



دانشگاه صنعتی سهند

نشریه سازه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۷- شماره ۱

بهار و تابستان ۱۳۹۹

صفحات ۱۰۸ الی ۱۳۰

ISSN: 2322-3146

http://jnsee.sut.ac.ir

# برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی با در نظر گرفتن عدم قطعیت بار، منابع تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی

محمد علیزاده گل‌محله<sup>۱</sup>، میثم جعفری نوکندی<sup>۲</sup> و قادر کرمی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، [m.alizadeh@nit.ac.ir](mailto:m.alizadeh@nit.ac.ir)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، [m.jafari@nit.ac.ir](mailto:m.jafari@nit.ac.ir)

<sup>۳</sup> کارشناسی ارشد، موسسه علوم و فناوری آریان بابل، بابل، [ghader.karami94@gmail.com](mailto:ghader.karami94@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۰۲)

## چکیده

### واژه‌های کلیدی

برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح،

خودروهای الکتریکی،

عدم قطعیت،

مشارکت واحدها،

منابع انرژی تجدیدپذیر.

هزینه بسیار پایین استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی از یک سو و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و قیمت سوخت از سوی دیگر، موجب رشد هم‌زمان استفاده از منابع تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی شده است. در این مقاله یک مدل ریاضی خطی و احتمالی آمیخته با عدد صحیح به منظور برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی با هدف حداقل کردن هم‌زمان هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها در حضور منابع تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی دارای قابلیت شارژ و دشارژ پیشنهاد شده است. خودروهای الکتریکی دارای قابلیت اتصال خودرو به شبکه می‌توانند به‌عنوان واحد ذخیره انرژی در یک شبکه هوشمند عمل کرده و در صورت نیاز به‌عنوان منبع تولید انرژی به شبکه متصل شوند. لذا در این مقاله از یک تجمیع‌کننده برای هماهنگی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی استفاده شده است. از سوی دیگر، عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی و در نتیجه، مشارکت واحدهای حرارتی را پیچیده می‌کند بنابراین در این مقاله از روش شبیه‌سازی مونت کارلو برای مدل‌سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و بار مصرفی شبکه استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که مدل خطی پیشنهادی، علاوه بر حداقل کردن هم‌زمان هزینه‌های بهره‌برداری واحدهای حرارتی و انتشار آلاینده‌ها، زمان رسیدن به جواب بهینه را نیز به طرز چشمگیری کاهش داده است.



Sahand University  
of Technology

Journal of Nonlinear  
Systems in Electrical  
Engineering

Vol.7, No.1

Spring and Summer 2020

ISSN: 2322 – 3146

<http://jnsee.sut.ac.ir>

# Mixed Integer Linear Programming for Managing the Thermal Units Commitment Considering the Load Uncertainty, Renewables Energy Resources and Electric Vehicles

Mohammad Alizadeh<sup>1</sup>, Meysam Jafari –Nokandi<sup>2</sup> and Ghader Karami<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, [m.alizadeh@nit.ac.ir](mailto:m.alizadeh@nit.ac.ir)

<sup>2</sup> **Corresponding Author**, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, [m.jafari@nit.ac.ir](mailto:m.jafari@nit.ac.ir)

<sup>3</sup>Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, [ghader.karami94@gmail.com](mailto:ghader.karami94@gmail.com)

## ABSTRACT

### Keywords

Mixed Integers Linear Programming,  
Electric Vehicles,  
Uncertainty,  
Unit commitment,  
Renewable Energy Sources

The very low operation cost of wind power and solar energy and the increase in greenhouse gas emissions and fuel prices have led to a simultaneous growth in the use of renewable energy sources and electric vehicles. In this paper, a mixed integer linear programming model is proposed for managing the thermal unit commitment in order to minimize the operation cost and emission of pollutants in the presence of renewable resources and electric vehicles with charge and discharge capability. Electric vehicles with the capability of vehicle-to-grid can act as energy storage units in a smart grid and can be connected to the grid as power sources in times of need. Therefore, in this paper, an aggregator coordinates the charging and discharging of electric vehicles. On the other hand, uncertainties in predicting the power produced by renewable resources complicate the charge/discharge management of electric vehicles and unit commitment. Therefore, the Monte Carlo simulation method is employed to model the uncertainty of wind and solar powers and load demand. Simulation results show that the proposed linear model minimizes the total operating cost of generating units and their emissions, while reducing the time to reach the optimal solution, significantly.

## اندیس‌ها

$t, h$	ساعت برنامه‌ریزی
$s$	سناریو
$i$	واحد تولیدی

## پارامترها

$P_{ts}^{solar}$	توان خورشیدی در زمان $t$ و سناریوی $s$
$P_{ts}^{wind}$	توان بادی در زمان $t$ و سناریوی $s$
$\psi_{pre}$	سطح شارژ باتری خودروی الکتریکی در زمان ورود به پارکینگ
$\psi_{dep}$	سطح شارژ باتری خودروی الکتریکی در زمان خروج از پارکینگ
$\psi_{min}$	حداقل سطح شارژ مجاز باتری خودروی الکتریکی
$\xi$	بازده دشارژ باتری خودروی الکتریکی
$ccost_i$	هزینه راه‌اندازی سرد واحد $i$
$hcost_i$	هزینه راه‌اندازی گرم واحد $i$
$t_i^{cold}$	زمان متناظر با راه‌اندازی سرد واحد $i$
$t_i^{hot}$	زمان متناظر با راه‌اندازی گرم واحد $i$
$P_{ts}^D$	تقاضای بار در ساعت $t$ و سناریوی $s$
$mut_i$	حداقل زمان روشن بودن واحد $i$
$mdt_i$	حداقل زمان خاموش بودن واحد $i$
$P_i^{min}$	حداقل توان تولیدی واحد $i$

$P_i^{\max}$  حداکثر توان تولیدی واحد  $i$

$P^{EV}$  ظرفیت متوسط باتری خودروها

$N^{EV\_total}$  تعداد کل خودروهای الکتریکی متقاضی شرکت در برنامه شارژ هماهنگ در یک شبانه‌روز

$N_t^{EV\_max}$  حداکثر تعداد خودروهای الکتریکی متصل به شبکه در ساعت  $t/m$

### متغیرها

$P_{its}$  توان تولیدی واحد  $i$  در زمان  $t$  و سناریوی  $s$

$FC_{its}$  هزینه سوخت واحد  $i$  در زمان  $t$  و سناریوی  $s$

$SC_{it}$  هزینه راه‌اندازی واحد  $i$  در زمان  $t$

$EC_{its}$  انتشار آلاینده‌گی واحد  $i$  در زمان  $t$  و سناریوی  $s$

$U_{it}$  متغیر باینری که یک بودن آن به معنای روشن بودن واحد  $i$  در زمان  $t$  است

$V_{it}$  متغیر باینری که یک بودن آن به معنای راه‌اندازی واحد  $i$  در زمان  $t$  است

$S_{it}^{hot}$  متغیر باینری که یک بودن آن به معنای راه‌اندازی گرم واحد  $i$  در زمان  $t$  است

$S_{it}^{cold}$  متغیر باینری که یک بودن آن به معنای راه‌اندازی سرد واحد  $i$  در زمان  $t$  است

$W_{it}$  متغیری که یک بودن آن به معنای خاموش شدن واحد  $i$  در زمان  $t$  است

$N_t^{EV\_source}$  تعداد خودروهای الکتریکی متصل به شبکه به عنوان منبع در زمان  $t$

$N_t^{EV\_load}$  تعداد خودروهای الکتریکی متصل به شبکه به عنوان بار در زمان  $t$

## ۱- مقدمه

نگرانی‌های مربوط به افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی باعث استفاده روزافزون از منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. نفوذ هر چه بیشتر منابع تجدیدپذیر می‌تواند موجب کاهش هم‌زمان هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی شود. راه‌حل دیگری که در راستای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد استفاده از خودروهای الکتریکی<sup>۱</sup> در بخش حمل‌ونقل است. خودروهای الکتریکی در ساعات مختلف روز، می‌توانند به صورت مصرف‌کننده و یا تولیدکننده انرژی الکتریکی عمل نمایند. گرچه حضور خودروهای الکتریکی به عنوان مصرف‌کننده انرژی الکتریکی می‌تواند روند مصرف توان در شبکه را تغییر دهد اما خودروهای الکتریکی دارای قابلیت خودرو به شبکه<sup>۲</sup> (V2G) می‌توانند در صورت نیاز، انرژی ذخیره‌شده در باتری خود را به شبکه تزریق کنند. این خودروها قادرند تغییرات توان تولیدی مربوط به منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی را جبران نمایند، مانع از روشن شدن واحدهای حرارتی گران شوند و هزینه بهره‌برداری شبکه را کاهش دهند. محققان در زمینه تأثیر خودروهای الکتریکی بر شبکه هوشمند عمدتاً بر ارتباط بین سیستم ذخیره انرژی خودرو و بهبود وضعیت شبکه متمرکز شده‌اند [۱]. خودروهای الکتریکی دارای قابلیت V2G می‌توانند در ارائه خدمات جانبی به شبکه نیز نقش مؤثری داشته باشند [۴-۲]. تأثیر حضور خودروهای الکتریکی دارای قابلیت V2G بر شبکه توزیع و نیز تنظیم فرکانس در [۷-۵] بررسی شده است. با این حال، خودروهای الکتریکی نمی‌توانند به تنهایی و به طور کامل مسئله انتشار گازهای گلخانه‌ای را حل کنند؛ زیرا برای حرکت، نیاز به انرژی الکتریکی دارند که تولید آن در نیروگاه‌های حرارتی، خود یکی از اصلی‌ترین منابع انتشار آلودگی است؛ بنابراین کارآرایی خودروهای الکتریکی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تا حد زیادی به استفاده حداکثری از منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت بستگی خواهد داشت.

هدف از برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی، تعیین برنامه روشن و خاموش شدن این واحدها با هدف به حداقل رساندن هزینه بهره‌برداری و با رعایت محدودیت‌های این واحدها و شبکه قدرت است [۸]. برای حل این مسئله روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی دینامیکی<sup>۳</sup>، لیست تقدم<sup>۴</sup>، آزادسازی لاگرانژ<sup>۵</sup>، برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح<sup>۶</sup> (MILP)، منطق فازی<sup>۷</sup>، جستجوی ممنوع<sup>۹</sup> [۹]، الگوریتم کلونی مورچگان<sup>۸</sup> [۱۰]، الگوریتم ژنتیک<sup>۹</sup> [۱۱]، شبکه عصبی، بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۱۰</sup> [۱۲]، عکس‌العمل شیمیایی<sup>۱۱</sup> [۱۳] و الگوریتم جهش قورباغه<sup>۱۲</sup> [۱۴] پیشنهاد شده‌اند.

در [۱۵] یک مدل غیرخطی آمیخته با عدد صحیح برای برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی در یک شبکه هوشمند دارای منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای الکتریکی دارای قابلیت V2G با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی پیشنهاد

<sup>1</sup> Electric vehicle

<sup>2</sup> Vehicle to grid

<sup>3</sup> Dynamic programming

<sup>4</sup> Priority list

<sup>5</sup> Lagrange relaxation

<sup>6</sup> Mixed integer linear programming

<sup>7</sup> Fuzzy logic

<sup>8</sup> Ant colony

<sup>9</sup> Genetic algorithm

<sup>10</sup> Particle swarm optimization

<sup>11</sup> Chemical reaction

<sup>12</sup> Shuffled frog leaping algorithm

شده است. در [۱۶] مسئله مشارکت واحدها با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی بهینه شده است ولی تأثیر منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه قدرت در نظر گرفته نشده است. همچنین با توجه به استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ازدحام ذرات هیبرید<sup>۱</sup> (HPSO)، زمان انجام محاسبات آن، طولانی شده است. در [۱۷] مسئله پخش بار بهینه در یک ریزشبکه و در حضور خودروهای الکتریکی و منابع تولید پراکنده از دید مالک نیروگاه مجازی بهینه شده است ولی در مورد مدل‌سازی مشارکت واحدهای حرارتی و استفاده از منابع تجدیدپذیر بحث نشده است. در [۱۸] مشارکت واحدهای تولیدی در حضور خودروهای الکتریکی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی دقیق تقاضای بار شبکه برنامه‌ریزی شده است ولی از منابع انرژی تجدیدپذیر در این شبکه استفاده نشده است. در [۱۹] مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای تولیدی با تمرکز بر سطح نفوذ خودروها و مسیر روزانه آن‌ها بهینه شده است ولی عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضای شبکه و نیز استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است. در [۲۰] تأثیر حضور خودروهای الکتریکی در برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی به منظور حداقل کردن هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در توان تولیدی نیروگاه‌های بادی ارزیابی شده است ولی نیروگاه‌های خورشیدی و عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضای بار شبکه در مدل پیشنهادی لحاظ نشده است. در [۲۱] مسئله مشارکت واحدها به صورت خطی و به روش تکرار حل شده است ولی حضور خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته نشده است. در [۲۲] مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی منابع انرژی تجدیدپذیر و با استفاده از الگوریتم PSO مطالعه شده است که به دلیل بزرگ بودن فضای جستجو، زمان حل مسئله طولانی شده است.

در [۲۳] یک مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح برای حل مسئله مشارکت واحدهای حرارتی به صورت تصادفی و چند هدفه با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی قابل اتصال به شبکه، برنامه پاسخگویی بار، سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده و منابع تولید تجدیدپذیر پیشنهاد شده است. در این مقاله از ترکیب بهینه‌سازی لکزیکوگرافی<sup>۲</sup> و روش محدودیت اپسیلون<sup>۳</sup> برای به دست آوردن جواب‌های بهینه پارتو استفاده شده است. در [۲۴] یک الگوریتم ترکیبی سلسله مراتبی جدید برای حل مسئله مشارکت واحدها با استفاده از لیست اولویت برای تولید جمعیت اولیه جواب‌ها ارائه شده است. در [۲۵] تأثیر عدم قطعیت در پیش‌بینی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و نیز خودروهای الکتریکی در مسئله مشارکت واحدهای حرارتی بررسی شده است. در این مقاله یک الگوریتم فرا ابتکاری ترکیبی شامل بهینه‌سازی ازدحام ذرات، الگوریتم تکامل تقاضای خودتنظیمی<sup>۴</sup> و روش تکرار  $\lambda$  برای تعیین هم‌زمان حالت در مدار قرار گرفتن و میزان توان واحدها، نیز تعیین توان شارژ و دشارژ خودروها در افق برنامه‌ریزی روز بعد معرفی شده است. مرجع [۲۶] یک الگوریتم ابتکاری سریع بر اساس لیست اولویت پیشنهاد داده و مسئله مشارکت واحدها را به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی حل کرده است. البته در هیچ کدام از مقالات مورد اشاره، مسئله انتشار آلاینده‌ها در اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی در نظر گرفته نشده است.

<sup>1</sup> Hybrid Particle swarm optimization

<sup>2</sup> Lexicographic

<sup>3</sup> Augmented-weighted  $\epsilon$ -constraint

<sup>4</sup> Self-adaptive differential evolution method

در این مقاله، یک مدل خطی و احتمالی با دو تابع هدف متفاوت شامل حداقل کردن هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌گی به منظور بهینه‌سازی برنامه مشارکت واحدهای حرارتی در حضور خودروهای الکتریکی، ارائه شده است. از نوآوری‌های این مقاله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ارائه یک مدل خطی آمیخته با عدد صحیح برای بهینه‌سازی برنامه مشارکت واحدهای حرارتی
  - بررسی تأثیر مدیریت شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی بر مسئله بهینه‌سازی برنامه مشارکت واحدهای حرارتی
  - در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و بار شبکه
- برای کاهش زمان محاسبات، تعداد سناریوهای توان تولیدی منابع تجدیدپذیر و بار شبکه با به کارگیری روش فاصله احتمالی<sup>۱</sup> کاهش یافته است. فرض شده است که یک تجمیع‌کننده خودرو (بهره‌بردار شبکه قدرت)، مدیریت و هماهنگی زمان ورود و خروج خودروهای الکتریکی از پارکینگ‌ها را بر عهده دارد. مدل MILP پیشنهادی با توجه به تعریف خطی تابع هدف و قیود، رسیدن به پاسخ بهینه سراسری را تضمین و زمان حل مسئله را کاهش می‌دهد.
- این مقاله در ادامه از بخش‌های زیر تشکیل شده است: در بخش دوم، مسئله مشارکت واحدها به صورت خطی و با تعریف تابع هدف و قیود موردنیاز مدل شده است. در بخش سوم، توابع توزیع احتمال مربوط به هر یک از عدم قطعیت‌ها، معرفی شده و نحوه تولید و کاهش سناریوها تشریح شده است. در بخش چهارم، مسئله مشارکت واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، شبیه‌سازی و در بخش پنجم نتیجه‌گیری انجام شده است.

## ۲- مدل‌سازی مسئله مشارکت واحدها

در این مقاله حداقل کردن مجموع هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها توسط نیروگاه‌های حرارتی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. هزینه بهره‌برداری هر واحد حرارتی به صورت مجموع هزینه سوخت و هزینه راه‌اندازی محاسبه شده است. با توجه به امکان تحقق سناریوهای مختلف برای توان تولیدی بادی و خورشیدی و مقدار بار شبکه، تابع هدف مسئله به صورت (۱) تعریف می‌شود:

$$OF = \sum_i^{Ng} \sum_t^T \sum_s^{Ns} \rho_s (\omega_1 [FC_{its} + SC_{it}] + \omega_2 \psi_i EC_{its}) \quad (1)$$

که  $\omega_1$  و  $\omega_2$  ضرایب وزنی مربوط به هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها،  $\rho_s$  احتمال وقوع سناریوی  $s$ ام و  $\psi_i$  ضریب وزنی یا جریمه انتشار آلاینده‌ها است که جهت هم‌وزن کردن هزینه‌های بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها به کار می‌رود و به صورت رابطه (۲) تعریف شده است.

$$\psi_i = \frac{C_i^{\max}}{e_i^{\max}} \quad (2)$$

که  $C_i^{\max}$  و  $e_i^{\max}$ ، به ترتیب هزینه تولید و میزان انتشار آلاینده‌گی در حداکثر توان تولیدی واحد  $i$ ام می‌باشند.

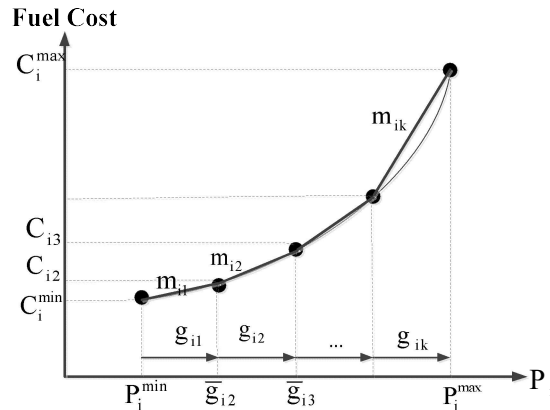
<sup>1</sup> Probability distance

## ۲-۱- هزینه بهره‌برداری

هزینه بهره‌برداری واحدهای حرارتی شامل هزینه راه‌اندازی و هزینه سوخت است. هزینه سوخت واحد تولیدی  $i$  ام به صورت یک تابع درجه دوم از توان تولیدی آن واحد بیان می‌شود [۲۷]:

$$FC_{its} = a_i P_{its}^2 + b_i P_{its} + c_i \quad (۳)$$

که  $a_i$ ،  $b_i$  و  $c_i$  ضرایب تابع هزینه سوخت واحد  $i$  ام هستند. برای خطی‌سازی مدل پیشنهادی طبق شکل (۱)، تابع هزینه به چند بخش خطی تقریب زده می‌شود:



شکل ۱. خطی‌سازی منحنی درجه دوم

برای خطی‌سازی منحنی درجه دوم هزینه سوخت از روابط زیر استفاده شده است:

$$FC_{its} = C_i^{\min} U_{it} + \sum_{k=1}^{N_k} m_{ik} g_{ikts} \quad \forall i, t, s \quad (۴)$$

$$0 \leq g_{ik} \leq \frac{P_i^{\max} - P_i^{\min}}{N_k} \quad \forall i, k \quad (۵)$$

$$m_{ik} = \frac{N_k (C_{ik+1} - C_{ik})}{(P_i^{\max} - P_i^{\min})} \quad \forall i, k \quad (۶)$$

$$C_{ik} = a_i \bar{g}_{ik}^2 + b_i \bar{g}_{ik} + c_i \quad \forall i, k \quad (۷)$$

$$\bar{g}_{ik} = P_i^{\min} + (k-1) \frac{P_i^{\max} - P_i^{\min}}{N_k} \quad \forall i, k \quad (۸)$$

که  $m_{ik}$  شیب بخش  $k$  ام از مشخصه خطی شده هزینه تولید واحد  $i$  ام و  $g_{ik}$  توان تولیدی بخش  $k$  ام واحد  $i$  ام است. در این مقاله، فواصل توان تولیدی جهت خطی‌سازی منحنی درجه دوم به صورت برابر در نظر گرفته شده است [۲۷]. توان تولیدی واحد  $i$  ام در زمان  $t$  و سناریو  $s$  نیز از رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید:

$$P_{its} = P_i^{\min} U_{it} + \sum_{k=1}^{N_k} g_{ikts} \quad \forall i, t, s \quad (۹)$$



قید محدودیت توان تولیدی واحدها در (۱۰) بیان شده است:

$$U_{it}.P_i^{\min} \leq P_{its} \leq U_{it}.P_i^{\max} \quad \forall i, t, s \quad (10)$$

برای رعایت قیود حداقل زمان خاموش و روشن بودن واحدها روابط (۱۱) الی (۱۴) تعریف شده‌اند:

$$U_{it} - U_{it-1} \leq V_{it} \quad \forall i, t \quad (11)$$

$$U_{it} - U_{it-1} = V_{it} - W_{it} \quad \forall i, t \quad (12)$$

$$\sum_{h=t-mut_i+1}^t V_{ih} \leq U_{it} \quad \forall i, t \geq mut_i \quad (13)$$

$$\sum_{h=t-mdt_i+1}^t W_{ih} \leq 1 - U_{it} \quad \forall i, t \geq mdt_i \quad (14)$$

متغیرهای  $V$  و  $W$  که بیان‌کننده زمان روشن و خاموش شدن واحدهای حرارتی هستند در واقع باید به صورت باینری تعریف شوند اما برای کاهش تعداد متغیرهای باینری و در نتیجه کاهش زمان حل مسئله، به صورت یک متغیر حقیقی در محدوده صفر و یک تعریف شده‌اند ولی با توجه به قیود مسئله، در نهایت، یکی از مقادیر صفر و یک برای این متغیرها به دست خواهد آمد. با توجه به مدت‌زمانی که یک واحد حرارتی قبل از روشن شدن، در حالت خاموش قرار داشته است یکی از دو حالت راه‌اندازی گرم و سرد برای محاسبه هزینه راه‌اندازی در نظر گرفته می‌شود لذا هزینه راه‌اندازی واحدها به صورت (۱۵) تعریف شده است:

$$SC_{it} = \begin{cases} hcost & t < t_i^{cold} \\ ccost & t \geq t_i^{cold} \end{cases} \quad (15)$$

با توجه به اینکه مدل پیشنهادی این مقاله، یک مدل خطی است. بنابراین رابطه (۱۵) با استفاده از روابط (۱۶) الی (۱۸) خطی شده است:

$$V_{it} = S_{it}^{cold} + S_{it}^{hot} \quad (16)$$

$$U_{it} - \sum_{h=t-t_i^{cold}}^{t-1} U_{ih} \leq S_{it}^{cold} \quad (17)$$

$$SC_{it} = S_{it}^{cold} ccost_i + S_{it}^{hot} hcost_i \quad (18)$$

رابطه (۱۶) بیان می‌کند که راه‌اندازی یک واحد حرارتی به دو صورت راه‌اندازی گرم و یا سرد انجام می‌شود. با توجه به (۱۷)، در صورت راه‌اندازی یک واحد حرارتی در ساعت  $t$ ام، اگر این واحد برای مدت‌زمان  $t_i^{cold}$  قبل از لحظه راه‌اندازی، خاموش باشد این واحد به صورت سرد راه‌اندازی می‌شود. با توجه به راه‌اندازی گرم و یا سرد واحد  $t$ ام در ساعت  $t$ ام، هزینه راه‌اندازی آن واحد در ساعت  $t$ ام طبق رابطه‌ی (۱۸) محاسبه می‌شود.

## ۲-۲- انتشار آلاینده‌ها

میزان انتشار آلاینده‌ها معمولاً به صورت تابعی از میزان توان تولیدی واحدهای حرارتی بیان می‌شود. در این مقاله از یک تابع درجه دوم برای نمایش تابع انتشار آلاینده‌ها استفاده شده است [۲۹]:

$$EC_{its} = \alpha_i P_{its}^2 + \beta_i P_{its} + \gamma_i \quad (19)$$

که  $\alpha_i$ ،  $\beta_i$  و  $\gamma_i$  ضرایب انتشار آلاینده واحد تولیدی نام هستند.

برای خطی‌سازی منحنی درجه دوم انتشار آلاینده‌گی نیز از روابط مشابه روابط خطی‌سازی منحنی درجه دوم هزینه سوخت استفاده شده است. روابط (۲۰) الی (۲۲) تابع انتشار آلاینده‌ی خطی شده را بیان می‌کنند.

$$EC_{its} = e_i^{\min} U_{it} + \sum_{k=1} m e_{ik} \cdot g_{ikts} \quad (20)$$

$$m e_{ik} = \frac{(e_{ik+1} - e_{ik}) N_E}{(p_i^{\max} - p_i^{\min})} \quad (21)$$

$$e_{ik} = \alpha_i + \beta_i \cdot \bar{g}_{ik} + \gamma_i \cdot \bar{g}_{ik}^2 \quad (22)$$

در این مقاله فرض شده که تعداد تکه‌های خطی‌سازی برای هر دو تابع هزینه سوخت و انتشار آلاینده‌ها برابر باشد. البته این فرض را می‌توان به‌سادگی و با در نظر گرفتن تعداد تکه‌های متفاوت برای هر کدام از این توابع اصلاح نمود.

در یک شبکه قدرت شامل خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر، توان تولیدشده باید تقاضای بار شبکه را برآورده کند. خودروهای الکتریکی می‌توانند به‌عنوان بار الکتریکی و یا منبع انرژی در نظر گرفته شوند. با توجه به اینکه در این مقاله، توپولوژی شبکه الکتریکی در نظر گرفته نشده است بنابراین رابطه برابری تولید و مصرف به‌صورت (۲۳) بیان شده است [۳۰]:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{its} + P_{ts}^{solar} + P_{ts}^{wind} + N_t^{EV\_source} \cdot P^{EV} \cdot (\psi_{pre} - \psi_{dep}) = P_{ts}^D + N_t^{EV\_load} \cdot P^{EV} \cdot (\psi_{dep} - \psi_{pre}) \quad \forall t, s \quad (23)$$

در این مقاله فرض شده است که با توجه به صفر بودن هزینه تولید منابع تجدیدپذیر، از توان تولیدی آنها به‌طور کامل استفاده می‌شود. ظرفیت باتری‌های مورد استفاده در خودروهای الکتریکی نیز برابر در نظر گرفته شده است.

جهت حفظ قابلیت اطمینان شبکه در مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی، این واحدها به‌گونه‌ای در مدار قرار می‌گیرند که علاوه بر تأمین تقاضای بار شبکه، مقداری رزرو چرخان هم در شبکه وجود داشته باشد که این رزرو چرخان در ساعت  $t$  به میزان درصدی از تقاضای بار در آن ساعت در نظر گرفته می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{N_g} U_{it} \cdot P_i^{\max} + P_{ts}^{solar} + P_{ts}^{wind} + N_t^{EV\_source} \cdot P^{EV} \cdot (\psi_{pre} - \psi_{min}) \geq R(1 + P_{ts}^D) + N_t^{EV\_load} \cdot P^{EV} \cdot (\psi_{dep} - \psi_{pre}) \quad \forall t, s \quad (24)$$

## ۲-۳- مدل‌سازی حضور خودروهای الکتریکی

در این مقاله فرض شده است که یک تجمیع‌کننده خودرو (بهره‌بردار شبکه قدرت)، قادر به هماهنگی و مدیریت تعداد مشخصی از خودروهای الکتریکی برای شرکت در شبکه به صورت G2V و V2G است. با مدیریت این تجمیع‌کننده، مالکان خودروهایی که در برنامه شارژ و دشارژ هماهنگ شرکت می‌کنند موظف خواهند شد در طول شبانه‌روز در ساعات مشخصی که تجمیع‌کننده اعلام می‌کند یک‌بار برای شارژ و یک‌بار هم برای دشارژ در پارکینگ‌ها حاضر شوند بنابراین تعداد کل خودروهایی که در طول شبانه‌روز برای شارژ و دشارژ در پارکینگ‌ها حاضر می‌شوند با هم برابر است. این مسئله را می‌توان به‌صورت (۲۵) نشان داد:

$$\sum_{t=1}^T N_t^{EV\_source} = \sum_{t=1}^T N_t^{EV\_load} = N^{EV\_total} \quad (25)$$

با توجه به محدودیت فضای پارکینگ‌ها، حداکثر تعداد خودروهایی که می‌توانند در هر ساعت وارد پارکینگ‌ها شوند با روابط زیر محدود شده‌اند:

$$N_t^{EV\_source} \leq N_t^{EV\_max} \quad (26)$$

$$N_t^{EV\_load} \leq N_t^{EV\_max} \quad (27)$$

### ۳- مدل‌سازی عدم قطعیت در پیش‌بینی بار و منابع انرژی تجدیدپذیر

در این مقاله عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر باد و خورشید و نیز تقاضای بار سیستم در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عدم قطعیت‌ها از سناریوهای گسسته استفاده شده است. برای مدل‌سازی مقدار توان باد معمولاً از تابع توزیع احتمال ویبول<sup>۱</sup> استفاده می‌شود [۳۱]:

$$PDF(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (28)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \quad (29)$$

$$c = \frac{\mu}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (30)$$

که  $k$  پارامتر شکل<sup>۲</sup>،  $C$  پارامتر مقیاس<sup>۳</sup>،  $V$  سرعت باد،  $\Gamma$  ضریب گاما،  $\mu$  میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار پارامترهای عدم قطعیت است. تابع توزیع تجمعی<sup>۴</sup> ویبول به صورت (۳۱) تعریف می‌شود:

$$CDF(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (31)$$

با استفاده از تابع توزیع ویبول و تولید اعداد تصادفی به تعداد دلخواه می‌توان سرعت‌های باد متناظر با آنها را تعیین و توان خروجی را از روی آنها محاسبه نمود. توان خروجی توربین بادی، تابعی از سرعت باد است که به صورت (۳۲) تعریف می‌شود [۲۹-۳۱]:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{cut\ in} \\ P_{rated} \left(\frac{v - v_{cut\ in}}{v_{rated} - v_{cut\ in}}\right) & v_{cut\ in} \leq v \leq v_{rated} \\ P_{rated} & v_{rated} \leq v \leq v_{cut\ out} \end{cases} \quad (32)$$

که  $P(v)$  توان خروجی توربین بادی در سرعت  $v$  و  $v_{cut\ in}$ ،  $v_{rated}$  و  $v_{cut\ out}$  به ترتیب سرعت قطع پایین، سرعت نامی و سرعت قطع بالای توربین بادی هستند.

برای تولید سناریوهای پیش‌بینی توان خورشیدی از تابع چگالی احتمال بتا<sup>۵</sup> استفاده شده که به صورت (۳۳) تعریف می‌شود [۳۱]:

<sup>1</sup> Weibull

<sup>2</sup> Shape parameter

<sup>3</sup> Scale parameter

<sup>4</sup> Cumulative distribution function

<sup>5</sup> Beta probability density function

$$PDF(p) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} p^{\alpha-1} (1-p)^{\beta-1} & 0 \leq p \leq 1 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (33)$$

$$\beta = (1-\mu) \left( \frac{\mu(1+\mu)}{\sigma^2} - 1 \right) \quad (34)$$

$$\alpha = \frac{\mu\beta}{1-\mu} \quad (35)$$

در آن  $p$  توان تولیدی خورشیدی و ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایب مثبت تابع بتا هستند.

برای تولید سناریوهای مربوط به میزان تقاضای بار، از تابع چگالی احتمال نرمال<sup>۱</sup> استفاده شده که به صورت (۳۶) تعریف می‌شود [۲۹].

$$PDF(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (36)$$

که  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب مقدار میانگین و انحراف معیار پیش‌بینی تقاضای بار شبکه هستند.

سناریوهای تولیدشده برای تقاضای بار الکتریکی و توان‌های تولیدی باد و خورشید، را با هم ترکیب نموده و که احتمال هر سناریوی ترکیبی، از حاصل ضرب احتمال سناریوهای مستقل به دست می‌آید:

$$\rho = \rho_D \times \rho_w \times \rho_{pv} \quad (37)$$

$\rho$  احتمال وقوع سناریوی ترکیبی و  $\rho_D$ ،  $\rho_w$  و  $\rho_{pv}$  به ترتیب احتمال وقوع هر یک از سناریوهای مستقل بار و توان باد و خورشید است.

### ۳-۱- کاهش سناریو

زیاد بودن تعداد سناریوها موجب پیچیدگی مسئله و افزایش زمان محاسبات خواهد شد. لذا در این مقاله، به منظور کاهش زمان محاسبات، تعداد سناریوها با استفاده از نظریه فاصله احتمالی کاهش یافته است که ضمن کاهش تعداد سناریوها، اطلاعات تصادفی سناریوها نیز تا حد امکان حفظ شود. در روش فاصله احتمالی، شاخص تصمیم‌گیری در مورد حذف یک سناریو، فاصله کانتروویج نامیده می‌شود. شاخص فاصله کانتروویج برابر حاصل ضرب فاصله سناریوی کاندیدا حذف‌شدن تا هر یک از سناریوهای دیگر در احتمال وقوع سناریوی کاندیدا حذف است. علت ضرب نمودن فاصله دو سناریو در احتمال وقوع آن، به دلیل کوچک بودن فاصله بین دو سناریو، می‌باشد اما به دلیل احتمال وقوع بالای سناریو، حذف آن می‌تواند تأثیر زیادی بر روی نتایج داشته باشد. روش فاصله کانتروویج به دو دسته پیشرو و پسرو تقسیم می‌شود. در روش انتخاب پیشرو، در هر مرحله یک سناریو از میان سناریوهای باقیمانده انتخاب می‌شود و به مجموعه سناریوهای نهایی، اضافه می‌گردد. ولی در روش کاهش پسرو، یک سناریو از میان سناریوهای باقیمانده حذف می‌شود تا زمانی که تعداد سناریوها به مقدار مورد نظر برسد (در این مقاله از روش انتخاب پیشرو استفاده شده است) [۳۲].

<sup>1</sup> Normal probability density function

## ۴- شبیه‌سازی

مدل پیشنهادی موردنظر روی یک سیستم قدرت با ده واحد تولیدی حرارتی پیاده‌سازی شده است که مجموع ظرفیت تولیدی واحدهای حرارتی برابر ۱،۶۶۲ مگاوات و بار پیک شبکه برابر ۱،۵۰۰ مگاوات است. جزییات اطلاعات واحدها در جدول (۸) پیوست این مقاله و مراجع [۱۶،۳۳] آمده است. به‌منظور خطی سازی توابع درجه دوم هزینه سوخت و انتشار آلاینده‌ها، این توابع به ده تکه خطی تقسیم شده‌اند. فرض شده است که حداکثر ظرفیت تولید توان بادی و خورشیدی در این سیستم، به ترتیب برابر ۲۵/۵ و ۴۰ مگاوات باشند. برنامه‌ریزی مشارکت واحدهای حرارتی برای یک شبانه‌روز انجام شده است که در زمان شروع برنامه فقط واحدهای ۱ و ۲ در مدار بوده و بقیه واحدها خاموش هستند. همچنین فرض شده است که ضرایب وزنی  $w_1$  و  $w_2$  در تابع هدف مدل پیشنهادی برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده‌اند. مشخصات مربوط به خودروهای الکتریکی در جدول (۱) آورده شده است:

جدول ۱. مشخصات خودروهای الکتریکی [۲۲]

$\psi_{pre}$	%۹۰	$P^{EV}$	۱۵ kWh
$\psi_{dep}$	%۵۰	$N^{EV}_{total}$	۵۰,۰۰۰
$\psi_{min}$	%۴۰	$N^{EV}_{max}$	۵,۰۰۰
$\xi$	%۸۵		

مدل پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS، شبیه‌سازی شده و نتایج آن مورد تحلیل قرار گرفته است. برای ارزیابی نتایج برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها و حضور خودروهای الکتریکی، مدل پیشنهادی در چهار حالت مختلف تحلیل شده است:

- حالت اول: حل مسئله مشارکت واحدهای حرارتی بدون حضور خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت بار سیستم
- حالت دوم: حل مسئله مشارکت واحدهای حرارتی در حضور خودروهای الکتریکی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت بار سیستم
- حالت سوم: حل مسئله مشارکت واحدهای حرارتی با حضور خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و بار سیستم
- حالت چهارم: حل مسئله مشارکت واحدها با حضور خودروهای الکتریکی و منابع بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی توان‌های بادی و خورشیدی و بار سیستم.

لازم به ذکر است که جهت مقایسه و راستی آزمایی نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی این مقاله و مقاله مرجع [۱۶]، حداقل رزرو چرخان موردنیاز شبکه در حالت اول برابر ۱۰٪ بار آن ساعت در نظر گرفته شده است ولی در حالت‌های دوم تا چهارم و با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی بار شبکه، مجموع حداکثر ظرفیت واحدهای حرارتی، توانایی تأمین این مقدار رزرو را نخواهد داشت؛ بنابراین حداقل رزرو چرخان موردنیاز شبکه در حالت‌های دوم تا چهارم برابر ۹٪ بار آن ساعت در نظر گرفته شده است.

**حالت اول:** نتایج مربوط به برنامه روشن و خاموش شدن و توان تولیدی هر یک از واحدهای حرارتی در جدول (۲) نشان داده شده است. در این حالت، هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها در ۲۴ ساعت به ترتیب برابر ۵۸۹،۳۱۴ دلار و ۲۰۰،۶۰۱ تن به‌دست آمده است. مطابق (۱)، مقدار تابع هدف در این حالت برابر ۱،۰۶۰،۶۸۲ دلار تعیین شده است. هزینه بهره‌برداری میزان

جدول ۲. مشارکت واحدها در حالت اول (بدون در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر)

واحد ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	هزینه تولید (دلار)	انتشار آلاینده‌ها (تن)	بار (مگاوات)	رزرو چرخان (مگاوات)
۱	۳۰۲/۵	۳۰۰/۵	۰	۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵۵۴۶/۴	۴۷۹۱/۵۲	۷۰۰	۳۴۰
۲	۳۰۲/۵	۲۷۲	۸۶	۸۹/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷۰۴۵/۱۵	۴۶۳۷/۸۷	۷۵۰	۴۲۰
۳	۲۹۸/۸	۲۷۲	۸۶	۸۶	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۲۳۲/۷	۴۸۶۸/۷۸	۸۵۰	۴۸۲
۴	۳۳۳	۳۰۲/۵	۹۷	۹۷	۱۲۰/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۱۷۵/۰۵	۶۰۹۷/۴۲	۹۵۰	۳۸۲/۳
۵	۳۳۳	۳۳۳	۱۰۵	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۰۳۹/۷۷	۶۷۵۰/۷۹	۱۰۰۰	۳۳۲/۱
۶	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۱۳/۶	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۷۲۶/۰۷	۸۶۳۳/۹۲	۱۱۰۰	۲۳۲
۷	۳۹۴	۳۸۳/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۶۳۷/۳۲	۹۲۴۶/۵۲	۱۱۵۰	۱۸۲
۸	۴۲۴/۵	۴۰۲/۹	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴۴۸۴/۴۲	۱۰۳۸۰/۹۸	۱۲۰۰	۱۳۲
۹	۳۹۴	۳۸۰/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۰	۰	۰	۲۹۱۵۰/۴	۹۷۱۱	۱۳۰۰	۱۹۷
۱۰	۴۲۴/۵	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳/۹	۵۵	۰	۰	۳۱۲۱۷/۳	۱۰۹۶۲/۳۹	۱۴۰۰	۱۵۲
۱۱	۴۲۰/۴	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۵۵	۵۵	۰	۳۳۲۹۵/۸	۱۱۱۳۸/۱۴	۱۴۵۰	۹۴۵
۱۲	۴۱۵/۴	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۵۵	۵۵	۵۵	۳۵۴۱۶/۶	۱۱۳۰۵/۶	۱۵۰۰	۱۶۲
۱۳	۴۲۴/۵	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳/۹	۵۵	۰	۰	۳۱۱۵۷/۲	۱۰۹۶۲/۳۹	۱۴۰۰	۱۵۲
۱۴	۳۹۴	۳۸۰/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۰	۰	۰	۲۸۲۹۰/۴	۹۷۱۱	۱۳۰۰	۱۹۷
۱۵	۴۲۴/۵	۴۰۲/۹	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴۴۸۴/۴۲	۱۰۳۸۰/۹۸	۱۲۰۰	۱۳۲
۱۶	۳۶۳/۵	۳۴۹/۶	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۸۸۳/۱۹	۷۶۷۷/۶۴	۱۰۵۰	۲۸۲
۱۷	۳۳۳	۳۳۳	۱۰۵/۱	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۰۳۹/۷۷	۶۷۵۰/۷۹	۱۰۰۰	۳۳۲
۱۸	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۱۳/۶	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۷۲۶/۰۷	۸۶۳۳/۹۲	۱۱۰۰	۲۳۲
۱۹	۳۶۳/۵	۳۵۲/۶	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	۶۷	۰	۰	۰	۲۷۳۳۴/۱۱	۸۲۴۷/۹	۱۲۰۰	۲۹۷
۲۰	۴۲۴/۵	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳/۹	۵۵	۰	۰	۳۱۲۱۷/۳۱	۱۰۹۶۲/۳۹	۱۴۰۰	۱۴۷
۲۱	۳۹۴	۳۸۰/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۰	۰	۰	۲۸۲۹۰/۴۳	۹۷۱۰/۹۹	۱۳۰۰	۱۹۷
۲۲	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۱۳/۶	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۷۲۶/۰۷	۸۶۳۳/۹۲	۱۱۰۰	۲۳۲
۲۳	۳۰۲/۵	۲۹۶/۳	۹۷	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۲۸۹/۷۵	۵۴۱۷/۶۱	۹۰۰	۴۳۲
۲۴	۳۰۲/۵	۲۹۳/۳	-	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶۹۰۸/۴۲	۴۹۸۶/۶۱	۸۰۰	۴۰۲
مجموع											۵۸۹,۳۱۴	۲۰۰,۶۰۱		

انتشار آلاینده‌ها و مقدار تابع هدف در [۱۶] به ترتیب برابر ۵۶۵,۳۲۴ دلار، ۲۶۰,۰۶۶ تن و ۱,۱۲۷,۵۹۹ دلار به دست آمده است که کاهش ۶٪ در مقدار تابع هدف، بیان‌کننده کارایی مدل ریاضی در حل مسئله مشارکت واحدها نسبت به روش PSO است. به دلیل خطی بودن مدل پیشنهادی، زمان اجرا کمتر از یک ثانیه است که در مقایسه با زمان ۸۲ ثانیه در [۱۶] کاهش بسیار چشمگیری داشته است.

**حالت دوم:** در این حالت که خودروهای الکتریکی در شبکه حضور دارند نتایج مربوط به توان تولیدی واحدها و نیز توان شارژ و دشارژ خودروهایی که باید در هر ساعت در پارکینگ حضور یابند در جدول (۳) نشان داده شده است. توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی نیز در شکل (۲) نمایش داده شده است. در نمایش توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی، علامت مثبت و منفی به ترتیب بیان‌کننده حالتی است که خودروهای الکتریکی به عنوان منبع تولید انرژی و بار مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

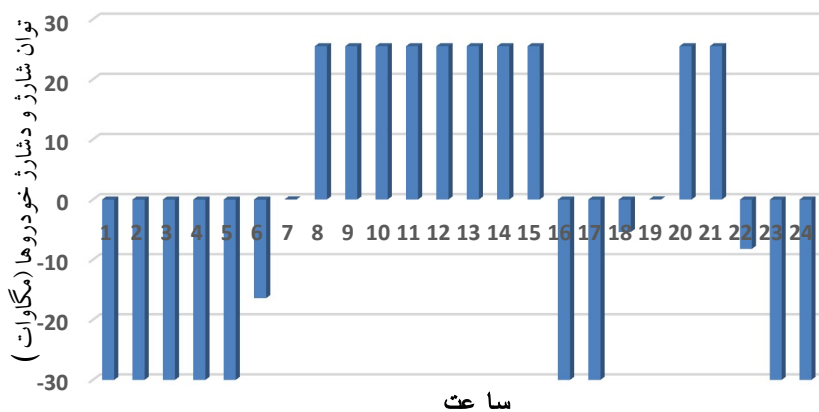
در این حالت هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها در ۲۴ ساعت برابر ۵۸۰,۰۱۳ دلار و ۲۰۷,۶۷۹ تن به دست آمده است که هزینه بهره‌برداری نسبت به حالت اول کمتر و انتشار آلاینده‌ها بیشتر شده است ولی مجموع هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها نسبت به حالت اول کمتر شده است. در این حالت، کاهش هزینه بهره‌برداری ناشی از حضور خودروهای الکتریکی در شبکه، شارژ خودروها در هنگام کم باری شبکه و سپس دشارژ آنها در ساعات پیک بار است که این امر موجب جلوگیری از روشن شدن واحدهای حرارتی گران‌تر خواهد شد. زمان اجرای برنامه نیز کمتر از یک ثانیه بوده است که در مقایسه با ۲۸ ثانیه‌ای که در [۱۶] به نتیجه رسیده است به‌طور قابل توجهی کمتر است.

جدول ۳. مشارکت واحدها در حالت دوم (با در نظر گرفتن حضور خودروهای الکتریکی)

واحد ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	هزینه تولید (دلار)	انتشار آلاینده‌ها (تن)	توان EV (مگاوات)	بار (مگاوات)	رزو چرخان (مگاوات)
۱	۳۳۰/۵	۳۰۲/۵	۰	۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۶۰۴۳/۱۳	۵۳۰۹/۲۱	-۳۰	۷۰۰	۳۱۰
۲	۳۰۲/۵	۲۷۲/۳	۰	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۸۳۵۹/۶۵	۴۶۷۷/۰۱	-۳۰	۷۵۰	۴۲۲
۳	۳۰۲/۵	۲۷۶/۳	۹۷	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۰۴۰/۹۸	۵۱۰۸/۰۱	-۳۰	۸۵۰	۴۵۸
۴	۳۳۳	۳۲۱/۱	۹۷	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۶۹۴/۲۵	۶۴۹۲/۳۸	-۳۰	۹۵۰	۳۵۲
۵	۳۶۰/۱	۳۳۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۵۳۶/۹	۷۲۹۱/۹۱	-۳۰	۱۰۰۰	۳۰۲
۶	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۰۰۵/۳۲	۸۷۵۶/۶۶	-۱۶/۴	۱۱۰۰	۲۱۵/۶
۷	۳۹۴	۳۸۳/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۶۳۷/۳۲	۹۲۴۶/۵۲	۰	۱۱۵۰	۱۸۲
۸	۴۰۷/۹	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴۰۵۳/۲۷	۹۷۹۲/۱۲	۲۵/۵	۱۲۰۰	۱۵۷/۵
۹	۴۲۴/۵	۳۹۷/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۶۹۲۴/۴۶	۱۰۴۸۹/۰۸	۲۵/۵	۱۳۰۰	۱۳۷/۵
۱۰	۴۲۴/۵	۴۱۸/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۹	۰	۰	۰	۳۰۱۴۸/۶۷	۱۱۲۸۵/۹۶	۲۵/۵	۱۴۰۰	۱۲۲/۵
۱۱	۴۲۴/۵	۴۱۳/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۹	۵۵	۰	۰	۳۱۶۹۹/۱۶	۱۱۴۲۶/۵۳	۲۵/۵	۱۴۵۰	۱۲۷/۵
۱۲	۴۲۴/۵	۴۰۸/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۹	۵۵	۵۵	۰	۳۳۷۸۳/۱۶	۱۱۵۸۴/۳۵	۲۵/۵	۱۵۰۰	۱۳۲/۵
۱۳	۴۲۴/۵	۴۱۸/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۹	۰	۰	۰	۲۹۶۲۸/۶۴	۱۱۲۸۵/۶۶	۲۵/۵	۱۴۰۰	۱۲۲/۵
۱۴	۴۲۴/۵	۳۹۷/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۶۵۸۴/۴۶	۱۰۴۸۹/۰۸	۲۵/۵	۱۳۰۰	۱۳۷/۵
۱۵	۴۰۷/۹	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴۰۵۳/۲۷	۹۷۹۲/۱۲	۲۵/۵	۱۲۰۰	۱۵۷/۵
۱۶	۳۷۹/۶	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۳۹۲/۶۲	۸۲۸۶/۸۸	-۳۰	۱۰۵۰	۲۵۲
۱۷	۳۶۰/۱	۳۳۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۵۳۶/۹	۷۲۹۱/۹۱	-۳۰	۱۰۰۰	۳۰۲
۱۸	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۱۹	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۸۱۷/۷۶	۸۶۷۴/۳۴	-۵/۴	۱۱۰۰	۲۲۶/۶
۱۹	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۵	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۵۶۱۶/۳	۹۰۰۹/۶۹	۰	۱۲۰۰	۲۱۲
۲۰	۴۱۷/۹	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۵۵	۵۵	۰	۳۰۸۰۵/۱۲	۱۰۷۸۷/۴۸	۲۵/۵	۱۴۰۰	۱۴۷/۵
۲۱	۴۲۴/۵	۳۹۷/۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۶۵۸۴/۴۶	۱۰۴۸۹/۰۸	۲۵/۵	۱۳۰۰	۱۳۷/۵
۲۲	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۱۰/۸	۱۱۹	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۸۶۵/۵۴	۸۶۹۵/۳۱	-۸/۲	۱۱۰۰	۲۲۳/۸
۲۳	۳۲۶/۳	۳۰۲/۵	۹۷	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۷۹۰/۴۴	۵۹۲۷/۳۱	-۳۰	۹۰۰	۴۰۲
۲۴	۳۲۳/۳	۳۰۲/۵	۰	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷۴۱۱/۹۴	۵۴۹۰/۵۹	-۳۰	۸۰۰	۳۷۲
مجموع											۵۸۰۰۱۳/۶۸	۲۰۷۶۷۹/۴۶			

**حالت سوم:** برای کاهش بیشتر هزینه بهره‌برداری و نیز کاهش انتشار آلاینده‌ها، استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌تواند راهکار

مؤثری باشد. در حالت سوم که خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر باد و خورشید در شبکه حضور دارند نتایج در جدول (۴) نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که در این مقاله، هیچ هزینه‌ای برای تولید انرژی از نیروگاه‌های بادی و خورشیدی در نظر گرفته نشده است و لذا همه توان تولیدی این نیروگاه‌های تجدیدپذیر در شبکه مصرف خواهد شد. در این حالت هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها در کل ۲۴ ساعت برابر ۵۶۴,۱۶۵ دلار و ۱۹۷,۶۵۹ تن به‌دست آمده است. با مقایسه نتایج مشخص است که در حضور منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در شبکه، هم هزینه بهره‌برداری و هم انتشار آلاینده‌ها نسبت به



شکل ۲. توان شارژ و دشارژ خودروهای برقی در حالت دوم

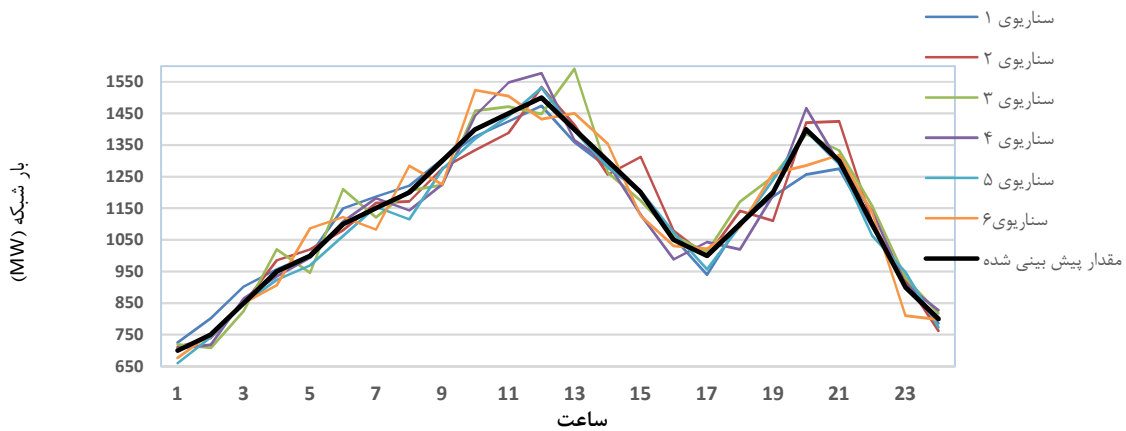
حالت‌های اول و دوم کاهش چشمگیری یافته است که این امر، استفاده از منابع تجدیدپذیر را در سیستم‌های قدرت توجیه خواهد کرد. در این حالت زمان اجرای برنامه در حدود ۲ ثانیه بوده است.

**جدول ۴. مشارکت واحدها در حالت سوم ( با در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و پیش‌بینی دقیق بار و تولید منابع**

**تجدیدپذیر)**

واحد ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	هزینه تولید (دلار)	انتشار آلاینده‌ها (تن)	توان خورشید (مگاوات)	توان بادی (مگاوات)	بار (مگاوات)	
۱	۳۱۹/۹۶	۳۰۲/۵	۰	۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵۸۶۹/۲۷	۵۱۲۶	-۳۰	۱۰/۵۴	۷۰۰	
۲	۳۰۲/۵	۲۷۲	۸۶/۲۳	۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷۱۲۵/۷	۴۶۷۸/۴۱	-۳۰	۰	۲۲/۲۷	۷۵۰
۳	۳۰۲/۵	۲۷۲	۸۶	۸۶/۸	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۳۰۷/۱۴	۴۹۳۰/۲۵	-۳۰	۰	۲۵/۵	۸۵۰
۴	۳۳۳	۳۰۲/۵	۹۷	/۱	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰۲۵۲/۷۱	۶۱۲۵/۱۳	-۳۰	۰	۲۵/۵	۹۵۰
۵	۳۳۴/۶	۳۳۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۱۱۵/۵۳	۶۸۰۰/۱۱	-۳۰	۰	۲۵/۵	۱۰۰۰
۶	۳۹۰/۶۶	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۵۷۵/۷	۸۵۲۱/۲۳	-۰/۷۴	۰	۲۵/۵	۱۱۰۰
۷	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۲۸/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۱۷۱/۲۹	۸۷۹۶/۵۳	۰	۰/۰۹	۲۵/۵	۱۱۵۰
۸	۳۹۴	۳۶۴/۹۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۳۱۴/۵۴	۸۸۵۵/۵۷	۲۵/۵	۱۷/۴۵	۲۵/۵	۱۲۰۰
۹	۴۲۴/۵	۴۲۰/۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۴۷۹۱/۷۸	۱۲۶	۲۵/۵	۳۱/۴۵	۲۵/۵	۱۳۰۰
۱۰	۳۹۴	۳۹۱/۳۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۰	۰	۰	۲۹۳۴۱/۸۳	۹۹۴۲/۸	۲۵/۵	۳۸/۰۶	۲۵/۵	۱۴۰۰
۱۱	۴۲۴/۵	۳۸۸/۴۷	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۹	۰	۰	۰	۲۹۴۲۸/۴۵	۱۱۰۲۲	۲۵/۵	۳۵/۹۳	۲۵/۵	۱۴۵۰
۱۲	۴۲۴/۵	۴۰۱/۱۲	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۹	۵۵	۰	۰	۳۱۴۸۴/۰۹	/۹۵	۲۵/۵	۳۶/۷۸	۲۵/۵	۱۵۰۰
۱۳	۳۹۷/۸۱	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۷۳	۰	۰	۰	۲۸۵۹۱/۵۴	/۱۵	۲۵/۵	۳۱/۵۹	۲۵/۵	۱۴۰۰
۱۴	۳۹۴	۳۹۳/۳۸	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۶۰۰۸/۲۹	۹۶۹۳/۰۹	۲۵/۵	۹/۷	۲۴/۸۲	۱۳۰۰
۱۵	۳۹۴	۳۷۴/۲۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۴۷۷/۰۷	۹۰۵۲/۴۲	۲۵/۵	۱۲/۹۲	۲۰/۷۴	۱۲۰۰
۱۶	۳۶۴/۹۸	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۱۵۰/۶	۷۹۷۷/۰۸	-۳۰	۰	۱۴/۶۲	۱۰۵۰
۱۷	۳۳۴/۶	۳۳۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۱۱۱۵/۵۳	۶۸۰۰/۱۱	-۳۰	۰	۲۵/۵	۱۰۰۰
۱۸	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۶۳۱	۸۵۹۲	-۱۳/۳۴	۰	۱۹/۰۴	۱۱۰۰
۱۹	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۰۸	/۱	۱۲۰/۹	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۵۱۶۹/۰۵	۸۸۲۷/۸۶	۰	۰	۲۵/۵	۱۲۰۰
۲۰	۳۹۹/۸۸	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۵۵	۵۵	۰	۳۰۵۰۶/۳	۳۴	۲۵/۵	۰	۱۸/۰۲	۱۴۰۰
۲۱	۴۰۲/۴	۳۹۴	۱۱۹	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	۰	۰	۰	۰	۲۶۱۵۸/۴۳	۹۹۰۰/۲۱	۲۵/۵	۰	۲۵/۵	۱۳۰۰
۲۲	۳۷۸/۱۸	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲۳۶۹/۱۱	۸۵۹۲/۰۲	-۱۵/۸۲	۰	۲۱/۴۲	۱۱۰۰
۲۳	۳۲۶/۳	۳۰۲/۵	۹۷	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹۷۹۰/۴۴	۵۹۲۷/۳۱	-۳۰	۰	۰	۹۰۰
۲۴	۳۲۰/۷۵	۳۰۲/۵	-	۹۷	۱۰۷/۲	۰	۰	۰	۰	۰	۱۷۳۶۹/۸۸	۵۴۴۶/۲۶	-۳۰	۰	۲/۵۵	۸۰۰
مجموع											۵۶۴۱۶۵	۱۹۷۶۵۹				

**حالت چهارم:** در این حالت و در حضور خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر، برای پیش‌بینی مقدار بار مصرفی شبکه در هر ساعت و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر عدم قطعیت در نظر گرفته شده است که مقادیر پیش‌بینی شده برای میزان بار شبکه و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در جدول (۹) پیوست مقاله و مرجع [۲۲] آورده شده است. همچنین مقدار انحراف

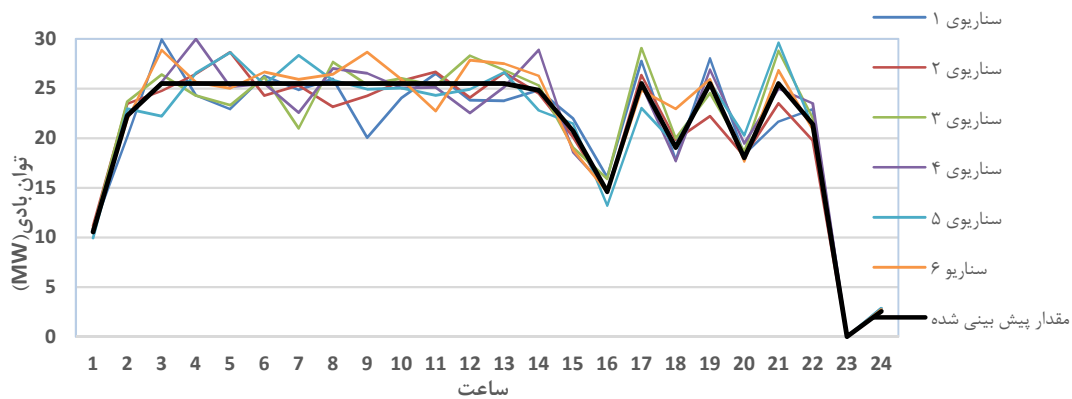


شکل ۳. سناریوهای پیش‌بینی بار شبکه

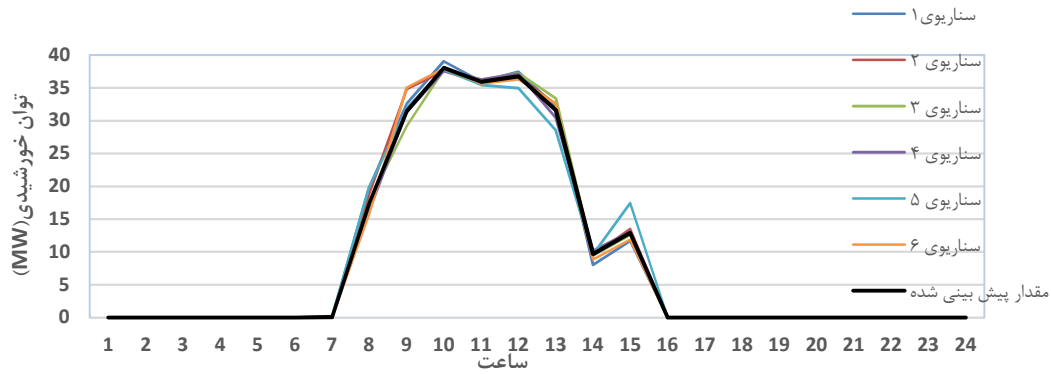


معیار در پیش‌بینی تقاضای بار و توان منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به ترتیب برابر ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد مقدار پیش‌بینی شده در هر ساعت در نظر گرفته شده است.

با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده و انحراف معیار مربوط به هر یک از پارامترهای بار شبکه و توان تولیدی منابع بادی و خورشیدی و با استفاده از توابع احتمال بیان شده در بخش سوم، تعداد ۱۰۰ سناریو برای هر پارامتر تولید شده است. به منظور افزایش سرعت و کاهش زمان محاسبات، تعداد سناریوهای تولید شده برای هر پارامتر با استفاده از نظریه فاصله احتمالی به ۶ سناریو کاهش یافته است. سناریوهای مستقل تولید شده در شکل‌های (۳) الی (۵) و احتمال وقوع هر یک در جدول (۵) نشان داده شده‌اند. سپس از ترکیب ۶ سناریوی موجود برای سه پارامتر بار شبکه و توان‌های بادی و خورشیدی، تعداد ۲۱۶ سناریو تولید شده است. در حالت چهارم که حضور خودروهای الکتریکی و عدم قطعیت در پیش‌بینی مقدار بار شبکه و منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی لحاظ شده‌اند نتیجه مشارکت واحدها در سناریوی اول در جدول (۶) آورده شده است.



شکل ۴. سناریوهای پیش‌بینی توان بادی

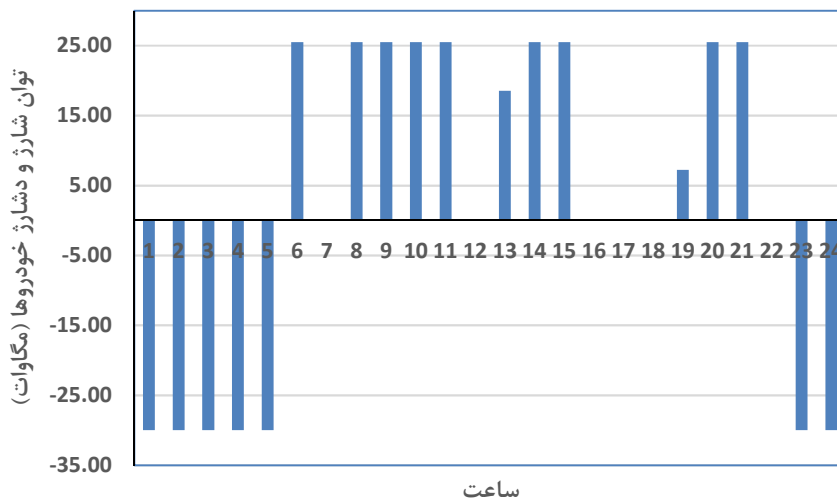


شکل ۵. سناریوهای پیش‌بینی توان خورشیدی

جدول ۵. احتمال وقوع سناریوهای مستقل توان تولیدی منابع تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و بار شبکه

سناریو	پارامتر	بادی	خورشیدی	بار شبکه
سناریوی ۱	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۱۱	
سناریوی ۲	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۱	
سناریوی ۳	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۸	
سناریوی ۴	۰/۰۸	۰/۱۹	۰/۱۳	
سناریوی ۵	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۵	
سناریوی ۶	۰/۲۷	۰/۱۷	۰/۰۸	

متغیر باینری  $U_{it}$  که تعیین‌کننده روشن و خاموش بودن هر واحد حرارتی در هر ساعت است مستقل از تحقق سناریوها در نظر گرفته شده است لذا زمان روشن و خاموش بودن هر واحد در هر یک از سناریوها یکسان خواهد بود، اما توان تولیدی واحدهای حرارتی در سناریو تغییر خواهد کرد. همچنین در این حالت، توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در هر ساعت، متغیرهای تصمیم‌گیری مستقل از تحقق سناریوها هستند و در صورت تحقق هر یک از سناریوها، برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروها تغییر نخواهد کرد. برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در هر ساعت در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶. توان شارژ و دشارژ خودروهای الکتریکی در حالت چهارم

با توجه به نتایج جدول (۶)، هزینه مورد انتظار بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها در ۲۴ ساعت به ترتیب برابر ۶۰۲,۵۳۳ دلار و ۱۸۵,۸۵۶ تن به دست آمده است که مقدار تابع هدف نسبت به حالت سوم افزایش یافته است. با توجه به اینکه توابع هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها به صورت درجه دوم در نظر گرفته شده‌اند بنابراین با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، افزایش بار شبکه در بعضی از سناریوها نسبت به کاهش بار در سناریوهای دیگر هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها را افزایش خواهد داد. در این حالت و با در نظر گرفتن تعداد ۲۱۶ سناریو، علیرغم تعداد زیاد متغیرها در مدل بهینه‌سازی، مدل خطی پیشنهادی با یک لپ‌تاپ معمولی دارای CPU core i7 با فرکانس ۲ گیگاهرتز در ۴۰ ثانیه به جواب بهینه رسیده است که به‌طور قابل توجهی کمتر از ۱۲۷۵ ثانیه زمان پردازش در [۲۲] است.

#### ۴-۱- تحلیل حساسیت

وابستگی هر یک از توابع هدف (هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها) به ضرایب وزن‌دهی  $w_1$  و  $w_2$  در شکل (۷) نشان داده شده است. در انتخاب این ضرایب، مجموع ضرایب  $w_1$  و  $w_2$  برابر یک فرض شده است. با افزایش ضریب  $w_2$  که اهمیت بحث کاهش انتشار آلاینده‌ها را برای بهره‌بردار سیستم نشان می‌دهد، مقدار مورد انتظار میزان انتشار آلاینده‌ها کاهش و مقدار مورد انتظار هزینه تولید واحدها کمی افزایش می‌یابد. همچنین جدول (۷)، نتایج به‌دست آمده از پیاده‌سازی مدل پیشنهادی را در سیستم‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ واحد که از تکرار سیستم ده واحد ایجاد می‌شوند را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود سرعت دستیابی به پاسخ در سیستم‌های بزرگ‌تر نیز با مدل خطی، بسیار مناسب است.

جدول ۶. مشارکت واحدها در حالت چهارم (حضور خودروهای الکتریکی و عدم قطعیت در پیش‌بینی بار و تولید منابع تجدیدپذیر)

واحد ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	هزینه تولید (دلار)	انتشار آلاینده‌ها (تن)	بار (مگاوات)	توان EV (مگاوات)	توان خورشید (مگاوات)	توان باد (مگاوات)
۱	۳۲۶/۵	۳۰۲/۵	.	.	.	.	۶۱	۵۵	.	.	۱۷۴۰۹/۹۷	۵۳۷۶/۱۴	۷۲۵	-۳۰	.	۱۰
۲	۳۵۴	۳۳۳	.	.	.	.	۶۷	۵۵	.	.	۱۷۹۸۳/۶۸	۶۴۳۶/۶۳	۸۰۲	-۳۰	.	۲۳
۳	۳۶۳/۵	۳۶۳/۵	.	.	.	.	۶۷	۵۵	.	۵۵	۲۰۹۳۷/۳۶	۷۴۹۱/۰۱	۹۰۲	-۳۰	.	۲۸
۴	۳۶۶/۵	۳۶۳/۵	.	.	.	.	۶۷	۵۵	۵۵	۵۵	۲۳۱۵۸/۵۹	۷۸۲۷/۸۷	۹۵۷	-۳۰	.	۲۵
۵	۳۶۱	۳۳۳	.	.	.	.	۶۷	۵۵	۵۵	۵۵	۲۵۰۱۰/۹۷	۷۳۶۲/۹۵	۱۰۰۲	-۳۰	.	۲۶
۶	۳۷۰/۳۷	۳۶۳/۵	.	.	۱۲۰/۹	۸۰	.	۵۵	۵۵	۵۵	۲۷۷۰۶/۸۹	۸۲۲۹/۶	۱۱۵۰	۲۵/۵	.	۲۵
۷	۳۵۳/۱	۳۳۳	.	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	.	۵۵	۵۵	۵۵	۲۸۶۹۴/۸۲	۷۷۴۹/۶۸	۱۱۸۷	.	.	۲۷
۸	۳۹۴	۳۶۹/۹	.	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	.	۵۵	.	.	۲۴۹۹۱/۸۸	۸۹۱۴/۶۹	۱۲۲۱	۲۵/۵	۱۶	۲۷
۹	۳۹۴	۳۷۹/۹	.	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	.	.	۵۵	۵۵	۲۷۵۶۳/۹۸	۹۴۲۶/۷۵	۱۳۰۴	۲۵/۵	۳۴	۲۷
۱۰	۳۵۹/۶	۳۳۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	۶۷	۵۵	.	۵۵	۳۲۰۸۴/۹۱	۸۳۳۳/۶۳	۱۳۷۸	۲۵/۵	۳۹	۲۷
۱۱	۳۸۰/۱	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	۶۷	۵۵	۵۵	.	۳۱۲۶۹/۰۵	۹۳۳۹/۱۹	۱۴۲۴	۲۵/۵	۳۷	۲۴
۱۲	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۲۸	۸۰	۷۲/۶	۵۵	۵۵	۵۵	۳۳۸۵۸/۷۹	۹۹۳۱/۲۶	۱۴۷۴	.	۳۸	۲۴
۱۳	۳۳۳	۳۱۲/۵۵	۹۷	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	۶۷	۵۵	۵۵	۵۵	۳۱۵۵۶/۷۶	۷۶۶۸/۳۳	۱۳۵۹	۱۸/۵۵	۳۵	۲۲
۱۴	۳۸۴/۱	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۱۹	۱۳۴/۶	۸۰	.	.	۵۵	.	۲۶۸۳۵/۰۴	۸۸۹۰/۶۲	۱۲۷۹	۲۵/۵	۱۰	۲۴
۱۵	۳۳۸/۶	۳۳۳	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	.	.	۵۵	.	۲۵۵۴۹/۵۷	۷۳۸۵/۶۵	۱۲۰۲	۲۵/۵	۱۲	۲۱
۱۶	۳۷۱/۶	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	.	.	.	.	.	۲۲۲۶۰/۱۹	۸۱۱۷/۳۶	۱۰۵۷	-۳۰	.	۱۵
۱۷	۳۳۳	۳۰۲/۵	۹۷	۹۷	۱۱۵/۵	.	.	.	.	.	۲۰۰۷۲/۰۱	۶۰۷۷/۲۵	۹۴۰	-۳۰	.	۲۵
۱۸	۳۹۴	۳۶۳/۵	۱۱۹	۱۱۹	۱۲۳/۵	.	.	.	.	.	۲۳۰۵۹/۳۱	۸۷۶۹/۶۱	۱۱۰۵	-۳۰	.	۱۶
۱۹	۳۷۵/۳۸	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	.	.	.	.	۲۴۸۰۹/۴۴	۸۳۶۸/۹۶	۱۱۸۷	۷/۲۲	.	۱۷
۲۰	۳۳۳	۳۰۷/۶	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	.	۵۵	۵۵	۵۵	۲۹۳۰۸/۲۹	۷۳۰۵/۰۶	۱۲۵۶	۲۵/۵	.	۱۹
۲۱	۳۶۳/۵	۳۳۶/۱	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	۸۰	.	۵۵	۵۵	.	۲۸۱۱۳/۲۹	۸۱۸۱/۷۱	۱۲۷۵	۲۵/۵	.	۲۳
۲۲	۳۷۰/۶	۳۶۳/۵	۱۰۸	۱۰۸	۱۲۰/۹	.	.	.	.	.	۲۲۳۴۳/۶۴	۸۰۹۶/۱۷	۱۰۹۰	.	.	۱۹
۲۳	۳۳۳	۳۰۲/۵	۱۰۵/۶	۹۷	۱۲۰/۹	.	.	.	.	.	۲۰۲۳۸/۹۱	۶۱۵۳/۷۷	۹۲۹	-۳۰	.	.
۲۴	۲۷۲	۲۷۲	۸۶	۸۶	۹۷	.	.	.	.	.	۱۷۷۸۲/۳۳	۴۴۲۲/۳۹	۷۸۶	-۳۰	.	۳
مجموع											۶۰۲۵۳۳	۱۸۵۸۵۶				

## جدول ۲. زمان شبیه‌سازی مدل پیشنهادی برای سیستم‌های بزرگ‌تر

سیستم مورد مطالعه	زمان شبیه‌سازی (ثانیه)
۱۰ واحد	۴۰
۲۰ واحد	۱۴۰
۳۰ واحد	۵۶۰

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله برنامه‌ریزی مشارکت واحدها با حضور خودروهای الکتریکی و منابع انرژی تجدیدپذیر بادی و خورشیدی و با هدف حداقل کردن هم‌زمان هزینه بهره‌برداری و انتشار آلاینده‌ها به صورت برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح ارائه شده است. به دلیل ماهیت متغیر بار شبکه و توان‌های تولیدی منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، عدم قطعیت در پیش‌بینی این پارامترها با توابع توزیع احتمال مدل شده است. مسئله در چهار حالت مختلف تحلیل شده است که با توجه به خطی بودن مدل پیشنهادی، در زمان بسیار کوتاه‌تری نسبت به الگوریتم PSO به پاسخ بهینه رسیده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از خودروهای الکتریکی و منابع تجدیدپذیر موجب کاهش هم‌زمان هزینه بهره‌برداری و میزان انتشار آلاینده‌ها خواهد شد.

## مراجع

- [1] J. Moreno, M. E. Ortúzar, J. W. Dixon, "Energy-management system for a hybrid electric vehicle, using ultracapacitors and neural networks," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 2, pp. 614–623, 2006
- [2] B. C. Ummels, E. Pelgrum, W. L. Kling, "Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply," IET Renewable Power Gener., vol. 2, no. 1, pp. 34–46, 2008
- [3] M. Lu, C. Chang, W. Lee, L. Wang, "Combining the wind power generation system with energy storage equipment," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 6, pp. 2109–2115, 2009
- [4] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle to grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy," J. Power Sources, vol. 144, no. 1, pp. 280–294, 2005
- [5] Robert C. Green, Lingfeng Wang, Mansoor Alam, "The impact of plug-in-hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook," Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pp.544-553, 2011
- [6] K. Clement-Nyngs, E. Haesen, J. Driesen, "The impact of vehicle-to-grid on distribution grid", Electric Power System Research, vol. 81, no. 1, pp.185-192, 2011
- [7] S. Han, S. Han, K. Sezaki, "Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation", IEEE Trans. On Smart Grid, vol.1, no. 1, pp.65-72, 2010
- [8] M. E. Khodayar, L. Wu, M. Shahidehpour, "Hourly Coordination of Electric Vehicle Operation and Volatile Wind Power Generation in SCUC", IEEE trans.smart grid, vol. 3, no. 3, pp. 1271 – 1279, 2012

- [9] C. Christober Asir Rajan, M. R. Mohan, "An evolutionary programming-based tabu search method for solving the unit commitment problem," *Power Systems, IEEE Transactions on* 19, pp.577-585, 2004
- [10] T. Ghanbarzadeh, S. Goleijani, M. Parsa Moghaddam, "Reliability Constrained Unit Commitment with Electric Vehicle to Grid Using Hybrid Particle Swarm Optimization and Ant Colony Optimization", *IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego*, pp. 1-7, 2011
- [11] S. Shobana, R. Janani, "Optimization of Unit Commitment Problem and Constrained Emission Using Genetic Algorithm," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, pp.367-371, 2013
- [12] T. Logenthiran, D. Srinivasan, "Particle swarm optimization for unit commitment problem," in *Proc. IEEE Intl. Conf. Prob. Methods Appl. Power Systems (PMAPS)*, pp. 642–647, 2010
- [13] James. J.Q. Yu, Victor O.K. Li, Albert Y.S. Lam, "Optimal V2G Scheduling of Electric Vehicles and Unit Commitment using Chemical Reaction Optimization", *IEEE Congress on Evolutionary Computation June 20-23, Cancún, México*, 2013
- [14] G. Giftson Samuel, C. Christober Asir Rajan, "A Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm for Long-Term Generation Maintenance Scheduling", *Proceedings of the Third International Conference on Soft Computing for Problem Solving. Springer India*, pp. 11-24, 2014
- [15] A. Shahmoradi, M. Kalantar, "Resource Scheduling in a Smart Grid with Renewable Energy Resources and Plug-In Vehicles by MINLP Method", *Amirkabir International Journal of Science & Research*, Vol. 47, No. 2, pp. 39- 47, 2015
- [16] A. Y. Saber, G. K. Venayagamoorthy, "Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid: A cost-emission optimization," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 3, pp. 898–911, 2010
- [17] T. Sousa, H. Morais, Z. Vale, P. Faria, J. Soares, " Intelligent Energy Resource Management Considering Vehicle-to-Grid: A Simulated Annealing Approach", *IEEE transactions on smart grid*, vol. 3, no. 1, pp. 535 – 542, 2012
- [18] S.M.H. Imani, S. Asghari, M.T. Ameli, "Considering The Load Uncertainty For Solving Security Constrained Unit Commitment Problem In Presence of Plug-In Electric Vehicle", *The 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering, Shahid Beheshti University*, 2014
- [19] D. Madzharov, E. Delarue, W. D'haeseleer, "Integrating electric vehicles as flexible load in unit commitment modeling", *Energy*, vol.65 ,pp. 285-294, 2014
- [20] C. Liu, J. Wang, Audun Botterud, Yan Zhou, Anantray Vyas, " Assessment of Impacts of PHEV Charging Patterns on Wind-Thermal Scheduling by Stochastic Unit Commitment", *IEEE transactions on smart grid*, vol. 3, no. 2, pp.675 – 683, 2012
- [21] A. Viana, João Pedro Pedroso, "A new MILP-based approach for Unit Commitment in power production planning", *Volume 44, Issue 1, PP. 997-1005*, 2013
- [22] A. Y. Saber, G. K. Venayagamoorthy, " Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles", *IEEE systems journal*, vol. 6, no. 1, pp. 103 – 109, 2012
- [23] Z. Soltani, M. Ghaljehei, G.B. Gharehpetian, H.A. Aalami, "Integration of smart grid technologies in stochastic multi-objective unit commitment: An economic emission analysis", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 100, pp. 565–590, 2018
- [24] Shahbazitabar, M., Abdi, H., "A Solution to the Unit Commitment Problem Applying a Hierarchical Combination Algorithm" , *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 12-19, 2017
- [25] Zhile Yang , Kang Li, Qun Niu, Yusheng Xue, "A comprehensive study of economic unit commitment of power systems integrating various renewable generations and plug-in electric vehicles", *Energy Conversion and Management Energy Conversion and Management*, vol. 132, pp. 460-481, 2017

- [26] Maryam Shahbazitabar, Hamdi Abdi, "A novel priority-based stochastic unit commitment considering renewable energy sources and parking lot cooperation", *Energy*, vol. 161, pp. 308-324, 2018
- [27] P. Venkatesh, R. Gnanadass, N. P. Padhy, "Comparison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 688–697, 2003
- [28] Miguel Carrión, and José M. Arroyo, "A Computationally Efficient Mixed-Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 21, NO. 3, AUGUST 2006
- [29] A. Ghahgharaee Zamani, A. Zakariazadeh, Sh. Jadid, A. Kazemi, "Stochastic operational scheduling of distributed energy resources in a large scale virtual power plant", *Electrical Power and Energy Systems*, vol.82, pp. 608–620, 2016
- [30] M. Mohanpurkar, R. G. Ramakumar, "Probability Density Functions for Power Output of Wind Electric Conversion Systems", *Power and Energy Society General Meeting*, 25-29 July, 2010
- [31] Y. M. Atwa, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25, Issue: 1, pp. 360 – 370, 2010
- [32] A. J. Conejo, M. Carrión, J. M. Morales, "Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets", New York, Springer, 2010.
- [33] T. O. Ting, M. V. C. Rao, and C. K. Loo, "A Novel Approach for Unit Commitment Problem via an Effective Hybrid Particle Swarm Optimization", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 21, NO. 1, FEBRUARY 2006

**پیوست:**

**جدول ۸. اطلاعات مورد نیاز شبکه مورد مطالعه**

	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶	واحد ۷	واحد ۸	واحد ۹	واحد ۱۰
حداکثر توان تولیدی (مگاوات)	۴۵۵	۴۵۵	۱۳۰	۱۳۰	۱۶۲	۸۰	۸۵	۵۵	۵۵	۵۵
حداقل توان تولیدی (مگاوات)	۱۵۰	۱۵۰	۲۰	۲۰	۲۵	۲۰	۲۵	۱۰	۱۰	۱۰
$\alpha$ (\$/MWh)	۱۰۰۰	۹۷۰	۷۰۰	۶۸۰	۴۵۰	۳۷۰	۴۸۰	۶۶۰	۶۶۵	۶۷۰
$\beta$ (\$/MWh)	۱۶/۱۹	۱۷/۲۶	۱۶/۶	۱۶/۵	۱۹/۷	۲۲/۲۶	۲۷/۲۴	۲۵/۹۲	۲۷/۲۷	۲۷/۷۹
$\gamma$ (\$/MWh <sup>2</sup> )	۰/۰۰۰۴۸	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲۱۱	۰/۰۰۳۹۸	۰/۰۰۷۱۲	۰/۰۰۷۹	۰/۰۰۴۱۳	۰/۰۰۲۲۲	۰/۰۰۱۷۳
حداقل زمان روشن بودن (ساعت)	۸	۸	۵	۵	۶	۳	۳	۱	۱	۱
حداقل زمان خاموش بودن (ساعت)	۸	۸	۵	۵	۶	۳	۳	۱	۱	۱
هزینه راه اندازی گرم (\$)	۴۵۰۰	۵۰۰۰	۵۵۰	۵۶۰	۹۰۰	۱۷۰	۲۶۰	۳۰	۳۰	۳۰
هزینه راه اندازی سرد (\$)	۹۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۲۰	۱۸۰۰	۳۴۰	۵۲۰	۶۰	۶۰	۶۰
ساعت راه اندازی سرد	۵	۵	۴	۴	۴	۲	۲	۰	۰	۰

**جدول ۹. مقادیر پیش بینی شده بار شبکه و توان منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی (بر حسب مگاوات)**

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
بادی	۱۰/۵۴	۲۲/۲۷	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵	۲۵/۵
خورشیدی	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۹	۱۷/۴۵	۳۱/۴۵	۳۸/۰۶	۳۵/۹۳	۳۶/۷۸
بار مصرفی	۷۰۰	۷۵۰	۸۵۰	۹۵۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۱۵۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۴۰۰	۱۴۵۰	۱۵۰۰
ساعت	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
بادی	۲۵/۵	۲۴/۸۲	۲۰/۷۴	۱۴/۶۲	۲۵/۵	۱۹/۰۴	۲۵/۵	۱۸/۰۲	۲۵/۵	۲۱/۴۲	۰/۰۱	۲/۵۵
خورشیدی	۳۱/۵۹	۹/۷	۱۲/۹۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
بار مصرفی	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۰۵۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰	۱۲۰۰	۱۴۰۰	۱۳۰۰	۱۱۰۰	۹۰۰	۸۰۰