

# جبران سازی بهینه و همزمان توان های اکتیو و راکتیو در سیستم های قدرت با استفاده از خودروهای برقی متصل به شبکه

حسن فشکی فراهانی و فرزانه رشیدی

حکایت: خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه در کنار مسئله کاهش آلودگی، دارای قابلیت هایی برای کمک رسانی به سیستم های قدرت می باشند. یکی از مهم ترین این قابلیت ها پاسخگویی به نیاز شبکه جهت تولید توان های اکتیو و راکتیو است. در این مقاله با توجه به قیود شبکه، ملاحظات فنی و قیمت های پیشنهادی بازار، یک چارچوب نظری جهت اختصاص ظرفیت این خودروها ارائه شده است. بدین منظور تابع هدفی با رویکرد حداقل سازی هزینه های پرداختی توسط بهره بردار مستقل شبکه توزیع یا DSO به تولیدکنندگان هر یک از توان های اکتیو و راکتیو پیشنهاد شده است. با توجه به این که مسأله مورد نظر در قالب یک مسأله بهینه سازی است، برای حل آن نیز از الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات استفاده شده است. همچنین به منظور تسریع در فرایند بهینه سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی به الگوریتم اضافه شده است. در این قالب پیشنهادی، خودروها برای تولید توان های اکتیو و راکتیو با ژنراتور رقابت می کنند. کارایی روش پیشنهادی بر روی یک فیدر شبکه ولتاژ پایین با ۱۳۴ مشترک و با حضور منابع تولید توان های اکتیو و راکتیو مورد ارزیابی قرار گرفته و میزان تولید و هزینه های پرداختی برای هر یک از تولیدکنندگان تعیین شده است.

**کلیدواژه:** الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات، جبران سازی توان راکتیو، خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه.

**متغیرها**

$P_{j,t}^{batt, ch}, P_{j,t}^{batt, dch}$ : توان باتری خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام به ترتیب در حالت دشارژ و شارژ

$C_j^{batt}$ : ظرفیت باتری خودروی  $j$  ام

$P_i^{max}, P_i^{min}$ : حداقل و حداکثر توان تولیدی ژنراتور  $i$  ام

$C_{j,t}^Q, C_{j,t}^P$ : هزینه پیشنهادی تولید به ترتیب برای توان اکتیو و راکتیو برای خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$Q_{j,t}$ : توان راکتیو تولیدی توسط خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$E_{af}^i$ : ولتاژ تحریک ژنراتور  $i$  ام

$Q^i$ : توان راکتیو تولیدی ژنراتور  $i$  ام

$I_{j,t}^{batt}$ : جریان باتری خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$Q_{Cost}$ : هزینه پرداختی توسط DSO برای تأمین توان راکتیو

$I_a^i$ : جریان آرمیچر ژنراتور  $i$  ام

$S_{m,n}^{max}, S_{m,n}$ : توان عبوری و حداکثر توان عبوری از خط بین شین  $m$  و  $n$  شبکه

$I_j^{max}, I_j^{min}$ : حداقل و حداکثر مقدار مجاز جریان خودروی  $j$  ام

$S_{j,max}$ : حداکثر مقدار توان ظاهری خودروی  $j$  ام

$P_{j,t}$ : توان اکتیو تولیدی توسط خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$SOC_j^{max}, SOC_j^{min}$ : حداقل و حداکثر مقدار مجاز SOC برای خودروی  $j$  ام

$P_j^{max}, P_j^{min}$ : حداقل و حداکثر توان تولیدی خودروی  $j$  ام

$SOC_{j,t}$ : میزان شارژ باقیمانده خودروی  $j$  ام برای ساعت  $t$  ام

$P_{j,t}^{batt}$ : توان باتری خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$S_j$ : توان ظاهری نامی خودروی  $j$  ام

$P_m^{Load}$ : بار شین  $m$  ام

$X_s^i$ : راکتانس سنکرون ژنراتور  $i$  ام

$P^i$ : توان اکتیو تولیدی ژنراتور  $i$  ام

$V_{m,max}, V_{m,min}$ : مقدار حداقل و حداکثر ولتاژ شین  $m$  ام

$P_{j,t}^{loss, dch}, P_{j,t}^{loss, ch}$ : تلفات به ترتیب در حالت شارژ و دشارژ خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$V_t^i$ : ولتاژ ترمینال ژنراتور  $i$  ام

$P_{Cost}$ : هزینه پرداختی توسط DSO برای تأمین توان اکتیو

$|V_m|$ : اندازه ولتاژ شین  $m$  ام

$P_{j,t}$ : میزان تولید توان اکتیو برای خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$W_{j,t}^{idle}, W_{j,t}^{dch}, W_{j,t}^{ch}$ : متغیرهای باینری بیانگر حالت به ترتیب شارژ، دشارژ و سکون خودرو  $j$  ام برای ساعت  $t$  ام

$P_{j,t}^{PCC, ch}$ : توان اکتیو جذب شده از نقطه PCC در حالت شارژ توسط خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$W_{i,t}^{gen}$ : متغیر باینری بیانگر انتخاب شدن ژنراتور  $i$  ام برای ساعت  $t$  ام

$P_{i,t}^{gen}$ : توان اکتیو خروجی ژنراتور  $i$  ام در ساعت  $t$  ام

$\alpha, \beta_1, \beta_2$ : پارامترهای قیمت

$P_{j,t}^{PCC, dch}$ : توان اکتیو تزریق شده به نقطه PCC در حالت دشارژ توسط خودروی  $j$  ام در ساعت  $t$  ام

$\lambda_t$ : قیمت انرژی (\$/MWh)

$P_{avg}, P_T$ : تقاضای به ترتیب بار کل و متوسط شبکه (kW)

## ۱- مقدمه

یکی از مشکلات شبکه های قدرت، پایین بودن راندمان تولید انرژی برقی و عدم وجود ذخیره سازی است که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشند. این مسئله موجب شده است جهت تأمین توان در ساعات پیک، نیروگاه های جدیدی احداث شوند که نیاز به حجم سرمایه گذاری های بسیار زیادی دارند. این حجم از سرمایه گذاری برای تأسیس نیروگاه هایی که تنها برای ساعت محدودی به کار گرفته شوند از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست. ایده استفاده از خودروهای برقی به عنوان ذخیره کننده

این مقاله در تاریخ ۲۵ شهریور ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۵ فروردین ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

حسن فشکی فراهانی، دانشکده فنی و مهندسی، واحد آشتیان، دانشگاه آزاد اسلامی، آشتیان، (email: hfeshki@aiau.ac.ir).

فرزانه رشیدی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، (email: rashidi@hormozgan.ac.ir)

این مقاله در تاریخ ۲۵ شهریور ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۵ فروردین ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

## متغیرها

این مقاله در تاریخ ۲۵ شهریور ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۵ فروردین ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

نیز بازار توان راکتیو به صورت چندهدفه با اهداف کاهش تلفات و هزینه پرداختی به تولیدکنندگان تسویه می‌شود. در زمینه بهبود کیفیت توان شبکه توسط خودروهای برقی مطالعات مختلفی صورت گرفته است [۲۱] تا [۲۳]. به طور نمونه در [۲۲] با هدف بهبود کیفیت توان، هر خودرو به صورت یک منبع جریان هارمونیک مدل شده که می‌تواند مؤلفه‌های مختلف هارمونیک را به شبکه تزریق نماید. سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند تلاش شده است دو هدف حداقل‌سازی هزینه پرداختی و کاهش تلفات برآورده گردد.

هدف این مقاله ارائه چارچوبی برای اختصاص بهینه ظرفیت خودرو به تولید هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو است. بدین منظور تابع هدفی ارائه شده تا بهره‌بردار سیستم توزیع (DSO) با در نظر گرفتن قیود شبکه و خودرو بتواند با کمترین هزینه، توان‌های مورد نیاز خود را تأمین نماید. با توجه به این که مسئله مورد نظر در قالب یک مسئله بهینه‌سازی است، برای حل آن از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است. همچنین به منظور تسریع در فرایند بهینه‌سازی و جلوگیری از گرفتار شدن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی به الگوریتم اضافه گردیده است. برای بررسی کارایی مدل و الگوریتم پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های متعددی بر روی یک شبکه نمونه انجام و نتایج به دست آمده ارزیابی خواهد شد.

## ۲- ارائه ساختار پیشنهادی

در ساختار سیستم شارژ و دشارژ خودروهای برقی متصل به شبکه از مبدل‌های AC/DC و DC/DC استفاده می‌شود که باعث افزایش انعطاف‌پذیری آن شده است. برای این که یک خودرو برقی هر یک از جریان‌های (توان‌های) اکتیو و راکتیو خود را به شبکه تزریق نماید نیازی به تغییرات سخت‌افزاری نبوده و تنها با تغییر سیستم کنترلی می‌توان توان‌های مورد نیاز شبکه را به آن تزریق نمود. بنابراین برای اختصاص ظرفیت خودرو به تولید هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو باید چارچوبی ارائه شود تا در این قالب ضمن فراهم شدن نیازهای شبکه، منافع مالکان خودروها نیز برآورده گردد.

در محل نقطه اتصال مشترک<sup>۱</sup> (PCC) ولتاژ شبکه مشخص و تقریباً مستقل از خودرو است، لذا خودرو می‌تواند با تزریق جریان‌های متناظر، هر یک از توان‌های مورد نیاز شبکه را فراهم نماید. به عبارتی دیگر با کنترل مناسب جریان می‌توان توان‌های مورد نیاز شبکه را فراهم نمود.

با فرض سینوسی بودن ولتاژ شبکه در محل PCC به صورت (۱) و انتخاب جریان مرجع به صورت (۲) می‌توان هر یک از توان‌های مورد نیاز را تولید و به شبکه تزریق نمود

$$V_{grid} = V_m \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$I_{ref} = I_m \sin(\omega t \pm \phi) \quad (2)$$

با توجه به میزان اختلاف فاز ولتاژ و جریان مؤلفه اصلی ( $\phi$ )، حالت‌های مختلف زیر می‌تواند به وجود آید:

- اگر  $\phi = 0^\circ$  یا  $\phi = 180^\circ$  باشد در آن صورت جریان خروجی خودرو با ولتاژ شبکه هم‌فاز و یا  $180^\circ$  درجه اختلاف فاز خواهد داشت. در این حالت خودرو فقط می‌تواند جریان اکتیو (توان اکتیو)

انرژی می‌تواند راهکاری برای حل این مسئله باشد. مطالعات انجام‌شده بر روی رفتار مالکان خودروها نشان می‌دهد خودروها حدوداً ۲۲ ساعت از شبانه‌روز در پارکینگ هستند. بنابراین اگر این خودروها قابلیت اتصال به شبکه را داشته باشند، می‌توان از انرژی ذخیره‌شده در باتری آنها برای کاهش پیک توان، تأمین ذخیره چرخان و تنظیم فرکانس استفاده کرد. این امر می‌تواند منجر به افزایش بار پایه، کاهش حداکثر تولید، افزایش ضریب بار، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش تلفات شبکه شده و به پایداری آن نیز کمک نماید [۱]. به علاوه افزایش نفوذ خودروهای برقی در شبکه قدرت می‌تواند باعث کاهش عدم قطعیت منابع انرژی تجدیدپذیر و همچنین تأخیر در توسعه شبکه‌های تولید و انتقال گردد.

اگرچه یک خودرو به تنهایی در مقایسه با بار شبکه به عنوان نوبز تلقی می‌شود اما با توجه به تعداد بالای آنها، توان انتقالی بین این خودروها و شبکه قابل توجه خواهد بود. لذا بار تجمعی خودروها می‌تواند در بازارهای مختلف از جمله بازار بار پایه، بار پیک، رزرو چرخان، تنظیم فرکانس، توان راکتیو و ... مشارکت داشته باشد.

در [۲] روابط ریاضی خودروهای الکتریکی جهت مشارکت در بازارهای بار پایه، بار پیک، رزرو چرخان و تنظیم فرکانس ارائه شده و میزان درآمد و هزینه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده در این مرجع، در بازار بار پایه با توجه به پایین بودن قیمت، این خودروها شانس چندانی برای رقابت ندارند. از دید شبکه نیز مطالعات مختلفی در زمینه روش‌های کنترلی شارژ این خودروها بر مبنای توابع هدف مختلف، ارائه شده است [۳]. با توجه به سرعت شارژ و دشارژ سریع، این خودروها می‌توانند در بازار تنظیم فرکانس حضور یابند. به عبارت دیگر این خودروها به منزله نیروگاه‌های با راه‌اندازی سریع هستند. نتایج مطالعات انجام‌شده در سوئد و آلمان نشان می‌دهد تنها با مشارکت ۵/۵٪ خودروها در آلمان و ۴/۲٪ در سوئد توان فراوانی می‌تواند در خدمت تنظیم فرکانس قرار گیرد [۴]. در [۵] استفاده از یک برنامه دومنظوره برای تنظیم V2G بر روی کاهش بار پیک و پایه در طول روز ارائه شده است. در [۶] برای تنظیم فرکانس V2G و افزایش کارایی آن، یک جمع‌کننده ارائه گردیده و در [۷] مسئله توزیع اقتصادی با در نظر گرفتن قیودی مانند کاهش هزینه و آلودگی این خودروها ارائه شده است.

مطالعات مختلفی در خصوص تأثیر خودروهای برقی بر شبکه‌های توزیع انجام شده است. در [۸] روش‌های مختلف شارژ هوشمند خودروها بررسی شده و شارژ خودروهای برقی از شبکه و تعامل آنها با منابع انرژی‌های تجدیدپذیر در [۹] ارائه شده است. مرجع [۱۰] مزایا و چالش‌های ورود خودروهای برقی به شبکه را مورد مطالعه قرار داده و [۱۱] روش‌های برنامه‌ریزی تجمیع خودروهای برقی را بررسی کرده است. تأثیر خودروهای برقی بر سیستم‌های قدرت با اهداف مختلفی مورد مطالعه قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به حداقل‌سازی واریانس بار [۱۲]، حداقل‌سازی بار پیک [۱۳]، حداکثرسازی سود بهره‌برداری [۱۴]، حداکثرسازی تعامل با منابع انرژی‌های نو [۱۵]، جلوگیری از افت فرکانس [۱۶] و کنترل ریسک [۱۷] اشاره نمود.

با توجه به گستردگی خودروهای برقی در بخش‌های مختلف شبکه قدرت، این خودروها در زمینه کنترل توان راکتیو نیز از پتانسیل‌های بسیار خوبی برخوردار هستند. در [۱۸] مدل‌سازی و مشارکت خودروهای برقی در بازار توان راکتیو و هزینه مرتبط با آن ارائه شده است. در این مرجع خودروها در کنار سایر تولیدکنندگان توان راکتیو، در بازار مشارکت نموده و با توجه به قیمت پیشنهادی انتخاب می‌شوند. در [۱۹] رفتار تصادفی خودروها در شبکه و انتخاب آنها در بازار در نظر گرفته شده است. در [۲۰]

1. Distribution System Operator  
2. Particle Swarm Optimization  
3. Point of Common Coupling

$$SOC_j^{\min} \leq SOC_{j,t} \leq SOC_j^{\max} \quad (18)$$

$$\left| SOC_{j,t} - SOC_{j,t-1} \right| \leq \frac{I_{j,t}^{batt}}{C_j^{batt}} \quad (19)$$

$$\sum_{j=1}^{N_v} \sum_{t=1}^{T} (W_{j,t}^{dch} \cdot P_{j,t}^{PCC,dch}) + \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{t=1}^{T} P_{i,t}^{gen} = \sum_{t=1}^{T} P_t^{load} + \sum_{j=1}^{N_v} \sum_{t=1}^{T} (W_{j,t}^{ch} \cdot P_{j,t}^{PCC,ch}) \quad (20)$$

$$P_{j,t}^{PCC,dch} = P_{j,t}^{batt,dch} - P_{j,t}^{loss,dch} \quad (21)$$

$$P_{j,t}^{PCC,ch} = P_{j,t}^{batt,ch} + P_{j,t}^{loss,ch} \quad (22)$$

$$P_i^{\min} W_{i,t}^{gen} \leq P_{i,t}^{gen} \leq P_i^{\max} W_{i,t}^{gen}, \quad W_{i,h}^{gen} \in \{0,1\} \quad (23)$$

$$\lambda_i = \beta_1 + \beta_2 \alpha \frac{P_i - P_{avg}}{P_{avg}} \quad (24)$$

رابطه (۳) همان تابع هدفی است که باید حداقل شود. وظیفه اصلی یک خودرو در اتصال به شبکه، تبادل یک‌طرفه توان اکتیو از سمت شبکه به خودرو (شارژ) است اما با توجه به وجود منابع تولیدات پراکنده و نیز در دسترس بودن این خودروها امکان تبادل انرژی به صورت دوطرفه نیز وجود دارد. البته در حالتی که خودرو به شبکه انرژی تزریق کند، هزینه‌هایی شامل هزینه تلفات مبدل‌ها، هزینه کاهش طول عمر باتری و جایگزینی آن و غیره وجود خواهد داشت که باید این هزینه‌ها در نظر گرفته شود. هزینه تولید توان اکتیو را می‌توان از (۴) به دست آورد.

یکی از قابلیت‌های جانبی خودروهای برقی، تولید توان راکتیو است. چنانچه یک خودرو کل یا بخشی از ظرفیت تولید خود را به تولید توان راکتیو اختصاص دهد، باید طبق (۵) هزینه‌های مشارکت از طرف شبکه پرداخت شود.

در بهینه‌سازی تابع هدف ارائه‌شده در (۳) قیود مختلفی باید در نظر گرفته شود که در (۷) تا (۲۴) ارائه شده است. رابطه (۶) برای در نظر گرفتن محدودیت توان تولیدی خودروها است. با توجه به وجود تلفات و هزینه‌های جانبی برای خودروها مانند هزینه باتری برای یک خودرو، توان تولیدی باید از یک مقدار بزرگ‌تر باشد تا بتواند این هزینه‌ها را پوشش دهد. همچنین به خاطر سیم‌بندی و اتصالات سیستم شارژ دارای یک حد بالا می‌باشد که در قالب (۶) بیان می‌شود.

وضعیت خودرو توسط متغیرهای باینری در (۷) تعیین می‌شود. وضعیت خودرو هر زمان می‌تواند یکی از حالات شارژ، دشارژ و یا سکون باشد. در این رابطه، هر یک از متغیرها می‌توانند وضعیت صفر یا یک را داشته باشند و در صورتی که مقدار متغیر برابر یک باشد به منزله آن است که خودرو در آن وضعیت قرار دارد. با توجه به این که در یک زمان خاص هر خودرو می‌تواند در یک وضعیت قرار گیرد، بنابراین جمع جبری این سه متغیر باید یک باشد یعنی در هر زمان فقط یکی از متغیرها یک و مابقی صفر هستند. روابط (۸) و (۹) نیز قیود معادلات پخش بار را نشان می‌دهند. همانند ژنراتورها، خودروهای برقی نیز دارای محدودیت توان خروجی هستند و این مسئله به دلیل محدودیت در اندازه هادی‌ها، اتصالات، سوئیچ‌ها و دیودهای نیمه‌هادی استفاده‌شده در مبدل‌های سیستم شارژ و دشارژ است. قیود مربوط به منحنی قابلیت توان<sup>۱</sup> PEV را می‌توان مطابق (۱۰) و (۱۱) در نظر گرفت [۱۸]. در حالت شارژ مقداری از

را به شبکه تزریق و یا از آن جذب نماید.  
 - اگر  $\varphi = 90^\circ$  باشد در آن صورت جریان مرجع با ولتاژ شبکه دارای اختلاف فاز  $\pm 90^\circ$  بوده و سبب تزریق و یا جذب توان راکتیو خواهد شد.  
 - اگر  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$  باشد در آن صورت جریان مرجع با ولتاژ شبکه دارای اختلاف فاز  $\pm \varphi$  بوده و با توجه به میزان  $\varphi$  می‌تواند جریان اکتیو و راکتیو را به شبکه تزریق و یا از آن جذب نماید.  
 با توجه به تولید و تزریق هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو هزینه‌هایی باید از طرف DSO به مالک خودرو پرداخته شود که در ادامه، این هزینه‌ها فرمول‌بندی شده است.  
 با توجه به این که بهره‌بردار سیستم توزیع به دنبال کاهش هزینه‌های بهره‌برداری است و یکی از راهکارهای کاهش هزینه‌ها، حداقل کردن هزینه‌های پرداختی است، در این مقاله، حداقل‌سازی پرداختی DSO به مالکان خودرو به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در ادامه این تابع هدف به همراه قیود آن آمده است

$$OF = \min(P_{Cost} + Q_{Cost}) \quad (3)$$

Subject to

$$P_{Cost} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_v} C_{j,t}^P P_{j,t} \quad (4)$$

$$Q_{Cost} = \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_v} C_{j,t}^Q Q_{j,t} \quad (5)$$

$$P_j^{\min} \leq P_{j,t}^{batt} \leq P_j^{\max} \quad (6)$$

$$W_{j,t}^{ch} + W_{j,t}^{dch} + W_{j,t}^{idle} = 1 \quad (7)$$

$$W_{j,t}^{ch}, W_{j,t}^{dch}, W_{j,t}^{idle} \in \{0,1\}$$

$$\left( \underbrace{P_{i,t}^{gen}}_{i=m} + \underbrace{W_{j,t}^{dch} \cdot P_{j,t}^{PCC,dch}}_{j=m} \right) - \left( P_m^{Load} + \underbrace{W_{j,t}^{ch} \cdot P_{j,t}^{PCC,ch}}_{j=m} \right) =$$

$$|V_m| \sum_{n=1}^{NB} |V_n| \cdot |Y_{mn}| \cos(\theta_m - \theta_n - \theta_{mn}) \quad (8)$$

$$\left( \underbrace{Q_{i,t}^{gen}}_{i=m} + \underbrace{W_{j,t}^{dch} \cdot Q_{j,t}^{PCC,dch}}_{j=m} \right) - \left( Q_m^{Load} + \underbrace{W_{j,t}^{ch} \cdot Q_{j,t}^{PCC,ch}}_{j=m} \right) =$$

$$|V_m| \sum_{n=1}^{NB} |V_n| \cdot |Y_{mn}| \sin(\theta_m - \theta_n - \theta_{mn}) \quad (9)$$

$$(P_{j,t} + P_{j,t}^{loss,ch})^r + (Q_{j,t})^r \leq (S_j)^r \quad (10)$$

$$(P_{j,t} - P_{j,t}^{loss,dch})^r + (Q_{j,t})^r \leq (S_j)^r \quad (11)$$

$$Q_g^i \leq \sqrt{(V_t^i \cdot I_a^i)^r - (P_g^i)^r} \quad (12)$$

$$Q_g^i \leq \sqrt{\left( \frac{V_t^i E_{af}^i}{X_s^i} \right)^r - (P_g^i)^r} - \frac{(V_t^i)^r}{X_s^i} \quad (13)$$

$$S_{m,n} \leq S_{m,n}^{\max}, \quad m = 1, \dots, NB, \quad n = 1, \dots, NB \quad (14)$$

$$V_{m,\min} \leq V_m \leq V_{m,\max} \quad (15)$$

$$P_{j,t}^{batt} = W_{j,t}^{ch} \cdot P_{j,t}^{batt,ch} + W_{j,t}^{dch} \cdot P_{j,t}^{batt,dch} \quad (16)$$

$$SOC_{j,t} = SOC_{j,t-1} - \frac{I_{j,t}^{batt}}{C_j^{batt}} (W_{j,t}^{dch} - W_{j,t}^{ch}) \quad (17)$$

جمعیت سعی می‌کنند با تنظیم مسیر و حرکت به سمت بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروه، به سوی راه حل نهایی حرکت کنند. در این الگوریتم، سرعت هر ذره در هر لحظه، از دو بخش تشکیل می‌شود، یکی سرعت ذره در لحظه قبل و دیگری مربوط به میزان تبعیت از بهترین تجربه شخصی و بهترین تجربه گروه است. بدون وجود قسمت دوم، حالت الگوریتم بیشتر شبیه جستجوی تصادفی خواهد بود، در حالی که بدون قسمت اول نیز الگوریتم مانند یک الگوریتم بهینه‌سازی محلی است که در همسایگی بهترین جواب، به دنبال راه حل بهینه است. بنابراین در این حالت بخش‌های زیادی از فضای جواب، جستجو نخواهند شد. الگوریتم PSO سعی می‌کند با ترکیب این دو قسمت، تعادلی بین جستجوی سراسری و محلی برقرار کند. در این الگوریتم، هر ذره در هر لحظه، موقعیت خود را در فضای جستجو با توجه به بهترین موقعیتی که تاکنون در آن قرار داشته ( $pbest_i$ ) و بهترین موقعیتی که تاکنون توسط اجتماع ذرات به دست آمده ( $gbest$ ) تنظیم می‌کند. بدین منظور برای هر ذره، یک بردار سرعت و یک بردار موقعیت تعریف می‌شود. سپس طبق (۳۲)، به روز رسانی موقعیت فعلی هر ذره با توجه به ساختار موقعیت قبلی و سرعت فعلی آن صورت می‌پذیرد [۲۵]

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (25)$$

در رابطه فوق،  $x_i(t)$  و  $x_i(t-1)$  به ترتیب موقعیت ذره  $i$ ام در زمان‌های  $t$  و  $t-1$  بوده و  $v_i(t)$  نیز بیانگر سرعت ذره در لحظه  $t$  است. فرایند به روز رسانی موقعیت ذرات تا زمانی ادامه می‌یابد که سرعت آنها صفر شده یا الگوریتم به تعداد تکرارهای معینی برسد. مکانیسم به روز رسانی سرعت ذرات نیز بر اساس رابطه زیر انجام می‌شود [۲۵]

$$v_i(t) = w.v_i(t-1) + c_1 r_1 (pbest_i - x_i(t-1)) + c_2 r_2 (gbest_i - x_i(t-1)) \quad (26)$$

در رابطه فوق، ثابت‌های  $c_1$  و  $c_2$ ، میزان تأثیر هر یک از پارامترهای  $gbest$  و  $pbest$  را بر موقعیت بعدی ذره مشخص می‌کنند.  $r_1$  و  $r_2$  نیز اعدادی تصادفی در محدوده  $[0,1]$  بوده و پارامتر وزن اینرسی ( $w$ ) نیز به منظور کنترل تأثیر سرعت در لحظه قبل بر سرعت فعلی ذره به کار برده می‌شود [۲۶]. به عبارت دیگر این پارامتر تعادلی بین جستجوی کلی و محلی برقرار می‌سازد، مقادیر بزرگ وزن اینرسی سبب بهبود قابلیت جستجوی عمومی شده حال آن که مقادیر کوچک آن قابلیت جستجوی محلی را بهبود می‌بخشد [۲۷]. از این رو انتخاب مناسب این پارامتر، می‌تواند مشکل گیرافتادن در بهینه‌های محلی را حل کند. ضریب  $c_1$  نیز مشخص می‌کند یک ذره چقدر به تجربیات خود وابسته بوده در حالی که ضریب  $c_2$ ، تعیین‌کننده میزان وابستگی سرعت یک ذره به تجربیات همسایگان خود است. به عنوان مثال با انتخاب  $c_1 = 0$  تمامی ذرات بر اساس تجربیات شخصی خود به جستجوی جواب بهینه در فضای مسئله می‌پردازند در حالی که با انتخاب  $c_2 = 0$ ، تمامی ذرات بر روی یک نقطه همگرا خواهند شد. با توجه به این که در ابتدا ذرات میل بیشتری به تجربه‌های تازه دارند و با گذشت زمان این میل، جای خود را به دنباله‌روی بیشتر از بهترین‌ها می‌دهد، از این رو در این مقاله مطابق (۲۷) و (۲۸) در ابتدای فرایند جستجو، با انتخاب مقادیر بزرگ برای  $c_1$  و مقادیر کوچک برای  $c_2$  اهمیت بیشتری به جستجوی عمومی داده‌ایم. سپس با گذشت زمان و پس از تعدادی کافی تکرار، با کاهش مقدار  $c_1$  و افزایش  $c_2$ ، این تأثیر کاهش یافته و به جستجوی مبتنی بر دنباله‌روی از بهترین‌ها اهمیت بیشتری داده شده است

توان دریافتی از شبکه در محل PCC توسط مبدل‌های سیستم شارژ تلف می‌شود، لذا مطابق (۱۰) در این حالت توان اکتیو با توان تلفاتی جمع می‌گردد و در حالت دشارژ جهت عبور توان از سمت خودرو به سمت شبکه بوده و مقداری از توان در حین انتقال تلف می‌شود که این توان تلفاتی با علامت منفی در (۱۱) در نظر گرفته شده است. روابط (۱۲) و (۱۳) بیانگر قیود مربوط به منحنی قابلیت توان ژنراتورها است که جزئیات بیشتر آن در [۲۴] ذکر شده است.

رابطه (۱۴) محدودیت توان ظاهری هر یک از خودروها را نشان می‌دهد. محدودیت ولتاژ هر یک از شین‌ها توسط (۱۵) در نظر گرفته شده و با استفاده از (۱۶) توان باطری محاسبه می‌شود. قیود باطری در قالب (۱۷) تا (۱۹) در نظر گرفته شده‌اند که (۱۷) بیانگر نحوه محاسبه SOC<sup>۱</sup> ساعتی برای خودروی شماره  $z$ ام است. طبق این رابطه SOC هر خودرو با توجه به وضعیت خودرو در هر ساعت (شارژ یا دشارژ) می‌تواند افزایش یا کاهش یابد. در صورتی که هر دو متغیر  $W_{j,t}^{ch}$  و  $W_{j,t}^{dch}$  برابر با صفر باشد SOC خودرو بدون تغییر خواهد ماند. رابطه (۱۸) بیانگر محدوده تغییرات SOC هر خودرو است. رابطه (۱۹) نیز تغییرات SOC در دو بازه متوالی را نشان می‌دهد. به عبارتی این رابطه بیانگر نرخ شارژ یا دشارژ می‌باشد که توسط جریان شارژ یا دشارژ محدود می‌شود.

رابطه (۲۰) تعادل توان اکتیو را در شبکه نشان می‌دهد. توان تزریقی به شبکه در نقطه PCC در حالت شارژ و دشارژ به ترتیب از (۲۱) و (۲۲) قابل محاسبه است. محدودیت توان تولیدی ژنراتور می‌تواند بین دو مقدار حداقل و حداکثر تغییر کند که این محدوده توسط (۲۳) بیان شده است. رابطه (۲۴) نیز قیمت انرژی بر حسب تابعی از بار شبکه را نشان می‌دهد که یک قیمت‌گذاری پویا است.

### ۳- پیاده‌سازی مسئله بهینه‌سازی توسط PSO

در بخش‌های قبل مسئله اختصاص ظرفیت خودروهای برقی قابل اتصال به شبکه جهت تولید توان‌های اکتیو و راکتیو در قالب یک مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شد. برای حل مسئله مورد نظر می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و یا از روش‌های بهینه‌سازی هوشمند استفاده کرد. در الگوریتم‌های بهینه‌سازی کلاسیک، با افزایش تعداد متغیرها، سرعت همگرایی کاهش یافته و احتمال گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی نیز افزایش می‌یابد. در مقابل در الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند، می‌توان با تنظیم پارامترهای الگوریتم، علاوه بر افزایش سرعت همگرایی، از گیر افتادن آن در بهینه‌های محلی نیز جلوگیری کرد. به همین دلیل در این مقاله از الگوریتم اجتماع ذرات که یکی از انواع شناخته‌شده و پرکاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است استفاده شده است. به منظور تسریع در فرایند بهینه‌سازی و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهای ابتکاری جدیدی نیز به الگوریتم اضافه شده‌اند. در ادامه ساختار این الگوریتم به اختصار توضیح داده شده است.

#### ۳-۱ روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO)، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت است که اولین بار در سال ۱۹۹۵ توسط ابرهارت و کندی ارائه شد [۲۵]. در این الگوریتم، جمعیتی از ذرات وجود دارند که هر یک از آنها یک راه حل ممکن برای مسئله بهینه‌سازی هستند. اعضای

$\Delta x_{max}$  پارامتر حداکثر مقدار جابه‌جایی است [۲۹]. در این مقاله تعداد اعضای جمعیت برابر ۳۰، حداکثر تعداد تکرار الگوریتم برابر ۴۰،  $c_{min} = ۰.۲$  و  $c_{max} = ۳.۷$  و  $w = ۰.۶$  انتخاب شده است.

### ۳-۲ نحوه مدل‌سازی برنامه بهینه‌سازی توسط PSO

خودروی برقی می‌تواند هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو را تولید نماید و لذا ذره در نظر گرفته به صورت بردار زیر است

$$X = [P_1, P_2, \dots, P_{N_v}, Q_1, Q_2, \dots, Q_{N_v}]_{1 \times 2N_v} \quad (۳۱)$$

در رابطه فوق،  $N_v$  بیانگر تعداد خودروها می‌باشد.

فرایند انجام کار به شرح زیر است. ابتدا شبکه مورد مطالعه در محیط نرم‌افزار DigSILENT پیاده‌سازی شده است. این نرم‌افزار قابلیت برنامه پخش بار نامتعادل را دارد [۳۰]. سپس برنامه پخش بار اجرا شده و میزان توان راکتیو و اکتیو تولیدی هر یک از خودروها به دست می‌آید. با توجه به میزان ظرفیت‌های اختصاص‌یافته برای هر خودرو میزان درآمد حاصل از محل فروش توان برای هر خودرو به دست می‌آید. روندنمای اجرای الگوریتم بهینه‌سازی توسط دو نرم‌افزار MATLAB و DigSILENT در شکل ۱ نمایش داده شده است.

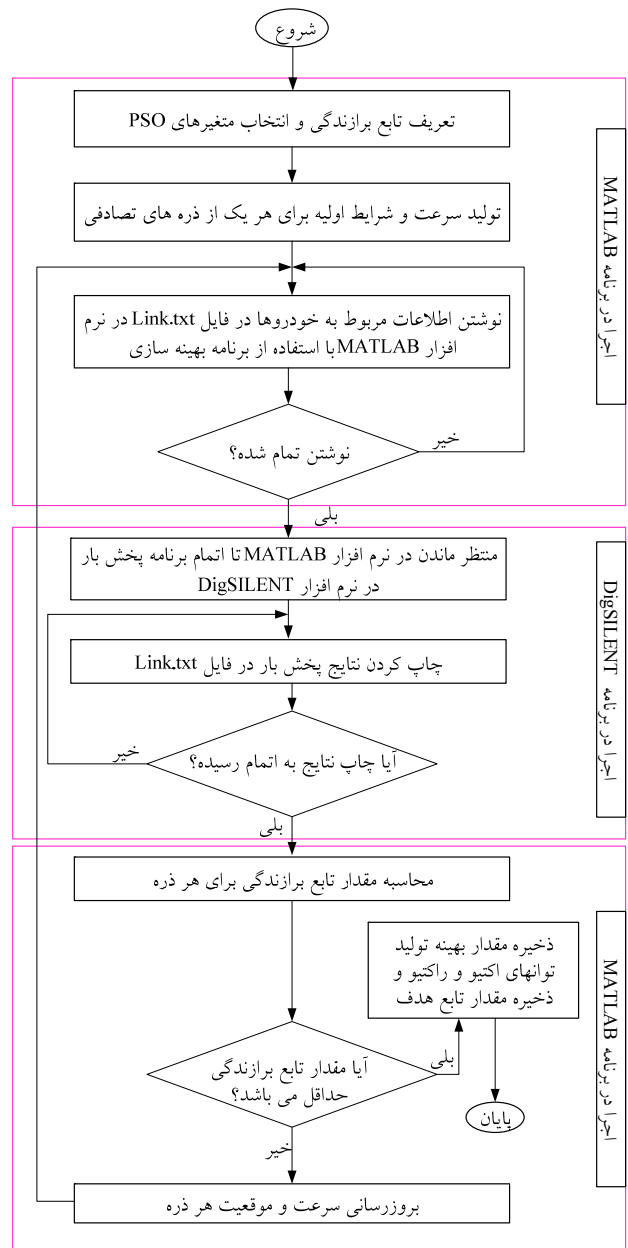
### ۴- مطالعه موردی

برای ارزیابی قابلیت روش پیشنهادی، مطابق شکل ۲ یک فیدر از شبکه ولتاژ پایین انتخاب شده است. این فیدر مربوط به شهر دوبلین کشور ایرلند بوده [۲۳] و ۱۳۴ بار تک‌فاز خانگی را تغذیه می‌کند. فرض شده که توان ظاهری هر بار خانگی ۱/۵ kVA و ضریب توان آنها برابر با ۰/۹۵ پس فاز باشد. ولتاژ نامی این شبکه برابر با  $V = ۲۳۰/۴۰۰$  با محدوده تغییرات ولتاژ ۵٪ در نظر گرفته شده و همچنین فرض گردیده که ۱۰ عدد خودرو در شبکه وجود دارد. خودروهای شماره ۱، ۴، ۷ و ۸ به فاز  $a$ ، خودروهای ۳، ۶ و ۱۰ به فاز  $b$  و خودروهای ۲، ۵ و ۹ به فاز  $c$  متصل هستند. از دیگر فرضیات در نظر گرفته شده این است که خودروها دارای ظرفیت باتری ۳۲ kWh بوده و باتری این خودروها در طول ۴ ساعت شارژ یا دشارژ کامل می‌شود. به عبارت دیگر این خودروها می‌توانند در هر ساعت ۸ kW توان به شبکه تغذیه و یا از آن دریافت نمایند. همچنین بازده شارژ و دشارژ این خودروها ۹۰٪ در نظر گرفته شده و لازم به ذکر است که انتخاب‌شدن برای تولید هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو و میزان آن را قیمت پیشنهادی و مکان قرارگرفتن خودرو مشخص خواهد نمود.

در جدول ۱ قیمت‌های پیشنهادی این خودروها برای تولید توان اکتیو و راکتیو نشان داده شده است. این قیمت‌ها بر مبنای قیمت‌های بازار نیویورک [۳۱] بوده و برای خودروها به صورت یک عدد تصادفی در محدوده رنج قیمتی در نظر گرفته شده است.

منحنی همگرایی تابع هدف در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود الگوریتم بعد از حدود ۲۰ تکرار به جواب بهینه همگرا شده است. مطابق شکل کمترین مقدار پرداختی توسط بهره‌بردار شبکه معادل ۱۳/۹۳ دلار می‌باشد که برای تأمین توان‌های اکتیو، راکتیو و اغتشاشی مورد نیاز شبکه باید به هر یک از تولیدکنندگان این توان‌ها پرداخت شود.

در جدول ۲ نتایج مشارکت خودروها در تأمین توان‌های اکتیو و راکتیو آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول مشاهده می‌شود با توجه به قیمت‌های پیشنهادی، مکان خودروها و قیود شبکه، هر یک از



شکل ۱: روندنمای بهینه‌سازی تابع هدف توسط دو نرم‌افزار MATLAB و DigSILENT و با استفاده از الگوریتم PSO.

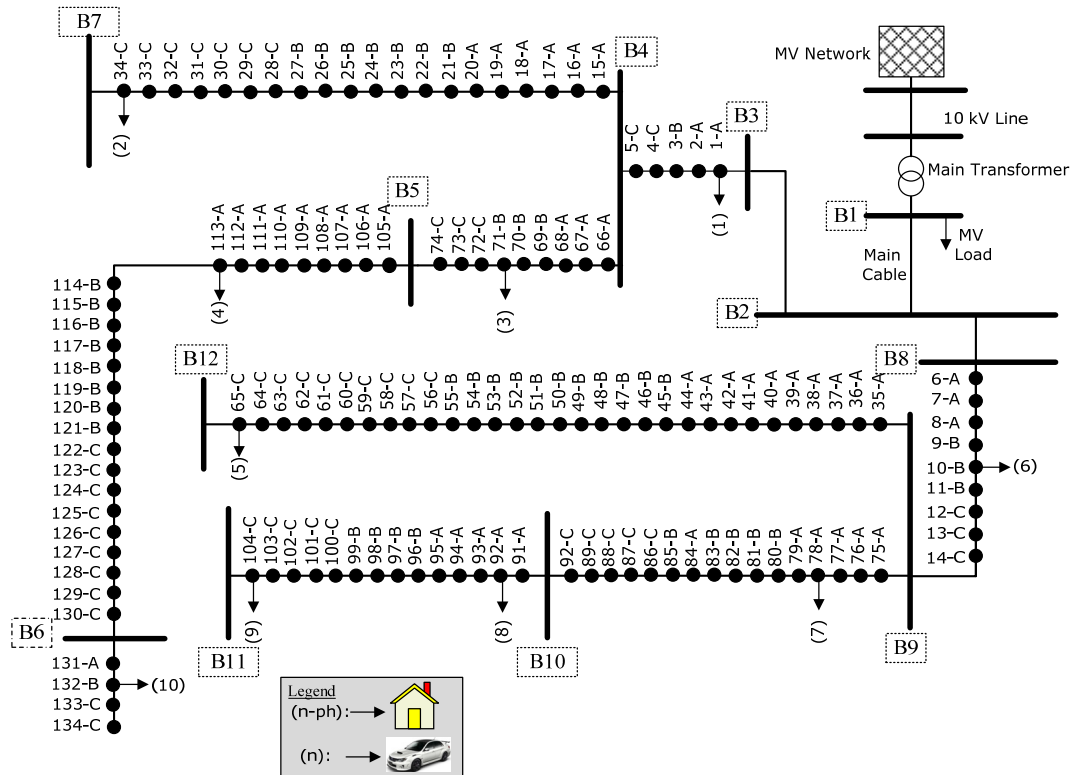
$$c_1 = c_{min} + (c_{max} - c_{min}) \frac{t}{Maxgen} \quad (۲۷)$$

$$c_r = c_{max} + (c_{min} - c_{max}) \frac{t}{Maxgen} \quad (۲۸)$$

در رابطه فوق،  $Maxgen$  حداکثر تعداد تکرار الگوریتم است. طبق رابطه فوق با افزایش تعداد تکرارها، مقدار  $c_1$  از  $c_{min}$  شروع به افزایش کرده و در آخرین تکرار مقدار آن به  $c_{max}$  می‌رسد. در حالی که برای پارامتر  $c_r$ ، درست برعکس حالت فوق اتفاق می‌افتد. یعنی مقدار این پارامتر از  $c_{max}$  در لحظه شروع الگوریتم به  $c_{min}$  در پایان الگوریتم خواهد رسید. برای متغیرهای گسسته، موقعیت و سرعت هر ذره باید مجدداً طبق روابط زیر به روز شود [۲۸]

$$v_i(t) = \tanh \frac{v_i(t)}{\psi} \quad (۲۹)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + \text{round}(v_i(t) \times \Delta x_{max}) \quad (۳۰)$$



شکل ۲: دیاگرام تک خطی شبکه تست با ۱۳۴ بار خانگی و ۱۰ دستگاه خودروی برقی.

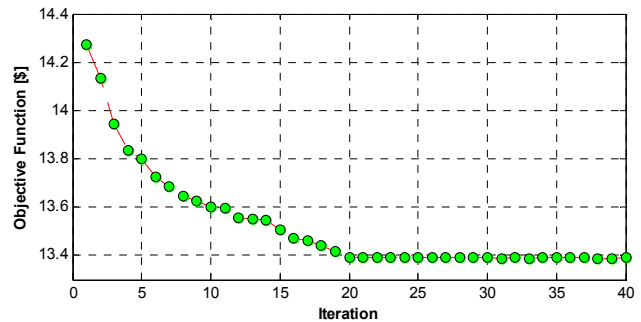
جدول ۲: میزان توان‌های پذیرفته شده از هر یک از مؤلفه‌های توان و برای هر یک از تولیدکنندگان (PEVها و ژنراتور).

مشارکت کننده	نماد	مؤلفه‌های توان	راکتیو
PEV۱	PEV۱	۴٫۵	۶٫۴
PEV۲	PEV۲	۲٫۴۸	۵٫۵۶
PEV۳	PEV۳	۲٫۰۴	۴٫۴۲
PEV۴	PEV۴	۲	۶٫۲
PEV۵	PEV۵	۷٫۶	۲٫۵
PEV۶	PEV۶	۴٫۹۸	۳٫۴۸
PEV۷	PEV۷	۶٫۲	۴٫۲۸
PEV۸	PEV۸	۵٫۵۶	۲٫۹
PEV۹	PEV۹	۳	۴٫۸
PEV۱۰	PEV۱۰	۴٫۴۸	۶٫۲۸
ژنراتور	Gen۱	۱۴۸٫۱۱	۱۵٫۹۴

۵ نیز با توجه به قیمت پیشنهادی پایین برای تولید توان اکتیو، بخش زیادی از ظرفیت آن در بازار انرژی پذیرفته می‌شود.

میزان پرداختی به هر یک از تولیدکنندگان برای تولید هر یک از مؤلفه‌های توان در جدول ۳ آورده شده است. با توجه به نتایج این جدول، کل هزینه پرداختی توسط DSO برابر ۱۳/۳۹ دلار است که از این مقدار ۳/۷ دلار (۱/۹۱ برای تولید توان + ۱/۷۹ برای تولید توان راکتیو) برای خودروهای برقی و ۹/۶۹ دلار (۸/۸۹ برای تولید توان + ۰/۸۰ برای تولید توان راکتیو) برای ژنراتور برای تولید توان‌های اکتیو و راکتیو باید پرداخته شود.

در جدول ۴ تأثیر مشارکت و عدم مشارکت خودروها در تولید توان‌های اکتیو و راکتیو آمده است. مطابق این جدول در صورتی که خودروها در بازار مشارکت داشته باشند، DSO باید مبلغ ۱۳/۳۹ دلار بپردازد و در صورت عدم مشارکت خودروها، DSO باید ۱۴/۶۰ دلار به تنها تولیدکننده



شکل ۳: منحنی همگرایی تابع هدف.

جدول ۱: قیمت‌های پیشنهادی PEVها و ژنراتور برای تولید هر یک از مؤلفه‌های توان.

مشارکت کننده	نماد	مؤلفه‌های توان	راکتیو
PEV۱	PEV۱	۰٫۰۴۴	۰٫۰۳۶
PEV۲	PEV۲	۰٫۰۴۳	۰٫۰۴۴
PEV۳	PEV۳	۰٫۰۵۰	۰٫۰۴۳
PEV۴	PEV۴	۰٫۰۵۱	۰٫۰۳۳
PEV۵	PEV۵	۰٫۰۳۹	۰٫۰۴۱
PEV۶	PEV۶	۰٫۰۴۵	۰٫۰۴۰
PEV۷	PEV۷	۰٫۰۴۱	۰٫۰۳۹
PEV۸	PEV۸	۰٫۰۴۸	۰٫۰۳۷
PEV۹	PEV۹	۰٫۰۴۹	۰٫۰۴۲
PEV۱۰	PEV۱۰	۰٫۰۴۶	۰٫۰۳۴
ژنراتور	Gen۱	۰٫۰۶۰	۰٫۰۵۰

تولیدکنندگان ظرفیت خود را به تولید هر یک از توان‌های اکتیو یا راکتیو اختصاص داده‌اند. به عنوان نمونه با توجه به پایین بودن قیمت پیشنهادی برای تولید توان راکتیو توسط خودروی شماره ۴، این خودرو بیشتر ظرفیت خود را برای تولید توان راکتیو اختصاص می‌دهد. همچنین خودروی شماره

## مراجع

- [1] D. S. Gautam, F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford., "An automotive onboard 3.3-kW battery charger for PHEV application," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 8, pp. 3466-3474, Oct. 2012.
- [2] B. Geng, J. K. Mills, and D. Sun, "Energy management control of microturbine-powered plug-in hybrid electric vehicles using the telemetry equivalent consumption minimization strategy," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 9, pp. 4238-4248, Nov. 2011.
- [3] F. Guo, Er. Inoa, W. Choi, and Jin Wang, "Study on global optimization and control strategy development for a PHEV charging facility," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 6, pp. 2431-2441, Jul. 2012.
- [4] R. M. Patil, J. C. Kelly, Z. Filipi, and H. Fathy, "A framework for the integrated optimization of charging and power management in plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 6, pp. 2402-2412, Jul. 2013.
- [5] E. Sortomme and M. A. El-Sharkawi, "Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 131-138, Mar. 2011.
- [6] E. Sortomme, et al., "Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 198-205, Mar. 2011.
- [7] M. S. ElNozahy and M. M. Salama, "A comprehensive study of the impacts of PHEVs on residential distribution networks," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 332-342, Mar. 2014.
- [8] J. Garcia-Villalobos, et al., "Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: a review of smart charging approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38, pp. 717-731, Oct. 2014.
- [9] L. Liu, F. Kong, X. Liu, Y. Peng, and Q. Wang, "A review on electric vehicles interacting with renewable energy in smart grid," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 648-661, Nov. 2015.
- [10] K. M. Tan, T., V. K. Ramachandaramurthy, Jia Y. Yong., "Integration of electric vehicles in smart grid: a review on vehicle to grid technologies and optimization techniques," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, pp. 720-732, Jan. 2016.
- [11] Z. Yang, K. Li, and A. Foley., "Computational scheduling methods for integrating plug-in electric vehicles with power systems: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51, pp. 396-416, Nov. 2015.
- [12] A. Sheikhi, S. Bahrami, A. M. Ranjbar, and H. Oraee., "Strategic charging method for plugged in hybrid electric vehicles in smart grids; a game theoretic approach," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 53, pp. 499-506, Dec. 2013.
- [13] C. D. White and K. M. Zhang, "Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction," *J. of Power Sources*, vol. 196, no. 8, pp. 3972-3980, 15 Apr. 2011.
- [14] T. Sousa, H. Morais, J. Soares, and Z. Vale, "Day-ahead resource scheduling in smart grids considering vehicle-to-grid and network constraints," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 183-193, Aug. 2012.
- [15] A. El-Zonkoly, "Intelligent energy management of optimally located renewable energy systems incorporating PHEV," *Energy Conversion and Management*, vol. 84, no. 26, pp. 427-435, Aug. 2014.
- [16] J. Zhong, et al., "Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation," *Applied Energy*, vol. 123, pp. 253-262, Jun. 2014.
- [17] S. Lefeng, Z. Qian, and P. Yongjian, "The reserve trading model considering V2G Reverse," *Energy*, vol. 59, pp. 50-55, Sept. 2013.
- [18] H. F. Farahani, H. A. Shayanfar, and M. S. Ghazizadeh, "Incorporation of plug in hybrid electric vehicle in the reactive power market," *J. of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, no. 5, Article 053123, 2012.
- [19] H. F. Farahani, H. A. Shayanfar, and M. S. Ghazizadeh, "Modeling of stochastic behavior of plug-in hybrid electric vehicle in a reactive power market," *Electrical Engineering*, vol. 96, no. 1, pp. 1-13, Mar. 2014.
- [20] H. F. Farahani, H. A. Shayanfar, and M. S. Ghazizadeh, "Multi-objective clearing of reactive power market including plug-in hybrid electric vehicle," *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, no. 2, pp. 197-220, 2013.
- [21] M. Esmaili and A. Goldoust, "Multi-objective optimal charging of plug-in electric vehicles in unbalanced distribution networks," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 73, no. 12, pp. 644-652, Dec. 2015.

جدول ۳: هزینه پرداختی به هر یک از تولیدکنندگان برای تولید هر یک از مؤلفه‌های توان.

مشارکت‌کننده	نماد	مؤلفه‌های توان اکتیو	مؤلفه‌های توان راکتیو	میزان پرداختی به هر یک از تولیدکنندگان
PEV1	۰٫۲	۰٫۲۳	۰٫۴۳	
PEV2	۰٫۱۱	۰٫۲۴	۰٫۳۵	
PEV3	۰٫۱۰	۰٫۱۹	۰٫۲۹	
PEV4	۰٫۱۰	۰٫۲۰	۰٫۳۰	
PEV5	۰٫۳	۰٫۱۰	۰٫۴۰	۳٫۷
PEV6	۰٫۲۲	۰٫۱۴	۰٫۳۶	
PEV7	۰٫۲۵	۰٫۱۷	۰٫۴۲	
PEV8	۰٫۲۷	۰٫۱۱	۰٫۳۸	
PEV9	۰٫۱۵	۰٫۲۰	۰٫۳۵	
PEV10	۰٫۲۱	۰٫۲۱	۰٫۴۲	
ژنراتور	Gen1	۸٫۸۹	۰٫۸۰	۹٫۶۹
جمع کل پرداختی		۱۰٫۸۰	۲٫۵۹	۱۳٫۳۹

جدول ۴: هزینه‌های مختلف در اثر مشارکت و عدم مشارکت خودروها در تولید توان.

وضعیت	مشارکت‌کننده	هزینه توان اکتیو	هزینه توان راکتیو	جمع
مشارکت خودرو	خودرو	۱٫۹۱	۱٫۷۹	۳٫۷
خودروها	ژنراتور	۸٫۸۹	۰٫۸۰	۹٫۶۹
عدم مشارکت خودروها	مجموع	۱۰٫۸۰	۲٫۵۹	۱۳٫۳۹
	ژنراتور	۱۱٫۴۶	۳٫۱۴	۱۴٫۶
	مجموع	۱۱٫۴۶	۳٫۱۴	۱۴٫۶

توان‌های اکتیو و راکتیو که ژنراتور است باید پردازد که از این مقدار ۱۱٫۴۶ دلار برای تولید توان اکتیو و ۳٫۱۴ دلار نیز برای تولید توان راکتیو پرداخت کند. به همین دلیل میزان پرداختی بابت تولید توان‌های اکتیو و راکتیو در صورت عدم مشارکت خودروها از ۱۳٫۳۹ به ۱۴٫۶ دلار افزایش یافته است (حدود ۹ درصد).

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله چارچوبی جهت اختصاص ظرفیت خودروهای برقی به هر یک از توان‌های اکتیو و راکتیو ارائه شد. چارچوب مورد نظر در قالب یک مسئله بهینه‌سازی با هدف تأمین مؤلفه‌های توان‌های مورد نیاز شبکه فرمول‌بندی شد. هدف اصلی نیز حداقل‌سازی هزینه‌های پرداختی به تولیدکنندگان تحت قیود و محدودیت‌های شبکه بود. برای حل مسئله مورد نظر از الگوریتم اجتماع ذرات استفاده گردید. برای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم و جلوگیری از گیرافتادن الگوریتم در بهینه‌های محلی، راهکارهایی نیز در نظر گرفته شد. مسئله مورد نظر بر روی یک شبکه نمونه ولتاژ پایین شامل ۱۳۴ مشترک خانگی و ۱۰ دستگاه خودروی برقی پیاده‌سازی شد و برای دو حالت با حضور خودروها و بدون مشارکت خودروها ارزیابی انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان دادند در صورت حضور خودروها، DSO باید ۱۳٫۳۹ دلار برای تأمین توان‌های مورد نیاز پردازد در حالی که اگر خودروها حضور نداشته باشند تولید توان اکتیو و راکتیو بر عهده ژنراتور خواهد بود که با توجه به قیمت‌های پیشنهادی نسبتاً بالای ژنراتور برای توان‌های اکتیو و راکتیو، در این حالت DSO باید ۱۴٫۶ دلار برای این منظور پردازد که نشان می‌دهد هزینه پرداختی حدود ۹ درصد افزایش یافته است.

- deployment problem," *J. of Automatic Control*, vol. 18, no. 1, pp. 9-14, Jan. 2008.
- [30] DiGSILENT GmbH Germany, *DiGSILENT PowerFactory Software Package*, <http://www.digsilent.de>, 2014.
- [31] New York Daily Market Price, <http://mis.nyiso.com/public/P-2Alist.htm>.
- **حسن فشکی فراهانی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در رشته مهندسی برق - الکترونیک از دانشگاه شاهد، کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۸۳ و در مقطع دکتری مهندسی برق در سال ۱۳۹۱ از واحد علوم و تحقیقات تهران دانشگاه آزاد اسلامی به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد آشتیان می‌باشد. نام‌برده به مدت ۱۳ سال به عنوان عضو هیأت علمی مشغول به تدریس می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: الکترونیک قدرت، خودروهای الکتریکی و سیستم‌های قدرت.
- فرزان رشیدی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی برق به ترتیب در دانشگاه شیراز، دانشگاه تهران و دانشگاه صنعتی شیراز به پایان رسانده و هم‌اکنون عضو هیأت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه هرمزگان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده عبارتند از: انرژی‌های نو، بازار برق، ریزشبکه‌ها، کیفیت توان و روش‌های بهینه‌سازی هوشمند.
- [22] H. F. Farahani, M. Khalili, A. Rabiee, and M. S. Ghazizadeh, "On the application of plug-in hybrid electric vehicle to compensate network harmonics: a multiobjective approach," *Scientia Iranica. Trans. D, Computer Science & Engineering, Electrical*, vol. 21, no. 6, pp. 2177-2185, Nov./Dec. 2014.
- [23] P. Richardson, D. Flynn, and A. Keane, "Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 27, no. 1, pp. 268-279, Feb. 2012.
- [24] A. Rabiee, H. Shayanfar, and N. Amjady, "Multiobjective clearing of reactive power market in deregulated power systems," *Applied Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1555-1564, Sept. 2009.
- [25] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Netw.*, vol. 4, pp. 1942-1948, Oct. 1995.
- [26] D. Tang, *et al.*, "A quantum-behaved particle swarm optimization with memetic algorithm and memory for continuous non-linear large scale problems," *Information Sciences*, vol. 289, no. 2, pp. 162-189, Dec. 2014.
- [27] P. Li and H. Xiao, "An improved quantum-behaved particle swarm optimization algorithm," *Applied Intelligence*, vol. 40, no. 3, pp. 479-496, Apr 2014.
- [28] H. Izakian, B. Tork Ladani, A. Abraham, and V. Snasel, "A discrete particle swarm optimization approach for grid job scheduling," *International J. of Innovative Computing, Information and Control*, vol. 6, no. 9, pp. 1-15, Sept. 2010.
- [29] M. R. Rapaic, Z. Kanovic, and Z. D. Jelicic, "Discrete particle swarm optimization algorithm for solving optimal sensor