

Research Paper

**Utilization of electric vehicles as energy storage with the purpose of increasing the profits of the owners and improving the reliability of the distribution system**

Mohammad Behzad Hadi<sup>1</sup>, Moein Moeini-Aghtaie<sup>2\*</sup>, Hossein Yousefi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Researcher, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Renewable Energies and Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

**ARTICLE INFO**

**Article History:**

Received 08 October, 2022

Revised 07 November, 2022

Accepted 07 December, 2022

**Keywords:**

Distribution network

Dynamic planning

Electric vehicle

Energy storage

Reliability

**ABSTRACT**

Today, the utilization of energy storage systems, especially in distribution systems, has a significant impact on improving the performance of the energy system, improving system reliability indicators, and reducing energy system operating costs. Therefore, using these utilities in the energy systems is advantageous. In this paper, the motivations for using electric vehicles as energy storage units are investigated. For instance, we can mention the effect of minimizing system costs from the load point of view. Moreover, in this paper, the effect of electric vehicles in improving the reliability indices, such as the Energy Not Served (ENS) and the System Average Interruption Duration Index (SAIDI) has been investigated. In order to achieve this, a dynamic planning framework has been introduced in a distribution network with the aim of minimizing system costs. After applying the framework presented in the article and modeling the IEEE 34-node sample system, the simulation results show that the network operator improves the network reliability indicators by adjusting the electricity price in such a way that electric car owners can benefit. In this regard, the total amount of ENS of the system is reduced by 11% in centralized mode. Also, the SAIDI index is reduced by 85% in the centralized mode and by 51% in the distributed mode.

**Introduction**

With the increase in human demand for energy in recent decades and the expansion energy structures around the world, the relationship between energy carriers such as electricity and natural gas and the connection and integration of electricity and gas networks has become especially important for energy system designers. These integrated and interconnected networks are examined in recent studies under the title of energy hub. The operation of the energy hub is based on receiving one or more energy carriers as input and converting these carriers to one or more carriers as output through energy structures such as Combined Heat and Power units (CHP). These carriers can be stored in the form of thermal or electrical storage due to the existence of storage devices. One of the types of storage devices that is used in an energy hub, and has recently received a lot of attention in developed countries, is Electric Vehicles (EVs). The presence of this units in energy systems, in addition to having

many environmental benefits, also has a significant impact on improving the flexibility and efficiency of energy systems.

This article presents an analytical method for evaluating the reliability of distribution networks, which examines the impact of electric vehicles on the reliability indicators of different networks by considering two models of distribution systems, distributed and centralized, based on the concept of energy hub; And at the end, it examines the effect of both mentioned systems on the reliability indicators of the system. Also, taking into account the possible uncertainties, this article uses electric vehicles in the form of energy storage in the presence of other electrical and thermal energy storages, and according to this, it examines the reliability indicators of an energy hub under different scenarios. It should be noted that the modeling of storage devices has turned this problem into an integer linear problem due to the impossibility of simultaneous charging and discharging. In this article, IEEE standard 34-node system is used and after modeling the behavior of charging and discharging and the electric vehicles in

\* Corresponding Author Email: moeini@sharif.edu

each of the nodes, the total discharge time in each part of the network is calculated in each hour, and with the help of that reliability indexes of the system is calculated. The result of this research shows a reduction in system operating cost by 71%, a reduction in the total amount of ENS by 11% in the centralized mode, a reduction in the SAIDI in the centralized mode by 85% and a reduction in the SAIDI in the distribution mode by 51%; Which, in turn, shows the increase in the quality of operation of the system, with the presence of EVs under the introduced framework.

**Proposed Model**

After simulating the behavior of EV owners, who are supposed to reduce their operational costs and find the best route using Floyd-Warshall method, the uncertainties of their transportation, thermal and electric storages, sources of electric and thermal energy production using the paper’s framework, the operational cost of the owners of electric storages (cars and batteries) has been depicted in two modes of optimized and non-optimized, in fig. 1. Also, the results of centralized and distributed mode strategies have been shown for the reliability index of the distribution system in Fig. 2 and Fig. 3.

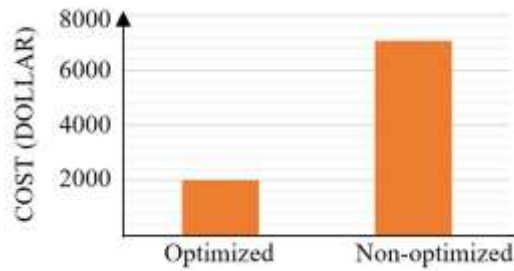


Fig. 1. Comparison of storage owners’ costs

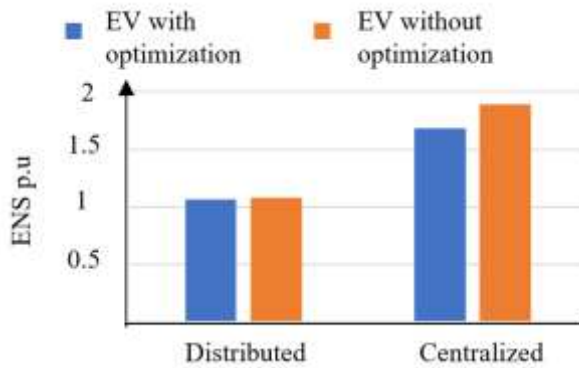


Fig. 2. Comparison of ENS in different modes

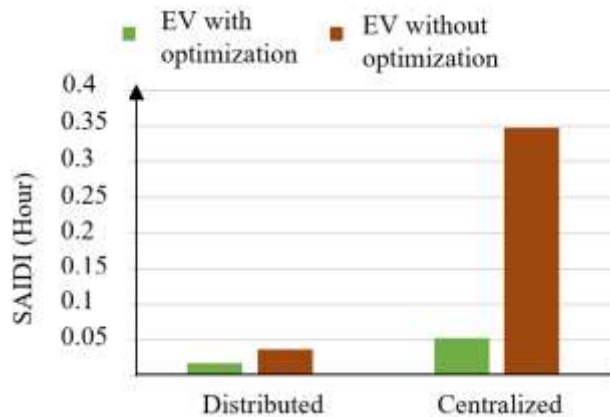


Fig. 3. Comparison of SAIDI in different modes

### Conclusion

Nowadays, due to the importance of economic and environmental management of energy systems, the concept of energy hub has developed. In this regard, the control of an acceptable level of reliability in these systems and the optimal management of energy storage units, to improve the quality of power services, are significant. By adopting an analytical approach, based on energy hub simulation, this article deals with the simulation of centralized and distributed multi-energy carrier systems; And in this regard, with the efficiency of dynamic optimization methods, it minimizes the cost of electric storage owners (including EVs and battery). The results have shown the improvement of the performance of the energy system in the presence of storage devices. It was also shown that in electric systems, the distributed strategy is much more efficient than the centralized strategy, and the

presence of batteries has a greater impact than the presence of individual EVs in improving system reliability indicators. On the other hand, the proposed framework of this article is beneficial in solving the challenge of the complexity of probabilities and availability of units to calculate system reliability. Using this framework, the ENS index for the electric system in two centralized and distributed energy hub strategies is reduced by 11% by optimizing the cost of electric storage owners; which itself indicates the effectiveness of the framework under study in order to reduce the amount of energy not supplied by the system. Also, the SAIDI index of the system, which indicates the degree of interruption and blackout of the system, is reduced by up to 85% in two centralized and distributed energy hub strategies by optimizing the cost of electric storage owners.

## فصلنامه سیستم‌های انرژی پایدار

سایت نشریه: <https://ses.ut.ac.ir>

مقاله پژوهشی

### بهره‌برداری از خودروهای الکتریکی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی با رویکرد افزایش سود مالکان و بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم توزیع

محمد بهزاد هادی<sup>۱</sup>، معین معینی اقطاعی<sup>۲\*</sup>، حسین یوسفی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> محقق، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>تاریخ‌های مقاله:</b>                      تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۷/۱۶                      تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۸/۱۶                      تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۱۶</p> <p><b>کلیدواژه:</b>                      برنامه‌ریزی پویا                      خودروی الکتریکی                      ذخیره‌ساز انرژی                      سیستم توزیع                      قابلیت اطمینان</p>	<p>امروزه، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، به‌خصوص در سیستم‌های توزیع، تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سیستم انرژی، بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری سیستم انرژی دارد. از این‌رو، به‌کارگیری آن‌ها در سیستم انرژی یک مزیت محسوب می‌شود. در این مقاله انگیزه‌های استفاده از خودروهای الکتریکی در قالب ذخیره‌ساز انرژی، بررسی می‌شود. به عنوان مثال، می‌توان به تأثیر کمینه کردن هزینه‌های سیستم از نظر بار اشاره کرد. همچنین، در این مقاله تأثیر خودروهای الکتریکی در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان، از قبیل شاخص انرژی تأمین‌نشده (ENS) و شاخص متوسط مدت قطع سیستم (SAIDI) بررسی شده است. جهت حصول این امر یک قالب برنامه‌ریزی پویا در چارچوب یک سیستم توزیع شده با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های سیستم معرفی شده است. پس از به‌کارگیری چارچوب ارائه‌شده ذیل مقاله و مدل‌سازی سیستم نمونه ۳۴ گرهی IEEE، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد بهره‌بردار شبکه با تنظیم قیمت برق به گونه‌ای که صاحبان خودروهای الکتریکی بتوانند سود کنند، باعث بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. در این راستا، میزان کل انرژی تأمین‌نشده توسط سیستم به میزان ۱۱ درصد در حالت متمرکز کاهش می‌یابد. همچنین، متوسط زمان قطعی سیستم در حالت متمرکز به میزان ۸۵ درصد و در حالت توزیع‌شده به میزان ۵۱ درصد کاهش می‌یابد.</p>

#### علائم، پارامترها و متغیرها

$L_t$	میزان بار در هر ساعت	ENS	شاخص انرژی تأمین‌نشده
$r_i$	زمان تعمیر به ازای خطای $i$ ام		میزان تأثیر اختلاف بار و مجموع
$Pr_{discharge_{t,j,be=1,zo}}$	احتمال دشارژ خودرو ژام در ساعت $t$ ام	ENS1	توان دریافتی توسط یک بخش به
$Pr_{discharge_{t,j,be=2,zo}}$	احتمال دشارژ باتری ژام در ساعت $t$ ام		جز ذخیره‌سازهای الکتریکی
$\lambda_i$	نرخ خرابی مربوط به خطای $i$ ام	ENSeffect	میزان تأثیر ذخیره‌ساز الکتریکی روی شاخص انرژی تأمین‌نشده
$T_{chDis_{t,j,be,zo}}$	جمع جبری مدت زمان شارژ و دشارژ باتری (خودرو) $z$ ام در بخش $zo$ ام، در حالت $be$ ام، در ساعت $t$ ام که در احتمالش ضرب شده		

\* نویسنده مسئول

Email: moeini@sharif.edu

هادی و همکاران: بهره‌برداری از خودروهای الکتریکی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی با رویکرد ...

Lh1	جمع جبری حرارت ورودی به واحد مدیریت توان و بار حرارتی	TchDistot <sub>t,be,zo</sub>	مجموع مدت زمان توان تخلیه‌شده توسط ذخیره‌سازهای الکتریکی مشارکت‌کننده در هر حالت be در ساعت t ام در بخش zo ام
$\eta_{furnc}$	بازده کوره حرارتی	Prdischarge <sub>tot,t,be,zo</sub>	احتمال رخداد TchDistot <sub>t,be,zo</sub> نرخ شارژ یا دشارژ هر ذخیره‌ساز الکتریکی
furncap	ماکزیمم ظرفیت کوره حرارتی	$r_{dis}$	مجموع توان دریافتی توسط یک بخش به جز ذخیره‌سازهای الکتریکی
Ahpump	در دسترس‌پذیری پمپ حرارتی	sumpowersent <sub>t</sub>	مجموع توان تخلیه‌شده توسط ذخیره‌سازهای الکتریکی
Ag	در دسترس‌پذیری گاز طبیعی	adis <sub>zo,be,t</sub>	مشارکت‌کننده در هر حالت be در ساعت t ام در بخش zo ام
Achp	در دسترس‌پذیری CHP	SAIDI	شاخص متوسط مدت قطعی سیستم
Afur	در دسترس‌پذیری کوره حرارتی	t	ساعت t ام
$\eta_{ch}$	بازده شارژ ذخیره‌ساز الکتریکی	zo	نشان‌دهنده بخش‌های سیستم الکتریکی که شامل سه بخش است
$\eta_{dis}$	بازده دشارژ ذخیره‌ساز الکتریکی	$r_i$	زمان تعمیر به ازای خطای i ام
$\eta_{dishs}$	بازده دشارژ ذخیره‌ساز حرارتی	be	مقدار ۱ نشان‌دهنده استفاده از خودروی الکتریکی و مقدار ۲ نشان‌دهنده استفاده از باتری
$\eta_{chhs}$	بازده شارژ ذخیره‌ساز حرارتی	NH	تعداد مشترکان در هر بخش
ph <sub>s</sub>	میزان حرارت تولیدی در سیستم حرارتی در سناریوی s ام	Prdischarge <sub>t,be=1,zo</sub>	احتمال دشارژ خودروی زام در ساعت t ام
pr <sub>s</sub>	احتمال تولید حرارت در سیستم حرارتی در سناریوی s ام	Prdischarge <sub>t,be=2,zo</sub>	احتمال دشارژ باتری زام در ساعت t ام
hs <sub>t,s</sub>	میزان شارژ موجود در ذخیره‌ساز حرارتی در ساعت t ام و سناریوی s ام	njbezo <sub>be,zo,t</sub>	تعداد ذخیره‌سازهای الکتریکی مشارکت‌کننده در هر حالت be در ساعت t ام در بخش zo ام
j	شاخص خودروی زام	NHneed <sub>t,zo,i</sub>	تعداد ذخیره‌ساز مورد نیاز در ساعت t ام در بخش zo ام در زمان رخ دادن خطای i ام در حالت متمرکز
t	شاخص ساعت t ام	TchDistot <sub>t,be,zo</sub>	مجموع مدت زمان توان تخلیه‌شده توسط ذخیره‌سازهای الکتریکی مشارکت‌کننده در هر حالت be در ساعت t ام در بخش zo ام
n	شاخص ساعت حرکت خودرو	Prdischarge <sub>tot,t,be,zo</sub>	احتمال مجموع مدت زمان توان تخلیه‌شده توسط ذخیره‌سازهای الکتریکی مشارکت‌کننده در هر حالت be در ساعت t ام در بخش zo ام
u	شاخص سناریوی u ام	Prdischarge <sub>t,be=1,zo</sub>	تخلیه‌شده توسط ذخیره‌سازهای الکتریکی مشارکت‌کننده در هر حالت be در ساعت t ام در بخش zo ام
v	تعداد کل خودرو و باتری در هر بخش	ENSH	شاخص انرژی تأمین‌نشده برای سیستم حرارتی
i	شاخص خطای i ام		
<b>متغیرهای وابسته</b>			
$Cost_{Storage}^{be=1}$	هزینه صاحبان خودرو در حالت بهینه		
costdis1	درآمد ناشی از فروش برق به شبکه برای صاحبان خودرو		
costch1	هزینه شارژ برای صاحبان خودروها		
tch1 <sub>j,u,n</sub>	زمان شارژ خودروی زام در سناریوی u ام که در ساعت n حرکت کرده است		
tdis1 <sub>j,u,n</sub>	زمان دشارژ خودروی زام در سناریوی u ام که در ساعت n حرکت کرده است		
Prdischarge <sub>t,be=1,zo</sub>	احتمال شارژ یا دشارژ خودرو زام در ساعت t ام		
bel1 <sub>j,u,n,t</sub>	میزان شارژ باتری خودرو زام در سناریوی u ام که در ساعت n حرکت می‌کند		

مقدمه

با افزایش تقاضای بشر به انرژی در دهه‌های اخیر و گسترش روابط میان ساختارهای انرژی در سرتاسر دنیا، رابطه میان حامل‌های انرژی مانند الکتریسیته و گاز طبیعی و اتصال و یکپارچه‌سازی شبکه‌های برق و گاز برای طراحان سیستم‌های انرژی اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. این شبکه‌های یکپارچه و به‌هم‌پیوسته در مطالعات اخیر تحت عنوان هاب انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱]. اساس کارکرد هاب انرژی بر مبنای دریافت یک یا چند حامل انرژی به عنوان ورودی و تبدیل این حامل‌ها به واسطه ساختارهای انرژی همانند واحدهای تولید هم‌زمان برق و حرارت ( $CHP^1$ ) به یک یا چند حامل به عنوان خروجی است [۲]. این حامل‌ها خود نیز می‌توانند به واسطه وجود ذخیره‌سازها، در قالب ذخیره‌سازی حرارتی و یا الکتریکی ذخیره شده و توسط ساختارهای انتقال حامل‌های انرژی به مقصد نهایی خود برسند [۳]. یکی از انواع ذخیره‌سازها که در یک هاب انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌تازگی نیز در کشورهای توسعه‌یافته توجه زیادی به آن می‌شود خودروهای الکتریکی است. حضور این تجهیزات در سیستم‌های انرژی علاوه بر داشتن مزایای متعدد زیست‌محیطی، تأثیر بسزایی نیز در بهبود انعطاف‌پذیری و بهینگی سیستم‌های انرژی دارد [۴]. به دلیل امکان جابه‌جایی خودروهای الکتریکی و قابلیت اتصال آن‌ها در نقاط مختلف به شبکه به این نوع ذخیره‌سازها منابع ذخیره الکتریکی بسیار نیز گفته می‌شود. در صورت استفاده گسترده از این منابع سیار، می‌توان حجم قابل توجهی از این انرژی را در مواقع حساس مانند پیک بار به شبکه تزریق کرد و قابلیت تأمین بار توسط شبکه را بالا برد و از فشار ناشی از پیک بار روی شبکه کاست [۵]. همچنین، استفاده از خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) می‌تواند به خودی خود مزایایی مانند تنظیم ولتاژ و فرکانس، تأمین ذخیره چرخشی، تسطیح بار، پیک‌سایی، صرفه‌جویی در انتشار گازهای گلخانه‌ای و غیره داشته باشد [۶]. البته، درخور یادآوری است که با تمام مزایای زیست‌محیطی و سهولت استفاده از این خودروها، در مطالعه‌ای مربوط به توسعه

$t_{dis2j,t}$	زمان دشارژ باتری زام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت کرده است
$bel12_{j,t}$	میزان شارژ باتری زام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت می‌کند
$Cost_{Storage}^{be=2}$	هزینه صاحبان باتری در حالت بهینه درآمد ناشی از فروش برق به شبکه برای صاحبان باتری
$cost_{dis2j,t}$	هزینه شارژ برای صاحبان باتری
$cost_{ch2j,t}$	زمان شارژ باتری زام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت کرده است
$t_{ch2j,t}$	زمان دشارژ باتری زام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت کرده است
$t_{dis2j,t}$	میزان شارژ باتری زام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت می‌کند
$bel12_{j,t}$	

متغیرهای مستقل

$p_{scenario_{j,u}}$	احتمال رخداد سناریوی $u$ ام برای باتری (خودرو) زام
$p_{tstart_{j,u,n}}$	احتمال رخداد شروع به حرکت خودرو زام در سناریوی $u$ ام در ساعت $n$
$t_{start_{j,u,n}}$	شروع به حرکت خودرو زام در سناریوی $u$ ام در ساعت $n$
$pr_{st}$	قیمت فروش برق به شبکه در ساعت $t$ ام
$pr_{bt}$	قیمت خرید برق از شبکه در ساعت $t$ ام

متغیرهای باینری

$B_{pb_{j,t,u,n}}$	مقدار باینری تعیین‌کننده شارژ شدن خودرو زام در ساعت $t$ ام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت کرده است
$B_{ps_{j,t,u,n}}$	متغیر باینری تعیین‌کننده دشارژ شدن خودروی زام در ساعت $t$ ام در سناریوی $u$ ام که در ساعت $n$ حرکت کرده است
$B_{pb2_{j,t}}$	مقدار باینری تعیین‌کننده شارژ شدن باتری زام در ساعت $t$ ام
$B_{ps2_{j,t}}$	مقدار باینری تعیین‌کننده دشارژ شدن باتری زام در ساعت $t$ ام
$b_{jbezo_{t,j,be,zo}}$	متغیر باینری حضور یا عدم حضور ذخیره‌ساز الکتریکی زام در ساعت $t$ ام در بخش $zo$

گاز انجام شده است. در این مرجع تأثیر منابع تبدیل توان محرک به گاز ( $P2G^2$ ) و ذخیره‌ساز حرارتی روی عملکرد تکنولوژی‌های به‌کاررفته و قابلیت اطمینان سیستم سنجیده شده است. همچنین [۱۳] به ارائه یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با هدف ارتقای قابلیت اطمینان برای اتصال هاب‌های انرژی پرداخته است. در این مقاله هزینه تلفات خطوط انتقال شبکه برق و تلفات حرارتی و افت فشار در خطوط لوله و گررها در شبکه گاز در نظر گرفته است. حال نیاز است تا مفاهیم قابلیت اطمینان و وجوب هاب، از منظر خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار گیرند. مرجع [۱۴] به بررسی قابلیت اطمینان سیستم توزیع در حضور خودروی الکتریکی برای هر نقطه (توزیع‌شده و متمرکز) پرداخته شده است، اما به نحوه ارتباط این خودروها با شبکه اشاره نشده است. در [۱۵] از روش تئوری زنجیره سفر برای توصیف و مدل‌سازی سفر این خودروها استفاده شده و محاسبات قابلیت اطمینان فقط سیستم انجام شده است، ولی سیستم پیشنهادی فقط سیستم الکتریکی را شامل می‌شود و این در حالی است که در مطالعات اخیر، سیستم‌های انرژی به صورت تجمیع‌شده یا چند حامل دیگر بررسی می‌شود؛ و به عنوان مثال در یک سیستم انرژی امکان ندارد که کمبود گاز طبیعی در مصرف برق تأثیری نداشته باشد.

در مرجع [۱۶] حضور ذخیره‌سازها در کنار منابع تجدیدپذیر تحت عنوان یک هاب انرژی بررسی شده و مسئله بهینه‌سازی به صورت یک برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح بررسی شده است. همچنین، در [۱۷] یک چارچوب جدید با حضور خودروهای الکتریکی به عنوان منابع ذخیره‌ساز پیشنهاد شده و چهار سناریوی شارژ خودروی الکتریکی مختلف برای تحلیل تأثیر خودروهای الکتریکی روی ریزشبکه صنعتی در نظر گرفته شده است؛ که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد مدل پیشنهادی به طور مؤثر هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و سهم انرژی تجدیدپذیر را به حداکثر می‌رساند، اما با توجه به اینکه تأمین تقاضا برای سیستم‌های انرژی از اهمیت زیادی برخوردار است، مسئله تأمین سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان و ذخیره‌سازی انرژی مهم می‌شود؛ زیرا در مواقع

حضور خودروهای الکتریکی در کشور ایران عوامل اساسی مهم دیگری همچون سیاست‌گذاری هزینه سوخت در کشور نیز جزء موارد مهمی در استفاده گسترده از این منابع است که باید توسط مدیران ارشد حوزه مربوطه مورد بررسی قرار گیرد [۷].

استفاده از خودروهای الکتریکی می‌تواند در میزان رضایت مشتریان و بهره‌بردار از عملکرد شبکه تأثیر بسزایی بگذارد و شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد؛ زیرا در مواقعی که بخشی از سیستم به خاطر خطاهای رخ داده دچار خاموشی می‌شود، از این منابع جهت پوشش خطاهای رخ داده در شبکه و تأمین اضطراری بار استفاده می‌شود. حال اگر در یک فضای چندحاملی از خودروی الکتریکی و سایر ذخیره‌سازهای انرژی در قالب یک هاب انرژی استفاده شود، قابلیت اطمینان سیستم انرژی در شرایط قطعی یکی از حامل‌ها یا شرایط پیک بار یکی از بخش‌های انرژی، می‌تواند بهبود یابد [۸].

مطالعات قابلیت اطمینان در سیستم‌های انرژی به سه بخش کلی تولید، انتقال و توزیع تقسیم می‌شود. دلیل این تقسیم‌بندی متفاوت بودن طریقه مدل کردن سیستم، برای انجام مطالعات قابلیت اطمینان در هر یک از بخش‌های یادشده است. همچنین دلیل وجوب مطالعات قابلیت اطمینان به صورت کلی برای ارزیابی کیفیت عملکرد سیستم در هر یک از بخش‌های یادشده در گذشته و مقایسه آن با سیستم‌های پیشنهادی جدید است [۹].

در سیستم‌های سنتی با وقوع یک خطا در یک بخش خاص ممکن بود که حتی اتصال مصرف‌کنندگان در سایر بخش‌ها را نیز قطع کند [۱۰]. این در حالی است که در سیستم‌های چندحاملی این امکان وجود خواهد داشت که در صورت قطع ارتباط یک بخش از منبع یک حامل انرژی خاص، بهره‌بردار سیستم بتواند با تأمین آن نوع حامل از مسیرهای دیگر اقدام به تأمین کل یا بخشی از تقاضا کند. به بیانی دیگر، راه‌های پاسخ‌گویی به تقاضا در سیستم متنوع شده و در نتیجه، مشترکان کمتری دچار قطعی و خاموشی خواهند شد [۱۱].

در [۱۲] قابلیت اطمینان سیستم‌های یکپارچه برق و گاز ( $IPGS^1$ ) با تنظیم پخش بار بین شبکه برق و شبکه

اوج بار با تخلیه این انرژی ذخیره شده در شبکه می‌توان بخشی از خاموشی‌ها را جبران کرد.

این مقاله یک روش تحلیلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع ارائه می‌دهد که تأثیر خودروهای الکتریکی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه‌های مختلف را با در نظر گرفتن دو مدل سیستم توزیع گسترده و متمرکز در شبکه، بر مبنای مفهوم هاب انرژی بررسی می‌کند؛ و در پایان تأثیر اتخاذ شکل توزیع هر دو سیستم یادشده را روی شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم، بررسی می‌کند. همچنین این مقاله با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ممکن، از خودروهای الکتریکی در قالب ذخیره‌سازهای انرژی در حضور دیگر ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و حرارتی استفاده کرده و با توجه به این امر شاخص‌های قابلیت اطمینان یک هاب انرژی را تحت سناریوهای مختلف بررسی می‌کند. درخور یادآوری است که مدل‌سازی ذخیره‌سازها به علت عدم امکان هم‌زمانی شارژ و دشارژ این مسئله را به یک مسئله خطی عدد صحیح تبدیل کرده است. در این مقاله از سیستم ۳۴ گرهی استاندارد IEEE استفاده شده است و پس از مدل کردن رفتار شارژ و دشارژها و خودروهای الکتریکی موجود در هر یک از گره‌ها، زمان کل تخلیه در هر بخش شبکه، در هر ساعت محاسبه می‌شود و به کمک آن شاخص‌های قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. نتیجه این پژوهش، نمایانگر کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم به میزان ۷۱ درصد، کاهش میزان کل انرژی تأمین‌نشده توسط سیستم به میزان ۱۱ درصد در حالت متمرکز، کاهش متوسط زمان قطعی در حالت متمرکز به میزان ۸۵ درصد و کاهش متوسط زمان قطعی در حالت توزیع‌شده به میزان ۵۱ درصد است؛ که به نوبه خود افزایش کیفیت بهره‌برداری را در هاب انرژی مورد مطالعه با وجود خودروهای برقی ذیل چارچوب معرفی شده نشان می‌دهد.

## روش‌شناسی

روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان شبکه‌های توزیع را می‌توان به دو دسته عمده تحلیلی و شبیه‌سازی تقسیم کرد. در روش‌های تحلیلی که کاربرد فراوانی در مطالعات قابلیت اطمینان سیستم‌های توزیع دارند، فیدر و تجهیزات به صورت اجزای سری یا موازی مدل می‌شوند و شاخص‌های مربوطه در

زمان نسبتاً کوتاهی محاسبه می‌شوند. در روش‌های شبیه‌سازی، با بهره‌گیری از نرم‌افزار و شبیه‌سازی صرف به روش مونت کارلو، قابلیت اطمینان سیستم انرژی به دست می‌آید. در این مقاله از روش‌های تحلیلی جهت شناسایی شبکه و مدل‌سازی آن استفاده شده و از روش شبیه‌سازی برای محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان و میزان هزینه شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی بهره برده شده است. به منظور بررسی مسئله کلی برنامه‌ریزی خودروها، در اولین مرحله ماتریس گراف شبکه تعریف می‌شود. در این گراف مشخص می‌شود که کدام گره‌ها به هم وصل و فاصله آن‌ها از هم چقدر است. پس از تعریف گراف شبکه، کوتاه‌ترین مسیر بین تمام جفت گره‌ها محاسبه می‌شود؛ به این منظور روش‌های متعددی همچون الگوریتم‌های بازگشتی، الگوریتم A، الگوریتم بلمن-فورد، الگوریتم حریصانه معروف به دایکسترا و روش‌های برنامه‌نویسی پویا می‌توانند کارا باشند. در میان روش‌های یادشده روش برنامه‌نویسی پویای فلویید وارشل<sup>۱</sup> به دلیل سرعت بالای محاسبات و در نظر گرفتن بهترین حالت و بدترین حالت مسیریابی می‌تواند بهترین انتخاب مسئله پژوهش فعلی باشد [۱۸]. دلیل کلی انتخاب مسئله کوتاه‌ترین مسیر، رویکرد بهینه‌سازی هزینه‌ها و کاهش مسیر توسط رانندگان خودروها است. حال، باید محل ایستگاه‌های شارژ در مسئله مشخص شود. این امر با توجه به فاصله گره‌ها و توانایی ضعیف‌ترین خودرو (خودرویی که برد کمتری دارد) صورت می‌پذیرد. به این صورت که اگر این خودرو توانایی جابه‌جایی بین هر جفت گره را داشته باشد، در این صورت تمام خودروها نیز می‌توانند این یال گراف را طی کنند بدون اینکه شارژ کم بیاورند. در صورتی که خودرو با کمترین برد نتواند این مسیر را طی کند، باید یک گره به گره‌های گراف اصلی اضافه شود که در این صورت به ابعاد ماتریس شبکه (ماتریس مجاورت) یک واحد اضافه می‌شود که لازم است فاصله این گره جدید و دو گره قبل و بعدش نیز تعیین شود. در نهایت، به صاحبان خودروها این اطمینان داده می‌شود که آن‌ها قبل از اینکه شارژ خودروشان تمام شود می‌توانند آن را شارژ کنند. درخور یادآوری است که فرض شده که در هر گره یک خانه وجود دارد که قابلیت شارژ و دشارژ خودروها را دارد. پس از تعیین ایستگاه‌های شارژ مکان

1. Floyd-Warshall



روش فلویید وارشال پس از مشخص شدن هدف‌های سفر، کوتاه‌ترین مسیر بین گره شروع و هدف اول محاسبه می‌شود. در این روش پس از نوشتن ماتریس مجاورت برای نقاط گراف مسیر نوشته شده و سپس، با استفاده از یک رأس واسطه، کوتاه‌ترین فاصله بین نقاط را محاسبه کرده و ماتریس را با مقادیر جدید بازنویسی می‌کنند. پس از آن، دو نقطه به عنوان واسطه انتخاب می‌شود و ماتریس جدید به دست می‌آید. با تکرار این روند الگوریتم به پایان رسیده و در نهایت، ماتریسی ایجاد شده که کوتاه‌ترین مسیر بین تمامی نقاط را محاسبه کرده است. حال، پس از تعیین کوتاه‌ترین مسیر، به کمک ماتریس مسیره‌های بهینه بین گره‌ها، تمام گره‌های میانی نقطه شروع و گره هدف محاسبه می‌شود. اگر خودرو شارژ کافی برای رسیدن به اولین هدف را داشت، خودرو شروع به حرکت می‌کند. در غیر این صورت، باید خودرو شارژ شود تا بتواند این مسیر را طی کند. پس از رسیدن به اولین ایستگاه شارژ، دوباره میزان شارژ خودرو چک می‌شود و در صورت داشتن شارژ کافی به سمت هدف بعد حرکت خواهد کرد. پس از رسیدن به این هدف در ماتریس اهداف اصلی ( $AIM$ ) درایه متناظر صفر می‌شود. بنابراین، خودرو تا زمانی که مجموع عناصر این ماتریس صفر نشده به حرکت خود ادامه می‌دهد. پس از صفر شدن تمام درایه‌های این ماتریس، خودرو به تمام اهداف خود می‌رسد و از حرکت باز می‌ایستد و وارد برنامه شارژ در خانه می‌شود.

#### شبیه‌سازی سیستم

این بخش ابتدا به مدل‌سازی عملیات هاب مورد مطالعه خواهد پرداخت. سپس، شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم را با در نظر گرفتن بهینه‌سازی هزینه‌های شارژ و دشارژ صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی، از قبیل خودروهای الکتریکی و باتری‌ها محاسبه خواهد کرد. ابتدا تابع هدف بهینه‌سازی در رابطه ۱ آورده شده است؛ که شامل کمینه کردن هزینه صاحبان خودروهای الکتریکی برای کل هاب انرژی است. به دلیل احتمالاتی بودن برنامه سفر خودروهای الکتریکی، شکل تابع هدف و قیود آن، با باتری‌ها فرق خواهد داشت. میزان وابستگی هزینه‌های خودروهای الکتریکی به دو متغیر وابسته هزینه شارژ و درآمد ناشی از دشارژ را، بیان می‌کند.

اولیه تمام خودروها به کمک تابع توزیع یکنواخت و به صورت کاملاً تصادفی انتخاب می‌شود، زیرا ممکن است این خودروها در هر گره دلخواهی قرار گیرند. مکان اولیه در واقع مبنای حرکت و محاسبات خودروی الکتریکی است.

برای حرکت تمامی خودروها پنج سناریو در نظر گرفته شده که عبارت‌اند از :

- ۱- حرکت از خانه به سمت اداری و از اداری به سمت خانه
- ۲- حرکت از خانه به سمت اداره و از اداره به سمت بازار و از بازار به سمت خانه
- ۳- حرکت از خانه به سمت بازار و از بازار به سمت خانه
- ۴- حرکت از خانه به سمت بازار و از بازار به سمت اداره و از بخش اداره به سمت خانه
- ۵- از خانه به هر گره دیگر که به صورت تصادفی و با کمک تابع توزیع یکنواخت مشخص می‌شود.

احتمال رخداد تمام سناریوها با توجه به تابع توزیع احتمال استخراج شده از  $NHTS^1$  محاسبه می‌شود [۱۹]. زمان شروع هر یک از این سناریوها هر ساعتی از شبانه روز ممکن است باشد. لذا برای تعیین ساعت شروع به حرکت از اطلاعات  $NHTS$  استفاده کرده و توابع توزیع ساعت شروع به حرکت را برای هر خودرو در هر سناریو مشخص می‌کنیم. با توجه به سناریوسازی هر خودرو باید به یک سری نقاط مانند بازار، اداره و یا هر گره دلخواهی سفر کند یا اینکه سفری نداشته باشد و در نهایت، به مکان اولیه خودرو که هدف آخر خودرو است، سفر کند. بنابراین، ماتریس اهداف خودروی  $z$  ام در سناریوی  $u$  ام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AIM(j.u.step) = \text{[ (اداره، خانه بازار،) اهداف اصلی]}$$

اکنون خودرو می‌تواند اهدافش را دنبال کند. خودرو تا زمانی که مجموع درایه‌های ماتریس اهداف بزرگ‌تر از صفر است، به حرکت خود ادامه می‌دهد. یک حالت خاص برای این ماتریس وجود دارد و این حالت زمانی اتفاق می‌افتد که خودرو در سناریوی پنجم هیچ مسیری برای حرکت نداشته باشد که در این صورت باید با خودرو مانند یک باتری که فقط می‌تواند از و به شبکه شارژ و دشارژ شود، رفتار شود.

مطابق آنچه که پیش‌تر نیز گفته شد، با استفاده از

1. National Household Travel Survey

به عنوان متغیرهای مستقل ورودی اعمال می‌شود. درآمد ناشی از فروش برق به شبکه به عنوان یک متغیر وابسته عمل می‌کند. روابط ۸-۱۴ به روابط ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی می‌پردازد.

$$Cost_{Storage}^{be=2} = \text{Min} \sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^v costch2_{j,t} - costdis2_{j,t} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} costch2_{j,t} &= Rch_j \times Bpb2_{j,t} \times tch2_{j,t} \\ &= Rch_j \times Bpb2_{j,t} \times tch2_{j,t} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} costdis2_{j,t} &= Rdis_j \times Bps2_{j,t} \times tdis2_{j,t} \\ &= Rdis_j \times Bps2_{j,t} \times tdis2_{j,t} \end{aligned} \quad (10)$$

$$Bps2_{j,t} + Bpb2_{j,t} \leq 1 \quad (11)$$

$$0 \leq bell2_{j,t} \leq bc_j \quad (12)$$

$$0 \leq bell2_{j,t} \leq bc_j \quad (13)$$

$$\begin{aligned} bell2_{j,t} &= (Rch_j \times Bpb2_{j,t} \times tch2_{j,t} \times \eta_{ch} \\ &- Rdis_j \times Bps2_{j,t} \times tdis2_{j,t}) + bell2_{j,t-1} \end{aligned} \quad (14)$$

سیستم حرارتی از واحدهایی مانند کوره حرارتی، واحد تولید هم‌زمان برق و حرارت، واحد مدیریت توان، پمپ حرارتی و ذخیره‌ساز حرارتی تشکیل می‌شود. برای برنامه‌ریزی ذخیره‌ساز حرارتی به اطلاعاتی از قبیل میزان تقاضای انرژی حرارتی، میزان تولید واحدهای تأمین حرارت و میزان انرژی حرارتی که از طریق پمپ حرارتی به سیستم حرارتی منتقل می‌شود، نیاز است. میزان تولید حرارت در واحدهای حرارتی نیز با توجه به میزان ورودی و بازده حرارتی آن‌ها قابل محاسبه است. از طرفی، این امکان وجود دارد که واحدهای تولید توان حرارتی در دسترس نباشند، بنابراین سناریوهای متفاوتی پیش خواهد آمد که باید در این سناریوها میزان توان تولیدی، مصرفی، ذخیره‌سازی، تخلیه ذخیره‌ساز در سیستم حرارتی و احتمال هر سناریو نیز محاسبه شود که مطابق با روابط ۱۵-۱۷ عمل می‌شود.

$$ph1_{t,s} = phf_{t,s} + phchp_{t,s} + phhp_{t,s} - lh \quad (15)$$

$$pr_s = Ahpump_s * Ag_s * Achp_s * Afur_s \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Cost_{Storage}^{be=1} &= \\ \min \sum_{j=1}^v \sum_{n=1}^n \sum_{u=1}^u & (costch1_{j,u,n} - costdis1_{j,u,n}) \end{aligned} \quad (1)$$

حال نیاز است که متناسب با تابع هدف بیان شده، محدودیت‌هایی در باب هزینه‌های شارژ و دشارژ خودروها و عدم هم‌زمانی عملیات شارژ و دشارژ تبیین شود (رابطه ۲).

$$\begin{aligned} costch1_{j,u,n} &= \sum_{t=1}^{24} (1/24) \times Rch_j \times tch1_{j,u,n} \times prb_t \\ &\times ptstart_{j,u,n} \times pscenario_{j,u} \times Bpb_{j,t,u,n} \end{aligned} \quad (2)$$

رابطه ۲ بیان می‌دارد که برای هر خودرو در هر سناریو و در هر ساعت شروع به حرکتی، میزان هزینه شارژ آن با توجه به چه عواملی محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} costdis1_{j,u,n} &= \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{1}{24} \right) \times Rdis_j \times tdis1_{j,u,n} \times prs_t \times \\ &ptstart_{j,u,n} \times pscenario_{j,u} \times Bps_{j,t,u,n} \times \eta_{dis} \end{aligned} \quad (3)$$

رابطه ۳ بیان می‌دارد که برای هر خودرو در هر سناریو و در هر ساعت شروع به حرکتی، میزان درآمد ناشی از دشارژش به شبکه با توجه به چه عواملی محاسبه می‌شود.

$$Bps \text{ and } Bpb = 0, 1 \quad (4)$$

$$Bps_{j,t,u,n} + Bpb_{j,t,u,n} \leq 1 \quad (5)$$

معادلات ۴ و ۵ به تبیین قرارگیری در وضعیت شارژ یا دشارژ و عدم هم‌زمانی عملیات شارژ و دشارژ اشاره دارند.

$$0 \leq bell1_{j,u,n,t} \leq bc_j \quad (6)$$

رابطه ۶ بیان می‌کند که در هر لحظه میزان شارژ باتری خودرو حداکثر می‌تواند برابر با ظرفیت باتری خودرو باشد.

$$\begin{aligned} bell1_{j,u,n,t} &= \left( \frac{1}{24} \right) \times ptstart_{j,u,n} \times pscenario_{j,u} \times \\ &(Rch_j \times tch1_{j,u,n} \times Bpb_{j,t,u,n} \times \eta_{ch} \\ &- Rdis_j \times tdis1_{j,u,n} \times Bps_{j,t,u,n}) + bell1_{j,u,n,t-1} \end{aligned} \quad (7)$$

رابطه ۷ بیان می‌دارد که در هر بازه از برنامه‌ریزی، میزان شارژ باتری خودرو برابر است با جمع جبری میزان شارژ یا دشارژ در بازه فعلی و شارژی که از قبل دارد. ساعت‌های شروع به حرکت و احتمال آن، احتمال وقوع هر سناریو، قیمت خرید و فروش برق در هر ساعت از شبکه،

با استفاده از اطلاعات موجود سیستم ۳۴ گرهی استاندارد IEEE بهینه‌سازی هزینه خودروها و محاسبات شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### هدف‌گذاری مسئله

بر اساس آنچه که پیش‌تر گفته شد، سیستم را در دو حالت کمینه‌سازی هزینه‌ها و عدم کمینه‌سازی هزینه‌ها در نظر می‌گیرد و در هر دو حالت شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم محاسبه می‌شود. برای کمینه‌سازی هزینه‌ها از روش بهینه‌سازی پویا استفاده شده است. به این منظور، باید مطابق جدول ۱ برنامه سفر خودرو نیز معین شود.

جدول ۱. برنامه سفر خودرو

	سفر ندارد			خودرو سفر دارد		
mad1	0	0	1	1	1	1
mad2	1	1	0	0	0	0
-	-	t=tstart & tstart=24	t=tstart & tstart<24	t<tstart	t=24	t>tstart
ac1	1	1	0	1	1	0
ac2	0	0	1	0	0	1
ac4	1	0	0	0	0	0 یا 1

نیاز برای رسیدن به هدف اول باشد یا در صورت نداشتن برنامه سفر شارژش بیش از ۱۵ درصد ظرفیت خودرو باشد، می‌تواند در صورت سودآوری برای صاحبان خودرو در شبکه تخلیه شود.

شرط سوم: اگر شارژ خودرو با میزان شارژ مورد نیاز تا رسیدن به هدف اول برابر بود یا در صورت نداشتن سفر شارژ خودرو با ۱۵ درصد ظرفیت خودرو برابر بود در این صورت خودرو می‌تواند فقط شارژ شود و دشارژی در شبکه نخواهد داشت.

پس از تعیین حالت شارژ و دشارژ خودروها باید قیود ظرفیت (که در درون روابط گنجانده شده است) و قید مربوط به اینکه در یک زمان خاص خودرو نمی‌تواند هم شارژ شود و هم دشارژ شود نیز مد نظر قرار گیرد. با تعریف تفاضل قیمت فروش در ساعت t و قیمت خرید در ساعت تصمim بعد (acd1) و تفاضل قیمت خرید در ساعت t و قیمت فروش در ساعت تصمim بعد (acd2)، می‌توان برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها را از دید منطقی مورد بررسی قرار داد. اگر شارژ خودرو بیش از شارژ مورد نیاز برای رسیدن به هدف اول و کمتر از حداکثر

$$A_x = \begin{cases} A_x \\ 1 - A_x \end{cases} \quad (17)$$

رابطه ۱۸ به عملیات ذخیره‌سازهای حرارتی اشاره دارد. این رابطه همچنین به این موضوع می‌پردازد که میزان انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز در هر بازه، به میزان انرژی ذخیره‌شده در بازه قبل و میزان شارژ یا دشارژ در بازه فعلی بستگی دارد و بر این اساس، برنامه‌ریزی مورد نظر پویاست.

$$hs_{t,s} = pr_s \left( (ph1_{t,s} * \eta_{chgs}) * y(ph1_{t,s}) + \left( \frac{ph1_{t,s}}{\eta_{dishs}} \right) \times y(hs_{t-1,s} + ph1_{t,s}) \times y(-ph1_{t,s}) \right) + hs_{t-1,s} \quad (18)$$

mad1: مقدار ۱ آن نشان‌دهنده برنامه سفر برای خودرو است. در زمان‌های متفاوت با توجه به متغیرهای تعریف‌شده در جدول مبنای تصمیم فرق خواهد داشت.

ac1: نشان‌دهنده این است که خودرو در ساعت بعد حرکت ندارد و مبنای تصمیم‌گیری ساعت بعد است.

ac2: نشان‌دهنده این است که خودرو در انتهای ساعت t شروع به حرکت می‌کند یا اینکه حرکت کرده ولی هنوز به هدف نهایی نرسیده.

ac4: بیانگر این است که خودرو یا به هدف آخر رسیده و یا اینکه به کلی ساکن است و حرکتی ندارد.

mad2: مقدار یک آن نشان‌دهنده این است که خودرو هیچ برنامه سفری ندارد.

برنامه‌ریزی خودرو شامل سه شرط به شرح زیر است: شرط اول: اگر شارژ خودرو کمتر از میزان حداقل شارژ برای رسیدن به هدف اول باشد یا اینکه خودرو قصد حرکت نداشته باشد ولی میزان شارژ آن کمتر از ۱۵ درصد ظرفیت خودرو باشد، در این صورت خودرو حتماً باید شارژ شود.

شرط دوم: اگر میزان شارژ خودرو بیش از میزان مورد

می‌توانند باشند که هریک به نوبه خود نمایانگر ویژگی‌های مورد انتظار سیستم از سطح خاصی از اطمینان به شبکه می‌تواند باشد [۲۰]. در این میان، شاخص‌های ENS و SAIDI که در روابط ۱۹ و ۲۰ آمده‌اند به دلیل کاربردهای عمومی‌تر در سیستم‌های گرمایش منطقه‌ای و سیستم‌های برقی-گازی می‌توانند معیارهای مناسب‌تری برای محاسبه قابلیت اطمینان مسئله پیش رو باشند.

کل انرژی تأمین‌نشده مورد انتظار توسط ENS = سیستم (۱۹)

$$= \sum_{s=1}^s (L(s) \times u(s))$$

$u(s)$  بیانگر مدت زمان سالیانه خاموشی و  $L(s)$  نمایانگر بار متوسط نقطه بار  $s$  ام است.

$$SAIDI = \frac{\text{تعداد کل مشترکین}}{\text{مجموع زمان‌های قطعی مشترکین}} \quad (۲۰)$$

$$= \frac{\sum_{s=1}^s (N(s) \times u(s))}{\sum_{s=1}^s N(s)}$$

SAIDI شاخص متوسط زمان قطعی سیستم و  $N(s)$  تعداد مشترکان در نقطه بار  $s$  ام است.

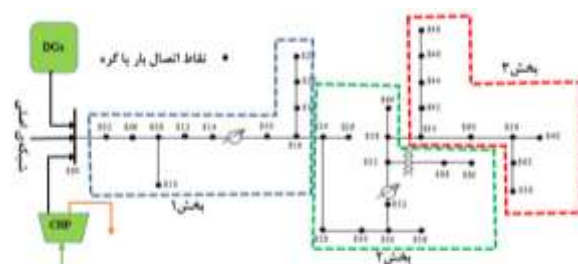
### وضعیت تحلیلی مسئله

اطلاعات مربوط به شبکه‌های مورد سنجش این مقاله شامل راکتانس شاخه‌ها و بار اکتیو و راکتیو متصل به باس‌ها، توان هر باس، ظرفیت خطوط انتقال، اطلاعات مربوط به ژنراتورها و هزینه هر یک از آن‌ها و فاصله باس‌ها از یکدیگر در سیستم ۳۴ گرهی استاندارد IEEE آمده‌است. تحلیل سیستم توزیع انرژی الکتریکی در دو حالت توزیع شده و متمرکز انجام خواهد شد. در سیستم‌های متمرکز تمام منابع تولید توان الکتریکی روی یک فیدر نصب می‌شوند و در صورت هرگونه خطا در این فیدر تمام بخش‌های پایین دست ارتباطشان با این فیدر قطع می‌شود. شکل ۱ نمایشی از این سیستم‌ها را بیان می‌کند، ولی در سیستم‌های توزیع شده، که نمایشی از آن‌ها در شکل ۲ آمده است، منابع تولید توان در نقاط مختلف شبکه نصب می‌شوند. در این مسئله مفروض است که فیدر توزیع به صورت شعاعی عمل می‌کند، دو خطا هم‌زمان نمی‌توانند رخ دهند، خطای رخ داده در یک ناحیه باعث قطعی در ناحیه دیگر نمی‌شود و بریکرها دارای قابلیت اطمینان کامل هستند.

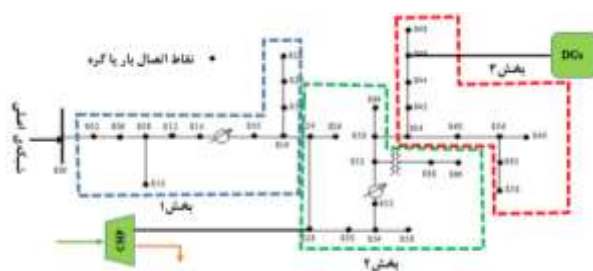
ظرفیت شارژ خودرو باشد که در صورت دشارژ، حداکثر تا حداقل شارژ مورد نیاز می‌تواند دشارژ شود که در ایستگاه بعدی حتماً باید شارژ شود و اگر در ایستگاه فعلی شارژ شود، این امکان وجود دارد که با توجه به شرایط موجود در ایستگاه بعد بتواند به شبکه تخلیه شود. حال، اگر  $acd1 > acd2$  بهتر است شارژ خودرو در شبکه تخلیه شود و اگر  $acd1 < acd2$  بهتر است که خودرو شارژ شود و در صورت مساوی بودن هم بهتر است خودرو تحت شارژ یا دشارژ قرار نگیرد. درخور یادآوری است که زمان شارژ یا دشارژ خودروها بیش از یک ساعت نیست؛ زیرا بازه‌های برنامه‌ریزی به صورت ساعتی است. در نهایت، مجموع ساعت‌های شارژ و دشارژ در شبکه و میزان شارژ هر خودرو در تمام بازه‌ها محاسبه می‌شود. همچنین، احتمال شارژ و دشارژ در هر بخش شبکه نیز برای هر خودرو به دست می‌آید؛ و در حالتی که از خودروی الکتریکی استفاده می‌شود باید برای به دست آوردن میزان شارژ و دشارژ هر خودرو در هر بازه، تمام احتمالات در آن دخیل شوند. زمان شارژ و دشارژ با توجه به اینکه برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودرو در هر ساعت وابسته به ساعت قبل است، بنابراین عامل زمان در این برنامه‌ریزی دخیل است. به عنوان مثال، میزان انرژی ذخیره‌شده در انتهای بازه زمانی دوم با جمع جبری میزان انرژی ذخیره‌شده در انتهای بازه زمانی اول و میزان انرژی مبادله‌شده در بازه زمانی دوم برابر است. بر این اساس، برای محاسبه مدت زمان شارژ و دشارژ ( $tch1$  و  $tdis1$ ) از یک برنامه‌ریزی پویا که مبتنی بر زمان است، استفاده می‌شود. در این برنامه‌ریزی ابتدا تمام سناریوها برای خودروها تعریف می‌شود. بر اساس این سناریوها برنامه‌ریزی سفر خودروها انجام می‌شود. درخور یادآوری است که ممکن است خودروها اقدام به سفر نکنند؛ که در این صورت با خودرو مانند یک باتری رفتار می‌شود. پس از مشخص شدن سناریوها، خودروها بر اساس اهدافی که در ذیل این سناریوها دارند رفتار خواهند کرد. زمان شارژ و دشارژ این خودروها نیز متأثر از اهدافشان متفاوت خواهد بود. درخور یادآوری است که خودروها در هر سناریویی که باشند باید احتمال وقوع آن سناریو و نرخ شارژ و دشارژ و میزان شارژشان در محاسبات منظور شود.

### شاخص‌های قابلیت اطمینان

شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم‌ها شامل عناوین مختلفی از جمله AENS، ENS، SAIDI، SAIFI و...



شکل ۱. حالت متمرکز



شکل ۲. حالت توزیع شده

زمانی محاسبه می‌شود. پس از یافتن برآیند زمان شارژ و دشارژ در یک دوره زمانی خاص، اکنون می‌توان با در نظر گرفتن خطاهای رخ داده در سیستم، میزان تأثیر خودرو در شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم را محاسبه کرد. این خطاها ممکن است در قسمت‌ها و یا تجهیزات مختلفی رخ دهد. با به دست آوردن نرخ خرابی و تعمیر متوسط برای هر بخش می‌توان برای هر بخش یک نرخ خطا و نرخ تعمیر متوسط محاسبه کرد. پس از به دست آوردن نرخ خطا و تعمیر اکنون می‌توان شاخص‌های قابلیت اطمینان را برای کل سیستم محاسبه کرد. روند محاسبات به صورت زیر است: اگر خطا در بخشی که مورد مطالعه است رخ ندهد و در بخش‌های دیگر به گونه‌ای رخ دهد که در توان تحویلی به این بخش اثر داشته و باعث کاهش آن شود. در این صورت این بخش می‌تواند از توان ارسالی بخش‌های متصل دیگر یا توان ذخیره‌شده توسط خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده موجود در بخش مورد مطالعه استفاده کند. حال اگر بار بخش مورد مطالعه از میزان توان تحویلی خودروهای الکتریکی کوچک‌تر یا مساوی باشد مقادیر شاخص‌های قابلیت اطمینان صفر خواهد بود و در غیر این صورت، به میزان توان دریافتی از منابع تولید پراکنده موجود در بخش مورد مطالعه و میزان توان ارسالی از سایر بخش‌های متصل وابسته است. به

### محاسبه شاخص‌های قابلیت اطمینان

پس از اجرای برنامه‌ریزی پویای مسئله به روش بیان‌شده در بخش قبل، با به دست آمدن میزان بهینه شارژ و دشارژ خودرو و احتمال آن در هر ساعت و با در نظر گرفتن میزان توان تخلیه‌شده توسط این منابع در شبکه، اطلاعات بار، توان شبکه در هر ساعت و در نظر گرفتن خطاهای احتمالی، می‌توان در هر ساعت شاخص‌های قابلیت اطمینان شبکه را به دست آورد. خودروهای الکتریکی در ساعات‌های مختلف قابلیت شارژ و دشارژ را (بر اساس برنامه‌ریزی انجام‌شده) خواهند داشت. از این‌رو، در ساعات‌هایی که این خودروها شارژ می‌شوند به بار شبکه می‌افزایند و در زمان‌هایی که توان ذخیره‌شده خود را در شبکه تخلیه می‌کنند می‌توانند قسمتی از بار شبکه را تأمین کنند. بنابراین، رفتار این خودروها در شرایط مختلف متفاوت خواهد بود. راه حل پیشنهادی برای حل مشکل دوگانگی رفتار این خودروها به این صورت است که جمع جبری زمان‌های شارژ و دشارژ به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شود. به گونه‌ای که اگر این متغیر در یک دوره زمانی مثبت شد یعنی خودرو توان به شبکه تزریق کرده است و اگر منفی شد، یعنی شارژ شده است و در غیر این صورت، به شکل خنثی عمل کرده است. با این کار در واقع برآیند زمان شارژ و دشارژ مؤثر ذخیره‌ساز در یک دوره



شکل ۳. مفهوم روابط محاسبه شاخص ENS. رنگ آبی کل بار الکتریکی در هر بازه، رنگ قرمز مقدار بار تأمین‌نشده و رنگ سبز میزان بار تأمین شده

برای محاسبه شاخص متوسط زمان قطعی سیستم (SAIDI)، از رابطه ۲۵ استفاده می‌شود.

$$SAIDI = \sum_{zo=1}^{zo} \sum_{t=1}^{24} \left( \sum_{t_1=t}^{24} \left( \sum_{v=1}^v \left( \frac{1}{24} \right) \times \lambda_i \right) \times (1 - TchDistot_{t_1,zo}) \times Prdischarge_{t_1,be,zo} \times y(1 - TchDistot_{t_1,be,zo}) \times bjbezo_{t_1,be,zo} \times \left( \frac{L_{t_1} - sumpowersent_{t_1}}{L_{t_1}} \right) \times y(L_{t_1} - sumpowersent_{t_1}) \right) + \sum_{t_1=t}^{24} \sum_{t_2=t_1}^{t_1} \left( \left( \frac{1}{24} \right) \times y(NHneed_{t_1,zo,t_2} - njbezo_{be,zo,t_1}) \times \left( \frac{L_{t_1} - sumpowersent_{t_1}}{L_{t_1}} \right) \times y(L_{t_1} - sumpowersent_{t_1}) \right) \times \sum_{i=1}^{NHneed_{t_1,zo,t_1}} \lambda_i \times 1 \right) + \sum_{t=1}^{24} \left( (1 - y(njbezo_{be,zo,t})) \times \sum_{zo=1}^{zo} \sum_{t_1=1}^{24} \left( \frac{1}{24} \right) \times \lambda_i \times r_i \times \left( \frac{L_t - sumpowersent_t}{L_t} \right) \times y(L_t - sumpowersent_t) \right) \quad (25)$$

قسمت اول این رابطه به تأثیر ذخیره‌سازهای الکتریکی بر شاخص متوسط زمان قطعی سیستم دلالت دارد، به گونه‌ای که در هر ساعت میزان تأثیر تخلیه هر خودرو در صورتی که در بخش متأثر از خطای رخ داده شارژ یا دشارژ شود، محاسبه و نتیجه برای همه خودروها جمع می‌شود. طبیعی است که در صورتی که خودرو در این بخش مشارکت نداشت (براساس برنامه سفر که در بخش‌های بعد بیان می‌شود) مقدار متغیر باینری مربوط (یعنی bjbezo) به آن خودرو در بخش مورد نظر و ساعت مورد نظر صفر می‌شود و تأثیری در محاسبات نخواهد داشت. قسمت دوم در واقع مکمل قسمت اول است. این قسمت بیان می‌کند که اگر خودروها در بخش مورد نظر و در یک ساعت خاص حضور داشته باشند، آن‌گاه تعداد کل خودروهایی که مورد نیاز است تا کل بار تأمین شود چقدر است؛ و اگر تعداد ذخیره‌سازهای مورد نیاز برای تأمین بار کمتر از تعداد ذخیره‌ساز مشارکت‌کننده در بخش مد نظر بود، آن‌گاه این بخش نیز فعال می‌شود و به تعداد کمبود ذخیره‌ساز در محاسبه شاخص متوسط زمان قطعی سیستم اثر داده می‌شود و در غیر این صورت، این قسمت تأثیری در محاسبات ندارد. قسمت سوم نیز به عدم مشارکت خودروها

صورت کلی، برای محاسبات در این حالت می‌توان از روابط ۲۰ و ۲۱ استفاده کرد؛ که در این روابط بازه‌های زمانی به شکل یک‌ساعته در نظر گرفته شده است.

$$ENSEffec = t \sum_{i=1}^i \sum_{zo=1}^{zo} \sum_{t=1}^{24} \sum_{t_1=t}^{t_1} \left( \frac{1}{24} \right) \times \lambda_i \times (1 - TchDistot_{t_1,zo}) \times r_{dis} \times y(1 - TchDistot_{t_1,zo}) \times Prdischarge_{tot_{t_1,zo}} \quad (21)$$

$$y(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

رابطه ۲۱ به ازای خطاهای مختلف اقدام به محاسبه اثر خودروهای الکتریکی در تأمین بار الکتریکی می‌کند. این رابطه بیانگر میزان تخلیه توان خودروی الکتریکی در هر بازه زمانی است. به ازای هر خطایی که رخ می‌دهد، احتمال رخداد و مدت زمان تعمیر محل خطای رخ داده در میزان تأثیر خودروهای الکتریکی اثر داده می‌شود. زمان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی نیز از برنامه بهینه‌سازی هزینه‌های خودروهای الکتریکی به دست می‌آید که در بخش‌های بعد نحوه محاسبه آن بیان می‌شود. حضور  $y(x)$  نشان می‌دهد اگر زمان تخلیه خودروهای الکتریکی بزرگ‌تر یا مساوی یک باشد، مقدار شاخص محاسبه‌شده صفر می‌شود و در غیر این صورت، شاخص مقداری غیر از صفر خواهد داشت. از طرفی، به جز خودروهای الکتریکی ممکن است که بخش مورد نظر از توان شبکه و یا منابع تولید پراکنده نیز بتواند استفاده کند؛ که در این صورت میزان تأثیر این منابع در شاخص ENS را نیز باید مطابق روابط ۲۳ و ۲۴ محاسبه کرد.

$$ENSI = \sum_{i=1}^i \sum_{zo=1}^{zo} \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{1}{24} \right) \times \lambda_i \times r_i \times (L_t - adis_{zo,t} - sumpowersent_t) \times y(L_t - adis_{zo,t} - sumpowersent_t) \quad (23)$$

$$ENS = ENSeffec + ENSI \quad (24)$$

با توجه به شکل ۳، با تقسیم منابع الکتریکی به دو دسته خودروها و منابع دریافتی از شبکه، در صورتی که بار الکتریکی از مجموع توان‌های تولیدی بیشتر باشد، شاخص ENS برابر قسمت‌های قرمز رنگ خواهد بود و در صورتی که بار الکتریکی کمتر یا مساوی هر کدام از دسته‌ها بود مقادیر بخش‌های قرمز رنگ صفر خواهد شد.

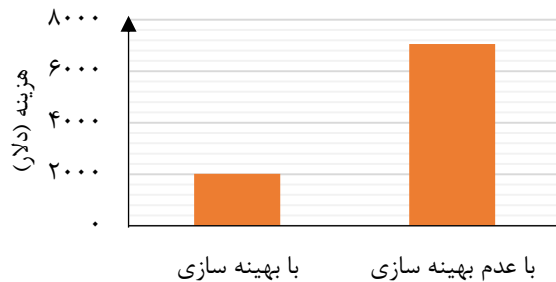
هادی و همکاران: بهره‌برداری از خودروهای الکتریکی به عنوان ذخیره‌ساز انرژی با رویکرد ...

الکتریکی و حرارتی با استفاده از الگوریتم پیشنهادی هزینه‌های صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی (خودرو و باتری) در دو حالت بهینه‌سازی و عدم بهینه‌سازی انجام شده است. همچنین، نتایج دو استراتژی حالت متمرکز و توزیع‌شده برای شاخص قابلیت اطمینان سیستم توزیع انجام شده است. در صورت استفاده از رویکرد بهینه‌سازی هزینه‌های صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی، این هزینه کاهش می‌یابد. این امر را می‌توان با استفاده از شکل ۴ به طور واضح درک کرد.

در زمان‌هایی خاص می‌پردازد. اگر خطا در بخش‌هایی رخ دهد که بر بخش مورد مطالعه تأثیری نداشته باشد، مقدار شاخص‌ها صفر خواهد بود. اگر خطا در بخش مورد مطالعه رخ دهد، جهت تعمیرات بخش مورد نظر، اتصال بخش مورد نظر از شبکه قطع می‌شود و بخش قادر به تأمین بار خود نیست.

### نتایج شبیه‌سازی

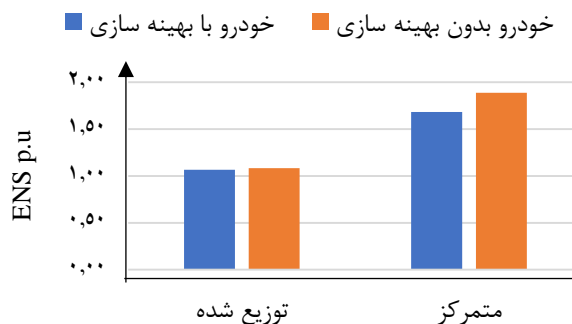
در این بخش پس از شبیه‌سازی رفتار خودروها، ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی، منابع تولید انرژی



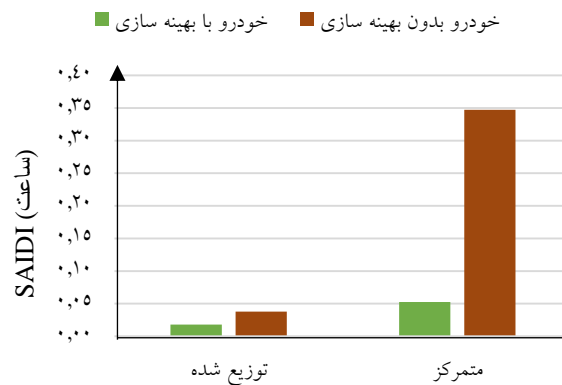
شکل ۴. مقایسه هزینه صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی

ذخیره‌سازهای الکتریکی (هم خودرو و هم باتری) مبادله می‌شود. در شکل ۶ شاخص SAIDI برای سیستم الکتریکی در دو استراتژی متمرکز و توزیع‌شده برای حالت‌های استفاده از خودروی الکتریکی محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار این شاخص نیز مانند شاخص ENS در استراتژی توزیع‌شده در تمام حالت‌های نسبت به مقادیر متناظر در سیستم متمرکز کمتر است و این نشان می‌دهد در صورت استفاده از سیستم به صورت توزیع‌شده میزان متوسط قطعی سیستم از نظر بار کاهش می‌یابد.

در شکل ۵ شاخص ENS (به پروبیت) برای سیستم الکتریکی در دو استراتژی سیستم متمرکز و توزیع‌شده، برای حالت‌های استفاده از خودروی الکتریکی، محاسبه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار این شاخص در استراتژی توزیع‌شده در تمام حالت‌ها نسبت به مقادیر متناظر در سیستم متمرکز کمتر است. این امر نشان می‌دهد در صورت استفاده از سیستم به صورت توزیع‌شده میزان تأمین بار افزایش می‌یابد. یکی از دلایل کمتر بودن اختلاف بین میله‌ها در حالت توزیع‌شده نسبت به متمرکز این است که در حالت توزیع‌شده بیشتر منابع تولیدی، مصرف می‌شود. لذا انرژی کمتری با



شکل ۵. شاخص ENS برای سیستم الکتریکی در دو استراتژی متمرکز و توزیع‌شده



شکل ۶. شاخص SAIDI برای سیستم الکتریکی در دو استراتژی سیستم متمرکز و توزیع شده

مطالعه در راستای کم شدن میزان انرژی تأمین نشده توسط سیستم است. همچنین، شاخص SAIDI سیستم که بیانگر میزان قطعی و خاموشی سیستم است در دو استراتژی متمرکز و توزیع شده هاب انرژی با بهینه سازی هزینه صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی تا حداکثر ۸۵ درصد کاهش می‌یابد.

#### منابع

- [1]. M. Geidl, "Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems." ETH Zurich, 2007.
- [2]. M. Mohammadi, Y. Noorollahi, B. Mohammadi-Ivatloo, and H. Yousefi, "Energy hub: from a model to a concept—a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, pp. 1512–1527, 2017.
- [3]. Z. Zeng, T. Ding, Y. Xu, Y. Yang, and Z. Dong, "Reliability evaluation for integrated power-gas systems with power-to-gas and gas storages," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 571–583, 2019.
- [4]. M. Rahmani-Andebili, M. F. Firuzabad, and M. Moeini-Agtaie, "Optimal incentive plans for plug-in electric vehicles," in *Electric distribution network planning*, Springer, 2018, pp. 299–320.
- [5]. Pouladi J, Bannae Sharifian MB, Soleymani S. Probabilistic Modeling of Aggregated Electric Vehicle Charging Demand in Residential Distribution Network. *TABRIZ J Electr Eng* 2018;47:1357–69.
- [6]. Y. Noorollahi, A. Aligholian, and A. Golshanfard, "Stochastic energy modeling with consideration of electrical vehicles and renewable energy resources—A review," *J. energy Manag. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–26, 2020.

#### نتیجه‌گیری

امروزه با توجه به اهمیت مدیریت اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم‌های انرژی، مفهوم هاب انرژی گسترش پیدا کرده است. در این راستا، کنترل سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان در این سیستم‌ها و همچنین مدیریت بهینه واحدهای ذخیره‌ساز انرژی برای بهبود کیفیت خدمات توان، از موارد مهمی تلقی می‌شود. این مقاله با اتخاذ رویکرد تحلیلی و بر اساس شبیه‌سازی هاب انرژی، به شبیه‌سازی سیستم‌های متمرکز و توزیع شده چندحاملی انرژی می‌پردازد؛ و در این راستا با بهره‌وری از روش‌های بهینه‌سازی پویا به کمینه کردن هزینه صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی (شامل خودروی الکتریکی و باتری) می‌پردازد؛ که نتایج بدست‌آمده نشان از بهبود عملکرد سیستم انرژی در حضور ذخیره‌سازها داشته‌است. همچنین نشان داده‌شد که در سیستم‌های الکتریکی استراتژی توزیع شده بسیار کارآمدتر از استراتژی متمرکز است و حضور باتری‌ها تأثیر بیشتری نسبت به حضور منفرد خودروهای الکتریکی در بهبود شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم دارند. از طرفی چارچوب پیشنهادی این مقاله در برطرف کردن چالش پیچیدگی احتمالات خرابی‌ها و در دسترس‌پذیری واحدها را برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم، کارا است. با استفاده از این چارچوب، شاخص ENS برای سیستم الکتریکی در دو استراتژی متمرکز و توزیع شده هاب انرژی با بهینه سازی هزینه صاحبان ذخیره‌سازهای الکتریکی تا حداکثر ۱۱٪ کاهش می‌یابد؛ که خود بیانگر کارایی چارچوب مورد



- [7]. S. Pirehbabi, A. Mosayyebi, and M. Zandi, "Development scenarios for electric vehicles in Iran with Dynamic System method," *J. Sustain. Energy Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–17, 2022.
- [8]. A. M. Pariyarath, "Probabilistic evaluation of distribution network reliability in the presence of renewable energy sources, energy storage and electric vehicles," 2021.
- [9]. R. Billington and R. N. Allan, "Reliability evaluation of power systems," 1984.
- [10]. Y. Huang and G. Li, "Reliability evaluation of distributed integrated energy systems via Markov chain Monte Carlo," in 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017, pp. 1–5.
- [11]. W. Huang et al., "Reliability and Vulnerability Assessment of Multi-Energy Systems: An Energy Hub Based Method," *IEEE Trans. Power Syst.*, 2021.
- [12]. O. A. Ansari, C. Y. Chung, and E. Zio, "A Novel Framework for the Operational Reliability Evaluation of Integrated Electric Power-Gas Networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, 2021.
- [13]. C. M. Correa-Posada and P. Sanchez-Martin, "Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3347–3355, 2014.
- [14]. N. Z. Xu and C. Y. Chung, "Reliability evaluation of distribution systems including vehicle-to-home and vehicle-to-grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 759–768, 2015.
- [15]. Q. Zhang, Y. Zhu, Z. Wang, Y. Su, and C. Li, "Reliability assessment of distribution network and electric vehicle considering quasi-dynamic traffic flow and vehicle-to-grid," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 131201–131213, 2019.
- [16]. X. Zhang, L. Che, M. Shahidehpour, A. S. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Reliability-based optimal planning of electricity and natural gas interconnections for multiple energy hubs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1658–1667, 2015.
- [17]. Y. Noorollahi, A. Golshanfard, A. Aligholian, B. Mohammadi-ivatloo, S. Nielsen, and A. Hajinezhad, "Sustainable energy system planning for an industrial zone by integrating electric vehicles as energy storage," *J. Energy Storage*, vol. 30, p. 101553, 2020.
- [18]. S. Hougardy, "The Floyd–Warshall algorithm on graphs with negative cycles," *Inf. Process. Lett.*, vol. 110, no. 8–9, pp. 279–281, 2010.
- [19]. I. Highlights, "NHTS Program Updates," pp. 1–4, 2021.
- [20]. J. Estakhr, M. Simab, and T. Niknam, "Security Analysis of Hybrid Multi-Carrier Energy Systems," *Sustainability*, vol. 13, no. 6, p. 3102, 2021.