

# برنامه‌ریزی اقتصادی - زیست‌محیطی چندهدفه ریزشبه‌ها در حضور خودروهای الکتریکی هیبریدی و برنامه پاسخگویی بار در جهت هموارسازی قیمت‌های گرهی توزیع

علی میرزایی، نوید تقی‌زادگان کلانتری و سجاد نجفی روادانق

**چکیده:** امروزه با رشد تقاضای خودروهای الکتریکی هیبریدی در ریزشبه‌ها، تأمین برق، مسائل زیست‌محیطی و زمان‌بندی مجدد از جمله چالش‌های ریزشبه‌هاست که باید حل و راه‌حل‌های مناسبی ارائه شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، این مقاله یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جدید را معرفی می‌کند که در هدف اول، هزینه کل بهره‌برداری ریزشبه‌ها را به حداقل می‌رساند و در هدف دوم با کاهش مقدار انرژی تأمین‌نشده، مقدار شاخص قابلیت اطمینان را بهبود می‌بخشد. به دلیل این دو هدف، الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی چندهدفه تکاملی برای یافتن بهترین راه‌حل‌های محلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا خودروهای الکتریکی هیبریدی و برنامه‌های پاسخ به تقاضا برای هموارسازی قیمت‌های گرهی توزیع و کاهش میزان انتشار دی‌اکسید کربن استفاده می‌شود. شبکه توزیع ۶۹ باسه برای ارزیابی کارایی روش پیشنهادی استفاده گردیده است.

**کلیدواژه:** ریزشبه‌ها، خودروی الکتریکی، الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی چندهدفه تکاملی، انرژی تجدیدپذیر، قیمت‌های گرهی توزیع، برنامه پاسخگویی بار.

## اصطلاحات

$t$ : شاخص زمان

$l$ : شاخص خط

$b$ : شاخص تعداد خودروهای الکتریکی

$k$ : شاخص تعداد منابع تولید پراکنده

$N_{DER}$ : مجموعه منابع تولید پراکنده

$N_{SEV}$ : مجموعه خودروهای الکتریکی

$N_l$ : مجموعه خطوط شبکه توزیع

$F_1$ : تابع هدف اول (هزینه‌های بهره‌برداری)

$F_2$ : تابع هدف دوم (میزان انرژی تأمین‌نشده)

$C^{Upstream}$ : هزینه مبادله برق با شبکه بالادست

این مقاله در تاریخ ۳ دی ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۱۶ مرداد ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

علی میرزایی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: g.mirzaei@azaruniv.ac.ir)

نوید تقی‌زادگان کلانتری (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: taghizadegan@azaruniv.ac.ir)

سجاد نجفی روادانق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: s.najafi@azaruniv.ac.ir)

$C^{DER}$ : هزینه منابع تولید پراکنده

$C^{ch/Dch}$ : هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی

$C^{DR}$ : هزینه اجرای برنامه پاسخگویی بار

$C^{Cong}$ : هزینه تراکم خطوط توزیع

$C^{Loss}$ : هزینه تلفات

$P_t^{Upstream}$ : توان مبادله‌شده با شبکه بالادست

$P_{kt}^{DER}$ : توان تولیدی توسط منابع تولید پراکنده

$P_{bt}$ : میزان توان شارژ و دشارژ شده توسط خودروهای الکتریکی در

زمان  $t$

$C_{bt}$ : ضریب هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی

$U_{bt}$ : ضریب بهره‌برداری در زمان  $t$

$DR_t$ : میزان توان مصرفی در برنامه پاسخگویی بار

$P_{t,l}$ : توان اکتیو عبوری خط  $l$  ام

$P_{t,l}^{Cap}$ : ظرفیت خط  $l$  ام

$\mu_t$ : ضریب هزینه که مقدار توان را به هزینه تبدیل می‌کند.

$R_l$ : مقاومت خط  $l$  ام

$I_{lt}$ : جریان عبوری از خط  $l$  ام در زمان  $t$

$ENS_i$ : مقدار انرژی تأمین‌نشده در باس  $i$

$P_i(\dots)$ : سهم هر نوع بار اعم از صنعتی، تجاری، مسکونی، عمومی

و کشاورزی

$k_i$ : میزان اهمیت بار  $i$  ام در شبکه توزیع

$\lambda$ : نرخ خرابی

$U$ : زمان قطعی متوسط

$r$ : نرخ تعمیر

$P_t^{Demand}$ : مقدار توان مصرفی در زمان  $t$

$P_{n,t}^{PEV,Ch}$ : مقدار توان شارژ شده توسط خودروی الکتریکی  $n$  ام در

زمان  $t$

$P_{n,t}^{PEV,Dis}$ : مقدار توان دشارژ شده توسط خودروی الکتریکی  $n$  ام در

زمان  $t$

$P_t^{Loss}$ : مقدار تلفات توان در زمان  $t$

$P_t^{PV}$ : مقدار توان تولیدی توسط پنل‌های خورشیدی

$P_t^{WT}$ : مقدار توان تولیدی توسط توربین‌های بادی

$P_t^{CHP}$ : مقدار توان تولیدی توسط واحدهای تولید هم‌زمان برق

و حرارت

$V_i$ : اندازه ولتاژ در باس  $i$  ام

$V_i^{\max}$  و  $V_i^{\min}$ : حداقل و حداکثر اندازه ولتاژ

الکتریکی، منابع تولید پراکنده، تقاضا و قیمت بازار برق، مدل پیشنهادی به عنوان یک مسئله برنامه ریزی تصادفی دومرحله‌ای توسعه داده شد.

مرجع [۷] عملکرد بهینه ریزشبه‌های حاوی دستگاه‌های ذخیره‌ساز انرژی، خودروهای الکتریکی هیبریدی و منابع تولید پراکنده را مطالعه می‌کند. الگوریتم جستجوی گرانشی ترکیبی و جستجوی الگو برای مقابله با مشکل پیشنهادی استفاده می‌شود. یک مدل چندهدفه در [۸] با در نظر گرفتن اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی در ریزشبه از جمله خودروهای الکتریکی فرموله شده است. روش وزن‌دهی خطی بر اساس تئوری بازی برای هماهنگ کردن مصرف واحد منابع تولید پراکنده با تحمل کل بار و تعادل بهتر دو هدف به کار گرفته شده است. علاوه بر این، یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تبرید شبیه‌سازی شده تطبیقی برای حل مسئله پیشنهادی و به دست آوردن راه‌حل‌های بهینه جهانی استفاده شده است. مرجع [۹] یک مسئله بهینه‌سازی جدید را پیشنهاد می‌کند که منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی هیبریدی را با استفاده از روش‌های احتمالی برای افزایش عرضه بار و کاهش وابستگی ریزشبه به شبکه اصلی ترکیب می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات اصلاح‌شده تطبیقی برای بهره‌برداری ریزشبه در حضور منابع تغذیه هیبریدی میکروتوربین/پیل سوختی/باتری با هدف کاهش هزینه استفاده می‌شود [۱۰]. در [۱۱] یک چارچوب استراتژی مناقصه تجمیع‌کننده خودروهای الکتریکی دوسطحی بحث شده که در آن هدف سطح بالایی، کاهش هزینه‌های شارژ و هدف سطح پایین‌تر، حداکثر کردن رفاه اجتماعی است. محدودیت‌های شبکه در نظر گرفته نمی‌شوند و نیز فرض می‌گردد که تمام منابع مانند تولید، تجمیع‌کننده‌های خودروهای الکتریکی و بارها در یک گره قرار می‌گیرند.

موضوع مدیریت تراکم پیشرفت بسیار خوبی داشته است؛ با این حال مسائل و کاستی‌های متعددی وجود دارند که نیازمند توجه کافی هستند. در موارد زیر به طور خلاصه به شکاف‌های مراجع قبلی اشاره شده است:

الف) عمدتاً بر کاهش تراکم از طریق بکارگیری ادوات FACTS یا برنامه‌ریزی مجدد ژنراتورها تمرکز کرده‌اند و تأثیر اضافه بار بر روی قیمت‌های گرهی و در نتیجه شاخص رفاه اجتماعی سیستم به طور کامل بررسی نشده است.

ب) مدیریت تراکم منابع تولید پراکنده در مورد بهینه‌سازی چندهدفه برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و پاسخگویی بار منتشر نشده است.

ج) در مبحث مدیریت تراکم از ابزار مناسبی برای کنترل عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر مانند منابع بادی و خورشیدی استفاده نشده است.

برای پرداختن به کاستی‌های ادبیات قبلی، این مقاله سعی دارد نوآوری‌های زیر را ارائه دهد:

۱) برای رفع اولین کاستی (الف)، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه مؤثر ایجاد شده که در آن هزینه‌های بهره‌برداری را به حداقل و همچنین میزان رفاه اجتماعی را به حداکثر می‌رساند.

۲) برای رفع دومین کاستی (ب)، یک مدل برنامه‌ریزی مشارکتی خودروهای الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی بار پیشنهاد شده که می‌تواند مدیریت تراکم را تسهیل کند.

۳) برای رفع سومین کاستی (ج) از ابزار مدیریت عدم قطعیت مبتنی بر شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است.

جدای از نوآوری‌های اصلی ذکرشده در بالا، برخی از نوآوری‌های اضافی به شرح زیر پیشنهاد شده است:

v: سرعت باد در مزرعه بادی تحت مطالعه

$v_{rat}$ : سرعت نامی در توربین بادی

$T_C$  و  $T_{ref}$ : دمای محیط و دمای پنل‌های خورشیدی

$T_a$ : دمای محیط

$G_{ING}$  و  $G_{STG}$ : میزان تابش نور خورشید در شرایط استاندارد و

شرایط تحت مطالعه

G: میزان تابش نور خورشید جهانی

NOCT: دمای بهره‌برداری سلول خورشیدی

$P_i^{rat}$ : توان نامی توربین‌های بادی نصب‌شده در باس i

$P_{STG}$ : خروجی نامی سلول‌های خورشیدی

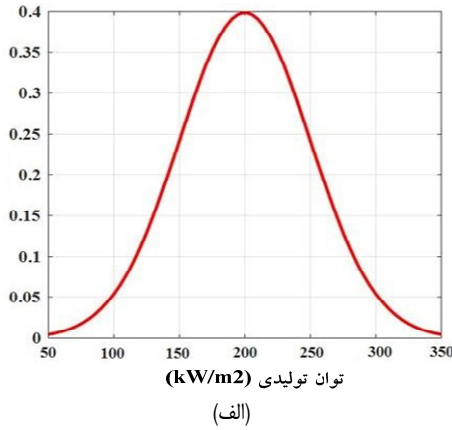
x و  $\gamma$ : پارامترهای تابع بتا

## ۱- مقدمه

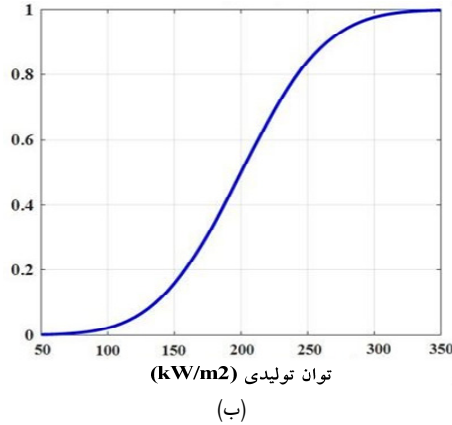
کاربرد گسترده خودروهای الکتریکی در شبکه‌های توزیع، منجر به افزایش تقاضای برق در دهه اخیر شده که باعث مشکلات فنی متعددی مانند بارگیری یا تراکم خطوط، افزایش قیمت برق، کمبود ظرفیت تولید و آلودگی زیست‌محیطی گردیده است. بارگذاری بیش از حد خطوط شبکه باعث ناهماهنگی بین تولید و مصرف می‌شود که به عنوان تراکم در شبکه توزیع تعریف می‌شود. تراکم، اثرات مخربی مانند خرابی تجهیزات روی شبکه دارد [۱]. نفوذ بالای خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده مانند سلول‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت، باعث تراکم در شبکه‌های توزیع می‌شود که چالشی بزرگ برای اپراتورهای سیستم توزیع است.

با توجه به این توضیحات، تراکم یا اضافه بار خطوط شبکه توزیع باید کاهش یابد و مدیریت شوند. نصب منابع تولید پراکنده محلی و نصب ادوات FACTS، مصرف‌کنندگان را تشویق می‌کند تا الگوهای مصرف خود را از طریق روش‌های بازارمحور مثل برنامه‌های پاسخگویی بار اصلاح کنند. این موارد از جمله واحدهایی است که اپراتورهای سیستم توزیع می‌توانند برای تغییر مقدار توان اکتیو در گره‌ها استفاده کنند [۲]. استفاده گسترده از دیزل ژنراتورها، نیروگاه‌های سنتی و خودروهای برقی هیبریدی همگی به افزایش آلودگی هوا کمک می‌کنند. اخیراً مناطق شهری خاصی در حفظ سطح کیفی هوای قابل قبول با مشکل مواجه بوده‌اند و سطوح بالای آلاینده‌های کلیدی، گاهی اوقات از حد مجاز فراتر رفته است [۳].

زمان‌بندی ریزشبه‌ها توجه زیادی را به خود جلب کرده و مطالعات مختلفی در این زمینه منتشر شده است. بنابراین، این مقاله قصد دارد به بررسی چندین مقاله مرتبط و به روز در این بخش بپردازد. بهره‌برداری ریزشبه برای روز آینده شامل منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر مانند توربین‌های بادی، پنل‌های خورشیدی و خودروهای الکتریکی هیبریدی در [۴] بحث شده است. همچنین عدم قطعیت‌های پیشنهادی در این مقاله دقیقاً در مدیریت بهینه ریزشبه با استفاده از ابزار شبیه‌سازی مونت کارلو مدل‌سازی شده‌اند. یک بهره‌برداری بهینه تصادفی غیرخطی غیرمحدب جدید از یک ریزشبه مجهز به ذخیره‌سازهای انرژی هوای فشرده و خودروهای الکتریکی در [۵] پیشنهاد شده است. تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی برای غلبه بر ماهیت احتمالی مسئله و نیز برای حل مسئله از روش برنامه‌ریزی نیمه‌معین استفاده می‌شود. مرجع [۶] برنامه‌ریزی بهینه ریزشبه‌های هوشمند مجهز به منابع تولید پراکنده، برنامه‌های پاسخگویی بار، خودروهای الکتریکی هیبریدی و ژنراتورهای دیزل را با هدف به حداقل رساندن هزینه‌های بهره‌برداری معرفی می‌کند. علاوه بر این برای بررسی ریسک مربوط به رفتارهای مالک خودروهای

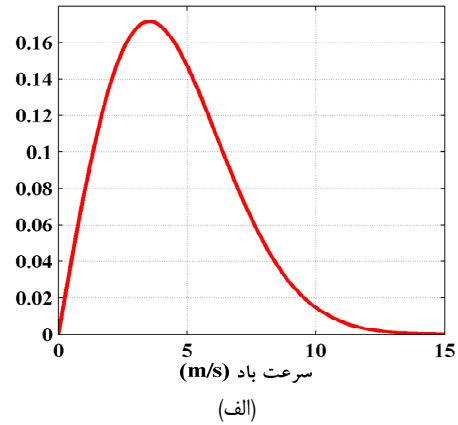


(الف)

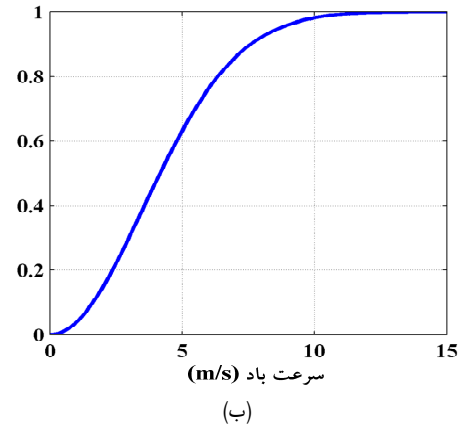


(ب)

شکل ۲: (الف) PDF و (ب) CDF واحدهای خورشیدی.



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) PDF و (ب) CDF توربین بادی.

سرعت باد از تابع چگالی احتمالاتی ویبول استفاده شده است [۱۲]

$$PDF(v) = \frac{S}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{s-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^s\right) \quad (1)$$

تابع چگالی احتمالاتی ویبول با (۱) تعریف می‌شود. با در نظر گرفتن سرعت نیروی باد، توان تولیدشده توسط توربین‌های بادی در زمان  $t$  با (۲) ارائه شده است

$$P_{n,t}^{wind}(v) = \begin{cases} P_b^{rat} & , v_{rat} \leq v \leq v_{c,out} \\ \frac{v - v_{c,in}}{v_{rat} - v_{c,in}} & , v_{c,in} \leq v \leq v_{rat} \\ 0 & , v \leq v_{c,in} \text{ and } v \geq v_{c,out} \end{cases} \quad (2)$$

### ۲-۲ واحدهای خورشیدی

در این مقاله از تابع توزیع احتمالاتی بتا برای مدل‌سازی عدم قطعیت واحدهای خورشیدی استفاده شده است. در این روش، پارامترهای مهم واحد خورشیدی مانند شدت نور خورشید و درجه حرارت محیط به صورت تصادفی و سپس تابع توزیع احتمالاتی بتا برای هر پارامتر تعریف می‌شود. سپس با استفاده از مدل‌های انرژی خورشیدی، باتری‌های ذخیره انرژی و سایر پارامترهای مرتبط با واحد خورشیدی، عملکرد واحد بادی با در نظر گرفتن تمام ترکیبات مختلف پارامترهای تصادفی محاسبه می‌شود. در نهایت با تحلیل داده‌های حاصل و استفاده از تابع توزیع احتمالاتی بتا می‌توان احتمالات مختلف عملکرد واحد خورشیدی را محاسبه کرد. خروجی آرایه‌های خورشیدی به زاویه و شدت تابش نور خورشید بستگی دارد. تابع چگالی احتمالاتی بتا (PDF- $\beta$ ) برای پیش‌بینی مقدار تابش نور خورشید استفاده می‌شود و در شکل ۲ نشان داده شده است. واحدهای خورشیدی تبدیل نور خورشید به انرژی الکتریکی بدون تولید هیچ گونه

(۱) برنامه‌ریزی چندهدفه بهینه ریزشکه‌های متصل به شبکه اصلی

با ادغام خودروهای الکتریکی هیبریدی و برنامه پاسخگویی بار.

(۲) استفاده از منابع تولید پراکنده، الگوهای مختلف شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و برنامه پاسخگویی بار برای کاهش میزان تراکم و هموارسازی قیمت‌های گرهی توزیع.

در بخش ۲ به مدل‌سازی منابع تولید پراکنده اشاره شده و در بخش ۳، مدل‌سازی مسئله پیشنهادی آمده است. چارچوب کلی الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی چندهدفه تکاملی در بخش ۴ ارائه شده است. نتایج عددی و شبیه‌سازی در بخش ۵ تحلیل و بررسی گردیده و نهایتاً نتیجه‌گیری کلی در بخش ۶ آمده است.

### ۲- مدل‌سازی منابع تولید پراکنده

#### ۱-۲ توربین‌های بادی

مدل‌سازی عدم قطعیت واحدهای بادی با استفاده از تابع چگالی احتمالاتی، روشی پرکاربرد در ارزیابی عملکرد واحدهای بادی است. در این روش، ابتدا پارامترهای مهم واحد بادی مانند سرعت باد و پارامترهای فیزیکی بادی به صورت تصادفی و سپس تابع چگالی احتمالاتی برای هر پارامتر تعریف می‌شود. پس از آن با استفاده از مدل‌های سرعت باد، توربین بادی و سایر پارامترهای مرتبط با واحد بادی، عملکرد واحد بادی با در نظر گرفتن تمامی ترکیب‌های مختلف پارامترهای تصادفی محاسبه می‌شود و نهایتاً با تحلیل داده‌های حاصل و استفاده از تابع چگالی احتمالاتی می‌توان احتمالات مختلف عملکرد واحد بادی را محاسبه کرد. PDF و CDF سرعت باد در شکل ۱ بر اساس اطلاعات استاتیکی مکان‌هایی است که توربین بادی در آنها نصب شده‌اند. سرعت و توان باد از عوامل اصلی مؤثر در تولید توربین‌های بادی هستند. برای پیش‌بینی

مشخصی برق تولید می‌کند. معادله ریاضی واحد تولید همزمان برق و حرارت به صورت (6) است. در (6)،  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  ضرایب تابع واحدهای تولید همزمان برق و حرارت هستند. با توجه به آنکه میزان تولید برق و حرارت توسط CHP به یکدیگر وابسته‌اند، محدود کردن تولید برق باعث می‌شود تولید حرارت نیز محدود گردد

$$P_{c,t}^{CHP} = \alpha + \beta P_{CHP} + \gamma P_{CHP}^x, \quad \forall c \in N_{CHP} \quad (6)$$

## 2-4 نحوه مدل‌سازی واحدهای تولید پراکنده در برنامه پخش بار پیشرو-پسرو

برای مدل‌سازی واحدهای تولید پراکنده در برنامه پخش بار پیشرو-پسرو، ابتدا باید نوع واحدهای تولید مورد نظر برای مدل‌سازی تعیین شود. این واحدها شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و واحدهای تولید همزمان برق و حرارت هستند. سپس تعداد و موقعیت واحدهای تولید بادی و خورشیدی در شبکه استاندارد برق ۶۹ باسه مشخص می‌شود. قدرت تولید باد و شدت تابش خورشید در هر باس و زمان با استفاده از داده‌های هواشناسی محاسبه می‌شود. این قدرت تولید به‌عنوان یک منبع بالقوه در برنامه پخش بار پیشرو-پسرو در نظر گرفته می‌شود. مدل‌سازی واحدهای تولید پراکنده به‌عنوان تزریق‌کننده توان ثابت در معادلات پخش بار انجام می‌شود. برای این کار، توان اکتیو تولیدی توسط واحدهای تولید پراکنده به مبدأ تزریق توان مربوط در معادلات پخش بار اضافه شده است. تولید بهینه منابع تولید پراکنده در هر ساعت با توجه به مصرف شبکه و قیمت تولید برق شبکه بالادستی (با در نظر گرفتن معادله تعادل توان شبکه) بر اساس الگوریتم چندهدفه مرغ دریایی تعیین می‌شود. این نتایج به‌صورت ساعتی در دیتاهای پخش بار، وارد و به‌روزرسانی می‌شوند و تمام خروجی‌های مرتبط با پروفیل ولتاژ، تلفات و توان‌های اکتیو عبوری از خطوط توسط پخش بار در هر ساعت تعیین می‌گردد.

## 2-5 بار مصرفی

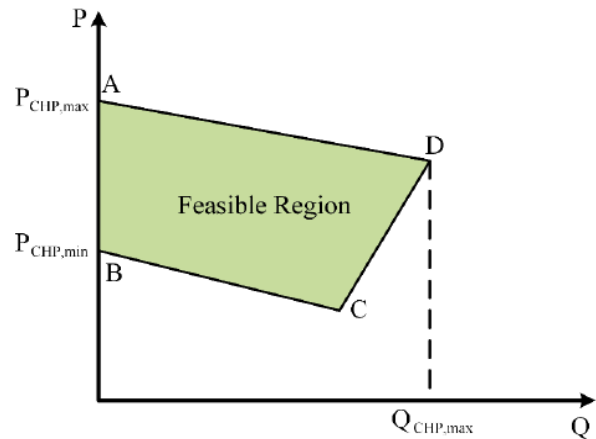
در شبکه‌های توزیع پیش‌بینی بار، یکی از مهم‌ترین ورودی‌های فرایند طراحی بهینه شبکه است که در انتهای آن، میزان مصرف شبکه در ساعات آتی تعیین می‌شود. در بهره‌برداری شبکه‌های توزیع، عدم قطعیت در برآورد بار یا به عبارت دیگر خطای برآورد بار به یک تابع توزیع می‌تواند مدل‌سازی شود که در آن میانگین خطای برآورد صفر و انحراف معیار آن برابر مقدار یا درصد خطای برآورد بار است. در صورتی که تابع توزیع احتمال برای مقدار بار برآورد شده نوشته شود، میانگین تابع برابر مقدار بار برآورد شده قطعی خواهد بود. رابطه (7) تابع توزیع احتمال بار برآوردی را برای روز آینده نشان می‌دهد

$$F_L(P_D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} \exp\left(-\frac{(P_D - \xi)^2}{2 \times \sigma^2}\right) \quad (7)$$

## 3- مدل‌سازی مسئله

### 3-1 تابع هدف اول (هزینه بهره‌برداری ریز شبکه)

تابع هدف پیشنهادی، حداقل هزینه بهره‌برداری ریز شبکه‌ها را شناسایی می‌کند. معادله (8) توان مبادله‌شده با شبکه بالادستی  $C^{Upstream}$ ، میزان تولید برق توسط منابع تولید پراکنده  $C^{DER}$  و مقدار شارژ و دشارژ خودروهایی الکتریکی  $C^{ch/Dch}$  را نشان می‌دهد. همچنین در تابع هدف، هزینه اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار  $C^{DR}$  و مجموع هزینه انتشار محیطی  $C^{Emission}$  نشان داده می‌شود. علاوه بر این، تراکم خطوط توزیع



شکل 3: منطقه بهره‌برداری عملی واحدهای تولید همزمان برق و حرارت.

انتشار گاز کربن دی‌اکسید هستند. هم زاویه و هم شدت نور خورشید عامل اصلی در میزان تولید واحدهای خورشیدی هستند

$$PDF(x) = x^{\gamma-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (3)$$

تابع توزیع بتا با (3) تعریف می‌شود. توان تولیدی واحدهای خورشیدی را می‌توان در یک سیستم مستقل نگه داشت؛ می‌توان آن را در واحدهای ذخیره‌ساز انرژی ذخیره کرد یا می‌توان شبکه برق بیشتری را تغذیه کرد. علاوه بر این، تولید برق واحدهای خورشیدی بر اساس دمای محیط و شدت نور خورشید تعیین می‌شود که می‌تواند به صورت زیر محاسبه شود

$$P_{m,t}^{pv} = P_{STG} \times \frac{G_{ING}}{G_{STG}} \times (1 + k(T_C - T_{C,ref})) , \quad \forall t \in T \quad (4)$$

مقدار توان تولیدشده توسط واحدهای خورشیدی از طریق واحد  $m$  در زمان  $t$  در (4) نشان داده شده است. همچنین دمای سلول را می‌توان به صورت (5) ارائه کرد

$$T_C = T_a + \frac{NOCT - 20}{0.8} \times G \quad (5)$$

دمای استاندارد بهره‌برداری سلول‌های خورشیدی بستگی به شرایط آزمایشگاهی و استاندارد مورد استفاده دارد؛ اما در بسیاری از موارد به‌عنوان دمای استاندارد 25 درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شود. در این شرایط، بهره‌وری سلول‌های خورشیدی برای بسیاری از تکنولوژی‌های موجود، بهترین مقدار را دارد. این دمای استاندارد برای ارزیابی و مقایسه سلول‌های خورشیدی با یکدیگر استفاده می‌شود و در شرایط واقعی استفاده از سلول‌های خورشیدی، دمای سلول بستگی به شرایط هواشناسی و شرایط اجرایی دارد و ممکن است با دمای استاندارد متفاوت باشد.

## 2-3 واحدهای تولید همزمان برق و حرارت

واحد تولید همزمان برق و حرارت به عنوان یک فناوری تولید همزمان است که گاز طبیعی را در سمت ورودی خود، دریافت و در خروجی خود به‌طور همزمان، برق و حرارت تولید می‌کند. این دستگاه که عامل مهمی در اتصال گاز طبیعی و برق می‌باشد به دلیل راندمان بالای آن مورد توجه قرار گرفته است. واحدهای تولید همزمان برق و حرارت را می‌توان به سه گروه اصلی شامل فقط برق، فقط حرارت و برق و حرارت طبقه‌بندی کرد که در این مقاله از واحد برق و حرارت استفاده شده است. واحد تولید همزمان برق و حرارت دارای یک منطقه بهره‌برداری عملی بوده که در شکل 3 نشان داده شده است. تولید برق و حرارت توسط واحدهای CHP به یکدیگر وابسته است؛ یعنی برای مقدار خاصی از تولید حرارت، مقدار

$$C^{Emission} = \sum_{t=1}^{Tf} [(P_t^{Grid} \times C^{Grid-EM}) + (P_t^{CHP} \times C^{CHP-EM}) + (P_t^{PHEV} \times C^{PHEV-EM})] \quad (17)$$

۳-۱-۶ هزینه تراکم خطوط

معادله (۱۸) هزینه تراکم خطوط توزیع را نشان می‌دهد. هدف از این تابع، مدیریت تراکم خطوط توزیع و در نتیجه هموارسازی قیمت‌های گرهی توزیع به منظور افزایش رضایت مشتریان است. جریمه صرفاً برای زمان‌هایی تعیین گردیده که میزان توان اکتیو عبوری از خط توزیع بیشتر از ظرفیت همان خط باشد. به همین منظور، قیدی در برابر (۱۸) تعریف شده تا نشان دهد که اعتبار این رابطه فقط برای خطوطی برقرار است که میزان توان عبوری آنها بیشتر از ظرفیت خط باشد و در این حالت مشمول جریمه قرار می‌گیرند. در وضعیت کارکرد خط در مقادیر کمتر از حداکثر، خط در وضعیت کارکرد عادی خود قرار دارد و مصرف‌کنندگان نهایی را تأمین می‌کند و هیچ گونه هزینه اضافی در قیمت‌های گرهی شبکه توزیع محاسبه نمی‌شود

$$C^{Cong} = \sum_{t=1}^{Tf} \sum_{l=1}^{N_l} [(P_{t,l} - P_{t,l}^{Cap}) \times \mu_l] \text{ if } P_{t,l} > P_{t,l}^{Cap} \quad (18)$$

۳-۱-۷ هزینه تلفات سیستم

هزینه تلفات توان ریزشکه‌های مختلف را می‌توان به‌عنوان حاصل ضرب مقاومت خط با مجذور جریان هر خط (بین دو گره در شبکه) طبق (۱۹) محاسبه کرد

$$C^{Loss} = C^{Loss} \times \sum_{l=1}^{N_l} R_l \times I_{lt}^2 \quad (19)$$

۳-۲-۲ تابع هدف دوم (انرژی تأمین نشده مشتریان)

میزان انرژی تأمین نشده مشتریان، نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ریزشکه‌ها دارد و در این مقاله از باتری‌های خودروهای الکتریکی هیبریدی به‌عنوان یک واحد ذخیره‌سازی در ریزشکه‌ها استفاده می‌شود. پارامترهایی که پیامدهای خاموشی در ریزشکه‌ها را نشان می‌دهند به شرح زیر در نظر گرفته می‌شوند

$$\min F_v = ENS_T = \sum_{i=1}^L (P_i \times ENS_i \times K_i) \quad (20)$$

$$P_i = \{P_i(res) + P_i(com) + P_i(ind) + P_i(agr) + P_i(gen)\} \quad (21)$$

ضرایب نقاط بار قابلیت اطمینان مانند نرخ خرابی، نرخ تعمیر و مقدار قطعی به‌صورت (۲۲) تا (۲۴) محاسبه می‌شوند

$$\lambda_s = \sum_{i \in A} \lambda_i \text{ (f/day)} \quad (22)$$

$$U_s = \sum_{i \in A} \lambda_i r_i \text{ (h/day)} \quad (23)$$

$$ENS = PU_s \text{ (Wh/day)} \quad (24)$$

۳-۳-۳ قیود مسئله

۳-۳-۱ قیود مساوی

معادله (۲۵) موازنه توان را نشان می‌دهد که طرف چپ و راست این معادله باید همیشه با هم برابر باشند. سمت چپ معادله، میزان مصرف کل شبکه، شارژ خودروهای الکتریکی و تلفات برق سیستم را نشان می‌دهد و

و میزان تلفات توان فعال به ترتیب به‌صورت  $C^{Cong}$  و  $C^{Loss}$  در (۸) نشان داده شده است

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{Tf} (C^{Upstream} + C^{DER} + C^{ch/Dch} + C^{DR} + C^{Emission} + \sum_{l=1}^{N_l} (C^{Cong} + C^{Loss})) \quad (8)$$

۳-۱-۱ هزینه شبکه بالادستی

مقدار توان خرید و فروش مبادله‌شده با انواع نیروگاه‌های بالادستی برای افق زمانی بهره‌برداری به صورت (۹) ارائه شده است

$$C^{Upstream} = C_t^{Upstream} \times P_t^{Upstream} \quad (9)$$

۳-۱-۲ هزینه منابع تولید پراکنده

هزینه کل منابع تولید پراکنده در (۱۰) در نظر گرفته شده که مجموع توان تولیدشده در هر واحد تولید پراکنده (شامل توربین‌های بادی، واحدهای خورشیدی و تولید همزمان برق و حرارت) در هر ضریب خود ضرب می‌شود تا آنها را به هزینه تولید خود تغییر دهد

$$C^{DER} = \sum_{k=1}^{N_{DER}} C_{kt}^{DER} \times P_{kt}^{DER} \quad (10)$$

۳-۱-۳ هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی

تعرفه شارژ/ دشارژ شامل کل هزینه انرژی الکتریکی خودرو الکتریکی هیبریدی در ریزشکه می‌باشد که در (۱۱) آمده است

$$C^{ch/Dch} = \sum_{b=1}^{N_{SEV}} U_{bt} \times C_{bt} \times P_{bt} \quad (11)$$

۳-۱-۴ هزینه اجرای برنامه پاسخگویی بار

از گزینه‌های مناسب مدیریت پروفایل بار که اپراتور سیستم می‌تواند ارائه دهد، برنامه پاسخگویی بار است. در این مقاله، برنامه پاسخگویی بار مبتنی بر تشویق برای مصرف‌کنندگان، اعمال و مشخصات بار با استفاده از (۱۳) پس از اجرای برنامه پاسخگویی بار محاسبه می‌شود. مقدار توان مصرفی جابه‌جاشده تحت برنامه پاسخگویی بار با (۱۴) و (۱۵) محاسبه می‌شود. در این مقاله، ریزش بار نباید در سیستم اتفاق بیفتد و از این رو، تمام خاموشی‌ها در پروفایل بار در زمان‌های پرباری باید در طول افق زمانی پیشنهادی (۲۴ ساعت) همان طور که در (۱۶) نشان داده شده است، جبران شود

$$C^{DR} = C^{DR} \times DR_t \quad (12)$$

$$P_{i,t}^{DR} = P_{i,t}^* + DR_t \quad (13)$$

$$DR_t \leq DR^{\max} \times P_{i,t}^* \quad (14)$$

$$DR_t \geq -DR^{\max} \times P_{i,t}^* \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^{Tf} DR_t = 0 \quad (16)$$

۳-۱-۵ هزینه انتشار آلاینده‌ها

مقدار آلاینده‌ها منتشرشده توسط نیروگاه‌ها، واحدهای تولید همزمان برق و حرارت و خودروهای الکتریکی هیبریدی در (۱۷) محاسبه شده و با درنظرگرفتن ضرایب هزینه مربوط که در بخش‌های بعدی تعریف گردیده است، به هزینه تغییر می‌کند

احتمال با فاصله زمانی نزدیک به ۶:۰۰ بعد از ظهر مدل‌سازی کرد [۱۵]

$$f(t_{start}) = \frac{1}{b-\alpha}, \quad \alpha \leq t_{start} \leq b, \quad \alpha = 18, \quad b = 19 \quad (32)$$

در الگوی دوم، مالک خودرو الکتریکی هیبریدی ترجیح می‌دهد باتری وسیله نقلیه خود را در دوره‌های کم‌باری شارژ کند؛ زیرا قیمت برق در دوره‌های اوج مصرف بسیار بالاست. قیمت بالای برق در زمان‌های اوج مصرف باعث می‌شود تا زمان شارژ خودروهای الکتریکی هیبریدی بعد از ساعت ۹:۰۰ شب منتقل شود. بنابراین طرح شارژ الگوی دوم به صورت مدل‌سازی می‌شود

$$f(t_{start}) = \frac{1}{b-\alpha}, \quad \alpha \leq t_{start} \leq b, \quad \alpha = 21, \quad b = 24 \quad (33)$$

نهایتاً در طرح شارژ هوشمند، شارژ خودروهای الکتریکی هیبریدی در دوره‌ای انجام می‌شود که میزان تولید برق، بیشتر از توان مصرفی و همچنین قیمت برق در حداقل سطح باشد. در بین تمام طرح‌های شارژ هوشمند، ایده ارائه‌شده یکی از رایج‌ترین تکنیک‌هاست. یک تابع توزیع احتمال نرمال برای تعیین زمان شروع شارژ پیشنهاد شده است [۱۶]

$$f(t_{start}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t_{start}-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \mu = 1, \quad \sigma = 3 \quad (34)$$

مقدار وضعیت شارژ باتری را می‌توان به صورت (۳۵) محاسبه کرد

$$SOC = \begin{cases} 0, & m > AER \\ \frac{AER - m}{AER} \times 100\%, & M \leq AER \end{cases} \quad (35)$$

### ۳-۵ محاسبات قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع

قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع (DLMP)<sup>۲</sup>، یک مکانیسم قیمت‌گذاری است که برای تعیین هزینه تأمین برق در مکان‌های (باس) مختلف در یک شبکه توزیع استفاده می‌شود. DLMPها بر اساس هزینه نهایی ارائه تقاضای برق اضافی در یک مکان خاص در شبکه با توجه به محدودیت‌ها و قیود شبکه تعریف می‌شوند. در یک شبکه توزیع شعاعی، DLMPها را می‌توان با استفاده از روشی به نام پخش بار بهینه توزیع (D-OPF) اعمال و محاسبه کرد. D-OPF یک مسئله بهینه‌سازی ریاضی است که به دنبال کمینه‌سازی هزینه تأمین برق برای تمام بارهای شبکه می‌باشد و در عین حال، محدودیت‌های بهره‌برداری مختلف مانند محدودیت‌های ولتاژ، محدودیت ظرفیت خط و پایداری سیستم را برآورده می‌کند. DLMPها بر اساس حل مسئله D-OPF برای شبکه توزیع محاسبه می‌شوند. DLMP در یک مکان خاص در شبکه نشان‌دهنده هزینه افزایشی تأمین یک واحد اضافی برق در آن مکان است که شامل هزینه تولید، انتقال و توزیع می‌شود. DLMPها توسط مشارکت‌کنندگان بازار می‌توانند برای تصمیم‌گیری در مورد جایابی منابع تولید یا تنظیم مصرف برق خود در پاسخ به سیگنال‌های قیمت مورد استفاده قرار گیرند و نیز می‌توانند برای پیاده‌سازی استراتژی‌های کنترلی مبتنی بر قیمت در شبکه‌های توزیع مانند برنامه‌های پاسخ به تقاضا و مدیریت منابع تولید پراکنده استفاده شوند. با ارائه سیگنال‌های قیمتی که منعکس‌کننده هزینه‌های زمان واقعی تأمین برق در مکان‌های مختلف در شبکه هستند، DLMPها می‌توانند مشتریان را تشویق کنند تا الگوهای مصرف خود را به گونه‌ای تنظیم کنند که راندمان کلی سیستم را بهبود بخشد.

در مقابل، سمت راست میزان تولید توان توسط شبکه بالادستی، دشارژ خودروهای الکتریکی و تولید منابع تولید پراکنده را نشان می‌دهد

$$P_t^{Demand} + \sum_{n=1}^{N_{PEV}} P_{n,t}^{PEV,Ch} + P_t^{Loss} = P_t^{Upstream} + \sum_{n=1}^{N_{PEV}} P_{n,t}^{PEV,Dis} + P_t^{DER} \quad (25)$$

منابع تولید پراکنده شامل توربین‌های بادی، واحدهای خورشیدی و منابع تولید همزمان برق و حرارت در شبکه توزیع می‌شوند

$$P_t^{DER} = \sum_{a=1}^{N_{PV}} P_{a,t}^{PV} + \sum_{b=1}^{N_{WT}} P_{b,t}^{WT} + \sum_{c=1}^{N_{CHP}} P_{c,t}^{CHP} \quad (26)$$

### ۳-۳-۲ قیود نامساوی

قیود نامساوی (۲۷) محدودیت توان ظاهری را نشان می‌دهد و قید نامساوی (۲۸) بزرگی ولتاژ را تعریف می‌کند. با توجه به این محدودیت، مقدار ولتاژ نباید از حد مجاز بین ۰.۹۲ و ۱.۰۲ پریونیت تجاوز کند. قیود (۲۹) تا (۳۱) محدودیت‌های تولید منابع تولید پراکنده را ارائه می‌دهند

$$S^{\min} \leq S_t \leq S^{\max} \quad (27)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (28)$$

$$P_{\min}^{PV} \leq P_{a,t}^{PV} \leq P_{\max}^{PV} \quad (29)$$

$$P_{\min}^{WT} \leq P_{b,t}^{WT} \leq P_{\max}^{WT} \quad (30)$$

$$P_{\min}^{CHP} \leq P_{c,t}^{CHP} \leq P_{\max}^{CHP} \quad (31)$$

### ۳-۴ مدل‌سازی خودروهای الکتریکی هیبریدی

انواع باتری‌های قابل شارژ روی خودروهای الکتریکی هیبریدی نصب می‌شوند که با اتصال به شبکه توزیع قابل شارژ هستند. همچنین استفاده از منابع سوخت فسیلی در مسافت‌های طولانی به جای انرژی باتری، یکی از توانایی‌های این ماشین‌هاست. برای مدل‌سازی مناسب رفتار خودروهای الکتریکی هیبریدی، برخی از پارامترهای ضروری که رفتار شارژ را مشخص می‌کنند باید در نظر گرفته شوند. نوع شارژر، وضعیت شارژر، تعداد خودروهای الکتریکی هیبریدی، ظرفیت باتری و زمان شارژ از جمله این پارامترهای مهم هستند [۱۳]. به‌طور کلی، برخی عدم قطعیت‌ها در مورد تقاضای شارژ خودروهای الکتریکی هیبریدی در پارکینگ‌های خصوصی و عمومی وجود دارند. برای مدیریت عدم قطعیت‌های ناشی از خودروهای الکتریکی هیبریدی، سه الگوی شارژ مختلف در این بخش به شرح زیر مورد بحث قرار می‌گیرند: (۱) الگوی شارژ ناهماهنگ، (۲) الگوی شارژ هماهنگ و (۳) الگوی شارژ هوشمند. در روش دوم، خودروهای الکتریکی هیبریدی در هر لحظه که به نقطه شارژ متصل می‌شوند، شارژ می‌گردند [۱۴].

با توجه به اطلاعات جمع‌آوری‌شده درباره حرکت خودروهای الکتریکی هیبریدی در شبکه، این نوع خودروها با دو سفر اصلی در یک روز روبه‌رو هستند. یکی از این سفرها هنگام خروج از خانه در صبح و دیگری هنگام بازگشت به خانه در عصر انجام می‌شود. همچنین سفرهای کوتاه‌مدت نیز در طول روز در نظر گرفته شده است. خودروهای الکتریکی هیبریدی نزدیک ساعت ۶:۰۰ بعد از ظهر وقتی که به خانه می‌رسند، به شبکه برق متصل می‌شوند؛ بنابراین زمان شارژ را می‌توان با استفاده از تابع توزیع

- اگر مشخص شد آرشیو خالی است باید پاسخ فعلی را در نظر گرفت.
- هر پاسخی که بیشتر متعلق به شخصی در آرشیو است باید رد شود.
- اگر راه حل تحت سلطه جمعیت خارجی نباشد، باید تأیید و در آرشیو نگهداری شود.
- اگر عنصری جدید بر آرشیو غالب باشد، در این صورت آرشیو از پاسخ‌ها خالی می‌شود.

#### ۴-۲ شبکه

جبهه‌های پارتو توسط فرایند شبکه تطبیقی تولید می‌شوند [۲۱] و تابع هدف استفاده‌شده از چهار ناحیه تشکیل گردیده است. رویکرد شبکه‌ای برای اندازه‌گیری افراد از جمعیت‌های ایجادشده در زمانی که خارج از ناحیه شبکه هستند، استفاده می‌شود و به دلیل توزیع یکنواخت ابرمکعب‌ها فضای شبکه ایجاد می‌گردد.

#### ۴-۳ مکانیزم انتخاب رهبر

مشکل اصلی در یک ناحیه جستجوی چندهدفه، تعیین راه حل‌های جدید در یک منطقه جستجوی معین است. با استفاده از روش انتخاب رهبر برای حل این موضوع، این تکنیک شامل کمترین شلوغی ناحیه جستجو می‌شود. روش انتخاب چرخ رولت با یکی از بهترین راه حل‌ها در مرز جستجو استفاده می‌شود. موارد زیر به شرح زیر است

$$U_k = \frac{g}{N_k} \quad (40)$$

که  $N_k$  تعداد پاسخ‌های بهینه پارتو در بخش  $k$  و  $g$  یک متغیر ثابت با مقدار بزرگ‌تر از ۱ است. این یک روش سنتی بوده که سهم هر فرد را با استفاده از درصد چرخ رولت کمی‌سازی می‌کند. این روش نسبت به سایر روش‌ها مزایایی دارد؛ زیرا به طور مداوم فرصتی برای انتخاب هر یک از آنها فراهم می‌کند. برخلاف آن، روش‌های تقاطع و جهش مورد استفاده در این مطالعه همان روش‌هایی هستند که در الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک رتبه‌بندی نامغلوب بیان شده‌اند [۲۲].

#### ۴-۴ نحوه پیاده‌سازی الگوریتم روی مسئله

الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی چندهدفه تکاملی، یک الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری است که می‌تواند برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه استفاده شود. در زمینه برنامه‌ریزی اقتصادی و زیست‌محیطی ریزشکه، EMoSOA می‌تواند برای بهینه‌سازی تولید منابع تولید پراکنده، خودروهای الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی بار به گونه‌ای مورد استفاده قرار گیرد که هزینه کل بهره‌برداری از ریزشکه را به حداقل برساند؛ در حالی که تراکم ایجادشده در خطوط توزیع را کاهش می‌دهد و قیمت‌های گرهی شبکه را هموار می‌کند. اکنون برای اجرای الگوریتم روی مسئله پیشنهادی، مراحل زیر باید طی شود:

- ۱) تعریف توابع هدف: اولین مرحله تعریف توابع هدف است که باید بهینه شوند. تابع هدف شامل به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری، هزینه خرید برق از شبکه بالادست، هزینه بهره‌برداری منابع تولید پراکنده، هزینه شارژ و دشارژ خودروها، هزینه اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار، هزینه تراکم و در نهایت هزینه تلفات سیستم توزیع است. همچنین کاهش میزان انرژی تأمین‌نشده مصرف‌کنندگان نهایی از اهداف این مسئله می‌باشد.

قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع، یکی از روش‌های معروف قیمت‌گذاری بازار است که برای کنترل شبکه توزیع و به شیوه‌ای کارآمد در حالی که اضافه بار در شبکه در مقیاس بزرگ اتفاق می‌افتد، استفاده می‌شود. تراکم در شبکه برق زمانی افزایش پیدا می‌کند که یک یا چند محدودیت در شبکه توزیع از کمترین هزینه انرژی برای مشتری جلوگیری کند [۱۷]. یک روش دقیق و مبتنی بر بازار برای قیمت‌گذاری انرژی، حاوی هزینه‌های تراکم در این مقاله برای مقابله با عرضه برق گران‌قیمت در گره‌های با قیمت برق بالا ارائه گردیده است. قیمت‌های تراکم حاشیه‌ای، هزینه تلفات نهایی و قیمت‌های نهایی انرژی، سه مورد از قیمت‌گذاری‌های حاشیه‌ای محلی توزیع هستند. قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی، سیگنال دقیق و واقعی قیمت برق را برای بازیگران بازار در هر گره شبکه توزیع عرضه می‌کند.

قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع، ضریب لاگرانژی می‌باشد که با معادله توان هر گره مرتبط است [۱۸]. قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع در هر گره، متغیر دوگانه برای محدودیت برابری در آن باس است. با توجه به توضیحات فوق، قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع به صورت (۳۶) تا (۳۹) توصیف شده است

$$DLMP_{Energy}^{b,s} = \lambda \quad (36)$$

$$DLMP_{Loss}^{b,s} = \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{net}} \lambda \quad (37)$$

$$DLMP_{Congestion}^{b,s} = \sum_{l=1}^{N_l} \mu_L \frac{\partial P_L}{\partial P_{net}} \quad (38)$$

$$\begin{cases} DLMP_{total}^{b,s} = DLMP_{Energy}^{b,s} + DLMP_{Loss}^{b,s} + DLMP_{Congestion}^{b,s} \\ DLMP_{total}^{b,s} = \lambda + \lambda \frac{\partial P_{Loss}}{\partial P_{net}} + \sum_{l=1}^{N_l} \mu_L \frac{\partial P_L}{\partial P_{net}} \\ DLMP_{total}^{b,s} = \lambda + \lambda_{L,b} + \lambda_{C,b} \end{cases} \quad (39)$$

#### ۴-۴ ارائه یک چارچوب کلی از الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی چندهدفه تکاملی

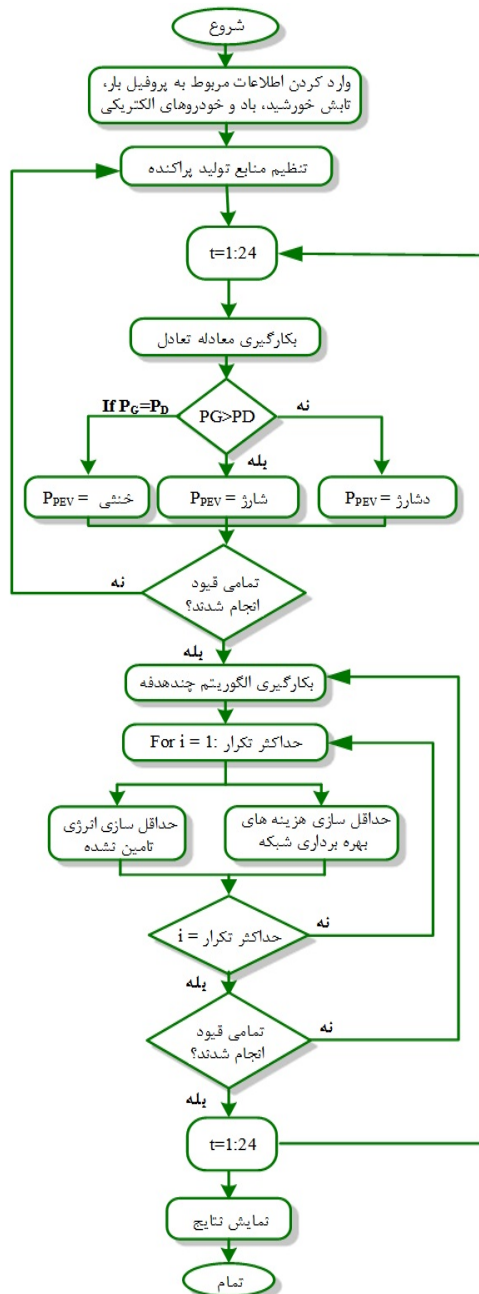
روش بهینه‌سازی ممکن است که هر مسئله بهینه‌سازی فراابتکاری را با یافتن بهترین پاسخ‌های جهانی در زمانی که ویژگی‌های اکتشاف به درستی متعادل می‌شوند، حل کند و برای حفظ همگرایی، فرایند کاوش در جستجوی پاسخ‌های جدید در مقیاس جهانی را به تصویر می‌کشد [۱۹]. ایده اصلی پشت الگوریتم پیشنهادی از فعالیت‌های مرغ‌های دریایی الهام گرفته شده و اقتباسی از روش بهینه‌سازی مرغ دریایی برای بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از چهار مؤلفه ایجاد گردیده است [۲۰]. شبکه و کنترل‌کننده آرشیو، دو عامل مهم هستند؛ زیرا بهترین پاسخ‌های پارتو بدون تسلط را در خود دارند. عامل‌های بعدی از روش انتخاب پیشگام و عملگرهای تکاملی برای انتخاب بهترین گزینه از بایگانی بر اساس جهت طعمه استفاده می‌کنند.

#### ۴-۱ کنترل‌کننده آرشیو

تمام پاسخ‌های بهینه پارتو که به بهترین شکل به دست می‌آیند در ناحیه‌ای به نام آرشیو نگهداری می‌شوند. تصمیم درج یک پاسخ خاص در لیست توسط کنترل‌کننده صورت می‌گیرد. در زیر دستورالعمل‌هایی برای به‌روزرسانی آرشیو ارائه شده است:

جدول ۱: محدوده متغیر تابش خورشید، سرعت باد، عمق دشارژ و وضعیت شارژ باتری.

مورد	حد پایین	حد بالا
میزان تابش خورشید ( $\text{kW/m}^2$ )	۵۰۰	۱۰۰۰
سرعت باد (m/sec)	۵/۵	۱۰/۵
عمق دشارژ باتری (درصد)	۴۰	۸۰
وضعیت شارژ باتری (kW)	۰	۵۰۰



شکل ۴: فلوچارت روش پیشنهادی.

که خودروهای الکتریکی هیبریدی شامل دو نوع موتورهای احتراقی و الکتریکی هستند. برخی اوقات، صاحبان این نوع دستگاهها تصمیم به استفاده از موتورهای احتراق خود می‌گیرند که منجر به انتشار گاز کربن دی‌اکسید در هوا می‌شود [۲۵]. همچنین حداقل و حداکثر مقدار تابش خورشید، سرعت باد، عمق دشارژ (DoD) و وضعیت شارژ باتری در جدول ۱ آمده است. موضوع ارائه شده با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی چندهدفه تکاملی در نرم‌افزار Matlab، حل و داده‌های مربوط به محاسبات انرژی تأمین نشده در جدول ۲ ارائه گردیده است. قیمت‌های بازار لحظه‌ای در شکل ۶ نشان داده شده [۲۶] که این قیمت‌ها برای محاسبات هزینه مبادله برق با شبکه بالادست مورد نیاز هستند. اپراتور سیستم توزیع از قیمت‌های بازار برای تعیین هزینه برق خریداری شده یا فروخته شده با شبکه بالادست در افق برنامه‌ریزی پیشنهادی استفاده می‌کند.

#### 1. Depth of Discharge

۲) فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی: مرحله بعدی، مدل کردن مسئله بهینه‌سازی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است. این شامل تعریف متغیرهای تصمیم، توابع هدف و قیود سیستم است. ۳) تعیین جمعیت اولیه: الگوریتم چندهدفه مرغ دریایی با جمعیت اولیه راه حل‌ها شروع می‌کند. این راه حل‌ها تصادفی تولید می‌شوند و برنامه‌ریزی‌های بالقوه متفاوتی را برای ریزشبه نشان می‌دهند. ۴) ارزیابی جمعیت: برازش هر راه حل یا پاسخ در جمعیت بر اساس میزان برآورده شدن توابع هدف و قیود ارزیابی می‌شود. ۵) اجرای انتخاب و تکثیر: بر اساس تابع، راه حل‌هایی برای تولید مثل انتخاب می‌شوند که این راه حل‌ها برای ایجاد راه حل‌های جدید با استفاده از عملگرهای متقاطع و جهش ترکیب می‌شوند. ۶) ارزیابی راه حل‌های جدید: راه حل‌های جدید، ارزیابی و به جمعیت اضافه می‌شود. ۷) انجام انتخاب بقا: راه حل‌هایی با بهترین تناسب برای بقا و تشکیل جمعیت برای نسل بعدی انتخاب می‌شوند. ۸) مراحل ۵ تا ۷ را تا رسیدن به همگرایی تکرار کنید. مراحل انتخاب، تولید مثل و بقا تکرار می‌شوند تا اینکه مجموعه‌ای از راه حل‌های رضایت‌بخش به دست آید.

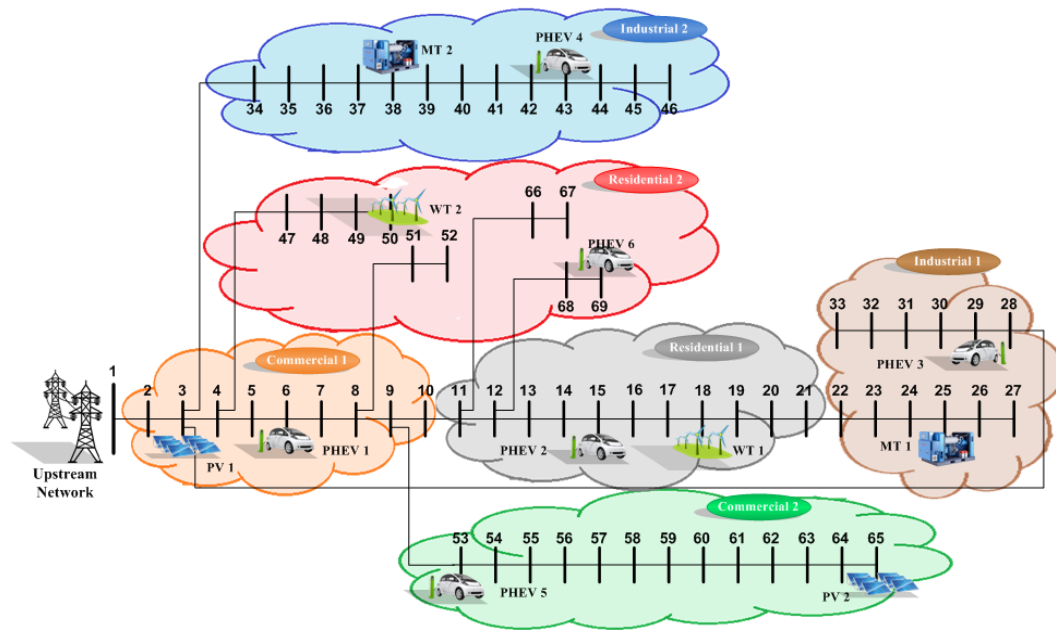
با استفاده از EMOSOA برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی ریزشبه، می‌توان به استفاده کارآمدتر از منابع، کاهش هزینه‌ها و بهبود قابلیت اطمینان شبکه دست یافت [۲۳]. این کار را می‌توان با بهینه‌سازی تولید و مصرف انرژی و همچنین شارژ و دشارژ خودروهای برقی انجام داد؛ به گونه‌ای که تراکم خطوط توزیع را کاهش داده و DLMPها را هموار کرد. علاوه بر این، برنامه‌های پاسخگویی به تقاضا را می‌توان در فرایند بهینه‌سازی ادغام کرد تا عملکرد ریزشبه را بهبود بخشد.

شکل ۴ فلوچارت روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌گردد، ابتدا اطلاعات منابع تولید پراکنده‌ها و ساختار شبکه وارد می‌شوند. سپس با استفاده از این اطلاعات، پخش بار پسر- پیشرو انجام شده است. در مرحله دوم از روش بهینه‌سازی چندهدفه برای توابع هدف پیشنهادی استفاده گردیده تا کل هزینه بهره‌برداری سیستم توزیع و میزان انرژی تأمین نشده در سیستم توزیع به حداقل برسد و نهایتاً نتایج بهینه به دست آمده است.

### ۵- نتایج عددی و شبیه‌سازی

برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، یک سیستم توزیع ۶۹باسه اصلاح شده در شکل ۵ ارائه گردیده است [۲۴]. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، شبکه شامل شش ناحیه مختلف با مصارف صنعتی، تجاری و مسکونی است. هر ناحیه دارای چندین منبع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی هیبریدی است که می‌توانند به‌طور بهینه، انرژی الکتریکی را با شبکه بالادست مبادله کنند. برای مدیریت بهینه، دو نوع خودروی الکتریکی شامل خودروهای الکتریکی فقط مجهز به باتری و خودروهای الکتریکی هیبریدی در نظر گرفته می‌شوند. توجه داشته باشید

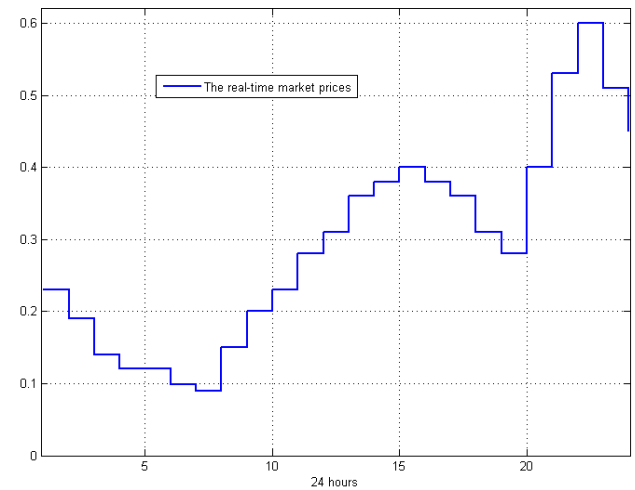




شکل ۵: شبکه توزیع ۶۹باسه اصلاح‌شده با شش ناحیه مختلف.

نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، مقدار توان در حضور خودروهای الکتریکی، منابع تولید پراکنده و برنامه پاسخگویی بار به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که کارایی مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

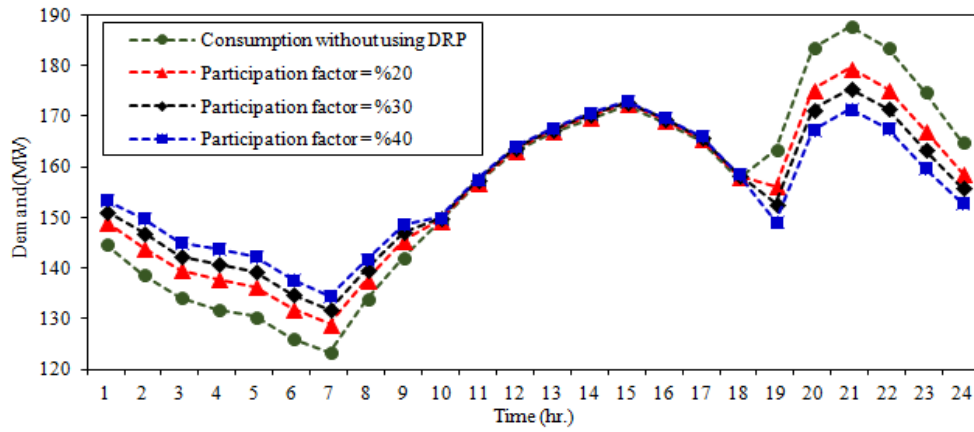
شکل ۹ مقدار قیمت‌گذاری حاشیه‌ای توزیع را در زمان  $t$  برای باس‌های انتخاب‌شده نشان می‌دهد و همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع در باس‌های انتخابی و مقدار قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع اولیه به ترتیب در محور چپ و راست شکل پیشنهادی نشان داده شده است. حداکثر اختلاف قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع در حالت اولیه نزدیک به  $2 \$/kW$  است؛ اما حداکثر مقدار قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع در باس ۱۰ نزدیک به  $0.107 \$/kW$  است که این نشان‌دهنده کارایی بالای روش پیشنهادی می‌باشد. با تفاوت کم در مقدار قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع، شاخص رفاه اجتماعی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. تراکم یا اضافه بار ایجادشده در خطوط شبکه توزیع باعث تغییرات در قیمت‌های گرهی باس‌های شبکه می‌شود که این تغییرات در قیمت گره‌های شبکه موجب می‌گردد تا انرژی الکتریکی با  $\$/kWh$ ‌های متفاوت به مشتریان عرضه شود. تفاوت در صورتحساب‌های ماهیانه، نارضایتی را در بین مشتریان پدید می‌آورد که باعث کاهش رفاه اجتماعی می‌شود. قیمت‌های گرهی شبکه توزیع به‌عنوان هزینه‌های مربوط به انتقال برق از پست فوق توزیع به مصرف‌کنندگان نهایی می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر رفاه اجتماعی داشته باشند. به طور کلی، افزایش قیمت‌های گرهی شبکه توزیع می‌تواند منجر به افزایش هزینه‌های مرتبط با مصرف برق در جامعه شود و از این رو، باعث کاهش رفاه اجتماعی می‌گردد. به این ترتیب، ارائه سیاست‌های دقیق تعیین قیمت برق می‌تواند در کاهش تأثیر منفی قیمت‌های گرهی شبکه توزیع بر رفاه اجتماعی کمک کند. سیاست‌هایی که به کاهش تعادلی بین قیمت‌های گرهی شبکه توزیع و هزینه‌های مرتبط با مصرف برق کمک می‌کنند می‌توانند منجر به افزایش رفاه اجتماعی شوند. همچنین استفاده از منابع انرژی تولید پراکنده و بهینه‌سازی شبکه توزیع می‌تواند به هموارسازی قیمت‌های گرهی شبکه توزیع و در نتیجه افزایش رفاه اجتماعی کمک کند.



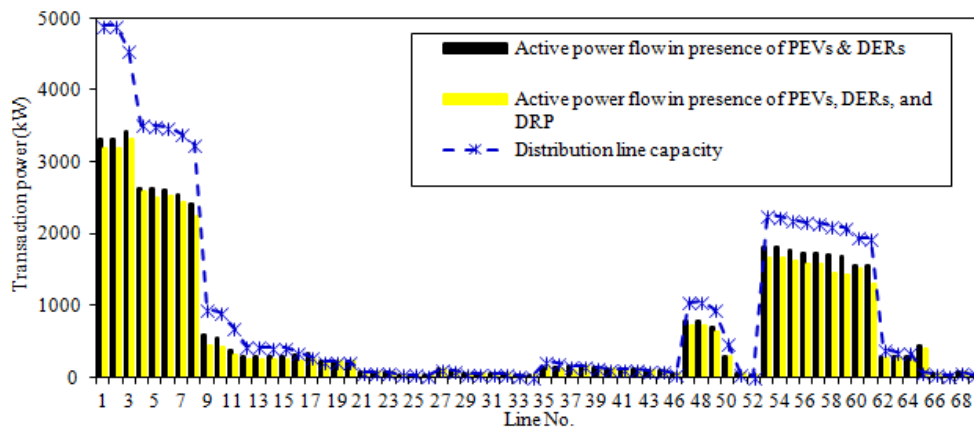
شکل ۶: قیمت‌های بازار لحظه‌ای [۲۶].

کل بار مصرفی شبکه برای هر ساعت در شکل ۷ ارائه شده است [۲۷]. این کار، بار مصرفی شبکه را با استفاده از برنامه پاسخگویی بار و ضرایب مشارکت مختلف در نظر گرفته است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که میزان ضرایب مشارکت افزایش می‌یابد، تأثیر برنامه پاسخگویی بار نیز بر پروفایل بار بیشتر می‌شود. برنامه پاسخگویی بار سعی می‌کند تا مصرف را از دوره‌های پرباری به دوره‌های کم‌باری انتقال دهد که این برای اپراتور سیستم توزیع به‌منظور برنامه‌ریزی بهتر منابع موجود مفید است.

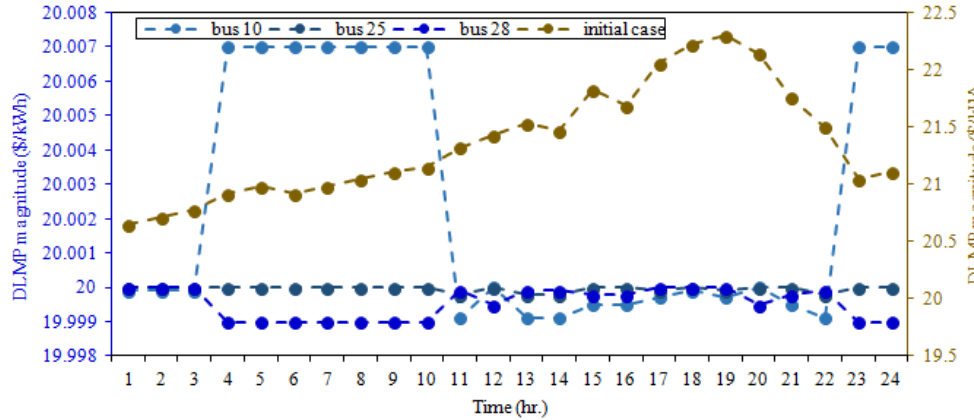
مقدار توان اکتیو عبوری از هر خط در شبکه توزیع در شکل ۸ نشان داده شده است. این نمودار اهمیت بالایی دارد؛ زیرا اگر تراکم یا اضافه بار در یک یا برخی از خطوط توزیع اتفاق بیفتد، شبکه دچار قطعی می‌شود و اپراتور سیستم توزیع قادر به تأمین بار نیست. این امر موجب نارضایتی مشتریان شده و میزان شاخص رفاه اجتماعی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای این منظور، بررسی میزان توان اکتیو عبوری از تمام خطوط برای اپراتور سیستم توزیع بسیار مهم است. خط آبی در شکل ۶ ظرفیت خطوط توزیع را نشان می‌دهد [۲۸] و با ستون‌های زرد و سیاه مقایسه می‌شود که میزان توان اکتیو عبوری را در حضور منابع مختلف



شکل ۷: بار مصرفی شبکه با ضرایب مشارکت مختلف [۲۷].



شکل ۸: بررسی تراکم خطوط توزیع.



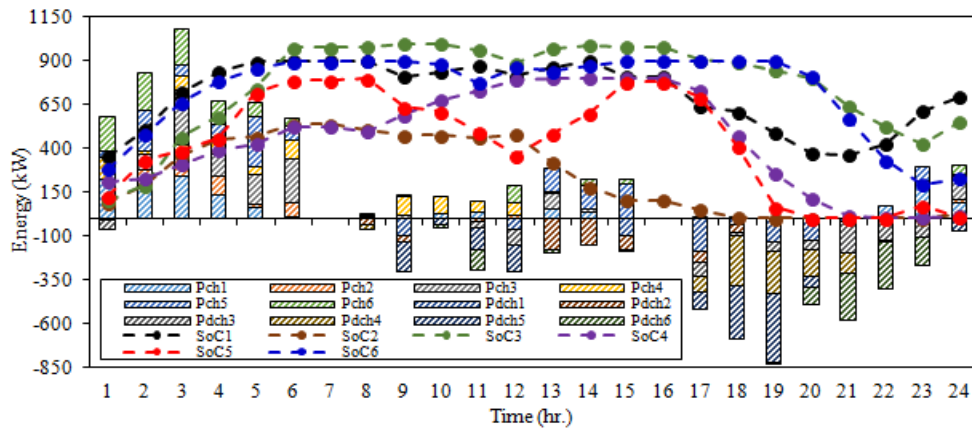
شکل ۹: قیمت‌گذاری حاشیه‌ای محلی توزیع در باس انتخابی.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به نقاط بار شبکه توزیع ۶۹ باسه.

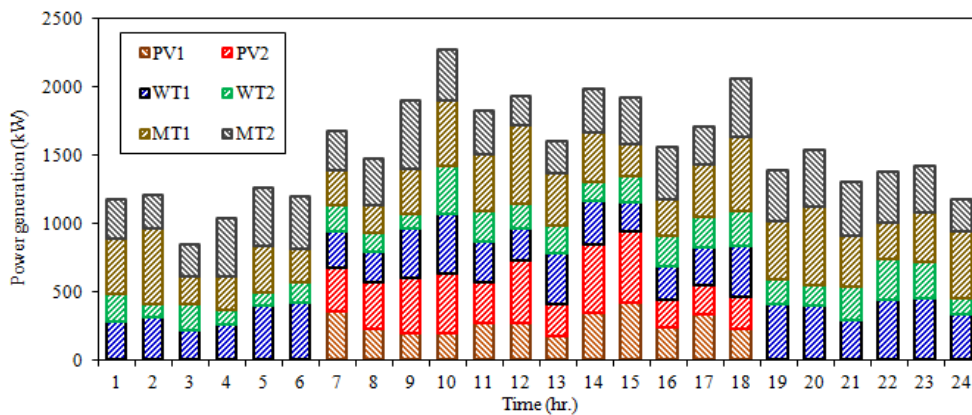
نقاط بار	نرخ خرابی (خرابی/سال)	زمان قطعی (ساعت)	مقدار عدم دسترسی سالانه (ساعت/سال)
۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸	۰،۲۲۱	۱،۹۴	۰،۴۳
۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸	۰،۳۲۱	۱۱،۰۴	۳،۵۴
۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸	۰،۳۰۱	۱۱،۴۴	۳،۴۴
۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸	۰،۳۱۴	۱۱،۱۷	۳،۵۱
۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸	۰،۲۰۸	۱،۷۵	۰،۳۶
۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸، ۳۹، ۴۰، ۴۱، ۴۲، ۴۳، ۴۴، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۸	۰،۳۲۷	۱۰،۹۶	۳،۵۱

خودروهای الکتریکی پیشنهاد می‌کند. همان طور که در شکل مشخص است، انواع مختلفی از خودروهای الکتریکی طبق الگوی پیشنهادی در حال شارژ و دشارژ هستند. مثلاً در ساعت ۳:۰۰ صبح، تمام خودروهای

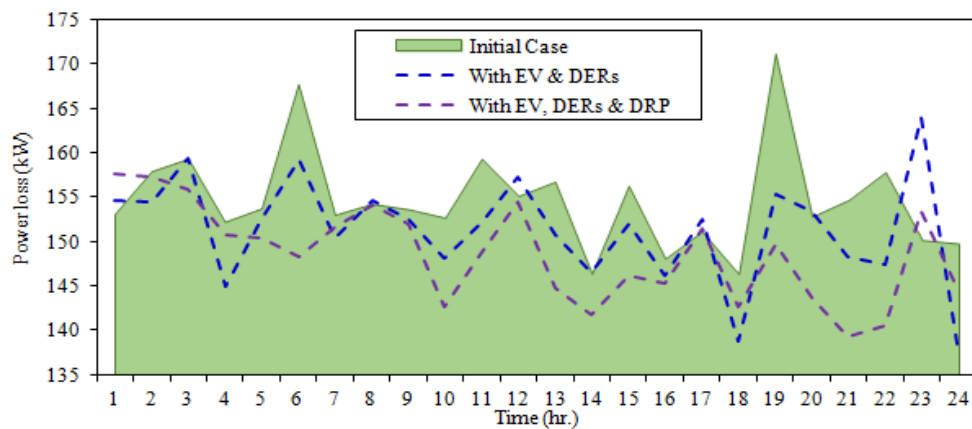
الگوی شارژ و دشارژ بهینه خودروهای الکتریکی توسط الگوریتم پیشنهادی، تعیین و در شکل ۱۰ ارائه شده است. زمان‌بندی به‌دست‌آمده نتیجه روش جستجوی الگوست که سه طرح را برای مشارکت مالک



شکل ۱۰: برنامه‌ریزی بهینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی مرغ دریایی.



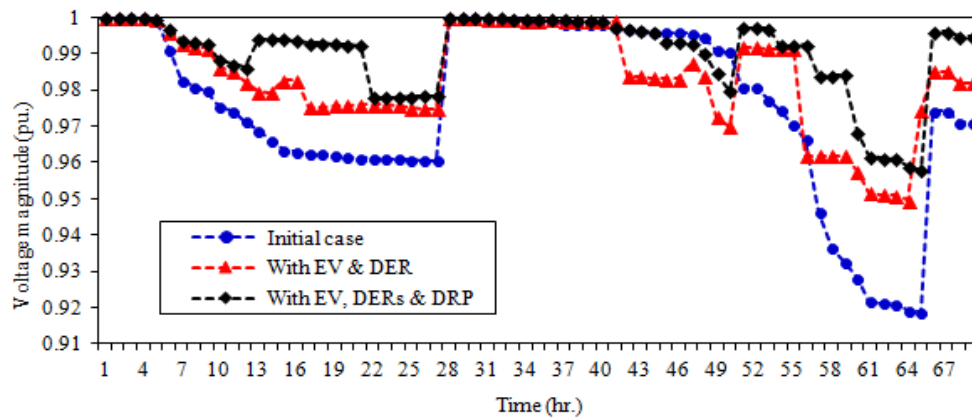
شکل ۱۱: تولید بهینه منابع تولید پراکنده در هر ساعت.



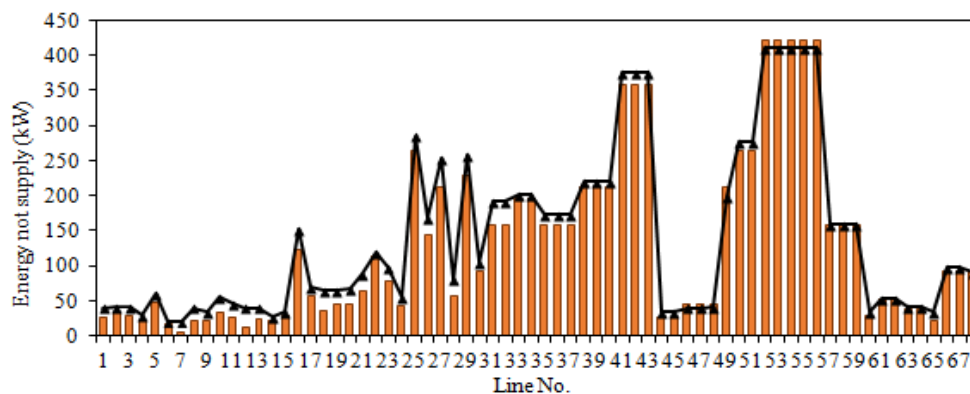
شکل ۱۲: تلفات توان شبکه توزیع.

مقدار تولید برق منابع تولید پراکنده در شکل ۱۱ آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود، مجموع تولید منابع تولید پراکنده در هر ساعت مربوط به عدم قطعیت‌های باد و خورشید در شبکه توزیع است. مقدار تلفات توان اکتیو در موارد مختلف در شکل ۱۲ نشان داده شده است. خط سبز با مساحت زیر آن، تلفات توان اولیه شبکه توزیع را نشان می‌دهد که از روش پخش بار پسر-پیشرو به دست می‌آید. خطوط آبی و بنفش نیز به ترتیب تلفات توان را در حضور خودروهای الکتریکی-منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی-منابع تولید پراکنده- برنامه‌های پاسخگویی بار نشان می‌دهند. در مقایسه با این خطوط، میزان تلفات برق در خطچین بنفش به دلیل سایر موارد به میزان قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند و نتیجه می‌شود که روش پیشنهادی، تأثیر خوبی بر کاهش تلفات توان داشته است.

الکتریکی در حالت شارژ هستند (همه آنها در پارکینگ‌ها قرار دارند) و از برق شبکه استفاده می‌کنند؛ زیرا در این زمان از روز، قیمت برق ارزان‌تر و در زمان کم‌باری شبکه است. برعکس ساعت ۷:۰۰ بعد از ظهر همه خودروهای الکتریکی در حالت دشارژ هستند و برق ذخیره‌شده خود را به شبکه توزیع پس می‌دهند؛ زیرا در این ساعت از روز قیمت برق بالا و زمان اوج مصرف شبکه است. همچنین خطچین در این شکل، مقدار وضعیت شارژ هر خودرو الکتریکی را نشان می‌دهد. سطح وضعیت هر خودرو الکتریکی بستگی به شارژ و دشارژ در آن زمان دارد. در هر دو ساعت ۷:۰۰ صبح و ۴:۰۰ بعد از ظهر، مالک خودروهای الکتریکی از دستگاه خود استفاده می‌کند و خودرو به شبکه توزیع متصل نیست؛ بنابراین اپراتور سیستم توزیع نمی‌تواند برای این زمان از روز برنامه‌ریزی و الگوسازی کند.



شکل ۱۳: پروفیل ولتاژ شبکه توزیع.



شکل ۱۴: مقدار انرژی از دست رفته.

جدول ۳: مقایسه نتایج با و بدون به کارگیری روش پیشنهادی.

آیتم	بدون در نظر گرفتن روش پیشنهادی	با در نظر گرفتن روش پیشنهادی
تابع هدف اول (هزینه بهره‌برداری)	۸۳۰۹۷۰۳ (\$)	۷۲۵۳۷۲ (\$)
تابع هدف دوم (انرژی تأمین نشده)	$۹,۶۲۸۵ \times 10^3$ (kW)	$۸,۸۷۳۵ \times 10^3$ (kW)

است. مقادیر هزینه‌های بهره‌برداری و میزان انرژی تأمین نشده مشتریان اصلاح شده نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، خطچین آبی بزرگی ولتاژ اولیه را نشان می‌دهد که از روش پخش بار پسر-پیشرو به دست می‌آید. محدودیت پایداری دینامیکی مجاز ولتاژ در شبکه توزیع از ۰/۹ تا ۱/۱ پریونیت تعریف شده است. خطچین قرمز و سیاه این نمودار، مقدار ولتاژ را به ترتیب در حضور خودروهای الکتریکی-منابع تولید پراکنده و خودروهای الکتریکی-منابع تولید پراکنده-برنامه‌های پاسخگویی نشان می‌دهد.

شکل ۱۴ نمایانگر میزان انرژی تأمین نشده بوده که برای حالت قبل و بعد از به کارگیری روش پیشنهادی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استراتژی بازآرایی و خودروهای الکتریکی به همراه برنامه تشویق محور پاسخگویی بار، قادر به کاهش مؤثر انرژی از دست رفته شده است. برای به دست آوردن نتایج از تابع هدف انرژی تأمین نشده استفاده گردیده و سپس با استفاده از الگوریتم تکاملی مرغ دریایی، مقدار کل انرژی تأمین نشده به حداقل رسانده شده تا قابلیت اطمینان سیستم افزایش یابد. در نتیجه می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از استراتژی بازآرایی و خودروهای الکتریکی به همراه برنامه تشویق محور پاسخگویی بار در کاهش مؤثر انرژی تأمین نشده مؤثر است و با استفاده از الگوریتم تکاملی مرغ دریایی می‌توان مقدار کل انرژی تأمین نشده را به حداقل رساند و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش داد. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی تأثیر خوبی بر بهبود پروفیل ولتاژ داشته

## ۶- نتیجه‌گیری

این مقاله، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه جدید را معرفی می‌کند که در آن هدف اول به حداقل رساندن هزینه کل بهره‌برداری ریزشکبه و هدف دوم به حداقل رساندن مقدار انرژی تأمین نشده است. هدف اول شامل هزینه مبادله برق با شبکه بالادست، هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، هزینه انتشار گاز کربن دی‌اکسید و هزینه تولید انرژی تجدیدپذیر است. در این کار از همکاری برنامه‌های پاسخگویی بار و الگوهای جدید مدیریت خودروهای الکتریکی به منظور مدیریت تراکم و هموارسازی قیمت‌های گرهی با هدف حداکثر کردن شاخص رفاه اجتماعی استفاده شده است. برای حل مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح برای رسیدن به راه حل‌های بهینه جهانی از یک

جدول ۴: مقایسه نتایج مقاله پیشنهادی با سایر روش‌های مرسوم.

مرجع	روش پیشنهادی	مورد مطالعاتی	میزان کاهش شاخص انرژی ازدست‌رفته	میزان کاهش هزینه بهره‌برداری کل
[۲۹]	برنامه ریزی احتمالاتی منابع تولید پراکنده در ریزشکه‌ها با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی	شبکه ۳۳ باسه	-	۱٪
[۳۰]	مدیریت انرژی شبکه توزیع با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز انرژی باتری	شبکه ۸۴ باسه	۶۶٪	۴٫۱٪
[۳۱]	برنامه‌ریزی بهینه هم‌زمان باتری‌ها و منابع تولید پراکنده به منظور کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان	شبکه ۶۹ باسه	۷٫۵٪	-
[۳۲]	برنامه‌ریزی ذخیره‌سازها و مدیریت بار در شبکه‌های توزیع	شبکه ۳۳ باسه	۶٫۵٪	۵٫۳٪
مقاله حاضر	برنامه‌ریزی ریزشکه‌ها در حضور خودروهای الکتریکی و برنامه‌های پاسخگویی بار با در نظر گرفتن استراتژی بازآرایی شبکه	شبکه ۶۹ باسه	۹٫۱٪	۱۱٫۳٪

- [13] G. Li and X. P. Zhang, "Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 492-499, Mar. 2012.
- [14] S. Rezaee, E. Farjah, and B. Khorramdel, "Probabilistic analysis of plug-in electric vehicles impact on electrical grid through homes and parking lots," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 1024-1033, Oct. 2013.
- [15] A. Ghaedi, S. D. Dehnavi, and H. Fotoohabadi, "Probabilistic scheduling of smart electric grids considering plug-in hybrid electric vehicles," *J. of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 1329-1340, 2016.
- [16] M. A. Rostami, A. Kavousi-Fard, and T. Niknam, "Expected cost minimization of smart grids with plug-in hybrid electric vehicles using optimal distribution feeder reconfiguration," *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 11, no. 2, pp. 388-397, Apr. 2015.
- [17] A. Abdolahi, J. Salehi, F. S. Gazijahani, and A. Safari, "Assessing the potential of merchant energy storage to maximize social welfare of renewable-based distribution networks considering risk analysis," *Electric Power Systems Research*, vol. 188, Article ID: 106522, Nov. 2020.
- [18] Z. Zhao, et al., "Distribution locational marginal pricing under uncertainty considering coordination of distribution and wholesale markets," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 14, no. 2, pp. 1590-1606, Aug. 2022.
- [19] S. N. Chegini, A. Bagheri, and F. Najafi, "PSOSCALF: a new hybrid PSO based on sine cosine algorithm and levy flight for solving optimization problems," *Applied Soft Computing*, vol. 73, pp. 697-726, Dec. 2018.
- [20] G. Dhiman and V. Kumar, "Seagull optimization algorithm: theory and its applications for large-scale industrial engineering problems," *Knowledge-Based Systems*, vol. 165, pp. 169-196, Feb. 2019.
- [21] J. D. Knowles and D. W. Corne, "Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy," *Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 2, pp. 149-172, Jun. 2000.
- [22] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, "Handling multiple objectives with particle swarm optimization," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 8, no. 3, pp. 256-279, Jun. 2004.
- [23] G. Dhiman, et al., "EMoSOA: a new evolutionary multi-objective seagull optimization algorithm for global optimization," *International J. of Machine Learning and Cybernetics*, vol. 12, pp. 571-596, Feb. 2021.
- [24] N. Taghizadegan, S. Cheshmeh Khavar, A. Abdolahi, F. Arasteh, and R. Ghoreyshi, "Dominated GSO algorithm for optimal scheduling of renewable microgrids with penetration of electric vehicles and energy storages considering DRP," *International J. of Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 1-12, 2022.
- [25] M. Shamsirband, J. Salehi, and F. S. Gazijahani, "Decentralized trading of plug-in electric vehicle aggregation agents for optimal energy management of smart renewable penetrated microgrids with the aim of CO2 emission reduction," *J. of Cleaner Production*, vol. 200, pp. 622-640, Nov. 2018.
- [26] A. Abdolahi, J. Salehi, F. Samadi Gazijahani, and A. Safari, "Probabilistic multi-objective arbitrage of dispersed energy storage systems for optimal congestion management of active distribution networks including solar/wind/CHP hybrid energy system," *J. of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, Article ID: 045502, Jul. 2018.
- [27] A. J. Pimm, T. T. Cockerill, and P. G. Taylor, "The potential for peak shaving on low voltage distribution networks using electricity storage," *J. of Energy Storage*, vol. 16, pp. 231-242, Apr. 2018.
- [28] X. Xu, D. Niu, L. Peng, S. Zheng, and J. Qiu, "Hierarchical multi-objective optimal planning model of active distribution network considering distributed generation and demand-side response,"

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی مرغ دریایی استفاده شده است. همان طور که در نتایج مشاهده می‌شود، زمان‌بندی بهینه خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر در حضور یک برنامه پاسخگویی بار به دست می‌آید. همچنین برخی از مشخصات فنی سیستم توزیع مانند تلفات توان و پروفیل ولتاژ با اعمال روش‌های پیشنهادی بهبود یافته است.

## مرجع

- [1] V. K. Prajapati and V. Mahajan, "Reliability assessment and congestion management of power system with energy storage system and uncertain renewable resources," *Energy, pt B*, vol. 215, Article ID: 119134, Jan. 2021.
- [2] M. A. F. Ghazvini, et al., "Congestion management in active distribution networks through demand response implementation," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 17, Article ID: 100185, Mar. 2019.
- [3] K. Prakash, et al., "Bi-level planning and scheduling of electric vehicle charging stations for peak shaving and congestion management in low voltage distribution networks," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 102, Article ID: pp. 108235, Sept. 2022.
- [4] Z. Xiaoluan, H. Farajian, W. Xifeng, and K. Ohshima, "Scheduling of renewable energy and plug-in hybrid electric vehicles based microgrid using hybrid crow-pattern search method," *J. of Energy Storage*, vol. 47, Article ID: 103605, Mar. 2022.
- [5] A. Ghazvini, M. Sedighzadeh, and J. Olamaei, "Semidefinite programing as a tool for economic-environmental operation of a microgrid including compressed air energy storage and electric vehicle," *J. of Energy Storage*, vol. 43, Article ID: 103215, Nov. 2021.
- [6] Q. Guo, S. Nojavan, S. Lei, and X. Liang, "Economic-environmental analysis of renewable-based microgrid under a CVaR-based two-stage stochastic model with efficient integration of plug-in electric vehicle and demand response," *Sustainable Cities and Society*, vol. 75, Article ID: 103276, Dec. 2021.
- [7] N. Li, Z. Su, H. Jerbi, R. Abbassi, M. Latifi, and N. Furukawa, "Energy management and optimized operation of renewable sources and electric vehicles based on microgrid using hybrid gravitational search and pattern search algorithm," *Sustainable Cities and Society*, vol. 75, Article ID: 103279, Dec. 2021.
- [8] Y. Mei, B. Li, H. Wang, X. Wang, and M. Negnevitsky, "Multi-objective optimal scheduling of microgrid with electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4512-4524, Nov. 2022.
- [9] E. A. Mahdiraji and M. S. Amiri, "Optimization of electric vehicles along with power generation units to improve microgrid reliability," *Quantum J. of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 1-15, Apr. 2021.
- [10] A. Aldosary, M. Rawa, Z. M. Ali, A. Razmjoo, and A. Rezvani, "Energy management strategy based on short-term resource scheduling of a renewable energy-based microgrid in the presence of electric vehicles using  $\theta$ -modified krill herd algorithm," *Neural Computing and Applications*, vol. 33, pp. 10005-10020, Aug. 2021.
- [11] M. Gonzalez Vaya and G. Andersson, "Optimal bidding strategy of a plug-in electric vehicle aggregator in day-ahead electricity markets under uncertainty," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 5, pp. 2375-2385, Sep. 2015.
- [12] M. A. Elfarra and M. Kaya, "Estimation of electricity cost of wind energy using Monte Carlo simulations based on nonparametric and parametric probability density functions," *Alexandria Engineering J.*, vol. 60, no. 4, pp. 3631-3640, Aug. 2021.

مقطع است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع، ریزشبکه‌ها، مدیریت انرژی و خودروهای الکتریکی.

**نوید تقی‌زادگان کلانتری** در سال ۱۳۶۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق با گرایش الکترونیک خود را از دانشگاه تبریز و در سال ۱۳۷۳ نیز مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق با گرایش قدرت خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۷۴ تا ۱۳۹۱ به‌عنوان عضو هیأت علمی- صنعتی در وزارت نیرو مشغول آموزش و تحقیق بوده و در این اثنا نیز در سال ۱۳۷۹ به دوره دکترای مهندسی برق گرایش قدرت در دانشگاه تبریز، وارد و در سال ۱۳۸۶ موفق به اخذ درجه دکترا از دانشگاه مذکور گردید. وی از سال ۱۳۹۱ در دانشکده فنی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان در تبریز مشغول به فعالیت شد و اینک نیز عضو هیأت علمی با مرتبه استادی این دانشکده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ایده‌های نو در سیستم‌های قدرت، حفاظت سیستم‌های قدرت، شبکه‌های توزیع و قابلیت اطمینان در مهندسی برق است.

**سجاد نجفی روادانق** در سال ۱۳۸۸ مدرک دکترای مهندسی برق را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر دریافت نمود و از همان سال نیز در دانشکده فنی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان در تبریز مشغول به فعالیت شد. اینک نیز عضو هیأت علمی با مرتبه استادی این دانشکده و همچنین مسئول آزمایشگاه تحقیقاتی شبکه‌های هوشمند تاب‌آور است. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند ریزشبکه‌ها، شبکه‌های هوشمند و تاب‌آوری در سیستم‌های قدرت است.

*Sustainable Energy Technologies and Assessments, pt A*, vol. 53, Article ID: 102438, Oct. 2022.

- [29] T. Hai, A. K. Alazzawi, J. M. Zain, and H. Oikawa, "A stochastic optimal scheduling of distributed energy resources with electric vehicles based on microgrid considering electricity price," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 55, Article ID: 102879, Feb. 2023.
- [30] A. Azizivahed, E. Naderi, H. Narimani, M. Fathi, and M. R. Narimani, "A new bi-objective approach to energy management in distribution networks with energy storage systems," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 56-64, Jun. 2017.
- [31] M. A. Hamidan and F. Borousan, "Optimal planning of distributed generation and battery energy storage systems simultaneously in distribution networks for loss reduction and reliability improvement," *J. of Energy Storage*, vol. 46, Article ID: 103844, Feb. 2022.
- [32] H. Farzin and M. Monadi, "Reliability enhancement of active distribution grids via emergency V2G programs: an analytical cost/worth evaluation framework," *Scientia Iranica*, vol. 26, Special Issue on Machine Learning, Data Analytics, and Advanced Optimization Techniques, pp. 3635-3645, Nov./Dec. 2019.

**علی میرزایی** در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه آزاد واحد تبریز و در سال ۱۳۹۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۹۸ به دوره دکترای مهندسی برق در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان وارد گردید و در حال حاضر مشغول تحصیل در این