

---

# A robust optimal restoration approach for the multi-microgrid active distribution network in the presence of the MESS fleet

Ehsan Lotfi<sup>1</sup>, Amin Samanfar<sup>2</sup>, Mahdi Nikzad<sup>3</sup>

1-PhD Candidate Islamic Azad University, Khorramabad Branch  
E.s23352@gmail.com

2-Assistant Prof. Islamic Azad University, Khorramabad Branch  
a.samanfar@gmail.com

3-Assistant Prof. Islamic Azad University, Islamshahr Branch  
Mehdi.nikzad@iau.ac.ir

## Abstract:

The occurrence of natural disasters can lead to the destruction of communication roads and electricity distribution lines. In this situation, to feed sensitive loads the flexibility of the network can be increased using the fleet of Mobile Energy Storage Systems (MESS). However, the destructive effects of natural disasters are not limited to the infrastructure of the electricity distribution network and may also damage some road lines which disrupts the dispatch of the MESS fleet. Since these failures are not certain, it is necessary to consider these uncertainties when determining the restoration scheduling of the Multi-Microgrid Active Distribution Network (MMADN) in the presence of the MESS fleet. In this regard, a comprehensive optimal robust restoration method for the distribution network after natural disasters is presented. In the proposed model, the MESS fleet dispatch along with their charge and discharge schedule is determined in coordination with the available local energy resource in the MMADN considering the worst simultaneous damages to the roads and distribution lines. Also, a two-level approach with a meta-heuristic algorithm in the upper level and the CPLEX solver in the lower level is developed to solve the proposed robust model. The simulation results on the modified IEEE 33-bus distribution network confirm the efficiency of the proposed method to schedule the MESS fleet and the microgrid resources to restore critical loads, optimally.

**Keywords:** MESS fleet, restoration, uncertainty, active distribution network, microgrid

Date of sending the article: 2023/12/04  
Acceptance date of the article: 2024/10/06

Name of the Corresponding Author: Amin Samanfar

Corresponding Author's Address: Islamic Azad University, Khorramabad Branch , Iran

## یک روش مقاوم جهت بازیابی بهینه شبکه توزیع فعال چند ریزشکه‌ای در حضور ناوگان MESS

نوع مطالعه: پژوهشی

- احسان لطفی<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، امین سامان فر<sup>۲</sup> استادیار، مهدی نیک زاد<sup>۳</sup> استادیار
- ۱- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی - واحد خرم‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - خرم‌آباد - ایران  
E.s23352@gmail.com
- ۲- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی - واحد خرم‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی - خرم‌آباد - ایران  
a.samanfar@gmail.com, a.samanfar@khoiau.ac.ir
- ۳- گروه برق دانشکده فنی و مهندسی - واحد اسلامشهر - دانشگاه آزاد اسلامی - اسلامشهر - ایران  
Mehdi.nikzad@iau.ac.ir

### چکیده

وقوع بلایای طبیعی می‌تواند تخریب جاده‌های ارتباطی و خطوط توزیع برق را به دنبال داشته باشد. در این شرایط، بکارگیری ناوگان سیستم‌های ذخیره انرژی سیار (MESS) انعطاف‌پذیری شبکه برای تغذیه بارهای حساس را افزایش می‌دهد. با این حال، آسیب‌های وارده به خطوط توزیع و جاده‌های ارتباطی نه تنها انتقال توان در سطح شبکه توزیع بلکه اعزام ناوگان MESS را نیز مختل می‌کند. از آنجایی که میزان این خسارات مشخص نیست، لازم است تا این عدم قطعیت‌ها هنگام برنامه‌ریزی بازیابی شبکه‌ی توزیع فعال چند ریزشکه‌ای در حضور ناوگان MESS در نظر گرفته شوند. برای این منظور، در این مقاله، یک روش مقاوم جهت بازیابی یکپارچه شبکه توزیع بعد از بروز بلایای طبیعی ارائه شده است. در این روش، برنامه‌ریزی حرکت ناوگان MESS و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ آن‌ها به صورت هماهنگ با برنامه‌ریزی تولید منابع انرژی ریزشکه‌ها در برابر بدترین خسارات همزمانی که منجر به بیشینه شدن هزینه‌های بهره‌برداری سیستم می‌شود، تعیین می‌گردد. همچنین، یک روش دو سطحی با تلفیق یک الگوریتم فراابتکاری با حل‌کننده‌ی CPLEX برای حل مدل مقاوم پیشنهادی ارائه شده است. شبیه‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه‌ی توزیع اصلاح شده‌ی ۳۳ شینه‌ی IEEE کارایی آن در بازیابی شبکه با استفاده از ظرفیت ناوگان MESS و ریزشکه‌های متصل به آن را تأیید می‌کند.

**کلمات کلیدی:** ناوگان MESS، بازیابی، عدم قطعیت، شبکه‌ی توزیع فعال، ریزشکه.

تاریخ ارسال: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵

نام نویسنده مسئول: امین سامان فر

نشانی نویسنده مسئول: گروه برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد - ایران

## ۱- مقدمه

تا کنون، مطالعات گسترده‌ای در زمینه‌ی بکارگیری MESS ها از جام شده است. در مرجع [۱۴]، MESS ها به عنوان ژنراتورهای توزیع شده در نظر گرفته شده و از آن‌ها برای بازیابی بارهای بحرانی استفاده شده است. از آنجایی که زمان سفر MESS ها در شبکه‌های جاده‌ای می‌تواند تا حد زیادی بر مدت زمان خاموشی بارهای بحرانی تأثیر گذار باشد، در این مرجع یک چارچوب دو مرحله‌ای برای تعیین مکان قرارگیری MESS ها قبل از بروز بلایای طبیعی و تعیین برنامه‌ریزی حرکت آن‌ها بعد از وقوع حادثه ارائه شده است. با این حال، اثر خسارت وارده به جاده‌های ارتباطی در نظر گرفته نشده است. در [۱۷]، منابع انرژی سیار شامل اتوبوس‌های برقی و باتری‌های قابل حمل، برای آمادگی پیشگیرانه در برابر رویدادهای آب و هوایی شدید تخصیص داده شده‌اند. شکل‌گیری ریز شبکه‌های پویا برای تطبیق عملکرد منابع تولید پراکنده متحرک و ثابت پس از بروز بلای طبیعی در [۱۸] پیشنهاد شده است. مرجع [۱۹] یک روش بازیابی بار بحرانی مبتنی بر ریز شبکه را با تشکیل ریز شبکه‌ها و موقعیت‌یابی منابع اضطراری متحرک ارائه می‌کند. با این وجود، تخصیص منابع MESS ها تنها یکبار و آن هم قبل از وقوع حادثه و یا در ابتدای بروز آن انجام شده است. در این مرجع، بهینه‌سازی رفتارهای زمانی-مکانی MESS ها در طول فرآیند بازسازی شبکه در نظر گرفته نشده است که موجب استفاده ناکافی از مزیت متحرک‌پذیری و انعطاف‌پذیری ناوگان MESS می‌شود. مرجع [۲۰] از طریق یک چارچوب دو مرحله‌ای مسیریابی و زمان‌بندی انعطاف‌پذیر منابع انرژی متحرک را برنامه‌ریزی کرده است، که در آن پیش‌موقعیت‌یابی و اعزام پویا با اقدامات بازیابی شبکه مانند بازسازی خطوط جاده‌ای هماهنگ شده‌اند. در [۲۱] به منظور بازیابی و ترمیم سیستم پس از وقوع بلای طبیعی یک طرح انعطاف‌پذیر برای تعیین برنامه‌ریزی هماهنگ پرسنل تعمیرات با ناوگان انرژی سیار با در نظر گرفتن پیکربندی مجدد شبکه ارائه شده است. یک طرح مشترک برای یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی پویای MESS ها، برنامه‌ریزی مجدد ژنراتورهای محلی و پیکربندی مجدد شبکه نیز در [۲۲] پیشنهاد شده است. این تحقیقات عدم قطعیت خسارات وارده به شبکه و جاده‌های ارتباطی را به صورت همزمان در نظر نمی‌گیرند. با این حال، حوادث شدید آب و هوایی نه تنها سیستم‌های توزیع بلکه شبکه‌های حمل و نقل جاده‌ای، را نیز می‌تواند از بین ببرد [۱، ۳] که برنامه‌ریزی حرکت ناوگان MESS ها را مختل می‌کند.

در مطالعات صورت گرفته، عدم قطعیت‌های مرتبط با خرابی جاده‌ها و

خاموشی‌های گسترده در پی حوادث شدید آب و هوایی می‌توانند منجر به عواقبی فاجعه‌بار برای اقتصاد و جامعه شوند [۱، ۲]. طوفان و شرایط وخیم آب و هوایی خسارات سنگینی را بر شبکه‌های برق تحمیل می‌کنند و بر اهمیت بهبود تاب‌آوری سیستم‌های توزیع تأکید دارند [۳-۵]. از آنجایی که خطوط توزیع در برابر بلایای طبیعی آسیب‌پذیر هستند، ضروری است تا انعطاف‌پذیری سیستم‌های توزیع جهت بازیابی بهتر و سریعتر، افزایش یابد [۶]. هنگام وقوع خاموشی گسترده، می‌توان از منابع محلی مختلف مانند ریز شبکه‌ها و منابع انرژی توزیع شده برای تغذیه بارهای حیاتی در سیستم‌های توزیع استفاده کرد.

تا کنون، به منظور بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع در برابر فاجعات طبیعی مطالعات گسترده‌ای صورت گرفته است. در [۷] یک روش فرآیندکاری برای جایابی، اندازه‌یابی و تعیین نوع بهینه منابع تولید پراکنده جهت بهبود تاب‌آوری شبکه‌ی توزیع ارائه شده است. یک چارچوب بازیابی بار پویا با استفاده همزمان از منابع تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای الکتریکی ثابت در [۸] پیشنهاد شده است. یک رویکرد بازیابی مبتنی بر جزیره‌سازی برای بازیابی شبکه‌ی توزیع با استفاده از منابع تولیدات پراکنده و خودروهای برقی در [۹] و یک روش مبتنی بر تئوری گراف جهت ایجاد ریز شبکه‌های جزیره‌ای در [۱۰] پیشنهاد شده است. در [۱۱] یک روش دوسطحی برای تعیین برنامه‌ریزی بهینه بهره‌برداری از ریز شبکه‌ها هنگام مواجهه با بدترین شرایط خروج منابع تجدیدپذیر ارائه شده است. در [۱۲] یک روش بازیابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک با هدف افزایش بار بازیابی شده با حداقل تعداد عملکردهای کلیدزنی در سطح شبکه توزیع ارائه شده است.

علاوه بر منابع تولیدات پراکنده، سیستم‌های انرژی سیار<sup>۱</sup> (MESSs) [۱۳] نیز یکی از تجهیزات مؤثر جهت افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع هستند [۱۴]. MESS ها عموماً سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب شده در کانتینرهای وسایل نقلیه جاده‌ای هستند که با برخورداری از رابط‌های الکتریکی استاندارد دارای قابلیت اتصال و اجرا<sup>۲</sup> هستند [۱۳] و بدون نیاز به تجهیزات اضافی می‌توانند به شبکه متصل و با آن تبادل انرژی الکتریکی انجام دهند. در حالت عملی عادی سیستم، MESS ها برای تغییر بار [۱۵] و رفع تراکم سیستم انتقال [۱۶] و در هنگام وقوع حوادث شدید به عنوان منابع انرژی متحرک استفاده می‌شوند.

<sup>1</sup> Mobile Energy Storage Systems (MESSs)

<sup>2</sup> plug and play

برنامه‌ریزی منابع انرژی موجود در ریزشکته‌های متصل به شبکه توزیع فعال مورد نیاز است. در این راستا در این مقاله یک مدل مقاوم یکپارچه برای تعیین برنامه‌ریزی بهینه شبکه توزیع فعال چند ریزشکته‌ای در حضور ناوگان MESS ارائه شده است. برخی از قابلیت‌های مدل پیشنهادی در جدول ۱۱ با روش‌های بازیابی موجود مقایسه شده است.

خطوط توزیع پس از وقوع بلایای طبیعی به صورت یکپارچه مدل‌سازی نشده‌اند تا اثر متقابل این خسارات بر میزان بازیابی شده و هزینه‌های بازیابی سیستم نمایان شود. همچنین، شبکه حمل و نقل جاده‌ای که برنامه‌ریزی حرکت MESSها بر اساس آن تعیین می‌شود، به صورت دقیق مدل‌سازی نشده و مسیرهای رفت و برگشت جاده‌ای از هم متمایز نشده‌اند. بنابراین، یک چارچوب بازیابی یکپارچه بهینه جهت هماهنگ نمودن برنامه‌ریزی عملکردی منابع انرژی متحرک با

جدول ۱ مقایسه مشخصات روش پیشنهادی با مطالعات موجود

مرجع	عدم قطعیت خرابی جاده	عدم قطعیت خروج شاخه توزیع	مدلسازی مجزای مسیر رفت و برگشت جاده‌ای	برنامه‌ریزی توان راکتیو
[۱۴]	x	x	x	x
[۱۷]	x	✓	x	x
[۱۸]	x	x	x	x
[۱۹]	x	✓	x	x
[۲۰]	x	✓	x	✓
[۲۱]	✓	x	x	✓
[۲۲]	x	✓	x	x
این مقاله	✓	✓	✓	✓

زیر ساخت‌های شبکه‌ی توزیع و مسیرهای جاده‌ای در نظر گرفته شود. برای در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها، در این مقاله، یک مدل مقاوم پیشنهاد شده است که در آن برنامه‌ریزی عملکردی ناوگان MESS و برنامه‌ریزی منابع تولید محلی در شبکه‌ی توزیع، به صورت یکپارچه با در نظر گرفتن عدم قطعیت خسارات ناشی از یک بلای طبیعی مدل‌سازی شده‌اند. در این بخش، مدل بازیابی مقاوم پیشنهادی تشریح می‌شود. برای این منظور، ابتدا فرضیات مدل‌سازی بیان می‌شوند و در ادامه، مدل پیشنهادی برای تعیین برنامه‌ریزی یکپارچه شبکه‌ی توزیع در حضور ناوگان MESS بیان می‌شود. در نهایت، مدل بازیابی مقاوم پیشنهادی با در نظر گرفتن بدترین خسارات همزمان به شبکه توزیع و سیستم حمل و نقل جاده‌ای تشریح خواهد شد.

مهم‌ترین نوآوری‌های این مقاله به شرح ذیل است:

- ارائه‌ی یک مدل مقاوم یکپارچه برای تعیین برنامه‌ریزی بازیابی شبکه توزیع فعال در حضور ناوگان MESS با در نظر گرفتن عدم قطعیت خسارت وارده به خطوط توزیع و جاده‌های ارتباطی.
  - ارائه‌ی یک روش حل دو سطحی با تلفیق یک الگوریتم فراابتکاری در سطح اول با حل کننده‌ی CPLEX در سطح دوم جهت بهینه‌سازی مدل مقاوم پیشنهادی
  - مدل‌سازی جاده‌های موجود در سیستم حمل و نقل به صورت یال‌های جهتدار به منظور مدل‌سازی مسیرهای یک طرفه و تفکیک مسیرهای رفت و برگشت جاده‌ای از یکدیگر.
- در ادامه، مدل مقاوم یکپارچه پیشنهادی برای بازیابی شبکه‌ی توزیع در حضور ناوگان MESS در بخش دوم و روش حل پیشنهادی دو سطحی در بخش سوم تشریح خواهد شد. سپس، مطالعات شبیه‌سازی بر روی سیستم توزیع اصلاح شده‌ی ۳۳ شینه‌ی IEEE در بخش چهارم بیان می‌شود و پس از آن نتیجه‌گیری مقاله در بخش پنجم بیان می‌شود.

## ۲- تشریح مسئله بازیابی

در اثر وقوع زلزله یا یک بلای طبیعی، ممکن است برخی از خطوط توزیع و یا برخی از جاده‌های شبکه‌ی ارتباطی آسیب دیده و قابل استفاده نباشند. با این حال، قبل از وقوع یک بلای طبیعی، میزان دقیق خسارت وارد شده به شبکه توزیع و شبکه‌ی حمل و نقل جاده‌ای قابل پیش‌بینی نیست. بنابراین، هنگام تعیین برنامه‌ریزی عملکردی ناوگان MESS و شبکه‌ی توزیع باید عدم قطعیت خسارات وارده به

## ۲-۱ فرضیات مدل‌سازی

در این مدل، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- (۱) از آنجایی که هدف این مقاله، تعیین برنامه‌ریزی بازیابی شبکه توزیع در حضور ناوگان MESS است، اطلاعات ناوگان MESS به عنوان پارامترهای ثابت ورودی مدل پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، تعیین ظرفیت و تعداد MESSهای موجود در ناوگان MESS، جزو اهداف این مقاله نیست.
- (۲) شبکه‌ی توزیع و ریزشکته‌های متصل به آن و همچنین ناوگان MESS دارای مالکیت واحد هستند و برنامه‌ریزی بهره‌برداری آن‌ها توسط یک مرکز کنترل واحد تعیین می‌شود.
- (۳) اتصال MESSها به شبکه‌ی توزیع فعال تنها از طریق ریزشکته‌ها امکان‌پذیر است [۲۳].

## ۲-۲ مدل‌سازی شبکه توزیع در حضور ناوگان

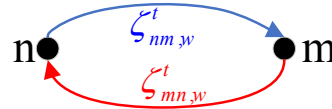
### MESS

در این مقاله، بهره‌برداری از شبکه‌ی توزیع در حضور ناوگان MESS در قالب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP<sup>1</sup>) فرمول‌بندی شده است که جزئیات آن در ادامه بیان می‌شود.

### ۱-۲-۲ مدل‌سازی سیستم حمل و نقل جاده‌ای

در مدل مقاوم یکپارچه پیشنهادی، هر کدام از جاده‌های موجود در شبکه‌ی حمل و نقل جاده‌ای به صورت یک یال جهت‌دار مدل شده‌اند. این ویژگی باعث می‌شود تا مسیرهای رفت و برگشت میان دو گره به صورت مجزا مدل شوند.

در شکل ۱، یال‌های جهت‌دار  $\xi_{nm,w}^t$  و  $\xi_{mn,w}^t$  برای مدل‌سازی سیستم حمل و نقل جاده‌ای میان گره‌های  $n$  و  $m$  نشان داده شده است.



شکل ۱ مدل‌سازی قرارگیری MESSها در شبکه‌ی حمل و نقل جاده‌ای

در این شکل، برای تأکید بر جهت یال‌ها،  $\xi_{nm,w}^t$  و  $\xi_{mn,w}^t$  با دو رنگ مجزای آبی و قرمز ترسیم شده‌اند. بالانویس  $t$  و زیرنویس  $w$  به ترتیب به شماره گام زمانی و شماره MESS اشاره دارند. همچنین، در این مقاله، یال جهت‌دار از گره‌ی  $n$  به  $m$  با اندیس  $nm$  و یال جهت‌دار از گره‌ی  $m$  به  $n$  با  $mn$  نشان داده شده است.  $\xi_{nm,w}^t$  یک متغیر باینری است که مکان MESS شماره  $w$ ام در گام زمانی  $t$ ام را در سیستم حمل و نقل جاده‌ای بیان می‌کند. اگر  $\xi_{nm,w}^t$  برابر یک باشد ( $\xi_{nm,w}^t = 1$ ) بدان معنا است که این MESS در یال جهت‌دار  $nm$  ( $\xi_{nm,w}^t = 1$ ) قرار دارد. در روش پیشنهادی، گره‌های سیستم حمل و نقل جاده‌ای، مانند گره‌های  $n$  و  $m$  نیز با یال‌های جهت‌دار  $nm$  و  $mn$  مدل‌سازی شده است. بنابراین، اگر MESS شماره  $w$ ام در گام زمانی  $t$ ام در گره‌ی  $n$  قرار گرفته باشد، آنگاه  $\xi_{nn,w}^t$  برابر یک خواهد بود ( $\xi_{nn,w}^t = 1$ ). با توجه به مدل ارائه شده، هر MESS در هر بازه‌ی زمانی تنها می‌تواند در یک یال حضور داشته باشد. این قید از نظر ریاضی در رابطه (۱) مدل‌سازی شده است:

$$\sum_{nm \in E} \xi_{nm,w}^t = 1 \quad \forall t \in T, \forall w \in W \quad (1)$$

که  $T$  مجموعه‌ی تمام گام‌های زمانی موجود در افق باز یابی،  $W$  مجموعه‌ی تمامی MESSهای موجود در ناوگان MESS و  $E$  نیز

<sup>1</sup> Mixed-Integer Linear Program (MILP)

مجموعه‌ی تمام یال‌های موجود در سیستم حمل و نقل جاده‌ای است. محدودیت پیوستگی حرکت MESS در شبکه‌ی حمل و نقل جاده‌ای در رابطه (۲) بیان شده است. بر اساس این رابطه، MESS شماره  $w$ ام در گام زمانی  $t$ ام نمی‌تواند وارد یال  $nm$  شود، مگر اینکه در گام زمانی قبل ( $t-1$ ) در یکی از گره‌های منتهی به  $n$  (یعنی یال جهت‌دار  $in$ ) و یا در همان یال ( $nm$ ) حضور داشته باشد.

$$\xi_{nm,w}^t - \xi_{nm,w}^{t-1} \leq \sum_{in \in E} \xi_{in,w}^{t-1} \quad \forall t \in T, \forall nm \in E, \forall w \in W \quad (2)$$

که،  $in$  اندیس یال منتهی به گره‌ی  $n$  است. محدودیت سرعت حرکت MESS در رابطه (۳) بیان شده است.

$$(\xi_{nm,w}^{t-1} - \xi_{nm,w}^t) \leq \frac{1}{\rho_{nm,w}} \sum_{k=t-\rho_{nm,w}}^{t-1} \xi_{nm,w}^k \quad \forall t \in T, \forall nm \in E, \forall w \in W \quad (3)$$

که  $\rho_{nm,w}$  تعداد گام‌های زمانی مورد نیاز برای پی‌موردن یال جهت‌دار  $nm$  توسط MESS شماره  $w$ ام می‌باشد. در رابطه (۴) به صورت نسبت طول یال جهت‌دار  $nm$  به حاصل ضرب طول گام زمانی  $\tau$  در سرعت متوسط MESS شماره  $w$ ام تعریف شده است.

$$\rho_{nm,w} = \left\lceil \frac{le_{nm}}{\tau \times Va_w} \right\rceil \quad \forall nm \in E, \forall w \in W \quad (4)$$

در این رابطه، نماد ریاضی  $\lceil A \rceil$  بیانگر تابع  $\text{ceil}(A)$  است که عدد  $A$  را به نزدیک‌ترین عدد صحیح بزرگتر از آن گرد می‌کند.  $Va_w$  سرعت متوسط MESS شماره  $w$ ام،  $le_{nm}$  طول یال  $nm$  و  $\tau$  طول گام زمانی برنامه‌ریزی است.

در رابطه‌ی (۵)، خسارات وارده به جاده‌ها مدل‌سازی شده است. بر اساس این رابطه، اگر یک جاده‌ی ارتباطی در اثر بلای طبیعی خسارت دیده و غیر قابل استفاده باشد، هیچ کدام از MESSها نمی‌توانند در یال جهت‌دار متناظر با آن قرار گیرند.

$$\xi_{nm,w}^t \leq 1 - F_{TN,nm} \quad \forall t \in T, \forall nm \in E, \forall w \in W \quad (5)$$

که  $F_{TN,nm}$  یک متغیر باینری است که وضعیت آسیب دیدگی یال جهت‌دار  $nm$  را بیان می‌کند. اگر این یال آسیب دیده باشد  $F_{TN,nm}$  برابر یک و در غیر اینصورت برابر صفر خواهد بود.

### ۲-۲-۲ مدل‌سازی شارژ و دشارژ MESSها

MESSها تنها در نقاط قرارگیری ریز شبکه‌ها می‌توانند به شبکه‌ی توزیع برق متصل شوند و شارژ و یا دشارژ شوند. این محدودیت، در قیود (۶) و (۷) مدل‌سازی شده است.

$$0 \leq Pch_{m,w}^t \leq \xi_{mm,w}^t \times Pch_w^{max} \quad \forall t \in T, \forall w \in W, \forall m \in M \quad (6)$$

$$0 \leq Pg_m^t \leq Pg_m^{max} \quad \forall t \in T, \forall m \in M \quad (13)$$

$$0 \leq Qg_m^t \leq Qg_m^{max} \quad \forall t \in T, \forall m \in M \quad (14)$$

که  $Pg_m^{max}$  و  $Qg_m^{max}$  حداکثر ظرفیت تولید توان اکتیو و راکتیو ریزشکهای  $m$ ، و  $Pg_m^t$  و  $Qg_m^t$  نیز میزان تولید توان اکتیو و راکتیو در آن ریزشکهای در گام زمانی  $t$ ام هستند.

#### ۲-۲-۴ مدلسازی قیود پخش بار

معادلات پخش بار شبکه‌ی توزیع باید در هنگام تعیین برنامه‌ریزی بازیابی شبکه در نظر گرفته شوند. در رابطه (۱۵)، روابط پخش بار با استفاده از روش DISTFLOW خطی بیان شده است [۲۴].

$$-Bi \times (1 - S_y^t) \leq \left( V_{REy}^t - V_{SEy}^t + \frac{R_y \times Pf_y^t + X_y \times Qf_y^t}{V_{sl}} \right) \leq Bi \times (1 - S_y^t) \quad \forall t \in T, \forall y \in Y \quad (15)$$

که  $Y$  اندیس شاخه،  $Y$  مجموعه‌ی تمام شاخه‌های موجود در شبکه‌ی توزیع،  $SE_y$  و  $RE_y$  به ترتیب جاس ابتدایی و انتهایی شاخه‌ی  $Y$ ام هستند. لازم به ذکر است که جهت عبور توان‌های  $Pf_y^t$  و  $Qf_y^t$  از سمت جاس  $SE_y$  به سمت جاس  $RE_y$  در نظر گرفته شده است.  $S_y^t$  یک متغیر باینری است که وضعیت در مدار بودن شاخه‌ی  $Y$ ام در زمان  $t$ ام را بیان می‌کند.  $R_y$  و  $X_y$  به ترتیب مقاومت و راکتانس شاخه‌ی  $Y$ ام هستند.  $V_{sl}$  دامنه‌ی ولتاژ جاس اسلک و  $Bi$  یک عدد نسبتاً بزرگ است.

قیود تعادل توان اکتیو و راکتیو در روابط (۱۶) و (۱۷) آمده‌اند.

$$Pg_{MG_b}^t + Pu_b^t + \sum_{w \in W} (Pdc_{MG_b,w}^t - Pch_{MG_b,w}^t) + \sum_{y \in Yu_b} Pf_y^t = Pr_b^t + \sum_{y \in Yd_b} Pf_y^t \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (16)$$

$$Qg_{MG_b}^t + Qu_b^t + \sum_{y \in Yu_b} Qf_y^t = Qr_b^t + \sum_{y \in Yd_b} Qf_y^t \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (17)$$

که  $B$  و  $b$  به ترتیب اندیس شین و مجموعه‌ی تمام شین‌های موجود در شبکه هستند.  $MG_b$  بیانگر ریزشکهای است که به جاس  $b$  متصل شده است.  $Yu_b$  مجموعه‌ی شاخه‌ی بالادست و  $Yd_b$  مجموعه‌ی شاخه‌های پایین دست شین  $b$  هستند.  $Pf_y^t$  و  $Qf_y^t$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو عبوری از شاخه  $Y$ ام در زمان  $t$ ام هستند.  $Qu_b^t$  و  $Pu_b^t$  به ترتیب میزان توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به جاس  $b$  از سمت شبکه‌ی بالادست در زمان  $t$  هستند.  $Pr_b^t$  و  $Qr_b^t$  نیز به ترتیب میزان توان اکتیو و راکتیو بازیابی شده در جاس  $b$  در بازه‌ی زمانی  $t$ ام هستند.

در (۱۸) محدوده‌ی مجاز دامنه‌ی ولتاژ شین‌های شبکه تعریف شده است.

$$0 \leq Pdc_{m,w}^t \leq \xi_{mm,w}^t \times Pdc_w^{max} \quad \forall t \in T, \forall w \in W, \forall m \in M \quad (7)$$

که  $Pch_w^{max}$  و  $Pdc_w^{max}$  به ترتیب حداکثر توان شارژ و دشارژ و  $Pch_{m,w}^t$  و  $Pdc_{m,w}^t$  نیز برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ MESS  $w$ ام در گام زمانی  $t$ ام هستند. بر اساس این روابط، MESS  $w$ ام برای اتصال به ریزشکهای  $m$ ام باید روی یال  $\xi_{mm,w}^t$  قرار داشته باشد. لازم به ذکر است، یال  $mm$  متناظر با ریزشکهای  $m$ ام در شبکه حمل و نقل جاده‌ای است که موقعیت مکان پارک MESS در ریزشکهای  $m$ ام را بیان می‌کند.  $M$  مجموعه‌ی تمام ریزشکهای موجود در شبکه است.

قیود (۸) الی (۱۰) محدودیت شارژ و دشارژ همزمان MESSها را در یک گام زمانی مشابه بیان می‌کنند.

$$0 \leq Pch_{m,w}^t \leq Ich_{m,w}^t \times Pch_w^{max} \quad \forall t \in T, \forall w \in W, \forall m \in M \quad (8)$$

$$0 \leq Pdc_{m,w}^t \leq Idc_{m,w}^t \times Pdc_w^{max} \quad \forall t \in T, \forall w \in W, \forall m \in M \quad (9)$$

$$Ich_{m,w}^t + Idc_{m,w}^t \leq \xi_{mm,w}^t \quad \forall t \in T, \forall w \in W, \forall m \in M \quad (10)$$

که  $Ich_{m,w}^t$  و  $Idc_{m,w}^t$  متغیرهای باینری هستند که به ترتیب وضعیت شارژ و دشارژ MESS  $w$ ام را در گام زمانی  $t$ ام کنترل می‌کنند. مطابق رابطه (۱۰)، زمانی که MESS در ریزشکهای قرار ندارد ( $\xi_{mm,w}^t = 0$ )، باید وضعیت شارژ و دشارژ هر دو برابر صفر شوند ( $Ich_{m,w}^t = 0$  و  $Idc_{m,w}^t = 0$ ).

میزان انرژی ذخیره شده در MESSها در رابطه (۱۱) و محدودیت انرژی ذخیره شده در آنها در رابطه (۱۲) مدل‌سازی شده است.

$$E_w^t = E_w^{t-1} - \tau \times \left( \frac{\sum_{m \in M} Pdc_{m,w}^t}{\eta dc_w} - \eta ch_w \times Pch_{m,w}^t \right) \quad \forall t \in T, \forall w \in W \quad (11)$$

$$E_w^{min} \leq E_w^t \leq E_w^{max} \quad \forall t \in T, \forall w \in W \quad (12)$$

که  $E_w^t$  انرژی ذخیره شده در گام زمانی  $t$ ام در MESS  $w$ ام،  $E_w^{min}$  و  $E_w^{max}$  به ترتیب حداقل و حداکثر انرژی قابل ذخیره، و  $\eta dc_w$  و  $\eta ch_w$  به ترتیب بازدهی حالت شارژ و دشارژ آن هستند.

#### ۲-۲-۳ مدلسازی تولید محلی در ریزشکهای

محدوده‌ی مجاز تولید توان اکتیو و راکتیو منابع انرژی توزیع شده (DER<sup>۱</sup>) موجود در ریزشکهای در روابط (۱۳) و (۱۴) بیان شده‌اند.

<sup>۱</sup> Distributed Energy Resource (DER)

$$C_{BM} = \tau \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{w \in W} (Cb_w \times (Pdc_{m,w}^t + Pch_{m,w}^t)) \quad (27)$$

$$C_{TC} = \tau \sum_{t \in T} \sum_{w \in W} \sum_{nm \in E} (Ct_w \times le_{nm} \times \xi_{nm,w}^t) \quad (28)$$

که،  $Ci_b$  هزینه‌ی وقفه‌ی مشترکین متصل به شین  $b$ ام است.

### ۲-۳ مدل مقاوم پیشنهادی

مراحل اصلی روش پیشنهادی جهت بازیابی شبکه توزیع فعال چند ریزشکه‌ای در حضور ناوگان MESS در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ مراحل اصلی بازیابی در روش پیشنهادی

از آنجایی که خسارات ناشی از بلایای طبیعی به شاخه‌های توزیع  $(F_{DN,y})$  و جاده‌های ارتباطی  $(F_{TN,nm})$  قبل از رخداد آن‌ها نامعین هستند، در روش مقاوم پیشنهادی، برنامه ریزی بازیابی با در نظر گرفتن بدترین خساراتی که منجر به بی‌شینه شدن هزینه‌های بهره‌برداری شبکه‌ی توزیع فعال  $(C)$  می‌شود، با استفاده از مدل (۲۹) تعیین می‌گردد.

$$\max_{F_{TN,nm}, F_{DN,y}} \left( \min_{(1)-(28)} C \right) \quad (29)$$

$$\text{s.t. (30)-(31)}$$

$$\sum_{nm \in E} F_{TN,nm} \leq F_{TN,max} \quad (30)$$

$$\sum_{y \in Y} F_{DN,y} \leq F_{DN,max} \quad (31)$$

در این مدل، قسمت  $\max$  بدترین خروج خطوط توزیع  $(F_{DN,y})$  و جاده‌های ارتباطی  $(F_{TN,nm})$  را تعیین می‌کند و قسمت  $\min$  برنامه بازیابی متناظر با این خرابی‌ها را با هدف کاهش هزینه‌های بازیابی  $(C)$  بیان می‌کند. هنگام حل قسمت  $\max$  باید بودجه تخریب بلای طبیعی که در روابط (۳۰) و (۳۱) بیان شده‌اند، در نظر گرفته شود. این قیود به ترتیب تعداد جاده‌ها و خطوط توزیع آسیب دیده در اثر بلای طبیعی را هنگام تعیین بدترین خسارت همزمان (در قسمت  $\max$ ) محدود می‌کنند. در این روابط،

$$V_{min} \leq V_b^t \leq V_{max} \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (18)$$

که  $V_b^t$  دامنه‌ی ولتاژ جاس  $b$  در گام زمانی  $t$ ام، و  $V_{min}$  و  $V_{max}$  نیز به ترتیب حداقل و حداکثر مقدار مجاز دامنه‌ی ولتاژ شین‌ها هستند.

محدودیت میزان توان اکتیو و راکتیو بازیابی شده در شبکه توزیع فعال به ترتیب در روابط (۱۹) و (۲۰) بیان شده است.

$$0 \leq Pr_b^t \leq Pd_b^t \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (19)$$

$$Qr_b^t = \tan(\cos^{-1}(PF_b)) \times Pr_b^t \quad \forall t \in T, \forall b \in B \quad (20)$$

در این روابط، دو پارامتر  $Pd_b^t$  و  $Qd_b^t$  به ترتیب تقاضای توان اکتیو و راکتیو شین  $b$ ام در گام زمانی  $t$ ام هستند.  $PF_b$  ضریب بار متصل به جاس  $b$ ام هستند.

ظرفیت حرارتی خطوط توزیع در روابط (۲۱) الی (۲۲) مدلسازی شده‌اند.

$$-Sf_y^{max} \times S_y^t \leq Pf_y^t \leq Sf_y^{max} \times S_y^t \quad \forall t \in T, \forall y \in Y \quad (21)$$

$$-Sf_y^{max} \times S_y^t \leq Qf_y^t \leq Sf_y^{max} \times S_y^t \quad \forall t \in T, \forall y \in Y \quad (22)$$

که  $Sf_y^{max}$  حداکثر ظرفیت حرارتی شاخه‌ی توزیع  $y$ ام است.

خسارات وارده به خطوط توزیع در رابطه (۲۳) مدلسازی شده است.

$$S_y^t \leq 1 - F_{DN,y} \quad \forall t \in T, \forall y \in Y \quad (23)$$

در این رابطه،  $F_{DN,y}$  یک متغیر باینری است که خسارت وارده به خط توزیع  $y$ ام را بیان می‌کند. بر اساس این رابطه، اگر خط  $y$ ام در اثر بلای طبیعی آسیب دیده باشد ( $F_{DN,y} = 1$ )، باید از مدار خارج شود ( $S_y^t = 0$ ).

### ۲-۲-۱ مدلسازی هزینه‌های بهره‌برداری

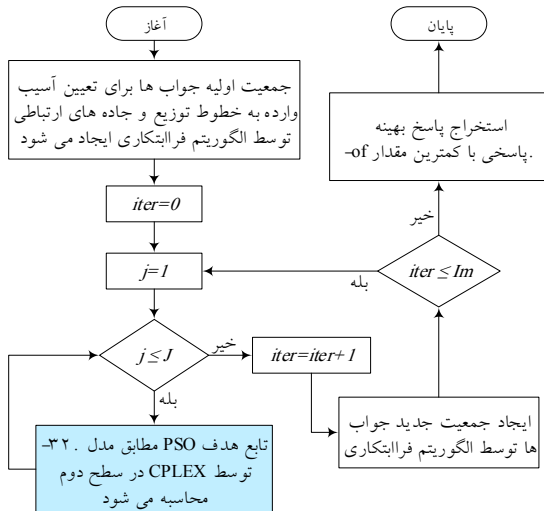
مجموع هزینه‌های بهره‌برداری جهت بازیابی شبکه‌ی توزیع در حضور ناوگان MESS در رابطه (۲۴) بیان شده است.

$$C = C_{CI} + C_{MG} + C_{BM} + C_{TC} \quad (24)$$

که،  $C_{CI}$  هزینه‌ی وقفه مشترکین،  $C_{MG}$  هزینه‌ی تولید برق در ریزشکه‌ها (MGها)،  $C_{BM}$  هزینه‌ی شارژ و دشارژ MESSها و  $C_{TC}$  نیز هزینه‌ی جابجایی MESSها در افق بازیابی هستند، که به ترتیب در روابط (۲۵) الی (۲۸) تعریف شده‌اند.

$$C_{CI} = \tau \sum_{t \in T} \sum_{b \in B} (Ci_b \times (Pd_b^t - Pr_b^t)) \quad (25)$$

$$C_{MG} = \tau \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} (\tau \times Cg_m \times Pg_m^t) \quad (26)$$



شکل ۳ فلوجارت روش دو سطحی پیشنهادی برای حل مدل بازیابی مقاوم ارائه شده

لازم به ذکر است، روش حل دو سطحی پیشنهادی، علاوه بر الگوریتم PSO با سایر الگوریتم های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک نیز سازگار است. با این حال، هر الگوریتم فراابتکاری برای بهبود پاسخهایی که به صورت تصادفی در جمعیت اولیه ایجاد شده اند، ساز و کار مشخصی دارد. به عنوان مثال، الگوریتم ژنتیک از عملگرهای ژنتیکی مانند عملگر تقاطع و جهش برای ایجاد جوابهای جدید استفاده می کند، در حالی که الگوریتم PSO از مفهوم پاسخ بهینه محلی و پاسخ بهینه سراسری برای حرکت ذرات در فضای جستجو و ایجاد مجموعه جدید پاسخها بهره می گیرد. با این حال، ارائه جزئیات الگوریتم فراابتکاری جزو اهداف این مقاله نیست.

#### ۴- شبیه سازی

جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، سیستم توزیع اصلاح شده ۳۳ شینه IEEE در حضور یک شبکه حمل و نقل ۲۵ گرهی، به عنوان سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. شبیه سازیها در محیط MATLAB با استفاده از جمعیه ابزار YALMIP [۲۵] بر روی یک لپ تاپ با ۴ گیگابایت RAM و CPU Core i5 با سرعت ۲/۵ گیگاهرتز انجام شده است. همچنین از نسخه ۱۲.۹.۰ CPLEX IBM به عنوان حل کننده استفاده شده است.

#### ۴-۱ سیستم توزیع اصلاح شده ۳۳ شینه

IEEE

$F_{TN,max}$  حداکثر تعداد جاده های تخریب شده و  $F_{DN,max}$  حداکثر تعداد خطوط توزیع آسیب دیده در اثر بلای طبیعی هستند. همانگونه که در شکل ۲ نشان داده شده است، پس از تعیین بدترین خسارت همزمان وارده به شبکه حمل و نقل و شبکه توزیع (یعنی  $F_{DN,y}$  و  $F_{TN,nm}$ )، برنامه ریزی شبکه با در نظر گرفتن این خسارات انجام. سپس، برنامه ریزی به دست آمده به ناوگان MESS و ریزشکها به صورت همزمان ارسال می شود تا با هماهنگی یکدیگر بازیابی شبکه انجام شود.

#### ۳- روش حل

برای حل مدل بازیابی مقاوم پیشنهادی در (۲۹)، یک روش حل دو سطحی با ترکیب حل کننده CPLEX با الگوریتم فراابتکاری PSO ارائه شده است. در این روش، خسارات ناشی از بلای طبیعی یعنی دو متغیر  $F_{DN,y}$  و  $F_{TN,nm}$  به عنوان متغیرهای تصمیم گیری PSO در نظر گرفته شده است. PSO با توجه به قیود (۳۰) و (۳۱)، دو متغیر  $F_{DN,y}$  و  $F_{TN,nm}$  را به گونه ای تعیین می کند که هزینه های بهره برداری  $C$  بهینه شود. بنابراین، مطابق مدل (۳۲)، گزینه هزینه های بازیابی (یعنی  $-C$ ) به عنوان تابع هدف PSO در نظر گرفته می شود که باید با توجه به قیود (۳۰) و (۳۱) مقدار مینیمم آن محاسبه شود.

$$of = \min_{(1)-(28)} -C \quad (32)$$

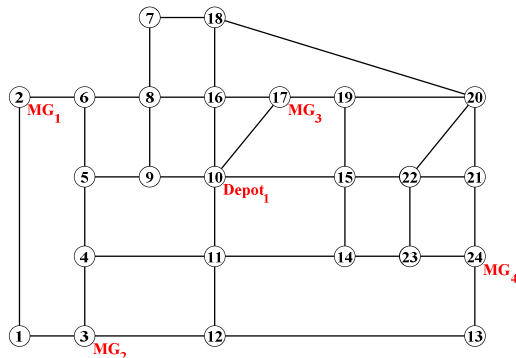
$$S.t: (30)-(31)$$

هزینه های بازیابی در سطح دوم توسط CPLEX و با حل مدل (۳۳) محاسبه می شود. لازم به ذکر است، هنگام محاسبه مدل (۳۳)، مقادیر  $F_{DN,y}$  و  $F_{DN,y}$  برابر مقادیر ارسال شده از PSO در نظر گرفته می شود.

$$\min_{F_{TN,nm}, F_{DN,y}} -C \quad (33)$$

$$S.t: (1) - (28)$$

بنابراین، در روش حل پیشنهادی، حل کننده CPLEX درون تابع هدف الگوریتم PSO قرار می گیرد. فلوجارت روش حل دو سطحی پیشنهادی در شکل ۳ ترسیم شده است. که  $iter$  بیان کننده تکرار،  $Im$  حداکثر تعداد تکرارها،  $J$  اندیس جواب و  $J$  تعداد جمعیت ذرات یا جوابهای موجود الگوریتم فراابتکاری را بیان می کند.

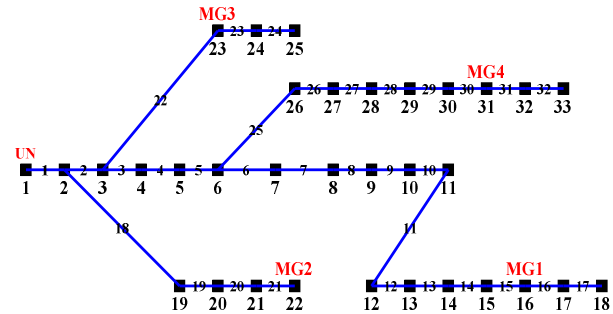


شکل ۵ شبکه حمل و نقل موجود در شبکه‌ی توزیع اصلاح شده‌ی ۳۳ شینه IEEE

#### ۲-۴ بدترین خسارات وارده

در این مقاله از الگوریتم PSO به عنوان الگوریتم فراابتکاری در سطح اول روش حل پیشنهادی استفاده شده است. تعداد جمعیت ذرات برابر ۵ ( $J = 5$ ) و حداکثر تعداد تکرار برابر ۱۰۰ جمعیت ذرات ( $Im = 100$ ) تکرار فرض شده است. نمودار همگرایی PSO در شکل ۶ نشان می‌دهد الگوریتم PSO در تکرار ۵۶ همگرا شده است. لازم به ذکر است از آنجایی که در ۱۰ تکرار متوالی، مقدار  $of$  ثابت باقی مانده، الگوریتم PSO مطابق با تنظیمات پیش فرض تابع particleswarm در نسخه MATLAB R2022a فرض متوقف شده است.

شبکه توزیع مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. این شبکه دارای ۴ ریزشبکه است که به ترتیب در شین‌های ۱۶، ۲۲، ۲۳ و ۳۱ قرار گرفته‌اند. شین شماره یک به شبکه بالادست (UN<sup>۱</sup>) متصل است.



شکل ۴ شبکه توزیع اصلاح شده‌ی ۳۳ شینه IEEE.

هزینه‌ی تولید و ظرفیت تولید هر کدام از این ریز شبکه‌ها در جدول ۲ داده شده است.

جدول ۲ اطلاعات ریزشبکه‌ها.

ریز شبکه	هزینه تولید توان (\$/kWh)	حداکثر ظرفیت تولید (kW)
۱	۰/۵	۴۰۰
۲	۰/۵	۵۰۰
۳	۰/۵	۲۰۰
۴	۰/۵	۷۰۰

شبکه‌ی حمل و نقل جاده‌ای متشکل از ۲۵ گره در شکل ۵ ترسیم شده است. فرض شده که ریزشبکه‌های شماره یک الی چهار به ترتیب در گره‌های ۲، ۳، ۱۷ و ۲۴ واقع شده‌اند. محل پارک اولیه ناوگان MESS با عنوان Depot<sub>۱</sub> در گره شماره ۱۰ قرار گرفته است [۲۳]. ناوگان MESS از سه عدد MESS تشکیل شده که اطلاعات آن در جدول ۳۱ داده شده است.

<sup>۱</sup> Upstream Network (UN)

جدول ۳ اطلاعات ناوگان MESS.

MESS	حداکثر توان شارژ/دشارژ (kW)	بازده شارژ/دشارژ (%)	ظرفیت ذخیره‌سازی (kWh)	حداقل انرژی (%)	حداکثر انرژی (%)	هزینه شارژ/دشارژ (\$/kWh)	هزینه جابجایی (\$/h)	سرعت متوسط (km/h)
۱	۱۰۰	۹۵	۵۰۰	۱۰	۹۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۵۰
۲	۱۰۰	۹۵	۵۰۰	۱۰	۹۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۵۰
۳	۱۰۰	۹۵	۵۰۰	۱۰	۹۰	۰/۰۲	۰/۰۱	۵۰

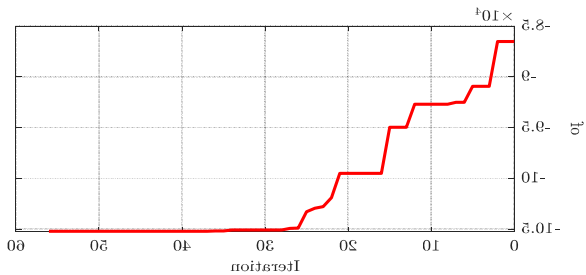
بدترین خسارات وارده که منجر به بیشینه شدن هزینه‌های سیستم می‌شوند در

جدول ۴ نشان داده شده‌اند. برای نمایش بهتر آسیب وارده به خطوط توزیع، دیاگرام تک خطی شبکه‌ی توزیع مورد مطالعه بعد از خروج خطوط محاسبه شده در

جدول ۴ در شکل ۷ نشان داده شده است. در اثر این خسارات، ریزشکه شماره ۴ (MG<sub>4</sub>) وارد حالت جزیره‌ای شده و اتصال شبکه توزیع با شبکه بالادست و ریزشکه شماره ۱ (MG<sub>1</sub>) قطع شده است. لازم به ذکر است که MG<sub>4</sub> دارای بیشترین ظرفیت تولید میان ریزشکه‌ها است و جزیره‌ای شدن آن بیشترین کاهش ظرفیت تولید در شبکه توزیع را به دنبال دارد.

### ۳-۴ نتایج بازیابی شبکه توزیع در حضور ناوگان MESS

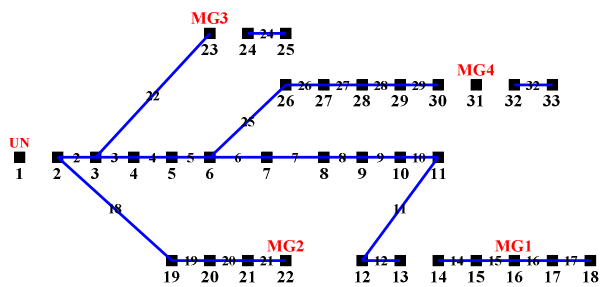
با حل مدل مقاوم پیشنهادی، همزمان با تعیین بدترین خسارات وارده به خطوط توزیع و جاده‌های ارتباطی، برنامه‌ریزی بازیابی شبکه با در نظر گرفتن این خسارات محاسبه می‌شود. این برنامه‌ریزی شامل تعیین میزان توان تولیدی ریزشکه‌ها و چگونگی اعزام ناوگان MESS است. برنامه‌ریزی ساعتی هر کدام از ریزشکه‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است.



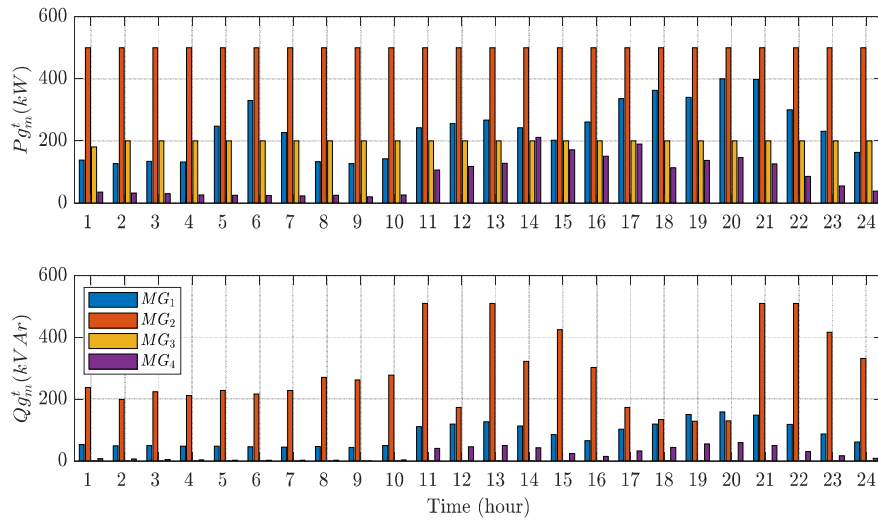
شکل ۶ نمودار همگرایی الگوریتم PSO در سطح اول روش پیشنهادی

جدول ۴ بدترین خسارات همزمان وارده به خطوط توزیع و جاده‌های ارتباطی

شبکه/سیستم	1	2	3	4	5
حمل و نقل جاده ای	3>4	23>14	22>15	22>21	24>23
توزیع برق	1-2	13-14	23-24	30-31	31-32



شکل ۷ آرایش شبکه توزیع فعال ۴ ریزشکه‌ای مورد مطالعه بعد از خروج خطوط توزیع آسیب دیده



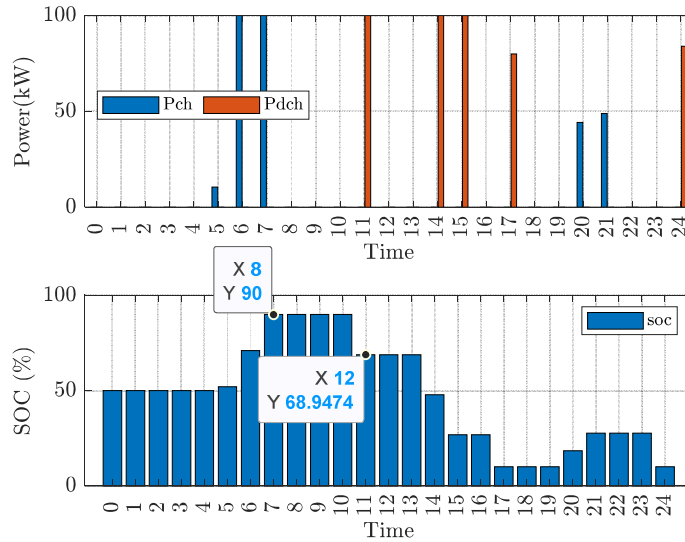
شکل ۸ برنامه‌ریزی تولید ساعتی هر کدام از ریزشبکه‌ها در افق بازبایی

جدول ۱ برنامه‌ریزی حرکت ناوگان MESS

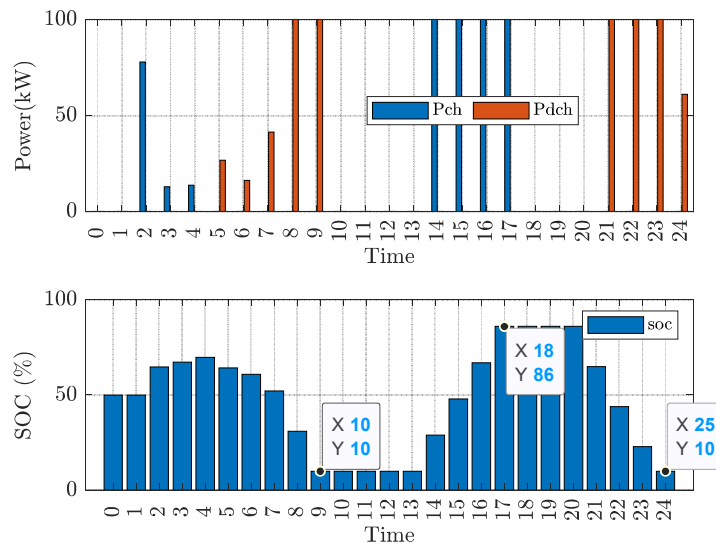
زمان $t$	MESS			زمان $t$	MESS		
	$w = 1$	$w = 2$	$w = 3$		$w = 1$	$w = 2$	$w = 3$
0	10>10	10>10	10>10	13	3>3	21>24	3>3
1	10>9	10>17	10>9	14	3>3	24>24	3>1
2	9>5	17>17	9>8	15	3>3	24>24	1>2
3	5>6	17>17	8>6	16	3>3	24>24	2>2
4	6>2	17>17	6>2	17	3>3	24>24	2>2
5	2>2	17>17	2>2	18	3>1	24>13	2>2
6	2>2	17>17	2>2	19	1>2	13>12	2>1
7	2>2	17>17	2>1	20	2>2	12>3	1>3
8	2>1	17>17	1>3	21	2>2	3>3	3>3
9	1>3	17>17	3>3	22	2>1	3>3	3>3
10	3>3	17>19	3>3	23	1>3	3>3	3>3
11	3>3	19>20	3>3	24	3>3	3>3	3>3
12	3>3	20>21	3>3	A>B به معنای حرکت از گره A به گره B			

در قسمت پایینی این شکل‌ها، میزان انرژی ذخیره شده در MESS بر حسب درصد نشان داده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد، توان‌های شارژ و دشارژ در محدوده‌ی ۰ تا ۱۰۰ کیلووات محاسبه شده‌اند. همچنین، MESS‌ها زمانی شارژ و یا دشارژ شده‌اند که در یک ریزشبکه واقع شده‌اند و همچنین، شارژ و دشارژ همزمان در یک گام زمانی یک‌سان مشاهده نمی‌شود. بنابراین، نتایج به دست آمده تحقق قیود عملیاتی MESS‌ها را تأیید می‌کند.

برنامه‌ریزی حرکت ناوگان MESS در هر گام زمانی در جدول ۳۱ نشان داده شده است. تمامی MESS‌ها در لحظه  $t=0$  در گره شماره ۱۰ که با نام Depot<sub>1</sub> در شکل ۵ نام‌گذاری شده است، قرار دارند. برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ هر کدام از MESS‌های شماره ۱ الی ۳ به ترتیب در شکل ۹ الی شکل ۱۱ ترسیم شده است. در قسمت بالایی این شکل‌ها برنامه‌ریزی شارژ MESS با یک نمودار میله‌ای آبی رنگ و برنامه‌ریزی دشارژ آن در هر ساعت از افق ۲۴ ساعته‌ی برنامه‌ریزی با نمودار میله‌ای قرمز رنگ نشان داده شده است.



شکل ۹ برنامه ریزی شارژ و دشارژ MESS شماره ۱



شکل ۱۰ برنامه ریزی شارژ و دشارژ MESS شماره ۲

۳ (که معادل گره ۱۷ شبکه حمل و نقل است) شارژ و در ساعت ۵ الی ۹ در همان ریزشکبه دشارژ می‌شود. مطابق

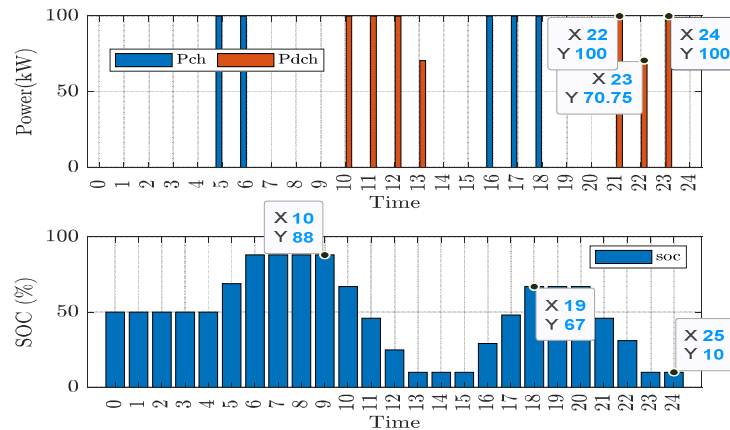
**جدول ۳۱**، این MESS با عبور از یال های جهت تدار ۱۷ به ۱۹، ۱۹ به ۲۰، ۲۰ به ۲۱، و ۲۱ به ۲۴ در گام زمانی ۱۴ به ریزشکبه چهارم که در گرهی ۲۴ واقع شده، می‌رسد. مطابق شکل ۱۰، فرایند شارژ در ساعات ۱۴ الی ۱۷ انجام می‌شود تا سطح شارژ MESS به ۸۶٪ برسد. سپس این MESS به سمت ریزشکبه دو که در گره شماره سه واقع شده حرکت می‌کند و با عبور از مسیر ۲۴ به ۱۳، ۱۳ به ۱۲ و ۱۲ به ۳ در گام زمانی  $t=20$  به ریزشکبه دوم ( $MG_2$ ) می‌رسد. این MESS در گام‌های زمانی ۲۱ الی ۲۴ در  $MG_2$  دشارژ شده و انرژی ذخیره شده در آن از ۸۶ درصد به

به عنوان نمونه، پس از شارژ MESS شماره ۱ در بازه‌های زمانی ۵ الی ۷، سطح انرژی ذخیره شده در آن از ۵۰ درصد شارژ اولیه به ۹۰ درصد افزایش پیدا کرده است.

بررسی جدول ۳ نشان می‌دهد که این MESS در گام‌های زمانی ۵ الی ۷ در گره شماره ۲ که مکان قرارگیری ریزشکبه شماره یک است، قرار دارد. پس از اینکه شارژ MESS کامل شد، با پیمودن یال‌های جهت‌دار ۲ به ۱ و ۱ به ۳، MESS در گام زمانی  $t=10$  به ریزشکبه شماره دو ( $MG_2$ ) می‌رسد. سپس، با دشارژ ۱۰۰ کیلوواتی این MESS در گام زمانی  $t=11$  سطح انرژی آن تا حدود ۶۹ درصد کاهش می‌یابد.

MESS شماره ۲ در گام‌های زمانی ۲ الی ۴ در ریزشکبه شماره

۱۰ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱ برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ MESS شماره ۲

#### ۴-۴ مقایسه نتایج

از آنجایی که روش پیشنهادی، قابلیت تفکیک مسیرهای جاده‌ای میان گره‌های موجود در شبکه‌ی حمل و نقل را به صورت مسیرهای رفت و برگشت را دارد، و در آن عدم قطعیت‌های مرتبط با خسارات وارده به این جاده‌ها و خطوط توزیع به صورت یکپارچه مدلسازی شده‌اند، روش مشابهی برای مقایسه نتایج آن با روش پیشنهادی وجود ندارد. بنابراین، جهت نشان دادن اثر MESSها بر کاهش هزینه‌های بازیابی شبکه‌ی توزیع فعال چندریزشکته‌ای، جزئیات هزینه‌های بهره‌برداری شبکه مورد مطالعه در دو حالت با و بدون وجود ناوگان MESS در جدول ۶ با هم مقایسه شده است.

بررسی همزمان شکل ۱۱ و جدول ۳۱ نشان می‌دهد که MESS شماره سه در ساعات ۵ و ۶ در  $MG_1$  شارژ و با حرکت به سمت گره سه در ساعات ۱۰ الی ۱۳ در  $MG_2$  دشارژ شده است. این MESS بار دیگر با عبور از یال‌های ۳ به ۱ و ۱ به ۲ دوباره در ساعات ۱۶ الی ۱۸ در  $MG_1$  شارژ شده است. سپس با عبور از یال‌های ۲ به ۱ و ۱ به ۳ در گام زمانی ۲۱ به  $MG_2$  بازگشته و با توان ۱۰۰، ۷۰/۷۵ و ۱۰۰ کیلووات در گام‌های زمانی ۲۱ الی ۲۳ در این ریزشکته دشارژ شده است.

بررسی شکل ۹ الی ۱۰ نشان می‌دهد که سطح انرژی موجود در تمامی MESSها در انتهای افق بازیابی یعنی در گام زمانی ۲۴ حداقل مقدار مجاز ۱۰٪ کاهش یافته که نشان می‌دهد روش پیشنهادی از تمامی ظرفیت ناوگان MESS برای بازیابی شبکه استفاده کرده است.

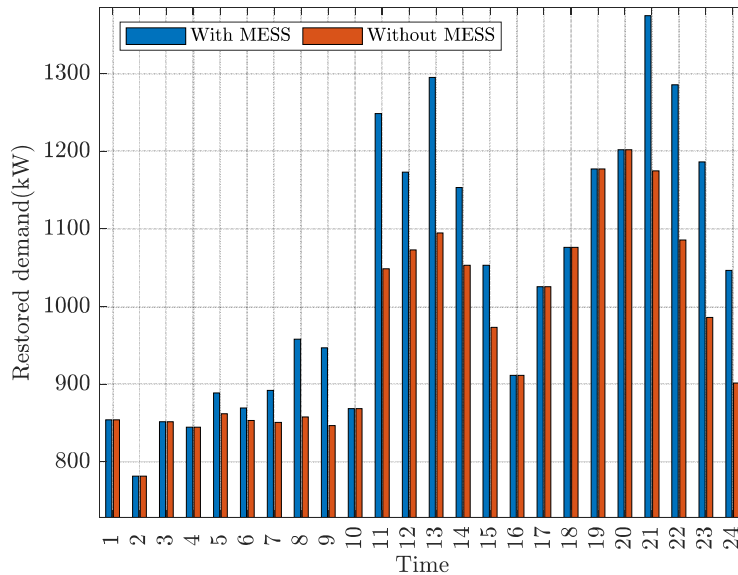
جدول ۶ مقایسه هزینه‌های بازیابی در دو حالت با و بدون وجود ناوگان MESS (بر حسب دلار).

هزینه کل	هزینه‌ی جابجایی MESSها	هزینه‌ی شارژ و دشارژ MESSها	هزینه‌ی تولید برق در ریزشکته‌ها	هزینه‌ی وقفه مشترکین	ناوگان MESS
107498.90	0.00	0.00	11627.82	95871.08	بدون MESSها
104713.69	0.72	61.17	12281.88	92369.91	با وجود MESSها
2.59	-	-	5.62	3.65	اختلاف (%)

ریزشکته‌ها با استفاده از ظرفیت MESSها می‌توانند از ظرفیت منابع تولید انرژی خود جهت بازیابی حداکثری شبکه استفاده کنند. میزان تقاضای بار بازیابی شده در هر ساعت از افق ۲۴ ساعته‌ی برنامه‌ریزی در دو حالت با و بدون وجود MESS در

وجود ناوگان MESS هزینه‌ی وقفه مشترکین را بیش از ۳۵۰۱ دلار و هزینه‌ی کل بازیابی را بیش از ۲۷۸۵ دلار کاهش داده است. هزینه‌ی تولید برق در ریزشکته‌ها با وجود ناوگان MESS ۶۵۴ دلار افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد،

شکل ۱۲ با هم مقایسه شده است.



شکل ۱۲ مقایسه بار بازیابی شده در دو حالت با و بدون وجود ناوگان MESS

انرژی میان آن‌ها (یعنی هزینه‌ی توان شارژ و د شارژ) مدل‌سازی شده است. جهت بهبود این روش پیشنهاد می‌گردد، هزینه‌ی شارژ و دشارژ MESSها در ریزشکها در نظر گرفته شود.

بررسی نتایج نشان می‌دهد که وجود MESSها میزان بار بازیابی شده در ساعات ۱۵ الی ۹، ۱۱ الی ۱۵ و ۲۱ الی ۲۴ را افزایش داده‌اند که در مجموع منجر به کاهش هزینه‌ی وقفه مشترکین از ۹۵۸۷۱/۰۸ دلار به ۹۲۳۶۹/۹۱ دلار شده‌اند.

## مراجع

- [۱] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, and F. Li, "Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1253-1266, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2679040.
- [۲] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziaargyriou, "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1202-1213, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2691357.
- [۳] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, and R. Baldick, "Research on Resilience of Power Systems Under Natural Disasters—A Review," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 2, pp. 1604-1613, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2429656.
- [۴] Y. Li, K. Xie, L. Wang, and Y. Xiang, "Exploiting network topology optimization and demand side management to improve bulk power system resilience under windstorms," *Electric Power Systems Research*, vol. 171, pp. 127-140, 2019/06/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.02.014>.
- [۵] N. M. Tabatabaei, S. N. Ravadanegh, and N.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک چارچوب نوین برای تعیین برنا مهر بیزی بهینه بازیابی یک شبکه توزیع در حضور ناوگان MESS ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند برنا مه بازیابی شبکه را با ایجاد هماهنگی بهینه میان DERهای موجود در ریزشکها و ناوگان MESS به صورت یکپارچه تعیین کند. همچنین عدم قطعیت‌های مرتبط با خسارات وارد شده به شبکه توزیع و مسیرهای ارتباطی موجود در شبکه حمل و نقل جاده‌ای در پی وقوع یک حادثه وخیم طبیعی مدل شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده از پیاده‌سازی مدل دو سطحی پیشنهادی بر روی سیستم توزیع ۳۳ شینه IEEE، هزینه‌های بهره‌برداری در هنگام بازیابی شبکه کاهش می‌یابند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، روش نوین ارائه شده جهت مدل‌سازی جاده‌های ارتباطی قابلیت بالایی در تفکیک مسیرهای رفت و برگشت و جاده‌های یک طرفه دارد که پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی را ممکن می‌سازد. با این حال، روش ارائه شده در این مقاله یک روش متمرکز است که در آن فرض شده که ناوگان MESS و ریزشکها هر دو دارای یک مالکیت واحد هستند. بنابراین، هزینه‌ی تراکنش‌های

- [۱۳] D. G. Photovoltaics, "IEEE Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems, both Stationary and Mobile, and Applications Integrated with Electric Power Systems".
- [۱۴] S. Lei, J. Wang, C. Chen, and Y. Hou, "Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2030-2041, 2016.
- [۱۵] H. H. Abdeltawab and Y. A.-R. I. Mohamed, "Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 6828-6840, 2017.
- [۱۶] Y. Sun, Z. Li, W. Tian, and M. Shahidehpour, "A Lagrangian decomposition approach to energy storage transportation scheduling in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 4348-4356, 2016.
- [۱۷] H. Gao, Y. Chen, S. Mei, S. Huang, and Y. Xu, "Resilience-oriented pre-hurricane resource allocation in distribution systems considering electric buses," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1214-1233, 2017.
- [۱۸] K. S. A. Sedzro, A. J. Lamadrid, and L. F. Zuluaga, "Allocation of resources using a microgrid formation approach for resilient electric grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 2633-2643, 2017.
- [۱۹] L. Che and M. Shahidehpour, "Adaptive formation of microgrids with mobile emergency resources for critical service restoration in extreme conditions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 742-753, 2018.
- [۲۰] S. Lei, C. Chen, H. Zhou, and Y. Hou, "Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5650-5662, 2018.
- [۲۱] S. Lei, C. Chen, Y. Li, and Y. Hou, "Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: Co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6187-6202, 2019.
- [۲۲] S. Yao, P. Wang, and T. Zhao, "Transportable energy storage for more resilient distribution systems with multiple microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. Bizon, *Power systems resilience: Modeling, analysis and practice*. Springer, 2018.
- [۶] C. Chen, J. Wang, and D. Ton, "Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: an integrated solution," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1267-1288, 2017.
- [۷] R. Saberi, H. Falaghi, and M. Esmaeeli, "Resilience-Based Framework for Distributed Generation Planning in Distribution Networks," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Research vol. 9, no. 4, pp. 35-49, 2020, doi: 10.29252/iejqp.9.4.35.
- [۸] S. Riahinia and A. abbaspour, "Considering energy storage resources and DGs in distribution system restoration," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Research vol. 6, no. 2, pp. 98-106, 2018. [Online]. Available: <http://iejqp.ir/article-1-469-fa.html>.
- [۹] m. alizadeh, m. jafari, and m. shahabi, "Improving the resilience of active distribution networks by optimal charging/discharging management of electric vehicles in parking lots," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Research vol. 10, no. 2, pp. 57-74, 2021. [Online]. Available: <http://iejqp.ir/article-1-781-fa.html>.
- [۱۰] M. Mousavizadeh, M. r.haghifam, and m. h. shariatkhah, "A Linear Path-based Method to Load Restoration in Distribution Networks by Microgrids Formation," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Research vol. 7, no. 1, pp. 35-44, 2018. [Online]. Available: <http://iejqp.ir/article-1-468-fa.html>.
- [۱۱] N. Ghanaei, M. Samiei Moghaddam, E. Alibeaki, N. Salehi, and R. Davarzani, "Bi-Level Optimization of Microgrids Considering Electric Vehicles under the Worst Conditions of Renewable Resource Output," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Research vol. 12, no. 3, pp. 74-84, 2023. [Online]. Available: <http://iejqp.ir/article-1-953-fa.html>.
- [۱۲] A. Samimi and M. Nikzad, "Optimal Restoration of Active Distribution Systems for Enhancing Resilience Considering the Uncertainty of Renewable Sources," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Research vol. 10, no. 3, pp. 97-108, 2021. [Online]. Available: <http://iejqp.ir/article-1-806-fa.html>.

- considering thermal inertia and diverse uncertainties," *Applied Energy*, vol. 336, p. 120736, 2023/04/15/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120736>.
- [۲۵] J. Lofberg, "YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB," in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (IEEE Cat. No.04CH37508)*, 2-4 Sept. 2004 2004, pp. 284-289, doi: <https://doi.org/10.1109/CACSD.2004.1393890>.
- [۲۳] S. Yao, P. Wang, X. Liu, H. Zhang, and T. Zhao, "Rolling Optimization of Mobile Energy Storage Fleets for Resilient Service Restoration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1030-1043, 2020, doi: 10.1109/TSG.2019.2930012.
- [۲۴] Z. Li, Y. Xu, P. Wang, and G. Xiao, "Coordinated preparation and recovery of a post-disaster Multi-energy distribution system 3331-3341, 2018.