

Modeling the random behavior of self-driving cars to exchange electrical energy in an independent microgrid with the aim of supplying power to telecommunications stations

Reza Bahri*, Saeed Zeynali**

*Faculty member, ICT Research Institute, Tehran, Iran

**Ms.C. in Electrical engineering, Power Branch, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

The cellular base stations are communication devices that ensure the connection in the world. Nevertheless, they are usually installed in remote places. This paper, studied the energy procurement of a cellular base stations in an independent microgrid with a hydrogen-based energy storage system, photovoltaic (PV) system, electric vehicles and a diesel generator. A new mixed-integer nonlinear programming model was used to deal with nonlinearities of the system components. The paper studied different uncertainties, such as the connection rate in cellular base stations, the driver of the electric vehicle, and PV generation, using stochastic programming method. The potency of the proposed method was studied in different case studies. The results prove that smart electric vehicle chargers reduce the risks and also cost/emission objective functions. The usage of this model can reduce the emissions as much as 18.60%.

Keywords: Telecommunication station, self-driving car, independent microgrid, electric power supply, greenhouse gases

مدلسازی رفتار تصادفی خودروهای خودران برای تبادل انرژی الکتریکی در ریزشبکه مستقل با هدف تامین توان ایستگاه‌های مخابراتی

رضا بحری*، سعید زینالی**

* عضو هیات علمی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، تهران، ایران

** کارشناسی ارشد مهندسی برق، گرایش قدرت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

ظهور فناوری های نوین ارتباطی نظیر نسل پنجم ارتباطی و ارائه خدماتی نظیر ارتباطات با تاخیر بسیار کم و قابلیت اطمینان بالا، باعث شده است تا کاربردهایی نظیر خودروهای خودران بسیار بیشتر از قبل مورد توجه قرار گرفته و امکان پذیرتر به نظر برسند. از جمله قابلیت های مهم این نوع خودروها، توانمندی آنها در تبادل انرژی الکتریکی با شبکه های تولید و توزیع توان الکتریکی V2G است. از طرفی برای حل مشکل تامین توان الکتریکی برای ایستگاه های مخابراتی در مناطق دورافتاده، صعب العبور، موضوع تبادل انرژی خودروهای الکتریکی در ریزشبکه های محلی پیشنهاد شده است. در این پیشنهاد با در نظر گرفتن یک ریز شبکه محلی، مدلسازی رفتار تصادفی خودروهای خودران برای تبادل انرژی الکتریکی در ریزشبکه محلی با هدف تامین توان دکل های مخابراتی انجام شده است. ریز شبکه پیشنهادی، شامل ژنراتور دیزلی، سیستم فتوولتائیک و منبع ذخیره هیدروژنی بوده و امکان تبادل انرژی ریز شبکه با خودرو متصل شده به ریز شبکه، مدل سازی و تحلیل شده است. مدل تحلیلی ارائه شده مبتنی بر برنامه ریزی غیرخطی مختلط با اعداد صحیح است که ماهیت غیرخطی المان ها را مدل سازی می کند. در قالب بهینه سازی چندهدفه، بجز هزینه، تولید گازهای گلخانه ای نیز از اهداف مسئله بوده و تعادلی بین این دو هدف متناقض در جبهه پارتو ایجاد شده است. نتایج نشان می دهد که شارژ و دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی، سهم چشمگیری در کاهش ریسک عملیاتی ریز شبکه، هزینه ی کل و گازهای گلخانه ای دارد. روش پیشنهادی منجر به ۱۸/۶۰٪ کاهش در مقدار گازهای گلخانه ای می شود.

واژگان کلیدی: ایستگاه مخابراتی، خودروی خودران، ریزشبکه مستقل، تامین توان الکتریکی، گازهای گلخانه ای

*نویسنده مسئول: رضا بحری reza.bahri@itrc.ac.ir

۱. مقدمه

این خودروها می‌تواند به افزایش بازده تولیدات پراکنده تجدیدپذیر کمک کرده و نقش کمی در تامین انرژی دکل‌های مخابراتی ایفا کند. با این حال، استفاده مکرر از باتری خودروهای الکتریکی موجب تخریب آنها در بلندمدت خواهد شد، که باید در مدل‌سازی در نظر گرفته شود [۷].

ایجاد یک برنامه‌ریزی و فرمولاسیون ریاضی جهت تامین انرژی بهینه در چنین ریزشبکه‌ای اهمیت زیادی دارد. یکی از مشکلات اصلی موجود، عدم قطعیت در تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و بار مصرفی می‌باشد. در این راستا، استفاده از روش‌های پیش‌بینی جدید، می‌تواند تاثیر خوبی در پیش‌بینی دقیق و کاهش هزینه داشته باشد. علاوه بر این، خودروهای الکتریکی عدم قطعیت‌های جدیدی مانند زمان رسیدن به خانه، زمانه خروج از خانه و مسافت روزانه طی شده، را به سیستم تحمیل می‌کند.

به این دلیل، استفاده از روش‌های مختلف تصادفی و احتمالاتی اهمیت زیادی دارد. مشکل مهم دیگری که باید مورد بررسی قرار گیرد، وجود اهداف مختلف و متناقض در مسئله تامین انرژی می‌باشد. به عنوان مثال، کمینه کردن هزینه و کمینه کردن انتشار گازهای گلخانه‌ای دو هدف متناقض با واحد‌های اندازه‌گیری متفاوت می‌باشند، که باید تحت روش‌های برنامه‌ریزی چند هدفه مورد بررسی قرار گیرند [۸].

۲- پیشینه پژوهش

تحقیقات زیادی در مورد تامین بهینه انرژی دکل‌های مخابراتی انجام شده و نتایج مهمی گزارش شده است. در جدول ۱ مقایسه کلی با تحقیقات پیشین و طرح پیشنهادی این پژوهش انجام شده است.

بدون شک افزایش روز افزون نفوذ فناوری اطلاعات و ارتباطات منجر به افزایش تقاضای توان الکتریکی می‌شود. برآوردهای انجام شده نشان می‌دهد که تجهیزات مخابراتی بالغ بر ۳٪ مصرف کل توان الکتریکی را شامل می‌شود، که نزدیک به ۱۷۰۰ تراوات ساعت انرژی تا سال ۲۰۳۰ خواهد شد [۱]. در سیستم‌های تولید انرژی منسوخ شده، کل انرژی تولیدی توسط نیروگاه‌ها بصورت یکپارچه تولید شده که منجر به هزینه‌ی بالای انتقال انرژی، تعمیر و نگهداری می‌شود [۲]. امروزه، با توجه به افزایش مشکلات زیست محیطی و مزایای آشکار تولیدات پراکنده تجدیدپذیر، مانند توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی، مرسوم شده است، که نه تنها هزینه‌های انتقال را کاهش داده، بلکه پوشش ارتباطی در مناطق دور افتاده و صعب‌العبور را نیز امکان‌پذیر می‌کند [۳]. در این مناطق معمولاً انرژی در ریزشبکه‌های صعب‌العبور مجزا از شبکه سراسری تولید و مصرف می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به ناپایداری تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، استفاده از منابع ذخیره انرژی ضروری می‌باشد. از این نظر، منابع ذخیره هیدروژنی (H_2) در سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته و مزایا متعددی نسبت به باتری‌های مرسوم گزارش شده است [۴].

علاوه بر این، در آینده، خودروهای هوشمند (خودران و متصل) که الکتریکی هم هستند، به عنوان روش حمل و نقل پاک، در هر شبکه الکتریکی حضور خواهند داشت. برقی‌سازی سامانه‌های حمل و نقل از جمله راهکارهای امیدبخش جهت مقابله با بحران‌های زیست محیطی کنونی است [۵]. با توجه به اینکه خودروها در ۹۰٪ طول عمر در حالت پارک شده می‌باشند، استفاده از باتری الکتریکی این خودروها در قالب ($V2G^2$) مطرح شده است [۶]. استفاده از باتری

جدول ۱. مروری بر پیشینه تحقیق

مرجع	برنامه‌ریزی	خودرو برقی	منبع ذخیره هیدروژنی	عدم قطعیت‌ها	چند هدفه	محیط شبیه‌سازی
[۹]	LP	×	×	-	×	Homer
[۱۰]	LP	×	×	مونت کارلو	×	Matlab
[۱۱]	MILP	×	×	-	×	-
[۱۲]	LP	×	×	-	×	Homer
[۱۳]	LP	×	×	-	×	Homer
[۱۴]	-	×	×	-	×	Matlab
[۱۵]	MILP	×	×	-	×	-

² Vehicle to Grid¹ Hydrogen energy storage

-	x	تصادفی	x	x	MILP	[۱۶]
-	x	-	x	x	LP	[۱۷]
Real-world testing	x	-	✓	x	-	[۱۸]
Matlab/Homer	x	-	x	x	LP	[۱۹]
Matlab	x	-	x	✓	MINLP	[۲۰]
Matlab	x	-	x	✓	MILP	[۲۱]
Genetic algorithm	✓	-	x	✓	MINLP	[۲۲]
Matlab	x	-	✓	✓	MILP	[۲۳]
GAMS	x	تصادفی	x	x	MILP	[۲۴]
Matlab	x	-	x	✓	MILP	[۲۵]
GAMS	x	2PEM	x	✓	MINLP	[۲۶]
PSO	✓	(2+1)PEM	x	✓	MINLP	[۲۷]
GAMS	x	تصادفی	x	✓	MILP	[۲۸]
Matlab	x	پویا	x	✓	MILP	[۲۹]
Matlab	x	-	x	x	MINLP	[۳۰]
GAMS	✓	تصادفی	✓	✓	MISOCP	این مقاله

۳- اهداف و دستاوردهای پژوهشی مورد انتظار

- مجموعه فعالیت‌های انجام شده در جدول ۱، دستاوردهای قابل توجهی در زمینه‌های مختلف مربوط به ریزشبکه‌ها و تامین توان دکل‌های مخابراتی داشته‌اند. با این حال، در مراجع کنونی کاستی‌های قابل توجهی وجود دارد، که می‌توان به صورت ذیل خلاصه کرد:
 - مراجعی نظیر [۹]-[۱۳]، از روش‌های برنامه‌ریزی خطی یا مختلط عدد صحیح خطی جهت مدل‌سازی مسئله تامین توان استفاده کرده‌اند. این روش‌ها، با ساده‌سازی‌ها و پیش‌فرض‌های خطی مسئله را توصیف می‌کنند که دور از واقعیت می‌باشد [۳۱]. در مقابل، روش‌های غیرخطی دارای بار محاسباتی بالایی بوده و در مقیاس بزرگ، حل آنها با احتمال امکان ناپذیر بودن^۱، یا غیرقابل رهگیری بودن^۲، همراه می‌باشد.
 - نرم‌افزار هومر (Homer) استفاده شده در مراجع [۹]، [۱۳] و [۱۹] دارای مدل‌های پیش‌فرض می‌باشد و تغییر این مدل جهت اضافه کردن المان‌های مختلف ممکن نمی‌باشد. علاوه بر این اضافه کردن روش‌های مقابله با عدم قطعیت در این نرم‌افزار ممکن نمی‌باشد.
- روش‌های بهینه‌سازی مینی بر الگوریتم‌های کنترل که در مراجع [۱۴] و [۱۸] استفاده شده است، به علت دقت پایین منسوخ شده است. در حالی که روش‌های تکاملی نظیر الگوریتم ژنتیک و الگوریتم تجمع ذرات، دارای بار محاسباتی بالا بوده و در حضور قید و متغیرهای تصمیم زیاد کارا نمی‌باشد. همچنین این الگوریتم‌ها تنها یک جواب بهینه محلی^۳ داده و قادر به تولید جواب‌های بهینه عام^۴ نمی‌باشند.
- مطالعاتی مانند [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴] عدم قطعیت‌های مختلف در پارامترهای ورودی را نادیده گرفته‌اند. علاوه بر این، اغلب مطالعات مانند [۱۰]، [۱۶]، [۲۴] و [۲۸]، از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی برای مقابله با عدم قطعیت‌ها استفاده کرده‌اند. علاوه بر این، روش بهینه‌سازی پویا در مطالعاتی مانند [۲۹]، استفاده شده است.
- اغلب مطالعات به صورت تک‌هدفه و مبتنی بر هزینه مدل‌سازی شده‌اند. در حالی که، مطالعات [۲۲] و [۲۷] تنها مراجعی موجود در زمینه بهینه‌سازی چندهدفه می‌باشند، که علاوه بر هزینه، کاهش گازهای گلخانه‌ای نیز، جزئی از مسئله می‌باشد. با این حال، این مراجع از روش جمع وزن بندی شده

³ Locally optimal

⁴ Globally optimal

¹ Infeasible

² Intractable

شده است، چراکه این پارامترها مربوط به الگوهای رفتاری فردی بوده و توابع توزیع احتمالی مشخص پیروی می‌کنند. علاوه بر این، با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، تابع آلودگی نیز در مسئله قرار داده شد تا علاوه بر هزینه، گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته از ریزشبکه نیز کاهش داده شود. بدین ترتیب سناریو-های پارامترهای تصادفی مانند ترافیک مخابراتی و بار الکتریکی مصرفی در ریزشبکه توسط توابع توزیع احتمالی تولید شده و علاوه بر این، با استفاده از روش بهینه‌سازی چندهدفه، تابع آلودگی نیز در مسئله قرار داده شد تا علاوه بر هزینه، گازهای گلخانه‌ای انتشار یافته از ریزشبکه نیز کاهش داده شود. در این جهت، ابتدا جبهه پارتو مسئله چندهدفه به دست آورده شده است، سپس با استفاده از روش رضایت فازی، بهترین تعادل بین هزینه و آلودگی ایجاد شده است. تاثیر شارژ کنترل نشده، و شارژ هوشمند خودروهای الکتریکی و روش‌های استفاده شده در سه سناریو مورد بررسی قرار گرفت.

۴- ارائه مدل تحلیلی

در این قسمت از مقاله، شرح روابط تحلیل مسئله تامین توان در ریزشبکه مجزا ارائه شده است. همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، مسئله مورد نظر یک برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با اعداد صحیح است. مجموعه پارامترهای غیرقطعی مسئله عبارتند از مسافت روزانه طی شده خودروهای الکتریکی، زمان رسیدن خودروها به ایستگاه شارژ، زمان خروج خودروها از ایستگاه شارژ، نرخ ترافیک ارتباطی در دکل‌های مخابراتی و بار الکتریکی مجموعه مسکونی می‌باشد. در این پژوهش این دسته از پارامترهای غیرقطعی توسط سناریوهای تصادفی (SP) مدل سازی شده‌اند از توزیع احتمالی متغیرهای تصادفی تولید به دست آمده است [۳۴]. در ادامه هر کدام از بخش-های شکل ۱، به تفکیک مدل‌سازی تحلیلی می‌شوند.

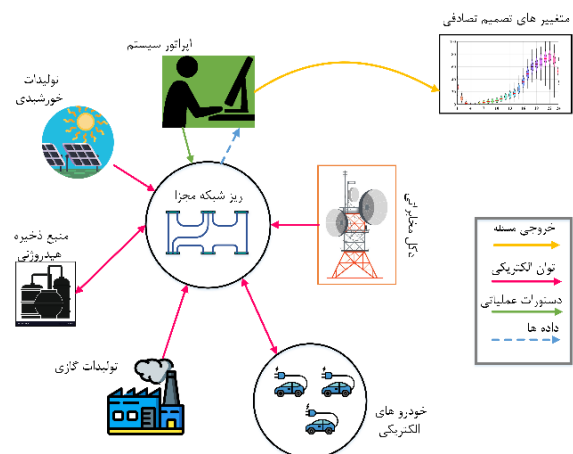
۴-۱ مدل تحلیلی ایستگاه مخابرات سلولی

توان مصرفی ایستگاه مخابرات سلولی شامل دو پروفایل مصرف بار ثابت و بار متغیر است. پروفایل بار متغیر، یک بار غیرقطعی می‌باشد که میزان آن وابسته به نرخ ترافیک ارتباطی در دکل مخابراتی است. عبارت دیگر تعداد مشترکین متصل شده به دکل‌های مخابراتی می‌باشد و توسط رابطه (۱) بیان شده است. در این معادله، پارامتر $K_{s,t}$ نماینده نرخ نرمالیزه شده ترافیک ارتباطی دکل مخابراتی است که توسط رابطه (۲) بیان شده است.

$$p_{s,t}^{VBS} = N^{TRX} \left(p^0 + \Delta^{BS} \overline{p^{BS}} K_{s,t} \right), 0 \leq K_{s,t} \leq 1 \quad \forall s, t \quad (1)$$

استفاده کرده و به تعادل بین این دو هدف اهمیت داده نشده است.

- خودروی هوشمند الکتریکی بخش مهمی از شبکه‌های آینده خواهد بود. بهره مندی از قابلیت تبادل انرژی این سامانه‌ها جهت تامین توان دکل‌های مخابراتی، مورد بررسی قرار نگرفته است.
- منبع ذخیره هیدروژنی تنها در مراجع محدودی مانند [۱۸] و [۲۳] استفاده شده است، که مدل پیشنهادی عدم قطعیت‌های مختلف و ماهیت غیرخطی سیستم پیل سوختی را در نظر نگرفته است.
- جهت پوشش این شکاف‌ها، این مقاله، تامین انرژی بهینه ایستگاه-های مخابراتی در یک ریزشبکه مجزا را مورد بررسی قرار داده است. ساختار و چیدمان کلی المان‌های این ریزشبکه در شکل ۱ ارائه شده است. ریزشبکه تحت بررسی شامل یک دکل مخابراتی، سیستم فتوولتائیک، منبع ذخیره هیدروژنی، و سه خودرو برقی می‌باشد، که تحت واحد مدیریت انرژی^۱ کنترل می‌شوند.



شکل ۱. نمای کلی ریز شبکه بررسی شده در مقاله

کنترل بهینه این المان به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط با اعداد صحیح مدلسازی شده و در نرم‌افزار (GAMS) حل شده است، که نه تنها بار محاسباتی پایین داشته، بلکه ماهیت غیرخطی مسئله را هم در بر می‌گیرد [۳۲]. علاوه بر این، جهت مقابله به عدم قطعیت‌های مختلف در پارامترهای سیستم، از روش برنامه‌ریزی تصادفی استفاده شده است [۳۳]. روش برنامه‌ریزی تصادفی، عدم قطعیت‌ها را در قالب سناریوهای تصادفی مدل‌سازی می‌کند. جهت مقابله با پارامترهای غیرقطعی، مانند مسافت روزانه طی شده توسط خودروهای الکتریکی، زمان رسیدن خودروها، زمان خروج خودروها، ترافیک مخابراتی، تولید انرژی خورشیدی و بار الکتریکی مصرفی در ریزشبکه، از روش برنامه‌ریزی تصادفی استفاده

¹ Energy management unit (EMU)

Q_t^S : پارامتر تقاضای توان خنک‌کاری ناشی از تابش تشعشعات خورشیدی (kW).

K^{EN} : پارامتر مقاومت انتقال حرارت کابین تجهیزات دکل مخابراتی،

F^{EN} : پارامتر سطح مقطع داخل کابین دکل مخابراتی (m^2).

T_t^{Amb} : پارامتر دمای محیط اطراف دکل مخابراتی (C^0).

T^{Set} : پارامتر دمای مورد انتظار داخل کابین دکل مخابراتی،

G^{air} : پارامتر حجم هوای نشتی از کابین دکل مخابراتی ($m^3/hour$).

ρ^{air} : پارامتر چگالی هوای نشتی از کابین دکل مخابراتی،

C^{air} : پارامتر ظرفیت گرمایی ویژه هوا (kWh/m^3).

e^{EN} : پارامتر نرخ جذب انرژی حرارتی کابین دکل مخابراتی،

q_t^{rad} : پارامتر انرژی تشعشعات خورشیدی بر سطح خارجی کابین دکل مخابراتی (kW/m^2).

α^W : پارامتر ضریب انتقال حرارت کابین دکل مخابراتی،

$\Delta p^{fan}, \eta^{fan}$: پارامتر میزان افزایش فشار و بازده عملیاتی فن در کابین دکل

p^{fan} : پارامتر توان مصرفی فن در کابین دکل مخابراتی (kW).

۲-۴ خودروهای الکتریکی

در این مقاله، مدل تحلیلی مربوط به خودروهای الکتریکی از [۳۶] برگرفته شده است. هر خودرو الکتریکی با مجموعه‌ای از پارامترهای تصادفی توصیف می‌شود که مبتنی بر الگوهای رفتاری غیرقطعی راننده خودرو است [۳۶]. سطح شارژ باتری خودروهای الکتریکی در هر پله زمانی و پله زمانی اولیه، توسط روابط (۹) - (۱۰) بیان شده است. سطح شارژ خودروهای الکتریکی در آخرین لحظه قبل از ورود به ایستگاه شارژ توسط رابطه (۱۱) بیان شده است. همانطور که دیده می‌شود، سطح شارژ خودرو در زمان ورود به ایستگاه شارژ، تابعی از مسافت روزانه طی شده و میزان مصرف انرژی میانگین خودرو در هر مایل است. میزان شارژ نهایی خودروهای الکتریکی هنگام خروج از ایستگاه شارژ توسط رابطه (۱۲) بیان شده است، که مقدار کمینه بین مقدار حداکثر شارژ امکانپذیر - میزان شارژی که توسط شارژ بی وقفه به دست می‌آید - و میزان شارژ مدنظر است. علاوه بر این، محدوده سطح شارژ باتری و توان شارژ/دشارژ توسط روابط (۱۳) - (۱۵) اعمال شده است. جهت جلوگیری از شارژ و دشارژ همزمان باتری خودروهای الکتریکی، رابطه (۱۶) به صورت جبر بولی اعمال شده است. عمق سیکل شارژ و تابع تخریب عمق سیکل شارژ باری باتری خودروهای الکتریکی توسط روابط (۱۷) - (۱۸) توصیف شده است. علاوه بر این، رابطه (۱۹) میزان واحد هزینه تخریب باتری خودروهای الکتریکی را نشان می‌دهد. در نهایت، هزینه تخریب سیکلی و کلی باتری الکتریکی توسط رابطه (۲۰) اعمال شده است [۳۷].

$$K_{s,t} = \frac{N_{s,t}}{N^{Max}} \quad \forall s, t \quad (2)$$

t : اندیس زمان،

s : اندیس سناریوهای تصادفی،

$p_{s,t}^{VBS}$: پارامتر توان مصرفی متغیر دکل مخابراتی (kW).

N^{TRX} : پارامتر تعداد دریافت‌کننده‌های دکل مخابراتی،

P^O : پارامتر توان مصرفی قابل دریافت‌کننده‌های دکل مخابراتی،

Δ^{BS} : پارامتر ضریب ثابت توان دکل مخابراتی،

$\overline{P^{BS}}$: پارامتر ماکزیمم مصرف الکتریکی دکل مخابراتی (kW).

$K_{s,t}$: پارامتر نرخ ترافیک استاندارد شده دکل مخابراتی،

$N_{s,t}$: تعداد مشترکین متصل شده به دکل مخابراتی،

N^{Max} : پارامتر بیشترین تعداد مشترکین متصل شده به دکل مخابراتی.

بار ثابت، مولفه دوم بار دکل‌های مخابراتی است. این نوع از تقاضای الکتریکی از طریق سیستم خنک‌کننده و فن‌های تهویه هوا تحمیل می‌شود. تقاضای الکتریکی سیستم خنک‌کننده تحت بار مشخص، در رابطه (۳) بیان شده است، که در تحت بازدهی عملیاتی مشخص تعریف شده است [۳۰]. تقاضای خنک‌کاری تحمیل شده توسط انتقال حرارتی کابین دکل مخابراتی، توسط رابطه (۵) اعمال شده شده است. در حالی که رابطه (۶) توان خنک‌کاری تحمیل شده توسط نشت هوا به داخل کابین را توصیف می‌کند. سرانجام توان خنک‌کاری تحمیل شده توسط تشعشعات خورشیدی به کابین دکل مخابراتی، در رابطه (۷) بیان شده است [۳۰]. توان الکتریکی مصرفی فن تهویه هوا توسط رابطه (۸) اعمال شده است [۳۵].

$$p_t^{AC} = Q_t^L / \eta_t^{PC} \quad \forall t \quad (3)$$

$$Q_t^L = Q_t^{IT} + Q_t^{EN} + Q_t^A + Q_t^S \quad \forall t \quad (4)$$

$$Q_t^{EN} = K^{EN} F^{EN} (T_t^{Amb} - T^{Set}) \quad \forall t \quad (5)$$

$$Q_t^A = G^{air} \rho^{air} C^{air} (T_t^{Amb} - T^{Set}) \quad \forall t \quad (6)$$

$$Q_t^S = \frac{K^{EN} e^{EN} q_t^{rad} F^{EN}}{\alpha^W} \quad \forall t \quad (7)$$

$$p^{fan} = \frac{G^{fan} \Delta p^{fan}}{3600 \eta^{fan}} \quad (8)$$

در این روابط:

t : اندیس زمان،

p_t^{AC} : پارامتر توان مصرفی تهویه‌کننده هوا (kW).

Q_t^L : پارامتر تقاضای توان خنک‌کاری دکل مخابراتی (kW).

Q_t^{EN} : پارامتر تقاضای توان خنک‌کاری در کابین دکل مخابراتی

(kW).

Q_t^A : پارامتر تقاضای توان خنک‌کاری ناشی از نشتی هوا (kW).

Cr_e : پارامتر نرخ شارژ نامی خودرو الکتریکی (kW)،

a_0 : پارامتر ضریب ثابت تابع تخریب باتری،

BC_e : پارامتر هزینه کلی باتری خودرو الکتریکی (\$)،

$SOC_{e,s,t}$: متغیر تصمیم سطح شارژ خودروهای الکتریکی،

$p_{e,s,t}^{EV+}, p_{e,s,t}^{EV-}$: متغیر تصمیم نرخ توان شارژ/دشارژ خودروهای

الکتریکی،

$\sigma_{e,s,t}$: تابع تخریب باتری خودروهای الکتریکی،

$MD_{e,s,t}$: متغیر تصمیم هزینه جزئی تخریب باتری الکتریکی،

$SOC_{e,s}^{end}$: بیشترین میزان سطح شارژ ممکن در زمان خروج خودرو

(%)،

SOC_e^{des} : سطح شارژ مورد انتظار هنگام خروج خودرو الکتریکی

(%)،

$uc_{e,s,t}, ud_{e,s,t}$: متغیر باینری جهت تبعیض حالات شارژ و دشارژ

در خودروهای الکتریکی.

۳-۴ مدل تحلیلی سیستم فتوولتائیک

باتوجه به رابطه (۲۱)، حداکثر میزان تولید انرژی الکتریکی سیستم فتوولتائیک، به تعداد سلول‌های سری/موازی در پنل خورشیدی، دمای سلول و شدت تشعشعات خورشیدی وابسته است. دمای سلول با توجه به رابطه (۲۲) قابل محاسبه می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود، دمای سلول به شدت تشعشعات خورشیدی و دمای محیط وابسته است. تشعشعات خورشیدی شامل سه مولفه تشعشع است که شامل: تشعشع افقی پراکنده^۱ (DHI)، تشعشع مستقیم^۲ (DNI) و تشعشع افقی کلی^۳ (GHI) خورشید است. در شکل ۲، این سه تشعشع همراه با تشعشع منعکس شده^۴ (RI) نشان داده شده است. رابطه (۲۳)، نسبت این تشعشعات با تشعشع کلی در سطح پنل خورشیدی را نشان می‌دهد [۳۸]. در نهایت حد بالا و پایین متغیر تصمیم‌گیری مربوط به تولید توان خورشیدی در رابطه (۲۴) بیان شده است.

$$\bar{P}_t^{PV} = P_{STC}^{PV} N_S^{PV} N_P^{PV} \frac{I_t}{1000} (1 - \alpha^{pv} (T_t^C - 25)) \quad (21)$$

$$\forall s, \forall t \quad (22)$$

$$T_t^C = T_t^A + \frac{I_t}{800} (NOCT - 20)$$

$$\forall s, \forall t$$

$$SOC_{e,s,t} = SOC_{e,s,t-1} + \frac{\eta_c \cdot p_{e,s,t}^{EV+}}{EB_e} - \frac{p_{e,s,t}^{EV-}}{EB_e \cdot \eta_e} \quad (9)$$

$$\in t \neq TA_e \} \quad (10)$$

$$SOC_{e,s,t} = SOC_{e,s}^{In} + \frac{\eta_c \cdot p_{e,s,t}^{EV+}}{EB_e} - \frac{p_{e,s,t}^{EV-}}{EB_e \cdot \eta_e} \quad (10)$$

$$\in t = TA_e \} \quad (11)$$

$$SOC_{e,s}^{In} = \max \left(SOC_e^{Min}, 1 - \frac{DT_{e,s} \times ECPM_e}{EB_e} \right) \quad (11)$$

$$\forall e, s$$

$$SOC_{e,s,t} = \min(SOC_{e,s}^{end}, SOC_e^{des}) \quad (12)$$

$$\forall e, s, t: \{t | t \in t =$$

$$TD_e \} \quad (12)$$

$$SOC_e^{Min} \leq SOC_{e,s,t} \leq SOC_e^{Max} \quad (13)$$

$$\forall e, s, t$$

$$p_{e,s,t}^{EV+} \leq Cr_e \cdot uc_{e,s,t} \quad (14)$$

$$\forall e, s, t$$

$$p_{e,s,t}^{EV-} \leq Cr_e \cdot ud_{e,s,t} \quad (15)$$

$$\forall e, s, t$$

$$uc_{e,s,t} + ud_{e,s,t} = 1 \quad (16)$$

$$\forall e, s, t$$

$$\sigma_{e,s,t} = \frac{p_{e,s,t}^{EV-}}{EB_e \cdot \eta_e} - \sigma_{e,s,t-1} \quad (17)$$

$$\forall e, s, t$$

$$\psi_{e,s,t}(\sigma_{e,s,t}) = a_0 \cdot (\sigma_{e,s,t})^{2.03} \quad (18)$$

$$\forall e, s, t$$

$$MD_{e,s,t} = BC_e \cdot \frac{\partial \psi_{e,s,t}}{\partial PD_{e,s,t}} = BC_e \cdot \frac{\partial \psi_{e,s,t}}{\partial \sigma_{e,s,t}} \cdot \frac{\sigma_{e,s,t}}{\partial p_{e,s,t}^{EV-}} \quad (19)$$

$$= 2.03 a_0 \cdot \frac{BC_e}{EB_e \cdot \eta_e} \cdot \sigma_{e,s,t}^{1.03}$$

$$\forall e, s, t$$

$$dg_{e,s,t}^{NL} = p_{e,s,t}^{EV-} \cdot MD_{e,s,t} \quad (20)$$

$$\forall e, s, t$$

در این روابط:

t : اندیس زمان،

S : اندیس سناریوهای تصادفی،

η_c, η_e : پارامتر بازده شارژ/دشارژ باتری خودروهای الکتریکی (/)،

EB_e : پارامتر ظرفیت نامی باتری خودروهای الکتریکی (kWh)،

SOC_e^{Min}, SOC_e^{Max} : پارامتر مینیمم/ماکزیمم درصد انرژی

قابل ذخیره در باتری خود الکتریکی (/)،

$SOC_{e,s}^{In}$: پارامتر مقدار شارژ اولیه خود الکتریکی زمان ورود به

ایستگاه (/)،

$ECPM_e$: پارامتر مقدار انرژی مصرفی خودرو الکتریکی در هر مایل

(kW)

³ Global Horizontal Irradiance

⁴ Reflected Irradiance

¹ Diffuse Horizontal Irradiance

² Direct Normal Irradiance

یک منبع ذخیره هیدروژنی شامل کپسول ذخیره سازی، پیل سوختی و الکترولایزر می باشد که در شکل ۳ نشان داده شده است. محدودیت های عملکرد واحد ذخیره سازی هیدروژن در قالب قیود (۳۳)-(۲۵) ارائه شده است [۳۹]. رابطه (۲۵) انرژی ذخیره شده را در واحد ذخیره سازی هیدروژن بیان می کند که به انرژی ذخیره شده در زمان قبلی بستگی دارد. رابطه (۲۶) نشان دهنده محدودیت ظرفیت هیدروژن ذخیره شده در واحد ذخیره سازی هیدروژن می باشد. رابطه (۲۷) بیانگر مساوی بودن مقدار اولیه و مقدار نهایی حجم ذخیره سازی در واحد ذخیره سازی هیدروژن است. رابطه (۲۸) و (۲۹) مربوط به محدودیت شارژ و دشارژ می باشد. رابطه (۲۰) محدودیت جبر بولی است، که مانع از شارژ و دشارژ همزمان می شود. هزینه تبدیل انرژی الکتریکی به هیدروژن توسط رابطه (۲۸) بیان شده است. در انتها، هزینه تبدیل گاز هیدروژن به انرژی الکتریکی در رابطه (۳۲) توصیف شده است. همانطور که دیده می شود رابطه (۳۲) یک چند جمله ای در جه دوم است.

$$H_{h,s,t} = H_{h,s,t-1} + \eta_h^{P2H} P_{h,s,t}^{P2H} - \frac{P_{h,s,t}^{H2P}}{\eta_h^{H2P}} - M_{h,s,t} \quad \forall h, \forall t, \forall s \quad (25)$$

$$H_h^{Min} \leq H_{h,s,t} \leq H_h^{Max} \quad \forall h, \forall t, \forall s \quad (26)$$

$$H_{h,s,t=0} = H_{h,s,t} = 24 = H_{h,s,in} \quad \forall h, \forall t, \forall s \quad (27)$$

$$P_{h,Min}^{P2H} I_{h,s,t}^{P2H} \leq P_{h,s,t}^{P2H} \leq P_{h,Max}^{P2H} I_{h,s,t}^{P2H} \quad \forall h, \forall t, \forall s \quad (28)$$

$$P_{h,Min}^{H2P} I_{h,s,t}^{H2P} \leq P_{h,s,t}^{H2P} \leq P_{h,Max}^{H2P} I_{h,s,t}^{H2P} \quad \forall h, \forall t, \forall s \quad (29)$$

$$I_{h,s,t}^{P2H} + I_{h,s,t}^{H2P} \leq 1 \quad \forall h, \forall t, \forall s \quad (30)$$

$$F_{s,t}^{P2H} = b^{P2H} p_{s,t}^{P2H} + c^{P2H} \quad \forall t, \forall s \quad (31)$$

$$F_{s,t}^{H2P} = a^{H2P} (p_{s,t}^{H2P})^2 + b^{H2P} p_{s,t}^{H2P} + c^{H2P} \quad \forall t, \forall s \quad (32)$$

در این روابط:

t : اندیس زمان،

S : اندیس سناریوهای تصادفی،

$\overline{HP}, \overline{HP}$: پارامتر ماکزیمم/مینیمم انرژی قابل ذخیره در منبع ذخیره هیدروژنی،

$\overline{P}^{P2H}, \underline{P}^{P2H}$: پارامتر ماکزیمم/مینیمم انرژی جهت تبدیل انرژی

الکتریکی به گاز هیدروژن،

b^{P2H}, c^{P2H} : پارامتر ضرایب هزینه برای تابع تبدیل انرژی

الکتریکی به گاز هیدروژن،

$a^{H2P}, b^{H2P}, c^{H2P}$: پارامتر ضرایب هزینه برای تابع تبدیل گاز

هیدروژن به توان الکتریکی،

$$I_t = I_t^d \cos \gamma + I_t^{dif} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho I_t^g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad \forall s, \forall t \quad (23)$$

$$0 \leq p_{s,t}^{pv} \leq \overline{P}_t^{PV} \quad \forall s, \forall t \quad (24)$$

در این روابط:

t : اندیس زمان،

S : اندیس سناریوهای تصادفی،

\overline{P}_t^{PV} : پارامتر بیشترین میزان ممکن تولید انرژی خورشیدی توسط کل سیستم فتوولتائیک،

P_{STC}^{PV} : پارامتر بیشترین میزان ممکن تولید انرژی خورشیدی توسط سلول های خورشیدی،

N_S^{PV}, N_P^{PV} : پارامتر تعداد سلول های خورشیدی سری و موازی در پنل خورشیدی،

I_t : پارامتر تشعشعات خورشیدی در سطح سیستم فتوولتائیک (kW/m^2).

α^{pv}, T_t^C : پارامتر میزان بازده سیستم فتوولتائیک، دمای سطح سیستم خورشیدی فتوولتائیک ($^\circ C$), (%).

$NOCT$: پارامتر دمای نامی در عملیات سلول خورشیدی ($^\circ C$).

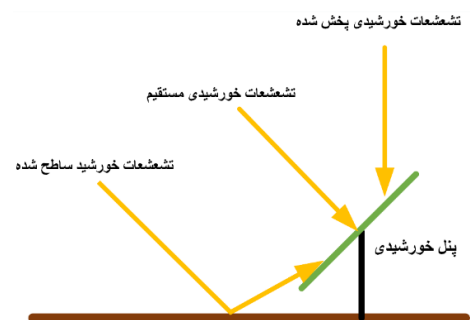
T_t^A : پارامتر دمای محیط برای سیستم فتوولتائیک،

γ : پارامتر زاویه تابع تشعشعات خورشیدی $^\circ$.

β : پارامتر زاویه پنل خورشیدی $^\circ$.

ρ : پارامتر ضریب تشعشعات محیطی،

$p_{s,t}^{pv}$: متغیر تصمیم توان گرفته شده از سیستم فتوولتائیک (kW).



شکل ۲. مولفه های تشعشعات خورشیدی بر سطح پنل خورشیدی

در یک ریزشبکه، تحت هر شرایط عملیاتی، توان مصرفی و تولیدی باید برابر باشند. در این مطالعه رابطه تعادل توان تولیدی و مصرفی توسط رابطه (۳۵) بیان شده است. علاوه بر این، درصدی از بارها به صورت قابل قطع برنامه‌ریزی شده‌اند که توسط رابطه (۳۶) بیان شده است.

$$p_{s,t}^{VBS} + p_t^{AC} + p^{fan} + p_{e,s,t}^{EV+} + p_{s,t}^{P2H} + p_{s,t}^{ING} = p_{s,t}^{pv} + p_{e,s,t}^{EV-} + p_{s,t}^{H2P} + p_{s,t}^{IL} + p_{s,t}^{DG} \quad (35) \quad \forall t, \forall s$$

$$0 \leq p_{s,t}^{IL} \leq \vartheta \cdot p_{s,t}^{ING} \quad (36) \quad \forall t, \forall s$$

در این روابط:

t : اندیس زمان،

S : اندیس سناریوهای تصادفی،

$p_{s,t}^{ING}$: پارامتر بار خانگی در ریزشبکه مجزا (kW)،

ϑ : پارامتر نسبت قطعی بار حداکثر در ریزشبکه مجزا،

$p_{s,t}^{IL}$: متغیر تصمیم میزان توان قطع بار شده (kW).

۴-۷ توابع هدف بهینه‌سازی چندهدفه

در این مقاله، در قالب بهینه‌سازی چندهدفه، دو هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده، که شامل هزینه کل عملیاتی و آلودگی است. در این راستا، تابع هدف هزینه کل عملیاتی سیستم در رابطه (۳۷) و تابع هدف مربوط به آلودگی کلی زیست محیطی سیستم در رابطه (۳۸) بیان شده است. در این مطالعه، روش بهینه‌سازی مقید-بر-اپسیلون، جهت بهینه‌سازی این مسئله چند هدفه استفاده شده است [۴۱].

$$OF^C = \min. \sum_s \pi_s \sum_t \left\{ \begin{aligned} & F_{s,t}^{DG} + F_{s,t}^{H2P} + F_{s,t}^{P2H} \\ & + C^{pv} p_{s,t}^{pv} + C^{IL} p_{s,t}^{IL} \\ & + \sum_e dg_{e,s,t}^{Lin} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

$$OF^E = \min. \sum_s \pi_s \sum_t \left\{ \begin{aligned} & p_{s,t}^{DG} (\mu_{net}^{CO_2} + \mu_{net}^{NO_x} + \mu_{net}^{SO_x}) \\ & + EM^{IL} p_{s,t}^{IL} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

در این روابط:

t : اندیس زمان،

S : اندیس سناریوهای تصادفی،

OF^C : تابع هدف هزینه،

OF^E : تابع هدف گازهای آلاینده،

$\mu_{net}^{CO_2}$, $\mu_{net}^{NO_x}$, $\mu_{net}^{SO_x}$: میزان دی‌اکسید کربن، اکسید نیتروژن، و

اکسید گوگرد در هر کیلووات تولید ژنراتور دیزلی. (g/kWh)،

EM^{IL} : پارامتر هزینه جریمه قطع بار در ریزشبکه مجزا،

$p_{s,t}^{P2H}$: متغیر تصمیم توان مصرفی جهت تبدیل توان الکتریکی به گاز هیدروژن. (kW)،

$p_{s,t}^{H2P}$: متغیر تصمیم توان مصرفی جهت تبدیل گاز هیدروژن به توان الکتریکی (kW)،

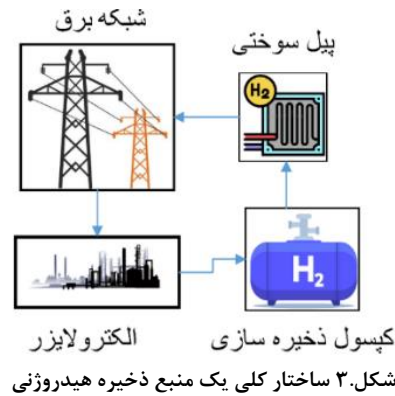
$F_{s,t}^{H2P}$: متغیر تصمیم هزینه تبدیل گاز هیدروژن به توان الکتریکی،

$F_{s,t}^{P2H}$: متغیر تصمیم هزینه تبدیل انرژی الکتریکی به گاز

هیدروژن،

$I_{s,t}^{P2H}$, $I_{s,t}^{H2P}$: متغیر باینری جهت تبعیض حالات شارژ و دشارژ در

منبع ذخیره هیدروژنی



۴-۵ مدل تحلیلی ژنراتور دیزلی

اگرچه ژنراتور دیزلی (DG^1) منبع اصلی گازهای آلاینده است، اما با توجه به قابلیت اطمینان بالا، این واحد تولیدی یک جزء مهم از ریزشبکه می‌باشد. به صورت مرسوم، هزینه مصرف سوخت این نوع واحدها با رابطه چندجمله‌ای درجه دوم ارائه شده در رابطه (۳۳) مدل‌سازی می‌شود [۴۰].

$$F_{s,t}^{DG} = a^{DG} (p_{s,t}^{DG})^2 + b^{DG} p_{s,t}^{DG} + c^{DG} I_t^{DG} \quad (33) \quad \forall t, \forall s$$

$$0 \leq p_{s,t}^{DG} \leq \overline{p_{s,t}^{DG}} I_t^{DG} \quad (34) \quad \forall t, \forall s$$

t : اندیس زمان،

S : اندیس سناریوهای تصادفی،

a^{DG} , b^{DG} , c^{DG} : پارامتر ضرایب هزینه تابع چندجمله‌ای مربوط

به هزینه ژنراتور دیزلی،

$F_{s,t}^{DG}$: هزینه توان تولیدی ژنراتور دیزلی،

$p_{s,t}^{DG}$: توان تولیدی ژنراتور دیزلی (kW)،

I_t^{DG} : متغیر باینری جهت روشن/خاموش کردن ژنراتور دیزلی

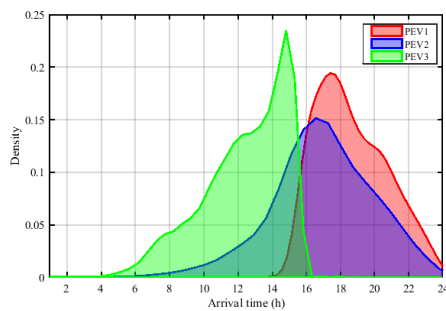
۴-۶ تعادل انرژی الکتریکی

¹ Diesel Generator

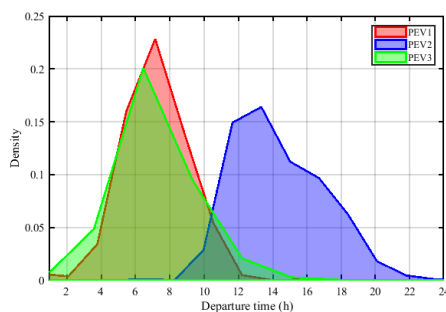
قرار گرفته است. (خودروها بلافاصله پس از رسیدن به ایستگاه شارژ شروع به شارژ می کنند)

- سناریوی دوم (CS2): در این مورد، برنامه ریزی بهینه مسئله پیشنهاد شده با در نظر گرفتن شارژ هوشمند دوجهته خودروهای الکتریکی مورد بررسی واقع شده است.

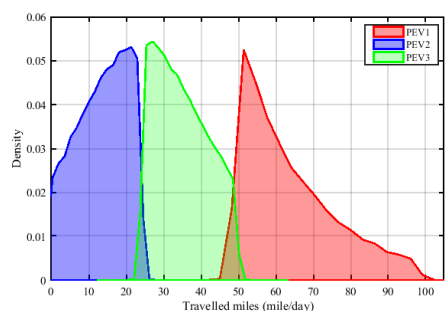
- سناریوی سوم (CS3): در این مورد، برنامه ریزی بهینه مسئله پیشنهاد شده با در نظر گرفتن شارژ هوشمند دوجهته خودروهای الکتریکی مورد بررسی واقع شده است. علاوه بر این، مدل بهینه سازی چندهدفه مورد اجرا قرار گرفته است، تا علاوه بر هزینه، گازهای آلاینده نیز کاهش داده شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. توزیع احتمالاتی آزمایشگاهی الگوهای رفتاری صاحبان خودروها: (الف) زمان رسیدن به خانه، (ب) زمان خروج از خانه، (ج) مسافت روزانه پیموده شده بر اساس مرجع [۴۲]

جدول ۲. پارامترهای ریزشکه بکارگرفته شده

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار

π_s : احتمال وقوع در هر سناریو تصادفی،
 C^{pv} : پارامتر هزینه سیستم فتوولتائیک،
 C^{ll} : پارامتر هزینه قطع بار،
 $dg_{e,s,t}^{lin}$: متغیر هزینه تخریب باتری.

۵- نتایج شبیه سازی عددی

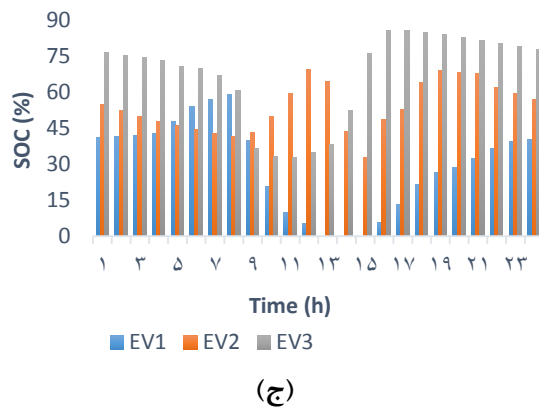
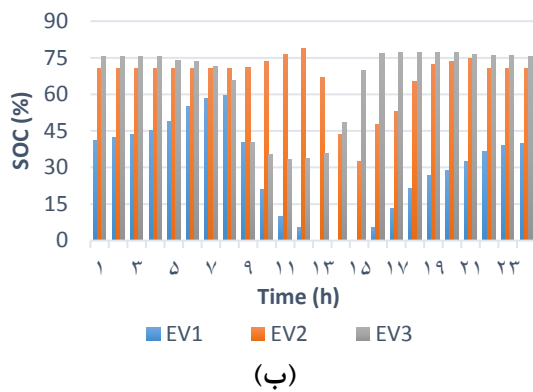
۵-۱ داده های مسئله و سناریوهای پیشنهادی

در این بخش شبیه سازی های عددی تحت موارد مطالعاتی مختلف، برای ریزشکه مورد نظر بررسی شده است. ریزشکه مورد نظر شامل سه عدد خودرو الکتریکی، یک منبع ذخیره هیدروژنی، یک ژنراتور دیزلی، سیستم فتوولتائیک و دکل مخابراتی است. مقادیر عددی پارامترهای ورودی مسئله، در جدول ۲ نشان داده شده است. در این مطالعه، الگوهای رفتاری متفاوت برای هر خودرو در نظر گرفته شده است. این الگوهای رفتاری تعیین کننده زمان ورود خودر به ایستگاه شارژ، زمان خروج خودرو از ایستگاه شارژ و مسافت روزانه پیموده شده، می باشد. توابع توزیع احتمالی آزمایشگاهی این پارامترها برای هر یک از این خودروها، در شکل ۴ نشان داده شده است. داده های مربوط به این توزیع های احتمالی در [۴۲] قرار داده شده است. همانطور که قبلا اشاره شد، روش برنامه ریزی تصادفی، جهت مدل سازی عدم قطعیت های خودروهای الکتریکی استفاده شده است. این توزیع های احتمالی، جهت تولید سناریوهای تصادفی مورد نیاز به کار برده شده است. پس از تولید ۱۰۰,۰۰۰ سناریو تصادفی در محیط نرم افزار متلب و شبکه هوش مصنوعی، با استفاده از روش کاهش سناریو پیشرو تعداد سناریوها به ۵۰ عدد از محتمل ترین سناریوها کاهش داده شد [۴۳].

سناریوهای تصادفی مربوط به میزان بار الکتریکی در ریزشکه توسط شکل ۵ نشان داده شده است [۴۴]. علاوه بر این، میزان بار ثابت و متغیر دکل مخابراتی در شکل ۶ نشان داده شده است. مدل پیشنهاد شده، یک برنامه ریزی غیرخطی مختلط با اعداد صحیح است، که دارای ۷۸۷۹ عدد قید، ۱۰۵۵ عدد متغیر پیوسته و ۲۶۲۶ عدد متغیر باینری است، که توسط حل کننده KNITRO در محیط نرم افزار گمز (GAMS) حل شده است [۴۵]. مسئله پیشنهاد شده با استفاده از یک سیستم با مشخصات Intel(R) Core (TM) i5-8250U CPU @ 1.60 GHz (4 CPUs), RAM 8 GB مدت زمان ۲۰ دقیقه حل شد. جهت ارزیابی مدل پیشنهاد شده، مسئله در سه سناریوی پیشنهادی (CS¹) مختلف بررسی شد، که به صورت زیر تعریف شده اند.

- سناریوی اول (CS1): در این مورد، برنامه ریزی بهینه مسئله پیشنهاد شده بدون در نظر گرفتن شارژ هوشمند مورد بررسی

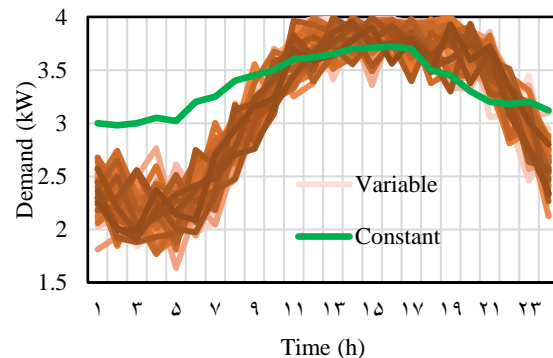
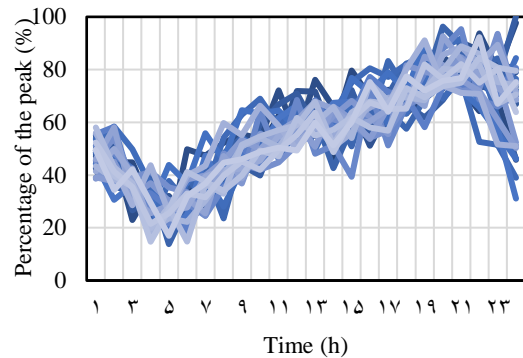
¹ Case Study



شکل ۷. سطح شارژ باتری خودروهای الکتریکی: الف) مورد مطالعاتی اول (ب) مورد مطالعاتی دوم (ج) مورد مطالعاتی سوم

با این حال، شیب نمودارها در ساعات ۱۲-۲۳ به صورت مثبت و تند می‌باشد. دلیل اصلی این امر شارژ کنترل نشده خودروها در این مورد مطالعاتی است، که خودروهای الکتریکی بلافاصله پس از رسیدن به ایستگاه شارژ شروع به شارژ می‌کنند و با توجه به اینکه خودروها معمولاً در ساعات عصر به ایستگاه می‌رسند، شیب شارژ خودروها در این ساعات مثبت است. در مورد مطالعاتی دوم، شیب شارژ خودروها در ساعات ۷-۱۱ مثبت است، که به دلیل شارژ تاخیر داده شده و هوشمند خودروها در این ساعات است. علت اصلی تاخیر شارژ به ساعات صبحگاهی، تقاضای الکتریکی کم در این ساعات است که از نظر هزینه این ساعات بهینه هستند. در مورد مطالعاتی سوم، شیب شارژ منفی در ساعات ۱۵-۲۳ قابل مشاهده است. علت اصلی این امر ارجح بودن آلودگی زیست محیطی در این مورد می‌باشد، که خودروهای الکتریکی را به صورت هوشمند و آداپت به دشارژ می‌کند تا آلودگی زیست محیطی کاهش داده شود. قابل توجه است که هزینه تخریب باتری خودروهای الکتریکی در این حالت بیشتر خواهد بود. در این مورد مطالعاتی خودروهای الکتریکی با انرژی سبز تامین شده توسط سیستم فتوولتائیک شارژ شده و در زمان‌های پیک دشارژ می‌شوند. به علت عدم حضور خودرو در بعضی از پیشامدهای تصادفی، شاید بهتر باشد که سطح شارژ خودروها در یک سناریو مشخص مورد بررسی قرار گیرد. در این جهت، شکل ۸ سطح شارژ

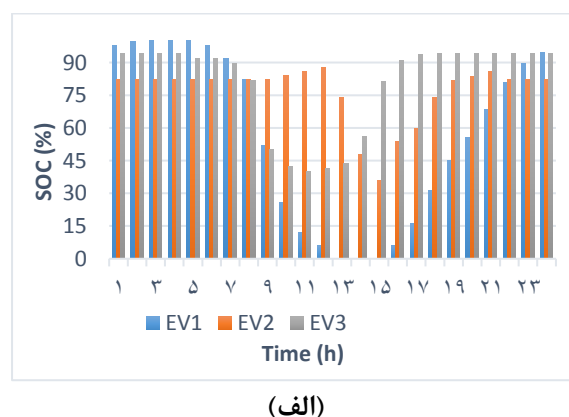
\overline{pBS}	1 (kW)	SOC_e^{Min}, SOC_e^{Max}	0.2, 1
N^{TRX}	4	BC_e	400 (\$/kWh)
p^0	0.1 (kW)	$\overline{HP}, \overline{HP}$	0.2, 16 (kWh)
N^{Max}	30	η^{P2H}, η^{H2P}	0.8, 0.7
η_e, η_c	0.97	$\overline{p^{P2H}}, \overline{p^{H2P}}$	4 (kW)
EB_e	30 (kWh)	a^{P2H}	0.06 (\$/MWh ²)
$ECPM$	0.3 (kWh/m)	b^{P2H}	0.046 (\$/MWh)
Cr_e	5 (kW)	c^{P2H}	0.00003 (\$)
a_0	$524e-6$	ϑ	0.1
C^{pv}, C^{IL}	0.005, 0.5 (\$/kWh)	a^{DG}	0.0025 (\$/MWh ²)
b^{DG}	0.0035 (\$/MWh)	c^{DG}	0.0035 (\$/MWh)

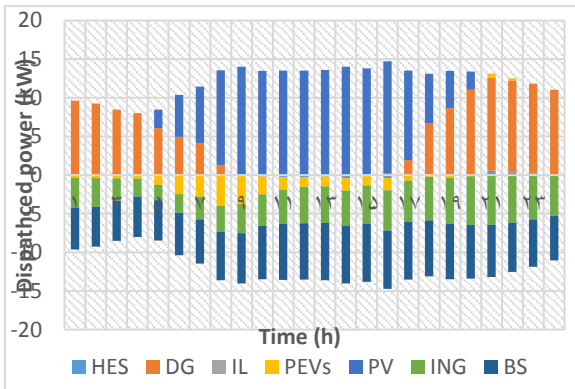


شکل ۶. سناریوهای تصادفی تقاضای بار الکتریکی متغیر و ثابت دکل مخابراتی بر اساس ۵۰ سناریوی محتمل [۴۴]

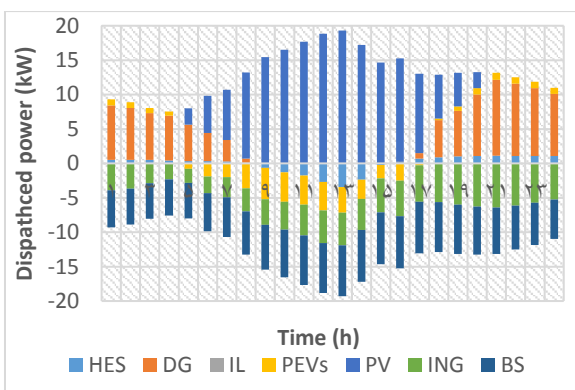
۲-۵ الگوی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی

مقدار متوسط سطح شارژ باتری خودروهای الکتریکی در شکل ۷ نشان داده شده است. مطابق شکل، در مورد مطالعاتی اول، سطح شارژ خودروهای الکتریکی در ساعات ۱ الی ۷ نسبتاً مسطح می‌باشد.





(ب)

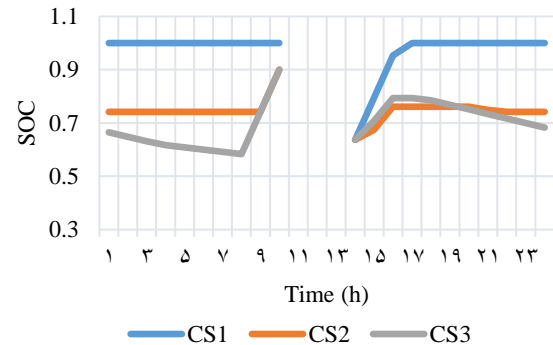


(ج)

شکل ۹. منحنی تامین توان در ریزشبهه (الف) مورد مطالعاتی اول (ب) مورد مطالعاتی دوم (ج) مورد مطالعاتی سوم

در مورد مطالعاتی سوم، علاوه بر هزینه کل، کاهش آلودگی نیز از توابع هدف است. به معنای دیگر، این مورد مطالعاتی تعادلی بین کاهش هزینه و کاهش آلودگیهای زیست محیطی، ایجاد می‌کند. به همین دلیل منحنی شارژ و دشارژ منبع ذخیره هیدروژنی در این مورد مطالعاتی غالب است. اگرچه هزینه استفاده از منبع ذخیره هیدروژنی زیاد می‌باشد، در این مورد مطالعاتی، کاهش گازهای آلاینده نیز مورد نظر است، و شارژ و دشارژ منبع ذخیره هیدروژنی موجب جذب بهتر انرژی تجدیدپذیر شده و موجب کاهش هدف آلودگی می‌شود. به همین شکل، خودروهای الکتریکی نیز در این ساعات بیشتر دشارژ شده‌اند تا استفاده بهتری از تولیدات تجدیدپذیر به عمل آید. تولید ژنراتور دیزلی در این مورد مطالعاتی ۱۹٪/۷۷ و ۱۷٪/۷۱ نسبت به مورد مطالعاتی اول و دوم کاهش داشته است. با این حال، انرژی جذب شده توسط سیستم فتوولتائیک در مورد مطالعاتی افزایش برابر با ۱۴٪/۹۹ داشته است. دلیل اصلی این پدیده، تحمیل هزینه بیشتر جهت افزایش نفوذ انرژی های تجدیدپذیر است. در انتها، تولید انرژی سیستم فتوولتائیک در مورد مطالعاتی چهارم

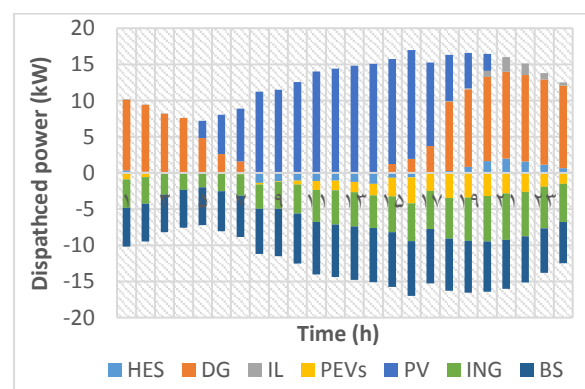
خودرو سوم در پیشامد هشتم را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است خودرو در ساعت ۱۴ با سطح شارژ ۰/۶۳ وارد ایستگاه شده و در ساعت ۱۰ صبح خارج شده است. در مورد مطالعاتی اول، بدون وقفه شارژ تا حداکثر میزان ممکن انجام گرفته است. در مورد مطالعاتی دوم، به محض رسیدن خودرو شروع به شارژ می‌کند تا به صورت هوشمند از انرژی خورشیدی استفاده کند. در حالی که هیچ گونه دشارژ انجام نگرفته است. در مورد مطالعاتی سوم، انرژی خورشیدی شارژ شده به سیستم تحویل داده شده است تا میزان گازهای گلخانه‌ای کاهش داده شود.



شکل ۸. سطح شارژ باتری خودروهای الکتریکی سوم در پیشامد هشتم

۳-۵ منحنی تامین توان

شکل ۹، منحنی میله‌ای انباشته شده تامین توان ریزشبهه نشان داده شده است، که میزان تولید و مصرف هر المان ریزشبهه را مشخص می‌کند. در این منحنی مقادیر مثبت نماینده توان الکتریکی تولیدی و مقادیر منفی نماینده توان الکتریکی مصرفی است. همانطور که دیده می‌شود، ۶/۱۹ (kW) از بار شبکه در مورد مطالعاتی اول قطع شده است، که دلیل اصلی آن شارژ کنترل نشده خودروهای الکتریکی می‌باشد. در این حالت بار نسبتاً بزرگی توسط خودروها در ساعات پیک به ریزشبهه اعمال می‌شود. قابل توجه هست که در مورد مطالعاتی دوم، منحنی تامین توان نسبتاً یکنواخت است. دلیل اصلی این پدیده در اولویت بودن کاهش هزینه کل در این مورد مطالعاتی است. علاوه بر این، نظریه‌های پیشین در مورد سوق دادن بار خودروها به ساعات غیرپیک نیز با این شکل منسجم‌تر می‌شوند.



(الف)

مشاهده می‌شود، که به دلیل در اولویت بودن هزینه در این مورد مطالعاتی است. مورد مطالعاتی سوم، کمترین مقدار آلودگی را نشان

به میزان ۱۷٪/۸ کمتر می‌باشد، که به دلیل استفاده از بهینه‌سازی پویا است. در این روش بهینه‌سازی تصمیمات محافظه‌گرا در پیش-بینی تولید های تجدیدپذیر اتخاذ می‌گردد.

جدول ۳. متغیرهای تصمیم‌گیری مهم مسئله در موارد مطالعاتی مختلف.

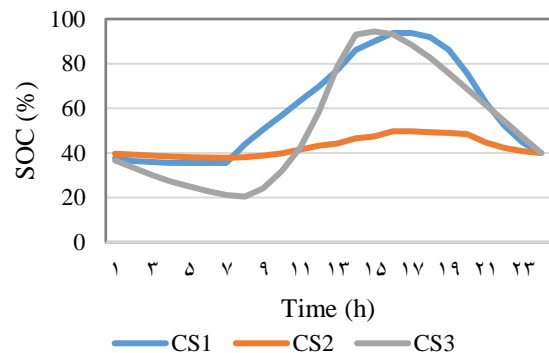
	CS1	CS2	CS3
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} p_{s,t}^{ll}$	6.3427	0	0
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} p_{s,t}^{pv}$	163.403	162.789	187.219
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} p_{s,t}^{DG}$	129.528	126.881	104.904
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} C^{pv} p_{s,t}^{pv}$	0.87651	0.87493	0.95709
$\sum_s \sum_t \sum_e \pi_{s,t} dg_{e,s,t}^{lin}$	0	0.11212	1.94635
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} C^{ll} p_{s,t}^{ll}$	3.19713	0	0
OF^C	10.5315	6.31044	7.88388
OF^E	72191.2	58313.3	47986.9
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} F_{s,t}^{DG}$	5.43807	5.06582	3.8699
$\sum_s \sum_t \pi_{s,t} (FC_{s,t}^{H2P} + FC_{s,t}^{P2H})$	1.689782	0.128555	1.1904

می‌دهد، چراکه علاوه بر هزینه‌های عملیاتی، آلودگی زیست‌محیطی نیز در قالب بهینه‌سازی چندهدفه مدلسازی شده است. با این حال قابل توجه هست که هزینه این مورد نسبت به مورد مطالعاتی دوم کمی بیشتر می‌باشد، اما مقدار کاهش در مقدار گاز های گلخانه‌ای چشمگیر است.

قابل توجه هست که مورد مطالعاتی اول، تنها با استفاده از (kW) ۶/۱۹ قطعی با به یک مسئله امکان‌پذیر^۱ تبدیل شده است که به دلیل توان شارژ زیاد خودروهای الکتریکی در ساعات پیک می‌باشد، هزینه تخریب باتری الکتریکی در این مورد مطالعاتی صفر می‌باشد، چراکه در شارژ کنترل نشده خودروهای الکتریکی فقط شارژ می‌شوند و از دشارژ تخریب کننده باتری‌ها صرف‌نظر شده است. مورد مطالعاتی دوم دارای هزینه تخریب باتری الکتریکی برابر با \$ ۰/۱۰۲ می‌باشد، در حالی که هزینه تخریب باتری در مورد مطالعاتی سوم برابر با \$ ۱/۶۴ می‌باشد. دلیل اصلی هزینه کم در مورد مطالعاتی دوم، در اولویت بودن کاهش هزینه می‌باشد، اما در مورد مطالعاتی سوم آلودگی نیز یکی از اهداف می‌باشد. در این راستا پاسخ بهینه، با

۴-۵ الگوی شارژ/دشارژ منبع ذخیره هیدروژنی

میزان متوسط سطح شارژ منبع ذخیره هیدروژن در موارد مطالعاتی مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق نمودار، مورد مطالعاتی دوم کمترین میزان سطح ذخیره شده را دارد. دلیل اصلی این امر، در اولویت بودن کاهش هزینه در این مورد می‌باشد. به طور مشابه، کاهش هزینه هدف اصلی مورد مطالعاتی اول نیز هست، اما در این مورد سطح شارژ نسبتاً بالا در منبع ذخیره هیدروژنی مشاهده می‌شود. دلیل این امر برنامه‌ریزی کنترل نشده شارژ خودروهای الکتریکی است، که منبع ذخیره هیدروژن را وادار به شارژ در ساعات غیرپیک می‌کند تا توان شارژ خودروها در ساعات پیک تامین شود.



شکل ۱۰. سطح شارژ منبع ذخیره هیدروژن در موارد مطالعاتی مختلف

در مورد مطالعاتی سوم، قابل مشاهده هست که منبع ذخیره هیدروژن در ساعات ۹-۱۵ بیشترین میزان شارژ را دارد. با توجه به اینکه بهینه‌سازی چندهدفه در این مورد استفاده شده است و حداکثر انرژی تجدیدپذیر در این ساعات توسط منبع ذخیره جذب می‌شود تا میزان گازهای گلخانه‌ای کاهش پیدا کند. با اینکه این روند باعث افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود، میزان کاهش در مقدار گازهای گلخانه‌ای قابل توجه است.

۵-۵ مقایسه و تحلیل موارد مطالعاتی

مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم‌گیری اصلی مسئله در جدول ۳ برای موارد مطالعاتی مختلف خلاصه شده است. همانطور که دیده می‌شود، مورد مطالعاتی اول، بیشترین مقدار هزینه را به ریزشبکه تحمیل می‌کند. دلیل اصلی این پدیده، شارژ کنترل نشده خودروهای الکتریکی می‌باشد، که بار نسبتاً بزرگی در ساعات پیک به سیستم تحمیل می‌کند. در مورد مطالعاتی دوم، کمترین هزینه عملیاتی را

¹ Feasible

افزایش هزینه تخریب باتری های خودروهای الکتریکی، میزان آلودگی را کاهش داده است. این کاهش هزینه توسط شارژ خودروهای انرژی پاک و دشارژ آنها در ساعات پیک حاصل می شود. علاوه بر این، صحت نظریه های پیشین در مود منبع ذخیره هیدروژنی، (توصیف شده در شکل ۱۰)، با این نتایج دوباره تایید می شوند. به عنوان نمونه، مورد مطالعاتی اول، بیشترین هزینه را برای منبع ذخیره هیدروژنی تحمیل می کند، چراکه دشارژ عمیق منبع ذخیره هیدروژنی در ساعات پیک تنها راه تامین توان شارژ خودروها می باشد. در حالی که، مورد مطالعاتی دوم دارای کمترین هزینه برای، منبع ذخیره هیدروژنی می باشد، زیرا شارژ خودرو های الکتریکی هوشمند بوده و به راحتی از طریق انرژی خورشیدی تامین شده توسط سیستم فتوولتائیک شارژ می شوند. مورد مطالعاتی سوم، بیشترین میزان هزینه برای منبع ذخیره هیدروژنی را نشان می دهد. دلیل اصلی این هزینه بالا، در اولویت بودن گازهای گلخانه ای در این مورد می باشد. به این دلیل، استفاده از حداکثر انرژی خورشیدی، توسط شارژ/دشارژ منبع ذخیره هیدروژنی در اولویت است. بنابراین، این مورد دارای کمترین میزان تولید ژنراتور دیزلی می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک برنامه ریزی غیرخطی مختلط با اعداد صحیح برای مدلسازی ماهیت غیرخطی مسئله تامین توان بهینه دکل های مخابراتی در ریزشبکه های مجزا استفاده شده است. همچنین عدم قطعیت های مختلف توسط رویکرد برنامه ریزی تصادفی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت روش بهینه سازی چندهدفه، جهت کمینه کردن هزینه ها و گازهای گلخانه ای انتشار یافته از سیستم، استفاده شده که با استفاده از انتخاب بهترین پاسخ از جبهه پارتو توسط روش رضایت فازی، بهترین تعادل را بین اهداف ایجاد می کند. ریزشبکه مورد مطالعه در این مقاله شامل یک ژنراتور دیزلی، سیستم فتوولتائیک، منبع ذخیره هیدروژنی است. علاوه بر این، امکان تبادل انرژی با سه خودرو الکتریکی متصل شده به ریزشبکه، مورد بررسی قرار گرفت. مدل تحلیلی مسئله فوق به عنوان یک برنامه ریزی غیرخطی مختلط با اعداد صحیح ارائه شد، که ماهیت غیرخطی مدل بهینه سازی را در بر می گیرد. در این راستا، در قالب بهینه سازی چندهدفه، علاوه بر هزینه، گازهای گلخانه ای نیز از اهداف مسئله بوده و تعادلی بین این دو هدف متناقض در جبهه پارتو ایجاد شد. در این مسئله، پارامترهای غیرقطعی مانند، الگوهای رفتاری راننده ها (زمان رسیدن به ایستگاه شارژ، زمان خروج از ایستگاه شارژ، و مسافت روزانه طی شده) توسط سناریوهای برنامه ریزی تصادفی مدلسازی شده است. کارایی مدل پیشنهاد شده در سه مورد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت، که مزیت استفاده از باتری خودروهای الکتریکی هوشمند، و بهینه سازی چندهدفه را ارزیابی می کند. نتایج کلی به دست آمده از مطالعه را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- ۱- زمانی که شارژ خودروهای الکتریکی به صورت کنترل نشده می باشد، بار نسبتا بزرگی در ساعات پیک توسط خودرو ها به ریزشبکه اعمال می شود، که منجر به هزینه و آلودگی بالا شده، و تنها با قطعی قسمتی از بار ریزشبکه حل مسئله ممکن می شود.
- ۲- استفاده از شارژ/دشارژ هوشمند خودروهای الکتریکی منجر به پیک زایی بار ریزشبکه شده، و قسمت بزرگی از بار به ساعات غیرپیک سوق داده می شود. این مورد مطالعاتی منجر به کاهش ۴۴٪ در هزینه، و ۱۹٪ در گازهای گلخانه ای می شود.
- ۳- هنگام استفاده از بهینه سازی چندهدفه، میزان استفاده از منبع ذخیره هیدروژنی و خودروهای الکتریکی افزایش پیدا می کند تا حداکثر استفاده از انرژی های تجدیدپذیر به عمل آید. در مورد مطالعاتی چندهدفه هزینه های عملیاتی به میزان ۲۴/۱٪ بیشتر می باشد، در حالی میزان گازهای گلخانه ای به میزان ۱۷/۷٪ کاهش داشته است.
- ۴- مقادیر انحراف معیار در هزینه تصادفی نشان می دهد که استفاده از شارژ کنترل شده، نه تنها باعث کاهش هزینه و گازهای گلخانه ای می شود، بلکه ریسک های ناشی از ماهیت عدم قطعیت ها نیز کاهش داده می شوند.

سپاسگزاری

این فعالیت پژوهشی با حمایت مادی و معنوی پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران) انجام شده است.

مراجع

- [1] P. Nema, R. K. Nema, and S. Rangnekar, "Minimization of green house gases emission by using hybrid energy system for telephony base station site application," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 6. Pergamon, pp. 1635–1639, Aug. 01, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.02.012.
- [2] N. Nasiri *et al.*, "A bi-level market-clearing for coordinated regional-local multi-carrier systems in presence of energy storage technologies," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 63, p. 102439, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102439.
- [3] J. Lian, Y. Zhang, C. Ma, Y. Yang, and E. Chaima, "A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 199. Elsevier Ltd, p. 112027, Nov. 01, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112027.
- [4] A. Mansour-Saatloo, M. Agabalaye-Rahvar, M.

- Characterization of the performance attributes of Graphene Nano Film based Surface Plasmon Resonance (SPR) Biosensor for Biomedical Applications View project lifetime measurement of monitoring system View project Hybrid Solar PV/Biomass Powered Energy Efficient Remote Cellular Base Stations,” 2020. Accessed: Feb. 05, 2021. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/340455867>.
- [14] E. Oh and B. Krishnamachari, “Energy savings through dynamic base station switching in cellular wireless access networks,” 2010, doi: 10.1109/GLOCOM.2010.5683654.
- [15] J. Gong, S. Zhou, Z. Niu, and P. Yang, “Traffic-aware base station sleeping in dense cellular networks,” 2010, doi: 10.1109/IWQoS.2010.5542725.
- [16] A. Spagnuolo, A. Petraglia, C. Vetromile, R. Formosi, and C. Lubritto, “Monitoring and optimization of energy consumption of base transceiver stations,” *Energy*, vol. 81, pp. 286–293, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2014.12.040.
- [17] Y. Choi and H. Kim, “Optimal Scheduling of Energy Storage System for Self-Sustainable Base Station Operation Considering Battery Wear-Out Cost,” *mdpi.com*, doi: 10.3390/en9060462.
- [18] S. Cordiner *et al.*, “Fuel cell based Hybrid Renewable Energy Systems for off-grid telecom stations: Data analysis from on field demonstration tests,” *Appl. Energy*, vol. 192, pp. 508–518, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.08.162.
- [19] T. O. BA Aderemi, SP Chowdhury, “NoTechno-economic feasibility of hybrid solar photovoltaic and battery energy storage power system for a mobile cellular base station in Soshanguve, South Africa Title,” *Energies*, 2018.
- [20] H. Turker and S. Bacha, “Optimal Minimization of Plug-In Electric Vehicle Charging Cost with Vehicle-to-Home and Vehicle-to-Grid Concepts,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 11, pp. 10281–10292, 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2867428.
- [21] P. Mesarić and S. Krajcar, “Home demand side management integrated with electric vehicles and renewable energy sources,” *Energy Build.*, vol. 108, pp. 1–9, Dec. 2015, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.09.001.
- [22] M. Alirezaei, M. Noori, and O. Tatari, “Getting to net zero energy building: Investigating the role of vehicle to home technology,” *Energy Build.*, vol. 130, pp. 465–476, Oct. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.08.044.
- A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Abapour, and K. Zare, “Robust scheduling of hydrogen based smart micro energy hub with integrated demand response,” *J. Clean. Prod.*, vol. 267, p. 122041, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122041.
- [5] R. P. Shea, M. O. Worsham, A. D. Chiasson, J. Kelly Kissock, and B. J. McCall, “A lifecycle cost analysis of transitioning to a fully-electrified, renewably powered, and carbon-neutral campus at the University of Dayton,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 37, p. 100576, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.SETA.2019.100576.
- [6] Z. J. Lee *et al.*, “Adaptive Charging Networks: A Framework for Smart Electric Vehicle Charging,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 12, no. 5, pp. 4339–4350, Sep. 2021, doi: 10.1109/TSG.2021.3074437.
- [7] M. Dubarry, A. Devie, and K. McKenzie, “Durability and reliability of electric vehicle batteries under electric utility grid operations: Bidirectional charging impact analysis,” *J. Power Sources*, vol. 358, pp. 39–49, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2017.05.015.
- [8] B. Qiao and J. Liu, “Multi-objective dynamic economic emission dispatch based on electric vehicles and wind power integrated system using differential evolution algorithm,” *Renew. Energy*, vol. 154, pp. 316–336, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.03.012.
- [9] M. S. Hossain, A. Jahid, and D. M. Fayzur Rahman, “Quantifying Potential of Hybrid PV/WT Power Supplies for Off-Grid LTE Base Station,” Sep. 2018, doi: 10.1109/IC4ME2.2018.8465653.
- [10] C. Zeljkovic *et al.*, “A Monte Carlo Simulation Platform for Studying the Behavior of Wind-PV-Diesel-Battery Powered Mobile Telephony Base Stations,” Aug. 2020, doi: 10.1109/PMAPS47429.2020.9183576.
- [11] E. Jannelli, M. Minutillo, A. Lubrano Lavadera, and G. Falcucci, “A small-scale CAES (compressed air energy storage) system for stand-alone renewable energy power plant for a radio base station: A sizing-design methodology,” *Energy*, vol. 78, pp. 313–322, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.energy.2014.10.016.
- [12] A. Jahid, M. K. H. Monju, M. E. Hossain, and M. F. Hossain, “Renewable Energy Assisted Cost Aware Sustainable Off-Grid Base Stations with Energy Cooperation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 60900–60920, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2874131.
- [13] Mdsanwar Hossain, M. Fayzur Rahman, M. Sanwar Hossain, S. Member, and C. Author, “Hybrid Solar PV/Biomass Powered Energy Efficient Remote Cellular Base Stations

- p. 106971, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2020.106971.
- [32] B. Li, X. Wang, M. Shahidehpour, C. Jiang, and Z. Li, "Robust Bidding Strategy and Profit Allocation for Cooperative DSR Aggregators with Correlated Wind Power Generation," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1904–1915, Oct. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2875483.
- [33] M. Zare Oskouei, M. A. Mirzaei, B. Mohammadi-Ivatloo, M. Shafiee, M. Marzband, and A. Anvari-Moghaddam, "A hybrid robust-stochastic approach to evaluate the profit of a multi-energy retailer in tri-layer energy markets," *Energy*, vol. 214, p. 118948, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.118948.
- [34] N. Nasiri, S. Zeynali, S. N. Ravadanegh, and M. Marzband, "A hybrid robust-stochastic approach for strategic scheduling of a multi-energy system as a price-maker player in day-ahead wholesale market," *Energy*, vol. 235, p. 121398, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.121398.
- [35] M. K. Kim and L. Baldini, "Energy analysis of a decentralized ventilation system compared with centralized ventilation systems in European climates: Based on review of analyses," *Energy Build.*, vol. 111, pp. 424–433, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2015.11.044.
- [36] S. Zeynali, N. Nasiri, M. Marzband, and S. N. Ravadanegh, "A hybrid robust-stochastic framework for strategic scheduling of integrated wind farm and plug-in hybrid electric vehicle fleets," *Appl. Energy*, vol. 300, p. 117432, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117432.
- [37] S. Zeynali, N. Rostami, A. Ahmadian, and A. Elkamel, "Two-stage stochastic home energy management strategy considering electric vehicle and battery energy storage system: An ANN-based scenario generation methodology," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 39, p. 100722, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100722.
- [38] N. Nasiri, M. Reza Banaei, and S. Zeynali, "A hybrid robust-stochastic approach for unit commitment scheduling in integrated thermal electrical systems considering high penetration of solar power," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 49, p. 101756, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2021.101756.
- [39] I. AlHajri, A. Ahmadian, and A. Elkamel, "Stochastic day-ahead unit commitment scheduling of integrated electricity and gas networks with hydrogen energy storage (HES), plug-in electric vehicles (PEVs) and renewable
- [23] C. B. Robledo, V. Oldenbroek, F. Abbruzzese, and A. J. M. van Wijk, "Integrating a hydrogen fuel cell electric vehicle with vehicle-to-grid technology, photovoltaic power and a residential building," *Appl. Energy*, vol. 215, pp. 615–629, Apr. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.02.038.
- [24] F. Brahman, M. Honarmand, and S. Jadid, "Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system," *Energy Build.*, vol. 90, pp. 65–75, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2014.12.039.
- [25] T. Ma, J. Wu, and L. Hao, "Energy flow modeling and optimal operation analysis of the micro energy grid based on energy hub," *Energy Convers. Manag.*, vol. 133, pp. 292–306, Feb. 2017, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2016.12.011.
- [26] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, H. Zareipour, and M. Moeini-Aghtaieh, "A Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 5, pp. 2217–2227, Sep. 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2518920.
- [27] S. A. Alavi, A. Ahmadian, and M. Aliakbar-Golkar, "Optimal probabilistic energy management in a typical micro-grid based-on robust optimization and point estimate method," *Energy Convers. Manag.*, vol. 95, pp. 314–325, May 2015, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2015.02.042.
- [28] M. Shafie-Khah and P. Siano, "A stochastic home energy management system considering satisfaction cost and response fatigue," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 629–638, Feb. 2018, doi: 10.1109/TII.2017.2728803.
- [29] X. Lu, Z. Liu, L. Ma, L. Wang, K. Zhou, and S. Yang, "A robust optimization approach for coordinated operation of multiple energy hubs," *Energy*, vol. 197, p. 117171, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117171.
- [30] P. Zhao, W. Xu, S. Zhang, J. Wang, and Y. Dai, "Technical feasibility assessment of a standalone photovoltaic/wind/adiabatic compressed air energy storage based hybrid energy supply system for rural mobile base station," *Energy Convers. Manag.*, vol. 206, p. 112486, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112486.
- [31] M. A. Mosa and A. A. Ali, "Energy management system of low voltage dc microgrid using mixed-integer nonlinear programming and a global optimization technique," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192,

- Ivatloo, "Risk-aware stochastic bidding strategy of renewable micro-grids in day-ahead and real-time markets," *Energy*, vol. 171, pp. 689–700, Mar. 2019, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.12.173.
- [44] P. Sheikhamadi, S. Bahramara, A. Mazza, G. Chicco, and J. P. S. Catalão, "Bi-level optimization model for the coordination between transmission and distribution systems interacting with local energy markets," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 124, p. 106392, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106392.
- [45] M. Baradar and M. R. Hesamzadeh, "Calculating negative LMPs from SOCP-OPF," *ENERGYCON 2014 - IEEE Int. Energy Conf.*, pp. 1461–1466, 2014, doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850615.
- energies," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 67, p. 102736, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.SCS.2021.102736.
- [40] S. Zeynali, N. Rostami, A. Ahmadian, and A. Elkamel, "Stochastic energy management of an electricity retailer with a novel plug-in electric vehicle-based demand response program and energy storage system: A linearized battery degradation cost model," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 74, p. 103154, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.SCS.2021.103154.
- [41] S. Nojavan and K. Zare, "Optimal energy pricing for consumers by electricity retailer," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, pp. 401–412, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.05.013.
- [42] "National household travel survey." <https://nhts.ornl.gov/>.
- [43] P. Fazlalipour, M. Ehsan, and B. Mohammadi-