

امکان سنجی فنی و اقتصادی تجهیز سیستم‌های فتوولتاییک مشترکین خانگی به ذخیره‌ساز باتری

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۸

کد مقاله: ۶۰۴۸۳

مستانه کرامتی^۱، علی دانشی^۲

چکیده

امروزه، تجمیع شبکه‌های توزیع با سیستم‌های فتوولتاییک مشترکین خانگی کوچک مقیاس در دنیا به سرعت در حال افزایش است. یکی از موانع اصلی نفوذ بیشتر این منابع تجدیدپذیر، عدم دسترسی به تولید آنها در ساعات پیک تقاضای عصر می‌باشد. برای غلبه بر این مشکل، در این مقاله یک مدل‌سازی جدید برای امکان‌سنجی اقتصادی تجهیز سیستم‌های فتوولتاییک مشترکین خانگی به سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی ارائه می‌شود. در واقع، هدف تعیین ظرفیت نصب بهینه سیستم فتوولتاییک به طور مجتمع با ذخیره‌ساز انرژی باتری برای بیشینه‌سازی راندمان بهره‌برداری و سود سرمایه‌گذاری با توجه به هزینه خرید و نصب این تجهیزات و قیمت انرژی در شبکه سراسری می‌باشد. در اینجا، الگوریتم اجتماع گروه ذرات برای حل مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود. بمنظور تایید کارایی و اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی شبکه توزیع یک منطقه مسکونی با ۳۰۰۰ خانوار که امکان نصب سیستم فتوولتاییک را دارند، انجام می‌شود. در نهایت، نتایج مفهومی حاصل از شبیه‌سازی بحث می‌گردد.

واژگان کلیدی: سیستم‌های فتوولتاییک، شبکه توزیع برق، امکان‌سنجی

۱- شرکت آماد تجهیز واپایش (نویسنده مسئول) ma.keramati86@gmail.com

۲- شرکت مهندسی مشاور ناموران

امروزه، نیاز به انرژی پاک به دلیل گرمایش کره زمین در اثر افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی توسط بخش‌های نیروگاهی بیش از گذشته حس می‌شود. علاوه، پیشرفت مداوم در فناوری‌های سلول‌های خورشیدی و واسط‌های الکترونیک قدرت، انرژی خورشیدی را به گزینه جایگزین مناسب برای انرژی حاصل از مصرف سوخت‌های فسیلی تبدیل کرده است. در نتیجه یک انقلاب عظیم در سطح نفوذ سیستم‌های فتوولتائیک در شبکه‌های قدرت، از نیروگاه‌های بزرگ گرفته تا سیستم‌های پشت بامی کوچک مقیاس ایجاد شده است. با توجه به ماهیت ساختاری این منابع تولید پراکنده، شرایط آب و هوایی نظیر شدت تابش، ابرها، مه، باران، طوفان‌های گرد و غبار و غیره بر میزان تولید این منابع به شدت تاثیرگذار بوده و عملاً در طول شب نیز تولید انرژی ندارند. از آنجایی که توان تولیدی سیستم‌های فتوولتائیک دقیقاً قابل پیش‌بینی نیست یا بعبارت دیگر غیرقطعی است بنابراین، امکان تنظیم خروجی توان این منابع برای تامین بخش معینی از تقاضای بار فراهم نمی‌شود. علاوه بر این، هزینه بالای خرید و نصب سیستم‌های فتوولتائیک، اعمال سیاست‌های حمایتی برای خرید تضمینی برق تولیدی سبب شده تا سرمایه‌گذاران خصوصی در مقیاس کوچک برای بخش‌های خانگی و کشاورزی و در مقیاس بزرگ نیروگاهی با ظرفیت چند صد کیلوواتی برای بخش صنعتی اقدام به نصب این منابع کنند. همواره، تقاضای بیشینه مصرف انرژی الکتریکی در بخش مسکونی زمانی است که سیستم‌های فتوولتائیک بواسطه عدم تابش امکان تولید انرژی ندارد. یکی از راهکارهای ساده برای غلبه بر مشکل عدم همزمانی تولید و مصرف، یکپارچه‌سازی سیستم‌های فتوولتائیک با ذخیره‌ساز انرژی نظیر باتری می‌باشد که امکان سنجی اقتصادی آن تمرکز اصلی کار در این مقاله می‌باشد. ذخیره‌ساز انرژی باتری طی ساعات کم باری و بار متوسط که قیمت انرژی در شبکه سراسری پایین است، انرژی تولیدی سیستم فتوولتائیک مازاد به نیاز مشترکین خانگی را جمع‌آوری و ذخیره نماید تا در ساعات پیک بار که قیمت انرژی بالا است به شبکه تزریق کند. بدین ترتیب حداکثر سود سرمایه‌گذاری از نصب و بهره‌برداری از این منابع تضمین می‌گردد. تا کنون مطالعات زیادی در زمینه برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌ساز انرژی انجام شده است برای نمونه، مرجع [۱] نشان می‌دهد که باتری‌های لیتیومی پیش‌تاز عرصه ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی به دلیل هزینه پایین، عمر مفید بالا، راندمان بالا، شرایط شارژ و دشارژ مناسب و همچنین حفظ انرژی ذخیره با اتلاف پایین هستند. در مرجع [۲]، تمایل مشترکین مسکونی تایلند برای استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک-باتری با کاهش قیمت باتری ارزیابی می‌شود، نتایج نشان می‌دهد که کاهش قیمت باتری در مقایسه با خرید تضمینی برق تاثیر بیشتری بر ظرفیت نصب باتری دارد. در مرجع [۳]، یک رهیافت جدید برای تعیین ظرفیت نصب بهینه ذخیره‌ساز انرژی باتری بر اساس تکنولوژی ساخت ذخیره‌ساز شامل نرخ شارژ و دشارژ، راندمان، هزینه سرمایه‌گذاری و نرخ بازگشت سرمایه پیشنهاد شد. مرجع [۴] تجمیع سیستم فتوولتائیک با باتری را با توجه به مسائل فنی در ژنو سوئیس مطالعه کرده است. در مرجع [۵]، یک مدل اقتصادی برای تخمین سودآوری باتری با توجه به عمر مفید، استهلاک، قیمت انرژی در شبکه و همچنین هزینه سرمایه‌گذاری ارائه شد. در مرجع [۶]، ظرفیت بهینه سیستم خورشیدی-باتری برای خانه‌های مسکونی متصل به شبکه با هدف کمینه‌سازی هزینه فعلی خالص بر اساس اطلاعات واقعی تابش، دمای داخلی منبع، میزان مصرف تعیین می‌گردد. در مرجع [۷]، مطالعه‌ای مشابه با توجه به نرخ شارژ و دشارژ باتری انجام شده است. در مرجع [۸]، یک مدل بهینه‌سازی جامع برای تعیین ظرفیت نصب بهینه سیستم فتوولتائیک-باتری در ریزشبکه با توجه به اهدافی همچون استقلال انرژی و توان، حداقل سازی هزینه سرمایه‌گذاری بر روی تجهیزات و دوره بازگشت سرمایه ارائه گردید. در مرجع [۹]، مدلی برای ارزیابی عمر مفید عملکردی و اقتصادی سیستم فتوولتائیک به همراه باتری لیتیومی در پنجاه ایالت آمریکا بکار گرفته شد و نتایج نشان داد اگر ظرفیت نصب سیستم فتوولتائیک و باتری لیتوم به درستی انتخاب گردد به لحاظ اقتصادی عملکردی مقرون به صرفه‌تری در مقایسه با سیستم فتوولتائیک تنها حاصل خواهد شد. در مرجع [۱۰]، مسئله تعیین ظرفیت بهینه باتری برای سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه مطالعه شد و از قیمت‌گذاری زمان استفاده انرژی برای تعیین زمان و مقدار خرید انرژی، ذخیره یا فروش انرژی مازاد سیستم فتوولتائیک گردید. در مرجع [۱۱]، سودآوری تجمیع باتری با سیستم فتوولتائیک خانگی پشت بامی مطالعه شد و نتایج نشان داد که اگر قابلیت کنترل منابع باتری بعنوان ذخیره چرخان سمت تقاضا توسط بهره‌بردار شبکه ممکن باشد آنگاه سودآوری سیستم فتوولتائیک-باتری به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. در مرجع [۱۲]، یک الگوریتم مدیریت انرژی باتری برای کنترل و هموارسازی نوسانات توان تولیدی بادی و فتوولتائیک ارائه شده است. در مرجع [۱۳]، اندازه بهینه سیستم فتوولتائیک و باتری را برای خانه‌های هوشمند با توجه به مکانیزم قیمت‌گذاری مختلف انرژی تعیین می‌شود. در مرجع [۱۴]، یک رهیافت مدیریت سمت تقاضا برای تعیین اندازه بهینه سیستم‌های منابع تجدیدپذیر و باتری ایزوله از شبکه سراسری پیشنهاد می‌گردد. جمع‌بندی مطالعات اخیر نشان می‌دهد، در مطالعات انجام شده طی بازه زمانی برنامه‌ریزی بمنظور تجمیع سیستم فتوولتائیک و باتری تا کنون عملکرد کنترلر ردیاب توان ماکزیمم سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته نشده است که تمرکز اصلی کار در این پژوهش می‌باشد. بنابراین، سازماندهی مابقی مقاله بترتیب ذیل است. در بخش دوم، مدل‌سازی الکتریکی سیستم فتوولتائیک و ذخیره‌ساز انرژی باتری انجام می‌شود. در بخش سوم، مدل‌سازی ریاضیاتی پیشنهادی برای مسئله امکان‌سنجی اقتصادی تجهیز سیستم‌های فتوولتائیک مشترکین خانگی به سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی باتری ارائه می‌شود. در بخش چهارم، کدسازی و حل مسئله مذکور با بکارگیری الگوریتم اجتماع گروه ذرات تشریح می‌گردد. در بخش پنجم، بمنظور تایید کارایی و

اعتبارسنجی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک منطقه مسکونی با ۳۰۰۰ خانوار انجام می‌شود و در بخش ششم، نتایج مفهومی حاصل از شبیه‌سازی بحث می‌گردد.

۲- مدل‌سازی الکتریکی سیستم‌های فتوولتائیک و ذخیره‌ساز باتری

در این بخش، مدل‌سازی الکتریکی سیستم فتوولتائیک مشترکین خانگی و ذخیره‌ساز انرژی باتری ارائه می‌شود.

۱-۲- سیستم فتوولتائیک

کار مدل‌سازی از سیستم فتوولتایی از کوچکترین المان سازنده آن یعنی سلول خورشیدی آغاز می‌شود. یک سلول خورشیدی از پیوند نیمه‌هادی نوع n و نوع p تشکیل می‌شود و مدار معادل آن را در حالت ایده‌آل می‌توان با یک منبع جریان و یک دیود موازی مدل‌سازی کرد. در حالت غیر ایده‌آل، مطابق شکل (۱) دو مقاومت به صورت سری و موازی به مدار معادل آن اضافه می‌گردد. با توجه به مدار معادل شکل (۱) می‌توان جریان خروجی سلول خورشیدی I_{pv} و جریان نوری ایجاد شده بواسطه دریافت انرژی تابشی خورشید I_{ph} را بترتیب طبق روابط (۱) و (۲) محاسبه کرد.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_r \quad (1)$$

$$I_{ph} = I_{sc0} \times \frac{S}{S_0} + C_t (T - T_{ref}) \quad (2)$$

در روابط فوق، جریان عبوری از مقاومت سری I_r ، جریان عبوری از دیود I_d ، جریان اتصال کوتاه در شرایط نامی I_{sc0} ، شدت تابش نامی S_0 (اغلب برای ۱۰۰۰ وات بر مترمربع) و شدت تابش S ، ضریب دمایی C_t و دمای مرجع T_{ref} (معمولاً برای ۲۵ درجه سلسیوس) تعریف می‌شوند. برای جریان عبوری از دیود و مقاومت موازی R_{sh} در مدل مدار معادل سلول خورشیدی مطابق روابط (۳) تا (۴) خواهیم داشت. جریان اشباع معکوس دیود I_0 و ولتاژ دو سر آن V_D مطابق روابط (۴) و (۵) مدل‌سازی می‌شوند.

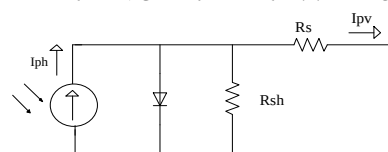
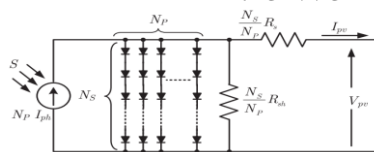
$$I_d = I_0 (e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1) \quad (3)$$

$$I_r = \frac{V_o}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_0 = I_{sc0} \times \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \times e^{\frac{qE_g}{AK}} \quad (5)$$

$$V_D = V_o + I_{pv} \times R_s \quad (6)$$

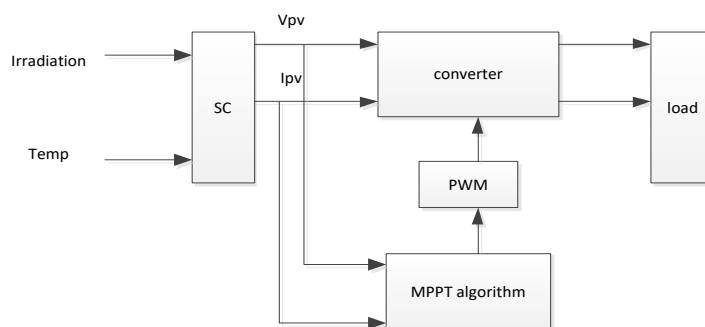
در روابط فوق، دمای سلول خورشیدی T ، بار الکترون q (برای حالت نرمال 1.6×10^{-19} کولمب)، ضریب انتشار A ، ثابت بولتزمن K (1.38×10^{-23})، مقاومت سری R_s ، باند انرژی بر حسب الکترون ولت E_g ، ولتاژ خروجی V_o تعریف می‌شوند. اگر تعدادی سلول خورشیدی به صورت موازی و سری به یکدیگر متصل شوند آنگاه پنل خورشیدی ایجاد می‌شود که مدار معادل آن مطابق شکل (۲) خواهد شد و جریان پنل خورشیدی به صورت معادله غیرخطی (۷) می‌شود.



$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{rs} \left(e^{\frac{q(V_{pv} + I_{pv} R_s)}{K T}} - 1 \right) - \frac{N_p V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

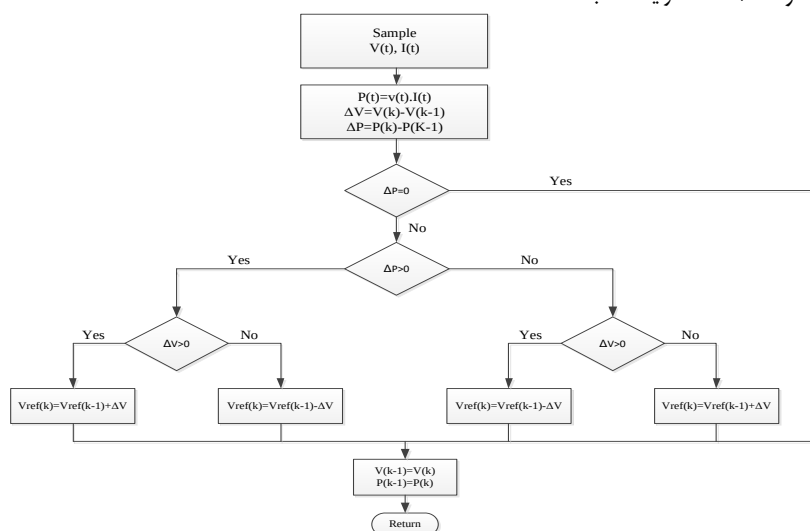
در رابطه فوق، تعداد سلول موازی N_p و تعداد سلول سری N_s برای تشکیل پنل هستند. دو نقطه مهم در نمودار ولتاژ-جریان یک پنل خورشیدی ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه آن است که مقدار توان خروجی پنل معادل صفر می‌باشد. با توجه به روابط فوق الذکر، هر چه شدت تابش افزایش یابد توان خروجی پنل خورشیدی افزایش می‌یابد و هر چه دما افزایش یابد ولتاژ مدار باز پنل خورشیدی کاهش و در نهایت توان خروجی کاهش می‌یابد. اغلب پنل‌های خورشیدی راندمانی در حدود ۹ الی ۱۷ درصد دارند که نظافت و شستشو و تعمیرات نگهداری درست این عدد به ۲۲ درصد می‌رسد. از سری و موازی شدن پنل‌ها آرایه و سیستم فتوولتائیک شکل می‌گیرد. مطابق انتظار تغییر دما و تابش و همچنین تقاضای بار در طول ساعات مختلف یک روز باعث تغییر در

حداکثر توان مستخرج از سیستم فتوولتاییک می‌شود که اگر نقطه کار پنل در نقطه ماکزیمم توان تنظیم نباشد آنگاه توان زیادی به هدر خواهد رفت. بنابراین، تحت شرایط مختلف تابش، دما و تقاضای بار ضروری است نقطه کاری که به ازای آن توان بیشینه از سیستم فتوولتاییک بعنوان یک منبع غیرخطی قابل استخراج است، تعقیب گردد. این وظیفه به عهده سیستم کنترلی ردیابی توان ماکزیمم^۱ مطابق شکل (۳) است [۱۵].



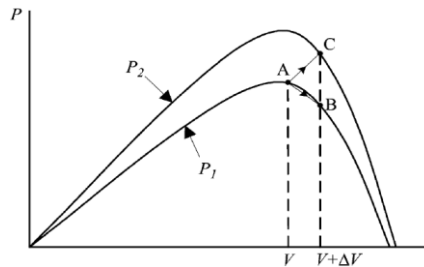
شکل (۳): بلوک دیاگرام سیستم فتوولتاییک و بار به همراه کنترلر ردیاب توان ماکزیمم [۱۵]

مطابق شکل (۳)، فرآیند ردیابی ولتاژ و جریان متناظر با نقطه توان حداکثر سیستم فتوولتاییک تحت شرایط مختلف دما، تابش و تقاضای بار از طریق سوئیچینگ کانورتر واسط بین منبع و بار فرآهم می‌شود. برای ردیابی اغلب از روش‌های اختلال و مشاهده^۲، هدایت افزایشی^۳، ولتاژ ثابت^۴، کسری از جریان اتصال کوتاه^۵، کسری از ولتاژمدار باز^۶ و منطق فازی^۷... استفاده می‌شود که در این مقاله روش اختلال و مشاهده مطابق شکل (۴) بکار شده است. البته باید متذکر شد مطابق شکل (۵) در صورتی که وضعیت جوی سریعاً تغییر کند، روش اختلال و مشاهده روش مناسبی نخواهد بود. در صورت ثابت ماندن وضعیت جوی با ایجاد اختلال ΔV به نقطه b می‌رویم و جهت اختلال بر عکس می‌شود اما اگر نمودار توان با افزایش تابش نور افزایش یابد به نقطه c می‌رویم و جهت برعکس نمی‌شود که می‌توان با افزایش سرعت نمونه‌گیری از این مشکل جلوگیری کرد. به تعداد دفعاتی در یک ثانیه که اختلال ایجاد می‌شود فرکانس اختلال یا فرکانس ردیابی می‌گویند. بر اساس پارامتر اختلال روش به سه دسته اختلال در ولتاژ، اختلال در جریان و اختلال در نسبت تبدیل کانورتر تقسیم می‌شود. سیستمی که با تغییر ولتاژ عمل می‌کند سیستمی سریع با بازدهی ۹۷ و ۹۷٫۲٪ به ترتیب برای تغییرات سریع و کند شدت تابش می‌باشد درحالی‌که سیستمی که با تغییر نسبت تبدیل کانورتر کار می‌کند دارای راندمان ۹۷٫۹ و ۹۹٪ تحت شرایط مشابه است.



شکل (۴): فلوجارت روش اختلال و مشاهده برای ردیابی توان ماکزیمم سیستم فتوولتاییک [۱۵]

- 1 Maximum power point tracker (MPPT)
- 2 Perturb and Observe algorithm (P&O)
- 3 Incremental Conductance (IC)
- 4 Constant Voltage (CV)
- 5 Fractional Short Circuit Current
- 6 Fractional Open Circuit Voltage
- 7 Fuzzy Logic



شکل (۵): اشکال در عملکرد روش کنترلی اختلال و مشاهده تحت شرایط تغییر سریع آب و هوایی [15]

۲-۲- ذخیره‌ساز باتری

اغلب، ویژگی‌های اساسی هر نوع باتری بر اساس حداکثر میزان شارژ و دشارژ، ظرفیت انرژی، حداکثر عمق دشارژ، فاکتور ظرفیت و راندمان شارژ / تخلیه تعیین می‌شود. انواع مختلفی از فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی به شکل باتری‌های سرب-اسید، نیکل-کادمیوم، لیتیوم-آنیون و وانادیوم در دسترس هستند قدرت همه انواع باتری‌ها مطابق رابطه (۸) مدل‌سازی می‌شود. در رابطه فوق η_{batt} راندمان و $P_{Batt}^s(t)$ قدرت و SOC سطح شارژ باتری است. به منظور اجتناب از شارژ بیش از حد طبق رابطه (۹) خواهیم داشت.

$$P_{Batt}^s(t) = \eta_{batt} \times (SOC^s(t) - SOC^s(t-1)) \quad (8)$$

$$SOC_{Min} \leq SOC \leq SOC_{Max} \quad (9)$$

که اندیس‌های SOC_{min} و SOC_{max} بترتیب سطح شارژ حداقل و حداکثر هستند.

۳- مدل‌سازی مسئله

مدل‌سازی مسئله در دو بخش فنی و اقتصادی انجام می‌شود. در بخش مدل‌سازی فنی، آنالیز ترمودینامیکی عملکرد سیستم فتوولتائیک با استفاده از مفهوم انرژی انجام می‌شود.

۳-۱- فنی

با بکارگیری قانون اول ترمودینامیک راندمان یک سیستم فتوولتائیک با تعریف انرژی خروجی سیستم به ورودی آن طبق رابطه (۱۰) تعریف می‌شود. در رابطه فوق، توان تابشی جذب شده از طریق سطح تمامی پنل‌های سیستم فتوولتائیک منصوب در سقف مشترکین خانگی طی یک دوره زمانی معین بهره‌برداری طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$\eta_{Energy, pv} = \frac{Energy_{output, pv}}{Energy_{input, pv}} = \frac{P_{output, pv}}{P_{input, pv}} \quad (10)$$

$$P_{input, pv} = RP_{sun} \times (N_{pv, Array} \times A_{Array}) \times C_{absorb} \quad (11)$$

با توجه به اینکه امواج تابشی (فوتون) با طول موج‌ها و سطح انرژی متفاوت به سطح زمین می‌رسند، بنابراین برخی از سلول خورشیدی عبور کرده و جذب نمی‌شوند. در رابطه فوق، ضریب جذب توان تابشی خورشید با توجه به نوع ماده بکار رفته نظیر سیلیکون بین مقادیر ۵۰٪ تا ۷۸٪ می‌باشد و RP_{sun} نیز توان تابشی را مدل‌سازی می‌کند. توان نامی سیستم فتوولتائیک از تعداد معینی پنل فتوولتائیک $N_{pv, Array}$ با اتصال موازی به مساحت $N_{pv, Array} \times A_{Array}$ ایجاد می‌شود. توان خروجی سیستم فتوولتائیک طی هر دوره زمانی معین با $P_{out, pv}$ نمایش داده شده است از مجموع توان مستخرج پنل‌ها توسط کنترلر ردیاب توان ماکزیمم طبق رابطه (۱۲) مدل‌سازی می‌شود.

$$P_{output, pv} = N_{pv, Array} \times (V_{mp, Array} \times I_{mp, Array}) \quad (12)$$

در روابط فوق، اندیس‌های $V_{mp, Array}$ و $I_{mp, Array}$ بترتیب جریان و ولتاژ ترمینال متناظر با توان ماکزیمم مستخرج از پنل‌های فتوولتائیک منصوب در سقف خانه‌های مشترکین مسکونی هستند.

۳-۲- اقتصادی

مدلسازی اقتصادی سیستم فتوولتاییک مجهز به سامانه ذخیره‌ساز باتری با توجه به هزینه سیکل عمر سیستم شامل مجموع هزینه سرمایه‌گذاری اولیه (IC)، هزینه تعویض و جایگزینی (RC) و هزینه تعمیرات و بهره‌برداری (OMC) طبق رابطه (۱۳) مدلسازی می‌شود [۱۷].

$$LCC = IC_{PV-BESS} + RC_{PV-BESS} + OMC_{PV-BESS} \quad (13)$$

که در رابطه فوق، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه $IC_{PV-BESS}$ ، هزینه تعویض و جایگزینی واحد $RC_{PV-BESS}$ و هزینه تعمیرات و بهره‌برداری $OMC_{PV-BESS}$ برای سیستم فتوولتاییک مجهز به باتری تعریف می‌گردد. هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، پول صرف شده برای خرید کلیه تجهیزات ذخیره‌ساز باتری و آرایه‌های فتوولتاییک، نصب و اتصالات، ساختمان تجهیزات می‌باشد. اگر این هزینه برای هر واحد فتوولتاییک با ظرفیت نامی $C_{nom,PV}$ معادل $C_{unit,PV}$ و هر باتری با ظرفیت نامی $C_{nom,BESS}$ - معادل $C_{unit,BESS}$ بر حسب دلار بر کیلووات باشد آنگاه کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه با تعداد N_{PV} آرایه‌های فتوولتاییک و تعداد N_{BESS} باتری طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود [۱۸]. اگر عمر مفید تجهیزات سیستم فتوولتاییک و باتری کمتر از زمان برنامه‌ریزی پروژه n باشد آنگاه هزینه جایگزینی به سیستم تحمیل می‌گردد. این هزینه در پایان عمر هر یک از تجهیزات مطابق رابطه (۱۵) بر اساس تعداد رخداد آن N_{rep} ، نرخ تورم برای خرید و جایگزینی تجهیزات مستهلک شده f_0 و همچنین نرخ مطلوب واقعی تورم k_d و همچنین نرخ تورم بهره‌برداری f_1 محاسبه می‌شود. از آنجایی که محرک اولیه سیستم فتوولتاییک و باتری تابش خورشید است که برای تولید برق کاملاً رایگان است در نتیجه، طبق رابطه (۱۶) هزینه بهره‌برداری از این سیستم بسیار پایین است مشروط به اینکه تمیزکاری و سرویس دوره‌ای پنل‌های فتوولتاییک و باتری طی عمر مفید پروژه انجام شود. هزینه تعمیرات و نگهداری سیستم در سال اول برنامه‌ریزی $C_{(O\&M)0}$ کسری از هزینه نصب تجهیزات است که طبق رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$IC_{PV-BESS} = \sum_{k \in \{PV, BESS\}} N_k \times C_{unit,k} C_{nom,k} \quad (14)$$

$$RC_{PV-WT} = \sum_{k \in \{PV, WT, \dots\}} (N_k \times C_{unit,k} C_{nom,k} \sum_{i=1}^{N_{rep,PV}} \left[\frac{1+f_0}{1+k_d} \right]^{(Ni/N_{rep,PV}+1)}) \quad (15)$$

$$OMC = \begin{cases} C_{(O\&M)0} \left(\frac{1+f_1}{k_d - f_1} \right) \left[1 - \left(\frac{1+f_1}{1+k_d} \right)^n \right] \xrightarrow{for} k_d \neq f_1 \\ C_{(O\&M)0} \times n, \xrightarrow{for} k_d \equiv f_1 \end{cases} \quad (16)$$

$$C_{(O\&M)0} = K \times IC \quad (17)$$

۴- کدسازی و حل مسئله توسط الگوریتم اجتماع گروه ذرات

در این بخش، روند کدسازی و حل مسئله امکان‌سنجی اقتصادی تجهیز سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی به سامانه ذخیره‌ساز باتری در الگوریتم اجتماع گروه ذرات تشریح می‌گردد. در اینجا فرض بر این است که آنالیز فنی و اقتصادی بر اساس پیش‌بینی‌های دمای محیط، دمای پنل‌ها، و شدت تابش خورشید بر اساس مقدار میانگین طی فصول سال انجام می‌شود. بعلاوه، سیستم فتوولتاییک و باتری هر مشترک خانگی امکان تبادلات انرژی با شبکه توزیع بالادست برای خرید و فروش انرژی الکتریکی برتریب در زمان کمبود و یا بیشبود تولید انرژی الکتریکی را طبق تعرفه دارد. هدف اصلی در واقع تعیین تعداد و ظرفیت بهینه نصب آرایه‌های فتوولتاییک و باتری به نحوی است که هزینه سیکل عمر سیستم کمینه و راندمان عملکردی آن به طور همزمان بیشینه گردد. بنابراین، برای تعریف متغیرهای مستقل مسئله یا به عبارت دیگر موقعیت هر ذره در فضای جستجوی حل مسئله توسط الگوریتم اجتماع گروه ذرات مطابق ذیل اقدام می‌شود. برای بخش سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی با فرض ثابت بودن تعداد ماژول‌های سری هر آرایه بمنظور دسترسی به ولتاژ مطلوب باید تعداد ماژول‌های موازی و تعداد کل آرایه‌های مورد نیاز با توجه شرایط دما پنل و محیط، شدت تابشی خورشید و توان ماکزیمم مستخرج از سیستم توسط کنترلر ردیاب توان ماکزیمم بعنوان متغیرهای مستقل طراحی در نظر گرفته شود. برای بخش ذخیره‌ساز انرژی آنها نیز تعداد و میزان شارژ/دشارژ بهینه باتری طی دوره‌های زمانی مورد مطالعه بعنوان متغیرهای مستقل مسئله در نظر گرفته می‌شود. میزان خرید و فروش توان از/به شبکه

سراسری را در هر دوره زمانی مورد مطالعه از عمر پروژه برای نمونه ۲۰ الی ۲۵ سال بعنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته می‌شود. موقعیت یک ذره برای الگوریتم اجتماع گروه ذرات به عنوان یک جواب مسئله مذکور طبق جدول (۱) تعریف می‌گردد.

جدول (۱): موقعیت یک ذره در الگوریتم اجتماع گروه ذرات به عنوان یک جواب مسئله

Npv	$N_{Pmodule}$	$Psale(1,2,..LL \times R)$	N_{BESS}	$Pcharge/discharge(1,2,..LL \times R)$
-----	---------------	----------------------------	------------	--

در جدول فوق، تعداد کل آرایه فتوولتاییک برای تشکیل سیستم فتوولتاییک مشترک خانگی با Npv و تعداد ماژول‌های موازی هر آرایه فتوولتاییک با $N_{Pmodule}$ محاسبه می‌شوند زیرا برای دستیابی به سطح ولتاژ مطلوب تعداد ماژول‌های سری $Array_{module}$ در تعداد از پیش تعیین شده ثابت فرض شده است. میزان خرید و یا فروش انرژی بترتیب از و یا به شبکه سراسری معادل با $Psale(1,2,..LL \times R)$ طی دوره‌های زمانی مورد مطالعه تعریف می‌گردد. در جدول فوق، تعداد کل باتری‌ها N_{BESS} و میزان شارژ/دشارژ آنها معادل $Pcharge/discharge(1,2,..LL \times R)$ به ازای ظرفیت از پیش تعیین شده برای مشترکین خانگی تعریف می‌شود. در واقع کلیه این متغیرهای مستقل سیستم معادل با ابعاد یک ذره در فضای جستجوی جواب مسئله مذکور توسط الگوریتم اجتماع گروه ذرات هستند که قبل از ورود به تکرارهای الگوریتم به تعداد معین از پیش تعیین شده برای مثال ۱۰۰۰ عدد به طور تصادفی تولید و مقداردهی اولیه می‌شوند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت، تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل‌سازی می‌شوند. این ذرات، به‌صورت تکرار شونده‌ای در فضای n بعدی مسئله با سرعت‌های مختلف حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار فیتنس طبق رابطه (۱۸) به عنوان یک ملاک سنجش برازندگی جواب، جواب‌های بهینه احتمالی جدید را جستجو کنند.

$$F = Min\left(\frac{LCC}{1 + \sum_{i=1}^n \eta_{PV_ESS}}\right) \quad (18)$$

یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش‌آمده کنونی در میان همه ذرات، تخصیص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه بهینه سراسری پیدا شود. در شروع حل مسئله برنامه-ریزی سیستم فتوولتاییک و باتری مشترکین خانگی به تمامی ذرات تولید شده تصادفی یک سرعت اولیه معادل صفر تخصیص می‌یابد. برای اجرای الگوریتم در تکرار بعد، ابتدا سرعت هر ذره طبق رابطه (۱۹) برحسب بهترین جواب‌های گلوبال و محلی به روزرسانی می‌شود.

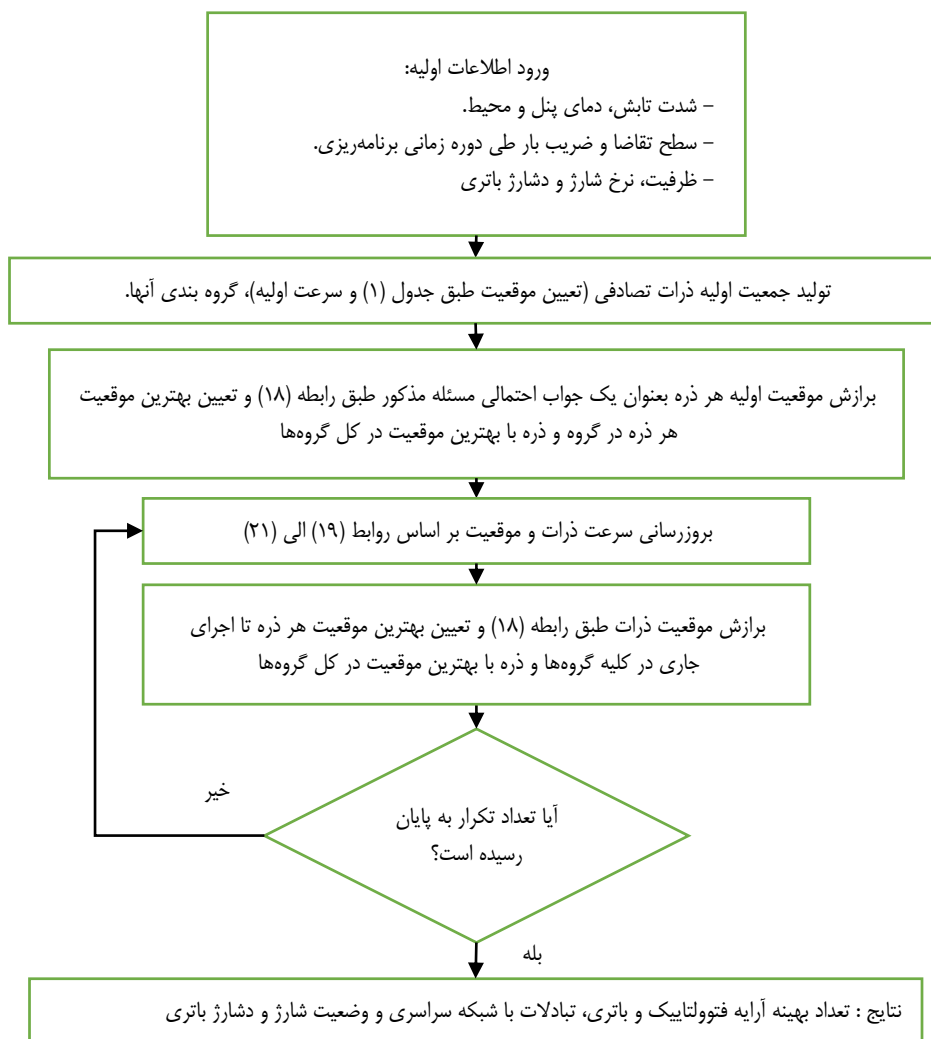
$$v_i^{k+1} = w.v_i^k + c_1 r_1 (P_{LB,i}^k - P_i^k) + c_2 r_2 (P_{GB,i}^k - P_i^k) \quad (19)$$

در رابطه فوق، سرعت ذره i ام برای تکرار شماره k با v_i^k ، پارامتر اینرسی خودی با w، پارامتر ادراکی و اجتماعی بترتیب C_1 و C_2 ، اعداد تصادفی مستقل بین ۰ و ۱ توزیع یکنواخت با C_1 و C_2 ، بهترین موقعیت تجربه‌شده برای ذره i ام تا تکرار k ام با $P_{LB,i}^k$ ، موقعیت تجربه شده در بین تمامی ذرات تا تکرار k ام با $P_{GB,i}^k$ تعریف می‌شوند. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد سرعت یک ذره حین حرکت از یک مکان به مکان دیگر (واگرا شدن بردار سرعت)، تغییرات سرعت طبق رابطه (۲۰) محدود می‌شود و در ادامه موقعیت هر ذره با استفاده از سرعت به‌روز شده و مکان قبلی آن، مطابق رابطه (۲۱) به‌روزرسانی می‌گردد.

$$v_{Min} \leq v_i^{k+1} \leq v_{max} \quad (20)$$

$$P_i^{k+1} = v_i^{k+1} + P_i^k \quad (21)$$

به‌روزرسانی سرعت هر ذره، تحت تأثیر بهترین جواب محلی و گلوبال قرار می‌گیرد، زیرا، این دو جواب بهترین جواب‌هایی هستند که تا لحظه‌ی جاری اجرای الگوریتم، به ترتیب توسط یک ذره و در کل جمعیت به‌دست آمده‌اند. بعد رسیدن به همگرایی با معیار تعداد تکرار، بعد اول ذره با بهترین موقعیت در کل گروه‌ها بعنوان تعداد بهینه آرایه سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی، بعد دوم آن ذره بعنوان تعداد بهینه ماژول‌های موازی در آرایه‌ها، بعد ۳ الی ۲ (LL×R) آن ذره بعنوان میزان بهینه تبادلات بهینه توان با شبکه بالادست مشترکین خانگی، بعد ۳ (LL×R) آن ذره بعنوان تعداد بهینه باتری، و بعد ۴ (LL×R) الی ۳ (LL×R)×۲ آن ذره بعنوان وضعیت بهینه شارژ و دشارژ باتری معرفی می‌گردد. شکل (۶) فلوچارت حل مسئله بهینه-سازی امکان‌سنجی اقتصادی تجهیز سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی را به سامانه ذخیره‌ساز باتری را توسط الگوریتم اجتماع گروه ذرات نشان می‌دهد.



شکل (۵): فلوچارت حل مسئله بهینه‌سازی امکان‌سنجی اقتصادی تجهیز سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی به سامانه ذخیره‌ساز باتری توسط الگوریتم اجتماع گروه ذرات

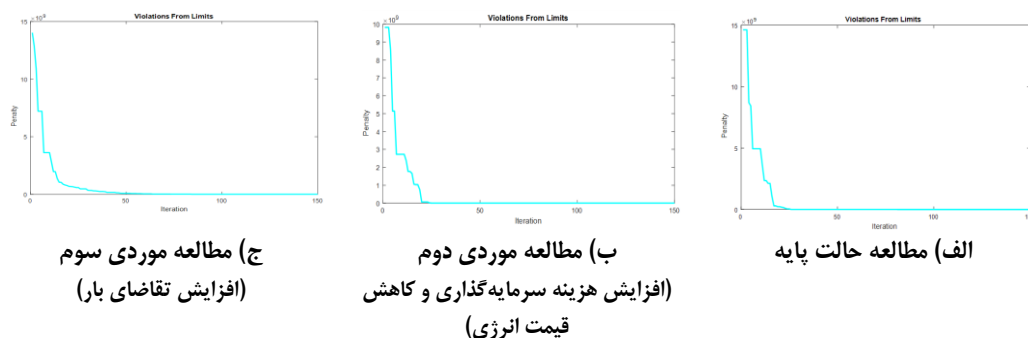
۵- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی

بمنظور تایید کارایی مدل پیشنهادی، مطالعات عددی برای تحلیل بهینگی برنامه‌ریزی نصب و بهره‌برداری از سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی به طور یکپارچه با ذخیره‌ساز انرژی باتری با توجه به اطلاعات میانگین تابش و تقاضای بار طی فصول سال به مدت ۲۰ سال انجام می‌شود. در اینجا محدوده جغرافیایی شبکه توزیع تحت مطالعه شامل ۳۰۰۰ خانه مسکونی فرض شده است که پیک تقاضای بار آنها در سال پایه برای مطالعات برنامه‌ریزی معادل ۱۰٫۲ مگاوات می‌باشد. ضریب بار طی سال فصول بترتیب برای بهار ۰٫۷، تابستان ۰٫۹۲، پاییز ۰٫۷۵ و برای زمستان ۰٫۸۵ مفروض است. قیمت انرژی در شبکه طی ساعات کم باری معادل ۵ دلار (کمتر از ۱۲ مگاوات)، برای بار متوسط ۱۰ دلار و برای بار پیک ۲۵ دلار (بیشتر از ۱۵ مگاوات) می‌باشد. سیستم فتوولتاییک هر خانه مسکونی شامل ۶ ماژول سری ثابت و حداکثر ۱۰ ماژول موازی است. ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه هر ماژول بترتیب معادل ۳۶٫۳ ولت و ۷٫۸۴ آمپر است. توان نامی هر ماژول ۲۱۳٫۱۵ وات است که از اتصال سری ۶۰ سلول خورشیدی حاصل می‌گردد. طول و عرض هر سلول خورشیدی برابر و معادل ۱۵۶٫۷۵ میلی‌متر می‌باشد، در مدار معادل هر سلول خورشیدی مقاومت سری و موازی بترتیب ۰٫۳۳۷۵ اهم و ۵۰ اهم است. ضریب ایده‌آلیتی دیود در مدار معادل سلول خورشیدی ۱٫۳ لحاظ شده است و ضرایب حساسیت ولتاژ و جریان نسبت به دما بترتیب معادل ۰٫۰۰۰۵۳ و ۰٫۰۰۳۶ (%/d.s) می‌باشد. فاکتور جذب نور توسط سلول خورشیدی تحت مطالعه ۹۹٫۸٪ می‌باشد. دمای طراحی سیستم فتوولتاییک حین عملکرد نرمال ۴۵ درجه سانتیگراد است، دمای متوسط روزانه محیط ۲۵ درجه سانتیگراد و شدت تابش متوسط ۱۰۰۰ وات بر مترمربع است. ظرفیت باتری برای تجمیع با سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی ۲٫۵ کیلووات است. راندمان باتری برای شارژ/دشارژ معادل ۸۰٪ است، شارژ اولیه ۵۰٪ در نظر گرفته شده است. در این مطالعات، نرخ بازگشت سرمایه ۰٫۰۸ لحاظ گردیده است و دو نرخ تورم

f0 و f1 مربوط به تغییر افزایشی قیمت خرید تجهیزات و گرفتن سرویس تعمیرات بترتیب معادل ۰,۰۴ و ۰,۰۲ در نظر گرفته شده است. طول عمر مفید سیستم فتوولتاییک منصوب بر سقف خانه مشترکین خانگی ۱۵ سال فرض شده است که هزینه‌ای معادل ۱۰۰۰ دلار صرف نصب هر کیلووات ظرفیت این منبع تولید انرژی در سال پایه و هزینه‌ای معادل ۱۵۰ دلار نیز صرف تعمیرات و نگهداری سالیانه هر کیلووات از ظرفیت نصب شده این منبع تولید انرژی می‌گردد. طول عمر مفید باتری ۱۰ سال فرض شده است که هزینه‌ای معادل ۱۰۰ دلار صرف نصب هر کیلووات ظرفیت این منبع ذخیره‌ساز انرژی در سال پایه می‌شود. هزینه‌ای معادل ۲۰ دلار صرف تعمیرات و نگهداری سالیانه هر کیلووات از ظرفیت نصب شده باتری می‌گردد. بنابراین، مشترکین خانگی بعنوان مالکین سیستم فتوولتاییک-باتری با توجه به هزینه‌های خرید و نصب ظرفیت، جایگزینی تجهیزات با توجه به عمر مفید آنها، درآمد حاصل از ذخیره‌سازی و فروش انرژی مازاد به شبکه سراسری و هزینه خرید انرژی از شبکه سراسری در هنگام کمبود تولید می‌توانند در ارتباط با طراحی نهایی این سیستم به طور بهینه تصمیم‌گیری کنند. مطالعات عددی برای حالت پایه با توجه به مفروضات انجام می‌شود و آنالیز حساسیت با تغییر برخی فاکتورهای مهم و تأثیرگذار بر مدل مطابق ذیل برای مطالعه موردی ۲ و ۳ بکار گرفته می‌شود:

- **مطالعه دوم:** بررسی تأثیر افزایش قیمت تجهیزات سیستم فتوولتاییک و کاهش قیمت انرژی در شبکه سراسری بر روند سرمایه‌گذاری مشترکین مسکونی.
- **مطالعه سوم:** بررسی افزایش سطح تقاضا پیک سالیانه بر روند سرمایه‌گذاری سیستم‌های فتوولتاییک و ذخیره‌ساز برای مشترکین مسکونی.

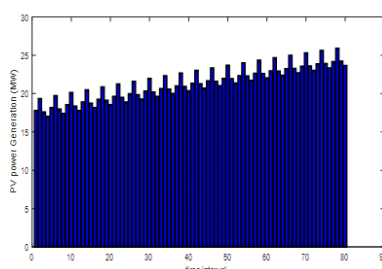
در اینجا، برای حل مسئله بهینه‌سازی مذکور از الگوریتم اجتماع گروه ذرات کمک گرفته می‌شود. پارامترهای الگوریتم شامل C1 و C2 بترتیب معادل ۰,۷ و ۱,۳ در نظر گرفته شده است. تعداد جمعیت اولیه ذرات معادل ۱۰۰۰ و تعداد تکرار الگوریتم معادل 150 در نظر گرفته شده است. کدنویسی روابط ریاضی مدل پیشنهادی به صورت ام‌فایل در محیط نرم افزار متلب ۲۰۱۶ انجام شده است که بر روی لپ‌تاپ ASUS با پردازشگر دو هسته‌ای ۲ گیگاهرتزی و حافظه جانبی ۸ گیگابایت نصب شده است. اجرای الگوریتم اجتماع گروه ذرات برای مطالعه حالت پایه تحت شرایط مفروض فوق‌الذکر انجام می‌شود. در مطالعه موردی دوم، قیمت خریداری تجهیزات سیستم فتوولتاییک از ۱۰۰۰ دلار به ۵۰۰۰ دلار افزایش داده شده است و قیمت انرژی برای تبادل با شبکه سراسری در ساعات کم باری، بار متوسط و بار پیک بترتیب ۰,۰۵، ۰,۱۵ و ۰,۵ دلار بر کیلووات ساعت فرض شده است. در مطالعه موردی سوم، تنها تقاضای بار پیک مشترکین در سال شروع برنامه‌ریزی از ۱۰,۲ مگاوات به مقدار ۱۸,۲ مگاوات افزایش می‌یابد و مابقی اطلاعات شبکه ثابت باقی مانده است. روند همگرایی الگوریتم برای دستیابی به پاسخ بهینه مسئله برنامه‌ریزی سیستم فتوولتاییک و باتری با پیشرفت نتایج در جهت حذف تخطی از قیود فنی در شکل (الف، ب و ج) نمایش شده است.



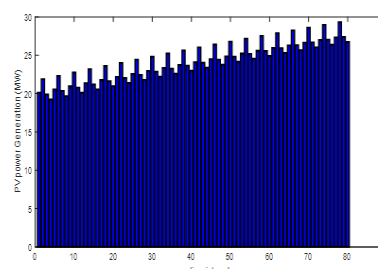
شکل (۶): نتایج شبیه‌سازی برای میزان تخطی از قیود فنی حین مسئله مذکور توسط الگوریتم اجتماع گروه ذرات

مطابق شکل فوق مطالعات موردی حالت پایه، دوم و سوم بترتیب بعد ۳۹، ۲۸ و ۸۹ تکرار الگوریتم به پاسخ بهینه همگرا شده و جریمه اعمالی به فیتنس به مقدار صفر می‌رسد. بعد اتمام اجرای الگوریتم تحت شرایط حالت پایه، تعداد کل آرایه‌های خورشیدی نصب شده توسط مشترکین خانگی ۲۷۳۶ ارزیابی می‌شود که از این تعداد فقط ۱۹۹ مشترک برای خرید و نصب باتری ۲ کیلوواتی به طور بهینه اقدام می‌کنند. در مطالعه حالت پایه با توجه به اینکه مشترکین خانگی مجهز به سیستم فتوولتاییک به همراه ذخیره-ساز باتری می‌توانند مازاد تولید به تقاضای بار را به شبکه سراسری بفروشند و یا به اندازه کمبود در صورت عدم امکان دشارژ باتری بخردن هزینه کل سرمایه‌گذاری بر روی چنین سیستمی ۲۰۷۲,۳ هزار دلار ارزیابی می‌شود. در این مطالعه تعداد مازول موازی هر آرایه خورشیدی به طور بهینه ۱۰ عدد تعیین شده است که در واقع ظرفیت نصب شده هر سیستم فتوولتاییک برای یک مشترک خانگی به طور بهینه معادل ۲,۱۳۱۵ کیلوواتی تعیین می‌شود. بعد اتمام اجرای الگوریتم اجتماع گروه ذرات برای حل مسئله تحت شرایط مطالعه موردی دوم، تعداد مشترکین خانگی که برای نصب سیستم فتوولتاییک اقدام می‌کنند از ۲۷۳۶ مشترک به ۲۴۱۸ مشترک کاهش می‌یابد که از این تعداد فقط ۱۰۰ مشترک خانگی به طور بهینه برای نصب ذخیره‌ساز انرژی باتری ۲ کیلوواتی اقدام می‌کنند. هزینه سرمایه‌گذاری کل بر روی سیستم فتوولتاییک و باتری تحت شرایط جدید ۱۴۲۲۷ هزار دلار شده است.

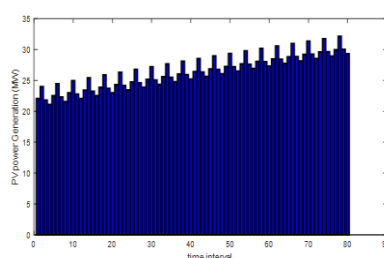
کاهش قیمت انرژی نیز باعث می‌شود فروش مازاد انرژی تولیدی سیستم فتوولتائیک و باتری به شبکه سراسری درآمد چشمگیری نداشته باشد و در نتیجه سود حاصله به شدت کاهش یابد. در مطالعه موردی دوم مشابه با مطالعه حالت پایه تعداد ۱۰ ماژول موازی برای هر آرایه خورشیدی به طور بهینه عدد تعیین می‌گردد که نشان‌دهنده ظرفیت ۲,۱۳۱۵ کیلوواتی برای سیستم فتوولتائیک هر مشترک خانگی به طور بهینه می‌باشد. بعد اجرای الگوریتم اجتماع گروه ذرات برای حل مسئله برنامه‌ریزی سیستم فتوولتائیک و باتری مشترکین خانگی تحت شرایط مطالعه موردی سوم، تعداد ۳۰۰۰ مشترک خانگی برای تامین انرژی مصرفی خود به سرمایه‌گذاری بر روی سیستم فتوولتائیک با ظرفیت ۲,۱۳۱۵ کیلووات اقدام کردند و در حالیکه تنها ۱۰۰ عدد از مشترکین سیستم فتوولتائیک خود را به ذخیره‌ساز باتری ۲ کیلوواتی تجهیز می‌کنند. با توجه به نصب تعداد بهینه آرایه‌های فتوولتائیک و باتری برای مشترکین خانگی تحت شرایط مطالعه موردی حالت پایه، مطالعه موردی دوم و سوم، مقدار توان اکتیو تولیدی با هدف تامین تقاضای بار طی فصول مختلف ۲۰ سال آینده مطابق شکل (الف، ب و ج) خواهد شد.



(ب) مطالعه موردی دوم (افزایش هزینه سرمایه‌گذاری و کاهش قیمت انرژی)



(الف) مطالعه حالت پایه



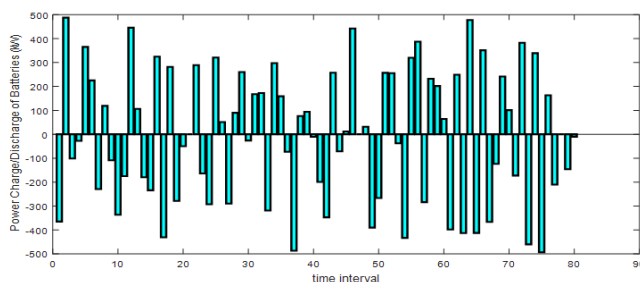
(ج) مطالعه موردی سوم (افزایش تقاضای بار)

شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی برای مقدار کل توان اکتیو تولیدی توسط مشترکین خانگی

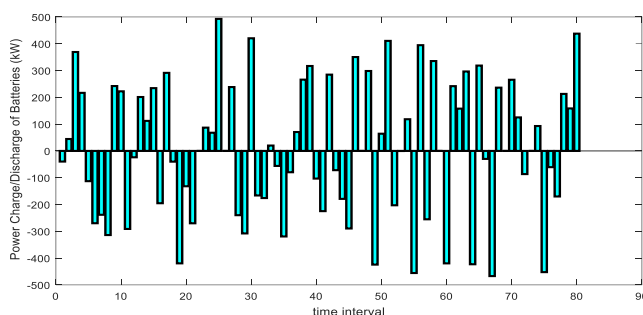
نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط مطالعه حالت پایه نشان می‌دهد که ردیابی توان ماکزیمم سیستم فتوولتائیک مشترکین خانگی با توجه به شرایط دمایی و تابش خورشید در منطقه به نحوی انجام می‌شود که مجموع تولید توان اکتیو این منابع مجموعاً در فصل بهار از ۲۰,۱۱۷ مگاوات تا ۲۶,۷۵۱ مگاوات افزایش یابد. برای مطالعه موردی دوم با افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم فتوولتائیک مشترکین خانگی و کاهش قیمت انرژی، ظرفیت کل نصب شده در فصل بهار سال پایه ۱۷,۷۷ مگاوات است در حالیکه با روند تغییرات دما و تابش خورشید در منطقه این ظرفیت در فصل بهار ۲۰ سال بعد تنها به مقدار ۲۴,۱۵ مگاوات افزایش می‌یابد. از نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه موردی سوم دیده می‌شود که در چندین سال انتهایی برنامه‌ریزی در برخی از دوره‌ها ظرفیت نصب شده سیستم فتوولتائیک و باتری پاسخگوی نیازمندی برخی مشترکین خانگی به انرژی الکتریکی نخواهد بود و در نتیجه کمبود آنها باید از طریق شبکه سراسری تامین گردد. بنابراین، با محدود شدن سقف نصب ظرفیت سیستم فتوولتائیک برای مشترکین خانگی در تامین سطح بالای تقاضای بار پیک، هزینه سرمایه‌گذاری بر روی این سیستم ۳۳۹۱,۳ هزار دلار ارزیابی می‌شود که در وضعیت غیربهینه قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی برای سه مطالعه موردی با توجه به عملکرد باتری‌ها طی سطوح مختلف تقاضای بار طی ۲۰ سال در شکل (۸) نمایش شده است.

نتایج شبیه‌سازی در حالت پایه نشان می‌دهد که با توجه به ظرفیت نصب شده ذخیره‌ساز باتری مقدار بیشینه شارژ و دشارژ انرژی باتری معادل ۵۰۰ کیلووات ساعت خواهد بود. این در حالی است که تقاضای بار پیک در فصل بهار سال پایه ۷,۱۴ مگاوات است و این میزان تقاضا در فصل بهار ۲۰ سال بعد به مقدار ۱۸,۸۷ مگاوات خواهد رسید. بنابراین، می‌توان دریافت که با توجه به هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً پایین برای سرمایه‌گذاری بر روی سیستم‌های خورشیدی و قیمت انرژی بالا به ویژه در ساعات بار متوسط و پیک به صرفه است که تقریباً کلیه مشترکین خانگی از سیستم فتوولتائیک برای تولید انرژی و فروش آن به شبکه استفاده کنند. اما، به دلیل هزینه نسبتاً بالای سرمایه‌گذاری بر روی باتری، در حالت بهینه تنها ۱۹۹ خانه به ذخیره‌ساز باتری تجهیز می‌شوند که تقریباً نزدیک به مقدار کمینه می‌باشد. با توجه به بالا بودن قیمت انرژی در شبکه سراسری به وضوح می‌توان دریافت زمانی نصب سیستم‌های فتوولتائیک خانگی تحت شرایط مطالعه موردی حالت پایه فارغ از بحث ذخیره‌سازی انرژی توسط باتری به دلیل هزینه بالای تحمیلی مقرون به صرفه اقتصادی می‌شود که بیشترین توان مازاد تولید این سیستم به شبکه سراسری فروخته

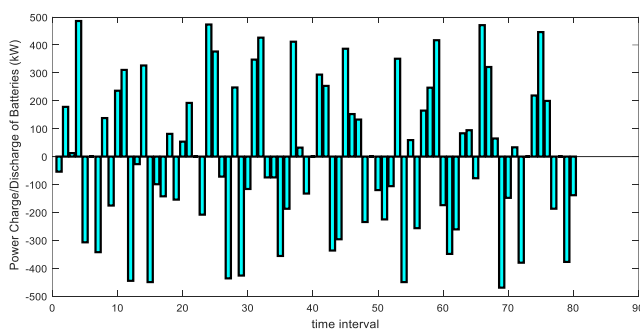
شود. برای مطالعه موردی دوم نتایج شبیه‌سازی گواه این حقیقت است که با کاهش قیمت کلی انرژی در شبکه سراسری نصب ذخیره‌ساز باتری در کنار سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی با توجه به هزینه نصب و سرمایه‌گذاری اولیه این تجهیزات اصلاً مقرون به صرفه نخواهد بود ضمن اینکه با افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بر روی سیستم‌های فتوولتاییک علاوه بر خودداری از مزایای اجرای سیاست‌های حمایتی از طرف بهره‌برداران سیستم توزیع تمایل مشترکین خانگی نیز برای نصب و بهره‌برداری از این تجهیزات کاهش می‌یابد. نتایج شبیه‌سازی برای مطالعه موردی سوم نشان می‌دهد که با افزایش سطح تقاضای بار میزان فعالیت کمینه تعداد باتری‌های نصب شده در کنار سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی در سال‌های انتهایی برنامه‌ریزی صرفاً جهت تامین بار محلی افزایش یابد.



الف) مطالعه حالت پایه



ب) مطالعه موردی دوم (افزایش هزینه سرمایه‌گذاری و کاهش قیمت انرژی)



ج) مطالعه موردی سوم (افزایش تقاضای بار)

شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی برای میزان شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌ساز باتری در بازه زمانی برنامه‌ریزی

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک مدل جدید برای امکان‌سنجی فنی و اقتصادی تجهیز سیستم فتوولتاییک مشترکین خانگی به ذخیره‌ساز باتری ارائه شد و الگوریتم اجتماع ذرات برای حل این مسئله بهینه‌سازی بکار گرفته شد. اعتبارسنجی مدل پیشنهادی با بکارگیری مطالعات عددی بر روی یک منطقه جغرافیایی تحت پوشش شبکه توزیع با ۳۰۰۰ مشترک مسکونی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی گواه این حقیقت است که سیستم فتوولتاییک با توجه به سطح بار، شرایط تابش و دمایی منطقه می‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش هزینه‌های تامین انرژی برای مشترکین خانگی باشد اما تصمیم برای ظرفیت نصب بهینه سیستم فتوولتاییک و تجمیع باتری با این سیستم شدیداً به هزینه سرمایه‌گذاری و اختلاف قیمت انرژی بین ساعات کم باری و بار پیک شبکه سراسری وابسته

است. با توجه به مطالعات انجام شده در این پژوهش، الحاق باتری به سیستمهای فتوولتائیک مشترکین خانگی با هزینههای سرمایه‌گذاری کنونی اصلا مقرون به صرفه اقتصادی نخواهد بود.

منابع

- [1] M. Alimardani, and M. Narimani, "A New Energy Storage System Configuration to Extend Li-Ion Battery Lifetime for a Household", IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2021, Vol. 44, No. 2, pp. 171-178.
- [2] A. Chaianong, A. Bangviwat, C. Menke, B. Breitschopf, and W. Eichhammer, "Customer economics of residential PV-Battery systems in Thailand", Elsevier, Renewable Energy", 2020, Vol. 146, PP. 297–308.
- [3] D. Parra, M. Gillott, S.A. Norman, and G.S. Walker, "Optimum community energy storage system for PV energy time-shift", Elsevier, Applied Energy, 2015, Vol. 137, pp. 576-587.
- [4] D. Parra, and M. K. Patel, "Effect of tariffs on the performance and economic benefits of PV-coupled battery systems", Elsevier, Applied Energy, 2016, Vol. 164, pp. 175-187.
- [5] M. Naumann, R.Ch. Karl, C.N. Truong, A. Jossen, and H.C. Hesse, "Lithium-ion battery cost analysis in PV-household application", 9th International Renewable Energy Storage Conference, 2015, pp. 37-47.
- [6] R. Khezri, A. Mahmoudi, and M.H. Haque, "Optimal Capacity of Solar PV and Battery Storage for Australian Grid-Connected Households", IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, Vol. 56, No. 5, pp. 5319-5329.
- [7] J. Li, "Optimal sizing of grid-connected photovoltaic battery systems for residential houses in Australia," Elsevier, Renewable Energy, 2019, Vol. 136, pp. 1245-1254.
- [8] S. Bandyopadhyay, G.R. Chandra Mouli, and Z. Qin, L. Ramirez Elizondo and P. Bauer, "Techno-Economical Model based Optimal Sizing of PV-Battery Systems for Micro-Grids", IEEE Transactions on Sustainable Energy, July 2020, Vol. 11, No. 3, pp. 1657-1668.
- [9] E. Tervo, K. Agbim, F. DeAngelis, J. Hernandez, H. K. Kim, and A. Odukomaiya, "An economic analysis of residential photovoltaic systems with lithium ion battery storage in the united states", Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, Vol. 94, pp. 1057–1066.
- [10] Y. Ru, J. Kleissl, and S. Martinez, "Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems", IEEE Transaction on Sustain Energy, 2012, Vol. 4, No. 1, pp. 68-81.
- [11] C. Goebel, V. Cheng, HA. Jacobsen, "Profitability of residential battery energy storage combined with solar Photovoltaic", Energies, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 1-17.
- [12] X. Li, D. Hui, and X. Lai, "Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations", IEEE Transaction on Sustainable Energy, April. 2013, Vol. 4, No. 2, pp. 464-473.
- [13] L. Zhou, Y. Zhang, X. Lin, C. Li, Z. Cai, and P. Yang, "Optimal sizing of PV and BESS for a smart household considering different price mechanisms", IEEE Access, 2018, Vol. 6, 41050–41059.
- [14] R. Khezri, A. Mahmoudi, M.H. Haque, "A demand side management approach for optimal sizing of standalone renewable-battery systems", IEEE Transaction on Sustainable Energy, 2021, Vol. 12, No. 4, pp. 2184 – 2194.
- [15] N. Abdul Rahman, and A. Omar, "Modeling of a maximum power point tracker for a stand-alone photovoltaic system using MATLAB/Simulink", International Journal Low Carbon Technology, 2014, Vol. 6, pp.195-201.
- [16] A. S. Joshi, I. Dincer, and B. V. Reddy, "Thermodynamic assessment of photovoltaic systems," Sol. Energy, 2009, vol. 83, no. 8, pp. 1139–1149.
- [17] RO. Bawazir, and NS. Cetin, "Comprehensive overview of optimizing PV-DG allocation in power system and solar energy resource potential assessments", Energy, 2020, Vol. 6, pp. 173–208.
- [18] A. Maleki, F. Pourfayaz, and M. H. Ahmadi, "Design of a cost-effective wind/photovoltaic/hydrogen energy system for supplying a desalination unit by a heuristic approach", Energy, 2016, Vol. 139, pp. 666–675.