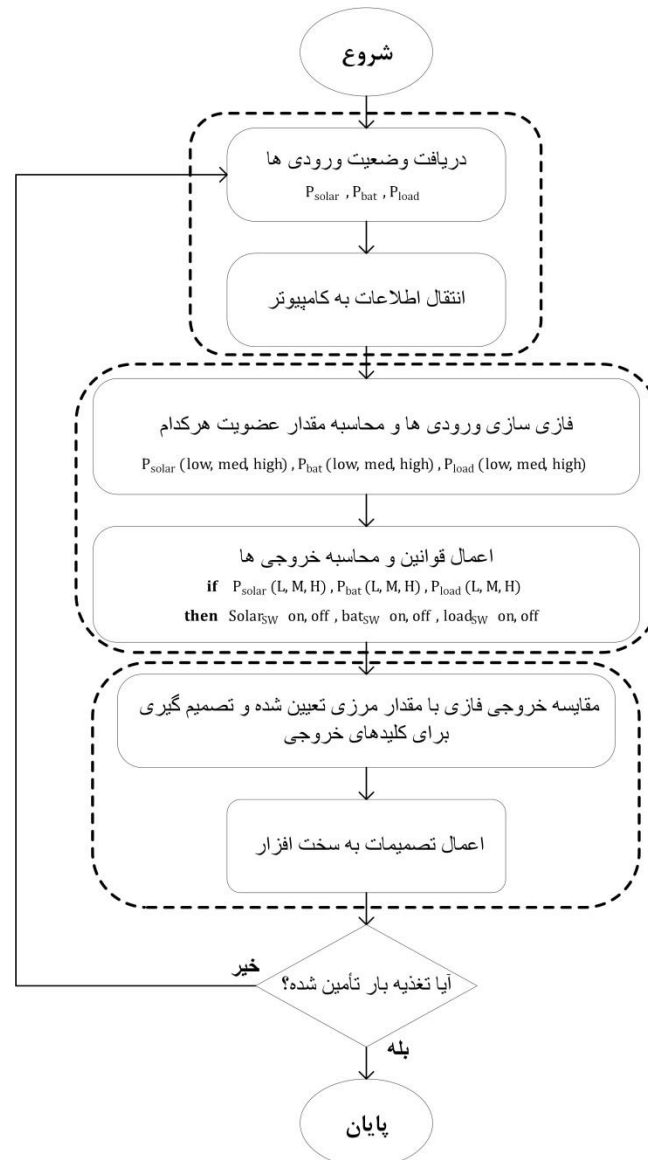
$$E_{\text{charge}(i_* < 0)} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i_* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (3)$$

$$E_{\text{discharge}(i_* > 0)} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i_* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (4)$$

در این رابطه E_0 ولتاژ ثابت بوده و Q ، A و K نیز به ترتیب بیشترین ظرفیت باتری بر حسب آمپر ساعت، ثابت قطبش و بر حسب اهم و ولتاژ نمایی بر حسب ولت هستند [۴۱، ۴۲]. در سیستم‌های قدرت ترکیبی با اندازه واقعی معمولاً از منبع ذخیره‌سازی ساخته شده از اسید-سرب یا لیتیوم-یون استفاده می‌شود. با توجه به مزایای باتری‌های لیتیوم-یون مانند چگالی انرژی بالاتر، هزینه‌های نگهداری کم‌تر و طول عمر بیشتر در سیستم ترکیبی پیشنهادی از باتری لیتیوم-یون قابل شارژ استفاده شده است [۴۳]. محدودیت و مشخصات منبع ذخیره‌سازی انرژی در مرجع [۴۴] قابل مشاهده است.

۳- کنترل‌کننده‌ی هوشمند فازی

کنترل‌کننده‌های مبتنی بر منطق فازی به صورت گسترده‌ای برای کنترل فرایندهای مختلف در صنعت مورد استفاده قرار گرفته‌اند که مهم‌ترین دلیل آن قابلیت‌های ذاتی این کنترل‌کننده از جمله سادگی اجرا، عدم نیاز به مدل ریاضی پیچیده، سازگاری بالا و حساسیت کم است [۴۵-۴۷]. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری بالای این کنترل‌کننده به دلیل داشتن سیستم استنتاج مبتنی بر قانون‌های ایجاد شده توسط طراح و همچنین توانایی آن در تصمیم‌گیری سریع بر اساس محدودیت‌های مسئله و شرایط آنی، باعث شده این کنترل‌کننده به گزینه‌ای مناسب برای سیستم‌های برخط و به خصوص کنترل برخط سیستم‌های قدرت ترکیبی تبدیل شود [۴۸، ۴۹]. در روش کنترلی پیشنهادی برد آردوینو توسط سنسورهای مورد نیاز داده‌های خام سیستم را دریافت نموده و با پردازش اطلاعات بر اساس منطق فازی، تصمیمات اتخاذ شده را توسط سوئیچ‌های کنترلی به سیستم قدرت ترکیبی اعمال می‌کند. هسته تصمیم‌گیرنده در این سیستم کنترل مبتنی بر منطق فازی ارائه شده در بخش پیشین است که در قسمت میانی فلوچارت شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده کنترل‌کننده هوشمند فازی دارای سه ورودی و سه خروجی است. ورودی‌های آن میزان توان تولید شده توسط پنل خورشیدی، وضعیت شارژ باتری و میزان بار درخواستی هستند و خروجی‌ها شامل تعیین وضعیت اتصال یا عدم اتصال سه سوئیچ است که وضعیت منابع (پنل خورشیدی، باتری و شبکه) به بار را تعیین می‌نماید. توابع عضویت انتخاب شده برای این کنترل‌کننده مطابق شکل (۷) برای ورودی از نوع مثلثی بوده و دارای سه برجسب L ، M و H است که به ترتیب معرف مقادیر کم، متوسط و زیاد هستند. خروجی‌ها نیز دارای دو تابع عضویت تک مقدار بوده که بیانگر وضعیت اتصال یا عدم اتصال منابع به بار هستند.



شکل (۵): فلوچارت ساده شده روش کنترل

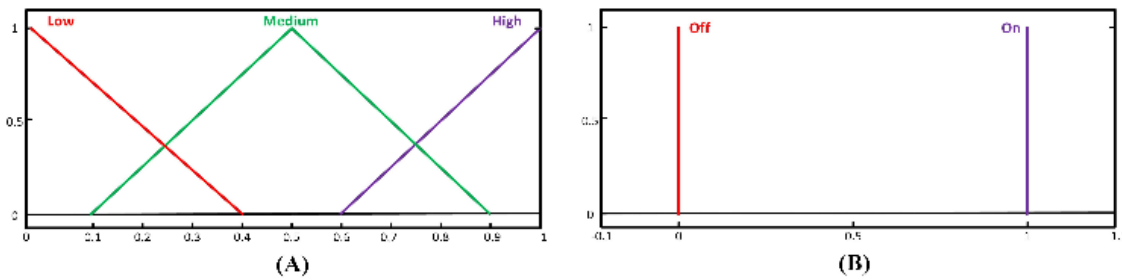
Figure (5): The simplified flowchart of the control method



شکل (۶): نمای کلی کنترل کننده هوشمند فازی

Figure (6): The overview of the fuzzy intelligent controller

در حقیقت وظیفه نهایی این کنترل کننده تعیین این مسئله است که آیا منابع به بار متصل باشند یا خیر لذا کنترل کننده در خروجی باید تنها دارای دو حالت روشن یا خاموش باشد. بنابراین دامنه خروجی ها بین [۰ ۱] تعیین شده و فاصله ۰ تا ۰/۵ به عنوان عدم اتصال سوئیچ و همچنین ۰/۵ تا ۱ به عنوان اتصال منبع به بار در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): توابع عضویت کنترل کننده هوشمند فاز (A) منابع ورودی (B) سیگنال خروجی
Figure (7): The fuzzy Intelligent Controller Membership Functions A) Input sources B) Output signal

در سیستم قدرت پیشنهادی برد آردوینو توانایی ایفای دو نقش را دارد، یکی به عنوان واسط و اجرا کننده تنها تصمیمات اتخاذ شده توسط کنترل کننده فاز را اجرا نماید و دیگری اینکه کنترل کننده فاز نیز بر روی برد برنامه ریزی شود و دو عمل تصمیم گیری و اجرا توسط آردوینو انجام شود. از این رو سیستم استنتاج کنترل کننده از نوع سوگنو انتخاب گردید تا با کاهش بار محاسباتی، زمان پاسخ گویی به تغییرات آنی شرایط سیستم کاهش یابد. همچنین به فضای مورد نیاز برنامه نویسی کمتری نیاز باشد و برد آردوینو MEGA2560 (با ۲۵۶ کیلوبایت حافظه فلش برای ذخیره کد) به عنوان یک انتخاب مناسب برای این سیستم قدرت ترکیبی مبدل شود.

در یک کنترل کننده فاز "قوانین" تعیین کننده نحوه تصمیم گیری و اعمال محدودیت‌های طراحی سیستم کنترل هستند [۵۰]. در کنترل کننده هوشمند فاز پیش رو قوانین بر اساس اهداف و محدودیت‌های زیر طراحی گردید:

- تضمین تغذیه بار.
- اولویت استفاده از منابع برای تغذیه بار به ترتیب پنل خورشیدی، منبع ذخیره سازی و سپس شبکه برق شهری است.
- اولویت استفاده از منابع برای شارژ باتری ابتدا پنل خورشیدی و سپس شبکه برق شهری است.
- همواره سعی شده باتری در حالت شارژ باشد تا در صورت ایجاد شرایط خاص یا عدم استفاده از منبع خورشیدی، منبع ذخیره نیرو در دسترس باشد.

• اگر میزان توان تولیدی توسط پنل خورشیدی ناچیز بود، به طور کلی این منبع نادیده گرفته شود. همان طور که قبلاً اشاره شد، کنترل کننده فاز دارای سه ورودی است و هر ورودی دارای سه برچسب، بنابراین در کل ۲۷ قانون برای این کنترل کننده فاز می توان متصور شد. جدول (۱) مجموعه قوانین فاز را نشان می دهد. تک تک این قوانین بر اساس پنج محدودیت ذکر شده طراحی شده اند. به عنوان مثال، قانون اول شرایطی را نشان می دهد که بار تقاضا شده، میزان انرژی خورشیدی تولیدی و وضعیت شارژ باتری، همه در کمترین مقدار خود هستند بنابراین در این حالت به دلیل کمبود انرژی تولید شده توسط پنل خورشیدی، از آن صرف نظر شده و در حالت قطع است. شبکه برق شهری برای تغذیه بار و شارژ باتری مورد استفاده قرار گرفته و در حالت اتصال است، منبع ذخیره نیز متصل بوده تا توسط شبکه شارژ شود.

به همین ترتیب، ۲۶ قانون دیگر برای تحقق اهداف ذکر شده طراحی شده اند. سطح نشان داده شده در شکل (۸) اولویت پایین استفاده از برق شبکه نسبت به پنل خورشیدی و باتری را نمایش می دهد. همان طور که مشاهده می شود، با افزایش تولید توان توسط منبع خورشیدی یا شارژ باتری، میزان استفاده از برق شبکه کاهش می یابد. بستر سخت افزاری اجرا شده برای سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی در شکل (۹) نشان داده شده است. در این سیستم متناسب با توانایی های برد آردوینو می توان دو نقش متفاوت را برای آن در نظر گرفت. در حالت اول آردوینو به عنوان مغز متفکر سیستم کدهای مرجع کنترل کننده منطق فاز را در خود جا داده و با پردازش اطلاعات بار و منابع انرژی، تصمیمات نهایی را به سویچ های کنترل اعمال می نماید. اجرای سیستم به این شیوه قابلیت عملکرد بدون نیاز به کامپیوتر را برای سخت افزار فراهم می نماید.

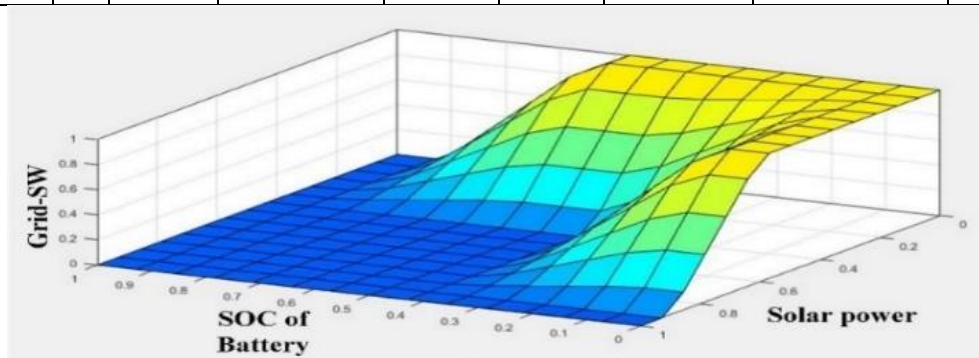
اما علاوه بر این روش پیاده سازی می توان حالتی را در نظر گرفت که در آن هسته اجرا کننده منطق فاز نرم افزار متلب بوده و آردوینو به عنوان یک واحد عملیاتی توسط کابل USB به کامپیوتر متصل شده و وظیفه انتقال اطلاعات سیستم قدرت به

کامپیوتر و همچنین اعمال تصمیمات نهایی کنترل کننده فازی به سیستم قدرت را بر عهده داشته باشد. لازم به ذکر است که اجرای سیستم به روش دوم قابلیت مانیتورینگ اطلاعات لحظه‌ای سیستم و همچنین امکان اعمال تغییرات را برای کاربر فراهم می‌نماید.

Table (1): The rules of fuzzy intelligent controller

جدول (۱): قوانین کنترل کننده هوشمند فازی

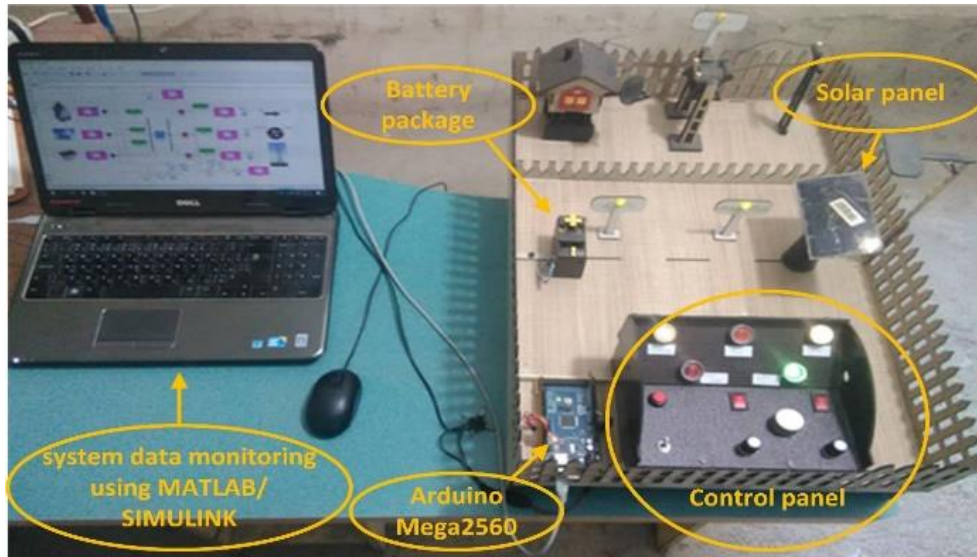
| ردیف | IF | بار | انرژی خورشید | باتری | Then | سوئیچ پنل خورشیدی | سوئیچ باتری | سوئیچ شبکه |
|------|----|-----|--------------|-------|------|-------------------|-------------|------------|
| ۱ | if | L | L | L | → | OFF | ON | ON |
| ۲ | if | L | L | M | → | OFF | ON | OFF |
| ۳ | if | L | L | H | → | OFF | ON | OFF |
| ۴ | if | L | M | L | → | ON | ON | OFF |
| ۵ | if | L | M | M | → | ON | OFF | OFF |
| ۶ | if | L | M | H | → | ON | OFF | OFF |
| ۷ | if | L | H | L | → | ON | ON | OFF |
| ۸ | if | L | H | M | → | ON | OFF | OFF |
| ۹ | if | L | H | H | → | ON | OFF | OFF |
| ۱۰ | if | M | L | L | → | OFF | ON | ON |
| ۱۱ | if | M | L | M | → | OFF | ON | ON |
| ۱۲ | if | M | L | H | → | OFF | ON | OFF |
| ۱۳ | if | M | M | L | → | ON | ON | ON |
| ۱۴ | if | M | M | M | → | ON | ON | OFF |
| ۱۵ | if | M | M | H | → | ON | ON | OFF |
| ۱۶ | if | M | H | L | → | ON | ON | OFF |
| ۱۷ | if | M | H | M | → | ON | OFF | OFF |
| ۱۸ | if | M | H | H | → | ON | OFF | OFF |
| ۱۹ | if | H | L | L | → | OFF | ON | ON |
| ۲۰ | if | H | L | M | → | OFF | ON | ON |
| ۲۱ | if | H | L | H | → | OFF | ON | OFF |
| ۲۲ | if | H | M | L | → | ON | ON | ON |
| ۲۳ | if | H | M | M | → | ON | ON | OFF |
| ۲۴ | if | H | M | H | → | ON | ON | OFF |
| ۲۵ | if | H | H | L | → | ON | ON | ON |
| ۲۶ | if | H | H | M | → | ON | ON | OFF |
| ۲۷ | if | H | H | H | → | ON | ON | OFF |



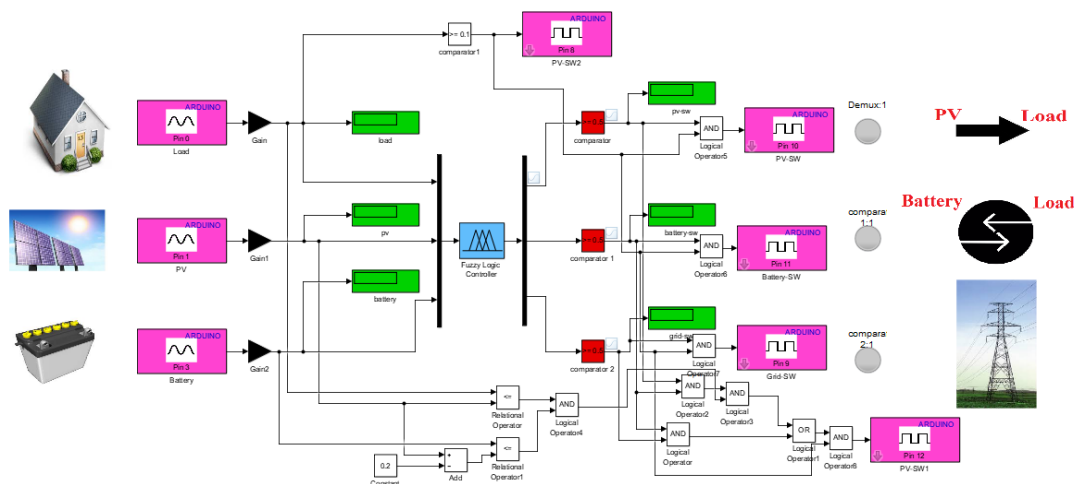
شکل (۸): سطوح کنترل کننده هوشمند فازی

Figure (8): The fuzzy intelligent control surface

لذا مطابق با شکل (۹) در این مطالعه روش دوم برای پیاده‌سازی سیستم قدرت ترکیبی به کار برده شده که در آن لپ‌تاپ مورد استفاده دارای پردازنده Intel (R) Core (TM) i3 حافظه رم 6G و سیستم عامل ۶۴ بیتی است. سه ورودی آنالوگ A0، A1، A3) با وضوح ۱۰ بیت برای سنجش بار، پنل خورشیدی و وضعیت شارژ باتری و سه پایه خروجی دیجیتال (پایه ۹، پایه ۱۰، پایه ۱۱) نیز برای تعیین وضعیت اتصال منابع به بار استفاده شده است. برای برنامه‌ریزی برد آردوینو نرم‌افزار سیمولینک متلب به کار برده شده و شکل (۱۰) منطق طراحی شده برای برد آردوینو را نشان می‌دهد.

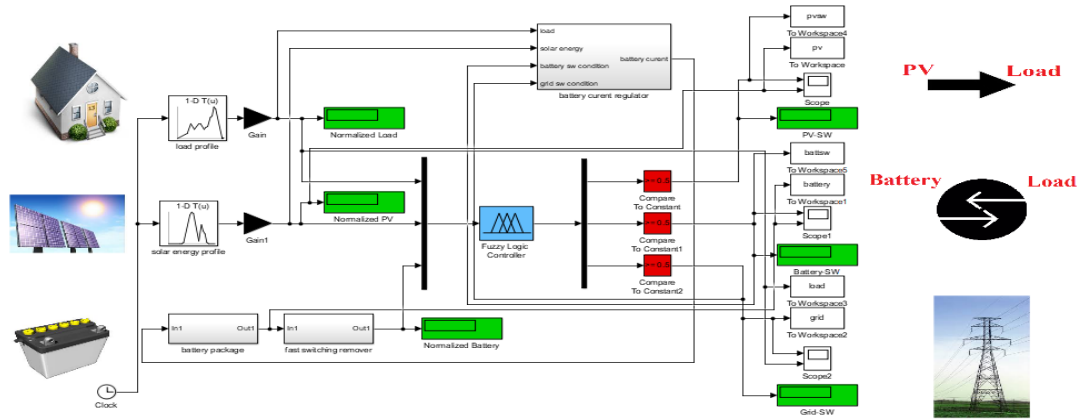


شکل (۹): پیاده‌سازی سیستم قدرت ترکیبی خانگی و مانیتورینگ آنلاین وضعیت سیستم
Figure (9): Implementation of the hybrid power system and system status monitoring

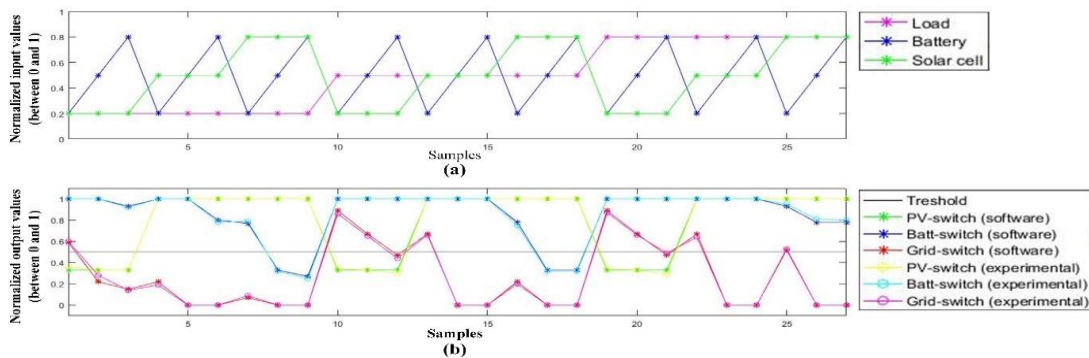


شکل (۱۰): منطق طراحی شده برای برنامه‌ریزی برد آردوینو توسط نرم‌افزار متلب
Figure (10): The designed control logic for programming the Arduino board by MATLAB software

برای بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی در شرایط مختلف آب و هوایی، سخت‌افزار نشان داده شده در شکل (۹) با استفاده از نرم‌افزار سیمولینک متلب شبیه‌سازی گردید [شکل (۱۱)]. دقت نتایج خروجی شبیه‌سازی در مقایسه با سخت‌افزار نیز مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، خروجی کنترل‌کننده برای ورودی‌های مختلف در سه نقطه ۰/۲، ۰/۵ و ۰/۸ اندازه‌گیری و با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند. نمودار نشان داده شده در شکل (۱۲-الف) ورودی‌های سیستم را نشان می‌دهد و شکل (۱۲-ب) تفاوت خروجی سیستم در فضای شبیه‌سازی و فضای واقعی را بررسی می‌نماید.



شکل (۱۱): شبیه‌سازی سیستم قدرت ترکیبی توسط نرم افزار متلب
Figure (11): Simulation of the hybrid power system using MATLAB software

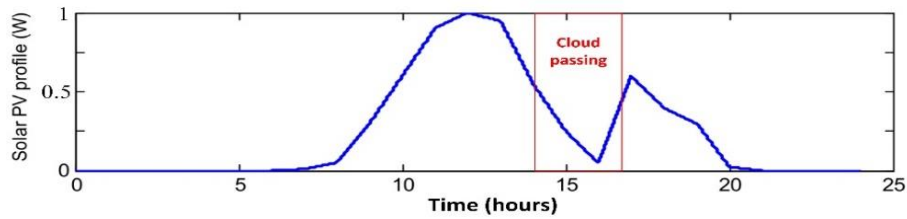


شکل (۱۲): مقایسه رفتار سیستم در محیط شبیه‌سازی و دنیای واقعی
Figure (12): The comparison of system behavior in the simulation environment and the real world

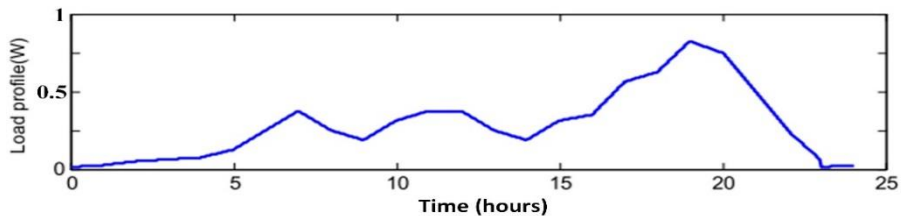
به‌عنوان مثال نمونه ۴ وضعیتی را نشان می‌دهد که در آن بار و سطح شارژ منبع ذخیره ۲۰ درصد و وضعیت پنل خورشیدی ۵۰ درصد است. در این شرایط، کنترل‌کننده هوشمند فازی تصمیم به قطع شبکه برق شهری و اتصال پنل خورشیدی و باتری به بار می‌گیرد. به دلیل تقاضای بار اندک، پنل خورشیدی هم بار را تأمین نموده و هم باتری را شارژ می‌نماید. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در این نقطه و سایر نقاط، اندازه‌گیری نرم‌افزار و سخت‌افزار بسیار نزدیک به هم هستند. علاوه بر نزدیکی نتایج، تعیین‌کننده نهایی وضعیت اتصال یا عدم اتصال سوئیچ‌های خروجی، خط آستانه در مقدار ۰/۵ است که هر چه بیشتر نتایج نهایی اندازه‌گیری سخت‌افزاری و نرم‌افزاری را به هم نزدیک می‌کند.

۴- نتایج شبیه‌سازی

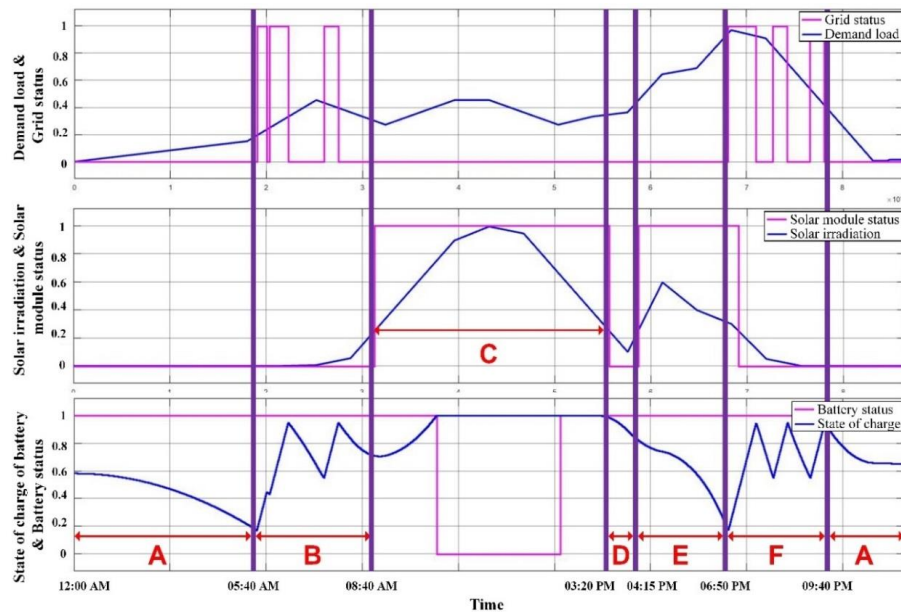
به‌منظور تعیین اثربخشی روش پیشنهادی، شرایط آب و هوایی یک روز معمول بهاری از مرجع [۱۵] استخراج و به سیستم قدرت ترکیبی اعمال گردید. در ادامه شرایط ورودی و نتایج حاصله مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت. براساس این داده‌ها، خورشید در ساعت ۸ صبح طلوع کرده، حدود ساعت ۱ بعد از ظهر به اوج خود می‌رسد و غروب آن در ساعت ۷ عصر خواهد بود. مطابق شکل (۱۳) بین ساعت دو تا چهار بعد از ظهر، میزان شدت نور خورشید کاهش می‌یابد که معرف عبور ابرها در این ساعات روز است. تغییرات بار درخواستی نیز از مرجع [۱۵] به‌دست آمده که براساس میانگین استفاده از وسایل برقی در بهار (ماه مه) تنظیم شده است. اما به دلیل تغییر اندازه سیستم قدرت ترکیبی نسبت به این مرجع و اجرای آن در ابعاد آزمایشگاهی، حداکثر تقاضای نیرو به ۱ وات کاهش یافته تا متناسب با توان تولید شده توسط سایر مؤلفه‌های سیستم باشد. مطابق شکل (۱۴)، مصرف برق از حدود ۶ تا ۸ صبح آغاز می‌شود، زمان پیک اوج مصرف از ساعت ۵ بعد از ظهر تا ۱۱ شب ادامه می‌یابد و از نیمه شب تا ۶ صبح کمترین میزان مصرف الکتریسیته را خواهیم داشت.



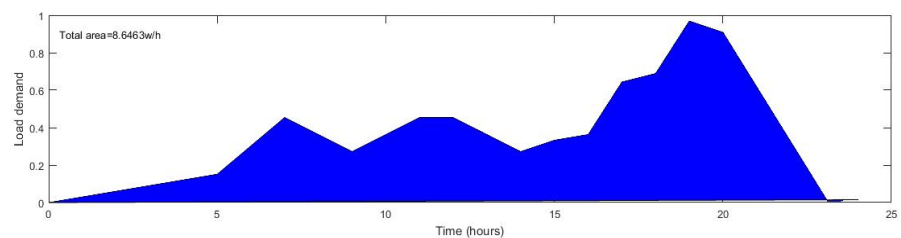
شکل (۱۳): توان تولید شده در طول روز توسط سلول خورشیدی
Figure (13): The amount of power generated during the day by the solar cell



شکل (۱۴): میزان تغییرات بار تقاضا شده در طول روز
Figure (14): The amount of demand load during the day



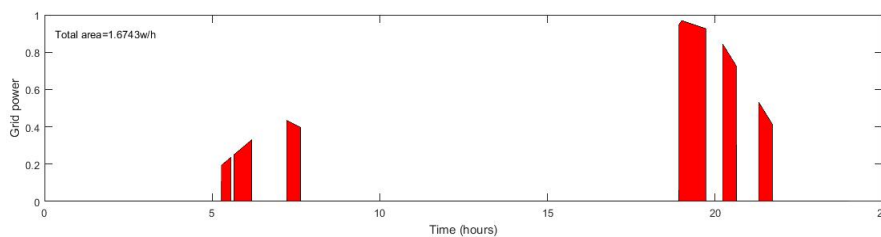
شکل (۱۵): نمودار ورودی خروجی کنترلی کننده در طول روز
Figure (15): The input/output diagram of the controller during the day



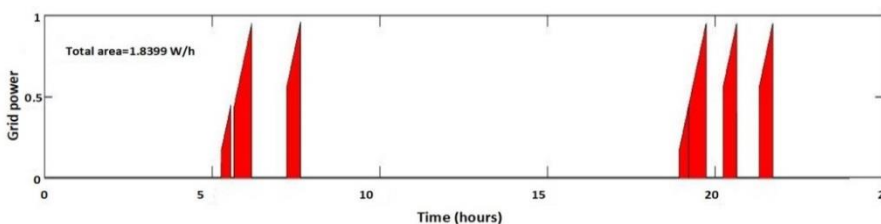
شکل (۱۶): مقدار کل بار درخواستی در طول روز
Figure (16): The total amount of demand load during the day

پاسخ این سیستم به شرایط ورودی در شکل (۱۵) نشان داده شده است. برای بررسی ساده‌تر، ورودی‌ها (نمودار آبی) به همراه سیگنال‌های خروجی (نمودار بنفش) به صورت همزمان در یک شکل نمایش داده شده‌اند. بازه زمانی A، از اواخر شب آغاز شده و تا ساعتی قبل از طلوع آفتاب ادامه می‌یابد. در این ساعات با توجه به وضعیت خوب شارژ باتری، تقاضای بار اندک و در

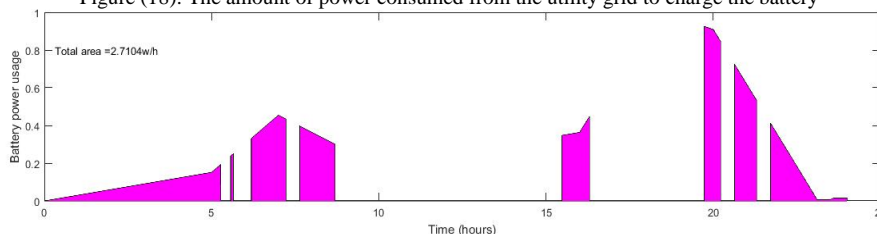
دسترس نبودن نور خورشید، از باتری برای تغذیه بار استفاده شده است. در فاصله زمانی B با کاهش شارژ باتری، افزایش تقاضای بار و همچنین کمبود انرژی خورشیدی در این ساعات، شبکه برق شهری و باتری به طور متناوب بار را تغذیه می نمایند. در بازه C و ساعات میانه روز با اوج گرفتن خورشید و رسیدن توان پنل خورشیدی به حداکثر مقدار خود، انرژی خورشیدی به تنهایی توانایی تغذیه بار و شارژ منبع ذخیره را دارد. در زمان شروع پیک مصرف پیش از غروب خورشید، ابتدا از پنل خورشیدی و باتری به صورت هم زمان برای تغذیه بار استفاده شده (بازه زمانی E) و با غروب آفتاب، باتری و شبکه به صورت متناوب بار را تغذیه می نمایند (فاصله زمانی F). به منظور بررسی دقیق تر نتایج و داده ها نمودارهای ورودی و خروجی توسط نرم افزار متلب تجزیه و تحلیل شده اند. زمان اتصال هر منبع به بار و مقدار توان تولیدی توسط این منابع مشخص شده و در انتها، مساحت زیر منحنی ها محاسبه می شود تا مقدار توان مصرفی بر حسب وات-ساعت را نشان دهد. مساحت نمودارها توسط قانون دوزنقه و دستور "trapz" در نرم افزار متلب محاسبه شده اند [۵۱]. نمودار شکل (۱۶) نشان می دهد که کل بار تقاضا شده در طول ۲۴ ساعت ۸/۶۵ وات-ساعت بوده است همچنین مقدار توان مصرف شده از شبکه برق شهری برای تغذیه بار و شارژ باتری نیز مطابق شکل های (۱۷) و (۱۸) به ترتیب برابر با ۱/۶۷ و ۱/۸۴ وات-ساعت است. علاوه بر این، شکل های (۱۹) الی (۲۱) به ترتیب میزان انرژی مصرفی برای تغذیه بار از منابع باتری، پنل خورشیدی و پنل خورشیدی-باتری (به صورت همزمان) را نشان می دهند. در حالت عادی و بدون به کار بردن روش پیشنهادی، ۸/۶۵ وات-ساعت مورد نیاز بار کاملاً توسط شبکه تأمین می شد، اما توسط سیستم قدرت ترکیبی طراحی شده، میزان مصرف برق شبکه تا ۶۰ درصد کاهش یافته است. جدول (۲) شاخص های مختلف انرژی سیستم در دو حالت استفاده از روش پیشنهادی و عدم استفاده از آن را با هم مقایسه می نماید.



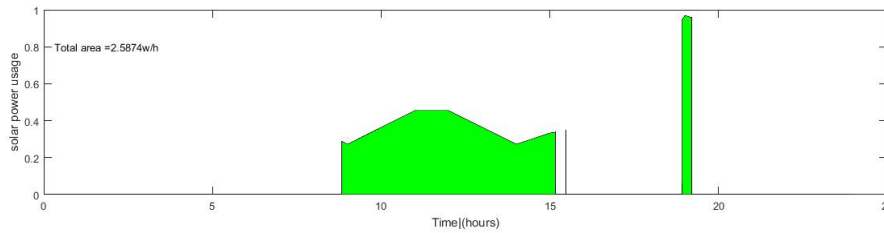
شکل (۱۷): مقدار توان مصرف شده از شبکه برق شهری برای تغذیه بار
Figure (17): The amount of power consumed from the utility grid to satisfy the load



شکل (۱۸): مقدار توان مصرف شده از شبکه برق شهری برای شارژ باتری
Figure (18): The amount of power consumed from the utility grid to charge the battery

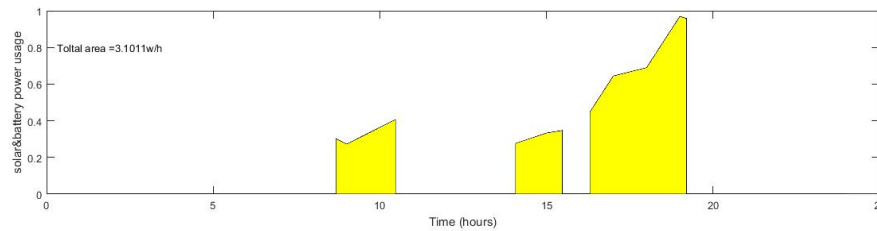


شکل (۱۹): مقدار توان مصرف شده از منبع ذخیره برای تغذیه بار
Figure (19): The amount of power consumed from the storage battery to satisfy the load



شکل (۲۰): مقدار توان مصرف شده از پنل خورشیدی برای تغذیه بار

Figure (20): The amount of power consumed from the solar panel to satisfy the load



شکل (۲۱): مقدار توان مصرف شده از پنل خورشیدی و باتری به صورت هم زمان برای تغذیه بار

Figure (21): The amount of power consumed from the storage battery and solar panel simultaneously to satisfy the load

Table (2): Comparison of the amount of power used by the proposed hybrid power system and a typical power system
جدول (۲): مقایسه میزان توان مورد استفاده توسط سیستم قدرت ترکیبی پیشنهادی و یک سیستم قدرت معمولی

| ردیف | عنوان پارامتر | بدون استفاده از سیستم قدرت پیشنهادی (وات بر ساعت) | با استفاده از سیستم قدرت پیشنهادی (وات بر ساعت) |
|------|--|---|---|
| ۱ | میزان بار درخواستی | ۸/۶۵ | ۸/۶۵ |
| ۲ | توان مورد استفاده از شبکه برای تغذیه بار | ۸/۶۵ | ۱/۶۸ |
| ۳ | توان مورد استفاده از شبکه برای شارژ باتری | ۰ | ۱/۸۴ |
| ۴ | توان مورد استفاده از منبع خورشیدی برای تغذیه بار | ۰ | ۲/۵۹ |
| ۵ | توان مورد استفاده از باتری برای تغذیه بار | ۰ | ۲/۷۱ |
| ۶ | توان در زمان استفاده مشترک از باتری و منبع خورشیدی | ۰ | ۳/۱ |
| ۷ | توان ذخیره شده | ۰ | ۵/۱۳ (حدود ۶۰ درصد) |

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، مدیریت انرژی یک سیستم قدرت ترکیبی خانگی شامل انرژی خورشیدی، منبع ذخیره و اتصال به شبکه برق شهری طراحی و شبیه سازی شده و در ابعاد آزمایشگاهی پیاده سازی گردید. مدیریت انرژی این سیستم قدرت بر اساس منطق فازی بوده، اجرای آن توسط برد Arduino Mega2560 انجام شده و هدف آن ارائه یک بستر سخت افزاری کارآمد، مقرون به صرفه و در دسترس عموم بوده است. نتایج عددی نشان داد که کنترل کننده طراحی شده با موفقیت اهداف طراحی را دنبال کرده و در شرایط جوی متغییر تصمیم گیری مناسب جهت تضمین تغذیه بار را انجام می دهد. نهایتاً سیستم قدرت و کنترل کننده هوشمند پیشنهادی مطابق با انتظار توانستند کاهش قابل توجهی در میزان مصرف برق شبکه شهری ایجاد نماید. با ساخت چنین بستر سخت افزاری در مقیاس آزمایشگاهی، چشم انداز توسعه یک سیستم قدرت ترکیبی مسکونی مبتنی بر برق متناوب، در ابعاد واقعی و با اجزای استاندارد در پیش رو است که گامی اساسی در جهت گسترش استفاده از انرژی های تجدیدپذیر، کاهش آلاینده های زیست محیطی و دستیابی به منابع انرژی پایدار خواهد بود.

References

مراجع

- [1] Y. Li, S. Q. Mohammed, G.S. Nariman, N. Aljojo, A. Rezvani, S. Dadfar, "Energy management of microgrid considering renewable energy sources and electric vehicles using the backtracking search optimization algorithm", Journal of Energy Resources Technology, vol. 142, no. 5, Article Number: 52103, May 2020 (doi:

- 10.1115/1.4046098).
- [2] L. Xiong, P. Li, Z. Wang, J. Wang, “Multi-agent based multi objective renewable energy management for diversified community power consumers”, *Applied Energy*, vol. 259, Article Number: 114140, Feb 2020 (doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114140).
- [3] A. Hasankhani, S.M. Hakimi, “Stochastic energy management of smart microgrid with intermittent renewable energy resources in electricity market”, *Energy*, vol. 219, Article Number: 119668, Mar 2021 (doi: 10.1016/j.energy.2020.119668).
- [4] C. Mokhtara, B. Negrou, A. Bouferrouk, Y. Yao, N. Settou, M. Ramadan, “Integrated supply–demand energy management for optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems for residential electrification in arid climates”, *Energy Conversion and Management*, vol. 221, Article Number: 113192, Oct 2020 (doi: 10.1016/j.enconman.2020.113192).
- [5] S. Nojavan, M. Majidi, K. Zare, “Performance improvement of a battery/PV/fuel cell/grid hybrid energy system considering load uncertainty modeling using IGD^T”, *Energy Conversion and Management*, vol. 147, pp. 29–39, Sept. 2017 (doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.039).
- [6] M. Majidi, S. Nojavan, K. Zare, “Optimal stochastic short-term thermal and electrical operation of fuel cell/photovoltaic/battery/grid hybrid energy system in the presence of demand response program”, *Energy Conversion and Management*, vol. 144, pp. 132–142, July 2017 (doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.051).
- [7] J. Pascual, J. Barricarte, P. Sanchis, L. Marroyo, “Energy management strategy for a renewable-based residential microgrid with generation and demand forecasting”, *Applied Energy*, vol. 158, pp. 12–25, Nov. 2015 (doi: 10.1016/j.apenergy.2015.08.040).
- [8] M. Patrone, D. Feroldi, “Passivity-based control design for a grid-connected hybrid generation system integrated with the energy management strategy”, *Journal of Process Control*, vol. 74, pp. 99–109, Feb. 2019 (doi: 10.1016/j.jprocont.2017.11.012).
- [9] A. Behzadi Forough, R. Roshandel, “Multi objective receding horizon optimization for optimal scheduling of hybrid renewable energy system”, *Energy and Buildings*, vol. 150, pp. 583–597, Sept. 2017 (doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.031).
- [10] A. Chaib, D. Achour, M. Kesraoui, “Control of a solar PV/wind hybrid energy system”, *Energy Procedia*, vol. 95, pp. 89–97, Sept. 2016 (doi: 10.1016/j.egypro.2016.09.028).
- [11] F.J. Vivas, A.D. Heras, F. Segura, J.M. Andújar, “A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, no, pp. 126–155, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.rser.2017.09.014).
- [12] H. Zhang, A. Davigny, F. Colas, Y. Poste, B. Robyns, “Fuzzy logic based energy management strategy for commercial buildings integrating photovoltaic and storage systems”, *Energy and Buildings*, vol. 54, pp. 196–206, Nov. 2012 (doi: 10.1016/j.enbuild.2012.07.022).
- [13] Z. Roumila, D. Rekioua, T. Rekioua, “Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel with storage battery”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 30, pp. 19525–19535, July 2017 (doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.006).
- [14] O. Erdiñç, O. Elma, M. Uzunoglu, U.S. Selamoğullari, B. Vural, E. Ugur, A.R. Boynueğri, S. Dusmez, “Experimental performance assessment of an online energy management strategy for varying renewable power production suppression”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 6, pp. 4737–4748, April 2012 (doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.12.042).
- [15] A. Derrouazin, M. Aillerie, N. Mekakia-Maaza, J.P. Charles, “Multi input-output fuzzy logic smart controller for a residential hybrid solar-wind-storage energy system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 148, pp. 238–250, Sept. 2017 (doi: 10.1016/j.enconman.2017.05.046).
- [16] M. Tiar, A. Betka, S. Drid, S. Abdeddaim, “Optimal energy control of a PV-fuel cell hybrid system”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1456–1465, Jan. 2017 (doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.113).
- [17] C. Mokhtara, B. Negrou, A. Bouferrouk, Y. Yao, N. Settou, M. Ramadan, “Integrated supply–demand energy management for optimal design of off-grid hybrid renewable energy systems for residential electrification in arid climates”, *Energy Conversion and Management*, vol. 221, Article Number: 113192, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.enconman.2020.113192).
- [18] A. Ahmad, A. Khan, N. Javaid, H.M. Hussain, W. Abdul, A. Almogren, A. Alamri, I.A. Niaz, “An optimized home energy management system with integrated renewable energy and storage resources”, *Energies*, vol. 10, no. 4, Article Number: 549, April 2017 (doi: 10.3390/en10040549).
- [19] N.T. Mbungu, R.C. Bansal, R. Naidoo, V. Miranda, M. Bipath, “An optimal energy management system for a commercial building with renewable energy generation under real-time electricity prices”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 41, pp. 392–404, Aug. 2018 (doi: 10.1016/j.scs.2018.05.049).
- [20] A.M. Abdelshafy, J. Jurasz, H. Hassan, A.M. Mohamed, “Optimized energy management strategy for grid connected double storage (pumped storage-battery) system powered by renewable energy resources”, *Energy*,

- vol. 192, Article Number: 116615, Feb 2020 (doi: 10.1016/j.energy.2019.116615).
- [21] D. Wu, H. Zeng, C. Lu, B. Boulet, "Two-stage energy management for office buildings with workplace EV charging and renewable energy", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 225–237, Mar. 2017 (doi: 10.1109/TTE.2017.2659626).
- [22] J. Yang, J. Liu, Z. Fang, W. Liu, "Electricity scheduling strategy for home energy management system with renewable energy and battery storage: a case study", *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 6, pp. 639–648, Dec. 2018 (doi: 10.1049/iet-rpg.2017.0330).
- [23] P.H. Divshali, B.J. Choi, H. Liang, "Multi-agent transactive energy management system considering high levels of renewable energy source and electric vehicles", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 11, no. 15, pp. 3713–3721, June 2017 (doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1916).
- [24] S.M. Zahraee, M.K. Assadi, R. Saidur, "Application of artificial intelligence methods for hybrid energy system optimization", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 617–630, Dec. 2016 (doi: 10.1016/j.rser.2016.08.028).
- [25] M.J.B. Fulzele, "Simulation and optimization of hybrid PV-wind renewable energy system", *Proceeding of the IEEE/EEECOS*, pp. 159–164, Tadepalligudem, June 2016 (doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.151).
- [26] M.A. Mohamed, A.M. Eltamaly, A.I. Alolah, "Swarm intelligence-based optimization of grid-dependent hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, no. 10, pp. 515–524, April 2017 (doi: 10.1016/j.rser.2017.04.048).
- [27] Y. Sawle, S.C. Gupta, A.K. Bohre, "Socio-techno-economic design of hybrid renewable energy system using optimization techniques", *Renewable Energy*, vol. 119, pp. 459–472, April 2018 (doi: 10.1016/j.renene.2017.11.058).
- [28] S. Sanajaoba Singh, E. Fernandez, "Modeling, size optimization and sensitivity analysis of a remote hybrid renewable energy system", *Energy*, vol. 143, pp. 719–731, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.energy.2017.11.053).
- [29] O. Abdalla, H. Rezk, E.M. Ahmed, "Wind driven optimization algorithm based global MPPT for PV system under non-uniform solar irradiance", *Solar Energy*, vol. 180, pp. 429–444, Mar. 2019 (doi: 10.1016/j.solener.2019.01.056).
- [30] S. Motahhir, A. El-Hammoumi, A. El-Ghzizal, "Photovoltaic system with quantitative comparative between an improved MPPT and existing INC and P&O methods under fast varying of solar irradiation", *Energy Reports*, vol. 4, pp. 341–350, Nov. 2018 (doi: 10.1016/j.egy.2018.04.003).
- [31] K. Amara, A. Fekik, D. Hocine; M.L. Bakir, E. Bourennane, T.A. Malek, A. Malek, "Improved performance of a PV solar panel with adaptive neuro fuzzy inference system ANFIS based MPPT", *Proceeding of the IEEE/ICRERA*, pp. 1098–1101, Paris, France, Oct. 2018 (doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566818).
- [32] N. Kumar, I. Hussain, B. Singh, B.K. Panigrahi, "Normal harmonic search algorithm-based MPPT for solar PV system and integrated with grid using reduced sensor approach and PNKLMs algorithm", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 6343–6352, July 2018 (doi: 10.1109/TIA.2018.2853744).
- [33] K. Bedoud, M. Ali-rachedi, T. Bahi, R. Lakel, "Adaptive Fuzzy Gain Scheduling of PI Controller for control of the Wind Energy Conversion Systems", *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 211–225, Aug. 2015 (doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.580).
- [34] X. Yin, Y. Lin, W. Li, Y. Gu, H. Liu, P. Lei, "A novel fuzzy integral sliding mode current control strategy for maximizing wind power extraction and eliminating voltage harmonics", *Energy*, vol. 85, pp. 677–686, June 2015 (doi: 10.1016/j.energy.2015.04.005).
- [35] A. Ghani, A. Tahour, N. Essounbouli, F. Nollet, M. Abid, "A fuzzy-PI control to extract an optimal power from wind turbine", *Energy Conversion and Management*, vol. 65, pp. 688–696, Jan. 2013 (doi: 10.1016/j.enconman.2011.11.034).
- [36] X. Yin, Y. Lin, W. Li, Y. Gu, P. Lei, H. Liu, "Sliding mode voltage control strategy for capturing maximum wind energy based on fuzzy logic control", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 70, pp. 45–51, Sept. 2015 (doi: 10.1016/j.ijepes.2015.01.029).
- [37] P. Molaro, S. Monai, "Solar atlas revised", *Astronomy and Astrophysics*, vol. 544, p. A125, Agus. 2012 (doi: 10.1051/0004-6361/201118675).
- [38] J. A. Gow, C.D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies", *IEE Proceedings- Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, pp. 193–200, Mar. 2002 (doi: 10.1049/ip-epa:19990116).
- [39] "Grand View Research." <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/photovoltaic-pv-materials-market>.
- [40] Amin, R. T. Bambang, A. S. Rohman, C. J. Dronkers, R. Ortega, A. Sasongko, "Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources using model predictive control", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 1992–2002, July 2014 (doi: 10.1109/TII.2014.2333873).
- [41] O. Tremblay, L.A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications", *World Electric Vehicle Journal*, vol. 2, pp. 930–939, June 2009 (doi: 10.3390/wevj3020289).

- [42] L.H. Saw, K. Somasundaram, Y. Ye, A.A.O. Tay, "Electro-thermal analysis of lithium iron phosphate battery for electric vehicles", *Journal of Power Sources*, vol. 249, pp. 231–238, 2014 (doi: 10.1016/j.jpowsour.2013-10.052).
- [43] D. Doerffel, S.A. Sharkh, "A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries", *Journal of Power Sources*, vol. 155, no. 2, pp. 395–400, April 2006 (doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.04.030).
- [44] P. Bjoy, C. Chen, "Lithium-ion polymer rechargeable battery specification sheet", pp. 1–19, 2014, [Online]. Available: https://www.mouser.com/catalog/additional/RushUp_Battery.pdf.
- [45] M. Zangeneh, E. Aghajari, M. Forouzanfar, "A survey: fuzzify parameters and membership function in electrical applications", *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 1040–1051, April 2020 (doi: 10.1007/s40435-020-00622-1).
- [46] M. Zangeneh, E. Aghajari, M. Forouzanfar, "Fuzzy membership function selection in electrical systems: A Review", *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 8, no. 3, pp. 13–25, Dec, 2019 (in Persian).
- [47] A. Fereidouni, M.A.S. Masoum, M. Moghbel, "A new adaptive configuration of PID type fuzzy logic controller", *ISA Transaction*, vol. 56, pp. 1–19, May 2014 (doi: 10.1016/j.isatra.2014.11.010).
- [48] M. Zangeneh, E. Aghajari, S.M. Seyed-Moosavi, "A PSO-based automatic design of fuzzy inference system for speed control of DC motors", *Journal of Novel Researches on Electrical Power*, vol. 9, no. 3, pp. 9–19, Nov 2020 (in Persian).
- [49] M. Zangeneh, E. Aghajari, M. Forouzanfar, "A review on optimization of fuzzy controller parameters in robotic applications", *IETE Journal of Research*, pp. 1–10, July 2020 (doi: 10.1080/03772063.2020.1787878).
- [50] L.A. Zadeh, L. Fellow, "Fuzzy Logic= Computing with Words", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 103–111, May 1996 (doi: 10.1109/91.493904).
- [51] M.P. Hajiabbas, B. Mohammadi-Ivatloo, "Optimization of power system problems: methods, algorithms and MATLAB codes", vol. 262. Springer Nature, 2020.

زیر نویس ها

1. Linear programing
2. Passivity control
3. Particle swarm optimization (PSO)
4. Model predictive control^t
5. Pumped-storage hydropower
6. Teaching learning based optimization (TLBO)
7. Maximum power point tracking (MPPT)
8. Doubly fed induced generator (DFIG)
9. Sugeno-fuzzy inference system (IF)
10. Overcharge protection
11. Double-exponential equation
12. Polycrystalline
13. Thermal voltage
14. The elementary charge of an electron
15. Solar-induced current
16. Charge and discharge
17. Polarization
18. Online
19. Singleton
20. Sugeno