

مدل سازی اتفاقی مسأله بهره برداری ریزشبهه در حالت جزیره‌ای با در نظر گرفتن شاخص ریسک

پوریا شیخ احمدی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ صلاح بهرام آرا^۲، استادیار؛ جمال مشتاق^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - pouria.sheikhahmadi@yahoo.com

۲- گروه مهندسی برق- واحد سنندج- دانشگاه آزاد اسلامی- سنندج- ایران - s_bahramara@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه کردستان - سنندج - ایران - j.moshtagh@uok.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسأله بهره‌برداری یک ریزشبهه در حالت جزیره‌ای و با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل سازی شده است. به همین منظور، مسأله به صورت یک مسأله ریاضی اتفاقی (Stochastic) که مبتنی بر یک مجموعه سناریو احتمالی بوده، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت بار مصرفی و منابع تولید توان تجدیدپذیر، مدل شده است. برای مدل کردن عدم قطعیت و کاهش اختلاف هزینه بهره‌برداری در بهترین و بدترین سناریو از روش ارزش در معرض خطر مشروط (CVaR) استفاده شده که ابزاری مناسب برای مدیریت ریسک مسأله است. بخشی از ظرفیت تولید ریزشبهه به عنوان رزرو در مدل ریاضی مسأله جهت پوشش کمبود تولید ریزشبهه به دلیل عدم قطعیت، خروج تجهیزات و جزیره‌ای بودن ریزشبهه، لحاظ شده است. در نهایت، نتایج بهره‌برداری ریزشبهه بررسی شده و یک تحلیل حساسیت برای مشاهده ارتباط هزینه ریزشبهه با برخی از پارامترهای مدل، انجام شده است.

واژه‌های کلیدی: منابع تجدیدپذیر، ریزشبهه، عدم قطعیت، مدیریت سمت تقاضا، مدیریت ریسک، مدل سازی اتفاقی.

Stochastic Modeling of Micro-Grid Operation Problem in Standalone Mode Considering Risk index

P. Sheikahmadi¹, MSc student; S. Bahramara², Assistant Professor; J. Moshtagh³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: pouria.sheikhahmadi@yahoo.com

2- Department of Electrical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran, Email: s_bahramara@yahoo.com

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, Email: j.moshtagh@uok.ac.ir

Abstract: In this paper, the operation problem of a micro-grid in standalone mode considering uncertainty is modeled. For this purpose, the problem is modeled as a stochastic mathematical problem based on a set of probabilistic scenarios for the consideration of the uncertainties of load and renewable power sources. To model uncertainties and reducing difference between the operation cost in the best and worst scenario, the value at risk (CVaR) as an appropriate tool for risk management is used. Some of the production capacity of micro-grid is considered in the mathematical model as a reserve in order to cover the shortage of micro-grid production due to uncertainty, equipment failure and no distribution network connection. Finally, the results of micro-grid operation have been analyzed and a sensitivity analysis is presented to observe the relationship between costs of the micro-grid with some parameters of the mathematical model.

Keywords: Renewable resources, micro-grid, uncertainty, demand side management, risk management, stochastic modeling.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۳۰، ۱۳۹۶/۰۷/۱۵ و ۱۳۹۶/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۱۴

نام نویسنده مسئول: دکتر جمال مشتاق

نشانی نویسنده مسئول: ایران - سنندج - بلوار پاسداران - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

تولید انرژی به‌وجود آمده‌است. در حال حاضر با توسعه استفاده از منابع تولید پراکنده، توانایی و انگیزه لازم جهت تغییر شبکه‌های توزیع غیرفعال به فعال مهیا شده‌است. تجمیعی از منابع تولید پراکنده جهت تغذیه یک بار مصرفی محلی، یک واژه جدید به نام ریزشبکه (Micro-grid) به‌وجود آورده‌است. ریزشبکه‌ها معمولاً در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه بهره‌برداری می‌شوند [۱]. یک موضوع مهم در مورد ریزشبکه‌ها، مدل کردن بهینه بهره‌برداری آن‌ها می‌باشد. اخیراً، این موضوع به‌طور گسترده توسط محققان مورد توجه قرار گرفته‌است [۲]. برنامه‌ریزی منابع انرژی در یک ریزشبکه، به دلیل اندازه و ظرفیت آن، تبادل توان با شبکه اصلی و شارژ و دشارژ منابع ذخیره انرژی، با شبکه توزیع یا سیستم قدرت متفاوت می‌باشد. همچنین منابع قابل کنترل در ریزشبکه کوچک‌تر از سیستم قدرت بوده و به همین دلیل، توان تولیدی آن‌ها تغییرات سریع‌تر داشته و انعطاف‌پذیرتر است. در ریزشبکه‌ها، جهت تولید توان با قابلیت اطمینان بالا، باید چندین منابع تولید پراکنده قابل کنترل و غیرقابل کنترل (منابع تجدیدپذیر) تحت وجود عدم قطعیت، با هم تعامل داشته باشند [۳]. در [۴] یک روش بهینه‌سازی جهت برنامه‌ریزی بهینه منابع تولید پراکنده و منابع ذخیره انرژی در یک ریزشبکه جزیره‌ای ارائه شده‌است که تابع هدف آن، کمینه کردن هزینه و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. در این روش، یک تابع چندهدفه جهت مدیریت انرژی ریزشبکه در دو سطح مختلف به کار گرفته شده‌است. در سطح اول، بهره‌برداری اقتصادی ریزشبکه انجام شده و در سطح دوم، برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن قیود دیگر سیستم، از جمله: پخش بار و محدودیت ولتاژ اجرا شده‌است. در [۵]، یک مدل جهت بهینه‌سازی پیشنهاد خرید انرژی از شبکه اصلی در بازار روز پیش (Day-Ahead) توسط یک ریزشبکه که در حالت متصل به شبکه توزیع می‌باشد، ارائه شده‌است. در [۶]، یک روش دو بخشی برای مدیریت انرژی ریزشبکه ارائه شده‌است که بخش اول، مربوط به بهره‌برداری ریزشبکه براساس اطلاعات پیش‌بینی شده و بخش دوم، مربوط به توزیع اقتصادی توان بین منابع قابل کنترل براساس اطلاعات زمان واقعی (Real-Time) می‌باشد. در [۷]، روش بارهای پاسخگو و مدیریت سمت تقاضا برای مدیریت انرژی ریزشبکه جزیره‌ای ارائه شده‌است. در [۸]، یک مدل مبتنی بر سناریو برای یک ریزشبکه متصل به شبکه، جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت انرژی شبکه بالادست بیان شده‌است. در [۹]، برای هماهنگ کردن منابع انرژی تجدیدپذیر با بارهای حرارتی و تهویه مطبوع، یک سیستم هیبریدی که ترکیبی است از منابع تجدیدپذیر و منبع ذخیره انرژی ارائه شده‌است. در [۱۰، ۱۱]، مدل‌های دیگری برای بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها آورده شده‌است. در این مدل‌ها، منابع تولید پراکنده و بارهای مصرفی به‌طور کامل توسط تجمیع‌کننده ریزشبکه (MG Aggregator) که به‌صورت یک نهاد غیرانتفاعی است، کنترل می‌شوند. تابع هدف در این مدل‌ها، یا به‌صورت کمینه کردن هزینه ریزشبکه یا حفظ تعادل بین بار تولیدی و مصرفی می‌باشد. در [۱۲]، یک مدل ریاضی احتمالی (Probabilistic) جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت برای مسأله بهره‌برداری یک ریزشبکه که در حالت جزیره‌ای

مجموعه‌ها و اندیس‌ها

j, J	اندیس و تعداد ژنراتورها
t, T	اندیس و تعداد گام‌های زمانی
ω, W	اندیس و تعداد سناریوها
پارامترها	
B^{Down}, B^{UP}	بیشترین درصد کاهش و افزایش بار قابل شیف
$\varepsilon^R, \varepsilon^C, \varepsilon^I$	بیشترین درصد قطع بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی
$\gamma^R, \gamma^C, \gamma^I$	درصدی از بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی برای رزرو
$\overline{SOC}, \underline{SOC}$	بیشترین و کمترین انرژی ذخیره‌شده در منبع ذخیره‌کننده
\bar{P}_{ESS}	بیشترین توان شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده
η_{CH}, η_{DCH}	راندمان شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده
$P_{t,\omega}^W$	توان تولیدی توربین بادی در هر گام زمانی و هر سناریو
$P_{t,\omega}^{PV}$	توان تولیدی پنل خورشیدی در هر گام زمانی و هر سناریو
$\bar{P}_j^{DG}, \underline{P}_j^{DG}$	بیشترین و کمترین ظرفیت تولید ژنراتورها
RR_j^{Down}, RR_j^{UP}	نرخ تغییرات کاهشی و افزایشی ژنراتورها
$P^{D-RCI-Det}$	بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی پیش‌بینی‌شده
$P_{t,\omega}^{D-RCI}$	بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی در هر گام زمانی و هر سناریو
SR_t	مقدار رزرو موردنیاز ریزشبکه در هر گام زمانی
λ_ω	احتمال رخداد هر سناریو
α	سطح اعتماد
β	پارامتر ریسک‌گریزی
$C_t^{int-RCI}$	هزینه قطع بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی
C_t^{res}	هزینه ثابت تأمین رزرو توسط قطع بار مصرفی و ژنراتورها
$C_t^{Down-RCI}$	هزینه شیف بار مصرفی از ساعت‌های پیک بار به کم‌باری
$C_j, SU_{j,t,\omega}, SD_{j,t,\omega}$	هزینه تولید توان ژنراتورها، روشن و خاموش شدن
C_{ESS}	هزینه شارژ و دشارژ شدن منبع ذخیره‌کننده
r_t	درصد فراخوانی احتمالی رزرو در هر گام زمانی
متغیرها	
ETC	هزینه کل موردانتظار ریزشبکه
$CVaR$	هزینه ریسک‌گریزی یا ارزش در معرض خطر مشروط
η_ω	اختلاف بین هزینه کل ریزشبکه و ارزش در معرض خطر در هر سناریو
ξ	ارزش در معرض خطر
$P_{t,\omega}^{CH}, P_{t,\omega}^{DCH}$	توان شارژ منبع ذخیره‌کننده در هر گام زمانی
$SOC_{t,\omega}$	انرژی ذخیره‌شده در منبع ذخیره‌کننده در ابتدای هر گام زمانی
$P_{j,t,\omega}^{DG}, R_{j,t,\omega}^{DG}$	توان تولیدی ژنراتورها برای تأمین انرژی و رزرو
$P_t^{int-RCI}$	بار مصرفی قطع‌شده برای تأمین انرژی ریزشبکه
$R_t^{int-RCI}$	بار مصرفی قطع‌شده برای تأمین رزرو ریزشبکه
$P_t^{Down-RCI}$	بار مصرفی شیف‌داده‌شده از ساعت‌های پیک بار به کم‌باری
P_t^{UP-RCI}	بار مصرفی اضافه‌شده در ساعت‌های کم‌باری
$P_{t,\omega}^{DEM}$	بار مصرفی متغیر همراه با بارهای قابل شیف
$U_{j,t,\omega}^{DG}$	متغیر باینری ژنراتورها (برابر ۱، اگر ژنراتور روشن باشد)
$V_{t,\omega}^{CH}$	متغیر باینری منبع ذخیره‌کننده (برابر ۱، اگر منبع شارژ شود)

۱- مقدمه

امروزه، اپراتورهای سیستم قدرت با چالش‌های مهمی از جمله: تغییرات ماهیت بارهای مصرفی، رشد سریع مصرف انرژی و گستردگی جغرافیایی مصرف‌کننده‌ها روبه‌رو شده‌اند. با توجه به مسائل زیست‌محیطی، سرمایه‌گذاران مایل به ایجاد نیروگاه‌های حرارتی نیستند، به همین دلیل چالش جدیدی برای بهره‌برداری سیستم قدرت جهت استفاده از منابع

جدول ۱: خلاصه کارهای انجام شده در مراجع و مقایسه با این مقاله

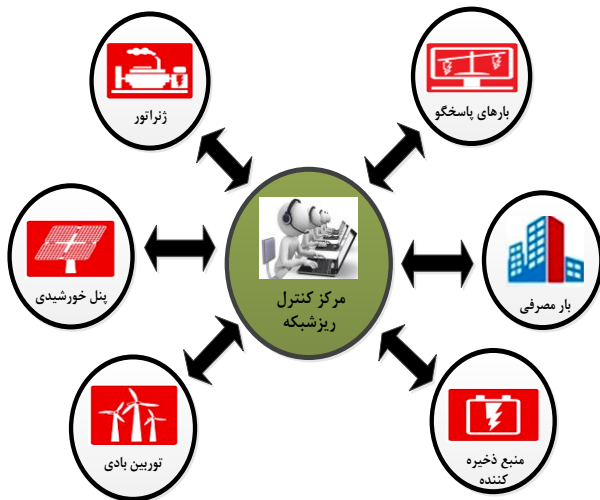
مراجع	نوع منابع تولید پراکنده	نوع مدل	تصمیم‌گیری روی	مدیریت ریسک	روش حل
[۴]	DG, ESS, WT, PV	قطعی	انرژی	خیر	Nonlinear Programming (NLP) – Niching Evolutionary Algorithm (NEA)
[۶]	DG, ESS, WT, PV, Fuel Cell	اتفاقی یک بخشی	انرژی	خیر	Heuristic algorithm – Double layer coordinated control
[۱۲]	DG, ESS, WT, PV, DR	اتفاقی یک بخشی	انرژی	خیر	Mixed Integer Linear Programming (MILP)
[۱۳]	ESS, WT, PV, Fuel Cell	اتفاقی یک بخشی	انرژی	خیر	Binary Particle Swarm Optimization Algorithm (BPSO)
[۱۴]	DG, ESS, PV	قطعی	انرژی	خیر	Heuristic algorithm-Dynamic Programming
[۱۵]	DG, WT, PV	احتمالی یک بخشی	انرژی	خیر	Robust optimization using heuristic algorithm
[۱۶]	DG, ESS, SC, PV	قطعی	انرژی	خیر	Heuristic algorithm
[۱۷]	DG, PV, Fuel Cell	قطعی	انرژی	خیر	Multi-objective linear programming (MOLP)
[۱۸]	DG, ESS, PV	قطعی	انرژی	خیر	Dispatch strategies using 'set point'
[۱۹]	DG, ESS, PV	اتفاقی یک بخشی	انرژی	خیر	Heuristic algorithm
[۲۰]	ESS, WT, PV, Fuel Cell, DR	قطعی	انرژی	خیر	Mixed Integer Linear Programming (MILP)
[۲۱]	Hydrogen ESS, DR	اتفاقی یک بخشی	انرژی	خیر	Linear Programming
[۲۲]	WT, PV, DG, Fuel Cell, ESS	قطعی	انرژی	خیر	Linear Programming
این مقاله	DG, ESS, WT, PV, DR	اتفاقی دو بخشی	انرژی و رزرو	بله	Mixed Integer Linear Programming (MILP)

قرار دارد، تعریف شده‌است. در نتیجه با هماهنگ کردن منابع در حالت‌های مختلف سعی شده‌است که رزرو مورد نیاز ریزشبهه تأمین و بارهای قطع شده، به دلیل احتمالی بودن مسأله تا حد امکان کاهش یابد. در [۱۳]، یک مدل ریاضی قطعی برای بهره‌برداری یک ریزشبهه ارائه شده‌است. تابع هدف در این مسئله، کاهش هزینه و انتشار گاز گلخانه‌ای و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر است. در [۱۴]، از روش برنامه‌ریزی دینامیکی جهت حل بهره‌برداری یک ریزشبهه استفاده شده‌است و مدل استفاده شده در این مقاله قطعی بوده و عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر مدل نشده‌است. در [۱۵]، یک مدل ریاضی جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر در مسئله بهره‌برداری یک ریزشبهه ارائه شده‌است اما ریسک اپراتور و کنترل عدم قطعیت پارامترهای نامعلوم در نظر گرفته نشده‌است. در [۱۶]، یک مدل ریاضی اتفاقی اما یک بخشی برای بهره‌برداری یک ریزشبهه جزیره‌ای به کار گرفته شده‌است. در [۱۷]، از یک مدل ریاضی خطی چندهدفه برای تصمیم‌گیری اپراتور یک ریزشبهه با هدف کمینه‌کردن هزینه و آلودگی استفاده شده‌است. در [۱۸]، یک روش مناسب جهت کمینه‌کردن هزینه منابع دیزل ژنراتور و ذخیره‌کننده در مسئله بهره‌برداری یک ریزشبهه به کار گرفته شده‌است. در [۱۹]، یک روش مناسب برای کنترل و بهره‌برداری بهینه یک ریزشبهه استفاده شده‌است. در [۲۰]، از یک مدل ریاضی آمیخته عدد صحیح قطعی برای بهره‌برداری بهینه یک ریزشبهه جزیره‌ای استفاده شده و بارهای پاسخگو به عنوان منابع تولید مجازی به کار گرفته شده‌است. در [۲۱]، یک روش جدید برای بهره‌برداری از ریزشبهه جزیره‌ای با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی که شامل الکتروولایزر، تانک‌های هیدروژنی و پیل سوختی است در حضور برنامه پاسخگویی ارائه شده‌است. در این مرجع، هدف از بهره‌برداری ریزشبهه، کمینه‌کردن هزینه بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و هزینه‌های مربوط به انرژی تأمین نشده و مازاد انرژی است. در این مقاله از مسئله اتفاقی استفاده شده که تمامی متغیرهای مساله و تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری ریزشبهه مبتنی بر سناریو بوده و به همین دلیل نمی‌توان عدم قطعیت پارامترهای مساله را کنترل کرده و ریسک اپراتور مدیریت شود. در مرجع [۲۲]، بهره‌برداری یک ریزشبهه (پارکینگ هوشمند) که شامل منابع تجدیدپذیر شامل توربین بادی و پنل خورشیدی و منابع محلی مثل میکروتوربین و پیل سوختی است، ارائه شده‌است. در این مقاله، هدف از بهره‌برداری پارکینگ هوشمند که در دو نقش بار و منبع تولید انرژی برای شبکه توزیع ایفای نقش می‌کند با هدف کاهش هزینه‌های مربوط به پارکینگ هوشمند صورت گرفته‌است. در این مقاله، عدم قطعیت مربوط به منابع متغیر و بار مصرفی مدل سازی نشده‌است و این عامل خطای زیادی را در نتایج بهره‌برداری و تصمیم‌گیری اپراتور ریزشبهه به خصوص در مواقع تعامل انرژی با شبکه توزیع ایجاد خواهد کرد. به طور کلی در جدول ۱، یک مقایسه کلی برای مراجع ذکر شده در این مقاله و نشان دادن نوآوری‌های این مقاله با آن‌ها آورده شده‌است.

ریزشبهه‌های مبتنی بر منابع تجدیدپذیر در حالت جزیره‌ای دارای مشکلاتی هستند که از عدم قطعیت توان خروجی این منابع ناشی می‌شود. به همین منظور در این مقاله، جهت بهره‌برداری ریزشبهه تحت عدم قطعیت، برخلاف مراجعی که ذکر شده‌اند و اکثراً عدم قطعیت مربوط به پارامترهای متغیر مساله را در نظر نگرفته‌اند و یا از مساله احتمالی که یک بخشی بوده و مبتنی بر سناریو استفاده کرده‌اند، یک مساله اتفاقی (Stochastic) دویخی تعریف شده‌است که یک بخش آن، مستقل از سناریو و به صورت بستن قرارداد از پیش تعیین شده و روزپیش است و بخش دوم، مبتنی بر سناریو بوده و به صورت زمان واقعی جهت ایجاد تعادل بین بار تولیدی و مصرفی است. همچنین همانطور که مشخص است در بهره‌برداری ریزشبهه جزیره‌ای تأمین و برنامه‌ریزی رزرو یک موضوع بسیار مهم است. در مقالاتی که اخیراً ارائه شده‌اند بخشی از منابع تولیدی را برای تأمین رزرو انتخاب می‌کنند که بسته به سلیقه اپراتور متفاوت خواهد بود. در این مقاله برخلاف سایر مقالات، از بارهای قابل

۲-۱- توصیف ساختار کلی ریزشبهه جزیره‌ای

در این مقاله، از یک ریزشبهه نمونه استفاده شده‌است که بار ریزشبهه که شامل بار مسکونی، تجاری و صنعتی می‌باشد توسط منابع تجدیدپذیر، منبع ذخیره‌کننده انرژی، منابع فسیلی و بارهای پاسخگو به عنوان منابع تولید مجازی، تغذیه می‌شود. در شکل (۱)، ساختار کلی ریزشبهه نشان داده شده‌است. همانطور که از شکل مشخص است، مرکز کنترل ریزشبهه، تمامی فعالیت‌های منابع تولیدی و بار مصرفی ریزشبهه را تحت کنترل دارد. اپراتور ریزشبهه در این مرکز، بهره‌برداری بهینه ریزشبهه را با استفاده از برنامه‌ریزی هم‌زمان انرژی و رزرو، انجام می‌دهد. هر کدام از فلش‌هایی که با رنگ مشکی مشخص شده‌اند، نشان دهنده سیگنال قیمت، انرژی، رزرو، کنترل مقادیر مرجع توان منابع تولید، کنترل بار مصرفی و بارهای پاسخگو و اطلاعات مربوط به پیش‌بینی توان منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی در طول دوره زمانی بهره‌برداری است.



شکل ۱: ساختار کلی ریزشبهه جزیره‌ای

۲-۲- مسأله تصمیم‌گیری اتفاقی

در تصمیم‌گیری تحت عدم قطعیت، اپراتور باید تصمیمی بهینه در طول یک دوره زمانی تصمیم‌گیری همراه با اطلاعات ناقص بگیرد. در مسأله تصمیم‌گیری اتفاقی، معمولاً دو بخش (Stage) تعریف می‌شود که یک بخش مستقل از سناریو و بخش دوم مبتنی بر سناریو است. تصمیم‌هایی که در بخش اول گرفته می‌شوند، قبل از به وقوع پیوستن فرآیندهای اتفاقی و به صورت قراردادهایی از پیش تعیین شده می‌باشند. متغیرهای مربوط به این بخش از تصمیم‌گیری، به صورت مستقل از سناریو و فرآیندهای اتفاقی است. تصمیم‌هایی که در بخش دوم گرفته می‌شوند، بعد از دانستن به وقوع پیوستن فرآیندهای اتفاقی می‌باشند. این تصمیم‌ها، به مجموعه‌ای از فرآیندهای اتفاقی که به صورت یک مجموعه سناریو تعریف می‌شوند، وابسته است. بنابراین، متغیرهای مربوط به این بخش از تصمیم‌گیری، براساس وقوع هر سناریو متفاوت خواهند بود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مسأله اتفاقی دو بخشی، استفاده از شاخص

قطع (به صورت توافقی و قراردادی) و دیزل ژنراتورها به دلیل قابل کنترل بودن و تغییرات سریع آن‌ها برای تأمین رزرو انتخاب شده‌است. بنابراین نوآوری ارائه شده در این مقاله نسبت به کارهای گذشته که در جدول ۱ خلاصه شده‌اند، به شرح ذیل است:

۱. مدل سازی مسئله بهره‌برداری ریزشبهه‌ها در حالت جزیره‌ای با استفاده از روش برنامه‌ریزی اتفاقی به صورت دویخی و کنترل عدم قطعیت مسأله با استفاده از شاخص ریسک، که نتایج احتمالی در بدترین و بهترین سناریو را می‌توان به نتیجه مورد انتظار اپراتور، با استفاده از تصمیم‌گیری مربوط به بخش مستقل از سناریو، نزدیک کرد.

۲. مدل سازی مسئله بهره‌برداری ریزشبهه در حالت جزیره‌ای با در نظر گرفتن تصمیم‌گیری هم‌زمان بروی انرژی و رزرو شامل مدل کردن هزینه ثابت مهیا کردن رزرو و هزینه تأمین آن توسط منابع در تابع هدف و لحاظ کردن درصد فراخوانی رزرو در مسئله بهره‌برداری ریزشبهه، که قطعاً تأثیر قابل توجهی در تصمیم‌گیری بهره‌بردار جهت هماهنگی منابع انتخاب شده برای تأمین رزرو و کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبهه خواهد داشت، یکی از نوآوری‌های اصلی این مقاله است.

۳. انتخاب بارهای قابل قطع و قابل شیفت در تأمین انرژی و انتخاب بارهای قابل قطع برای تأمین رزرو در بخش مستقل از سناریو مدل دویخی به صورت قراردادی و تشویقی و همچنین انتخاب منابع دیزل ژنراتور و ذخیره‌کننده برای تأمین انرژی و انتخاب دیزل ژنراتور برای تأمین رزرو در بخش مبتنی بر سناریو که در هیچ مقاله دیگری از قابلیت بارهای پاسخگو در بهره‌برداری ریزشبهه جزیره‌ای استفاده نشده‌است.

۲- بیان مسأله

بسیاری از مسائل مهندسی به دلیل وجود پدیده‌هایی که به طور ذاتی دارای تغییرات می‌باشند، موجب ایجاد عدم قطعیت در مسائل می‌شوند. این عامل، باعث به وجود آمدن خطا در برنامه‌ریزی مسأله، به دلیل خطای پیش‌بینی و اطلاعات ناقص مسأله می‌شود. بنابراین، جهت فائق آمدن بر این مسائل، مهندسان باید مدل سازی مسأله را با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها انجام داده و خطای نتیجه‌گیری را تا حدی که امکان دارد، کاهش داد. این مشکل، در مسأله مدیریت انرژی و بهره‌برداری بهینه از ریزشبهه‌ها هم وجود دارد. وجود اطلاعات احتمالی و کمبود اطلاعات کامل در مورد بخش‌های مختلف مسأله بهره‌برداری، موجب می‌شود که اپراتور با تصمیم‌گیری احتمالی و مورد انتظار (Expected) مواجه شود و این عامل تأثیر زیادی روی نتایج بهره‌برداری ریزشبهه خواهد داشت. به طور کلی به دلیل ایجاد عامل عدم قطعیت در پارامترهای مختلف، مثل: توان تولیدی توربین بادی، پنل خورشیدی، توان مصرفی، دو روش بهره‌برداری برای ریزشبهه، شبکه توزیع و سطوح بالاتر به وجود می‌آیند که شامل: مسأله احتمالی و مسأله اتفاقی می‌باشند.

استفاده از توابع توزیع پارامترهای نامعین ذکر شده و همچنین درخت سناریو، سناریو، ۱۰۰۰۰ سناریو تولید شده است. برای کاهش پیچیدگی مسئله، با استفاده از GAMS/SCENRED Package و تکنیک کاهش سناریو Fast-Forward، تعداد سناریوها به ۱۵ سناریو کاهش داده شده است [۲۳].

۳- مدل سازی ریاضی مسأله بهره‌برداری ریزشبه

در این مقاله، یک مدل اتفاقی دوبخشی برای مسأله بهره‌برداری ریزشبه آماده شده است. بخش اول، مستقل از سناریو بوده و بخش دوم، مبتنی بر سناریو است. هدف از مدل نوشته شده، کمینه کردن هزینه موردانتظار (Expected Cost) در طول دوره زمانی ۲۴ ساعته و برای ۱۵ سناریو می باشد که به صورت زیر نوشته شده است:

$$ETC = \sum_{\omega \in W} \lambda_{\omega} \cdot [Cost_{DG}^E + Cost_{ESS}^E + Cost_{IL}^E + Cost_{Down}^E + Cost_{AV}^R + Cost_{DG}^R + Cost_{IL}^R] \quad (1)$$

$$Cost_{DG}^E = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} (C_j \cdot (P_{j,t,\omega}^{DG}) + SU_{j,t,\omega} + SD_{j,t,\omega}) \quad (2)$$

$$Cost_{ESS}^E = \sum_{t \in T} C_{ESS} \cdot (P_{t,\omega}^{CH} + P_{t,\omega}^{DCH}) \quad (3)$$

$$Cost_{IL}^E = \sum_{t \in T} C_t^{int-RCL} \cdot (P_t^{int-RCL}) \quad (4)$$

$$Cost_{Down}^E = \sum_{t \in T} C_t^{Down-RCL} \cdot (P_t^{Down-RCL}) \quad (5)$$

$$Cost_{AV}^R = \sum_{t \in T} C_t^{res} \cdot (SR_t) \quad (6)$$

$$Cost_{DG}^R = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} C_j \cdot (R_{j,t,\omega}^{DG}) \cdot r_t \quad (7)$$

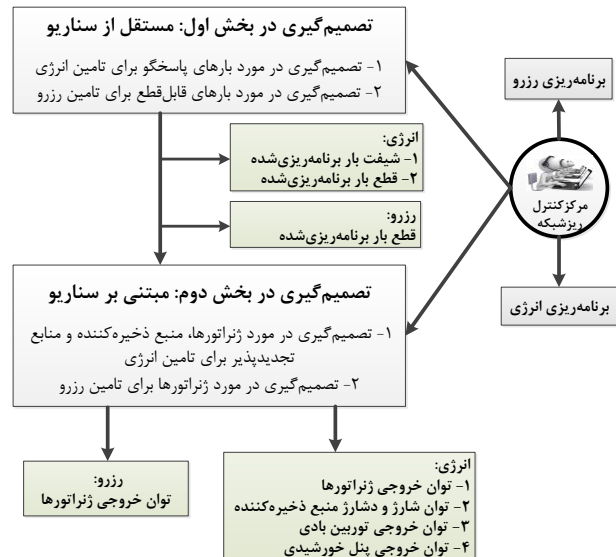
$$Cost_{IL}^R = \sum_{t \in T} C_t^{int-RCL} \cdot (R_t^{int-RCL}) \cdot r_t \quad (8)$$

معادله (۱)، هزینه کل موردانتظار ریزشبه برای تأمین انرژی و رزرو است که به صورت مسأله اتفاقی تعریف شده و دارای دو بخش می باشد. یک بخش آن مربوط به قطع بار برای تأمین انرژی و رزرو و شیفت بار برای تأمین انرژی بوده و مستقل از سناریو است. بخش دیگر مربوط به ژنراتورها و منبع ذخیره کننده بوده و مبتنی بر سناریو می باشد. معادله‌های (۲) و (۷)، به ترتیب هزینه تولید توان ژنراتورها برای تأمین انرژی و رزرو فراخوانی شده، معادله (۳)، هزینه بهره‌برداری منابع ذخیره کننده انرژی، معادله‌های (۴) و (۸)، به ترتیب هزینه قطع بار مصرفی برای تأمین انرژی و رزرو فراخوانی شده، معادله (۵)، هزینه شیفت بارهای پاسخگو و معادله (۶)، هزینه مهیا و آماده کردن رزرو موردنظر اپراتور ریزشبه جهت فراخوانی در مواقع لزوم می باشد.

۳-۱- مدیریت ریسک

معمولاً بار مصرفی و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر به دلیل ذات متغیر آن‌ها، براساس پیش‌بینی و استفاده از اطلاعات گذشته تعیین می‌شوند

ریسک برای کنترل عدم قطعیت پارامترهای متغیر مساله و مدیریت ریسک اپراتور برای بهره‌برداری ریزشبه است [۲۳]. در این مقاله، چارچوب کلی مساله تصمیم‌گیری اتفاقی دو بخشی برای برنامه‌ریزی انرژی و رزرو یک ریزشبه جزیره‌ای، به ترتیب در شکل (۲)، نشان داده شده‌اند.



شکل ۲: چارچوب کلی مساله اتفاقی دوبخشی برای برنامه‌ریزی انرژی و رزرو ریزشبه جزیره‌ای

۳-۲- توصیف عدم قطعیت به وسیله سناریو

دو نوع کلی عدم قطعیت بر روی بهره‌برداری سیستم قدرت و ریزشبه‌ها تأثیر می‌گذارد. نوع اول، خروج واحدهای تولیدی و نوع دوم، خطای ناشی از پیش‌بینی اطلاعات ورودی است. خروج واحدهای تولیدی موجب کمبود تولید در سیستم می‌شود. خطای ناشی از پیش‌بینی، به دلیل تغییرات بار مصرفی و نفوذ منابع تجدیدپذیر به سیستم قدرت و ریزشبه‌ها به وجود می‌آید. تولید توان توربین بادی و پنل خورشیدی به سرعت باد و تابش نور خورشید وابسته است که همین عامل، پیش‌بینی توان تولیدی این منابع را دشوار می‌کند. همچنین اثر عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر در بهره‌برداری ریزشبه، به دلیل نفوذ بالای آن‌ها بسیار قابل توجه است. در این مقاله، جهت مدل کردن عدم قطعیت پارامترهای مربوط به منابع تجدیدپذیر و سه نوع بار مصرفی از مسئله اتفاقی دوبخشی استفاده شده است. بنابراین، با استفاده از مدل توزیع نرمال برای بار مصرفی و مدل توزیع ویبول برای سرعت باد و تابش خورشید، تعداد زیادی سناریو تولید شده است، که به صورت توابع چگالی احتمال توزیع (PDF) هستند [۲۴]. در مسأله احتمالی، معمولاً تعداد سناریوها کمتر از مسأله اتفاقی است. اگر از مجموعه پیوسته برای سناریوها استفاده شود، در این صورت، در حالی که مسأله اتفاقی موردنظر کوچک (Small Scale) نباشد، حل مسأله غیرممکن خواهد بود. بنابراین باید از مجموعه گسسته سناریوها برای حل مسأله استفاده شود. با

معرض خطر مشروط یا به عبارت دیگر هزینه موردانتظار سناریوهایی است که اپراتور ریزش شبکه به آن‌ها اعتماد ندارد. در این رابطه، α ، سطح اعتماد اپراتور ریزش شبکه است و به عنوان پارامتر (اطلاعات ورودی مسئله) تعریف شده و انتخاب مقدار آن برعهده اپراتور است. λ_{ω} ، احتمال رخداد هر سناریو، ξ ، یک متغیر کمکی آزاد در علامت است که به صورت ارزش در معرض خطر (VaR) برحسب هزینه است. η_{ω} ، یک متغیر کمکی غیرمنفی است که برابر اختلاف بین هزینه کل ریزش شبکه در هر سناریو و VaR خواهد بود، اگر مقدار VaR کمتر از هزینه کل ریزش شبکه در هر سناریو باشد. در غیراین صورت، مقدار VaR صفر است [۲۳]. معادله (۱۰)، مربوط است به اختلاف هزینه ریزش شبکه در هر سناریو با مقدار بهینه ξ که همان VaR می‌باشد. بنابراین با توجه به معادله (۹) و کمینه کردن CVaR در تابع هدف، با استفاده از این قید، اختلاف بین هزینه بهترین و بدترین سناریو کنترل می‌شود و در این صورت با افزایش پارامتر β ، هزینه ریزش شبکه در هر سناریو به هزینه موردانتظار ریزش شبکه نزدیک شده و از این طریق ریسک اپراتور برای مساله بهره‌برداری ریزش شبکه مدیریت می‌شود. معادله (۱۱)، قید مربوط به η_{ω} است. η_{ω} ، یک متغیر کمکی غیرمنفی می‌باشد که برابر است با اختلاف بین هزینه کل ریزش شبکه در هر سناریو و VaR در صورتی که VaR کمتر از هزینه کل ریزش شبکه در هر سناریو باشد و در غیراین صورت برابر صفر است.

۲-۳- تابع هدف مسأله بهره‌برداری ریزش شبکه

هدف از مدل سازی مسأله بهره‌برداری ریزش شبکه، کمینه کردن هزینه بهره‌برداری ریزش شبکه همراه با هزینه ریسک، مبتنی بر سناریو در طول دوره زمانی ۲۴ ساعته می‌باشد. رابطه کلی تابع هدف به صورت زیر است:

$$\text{Minimize } (ETC + \beta CVaR) \quad (12)$$

در معادله (۱۲)، β ، پارامتر ریسک‌گریزی است. به این صورت که، اگر پارامتر β صفر باشد، تصمیم‌گیری اپراتور ریزش شبکه مبتنی بر ریسک و احتمالی می‌باشد که با افزایش پارامتر β ، ریسک‌گریزی اپراتور در تصمیم‌گیری بیشتر شده و باعث می‌شود که فاصله بین هزینه ریزش شبکه در بدترین و بهترین سناریو کمتر شده ولی در عوض هزینه مورد انتظار ریزش شبکه بیشتر می‌شود. به عبارت دیگر، با رخداد بدترین سناریوها اپراتور با ضرر کمتری مواجه خواهد شد.

۳-۳- قید تعادل توان در ریزش شبکه

این قید تغذیه بار مصرفی پیش‌بینی شده ریزش شبکه را در هر گام زمانی و در هر سناریو توسط منابع تولید توان ریزش شبکه تضمین می‌کند. منابع تولید توان ریزش شبکه شامل: ژنراتورها، توربین بادی، پنل خورشیدی، منبع ذخیره‌کننده انرژی و منابع تولید توان مجازی (VPP) که همان بارهای قابل قطع و بارهای قابل شیف است، می‌باشد. قید تعادل توان تولیدی و مصرفی ریزش شبکه به صورت زیر نوشته شده است:

که این عامل موجب ایجاد عدم قطعیت در مقادیر آن‌ها شده و در این صورت اپراتور با تصمیم‌گیری احتمالی برای کمینه کردن هزینه ریزش شبکه روبرو خواهد شد. هزینه بهینه ریزش شبکه تحت عدم قطعیت ممکن است در بعضی از سناریوها بسیار زیاد شده و فاصله زیادی با هزینه موردانتظار ریزش شبکه داشته باشد که این عامل اپراتور را با سطح بالایی از ریسک هنگام تصمیم‌گیری مواجه خواهد کرد.

در این مقاله، جهت کنترل عدم قطعیت مسأله و مدیریت ریسک، از یک روش جدید یعنی، شاخص ارزیابی ریسک استفاده شده است. شاخص‌های ارزیابی ریسک مختلفی وجود دارد که یکی از آن‌ها، شاخص ارزش در معرض خطر (VaR) است که معیار آماری جدید جهت تعیین بیشترین هزینه موردانتظار در طول دوره زمانی بهره‌برداری و تحت تعداد مشخصی سناریو است. این شاخص معیابی در مقایسه با یک شاخص ریسک جدید دیگر، با عنوان شاخص ارزش در معرض خطر مشروط (CVaR) دارد. مقایسه بین دو شاخص ریسک ذکر شده، به شرح ذیل است:

۱. تفاوت‌های بین این دو روش در، ویژگی‌های ریاضی، پایداری تخمین آماری و سادگی در روش بهینه‌سازی است.
۲. در روش VaR، نمی‌توان سناریوهایی که در آن هزینه بسیار بیشتر از ارزش در معرض خطر باشد را کنترل کرد در حالی که، CVaR این سناریوها را هم کنترل می‌کند.
۳. VaR، یک تابع غیرهمگرا و گسسته است. بنابراین این عامل موجب می‌شود مساله بهینه‌سازی خطی و پیوسته نشده و در برخی موارد احتمال همگرانشدن مساله بالا خواهد بود. ولی CVaR، پیوسته و همگرا می‌باشد.
۴. در حل مسئله بهره‌برداری، اگر از VaR استفاده شود، اختلاف بین هزینه در بدترین و بهترین سناریو بسیار بیشتر از حالتی است که از CVaR استفاده شود. به عبارت دیگر، توانایی VaR در کنترل عدم قطعیت‌های پارامترهای متغیر و مدیریت ریسک بسیار کمتر از CVaR است.

در این مقاله، مبنی بر مقایسه ذکر شده بین VaR و CVaR، از شاخص ریسک CVaR برای مدیریت ریسک مساله استفاده شده است. در مسأله بهینه‌سازی اتفاقی مبتنی بر سناریو، CVaR، در یک سطح اعتماد (α)، به صورت معادله (۹) در زیر تعریف شده است [۲۳]:

$$CVaR = \xi + \frac{1}{1-\alpha} \sum_{\omega \in W} \lambda_{\omega} \cdot \eta_{\omega} \quad (9)$$

$$ETC_{\omega} - \xi - \eta_{\omega} \leq 0 \quad (10)$$

$$\eta_{\omega} \geq 0 \quad (11)$$

100% $\times (1 - \alpha)$ از توزیع سناریوها به عنوان VaR شناخته می‌شود که بیشترین مقدار VaR تضمین می‌کند که احتمال به دست آوردن یک هزینه که مقدار آن بیشتر از VaR باشد، $(1 - \alpha)$ است. معادله (۹)، مربوط به رابطه محاسبه CVaR است که به صورت هزینه موردانتظار $100\% \times (1 - \alpha)$ بدترین سناریوها تعریف شده است. CVaR، ارزش در

$$V_{t,\omega}^{CH} + V_{t,\omega}^{DCH} \leq 1 \quad (26)$$

$$SOC \leq SOC_{t,\omega} \leq \overline{SOC} \quad (27)$$

$$SOC_{t+1,\omega} = SOC_{t,\omega} + (P_{t,\omega}^{CH} \cdot \eta_{CH}) - (P_{t,\omega}^{DCH} / \eta_{DCH}) \quad (28)$$

معادله‌های (۲۴) و (۲۵)، مربوط به محدودیت شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده می‌باشد. معادله (۲۶)، هماهنگی شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده برای جلوگیری از شارژ و دشارژ به‌طور هم‌زمان در یک گام زمانی، معادله (۲۷)، محدودیت انرژی ذخیره‌شده در طول دوره بهره‌برداری و معادله (۲۸)، وضعیت دینامیکی شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده را در هر گام زمانی و هر سناریو را مشخص می‌کند.

۳-۶- قید بارهای قابل قطع (Interruptible Loads)

در مسأله بهره‌برداری ریزشکه، با قرارداد بستن اپراتور با بار مصرفی مبتنی بر تصمیم‌گیری در بخش اول مسأله اتفاقی، در هر گام زمانی درصدی از بار مصرفی ریزشکه برای تأمین انرژی و رزرو به‌صورت مستقل از سناریو که به‌عنوان تولید مجازی شناخته می‌شود، استفاده می‌شود.

$$0 \leq P_t^{int-R} + R_t^{int-R} \leq \varepsilon^R \cdot P_t^{D-R-Det} \quad (29)$$

$$0 \leq P_t^{int-C} + R_t^{int-C} \leq \varepsilon^C \cdot P_t^{D-C-Det} \quad (30)$$

$$0 \leq P_t^{int-I} + R_t^{int-I} \leq \varepsilon^I \cdot P_t^{D-I-Det} \quad (31)$$

$$P_t^{int-RCI} = P_t^{int-R} + P_t^{int-C} + P_t^{int-I} \quad (32)$$

$$R_t^{int-RCI} = R_t^{int-R} + R_t^{int-C} + R_t^{int-I} \quad (33)$$

در معادله‌های (۲۹) تا (۳۱)، $P_t^{D-R-Det}$ ، $P_t^{D-C-Det}$ و $P_t^{D-I-Det}$ ، مقادیر پیش‌بینی‌شده برای بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی در دوره زمانی بدون در نظر گرفتن سناریو برای بهره‌برداری ریزشکه است. ε^R ، ε^C و ε^I ، ضرایب انتخاب‌شده برای قطع درصدی از بار مصرفی پیش‌بینی‌شده است.

۳-۷- قید بارهای قابل شیفت (Load Shifting)

یکی از راه‌های مدیریت سمت تقاضا، شیفت بار مصرفی از ساعت‌های پیک بار به ساعت‌های کم‌باری جهت مسطح کردن پروفیل بار مصرفی در طول شبانه‌روز و استفاده به‌عنوان تولید مجازی در ساعت‌های پیک بار است. بنابراین، افزایش ظرفیت خطوط، کاهش تلفات، کاهش افت ولتاژ و کاهش هزینه برای هر دوی مصرف‌کننده و تولیدکننده در بر خواهد داشت. برنامه‌ریزی بارهای قابل شیفت هم مربوط به تصمیم‌گیری بخش اول مسأله اتفاقی بوده و به‌صورت توافقی بین اپراتور ریزشکه و مصرف‌کننده‌ها به‌دلیل مستقل‌سازی سناریو بودن آن، انجام می‌شود. این روش، از طریق ایجاد انگیزه در مصرف‌کنندگان از طریق یک وجه پرداختی به آن‌ها توسط اپراتور به‌عنوان تشویقی، که هزینه مربوط به آن هم در تابع هدف آورده شده‌است، امکان‌پذیر خواهد بود.

$$\sum_{j \in J} P_{j,t,\omega}^{DG} + P_{t,\omega}^W + P_{t,\omega}^{PV} = P_{t,\omega}^{DEM} + P_{t,\omega}^{ESS} - P_t^{int-RCI} \quad (13)$$

$$P_{t,\omega}^{DEM} = P_{t,\omega}^{D-RCI} + P_t^{UP-RCI} - P_t^{Down-RCI} \quad (14)$$

$$P_{t,\omega}^{D-RCI} = P_{t,\omega}^{D-R} + P_{t,\omega}^{D-C} + P_{t,\omega}^{D-I} \quad (15)$$

$$P_t^{UP-RCI} = P_t^{UP-R} + P_t^{UP-C} + P_t^{UP-I} \quad (16)$$

$$P_t^{Down-RCI} = P_t^{Down-R} + P_t^{Down-C} + P_t^{Down-I} \quad (17)$$

$$P_{t,\omega}^{ESS} = P_{t,\omega}^{CH} - P_{t,\omega}^{DCH} \quad (18)$$

$$P_t^{int-RCI} = P_t^{int-R} + P_t^{int-C} + P_t^{int-I} \quad (19)$$

معادله (۱۳)، تعادل بین توان تولیدی و بار مصرفی ریزشکه را نشان می‌دهد. معادله (۱۴)، بار مصرفی کل و میزان بار مصرفی شیفت‌داده‌شده را که در هر گام زمانی t ، افزایش یا کاهش می‌دهد توصیف می‌کند. معادله (۱۵)، مربوط به بار مصرفی ریزشکه که شامل سه نوع بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی می‌باشد. معادله‌های (۱۶) و (۱۷)، بارهای مسکونی، تجاری و صنعتی شیفت‌داده‌شده را نشان می‌دهد، به‌طوری‌که معادله (۱۶) مربوط به افزایش بار در گام زمانی t و معادله (۱۷)، مربوط به کاهش بار در گام زمانی t است. معادله (۱۸)، مربوط به شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌کننده است و معادله (۱۹)، مقدار بار مصرفی قطع‌شده در گام زمانی t می‌باشد.

۳-۴- قید عملکرد ژنراتورها (DGs)

در این بخش، قیود مربوط به عملکرد ژنراتورها در مسأله بهره‌برداری ریزشکه، به‌صورت زیر بیان شده‌است:

$$P_{j,t,\omega}^{DG} + R_{j,t,\omega}^{DG} \leq \bar{P}_j^{DG} \cdot U_{j,t,\omega}^{DG} \quad (20)$$

$$U_{j,t,\omega}^{DG} \cdot \underline{P}_j^{DG} \leq P_{j,t,\omega}^{DG} \quad (21)$$

$$-RR_j^{Down} \leq P_{j,t,\omega}^{DG} - P_{j,t-1,\omega}^{DG} \leq RR_j^{UP} \quad (22)$$

$$0 \leq R_{j,t,\omega}^{DG} \leq \bar{P}_j^{DG} - P_{j,t,\omega}^{DG} \quad (23)$$

معادله (۲۰)، حد بالای توان تولیدی ژنراتورها را برای تأمین انرژی و رزرو در هر گام زمانی و برای هر سناریو مشخص می‌کند. معادله (۲۱)، مربوط به حد پایین توان تولیدی ژنراتور است، معادله (۲۲)، نرخ تغییرات افزایشی و کاهش‌ی توان خروجی ژنراتورها، در شروع هر گام زمانی می‌باشد. معادله (۲۳)، حد بالا و پایین توان تولیدی ژنراتورها برای تأمین رزرو را نشان می‌دهد.

۳-۵- قید عملکرد منبع ذخیره‌کننده

قیود زیر برای عملکرد منبع ذخیره‌کننده، باید در مسأله بهره‌برداری ریزشکه لحاظ شود:

$$P_{t,\omega}^{CH} \leq \bar{P}_{ESS} \cdot V_{t,\omega}^{CH} \quad (24)$$

$$P_{t,\omega}^{DCH} \leq \bar{P}_{ESS} \cdot V_{t,\omega}^{DCH} \quad (25)$$

$$R_t^C = \gamma^C \cdot P_t^{D-C-Det} \quad (42)$$

$$R_t^I = \gamma^I \cdot P_t^{D-I-Det} \quad (43)$$

$$SR_t = R_t^R + R_t^C + R_t^I \quad (44)$$

$$\sum_{j \in J} R_{j,t,\omega}^{DG} + R_t^{int-RCI} \geq SR_t \quad (45)$$

معادله‌های (۴۱) تا (۴۳)، مربوط به مقدار رزرو است که به صورت درصدی از بار مصرفی پیش‌بینی شده تعریف می‌شوند. معادله (۴۴)، مجموع رزرو در نظر گرفته شده توسط سه نوع بار مصرفی می‌باشد. معادله (۴۵)، مجموع بارهای قابل قطع و ظرفیت ژنراتورها جهت تأمین رزرو مورد نیاز ریزش شبکه در هر گام زمانی و هر سناریو می‌باشد.

با توجه به معادلات ۱ تا ۸، قسمت اول رابطه ۱۲ یعنی ETC، خطی می‌باشد. همچنین، با توجه به رابطه ۹، قسمت دوم رابطه ۱۲ یعنی CVaR نیز خطی می‌باشد. در رابطه ۱۲، β پارامتری است که مقدار ریسک‌گریزی اپراتور ریزش شبکه را نشان می‌دهد. این پارامتر توسط خود اپراتور تنظیم می‌شود و براساس آن مقدار ریسک‌گریزی خود را مشخص می‌کند. بنابراین، رابطه ۱۲ از دو عبارت خطی تشکیل شده است. همچنین، باتوجه به اینکه تمامی قیود ارائه شده در روابط ۱۰ تا ۴۰، خطی هستند بنابراین مدل ارائه شده برای مسئله بهره‌برداری ریزش شبکه از نوع MILP می‌باشد. این مدل در نرم‌افزار GAMS با حل کننده CPLEX حل شده و Gap در نظر گرفته شده برای آن در بهینه‌سازی برابر صفر قرار داده شده است.

۳-۹- مدل منابع تجدیدپذیر

توان تولیدی منابع تجدیدپذیر مثل توربین بادی و پنل خورشیدی دارای عدم قطعیت می‌باشند. توان خروجی توربین بادی به سرعت باد و توان خروجی پنل خورشیدی به تابش نور خورشید و درجه حرارت محیط وابسته است.

۳-۹-۱- مدل توربین بادی

با استفاده از برازش منحنی، می‌توان یک رابطه بین سرعت باد و توان تولیدی توربین به دست آورد. همچنین برای مدل سازی عدم قطعیت سرعت باد و تولید سناریو، از تابع چگالی احتمال توزیع ویبول استفاده شده است. در این مقاله، رابطه توان خروجی توربین بادی در هر گام زمانی و هر سناریو برحسب سرعت باد به صورت زیر است [۱۲]:

$$P_W^{out}(\omega, t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq V_{t,\omega} \leq V_1 \\ aV_{t,\omega}^3 + bV_{t,\omega}^2 + cV_{t,\omega} + d & V_1 \leq V_{t,\omega} \leq V_r \\ P_{rated} & V_r \leq V_{t,\omega} \leq V_c \\ 0 & V_{t,\omega} \geq V_c \end{cases} \quad (46)$$

در رابطه (۴۶)، V_1 ، V_r ، V_c و V_c به ترتیب، سرعت باد در هر گام زمانی و سناریو، سرعت شروع تولید توان توربین بادی، سرعت نامی و سرعت به اشباع رسیدن توربین بادی است.

$$0 \leq \begin{pmatrix} P_t^{Down-R} \\ P_t^{Down-C} \\ P_t^{Down-I} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} B^{Down-R} \\ B^{Down-C} \\ B^{Down-I} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_t^{D-R-Det} \\ P_t^{D-C-Det} \\ P_t^{D-I-Det} \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$0 \leq \begin{pmatrix} P_t^{UP-R} \\ P_t^{UP-C} \\ P_t^{UP-I} \end{pmatrix} \leq \begin{pmatrix} B^{UP-R} \\ B^{UP-C} \\ B^{UP-I} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P_t^{D-R-Det} \\ P_t^{D-C-Det} \\ P_t^{D-I-Det} \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$P_t^{Down-RCI} = P_t^{Down-R} + P_t^{Down-C} + P_t^{Down-I} \quad (36)$$

$$P_t^{UP-RCI} = P_t^{UP-R} + P_t^{UP-C} + P_t^{UP-I} \quad (37)$$

$$\sum_{t \in T} P_t^{Down-R} = \sum_{t \in T} P_t^{UP-R} \quad (38)$$

$$\sum_{t \in T} P_t^{Down-C} = \sum_{t \in T} P_t^{UP-C} \quad (39)$$

$$\sum_{t \in T} P_t^{Down-I} = \sum_{t \in T} P_t^{UP-I} \quad (40)$$

معادله‌های (۳۴) و (۳۵)، به ترتیب، محدودیت مربوط به درصدی از بار مصرفی است که در ساعت‌های پیک بار توسط مصرف کننده کاهش و محدودیت مربوط به درصدی از بار مصرفی است که در ساعت‌های کم‌باری افزایش می‌یابد. معادله‌ها (۳۶) و (۳۷)، مجموع سه نوع بار مصرفی است که در ساعت‌های پیک بار و کم‌باری کاهش و افزایش می‌یابد. معادله‌های (۳۸) تا (۴۰)، مقید می‌کنند که مجموع هر نوع بار مصرفی که در طول دوره زمانی بهره‌برداری، افزایش و کاهش پیدا می‌کند، باید برابر باشد. به عبارت دیگر کل بار مصرفی در مدت زمان بهره‌برداری، ثابت باقی می‌ماند.

۳-۸- تأمین رزرو مورد نیاز ریزش شبکه

ریزش شبکه‌ها به طور کلی در دو حالت جزیره‌ای و متصل به شبکه مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. در حالت متصل به شبکه نیازی به تأمین رزرو توسط منابع تولید آن، برای رفع پیشامدهایی که در ریزش شبکه اتفاق می‌افتد، نمی‌باشد. دلیل آن این است که، رزرو مورد نیاز در هر لحظه توسط شبکه بالادست تأمین می‌شود. در این مقاله ریزش شبکه مورد بررسی به صورت جزیره‌ای بهره‌برداری می‌شود. بنابراین، در صورت رخداد پیشامد، عدم تعادل بین بار تولیدی و مصرفی باید توسط رزروی که در مسأله بهره‌برداری ریزش شبکه مشخص می‌شود، رفع شود. معمولاً رزرو مورد نیاز ریزش شبکه به اندازه بزرگترین منبع تولید ریزش شبکه یا درصدی از بار مصرفی آن در هر گام زمانی، تعیین می‌شود. در این مقاله، رزرو مورد نیاز ریزش شبکه براساس روش دوم، انتخاب شده است. معادله (۶) که در بخش توصیف تابع هدف تشریح شد، هزینه ثابت مربوط به تأمین رزرو در طول دوره زمانی مدیریت انرژی ریزش شبکه است. معادله‌های (۷) و (۸)، هزینه مربوط به رزرو است زمانی که، پیشامدی در ریزش شبکه رخ دهد و براساس درصد فراخوانی ($r(t)$ ، رزرو برای جبران کمبود تولید، توسط بارهای قابل قطع و ژنراتورها تولید می‌شود [۲۵].

$$R_t^R = \gamma^R \cdot P_t^{D-R-Det} \quad (41)$$

۳-۹-۲- مدل پنل خورشیدی

برای مدل سازی عدم قطعیت تابش خورشید و درجه حرارت و تولید سناریو، از تابع چگالی احتمال توزیع ویبول استفاده شده است. رابطه توان خروجی پنل خورشیدی بر حسب تابش خورشید و درجه حرارت به صورت زیر است [۲۶]:

$$P_{PV}^{out}(\omega, t) = \bar{P}_{STC} \cdot \frac{G_{t,\omega}^{AC}}{G_{STC}} \cdot (1 + k(T_{t,\omega}^e - T_{STC})) \quad (47)$$

در رابطه (۴۷)، \bar{P}_{STC} ، توان خروجی بیشینه پنل خورشیدی تحت شرایط آزمایش استاندارد، $G_{t,\omega}^{AC}$ و G_{STC} ، به ترتیب، تابش در هر گام زمانی و هر سناریو و تابش استاندارد و $T_{t,\omega}^e$ و T_{STC} ، به ترتیب، درجه حرارت در هر گام زمانی و هر سناریو و درجه حرارت استاندارد را نشان می دهند.

۴- مطالعات عددی

۴-۱- اطلاعات ورودی

مدل ریاضی نوشته شده در این مقاله جهت بهره برداری یک ریزشبه نمونه توسط نرم افزار گمز (GAMS) ارائه شده است. در جدول (۲)، احتمال وقوع هر ۱۵ سناریو جهت حل مسأله بهره برداری ریزشبه جزیره ای مشخص شده است. این ریزشبه دارای ۱۲ ژنراتور [۲۷]، ۴ توربین بادی (۰/۵۶ مگاوات)، پنل های خورشیدی (۱/۴۴ مگاوات)، بارهای قابل قطع و قابل شیفیت به عنوان منبع تولید مجازی و منبع ذخیره کننده که مشخصات آن ها در جدول (۳) و (۴) ذکر شده است، منابع تولید توان ریزشبه را تشکیل می دهند. پروفیل بار مصرفی پیش بینی شده ریزشبه در طول دوره زمانی ۲۴ ساعته که شامل سه نوع بار مسکونی، تجاری و صنعتی است در شکل (۳) نشان داده شده است و برای مدل سازی عدم قطعیت آن و تولید سناریو، از تابع چگالی احتمال توزیع نرمال استفاده شده است. شکل های (۴) و (۵)، به ترتیب، توان تولیدی پیش بینی شده هر توربین و توان تولیدی پنل خورشیدی را در طول شبانه روز نشان می دهند و با استفاده از مدل های توربین بادی و پنل خورشیدی ذکر شده، توان هریک از این منابع در ۱۵ سناریو مشخص شده است. همچنین برای مبحث مدیریت ریسک ریزشبه، مقدار α ، ۰/۸۵ است، یعنی اپراتور ریزشبه که به ۸۵ درصد سناریوها اعتماد دارد و هدف مدیریت ریسک ۱۵ درصد سناریوها، که به عنوان بدترین سناریوها در نظر گرفته شده است.

جدول ۲: احتمال وقوع هر سناریو در مسأله تصمیم گیری اتفاقی

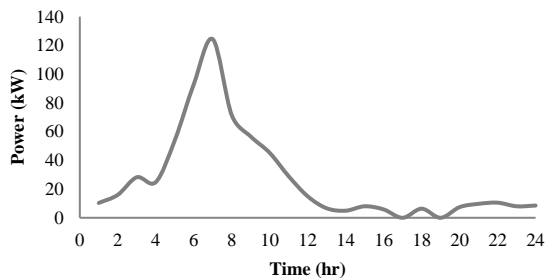
شماره سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
احتمال وقوع سناریو	۰/۰۶۱	۰/۰۴۹	۰/۰۴۷	۰/۰۹۱	۰/۰۵۱
شماره سناریو	۶	۷	۸	۹	۱۰
احتمال وقوع سناریو	۰/۰۸۵	۰/۰۷۷	۰/۰۶۵	۰/۰۶۵	۰/۰۶۴
شماره سناریو	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
احتمال وقوع سناریو	۰/۰۷۴	۰/۰۸۷	۰/۰۶۷	۰/۰۶۳	۰/۰۵۴

جدول ۳: مشخصات منبع ذخیره کننده

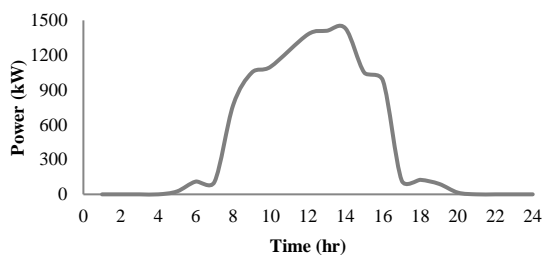
$\bar{P}_{ESS}(kW)$	$SOE(kWh)$	$\overline{SOC}(kWh)$	η_{CH}	η_{DCH}	$C_{ESS}(\frac{\$}{kWh})$
۴۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۰/۹	۰/۹	۰/۲۴

جدول ۴: ضرایب بار مصرفی جهت تأمین رزرو، شیفیت و قطع

γ^R	γ^C	γ^I	B^{Down-R}	B^{Down-C}	B^{Down-I}
۱۰٪	۱۰٪	۱۰٪	۵٪	۵٪	۱۰٪
B^{UP-R}	B^{UP-C}	B^{UP-I}	ϵ^R	ϵ^C	ϵ^I
۵٪	۵٪	۱۰٪	۲۵٪	۲۰٪	۲۰٪

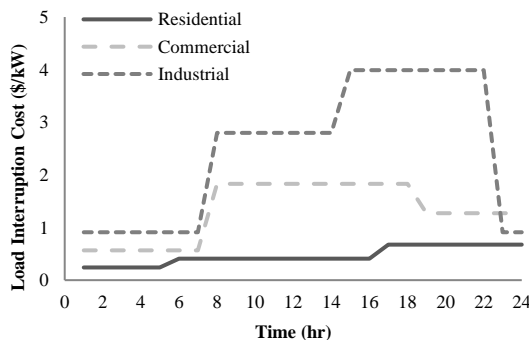


شکل ۴: توان خروجی پیش بینی شده هر توربین بادی در طول ۲۴ ساعت

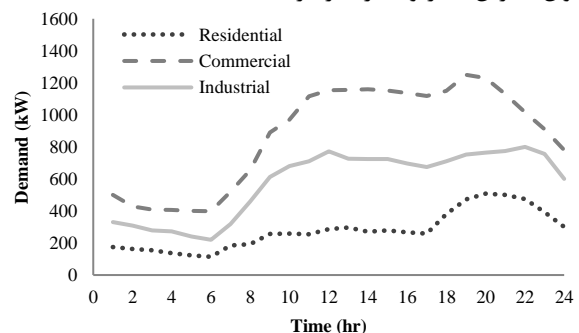


شکل ۵: توان خروجی پیش بینی شده پنل خورشیدی در طول ۲۴ ساعت

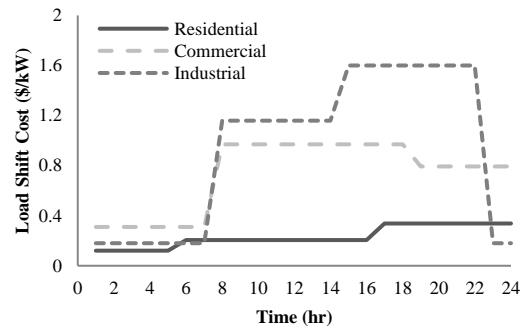
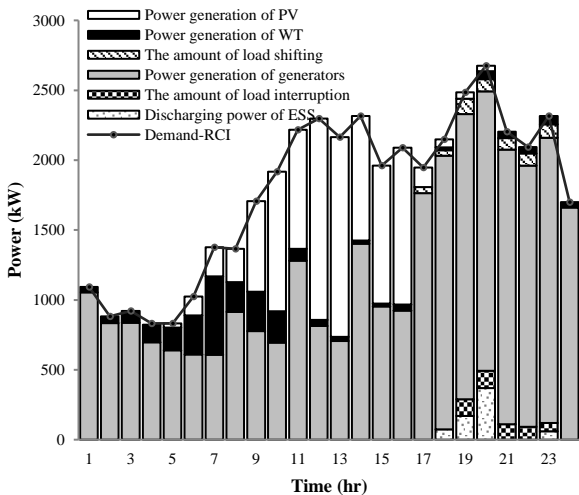
بخشی از هزینه بهره برداری ریزشبه که در تابع هدف آمده است، مربوط به بار قطع شده برای تأمین انرژی و رزرو و بار قابل شیفیت برای مدیریت بار و مسطح کردن پروفیل بار مصرفی می باشد. در شکل (۶) و (۷)، به ترتیب هزینه قطع بار و شیفیت بار در طول دوره زمانی ۲۴ ساعته بهره برداری ریزشبه نشان داده شده است [۲۸].



شکل ۶: هزینه قطع بارهای مصرفی در طول ۲۴ ساعت



شکل ۷: پروفیل بار مصرفی پیش بینی شده ریزشبه در طول ۲۴ ساعت



شکل ۷: هزینه شیفت بارهای مصرفی در طول ۲۴ ساعت

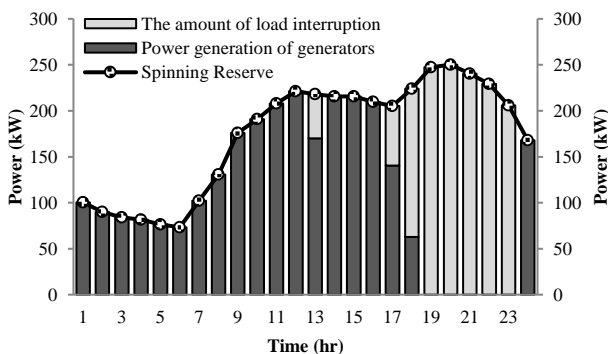
۲-۴ نتایج

در این بخش، به دلیل بالابودن حجم نتایج مربوط به ۱۵ سناریو، نتیجه بهره‌برداری ریزشبهکه در طول دوره زمانی ۲۴ ساعته و برای سناریو ۱ و پارامتر ریسک‌گریزی ۰/۵، در شکل (۸) نشان داده شده، که شامل توان تولیدی ژنراتورها، توربین بادی، پنل خورشیدی، منبع ذخیره‌کننده، شیفت بار مصرفی و قطع بار مصرفی جهت تأمین بار مصرفی مسکونی، تجاری و صنعتی ریزشبهکه و نمایش تعادل توان تولیدی و مصرفی در هر گام زمانی می‌باشد. همانطور که از شکل (۸) مشخص است، چون هزینه بهره‌برداری منابع تجدیدپذیر صفر هستند در نتیجه تا حد امکان از این منابع با توجه به ظرفیت آن‌ها در تأمین بار مصرفی استفاده شده و مازاد این انرژی صرف شارژ منبع ذخیره‌کننده می‌شود. در ساعات پیک بار هم با افزایش بار مصرفی ریزشبهکه و کم‌بودن ظرفیت بیشینه ژنراتورها نسبت به بار مصرفی در پیک بار، در نتیجه از بارهای پاسخگو به‌عنوان تولید مجازی استفاده شده و این روش تأثیر زیادی در هزینه موردانتظار ریزشبهکه خواهد داشت. در شکل (۹)، مقادیر توان ژنراتورها و بارهای قابل قطع برای تأمین رزرو موردنیاز ریزشبهکه برای سناریو ۱ و ۵۰ درصد فراخوانی رزرو، ارائه شده است. شکل (۱۰)، توان شارژ و دشارژ و وضعیت شارژ (انرژی ذخیره‌شده) منبع ذخیره‌کننده را نشان می‌دهد. با توجه به رفتار دینامیکی منبع ذخیره‌کننده، مشخص است که در ساعات‌های کم‌باری شارژ شده و در ساعات‌های پیک‌بار جهت تغذیه بار مصرفی با هزینه کمتر دشارژ می‌شود. در شکل (۱۱)، وضعیت روشن و خاموش بودن هر کدام از ۱۲ ژنراتور در طول دوره زمانی بهره‌برداری ریزشبهکه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مدتی که منابع تجدیدپذیر توان موردنیاز را تولید می‌کنند، در تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری ریزشبهکه، از ژنراتورها به‌دلیل هزینه بالای بهره‌برداری و مصرف سوخت زیاد، تا حد امکان استفاده نمی‌شود. در جدول (۵)، هزینه بهره‌برداری ریزشبهکه برای ۱۵ سناریو آورده شده است.

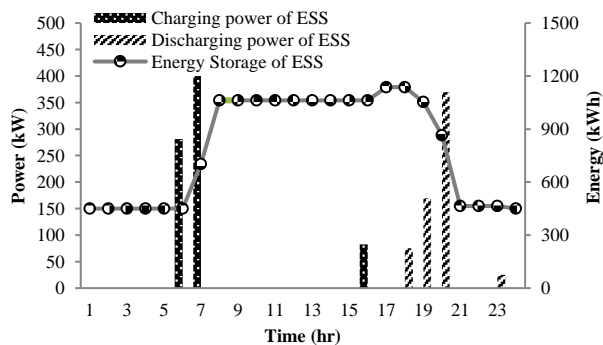
جدول ۵: هزینه بهره‌برداری ریزشبهکه در هر سناریو

شماره سناریو	۱	۲	۳	۴	۵
هزینه کل ریزشبهکه (\$) سناریو	۸۰۵۴/۵۰	۷۹۸۹/۴۴	۸۷۲۸/۹۲	۸۵۹۵/۱۹	۷۸۶۱/۰۹
شماره سناریو	۶	۷	۸	۹	۱۰
هزینه کل ریزشبهکه (\$) سناریو	۷۳۶۲/۲۲	۸۱۹۷/۲۹	۸۳۲۸/۹۳	۸۴۲۷/۴۰	۸۰۳۲/۷۴
شماره سناریو	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
هزینه کل ریزشبهکه (\$) سناریو	۸۱۴۷/۹۳	۸۸۱۹/۴۶	۷۹۶۶/۵۷	۸۷۲۸/۹۲	۷۸۴۲/۲۰

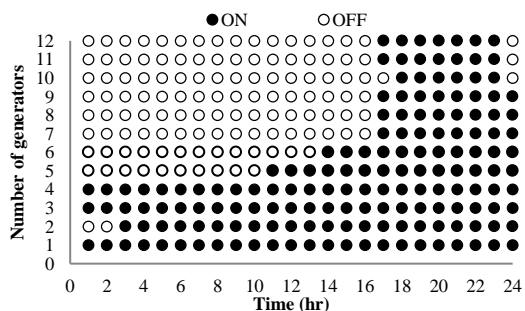
شکل ۸: سهم هر یک از منابع تولید ریزشبهکه برای تأمین انرژی



شکل ۹: سهم دیزل ژنراتورها و قطع بار در تأمین رزرو



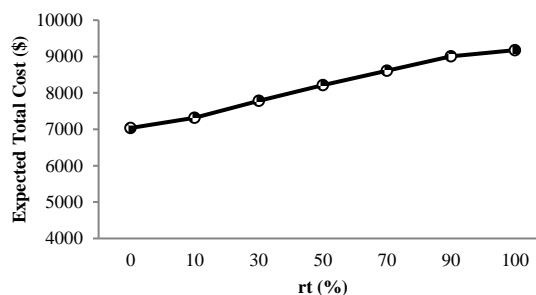
شکل ۱۰: رفتار دینامیکی منبع ذخیره‌کننده در طول ۲۴ ساعت



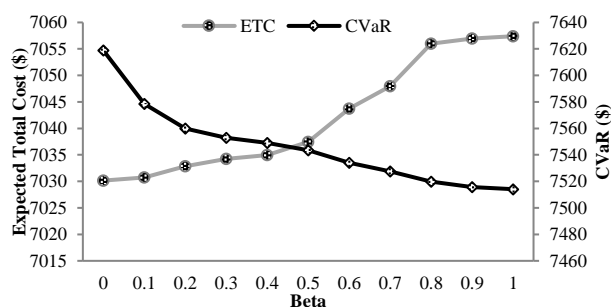
شکل ۱۱: وضعیت خاموش و روشن ژنراتورها در طول ۲۴ ساعت

۳-۴- تحلیل حساسیت

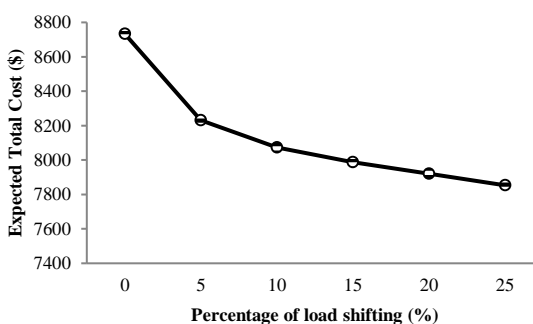
هزینه موردانتظار ریزشکبه و تصمیم‌گیری برای بهره‌برداری آن همواره تحت تأثیر نوع مدل‌سازی مسأله و پارامترهای آن است. به همین دلیل، یک تحلیل حساسیت جهت مشاهده تغییرات هزینه کل موردانتظار ریزشکبه نسبت به برخی از پارامترهای مدل ریاضی مسأله، مثل: درصد فراخوانی رزرو، پارامتر ریسک‌گریزی و درصد شیفت بار مصرفی، انجام شده و به ترتیب در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نشان داده شده‌است.



شکل ۱۲: حساسیت هزینه کل موردانتظار نسبت درصد فراخوانی رزرو ($\beta = 0.5$)



شکل ۱۳: حساسیت ETC و CVaR به پارامتر ریسک‌گریزی ($r_t = 0$)



شکل ۱۴: حساسیت هزینه موردانتظار ریزشکبه به درصد شیفت بار ($\beta = 0.5$ و $r_t = 0.5$)

هزینه بهترین سناریوها هم بیشتر شده، در نتیجه در کل هزینه موردانتظار بیشتر می‌شود. بنابراین به‌طور کلی، هرچه ریسک‌گریزی اپراتور بیشتر شود، در صورت رخداد بدترین سناریو ضرر کمتری خواهد کرد. در شکل (۱۴)، مشاهده می‌شود، هرچه درصد شیفت بار مصرفی از ساعت‌های پیک بار به ساعت‌های کم‌باری افزایش یابد، هزینه کل موردانتظار ریزشکبه به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن مقدار صفر برای پارامتر ریسک‌گریزی در مدل ارائه شده، CVaR در تابع هدف حذف شده و تنها ETC کمینه خواهد شد (اپراتور ریسک‌پذیر) و با تغییر پارامتر ریسک‌گریزی به ۱، تابع هدف با در نظر گرفتن ریسک حل خواهد شد. نتایج این دو حالت در جدول ۶ ارائه شده‌است. با تغییر پارامتر ریسک‌گریزی، اپراتور ریزشکبه متغیرهای تصمیم بخش اول مسئله دو بخشی شامل قطع بار و شیفت بار مصرفی برای تأمین انرژی و قطع بار برای رزرو در نظر گرفته شده را تغییر داده و به تبع آن، متغیرهای تصمیم بخش دوم هم شامل توان خروجی دیزل ژنراتورها و منبع ذخیره‌کننده برای تأمین انرژی و توان خروجی دیزل ژنراتورها برای مهیا کردن رزرو تغییر خواهند کرد. نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که اضافه کردن شاخص CVaR به مدل بهره‌برداری ریزشکبه تأثیر بسیار زیادی بر روی تعادل توان و رزرو ریزشکبه دارد. در واقع ریزشکبه برای تأمین انرژی و رزرو موردنیاز خود با توجه به شاخص CVaR، تصمیمات متفاوتی خواهد گرفت. افزایش ریسک‌گریزی اپراتور موجب افزایش تمایل آن به استفاده از منابع مستقل از سناریو برای تأمین توان مصرفی و رزرو جهت کاهش احتمالی بودن نتایج بهره‌برداری، کاهش اختلاف هزینه بین بهترین و بدترین سناریو و مدیریت ریسک خواهد شد.

جدول ۶: حساسیت توان تولیدی و رزرو به پارامتر ریسک‌گریزی (سناریو ۱)

β	مجموع توان تولیدی در کل دوره بهره‌برداری (kW)		مجموع رزرو در نظر گرفته شده در کل دوره بهره‌برداری (kW)	
	منابع مستقل از سناریو	منابع مبتنی بر سناریو	منابع مستقل از سناریو	منابع مبتنی بر سناریو
۰	۹۴۹/۵۱۵	۲۹۸۰۴/۴۲۶	۱۳۹۹/۱۰۵	۲۷۶۴/۳۰۵
۱	۹۹۵/۰۰۵	۲۹۶۷۴/۶۵۱	۱۴۹۰/۵۴۹	۲۶۷۲/۸۶۱

۴-۴- مقایسه نتایج مقاله با برخی از مقالات مرجع

در این بخش، به‌طور کلی برخی از برتری‌های مدل‌سازی مورد استفاده در این مقاله نسبت به کارهای انجام شده در مقالات مرجع و بهبود آن‌ها آورده شده‌است:

- در این مقاله برخلاف مدل تصمیم‌گیری احتمالی که در مراجع [۱۲]، [۲۱] آمده‌است و عدم قطعیت پارامترهای متغیر مساله قابل کنترل نبوده و ریسک تصمیم‌گیری اپراتور مدیریت نمی‌شود، از مدل تصمیم‌گیری اتفاقی دویخشی استفاده شده و بدین وسیله به راحتی با تصمیم‌گیری در بخش مستقل از سناریو و استفاده از شاخص ریسک، احتمالی بودن مساله و عدم قطعیت کنترل شده و ریسک تصمیم‌گیری مدیریت می‌شود.
- در مراجع [۱۲]، [۲۱]، برنامه‌ریزی رزرو احتمالی بوده و هزینه تأمین رزرو و تأثیر درصد فراخوانی رزرو در مدل‌سازی مساله احتمالی

هماهنگی و استفاده از منابع تولید پراکنده و بارهای پاسخگو، به‌طور قابل توجهی نتایج بهره‌برداری ریزشبکه را بهبود داده، هزینه کل موردانتظار بهره‌برداری کاهش یافته و به حفظ تعادل توان تولیدی و مصرفی تحت نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر، به‌خصوص وقتی که خطای پیش‌بینی و عدم قطعیت زیاد باشد، کمک می‌کند. در آخر، یک تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مربوط به درصد فراخوانی رزرو، ریسک‌گریزی و درصد شیفیت بار مصرفی ارائه شد. با افزایش درصد فراخوانی رزرو، توان تولیدی ژنراتورها و بار مصرفی قطع شده برای تأمین رزرو افزایش یافته و در نتیجه هزینه بهره‌برداری بیشتر شد. ریسک بالای اپراتور در بهره‌برداری ریزشبکه به دلیل عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی موجب ایجاد اختلاف زیاد در بهترین و بدترین سناریو می‌شود. با تعریف روش CVaR برای کنترل ریسک و عدم قطعیت مسأله، تأثیر ریسک‌گریزی اپراتور بر روی هزینه بدترین سناریوها و هزینه کل موردانتظار ریزشبکه بررسی شده و افزایش ریسک‌گریزی اپراتور موجب کاهش هزینه و ضرر، در بدترین سناریوها و در عوض افزایش هزینه موردانتظار ریزشبکه شد. ایجاد انگیزه در مصرف‌کنندگان و قرارداد بستن با آن‌ها برای شیفیت بار مصرفی از ساعت‌های پیک بار به ساعت‌های کم‌باری موجب کاهش قابل توجه در هزینه کل موردانتظار ریزشبکه خواهد شد. در این مقاله، روش جدیدی برای تأمین رزرو موردنیاز ریزشبکه با استفاده از ایجاد انگیزه و بستن قرارداد با بارهای قابل قطع ارائه شد و همچنین علاوه بر هزینه تأمین رزرو، هزینه مربوط به احتمال فراخوانی رزرو در هر گام زمانی در تابع هدف آورده شده و این عامل می‌تواند بر روی تصمیم اپراتور ریزشبکه برای بهره‌برداری آن تأثیر بگذارد. تاکنون روش‌های زیادی در مورد مدل‌سازی ریاضی برای بهره‌برداری ریزشبکه ارائه شده‌اند، اما با استفاده از مدل دوبخشی ارائه شده در این مقاله، به راحتی می‌توان احتمالی بودن نتایج بهره‌برداری ریزشبکه را که به دلیل عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و بار مصرفی به وجود می‌آیند را براساس قراردادهای روزپیش که مربوط به بخش مستقل از سناریو است، کنترل کرد و نتایج تصمیم‌گیری اپراتور را در حالت متکی به بهره‌برداری روزپیش و زمان واقعی، با هم مقایسه کرد. اخیراً تحقیقات جدید و اندکی در زمینه روش بهینه‌سازی دوسطحی (bi-level) برای ارتباط و مبادله انرژی بین چند ریزشبکه با هم ارائه شده‌است که این روش هم می‌تواند ایده جدیدی برای تحقیقات بعدی محقق‌ها باشد.

مراجع

- [1] S. Salahi and S. Bahramara, "Modeling operation problem of micro-grids considering economical, and environmental issues as mixed integer non-linear programming," *Int. Journal of Renewable Energy Development*, vol. 5, no. 2, pp. 139-149, 2016.
- [2] S. Bahramara, M. Parsa Moghadam and M.R. Haghifam, "Modeling hierarchical decision making framework for operation of active distribution grids," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 16, pp. 2555-2564, 2015.
- [3] C.A. Hernandez, T.C. Green and N. Mugnier, "Fuel consumption minimization of a micro-grid," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 4, no. 2, pp. 673-678, 2005.
- [4] S. Conti, R. Nicolosi S. Rizzo and H. Zeineldin, "Optimal dispatching of distributed generators and storage systems for MV

آورده‌نشده و این عامل قطعاً بر روی نتایج بهره‌برداری ریزشبکه جزیره‌ای و تصمیم‌گیری اپراتور تأثیر خواهد گذاشت. بنابراین در این مقاله، این کمبود برطرف شده و یک برنامه‌ریزی جامعی برای رزرو آورده شد و تأثیر آن در شکل (۹) و (۱۲) به‌طور واضح نشان داده شد. ۳. در مقالات مرجع، قطع بار به‌صورت اجباری و بدون توافق با مصرف‌کننده انجام شده و این عامل موجب افزایش هزینه بهره‌برداری ریزشبکه جزیره‌ای و نارضایتی مصرف‌کننده‌ها خواهد شد. در این مقاله، علاوه بر استفاده از بارهای قابل‌شیفت، از بارهای قابل قطع هم به‌صورت توافقی و قراردادی بین اپراتور ریزشبکه و مصرف‌کننده‌ها، به‌عنوان بارهای پاسخگو استفاده شده‌است و این روش موجب کاهش هزینه بهره‌برداری ریزشبکه جزیره‌ای و فرهنگ‌سازی برای ایجاد انگیزه در مصرف‌کننده‌ها خواهد شد. همچنین استفاده از بارهای قابل قطع به‌صورت قراردادی و مربوط به بخش اول (مستقل از سناریو و برنامه‌ریزی شده) برای برنامه‌ریزی رزرو طبق شکل (۲)، هم موجب کاهش احتمالی بودن رزرو فراهم شده در هر سناریو شده و هم به دلیل نرخ تغییرات زیاد و سریع بودن، به راحتی بخشی از رزرو به سرعت جهت استفاده برای ایجاد تعادل بین بار تولیدی و مصرفی ریزشبکه جزیره‌ای فراهم خواهد شد.

۴. در این مقاله، داده‌ها، اطلاعات و مشخصات منبع ذخیره‌کننده، بارهای پاسخگو، ژنراتورها شامل مشخصه هزینه، RD، RU، هزینه روشن و خاموش شدن و همچنین مدل کردن هزینه ثابت رزرو و در نظر گرفتن هزینه درصد فراخوانی رزرو در تابع هدف، تغییر کرده، اضافه شده و همچنین به واقعیت نزدیک‌تر شده‌است و این عامل موجب تغییر نتایج مسئله بهره‌برداری در این مقاله نسبت به مرجع [۱۲] می‌شود. اما با وارد کردن اطلاعات ورودی مرجع [۱۲] به مدل‌سازی ارائه شده در این مقاله، هزینه بهره‌برداری موردانتظار از مقدار موجود در مرجع [۱۲] یعنی، ۴۷۹۱ دلار به ۳۰۲۹/۱۰۲ دلار کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که در مدل‌سازی این مقاله، هزینه قطع بار چون به‌صورت توافقی می‌باشد کمتر است از هزینه قطع بار در مرجع [۱۲] که به‌صورت اجباری می‌باشد. همچنین مدل‌سازی رزرو و برنامه‌ریزی آن کاملاً متفاوت از مرجع [۱۲] است. بنابراین این نتیجه، جامعیت داشتن و برتر بودن مسأله اتفاقی دوبخشی ارائه شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری و کارهای پیش‌رو

در این مقاله، یک مدل ریاضی جامع اتفاقی برای بهره‌برداری یک ریزشبکه جزیره‌ای توسعه داده شد. مدل شامل دو بخش بوده به‌طوری‌که، بخش اول، مستقل از سناریو و به‌صورت برنامه‌ریزی روزپیش بارهای قابل قطع و بارهای قابل‌شیفت می‌باشد. بخش دوم مبتنی بر سناریو و به‌صورت برنامه‌ریزی زمان واقعی منابع تجدیدپذیر، منبع ذخیره‌کننده و ژنراتورها ارائه شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که

- [18] M. Ashari, C.V. Nayar, "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system," *Solar Energy*, vol. 66, 1-9, 1999.
- [19] A. Gupta, R.P. Saini, M.P. Sharma, "Modelling of hybrid energy system: Combined dispatch strategies and solution algorithm," *Renewable Energy*, vol. 36, 466-473, 2011.
- [20] H. Morais, P. Kadar, P. Faria, Z.A. Vale, H.M. Khodr, "Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming," *Renewable Energy*, vol. 35, 151-156, 2010.
- [۲۱] علی مهدی‌زاده، نوید تقی‌زادگان کلانتری، «برنامه‌ریزی تصادفی ریزش‌بکه جزیره‌ای در حضور سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶.
- [۲۲] جمیل جنتی، داریوش نظریور، «مدیریت انرژی پارکینگ هوشمند خودروهای برقی در یک ریزش‌بکه با در نظر گرفتن اثرات برنامه پاسخ‌گویی بار»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶.
- [23] A. J. Conejo, M. Carrion, J. M. Morales, "Decision making under uncertainty in electricity markets," New York: Springer, 2010.
- [24] M.Q. Wang, H. Gooi, "Spinning reserve estimation in microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, pp. 1164-1174, 2011.
- [25] Doostizadeh and H. Ghasemi, "Day-ahead scheduling of an active distribution network considering energy and reserve markets," *Int. Trans. Elect. Energy Syst.*, vol. 23, no. 5, 930-945, 2013.
- [26] J. Shen, C. Jiang, Y. Liu, A. X. Wang, "A micro-grid energy management system and risk management under an electricity market environment," *IEEE Access*, vol. 4, no. 1, 2349-2356, 2016.
- [27] T. Logenthiran, D. Srinivasan and A. M. Khambadkone, "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated micro-grids in a distributed system," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 8, no. 5, 138-148, 2011.
- [28] I. Bae, J. Kim, C. Singh, "Optimal Operating Strategy for distributed generation considering hourly reliability worth," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 1, 287-292, 2004.
- island micro-grids," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 3, pp. 1243-1251, 2012.
- [5] D. T. Nguyen and L. B. Lee, "Risk-constraint profit maximization for micro-grid aggregator with demand response," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, 135-146, 2015.
- [6] Q. Jiang, M. Xue and G. Geng, "Energy management of micro-grid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 3380-3389, 2013.
- [7] Y. Zhang, N. Gatsis and G. B. Giannakis, "Robust energy management for micro-grid with high-penetration renewables," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 944-955, 2013.
- [8] M. Mao, P. Jin, N. D. Hatzigiorgiouris and L. Chang, "Multi-agent based hybrid energy management system for micro-grids," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, 2014.
- [9] M. Arabali, M. Ghofrani, M. Etezadi-Amoli and M. S. Fadali, "Genetic algorithm-based optimization approach for energy management," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 2, no. 4, pp. 162-170, 2013.
- [10] R. P. Behnke, et al., "A micro-grid energy management system based on the rolling horizon strategy," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, 996-1006, 2013.
- [11] M. Rahimiyan, L. Baringo and A. J. Conejo, "Energy management of a cluster of interconnected price-responsive demands," *IEEE Trans. Power syst.*, vol. 3, no. 5, pp. 645-655, 2014.
- [12] W. Alharbi and K. Raahemifa, "Probabilistic coordination of micro-grid energy resources operation considering uncertainty," *Elect. Power Syst. Res.*, vol. 2, no. 3, 1-10, 2015.
- [13] M. Elsied, A. Oukaour, H. Gualous, O.A. Lo Brutto, "Optimal economic and environment operation of micro-grid power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 122, 182-194, 2016.
- [14] M. Elsied, A. Oukaour, H. Gualous, O.A. Lo Brutto, "Optimal economic and environment operation of micro-grid power system," *Energy Conversion and Management*, vol. 122, 182-194, 2016.
- [15] H. Kanchev, F. Colas, V. Lazarov, B. Francois, "Emission reduction and economical optimization of an urban micro-grid operation including dispatched PV-Based active generators," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol.5, 1397-1405, 2014.
- [16] S. Mazzola, C. Vergara, M. Astolfi, V. Li, I. Perez-Arriaga, E. Macchi, "Assessing the value of forecast-based dispatch in the operation of off-grid rural micro-grids," *Renewable Energy*, vol. 108, 116-125, 2017.
- [17] H. Ren, W. Zhou, K.i. Nakagami, W. Gao, Q. Wu, "Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects," *Applied Energy*, vol. 87, 3642-3651, 2010.