



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 13, No. 2, 2022  
Research Paper

## Planning of Mobile Generators to Improve Resiliency of Distribution Systems

Hossein Ghasemi <sup>1</sup>, Reza Mohammadi Chabanloo <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Dept. of Electrical Engineering, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran

### Abstract:

One way to improve the distribution network resilience is to use mobile generators (MEGs) in the network. Such generators with the ability to move in the network and supply power to different parts increase the possibility of supplying important loads. However, due to the limited fuel of these generators, their movement will be limited, which will reduce their efficiency. Therefore, in this paper, considering this type of generators and also their limited fuel, an algorithm for their optimal displacement during the disaster is presented. Also, by considering fueling vehicles and planning to move them to inject fuel into these generators, an attempt has been made to reduce the effect of fuel restrictions on these generators. Finally, by simulating the proposed algorithm on the IEEE 33-bus network, taking into account the daily variable loads, the effectiveness of the proposed algorithm on improving the resilience of the distribution network is shown.

**Keywords:** Network Restoration, Mobile Generator, Distribution system, Resiliency.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<http://dx.doi.org/10.22108/ISEE.2021.125931.1426>

## برنامه‌ریزی ژنراتورهای سیار برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع

حسین قاسمی<sup>۱</sup>، رضا محمدی چنبلو<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق کنترل و قدرت - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

hghasemee@aut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق کنترل و قدرت - دانشگاه شهید بهشتی - تهران - ایران

re\_mohammadi@sbu.ac.ir

**چکیده:** یکی از راه‌های بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع، استفاده از ژنراتورهای سیار (MEGS) در شبکه است. این ژنراتورها با قابلیت جابه‌جایی در شبکه و برقرسانی به قسمت‌های مختلف، امکان بازیابی بارهای مهم شبکه را افزایش می‌دهد؛ اما به دلیل سوخت محدود این ژنراتورها، جابه‌جایی آنها با محدودیت روبه‌رو خواهد شد که این موضوع باعث کاهش اثربخشی آنها می‌شود. در این مقاله با در نظر گرفتن این نوع از ژنراتورها و نیز سوخت محدود برای آنها الگوریتمی برای جابه‌جایی بهینه آنها در طول مدت حادثه ارائه شده است. همچنین، با در نظر گرفتن خودروهای سوخت‌رسان و برنامه‌ریزی برای جابه‌جایی آنها برای تزریق سوخت به این ژنراتورها سعی به کاهش اثر محدودیت سوخت این ژنراتورها شده است. در نهایت، با شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی روی شبکه ۳۳-باس IEEE با در نظر گرفتن بارهای متغیر روزانه، اثربخشی الگوریتم پیشنهادی بر بهبود تاب‌آوری شبکه توزیع نشان داده شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تاب‌آوری، شبکه توزیع، ژنراتور سیار، بازیابی شبکه

### ۱- مقدمه

دسته‌بندی می‌شوند. در نخستین مرحله که قبل از وقوع حادثه است، نیاز است با مطالعات احتمالاتی، نقاط آسیب‌پذیر شبکه، شناسایی و به مقاوم‌سازی آنها پرداخته شود. در دومین مرحله که پس از اتفاق افتادن حادثه است، با توجه به خرابی‌های حاصل‌شده از حادثه، راهکارهایی برای کاهش میزان خاموشی‌ها (افزایش تاب‌آوری شبکه) ارائه می‌شود؛ از جمله این راهکارها تشکیل ریزشبکه‌ها [۱]- [۳]، تغییر آرایش در شبکه [۴]- [۵]، استفاده از ژنراتورهای سیار [۶]- [۷] و ... است.

همان‌گونه که مطرح شد یکی از راهکارهای افزایش تاب‌آوری شبکه، مقاوم‌سازی تجهیزات مختلف است. در حالت کلی هر اقدامی مربوط به ساختار شبکه که به مقاومت بالاتر در برابر حوادث طبیعی منجر شود، بخشی از مقاوم‌سازی شبکه در نظر گرفته می‌شود؛ برای مثال، استفاده از خطوط توزیع و انتقال زیرزمینی، مقاوم‌سازی دکل‌های فرسوده و ... جزو اقدامات مقاوم‌سازی در نظر گرفته می‌شود [۸].

در سال‌های اخیر به دلیل تغییرات آب‌وهوایی شمار حوادث طبیعی شامل طوفان، سیل، زلزله و ... در سطح جهان افزایش یافته است. مطالعه این حوادث و اثرات آن در سیستم قدرت به شناخت بهتر موضوع تاب‌آوری شبکه منجر می‌شود. تاب‌آوری در حالت کلی به معنی تحمل کردن اثرات ناشی از حوادث طبیعی و بازگشت سریع‌تر شبکه به شرایط عادی است. به دلیل اهمیت بحث تاب‌آوری، پژوهشگران روش‌های متفاوتی را برای بهبود تاب‌آوری شبکه معرفی کرده‌اند. این روش‌ها در دو مرحله مختلف

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۶

نام نویسنده مسئول: رضا محمدی چنبلو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - دانشگاه شهید بهشتی - پردیس فنی مهندسی شهید عباسپور - دانشکده برق

حادثه پرداخته است. در این مقاله، یک الگوریتم ریاضی برای پیش‌بینی بدترین حالت ممکن برای اتفاق افتادن خطا ارائه شده است که بر اساس آن، جایابی اولیه این ژنراتورها انجام می‌شود. پس از آن، با استفاده از الگوریتم 'Benders'، در مدت زمان کمی جابه‌جایی بهینه این ژنراتورها مشخص می‌شود که تابع هدف، کاهش میزان خاموشی بارها با اولویت بالا و کمترین مقدار جابه‌جایی ژنراتورهای سیار است. این الگوریتم به‌خوبی به حل این مسئله و نحوه استفاده از ژنراتورهای سیار پرداخته است؛ ولی محدودیت سوخت ماشین‌های جابه‌جاکننده ژنراتورها در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر، خودروی به‌کاررفته برای جابه‌جایی ژنراتورها به دلیل داشتن سوخت محدود، توانایی جابه‌جایی بهینه - که با الگوریتم به دست آمده است - را ندارد.

در این مقاله با در نظر گرفتن ژنراتورهای سیار و میزان سوخت محدود برای آنها مدل استفاده از این ژنراتورها به مدل واقعی نزدیک‌تر شده است. همچنین، برای کاهش اثر میزان سوخت محدود آنها کامیون‌های سوخت‌رسان نیز برای تزریق سوخت به آنها در نظر گرفته شده است. در این شرایط، علاوه بر برنامه‌ریزی برای جابه‌جایی ژنراتورهای سیار، برنامه‌ریزی برای جابه‌جایی خودروهای سوخت‌رسان نیز باید انجام شود تا جواب نهایی به بهینه‌ترین جواب ممکن نزدیک شود.

## ۲- بیان مسئله

بخش زیادی از حوادث طبیعی، نتایج تغییرات شرایط آب‌وهوایی است؛ درحالی‌که احتمال کمی برای اتفاق افتادن این حوادث وجود دارد؛ اما اثرات این حوادث بر شبکه، عمیق و تأثیرگذار است؛ از این رو مطالعه اثرات این حوادث بر شبکه قدرت و پیدا کردن راه‌حلی برای کاهش این حوادث ضروری است. مطالعه تاب‌آوری به سه مرحله زمانی تقسیم‌بندی می‌شود که این مراحل به‌ترتیب قبل از وقوع حادثه، در زمان وقوع حادثه و پس از وقوع حادثه است. این مقاله به اقداماتی می‌پردازد که در زمان وقوع و پس از وقوع حادثه اتفاق می‌افتد (در زمانی که حادثه اتفاق

تشکیل ریزش‌بکه‌ها راهکار پیشنهادی برای بهبود تاب‌آوری شبکه قدرت است. در مقاله [۹] نویسندگان از یک الگوریتم خطی برای تشکیل ریزش‌بکه‌ها استفاده کرده‌اند. در این مقاله، فرض شده است در هر ریزش‌بکه یک منبع تولید پراکنده وجود دارد و یک ضریب اولویت به هر بار اختصاص داده شده است. به عبارت دیگر، تغذیه بارهای مهم قطع شده به مقدار بار و اولویت بار بستگی دارد؛ مانند بارهای بیمارستان، مراکز نظامی و ... همچنین، در این مقاله فرض شده است بارها در شبکه به‌صورت متعادل‌اند؛ بنابراین، برای نزدیک‌تر کردن مسئله به واقعیت در مقاله [۱۰] یک الگوریتم برای تشکیل ریزش‌بکه‌ها در شبکه‌هایی با بارهای نامتعادل ارائه شده است. در این صورت، یک محدودیت به محدودیت‌های بهره‌برداری در شبکه‌های متعادل افزوده می‌شود و آن محدودیت عبارت است از حداکثر عدم تعادل تحمل‌پذیر برای یک ژنراتور سنکرون. در این مقاله، تشریح می‌شود هر ژنراتور سنکرون می‌تواند ترانس چشمگیری از عدم تعادل را در فازهای مختلف به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد نامتعادلی تحمل کند. روش دیگر پیشنهاد شده برای بهبود تاب‌آوری شبکه، بعد از وقوع حادثه، تغییر آرایش شبکه است. در مقاله [۱۱] تشریح می‌شود با در نظر گرفتن تغییر آرایش شبکه به همراه تشکیل ریزش‌بکه‌ها بارهای بیشتری تغذیه می‌شوند.

ازجمله راهکارهای اساسی برای تأمین بارهای مهم شبکه، در طول زمان خرابی‌های ناشی از حادثه، استفاده از MEG است. MEG ژنراتورهای نصب‌شده روی کامیون هستند که می‌تواند در صورت لزوم به مکان‌های مختلف در داخل شبکه منتقل شوند و بارهای اساسی نیازمند به تأمین برق فوری را تغذیه کنند [۱۲]. پس برنامه‌ریزی برای جابه‌جایی این ژنراتورها برای تأمین بارها با اهمیت بالاتر از اهمیت ویژه‌ای در هنگام حادثه برخوردار است؛ به همین دلیل، تا کنون راهکارهای مختلفی برای استفاده از این منابع ارائه شده است. نویسندگان در [۱۳] الگوریتمی برای جابه‌جایی بهینه این ژنراتورها به‌منظور کاهش تلفات براساس بارهای با اهمیت هنگام بروز خاموشی سراسری ارائه داده‌اند. مرجع [۱۴] به جایابی بهینه این ژنراتورها قبل از وقوع حادثه و برنامه‌ریزی جابه‌جایی آنها پس از وقوع

می‌افتد و شبکه دچار مشکل می‌شود و هنوز تعمیرات شبکه انجام نشده است).  
در این مقاله، برای افزایش تاب‌آوری، در زمانی که خرابی‌های ناشی از حادثه در شبکه وجود دارد، ایده استفاده از منابع سیار در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل (۱)، با اتفاق افتادن خطا، قسمتی از شبکه به صورت متصل به شبکه بالادست و قسمتی به صورت بی‌برق خواهند بود. برای تأمین بارهای قسمت متصل به شبکه بالادست محدودیتی وجود ندارد. پس نیاز است راهکاری برای تأمین بارهای قسمت بی‌برق ارائه شود.

با استفاده از MEG مقداری از بارهای قسمت بی‌برق تأمین می‌شود که دارای اهمیت بیشتری‌اند. منابع سیار ذخیره‌سازهای انرژی‌اند که روی یک کامیون و برای جابه‌جایی انرژی نصب شده‌اند. این منابع پس از شارژ اولیه، توان خود را به بارهای قسمت بی‌برق تحویل می‌دهند و پس از اتمام انرژی، مجدد به شبکه بالادست متصل می‌شوند و ذخیره‌ساز خود را شارژ می‌کنند و دوباره با حرکت به قسمت ایزوله، برای تغذیه بارهای مهم قطع شده بر اثر حادثه، توان خود را به این قسمت منتقل می‌کنند. این نکته درخور توجه است که چون هیچ منبع انرژی در شبکه وجود ندارد و ارتباط شبکه توزیع با شبکه بالادستی قطع شده است؛ از این رو از واحدهای تولیدی سیار برای بازیابی استفاده شده است.

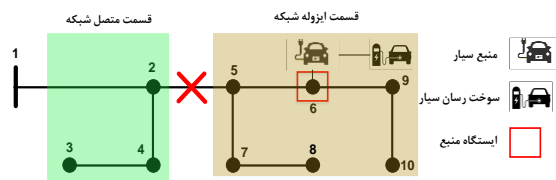
با توجه به نوع منابع سیار، چالش‌های متفاوتی برای برنامه‌ریزی برای جابه‌جایی و شارژ/دشارژ این منابع وجود دارد. سه نوع منبع سیار به شرح ذیل در نظر گرفته می‌شود:

۱- دیزل ژنراتورهای اضطراری سیار: این منابع از یک دیزل ژنراتور و یک کامیون تشکیل شده است. دیزل ژنراتور موجود، سوخت (گازوییل) را به انرژی الکتریکی تبدیل

می‌کند. درباره این نوع منبع سیار باید به این نکته توجه کرد که برای شارژ شدن نیازی نیست به قسمت متصل به شبکه حرکت کند و تنها نیاز است سوخت لازم برای تولید انرژی این منبع در نظر گرفته شود.

۲- سیستم ذخیره‌ساز انرژی سیار (باتری‌ها): این نوع منابع برای شارژ و دشارژ شدن می‌توانند در شبکه جابه‌جا شوند. همان‌گونه که از ماهیت این منابع مشخص است برای شارژ شدن نیاز است به قسمت بالادست شبکه متصل شوند.

۳- خودروهای الکتریکی: همان‌گونه که از ماهیت این منابع مشخص است برای شارژ شدن نیاز است به قسمت بالادست شبکه متصل شوند.



شکل (۱): قسمتی از یک شبکه نمونه

دیزل ژنراتورهای اضطراری سیار: این منابع از یک دیزل ژنراتور و یک کامیون تشکیل شده است. دیزل ژنراتور موجود، سوخت (گازوییل) را به انرژی الکتریکی تبدیل

قرار دارند و همزمان امکان شارژ و دشارژ وجود ندارد. قیود (۱۱) و (۱۲) حداکثر توان اکتیو و راکتیو قابل تولید دیزل ژنراتورها را مشخص می‌کنند. قیود (۱۳) و (۱۴) تعادل توان اکتیو و راکتیو را در هر باس مشخص می‌کنند؛ به این صورت که توان ورودی به یک باس با توان خروجی آن برابر است. قیود (۱۵) و (۱۶) توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی توسط منابع را مشخص می‌کنند. چون بارها به صورت کنترل‌پذیر در نظر گرفته شده‌اند، قید (۱۷) این موضوع را مطرح می‌کند که چند درصد از میزان بار اکتیو یک باس تأمین خواهد شد. قید (۱۸) مشخص می‌کند به همان درصد بار راکتیو آن باس تأمین خواهد شد. قیود (۱۹) و (۲۰) حداکثر توان اکتیو و راکتیو تحمل‌پذیر خطوط را مشخص می‌کنند. قیود (۲۱) و (۲۲) به منظور محاسبه ولتاژ باس‌های مختلف در نظر گرفته شده‌اند که در این عبارت‌ها ولتاژ باسی که شبکه از طریق آن به شبکه بالادست متصل است، برابر ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است. قید (۲۳) نشان‌دهنده حداکثر انحراف مجاز ولتاژ است که در شبکه توزیع معمولاً برابر (۱,۰۵-۰,۹۵) در نظر گرفته می‌شود. قیود (۲۴) و (۲۵) وضعیت سوخت خودروها را مشخص می‌کند. قید (۲۴) مربوط به خودروهای جابه‌جاکننده منابع است و این نکته را بیان می‌کند که در صورت هر جابه‌جایی به اندازه پارامتر مشخص شده گازوییل از سوخت خودرو کاهش پیدا می‌کند و در صورتی که این خودرو با ماشین سوخت‌رسان سیار در یک باس قرار داشته باشد، این خودرو می‌تواند تا مقدار بهینه‌ای که مسئله مشخص می‌کند، سوخت از ماشین سوخت‌رسان سیار دریافت کند.

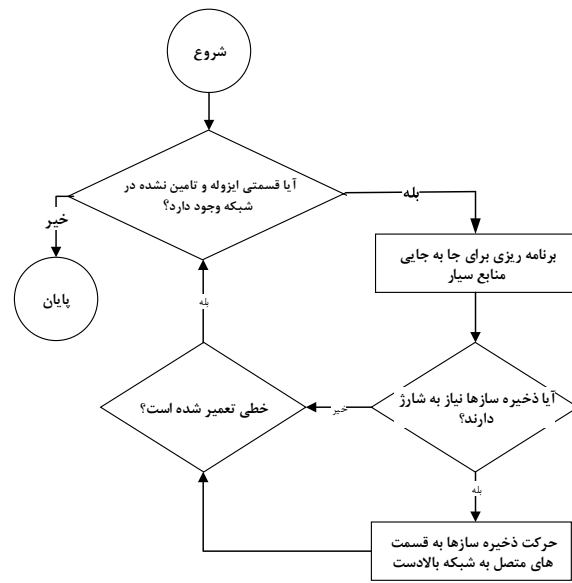
$$\max \sum_t \left\{ \begin{array}{l} \sum_i \omega_i \times y_{i,t} \times p_{i,t} \\ - \sum_i C_m \times \gamma_{m,t} \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\sum_i \beta_{i,m,t} \leq 1, \quad \forall t \in T, i \in I \quad (2)$$

$$\sum_m \beta_{i,m,t} \leq cap_i, \quad \forall t \in T, i \in I \quad (3)$$

$$\beta_{i,m,t} + \gamma_{m,t+1} + \beta_{i,m,t+2} \leq 2 \quad (4)$$

$$SoC_{m,t} = SoC_{m,t-1} + \left( \begin{array}{l} \eta_m^c \times cp_{m,t} \\ - dp_{m,t} / \eta_m^d \end{array} \right) \Delta t \quad (5)$$



شکل (۲): فلوچارت روش پیشنهادی

### ۳- فرمول‌بندی مسئله

همان‌گونه که قبلاً مطرح شد تابع هدف شامل بازگرداندن حداکثر بارها با اهمیت زیاد و با کمترین مقدار جابه‌جایی مولدها است. دو عبارت در تابع هدف موجود است؛ عبارت اول مربوط به بازیابی بارها با اهمیت بالا و عبارت دوم مربوط به جابه‌جایی است. چون عبارت اول نیاز به حداکثر شدن و عبارت دوم نیاز به حداقل‌سازی دارد، عبارت دوم با علامت منفی در تابع هدف ظاهر شده است. معادله‌های (۱) تا (۲۴) قیودی هستند که در این مسئله باید در نظر گرفته شوند.

قید شماره (۲) این موضوع را مطرح می‌کند که یک منبع به صورت هم‌زمان نمی‌تواند به دو باس متصل باشد. قید شماره (۳) این موضوع را مطرح می‌کند که هر ایستگاه ظرفیت محدودی برای قرارگرفتن منابع دارد که بیش از آن مقدار منبع نباید در ایستگاه قرار گیرد. قید شماره (۴) از برخی جواب‌های نادرست مسئله جلوگیری می‌کند. منظور از جواب نادرست، جواب‌هایی هستند مانند اینکه منبع در یک زمان مشخص در یک باس قرار دارد و پس از آن، باس را ترک می‌کند و مجدد به همان باس باز می‌گردد. قیود (۵) تا (۷) وضعیت شارژ و دشارژ باتری‌ها را مشخص می‌کنند. قیود (۸) و (۹) حداکثر توان شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها را مشخص می‌کند. قید (۱۰) به این نکته اشاره می‌کند که ذخیره‌سازها یا در وضعیت شارژ و یا در وضعیت دشارژ

به منظور نشان دادن درستی الگوریتم پیشنهادی، این الگوریتم روی شبکه ۳۳ باس IEEE با بارهای متغیر روزانه شبیه سازی شده است که ضریب هر بار در شکل (۴) مشاهده می شود [۱۵]. در این شبیه سازی فرض شده است در شبکه، ۳ نوع مختلف منبع سیار موجود است و اطلاعات مربوط به این ۳ منبع در جدول (۲) مشاهده می شود. خطاهای حاصل از حادثه و ایستگاههای نصب ژنراتورهای سیار در شکل (۳) نشان داده شده اند. برای حل این مسئله از نرم افزار GAMS و حل کننده BARON استفاده شده است.

جدول (۲): پارامترهای در نظر گرفته شده برای شبیه سازی [۱۴]

خودروی برقی	باتری	دیزل ژنراتور	
۱	۱	۱	$C_m$
۲۰	۲۰	-	$SoC^{\min}$
۸۰۰	۸۰۰	-	$SoC^{\max}$
۷۰۰	۷۰۰	-	$SoC^0$
۵۰۰	۵۰۰	-	$cp^{\max}$
۱۵۰	۱۵۰	-	$dp^{\max}$
-	-	۸۰۰	$P^{\max}$
-	-	۶۰۰	$Q^{\max}$
۰,۹۵	۰,۹۵	۰,۹۵	$V^{\min}$
۱,۰۵	۱,۰۵	۱,۰۵	$V^{\max}$
۰,۵	۰,۵	-	$\eta_m^c$
۰,۹۵	۰,۹۵	-	$\eta_m^d$

در این شبیه سازی فرض شده است پس از وقوع حادثه، تیم تعمیراتی به سمت مناطق آسیب دیده حرکت می کند و خطوط آسیب دیده ۱-۲، ۱۹-۲۰، ۱۶-۱۷، ۳۲-۳۳، ۲۹-۳۰، ۲۸-۲۹، ۲۴-۲۵ به ترتیب در زمان های ۳، ۶، ۱۳، ۱۶، ۲۰، ۲۲ و ۲۴ تعمیر می شوند [۱۴].

$$SoC_{m,t} = SoC_{m,t-1} + \left( \eta_m^c \times cp_{m,t} - dp_{m,t} / \eta_m^d \right) \Delta t \quad (6)$$

$$SoC_m^{\min} \leq SoC_{m,t} \leq SoC_m^{\max}, \forall m,t \quad (7)$$

$$0 \leq dp_{m,t} \leq d_{m,t} \times dp_m^{\max}, \forall m,t \quad (8)$$

$$0 \leq dp_{m,t} \leq d_{m,t} \times dp_m^{\max}, \forall m,t \quad (9)$$

$$c_{m,t} + d_{m,t} \leq \sum_i \beta_{i,m,t}, \forall m,t \quad (10)$$

$$0 \leq gp_{m,t} \leq \sum_i \beta_{i,m,t} \times P_m^{\max}, \forall m,t \quad (11)$$

$$0 \leq gq_{m,t} \leq \sum_i \beta_{i,m,t} \times Q_m^{\max}, \forall m,t \quad (12)$$

$$\sum_{i,j} pf_{ji} - \sum_{i,j} pf_{ij} = p_{i,t} - P_{i,t} \quad (13)$$

$$\sum_{i,j} qf_{ji} - \sum_{i,j} qf_{ij} = q_{i,t} - Q_{i,t} \quad (14)$$

$$P_{i,t} = \sum_m \beta_{i,m,t} (dp_{m,t} - cp_{m,t}) + \sum_m \beta_{i,m,t} \times gp_{m,t}, \forall i,t \quad (15)$$

$$Q_{i,t} = \sum_m \beta_{i,m,t} \times gq_{m,t}, \forall i,t \quad (16)$$

$$0 \leq p_{i,t} \leq \bar{p}_{i,t}, \forall i,t \quad (17)$$

$$q_{i,t} = \left( \bar{p}_{i,t} / \bar{q}_{i,t} \right) \times p_{i,t}, \forall i,t \quad (18)$$

$$0 \leq pf_{ij} \leq \alpha_{ij,t} \times pf^{\max}, \forall i,j,t \quad (19)$$

$$0 \leq qf_{ij} \leq \alpha_{ij,t} \times qf^{\max}, \forall i,j,t \quad (20)$$

$$v_{i,t} - v_{j,t} \leq (1 - \alpha_{ij,t}) \times K \quad (21)$$

$$+ 2(r_{ij} \times pf_{ij,t} + x_{ij} \times qf_{ij,t}), \forall i,j,t$$

$$v_{i,t} - v_{j,t} \geq (\alpha_{ij,t} - 1) \times K + 2 \left( r_{ij} \times pf_{ij,t} + x_{ij} \times qf_{ij,t} \right), \forall i,j,t \quad (22)$$

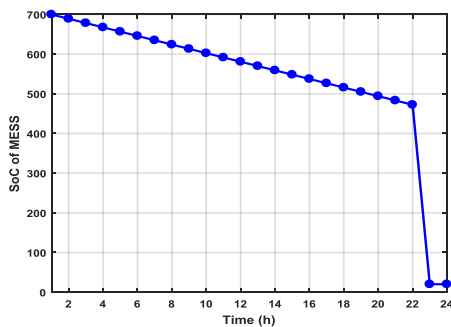
$$V^{\min} \leq v_{i,t} \leq V^{\max}, \forall i,t \quad (23)$$

$$SoG_{ms,t} = SoG_{ms,t-1} - GASOLIN_m \times \gamma_{ms,t} - GAS_{m,t} \times \beta_{i,m,t} \times \beta_{i,ms,t} \quad (24)$$

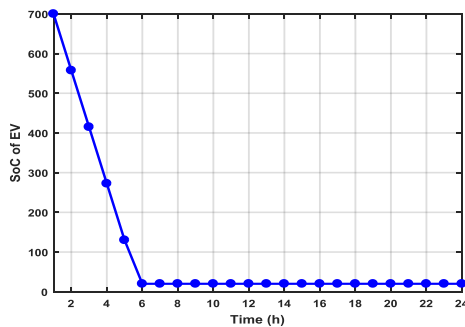
#### ۴- نتایج حاصل از شبیه سازی

برنامه‌ریزی ژنراتورهای سیار برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع

مشاهده می‌شوند. همان‌گونه که مشخص است خودرو برقی طی پنج ساعت اول، کل توان ذخیره خود را به شبکه تحویل داده است. دلیل این موضوع این است که چون در این ساعت سوم خط ۱-۲ تعمیر می‌شود، بارهای موجود در این قسمت می‌توانند از شبکه بالادست تأمین شوند؛ به همین دلیل نیاز است تا خودروی برقی در زمان خاموشی قسمت بی‌برق، کل توان خود را به شبکه تحویل دهد. بهینه‌ترین حالت ممکن این است که خودرو برقی طی سه ساعت اول، کل توان خود را به شبکه تحویل دهد که به دلیل محدود بودن حداکثر توان دشارژ شدن این منبع، این موضوع امکان‌پذیر نبوده است.

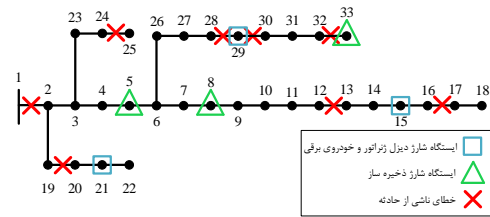
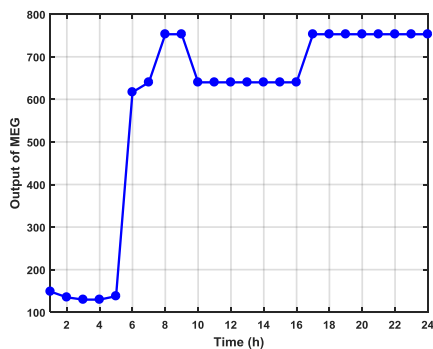


شکل (۵): میزان شارژ باتری در طول شبانه‌روز در سناریو اول

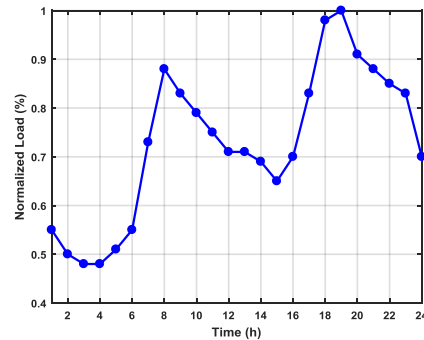


شکل (۶): میزان شارژ خودروی برقی در طول شبانه‌روز در

سناریو اول



شکل (۳): شبکه ۳۳ باس IEEE



شکل (۴): ضریب بار در طول شبانه‌روز [۱۶]

شبه‌سازی‌های انجام‌شده در ۴ سناریو مختلف انجام شده‌اند که هر یک از این سناریوها به شرح زیر است:

- سناریو اول: برنامه‌ریزی توان تولیدی منابع بدون در نظر گرفتن جابه‌جایی؛

- سناریو دوم: برنامه‌ریزی توان تولید منابع به همراه جابه‌جایی بدون در نظر گرفتن سوخت؛

- سناریو سوم: برنامه‌ریزی توان تولیدی منابع به همراه جابه‌جایی با در نظر گرفتن سوخت محدود؛

- سناریو چهارم: برنامه‌ریزی توان تولیدی منابع به همراه جابه‌جایی منابع با در نظر گرفتن ماشین سوخت‌رسان سیار.

**الف) سناریو اول:** در این سناریو فرض شده است

دیزل ژنراتور، باتری و خودروی برقی به‌ترتیب روی باس‌های ۲۱، ۲۹ و ۸ نصب شدند و در مدت برنامه‌ریزی قابلیت جابه‌جایی ندارند. همان‌گونه که از نتایج مشخص است چون باتری و خودروی برقی به قسمت بی‌برق شبکه متصل شده‌اند و امکان جابه‌جایی برای آنها وجود ندارد، این منابع قابلیت شارژ مجدد را نخواهند داشت و پس از اتمام شارژ بارهای قسمت بی‌برق که با این منابع تأمین می‌شدند، تأمین نخواهند شد. توان خروجی منابع، وضعیت باتری و خودروی برقی و دیزل ژنراتور در شکل‌های (۵) تا (۷)

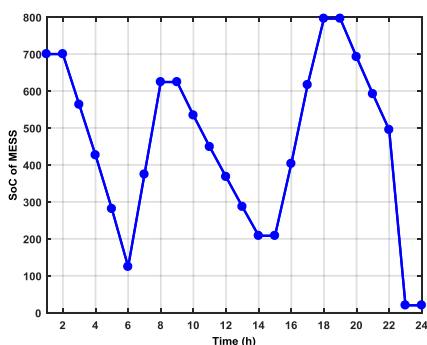
سناریو اول

شکل (۷): توان خروجی دیزل ژنراتور در طول شبانه‌روز در

جدول (۴): جابه‌جایی منابع در سناریو دوم

	۱	۲	۳-۵	۶	۷	۸	۹	۱۰-۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰-۲۴
دیزل ژنراتور	باس ۲۱			→	باس ۱۵									
باتری	باس ۲۹	→	باس ۱۵			→	باس ۲۹	→	باس ۱۵			→	باس ۲۹	
خودروی برقی	باس ۸	→	باس ۳۳			→	باس ۸			→	باس ۳۳			

ساعت‌های ۱۰-۱۴ به بارهای این ناحیه تأمین خواهند شد و سپس میزان شارژ ذخیره‌ساز کاهش پیدا می‌کند. پس ذخیره‌ساز باید مجدداً به قسمتی برای شارژ شدن حرکت کند و پس از آن، شارژ باتری خود را به قسمت بی‌برق باس ۲۹ تحویل دهد. پس ذخیره‌ساز برای شارژ شدن، مجدداً به سمت باس ۱۵، حرکت می‌کند و میزان شارژ خود را به حداکثر مقدار خود می‌رساند و سپس برای اتصال به ایستگاه باس ۲۹ و تأمین بار این قسمت بی‌برق حرکت می‌کند. در این سناریو، خودرو برقی نیز به سمت ایستگاه باس ۳۳، حرکت و بارهای این قسمت بی‌برق را تأمین می‌کند. سپس با کم شدن شارژ خودرو برقی، این منبع به سمت ایستگاه باس ۸ حرکت می‌کند و در این ایستگاه شارژ می‌شود تا مجدداً به سمت ایستگاه باس ۳۳، حرکت و بارهای این قسمت را تأمین کند.



شکل (۸): میزان شارژ باتری در طول شبانه‌روز در سناریو دوم

**ب) سناریو دوم:** الگوریتم این سناریو در مرجع

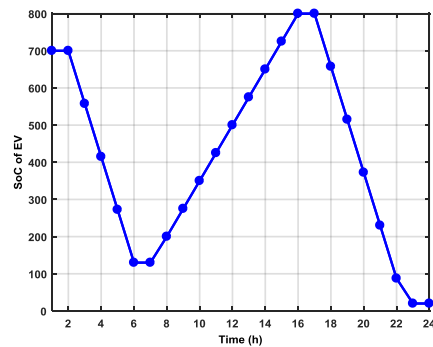
[۱۴] ارائه شده و فرض شده است دیزل ژنراتور، باتری و خودروی برقی در باس‌های ۲۱، ۲۹ و ۸ نصب شده‌اند. همچنین، در این سناریو محدودیتی برای میزان سوخت ژنراتورها در نظر گرفته نشده است. با توجه به شکل‌های (۸)-(۱۰) و جدول (۴) این نتایج به دست می‌آیند که در این سناریو، دیزل ژنراتور در ابتدا در باس ۲۱ متصل است و پس از تعمیر شدن خط ۱۹-۲۰ در ساعت ۵ و اتصال این قسمت به شبکه بالادست، این ژنراتور به سمت یک قسمت بی‌برق حرکت می‌کند تا میزان بار بیشتری تأمین شود. با توجه به اینکه بارهای متصل به باس‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ایستگاه باس ۱۵ حرکت می‌کند تا این بارها را نیز تأمین کند، در این شرایط تا رسیدن دیزل ژنراتور و تأمین این بارهای مهم، ذخیره‌ساز به سمت این قسمت از شبکه حرکت می‌کند و در ایستگاه باس ۱۵ قرار می‌گیرد و مقداری از توان ذخیره‌شده خود را به تأمین بارها اختصاص می‌دهد. پس از رسیدن دیزل ژنراتور به این قسمت از شبکه، این منبع به تأمین بارها می‌پردازد و شروع به شارژ کردن ذخیره‌ساز می‌کند تا به سمت قسمتی دیگر از شبکه حرکت کند و میزان بیشتری از بار تأمین شود. همان‌گونه که مشخص است در ساعت ۱۸م و پس از شارژ ذخیره‌ساز، این منبع به سمت ایستگاه باس ۲۹ حرکت می‌کند تا بار موجود در این ناحیه را تأمین کند. دلیل انتخاب باس ۲۹ در این ساعت این است که بارهای اطراف ایستگاه ۲۱ توسط شبکه بالادست و بارهای اطراف ایستگاه ۱۵ از طریق دیزل ژنراتور تأمین می‌شوند و تنها ایستگاه موجود در قسمت بی‌برق برای ذخیره‌ساز، ایستگاه باس ۲۹ است. پس از اتصال ذخیره‌ساز به ایستگاه باس ۲۹،



برنامه‌ریزی ژنراتورهای سیار برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های توزیع

شکل (۹): میزان شارژ خودروی برقی در طول شبانه‌روز در

سناریو دوم



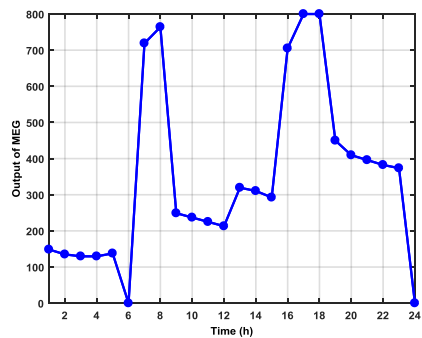
جدول (۵): جابه‌جایی منابع در سناریو سوم

	۱	۲	۳	۴-۱۱	۱۲	۱۳-۱۷	۱۸	۱۹-۲۴
دیزل ژنراتور	باس ۲۱	→	باس ۱۵					
باتری	باس ۲۹			→	باس ۲۱	→	باس ۲۹	
خودروی برقی	باس ۸			→	باس ۳۳			

مطابق با جدول (۵) و شکل (۱۱)، ذخیره‌ساز در ابتدا به ایستگاه باس ۲۹ متصل است و به تأمین بارهای این ناحیه می‌پردازد. پس از آن، با تمام‌شده ذخیره این منبع و با توجه به تعمیر خطوط ۲-۱ و ۱۹-۲۰ به سمت ایستگاه باس ۲۱ حرکت می‌کند تا از طریق شبکه بالادست مجدد شارژ شود. شارژ ذخیره‌ساز در ساعت‌های ۱۳-۱۷ انجام می‌شود و پس از آن، ذخیره‌ساز به سمت باس ۲۹ حرکت می‌کند تا بار این قسمت بی‌برق را تأمین کند. همان‌گونه که از مقایسه جدول‌های (۴) و (۵) مشخص است با محدود در نظر گرفتن میزان سوخت، جابه‌جایی این منبع در این سناریو نسبت به سناریو قبل کاهش پیدا کرده و جواب کلی مسئله از بهترین جواب ممکن فاصله گرفته است.

با توجه به جدول (۵) و شکل (۱۳)، این نکته برداشت می‌شود که دیزل ژنراتور نیز که به باس ۲۱ متصل است، به دلیل اهمیت بارهای اطراف ایستگاه ۱۵ به سمت این ایستگاه حرکت می‌کند تا بارهای این ناحیه بی‌برق را تأمین کند.

مطابق با جدول (۵) و شکل (۱۲)، به این نکته اشاره می‌شود که خودرو برقی نیز که به باس ۸ متصل است، بارهای این ناحیه را تأمین می‌کند. با توجه به اینکه خط ۱-۲ در ساعت سوم تعمیر می‌شود، این ناحیه از طریق شبکه بالادست تأمین خواهد شد. پس در ساعت‌های ۳-۵ خودرو برقی شروع به شارژ شدن از طریق شبکه بالادست خواهد کرد. پس از تکمیل شدن شارژ خودرو برقی در ساعت ۱۱، این منبع به سمت ایستگاه باس ۳۳ در قسمت بی‌برق، حرکت می‌کند تا بارهای این ناحیه را تأمین کند.

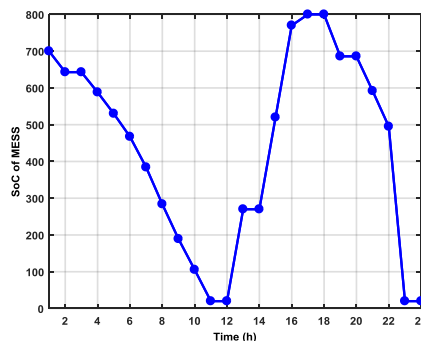


شکل (۱۰): توان خروجی دیزل ژنراتور در طول شبانه‌روز در

سناریو دوم

ج) سناریو سوم: در این سناریو برای نزدیک‌تر

کردن سناریو دوم به واقعیت، سوخت خودروهای جابه‌جاکننده منابع نیز محدود در نظر گرفته شده است. در این حالت فرض شده میزان سوخت اولیه کامیون‌ها برابر ۱۰۰ لیتر و جابه‌جایی بین هر دو باس نیازمند مصرف ۴۰ لیتر سوخت است که با این فرضیات هر خودرو حداکثر قادر به ۲ بار جابه‌جایی است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در سناریو دوم، چون ذخیره‌ساز و خودرو برقی بیش از دو بار جابه‌جایی را در حالت بهینه داشته‌اند، انتظار می‌رود حرکت این منابع در این سناریو نسبت به سناریو قبل تغییر کند (در سناریو دوم، ذخیره‌ساز، چهار مرتبه و خودرو برقی، سه مرتبه برای شارژ شدن و تحویل توان شارژ شده به قسمت بی‌برق، بین نقاط مختلف شبکه جابه‌جا شده‌اند).



شکل (۱۱): میزان شارژ باتری در طول شبانه‌روز در سناریو

سوم

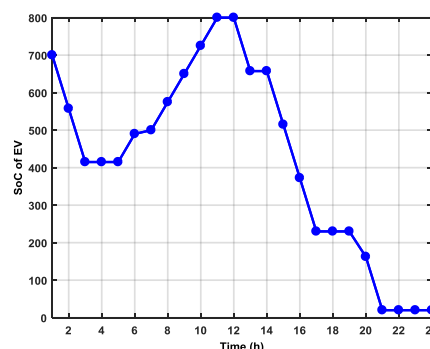
جدول (۶): جابه‌جایی منابع در سناریو چهارم

	۱	۲	۳-۵	۶	۷	۸	۹	۱۰-۱۳	۱۴	۱۵-۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰-۲۴	
دیزل ژنراتور	۲۱ باس	→	۱۵ باس												
ذخیره ساز	۲۹ باس	→	۲۱ باس	→	۲۹ باس				→	۲۱ باس		→	۲۹ باس		
خودروی برقی	۸ باس	→	۳۳ باس		→	۸ باس					→	۳۳ باس			
سوخت‌رسان	۳۳ باس					→	۲۹ باس								

### سناریو چهارم: برای نزدیک‌کردن مسئله به بهینه‌ترین

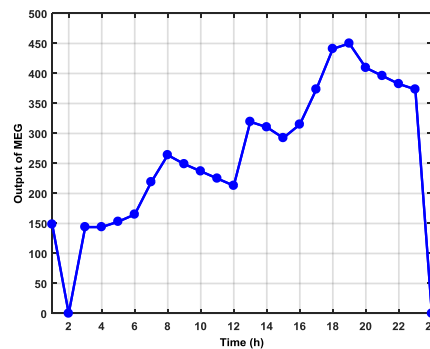
جواب، اثر محدودیت سوخت منابع موجود در شبکه با در نظر گرفتن ماشین‌های سوخت‌رسان بسیار کاهش یافته است. این سوخت‌رسان‌ها در شبکه حرکت می‌کنند و چون منابع فقط در ایستگاههای مخصوص خود قادر به توقف‌اند، این ماشین‌ها نیز فقط می‌توانند در این ایستگاهها مستقر شوند. درضمن میزان سوخت تزریقی به هر منبع با توجه به مسئله بهینه‌سازی (مصرف گازوییل) تعیین می‌شود. این سوخت‌رسان‌ها با حرکت در شبکه، خود نیز سوخت مصرف می‌کنند که مطابق سناریو سوم، میزان سوخت مصرفی با حرکت بین دو باس ۴۰ لیتر و میزان سوخت ذخیره‌شده این سوخت‌رسان ۲۵۰ لیتر در نظر گرفته شده است. با استفاده از ماشین‌های سوخت‌رسان مشکل محدودیت سوخت، کم‌رنگ‌تر و جواب مسئله در این سناریو به جواب واقعی نزدیک‌تر می‌شود.

با توجه به شکل (۱۶)، (۱۷) و جدول (۶)، دیزل ژنراتور برای تأمین بارهای اراف ایستگاه ۱۵ که بارهای با اهمیت بالا هستند، در ساعت دوم به سمت این ایستگاه،



شکل (۱۲): میزان شارژ خودروی برقی در طول شبانه‌روز در

سناریو سوم

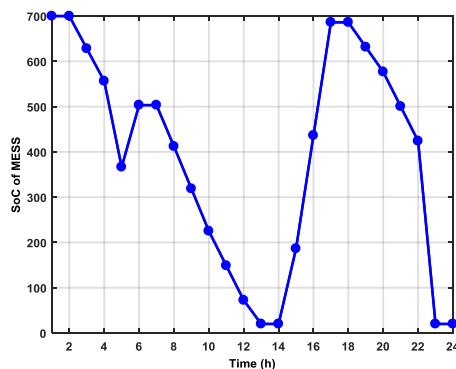


شکل (۱۳): توان خروجی دیزل ژنراتور در طول شبانه‌روز در

سناریو سوم

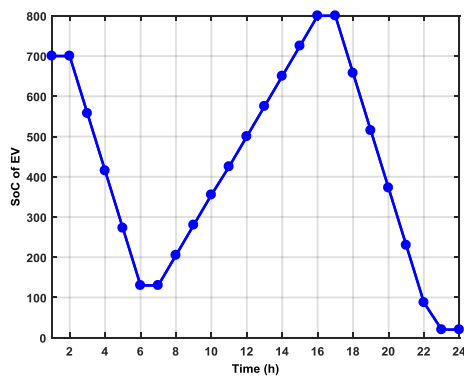
بالادست متصل است، حرکت می‌کند تا میزان توان ذخیره‌شده خود را افزایش دهد. پس از تکمیل شارژ در ساعت ۱۶ مجدد به سمت باس ۳۳ حرکت می‌کند تا بارهای این ناحیه بی‌برق را تأمین کند.

با توجه به شکل (۱۷)، میزان سوخت خودروی سوخت‌رسان سه مرتبه کاهش پیدا کرده است. این کاهش سوخت در ساعت ۱۶م به دلیل سوخت‌رسانی به خودروی برقی، در ساعت ۱۹م به دلیل حرکت به سمت ایستگاه باس ۲۹ و در ساعت ۱۱۳م به دلیل سوخت‌رسانی به ذخیره‌ساز است.



شکل (۱۴): میزان شارژ باتری در طول شبانه‌روز در سناریو

#### چهارم



شکل (۱۵): میزان شارژ خودروی برقی در طول شبانه‌روز در

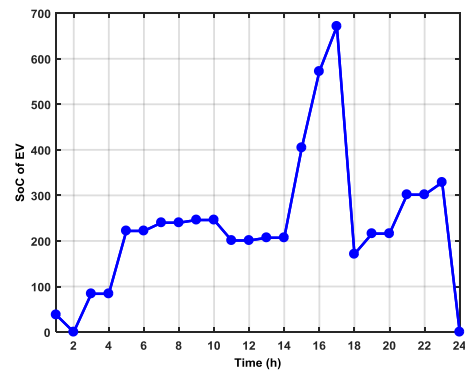
#### سناریو چهارم

حرکت و به سبب این جابه‌جایی ۴۰ لیتر از سوخت خود را مصرف می‌کند. این منبع تا آخرین ساعت روز در این ایستگاه مستقر خواهد بود. پس میزان سوخت این منبع ۶۰ لیتر باقی خواهد ماند.

ذخیره‌ساز که در ایستگاه باس ۲۹ قرار دارد، به سمت ایستگاه باس ۲۱ حرکت می‌کند تا بارهای این ناحیه را تأمین کند و در این جابه‌جایی میزان ۴۰ لیتر از سوخت خود را از دست می‌دهد. سپس با تعمیرشدن خطوط ۱-۲ و ۲۰-۱۹ در زمان‌های ۳ و ۵، این ایستگاه به شبکه بالادست متصل می‌شود. پس ذخیره‌ساز شارژ می‌شود و مجدد به سمت ایستگاه باس ۲۹ حرکت می‌کند تا بارهای این قسمت بی‌برق را تأمین کند که مطابق شکل (۱۷) میزان ۴۰ لیتر از سوخت خود را از دست می‌دهد. در این شرایط، ذخیره‌ساز دارای ۲۰ لیتر سوخت است که به جابه‌جایی بیشتر قادر نیست؛ ولی چون خودروی سوخت‌رسان در ساعت ۱۹م به سمت ایستگاه باس ۲۹ حرکت کرده است، این امکان وجود دارد که مقداری سوخت به ذخیره‌ساز برای جابه‌جایی‌های بیشتر تزریق کند. پس با میزان سوخت تزریق‌شده به ذخیره‌ساز، این منبع، مجدد به سمت باس ۲۱ برای شارژشدن حرکت می‌کند و پس از تکمیل شارژ به سمت ایستگاه باس ۲۹ باز می‌گردد تا بار این ناحیه بی‌برق را تأمین کند.

خودروی برقی مستقر در ایستگاه باس ۸ به سمت باس ۳۳ حرکت می‌کند تا بارهای این ناحیه بی‌برق را تأمین کند. دلیل این جابه‌جایی در این است که با تعمیر خط ۱-۲ در ساعت سوم، این ناحیه، دیگر به صورت بی‌برق نیست و با شبکه بالادست تأمین می‌شود. مطابق با شکل (۱۷)، خودروی برقی در این جابه‌جایی میزان ۴۰ لیتر از سوخت خود را از دست می‌دهد. به دلیل اینکه سوخت باقی‌مانده در خودروی برقی برای یک مرتبه رفتن و برگشتن به قسمت متصل به بالادست شبکه کافی نیست، خودروی سوخت‌رسان که تا ساعت ۸م در ایستگاه باس ۳۳ مستقر است، میزان سوخت خودروی برقی را به ۸۰ لیتر (تزریق ۲۰ لیتر) افزایش می‌دهد. پس با توجه به جدول (۶) و شکل (۱۵)، این خودرو در ساعت ۱۶م سوخت دریافت می‌کند و در ساعت ۱۷م به سمت ایستگاه باس ۸ که به شبکه

شده، ایده استفاده از خودروهای سوخت‌رسان در نظر گرفته شده است. جابه‌جایی خودرو سوخت‌رسان به اندازه جابه‌جایی ژنراتورهای سیار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مطابق با جدول ۷، با الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله، جابه‌جایی بهینه این خودروها بارهای تأمین‌شده برابر با بهینه‌ترین حالت ممکن (سناریو دوم) شده است. در واقع الگوریتم ارائه‌شده در این مقاله نه تنها مدل مسئله را به مدل واقعی‌تر نسبت به مرجع [۱۴] تبدیل می‌کند، جواب به‌دست‌آمده برای مسئله از مقدار بهینه موجود فاصله نخواهد گرفت.

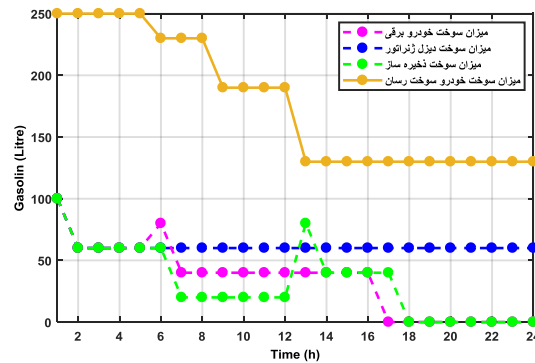


شکل (۱۶): توان خروجی دیزل ژنراتور در طول شبانه روز در

سناریو چهارم

جدول (۷): انرژی تأمین‌شده و زمان محاسبات در هر سناریو

سناریو	انرژی تأمین‌شده (kWh)	زمان انجام محاسبات (s)
سناریو اول	۳۳۲۵۸	۱۰۸۲
سناریو دوم	۳۹۴۱۸	۴۸۸۳۴
سناریو سوم	۳۹۰۷۹	۵۴۹۰۸
سناریو چهارم	۳۹۴۱۸	۵۸۶۰۷



شکل (۱۷): میزان سوخت منابع در طول شبانه‌روز در سناریو

چهارم

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به یکی از راهکارهای افزایش تاب‌آوری شبکه توزیع هنگام وقوع حوادث طبیعی پرداخته شده است؛ این راهکار، استفاده از منابع سیار است. این منابع با قابلیت جابه‌جایی در نقاط مختلف شبکه و امکان تأمین بارهای با اهمیت در قسمت بی‌برق، ابزاری کارآمد برای افزایش تاب‌آوری هستند. همچنین، این منابع این امکان را فراهم می‌کنند تا برخی منابع مانند ذخیره‌سازهای سیار به سمت قسمت متصل به شبکه بالادست حرکت کنند و میزان شارژ خود را افزایش دهند تا بتوانند میزان شارژشده را به شبکه تحویل دهند؛ اما به دلیل میزان سوخت محدود این منابع، امکان جابه‌جایی زیاد برای آنها در شبکه موجود نیست؛ به همین دلیل در این مقاله با در نظر گرفتن خودروی سوخت‌رسان، این محدودیت ژنراتورهای سیار به حداقل مقدار خود رسیده است. نتایج ارائه‌شده در قسمت شبیه‌سازی نشان می‌دهند وجود محدودیت در سوخت ژنراتورهای سیار، جواب مسئله را از بهترین جواب ممکن

در نهایت به‌منظور مقایسه نتایج سناریوهای مختلف، میزان انرژی تأمین‌شده و زمان لازم برای حل مسئله در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است در سناریو اول به دلیل اینکه منابع قابلیت جابه‌جایی ندارند، کمترین میزان تأمین انرژی وجود خواهد داشت. در سناریو دوم که برای حل آن از الگوریتم ارائه‌شده در مرجع [۱۴] استفاده شده، جابه‌جایی خودروها با هدف تأمین بیشترین بارهای مهم با کمترین میزان جابه‌جایی در نظر گرفته شده است. در این مرجع، خودروها قابلیت جابه‌جایی نامحدود دارند و هزینه سوخت آنها در نظر گرفته نشده است؛ به همین دلیل، به‌منظور واقعی‌تر شدن الگوریتم ارائه‌شده در این مرجع، در سناریو سوم سوخت خودروهای جابه‌جاکننده منابع محدود در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول ۷، در نظر گرفتن سوخت محدود باعث کاهش میزان بارهای تأمین‌شده می‌شود. در نهایت به‌منظور جبران این نقص و نزدیک‌شدن به جواب بهینه مسئله که در سناریو دوم ارائه

- [8] M. McGranaghan, M. Olearczyk, C. Gellings, "Enhancing distribution resiliency Opportunities for applying innovative technologies", *Electr. Today*, Vol. 28, No. 1, pp. 46-48, 2013.
- [9] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, D. Zhao, "Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters", *IEEE Transactions on smart grid*, Vol. 7, No. 2, pp. 958-966, 2015.
- [10] Z. Wang, J. Wang, C. Chen, "A three-phase microgrid restoration model considering unbalanced operation of distributed generation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 4, pp. 3594-3604, 2016.
- [11] M. Khederzadeh, S. Zandi. "Enhancement of Distribution System Restoration Capability in Single/Multiple Faults by using Microgrids as a Resiliency Resource", *IEEE Systems Journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 1796-1803, 2019.
- [12] J. Kim, Y. Dvorkin, "Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 5, pp. 4996-5006, 2019.
- [13] J. Shang, X. Sheng, J. H. Zhang, W. Zhao, "The optimized allocation of mobile emergency generator based on the loads importance", *IEEE Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-4, 2009.
- [14] S. Lei, C. Chen, H. Zhou, 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.
- [15] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing", *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 4, No. 2, pp. 1401-1407, Apr 1989.
- [16] M. R. Dorostkar-Ghamsari, M. Fotuhi-Firuzabad, Lehtonen, A. Safdarian. "Value of distribution network reconfiguration in presence of renewable energy resources", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 31, No. 3, pp. 1879-1888, 2015.
- دور خواهد کرد که استفاده از خودرو سوخت‌رسان این تأثیر را به حداقل مقدار خود خواهد رساند.

## مراجع

- [1] Y. Wang, Y. Xu, J. He, C. C. Liu, K. P. Schneider, M. Hong, D. T. Ton, "Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 10, No. 5, pp. 5781-5793, 2019.
- [2] X. Lu, J. Wang, L. Guo, "Using micro-grids to enhance energy security and resilience", *The Electricity Journal*, Vol. 29, No. 10, pp. 8-15, Dec 2016.
- [3] K. Schneider, "Micro-grids as a resiliency resource", 2014 IEEE International Test Conference (ITC), IEEE Computer Society, Seattle, pp. 1-1, USA, 2014.
- [4] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, F. Li, "Battling the extreme: A study on the power system resilience", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 105, No.7, pp. 1253-1266, Apr 2017.
- [5] M. Khederzadeh, S. Zandi, "Enhancement of distribution system restoration capability in single/multiple faults by using micro-grids as a resiliency resource", *IEEE Systems Journal*, Vol. 13, No.2, pp. 1796-1803, 2019.
- [6] S. Lei, J. Wang, C. Chen, 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, 2018.
- [7] H.H. Abdeltawab, Y.A. Mohamed, "Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 9, pp. 6828-6840, 2017.

<sup>1</sup> Benders Decomposition