نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۲، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۴۸ – ۳۱

# نقش ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی و ذخیره‌سازها در افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده و بازآرایی شبکه در شرایط عادی و بحرانی

[۱] محسن کلانتر ، [۲] سامان قنبری *

**تاریخ دریافت:**
۱۳۹۸ / ۰۷ / ۲۳

**تاریخ پذیرش:**
۱۳۹۸ / ۰۹ / ۱۱

**کلمات کلیدی:**
خودرو الکتریکی، سیستم‌های ذخیره‌ساز، منابع تولید پراکنده، بازآرایی، مکان‌یابی، هزینه بهره‌برداری.

**چکیده**

بروز تکنولوژی‌های مختلف همچون سیستم‌های ذخیره انرژی، خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده باعث بهبود مشخصه‌های سیستم‌های قدرت شده است. از طرفی، استفاده از این ادوات در شبکه‌های توزیع باعث بهبود مشخصه‌های مختلفی همچون تلفات توان خواهد شد. یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود مشخصه‌های مختلف سیستم در شبکه توزیع تغییر آرایش شبکه است. در این پژوهش، علاوه بر بررسی نقش تجدید آرایش شبکه بر بهبود مشخصه‌های فنی و اقتصادی، اثر این روش بر روی بهبود تاب‌آوری شبکه در مواقع بحرانی بررسی شده است. در این راستا، یک مدل جامع برای باز آرایی شبکه توزیع در حضور سیستم‌های ذخیره انرژی، خودروهای برقی، و توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی داده شده است. مکان و ظرفیت خروجی بهینه جهت بهره‌برداری بهینه برای تمام ادوات اشاره شده تعیین شده‌است. جهت بررسی کارایی مدل، چهار حالت مختلف در نظر گرفته شده‌اند. نتایج چهار حالت مورد مقایسه قرار گرفته است نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده تأثیر بازآرایی شبکه و ادوات دخیره انرژی بر خروجی‌های مدل است. مدل ذکر شده بر روی شبکه ۳۳ شینه IEEE در محیطGAMS و با سالور Sbb پیاده سازی شده است.

۱. استاد دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت Kalantar@iust.ac.ir
۲. کارشناس ارشد مهندسی برق سیستم‌های قدرت دانشگاه علم و صنعت ایران Samanghanbari2160@gmail.com

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر افزایش نفوذ منابع تولیدات پراکنده در سیستم‌های توزیع باعث بهبود مشخصه‌های مختلفی همچون قابلیت اطمینان و کاهش تلفات شده است. از طرفی، با توجه به عدم قطعیت منابع تولید پراکنده، تأمین بیش از حد بار با بهره بردن از این تکنولوژی‌ها باعث بروز مشکلاتی همچون ناپایداری خواهد شد. در این راه جهت افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر نقش تکنولوژی‌های دیگر در سیستم‌های قدرت پررنگ‌تر شده است. سیستم‌های ذخیره انرژی یکی از این تجهیزات کارآمد در شبکه هستند که می‌توانند با بهره‌گیری از خاصیت شارژ و تخلیه شارژ نفوذ منابع تجدیدپذیر را در شبکه افزایش دهند. از طرفی، سیستم‌های ذخیره انرژی تنها ادوات با قابلیت شارژ و تخلیه شارژ در شبکه نیستند. همچنین پژوهشگران از خاصیت خودروهای برقی برای بهبود مشخصه‌های سیستم و بهره‌برداری بهینه از آن پرده برداشته‌اند.

باتری خودروهای برقی همانند سیستم‌های ذخیره انرژی قابلیت شارژ و دشارژ را دارد. البته با توجه به ظرفیت کم باتری، می‌توان گفت که تجمیع این ادوات در شبکه می‌تواند اثر خود را نشان دهد. از طرفی، با توجه به گسترش بهره‌برداری از شبکه‌های هوشمند، مسائل پایه در سیستم‌های قدرت اهمیت بالاتری پیدا نموده است. بازآرایی شبکه توزیع یکی از مسائل دیگری است که توجه پژوهشگران و صنعتگران را در نقاط مختلف دنیا به خود جلب نموده است. مسئله دیگری توجه صنعتگران و پژوهشگران را به خود جلب نموده است افزایش تاب‌آوری[1] شبکه در شرایط بحرانی همچون سیل و طوفان است. بررسی این موضوع از دیدگاه‌های مختلفی انجام شده است. یکی از مهمترین شاخص‌ها برای بهبود تاب‌آوری کاهش قطع بار[2] سیستم است. بنابراین، تغییر ساختار شبکه توزیع و اضافه نمودن تکنولوژی‌های به‌روز با توجه به شرایط موجود می‌تواند منجر به بهبود عملکرد کلی سیستم شود. مطالعات متعددی روی جایابی بهینه ادوات ذخیره‌انرژی، تولیدات پراکنده و بازآرایی بهینه شبکه انجام

1. Resilience
2. Load shedding

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

شـده اسـت. در این مطالعات از روش‌های مختلف بهینه‌سـازی جهت تعیین متغیرهای تصـمیم‌گیری استفاده شده است [۱].

## ۲. پیشینه تحقیق

بازآرایی روزانه با هدف کاهش تلفات و بهبود قابلیت اطمینان انجام شـده و از الگوریتم ژنتیک برای یافتن آرایش بهینه در هر بازهی زمانی استفاده شده است [۶]. بر اساس نتایج بازآرایی، کلیدهایی که نیاز به کنترل از راه دور دارند، به منظور کاهش زمان کلیدزنی موردنیاز برای بازآرایی روزانه، تعیین شـده اسـت. بهبود شاخص تعادل بار یکی از اهداف عملیاتی بازآرایی است که به طور همزمان با کاهش تلفات و قابلیت اطمینان را به عنوان توابع هدف مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۱]. الگوریتم چندهدفه ارائه شده است تا مسئله بازآرایی تصادفی را در حضور توربین بادی و سلول‌های سوختی بهینه کند [۱۰].

در این پژوهش از روش پخش بار احتمالی مبتنی بر روش تخمین نقطه ( PEM[1]) اسـتفاده شـده اسـت تا شـامل عدم قطعیت خروجی‌های توربین بادی و بار باشـد. نویسـندگان نظر به عدم قطعیت و تناوب توان بادی، یک مدل پخش بار اقتصـادی( ED[2]) بهینه را پیشـنهاد داده‌اند و یک روش برای تخمین ریسک و مدیریت سیستمهای قدرت هیبرید (سیستم‌های اولیه+ توان بادی) برای بهره برداری کوتاه مدت (۲۴ ساعته) ایجاد کرده‌اند. این مدل و روش، نفوذ بالای توان بادی و تغییرپذیری باد را به حساب آورده است [۹].

با توجه به منحنی Q-V شین‌های سیستم را از لحاظ پایداری ولتاژ به شین‌های قوی و شین‌های ضـعیف تقسـیم نموده‌اند. سـپس، با نصـب مزارع بادی در شـین‌های کاندید و با توجه به مقادیر ویژه در مورد شـین‌های مناسـب برای نصـب مزارع بادی تصـمیم‌گیری نموده اسـت. نتایج به‌دسـت آمده نشـان می‌دهد شـین‌هایی که از لحاظ پایداری ولتاژ شـین‌های قوی‌تری هسـتند، قابلیت بیشـتری برای انتقال توان مزارع بادی را دارند. پس می‌توان گفت که مکان‌یابی با در نظر گرفتن پایداری ولتاژ، امکان انتقال توان بیشـتری از مزارع بادی را خواهد داد [۱۴]. یک مدل ریاضـی جدید برای بازآرایی در حضـور منابع تجدیدپذیر جهت کاهش تلفات روزانه استفاده شده است. این مطالعه شامل تغییرات بار و نوسانات منابع

1. Point Estimate Method (PEM)
2. Economic Dispatch (ED)

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

تجدیدپذیر و هزینه‌های کلیدزنی اســـت [۳]. مکان، ظرفیت و تعداد خودروهای پارکینگ‌های خودرو برقی[1] قابل نصب در شبکه به صورت بهینه به‌دست آمده است. مدل ارائه شده جهت بیشینه نمودن سود شرکت توزیع و اثر آن بر مکان‌یابی پارکینگ خودرو برقی ارائه شده است [۸].

به صـــورت کلی می‌توان گفت که اســـتفاده از تولیدات پراکنده در کنار تکنولوژی‌های دیگری همچون ذخیره‌سازها و خودروهای برقی می‌تواند اثرات قابل توجهی بر بهبود مشخصه‌های سیستم داشته باشد. استفاده همزمان از این ادوات در کنار تغییر آرایش شبکه می‌تواند مزایای زیادی همچون کاهش تلفات خطوط، بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش انتشار گازهای آلاینده، آزادسازی ظرفیت سیستم‌های توزیع و انتقال، به تعویق افتادن سرمایه‌گذاری برای توسعه شبکه، ارتقای بهره‌وری و افزایش امنیت برای بارهای حساس و پراهمیت شبکه‌های توزیع داشته باشد.

در این پژوهش یک مدل جامع جهت هماهنگ‌سازی تجدید آرایش بهینه سیستم با منابع تولید پراکنده و تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی در شبکه ارئه شده است. در این راستا، یک مدل ریاضی جامع جهت بررسی افزایش نفوذ انرژی باد به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر در شبکه ارائه شده است. همچنین، در این مدل، تأثیر متقابل باز آرایی شـــبکه بر تعداد خودروهای در حال شـــارژ و دشـــارژ در پارکینگ خودروهای برقی بررسی شده است. مدل ارائه شده در یک بازه زمانی ۲۴ ساعته و در شرایط عادی و بحرانی بررسی می‌شود. در این راه، با فرض قطع شدن ارتباط با شبکه بالادست در ساعاتی از روز، میزان قطع بار قبل و بعد از بروز خطا به‌دست می‌آید. در این راستا، تابع هدف مسئله، از دیدگاه شـــرکت توزیع، علاوه بر کمینه کردن هزینه خرید انرژی الکتریکی از شـــبکه بالادســـت و صـــاحبان توربین‌های بادی، هزینه خرید و فروش انرژی به ســـیســـتم‌های ذخیره انرژی و پارکینگ خودروهای برقی، هزینه قطع بار بارهای کنترل پذیر را نیز کمینه می‌کند.

## ۳. فرمول‌بندی مسئله

مدل پیشـــنهاد شـــده برای شـــبکه هوشـــمند تحت نفوذ انرژی بادی و خورشـــید تجهیز شـــده به سیستم‌های ذخیره انرژی در حضور پارکینگ خودروهای برقی و بازآرایی شبکه ارائه خواهد شد. در این

1. Electric vehicles' parking lot

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

راستا، ابتدا تابع هدف مسئله که تمامی هزینه‌های شرکت توزیع را پوشش می‌دهد ارائه خواهد شد. سپس قیود کلی مسئله شامل قیود فیزیکی شبکه، قیود منابع و تکنولوژی‌های موجود و قیود مربوط به آرایش شبکه توزیع پیشنهاد می‌شود.

تابع هدف:

$$OF = \min\left\{\sum_{t=1}^{N_t}\tau(t)\times\left[\begin{array}{l}\sum_{i=1}^{N_{Ups}}P^{Ups}(i,t)+\sum_{i=1}^{N_{WT}}P^{WT}(i,t)+\sum_{i=1}^{N_{PV}}P^{PV}(i,t)\\+\left(\sum_{i=1}^{N_{ESS}}P_{ESS}^{DCh}(i,t)-\sum_{i=1}^{N_{ESS}}P_{ESS}^{Ch}(i,t)\right)\\+\sum_{i=1}^{N_{PL}}\sum_{v=1}^{N_{EV}}Num^{EV}(v)\times\left(P_{EV}^{DCh}(i,\mathrm{v},t)-P_{EV}^{Ch}(i,\mathrm{v},t)\right)\end{array}\right]+\sum_{t=1}^{N_t}\sum_{i=1}^{N_b}VOLL(i,t)\times P^{LSH}(\mathrm{i},\mathrm{t})\right\} \quad (۱)$$

عبارت اول سطر اول رابطه (۱) مربوط به هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه بالادست است. عبارت دوم و سوم به ترتیب هزینه خرید انرژی از واحدهای تجدیدپذیر بادی و خورشیدی است. سطر دوم هزینه‌های شارژ و دشارژ باتری را در نظر گرفته به صورتی که هنگام شارژ ذخیره‌ساز می‌تواند مبلغی را از صاحب آن دریافت نماید و در حالت دشارژ لازم است به صاحب ذخیره‌ساز هزینه پرداخت کند. سطر سوم هزینه‌های خودروهای برقی پارکینگ در نظر گرفته شده است. در این مدل، هر خودرو با توجه به مقدار شارژ یا دشارژی که انجام می‌دهد به شرکت توزیع مبلغی را پرداخت و یا دریافت می‌کند. در سطر چهارم مربوط به هزینه قطع بار است. طبیعتاً در حالت عادی، با توجه به زیاد بودن هزینه قطع بار برای شرکت توزیع قطع باری صورت نمی‌گیرد.ولی در مواقع بحرانی با توجه به کم بودن منابع در دسترس نیاز به قطع بار وجود دارد. $Num^{EV}(v)$ تعداد هر نوع خودرو، VOLL[1]هزینه انرژی ازدست رفته، $\tau(t)$ قیمت انرژی الکتریکی است.

1. Value of lost load

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

## ٤. محدودیت‌های مسئله

### ٤-١. محدودیت بازآرایی

گراف یک شبکه شعاعی متشکل از یک درخت بدون حلقه است. جهت اعمال این قید، تعداد خطوط شبکه باید برابر تعداد شین‌های شبکه منهای یک باشد. که $N_b$ تعداد شین‌های شبکه و $z^r(i,j)$ متغییر باینری نشان‌دهنده حالت خطوط است.

$$\sum_{ij \in N_b} z^r(i,j) = 2(N_b - 1) \quad (۲)$$

### ٤-٢. محدودیت پخش بار

در این قیود حدود بهره‌برداری و فیزیکی مختلف شبکه نظیر حدود ولتاژهای شبکه، توان عبوری از خطوط، محدودیت توان تزریقی به شبکه و غیره در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه علاوه بر توان تزریقی از شبکه بالادست، توان توربین‌های بادی، سیستم‌های ذخیره انرژی و پارکینگ‌های خودرو برقی در نظر گرفته شده است. همچنین، توان عبوری از خطوط شبکه با توجه به آرایش شبکه محدود شده است.

$$\forall i,j \in N_b,\ \forall t \in N_t$$

$$\begin{aligned} &P^G(i,t)+P^{WT}(i,t)+P^{PV}(i,t)+P^{LSH}(i,t)+P_{ESS}^{DCh}(i,t)-P^D(i,t) \\ &-P_{ESS}^{Ch}(i,t)+\sum_{N_{EV}} \mathrm{Num}^{EV}(\mathrm{v})\times(P_{EV}^{DCh}(i,\mathrm{v},t)-P_{EV}^{Ch}(i,\mathrm{v},t)) = \sum_{j\in N_b} z^r(i,j)\times P^{Line}(\mathrm{i,j,t}) \end{aligned} \quad (۳)$$

$$Q^G(i,t)+Q^{WT}(i,t)+\tan\left(\frac{P^D(i,t)}{Q^D(i,t)}\right)\times P^{LSH}(i,t)-Q^D(i,t) = \sum_{j\in N_b} z^r(i,j)\times Q^{Line}(\mathrm{i,j,t}) \quad (۴)$$

$$P^{line}(i,j,t) = V^2(i,\mathrm{t})\times G(i,\mathrm{j}) - V(i,t)\times V(j,t)\times\left(G(i,\mathrm{j})\times\cos(\delta(\mathrm{i,j,t}))+B(i,\mathrm{j})\times\sin(\delta(\mathrm{i,j,t}))\right) \quad (۵)$$

$$Q^{line}(i,j,t) = -V^2(i,t)\times B(i,j) - V(i,t)\times V(j,t)\times\left(G(i,\mathrm{j})\times\sin(\delta(\mathrm{i,j,t}))-B(i,\mathrm{j})\times\cos(\delta(\mathrm{i,j,t}))\right) \quad (۶)$$

روابط (۲) و (۳) روابط تعادل توان هستند. روابط (۴) و (۵) جریان توان در خطوط شبکه را نشان می‌دهند. در روابط (۲) و (۳) متغیر باینری $z^r(i,\mathrm{j})$ تعیین کننده حالت قطع و وصل خطوط بوده و در جریان توان تأثیرگذار است. G(i,j) , B(i,j) به ترتیب کندوکتانس و سوسپتانس خط بین شین i , j می‌باشند.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

## ٤-۳. محدودیت ولتاژ و توان عبوری از خط

توان ظاهری عبوری از خطوط باید در محدوده تعیین‌شده‌ای باشد و ولتاژ شین‌ها در محدود مجاز خود باشد. هچنین مقدار بار قطع شده هر شین با توجه به حداکثر بار شین در رابطه (۹) مشخص می‌شود:

$$\forall i, j \in N_b,\ \forall t \in N_t$$

$$S^{Line}(i,j,t) \le S^{line}_{MAX}(i,j,t) \quad (۷)$$

$$S^{Line}(i,j,t) = \sqrt{\left(P^{line}(i,j,t)\right)^2 + \left(Q^{line}(i,j,t)\right)^2} \quad (۸)$$

$$V_{\min} \le V(i,t) \le V_{\max} \quad (۹)$$

$$0 \le P^{LSH}(i,t) \le P^{D}(i,t) \quad (۱۰)$$

## ٤-٤. محدودیت منابع تولیدات پراکنده

$$\forall i \in N_{WT},\ \forall t \in N_t:$$

$$P^{WT}_{\min}(i) \times z^{WT}(i) \le P^{WT}(i,t) \le P^{WT}_{\max}(i) \times \psi^{WT}(t) \times z^{WT}(i) \quad (۱۱)$$

$$Q^{WT}_{\min}(i) \times z^{WT}(i) \le Q^{WT}(i,t) \le Q^{WT}_{\max}(i) \times z^{WT}(i) \quad (۱۲)$$

$$\sum_{i \in N_b} z^{WT}(i) \le MN^{WT} \quad (۱۳)$$

رابطه۱۱و۱۲ محدودیت توان اکتیو و راکتیو توربین‌های بادی[1] را با توجه به توان در دسترس این منابع در در هر ساعت نشان می‌دهد. در این رابطه، متغیر باینری $z^{WT}(i)$ و $z^{PV}(i)$ تعیین‌کننده مکان نصب توربین بادی و سلول خورشیدی[2] است. با توجه به رابطه (۱۳) تعداد توربین بادی قابل نصب در کل شبکه به یه تعداد خاص محدود می‌شود. این تعداد می‌تواند تحت تأثیر فاکتورهای مختلفی

1. Wind turbine
2. Photo-voltaic

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

قرار بگیرد. همچنین، توان خروجی منابع خورشیدی به صورت زیر محدود می‌شود. $\psi^{PV}(t)$ و $\psi^{WT}(t)$ ضرایب توان بادی و خورشیدی در دسترس می‌باشد.

$\forall i \in N_{PV}$ , $\forall t \in N_t$ :

$$P_{\min}^{PV}(i)\times z^{PV}(i) \le P^{PV}(i,t) \le P_{\max}^{PV}(i)\times \psi^{PV}(t)\times z^{PV}(i) \quad (۱۴)$$

$$\sum_{i\in N_b} z^{PV}(i) \le MN^{PV} \quad (۱۵)$$

## ٤-٥. محدودیت سیستم ذخیره‌ساز[1]

$\forall i \in N_{ESS}, \forall t \in N_t$

$$\begin{cases} 0 \le P_{ESS}^{Ch}(i,t) \le \lambda_{ESS}^{Ch}(i,t)\times P_{ESS}^{Ch^{MAX}}(i,t)\times z^{ESS}(i) & ;\forall i \in N_{ESS} \\ 0 & ;otherwise \end{cases} \quad (۱۶)$$

$$\begin{cases} 0 \le P_{ESS}^{DCh}(i,t) \le \lambda_{ESS}^{DCh}(i,t)\times P_{ESS}^{DCh^{MAX}}(i,t)\times z^{ESS}(i) & ;\forall i \in N_{ESS} \\ 0 & ;otherwise \end{cases} \quad (۱۷)$$

$$\lambda_{ESS}^{Ch}(i,t)+\lambda_{ESS}^{DCh}(i,t) \le 1 \ , \ (\lambda_{ESS}^{Ch}(i,t), \lambda_{ESS}^{DCh}(i,t) \in \{0,1\}) \quad (۱۸)$$

$$\sum_{i\in N_b} z^{ESS}(i) \le MN^{ESS} \quad (۱۹)$$

$$SOC^{ESS}(i,t) = SOC^{ESS}(i,t-1) + \Delta t.\left( P_{ESS}^{Ch}(i,t)\times \eta_{ESS}^{Ch}(i,t) - \frac{P_{ESS}^{DCh}(i,t)}{\eta_{ESS}^{DCh}(i,t)} \right) \quad (۲۰)$$

رابطه (۱۶) و (۱۷) حداکثر توان شارژ و دشارژ سیستم ذخیره انرژی را نشان می‌دهد. در این روابط متغیرهای باینری $\lambda_{ESS}^{Ch}(i,t)$ و $\lambda_{ESS}^{DCh}(i,t)$ به ترتیب تعیین‌کننده حالت شارژ و یا دشارژ باتری هستند که طبق رابطه (۱۸) فقط یکی از آن‌ها در یک ساعت مشخص می‌تولند عدد یک باشد. تعداد ذخیره‌سازهای قابل نصب در شبکه با توجه به رابطه (۱۹) محدود می‌شود. رابطه (۲۰) حالت شارژ

1. Energy storage systems

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

سیستم ذخیره انرژی $SOC^{ESS}(i,t)$ را نشان می‌دهد. $\eta_{ESS}^{Ch}(i,t)$ و $\eta_{ESS}^{DCh}(i,t)$ راندمان شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز می‌باشد. $z^{ESS}(i)$ تعیین کننده مکان نصب ذخیره‌ساز است.

## ٤-٦. محدودیت خوردهای برقی

باتری این تکنولوژی همچون باتری یک سیستم ذخیره انرژی مدل می‌شود [۴]. علاوه بر در نظر گرفتن حالت شارژ و دشارژ باتری خودرو، مسافت پیموده شده توسط هر خودرو یکی از المان‌های تابع انرژی ذخیره شده در خودرو است [۵].

$$\forall \mathrm{i} \in N_{PL}, \forall v \in N_{EV}, \forall t \in N_t$$

$$SOC^{EV}(i,\mathrm{v},t) = E_0^{EV} + \Delta t.\left( P_{EV}^{Ch}(i,\mathrm{v},t) \times \eta_{EV}^{Ch}(i,\mathrm{v},t) - \frac{P_{EV}^{DCh}(i,\mathrm{v},t)}{\eta_{EV}^{DCh}(i,\mathrm{v},t)} \right) - P_{EV}^{TR}(i,\mathrm{v},t) \quad (۲۱)$$

$$\begin{cases} 0 \le P_{EV}^{Ch}(i,\mathrm{v},t) \le \lambda_{EV}^{Ch}(i,\mathrm{v},t) \times P_{EV}^{Ch^{MAX}}(i,\mathrm{v},t) \times z^{PL}(i) & ;\forall i \in N_{PL} \\ 0 & ;otherwise \end{cases} \quad (۲۲)$$

$$\begin{cases} 0 \le P_{EV}^{DCh}(i,\mathrm{v},t) \le \lambda_{EV}^{DCh}(i,\mathrm{v},t) \times P_{EV}^{DCh^{MAX}}(i,\mathrm{v},t) \times z^{PL}(i) & ;\forall i \in N_{PL} \\ 0 & ;otherwise \end{cases} \quad (۲۳)$$

$$\lambda_{EV}^{Ch}(i,t) + \lambda_{EV}^{DCh}(i,t) \le 1 \ , \ (\lambda_{EV}^{Ch}(i,t), \lambda_{EV}^{DCh}(i,t) \in \{0,1\}) \quad (۲۴)$$

$$P_{EV}^{TR}(i,\mathrm{v},t) = \Delta D(\mathrm{v},\mathrm{t}) \times \vartheta^{EV}(v) \quad (۲۵)$$

$$Num_{Min}^{EV}(v) \le Num^{EV}(v) \le Num_{Max}^{EV}(v) \quad (۲۶)$$

$$\sum_{v \in N_{EV}} Num^{EV}(v) \le EV^{MAX} \quad (۲۷)$$

رابطه (۲۱) مقدار انرژی هر خودرو برقی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این پژوهش فرض شده است که پارکینگ عمومی در شبکه وجود دارد که خودروهای برقی در آنجا می‌توانند شارژ و دشارژ شوند. مکان این پارکینگ همانند ادوات دیگر شبکه تعیین می‌شود. حالت شارژ و دشارژ باتری هر خودرو نیز با توجه به متغیرهای باینری $\lambda_{EV}^{Ch}(i,t)$ و $\lambda_{EV}^{DCh}(i,t)$ طبق رابطه (۲۴) قابل تعریف است. همچنین، $P_{EV}^{TR}(i,\mathrm{v},t)$ توانی که جهت حرکت خودرو در سیستم حمل و نقل مصرف شده است که

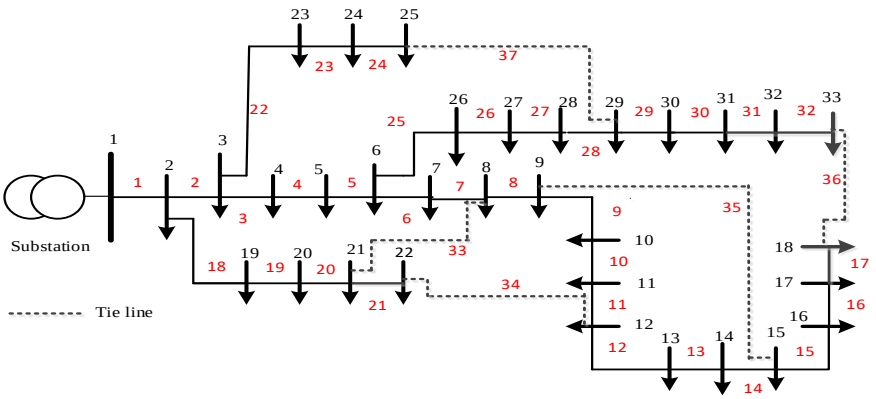
[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

طبق رابطه (۲۵) به‌دست می‌آید. $\vartheta^{EV}(v)$ ضریب مصرف خودروهای برقی است، رابطه(۲۶) و(۲۷) به ترتیب محدودکننده نوع هر خودرو و تعداد کل خودروهای شبکه هستند. $z^{PL}(i)$ تعیین‌کننده مکان نصب ایستگاه شارژ خودروهای برقی است. $E_0^{EV}$ مقدار انرژی اولیه خودرو می‌باشد.

## ۵. نتایج و تحلیل نتایج

مدل ذکر شده بر روی شبکه ۳۳ شینه IEEE در محیط GAMS پیاده‌سازی شده است داده‌های این شبکه در (باران ، ۱۹۸۹) موجود است. دیاگرام تک خطی شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است، شبکه شامل ۳۷ خط انتقال که خطوط ۳۳ تا ۳۷ آن باز می‌باشد. جهت مشاهده اثر ادوات مختلف بر شبکه بار شبکه در زمان پیک ۴/۳۶۵ مگاوات در نظر گرفته شده است. بار شبکه طبق الگوی مرجع [۱۳] در طول ۲۴ ساعت تغییر خواهد کرد. در این پژوهش فرض شده است که دو توربین بادی با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات و دو سلول خورشیدی با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات که خروجی آنها مطابق با مرجع [۷] تغییر خواهد کرد، قابل نصب خواهد بود ، همچنین یک ذخیره‌ساز با ظرفیت ۵۰۰ کیلووات ساعت که اطلاعات آن در مرجع [۲] ذکر شده است در شبکه قابل نصب است. در این مطالعه، همان‌طوری که در مرجع [۵] مشخص شده است، ۵ نوع خودرو برقی در شبکه مشخص شده است. نوع خودرو بر اساس الگوی رانندگی تعیین می‌شود. همچنین تعداد یک پارکینگ خودرو در شبکه در نظر گرفته شده است. حداکثر و حداقل هر نوع خودرو به ترتیب ۳۰ و ۵؛ تعداد کل خودروهای پارکینگ نیز ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. اطلاعات مربوط به خودروهای برقی و مسافت پیموده شده توسط هر نوع خودرو در ۲۴ ساعت در مرجع [۵] موجود می‌باشد. ضریب $\vartheta^{EV}(v)$ برابر یک ششم (کیلووات بر کیلومتر) در نظر گرفته شده است. هزینه‌ای که شرکت توزیع در ۲۴ ساعت برای خرید انرژی از واحد های تزریق توان به شبکه می‌پردازد مطابق مرجع [۱۲] تعیین می‌شود، همچنین هزینه انرژی از دست رفته VOLL در این پژوهش ۱۰۰۰ دلار بر مگاوات در نظر گرفته شده است.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]




شکل ۱. دیاگرام تک خطی شبکه۳۳ شینه

مدل ذکر شده در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد:

حالت اول: شبکه با حضور تمام ادوات (توربین بادی، سلول خورشیدی، ذخیره‌ساز و ایستگاه شارژ) و بازآرایی

حالت دوم : شبکه بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز و خودرو های برقی

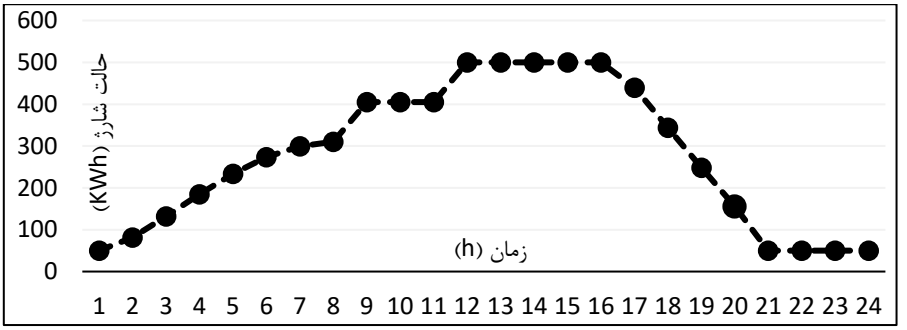
حالت سوم : شبکه با تمام ادوات و بدون در نظر گرفتن بازآرایی

حالت چهارم: شبکه در حالت بحرانی

## ۵-۱. حالت اول : شبکه با حضور تمام ادوات و بازآرایی

در این حالت که تمام ادوات از جمله توربین بادی، سلول خورشیدی، ذخیره‌ساز و پارکینگ خودرو برقی حضور دارند و شبکه قابلیت بازآرایی را خواهد داشت. در این حالت هزینه ۲۴ ساعت بهره‌برداری ۳۰۹۴/۷۵ دلار می‌باشد، مکان بهینه توربین‌های بادی در شین‌های ۳۰ و ۳۲ ، مکان بهینه نصب سلول‌های خورشیدی ۱۰و ۱۶ و مکان بهینه نصب ذخیره‌ساز و ایستگاه‌های شارژ خودروهای برقی به ترتیب شین‌های ۱۶و ۳۲ می‌باشد. در این حالت مقدار تلفات شبکه ۹۵۹ کیلووات است. در این حالت خطوط با شماره‌های ۷، ۹، ۱۴، ۱۵، ۲۴ باز می‌باشد. تغییرات سطح شارژ ذخیره‌ساز نصب شده در نمودار ۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییرات شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز با توجه به الگوی بار و قیمت انرژی قابل تعریف است به نحوی که در ساعات کم‌باری ذخیره‌ساز شارژ شده و در ساعت پرباری ذخیره‌ساز دشارژ می‌شود.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]



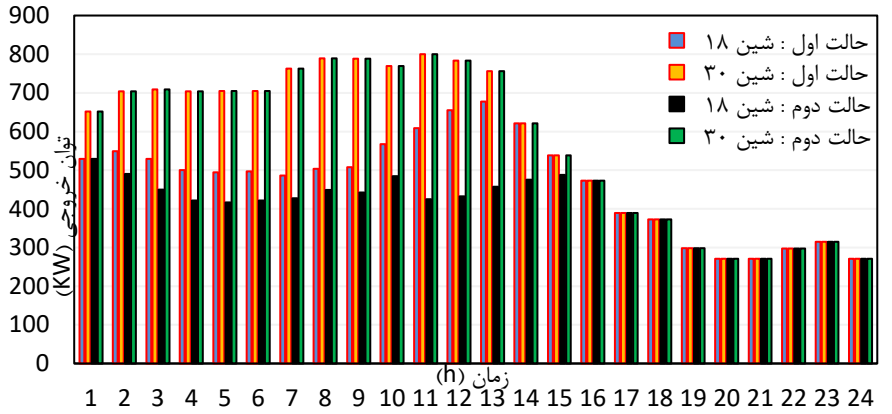

نمودار ۱. سطح شارژ ذخیره‌ساز نصب شده در حالت اول

## ۵-۲. حالت دوم : شبکه بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز و خودروهای برقی

در این حالت، تأثیر ذخیره‌ساز و خودرو های برقی را بر آرایش شبکه، توان تزریقی از شبکه بالا دست و مقدار توان تولیدات پراکنده بررسی می‌شود، در این حالت هزینه بهره‌برداری ۲۴ ساعته شبکه ۳۱۴۲/۷۱ دلار می‌باشد که نسبت به حالت اول افزایش یافته است. مکان نصب بهینه توربین‌های بادی به شین‌های ۹ و۳۲ و سلول‌های خورشیدی به شین‌های ۱۵ و ۳۱ تغییر یافته است. تلفات شبکه ۱۶۶۰ کیلووات می‌باشد که نشان‌دهنده تأثیر خودروهای برقی و ذخیره‌سازها بر کاهش تلفات است. در این حالت خطوط با شماره‌های ۴، ۷، ۱۱ ،۱۳، ۱۶ باز می‌باشد.

به دلیل پایین بودن ظرفیت منابع تولید پراکنده (۵۰۰کیلووات) در دو حالت، با و بدون ادوات ذخیره‌کننده انرژی منابع تولیدات پراکنده بیشترین توان تولیدی ممکن خود را تولید می‌کنند. جهت مشاهده تأثیر ذخیره‌ساز و خودروهایی برقی برروی تولیدات پراکنده، شبکه با توربین‌های بادی با ظرفیت ۸۰۰ کیلووات در دو حالت مجزا با و بدون ادوات ذخیره‌کننده انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق با نمودار ۲ حضور خودروهای برقی و ذخیره‌سازها باعث افزایش توان تولیدی منابع تولیدات پراکنده می‌شود. مقایسه نتایج این دو حالت که ظرفیت توربین ۸۰۰ کیلووات می‌باشد، در جدول (۱) نشان داده شده است.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]




نمودار ۲. توان تولیدی توربین‌های بادی در حالت اول و دوم

جدول۱. مقایسه نتایج در دو حالت با و بدون ادوات ذخیره انرژی با توربین ۸۰۰ کیلووات.

| هزینه بهره‌برداری ($) | خطوط باز شبکه | PL مکان | ESS مکان | PV مکان | WT مکان | شبکه با توربین kw۸۰۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۳۰۸۴/۲۵ | ۱۰- ۱۴- ۲۸ ۳۲ - ۳۳ | ۳۲ | ۶ | ۱۴- ۳۰ | ۱۸ - ۳۰ | حالت اول |
| ۳۰۹۴/۰۳ | ۱۴ - ۲۶ - ۹ ۳۲ - ۳۳ | – | – | ۱۴ - ۱۵ | ۱۸ - ۳۰ | حالت دوم |

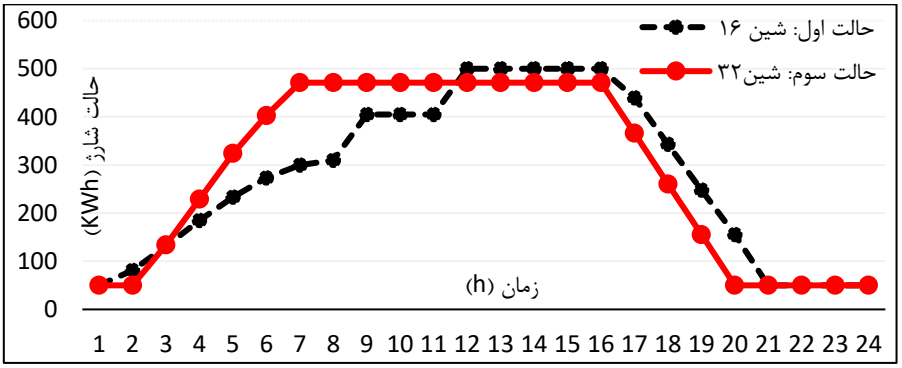
مأخذ: نتایج تحقیق

## ۵-۳. حالت سوم شبکه با تمام ادوات و بدون در نظر گرفتن بازآرایی

در این حالت شبکه در آرایش اولیه و بدون در نظر گرفتن قابلیت بازآرایی بررسی می‌شود. مقدار هزینه شرکت توزیع در حالت ۳۱۱۳/۱۷ دلار است. می‌توان گفت که بازآرایی شبکه باعث کاهش هزینه بهره‌برداری می‌شود، در مقایسه با حالت دوم می‌توان گفت تأثیر بازآرایی کمتر از تأثیر حضور ذخیره‌ساز و خودروهای برقی است. در این حالت تلفات ۱۴۵۰ کیلووات می‌باشد. در این حالت توربین‌های بادی درشین‌های ۱۴ و ۳۲، سلول‌های خورشیدی شین‌های ۱۵ و ۳۰، ایستگاه شارژ خودرو برقی و ذخیره‌ساز به ترتیب شین‌های ۱۴ و ۳۲ نصب می‌شوند. در این حالت شبکه در آرایش اولیه خود می‌باشد بنابراین خطوط با شماره‌های۳۳ تا ۳۷ باز می‌باشد. در نمودار ۳ سطح شارژ ذخیره‌ساز نصب شده در این حالت با

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

حالت اول مورد مقایسه قرار گرفته است که نشان می‌دهد که سطح شارژ ذخیره‌ساز تحت تأثیر بازآرایی قرار می‌گیرد.




نمودار ۳. تغییرات سطح شارژ ذخیره‌ساز در حالت اول و سوم

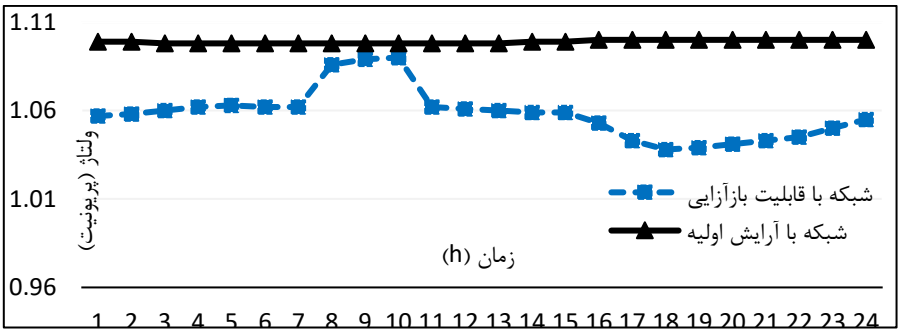
### ٤-٥. حالت چهارم شبکه در حالت بحرانی

در این حالت فرض می‌شود که ارتباط شبکه توزیع با پست برای در ساعت ۸ تا ۱۰ قطع و خطوط بین شین‌های ۶ و ۷ همچنین ۳ و ۲۳ قطع شود. جهت بررسی اثر بازآرایی شبکه را با و بدون در نظر گرفتن قابلیت بازآرایی بررسی می‌شود.

در حالتی که شبکه قابلیت بازآزایی دارد هزینه بهره‌داری ۲۴ ساعته شبکه ۶۱۱۶/۱ دلار و در حالتی که شبکه قابلیت بازارایی ندارد این هزینه به ۲۳۹۱۳/۱ دلار افزایش می‌یابد که این افزایش هزینه به دلیل مقدار بارهای از دست رفته در این حالت است، به عنوان نمونه شین ۱۸ در حالت با قابلیت بازآرایی فقط ۱۳۴ کیلووات بار از دست داده در حالی که در حالت بدون قابلیت بازآریی مقدار بار قطع شده در این شین ۱۷۴۲ کیلووات می‌باشد. می‌توان گفت بازآرایی باعث کاهش هزینه شرکت توزیع و همچنین کاهش مقدار بار قطع شده خواهد شد، که خود منجر به بهبود تاب‌آوری شبکه می‌شود. در حالت با قابلیت بازآرایی مکان بهینه نصب توربین‌های بادی شین‌های ۳۰ و ۳۲، سلول‌های خورشیدی شین‌های ۱۸ و ۲۳، ذخیره‌ساز شین ۲۲ و ایستگاه شارژ خودروهای برقی شین ۳ می‌باشد. همچنین خطوط با شماره ۹، ۱۳، ۳۶ باز و خطوط ۶ و ۲۲ قطع فرض شده است. در حالت بدون بازآرایی مکان بهینه نصب توربین‌های بادی شین‌های ۱۴ و ۲۵، سلول‌های‌خورشیدی شین‌های ۷ و ۱۱، ذخیره‌ساز شین ۶ و ایستگاه شارژ خودروهای برقی شین ۳ می‌باشد. همچنین خطوط ۶ و ۲۲ قطع

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

فرض شده است. در نمودار ۴ پروفیل ولتاژ در شین ۱۸ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود حالت بدون قابلیت بازآرایی ولتاژ این شین در حال فروپاشی و رد شدن از حد بالای ولتاژ قرار دارد. نشان‌دهنده تأثیر بازآرایی بر روی امنیت شبکه از دیدگاه پایداری ولتاژ در مواقع بحرانی است.




نمودار ۴. پروفیل ولتاژ شین ۱۸ در دو حالت شبکه با بازآرایی و بدون بازآرایی

جهت مقایسه بهتر تأثیر بازآرایی شبکه و ادوات ذخیره انرژی بر خروجی‌های مدل، نتایج حالت‌های مختلف در جدول (۲) به صورت خلاصه ذکر شده است.

جدول ۲. مقایسه حالت‌های مختلف شبکه

| حالت مسئله | WT مکان | PV مکان | ESS مکان | PL مکان | خطوط باز شبکه | هزینه بهره‌برداری ($) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| حالت اول | ۳۰ - ۳۲ | ۱۰ - ۱۶ | ۱۶ | ۳۲ | ۹ - ۱۴ - ۱۵ ۷ - ۲۴ | ۳۰۹۴/۷۵ |
| حالت دوم | ۹ - ۳۲ | ۱۵ - ۳۱ | – | – | ۴ - ۷ - ۱۱- ۱۳ ۱۶ | ۳۱۴۲/۷۱ |
| حالت سوم | ۱۴ - ۳۲ | ۱۵ - ۳۰ | ۳۲ | ۱۴ | – | ۳۱۱۳/۱۷ |
| حالت چهارم با بازآرایی | ۳۰ - ۳۲ | ۱۸ -۲۳ | ۲۲ | ۳ | ۹ - ۱۳ - ۲۲ ۶ - ۳۶ | ۶۱۱۶/۱ |
| حالت چهارم بدون بازآرایی | ۱۴ - ۲۵ | ۷ - ۱۱ | ۶ | ۳ | ۶ - ۲۲ | ۲۳۹۱۳/۰۷ |

مأخذ: نتایج تحقیق

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

## ٦. نتیجه‌گیری

با توجه به کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش گازهای گلخانه‌ای، در آینده‌ای نه‌چندان دور شاهد نفوذ خودروهای الکتریکی و منابع‌تولید پراکنده در سطوح بالا خواهیم بود. پیوست سیستم‌های ذخیره انرژی و خودروهای برقی در سیستم‌های ولتاژ پایین باعث افزایش انعطاف‌پذیری این شبکه‌ها می‌شود. از جمله این ویژگی‌ها، فراهم آوردن امکان تجمیع تولیدات پراکنده در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر بوده که این موضوع اهمیت این تکنولوژی را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرپذیر بودن توان خروجی منابع تولید پراکنده، با کنترل بهینه شارژ و دشارژ خروجی این ادوات می‌توان لزوم حضور این ادوات در شبکه را بیشتر نشان داد. از طرفی، با توجه به وجود تعدادی کلید در شبکه توزیع که در حالت عادی باز هستند، از این گزینه می‌توان جهت بهبود مشخصه‌های مختلف شبکه بهره برد.

در این مقاله، یک مدل جامع برای بازآرایی شبکه توزیع در حضور سیستم‌های ذخیره انرژی، خودروهای برقی و منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در این راه تأثیر ادوات ذخیره‌ساز انرژی موجود در شبکه بر نفود منابع تولید پراکنده و آرایش شبکه بررسی شده است. همچنین، جهت نشان دادن تأثیر تجدیدآرایش شبکه بر بهبود تاب‌آوری شبکه، مدل مسئله در حالت بحرانی حل شده است.

مقایسه نتایج حالت‌های مختلف حاکی از آن است که:

- آرایش شبکه توزیع تحت تأثیر حضور ادوات ذخیره‌ساز انرژی همچون باتری و خودروهای برقی است.
- مکان بهینه بهره‌برداری از تولیدات پراکنده، سیستم‌های ذخیره انرژی و پارکینگ خودروهای برقی تحت تأثیر تجدید آرایش شبکه قرار دارد.
- سیستم‌های ذخیره انرژی و خوردوهای برقی باعث افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده در شبکه می‌شوند.
- بازآرایی شبکه یک روش مناسب برای بهبود تاب‌آوری شبکه است.
- تجدید آرایش شبکه توزیع می‌تواند بر استراتژی‌های شارژ و دشارژ تأثیر بگذارند.
- ادوات ذخیره انرژی و بازآرایی شبکه می‌توانند به صورت جداگانه و یا به صورت مشترک باعث کاهش تلفات توان شوند.
- بازآرایی شبکه توزیع می‌تواند امنیت شبکه را از دیدگاه پایداری ولتاژ در مواقع بحرانی بهبود بخشد.
- بازآرایی شبکه توزیع و ادوات ذخیره‌سازی انرژی نقش پررنگی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری دارند.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

## منابع


[1] Baran M.E. and F.F. Wu. (1989). "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Transactions on Power delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1401-1407.

[2] Carpinelli G. et al. (2013). "Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 4, no. 2, pp. 985-995.

[3] Dorostkar-Ghamsari M.R. et al. (2016). "Value of Distribution Network Reconfiguration in Presence of Renewable Energy Resources," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, No. 3, pp. 1879-1888.

[4] El-Zonkoly A. and L. dos Santos Coelho. (2015). "Optimal allocation, sizing of PHEV parking lots in distributionsystem," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 472-477.

[5] Ghahramani M. et al. (2018). "Short-term Scheduling of Future Distribution Network in High Penetration of Electric Vehicles in Deregulated Energy Market," *in Operation of Distributed Energy Resources in Smart Distribution Networks: Elsevier*, pp. 139-159.

[6] Ghofrani-Jahromi Z. et al. (2014). "Distribution Switches Upgrade for loss Reduction and Reliability Improvement," *IEEE Transactions on Power Delivery, vol*. 30, No. 2, pp. 684-692.

[7] Hooshmand E. and A. Rabiee (2019). "Energy Management in Distribution Systems, Considering the Impact of Reconfiguration, RESs, ESSs and DR: A trade-off between cost and reliability," *Renewable energy*, vol. 139, pp. 346-358.

[8] Kazemi M.A. et al. (2016). "Optimal Siting and Sizing of Distribution System Operator Owned EV Parking lots," *Applied energy*, vol. 179, pp. 1176-1184.

[9] Li.X and C. Jiang. (2010). "Short-term Operation Model and Risk Management for Wind power Penetrated System in Electricity Market," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 2, pp. 932-939.

[10] Malekpour A.R. (2013). "Multi-objective Stochastic Distribution feeder Reconfiguration in Systems with wind Power Generators and Fuel Cells using the Point Estimate Method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, No.2, pp. 1483-1492.

[11] Mazza A. et al. (2014). "Optimal Multi-objective Distribution System Reconfiguration with multi Criteria Decision Making-based Solution Ranking and Enhanced Genetic Operators," I*nternational Journal of Electrical Power & Energy Systems*, No. 54, pp. 255-267.

[12] Parvania M. et al. (2013). "Optimal Demand Response Aggregation in Wholesale Electricity Markets," *IEEE transactions on smart grid*, vol. 4, No. 4, pp. 1957-1965.


[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]

[13] Soroudi A. et al. (2015). "Optimal DR and ESS Scheduling for Distribution Losses Payments Minimization under Electricity Price Uncertainty," *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 7, No. 1, pp. 261-272.

[14] Tamimi A.A. et al. (2012). "Effective wind farm Sizing Method for Weak Power Systems using Critical Modes of Voltage Instability," *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 27, No. 3, pp. 1610-1617.

[ Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-12 ]