



Computational Intelligence in Electrical Engineering
Vol. 15, No. 3, 2024
pp. 15-42
Research Paper

Optimal Power Management and Energy Cost Saving for the Hybrid Microgrids under Uncertainties of Wind Speed and Solar Radiation Considering Demand Side Management (DSM)

Mohsen Aryannezhad ^{*1}, Abdollah Rastgou ², Sasan Ghasemi ³

¹ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Computer Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

³ Postdoctoral researcher, Department of Electrical Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran

Abstract:

Because the energy production of wind turbines (WT) and PV is highly dependent on wind speed and solar radiation, the financial consequences of weather changes in a hybrid microgrid (HMG) have been analyzed. To provide optimal performance of the microgrid, demand side management (DSM) has been also included in the modeling. For this purpose, based on actual weather conditions and output results of Homer software in the hourly data section, the hourly power generation of PV and WT is obtained. Then, optimal energy management among PV, WT, battery, main grid, and a diesel generator is obtained considering DSM and uncertainty in the weather condition, using GAMS software. According to the obtained results, the proper charging and discharging of batteries and demand management in the HMG have essential roles in energy cost saving, operation cost reducing, and reducing purchased electrical energy from the main grid under different weather conditions.

Keywords: Energy management, energy saving, demand side management, microgrid, renewable energy.



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



<https://doi.org/10.22108/isee.2023.134620.1576>

مقاله پژوهشی

برنامه‌ریزی برای مدیریت و مصرف بهینه انرژی الکتریکی در ریزشبکه‌های هیبریدی با در

نظر گرفتن مدیریت تقاضا و نایقینی در مقدار سرعت باد و تابش خورشید

محسن آریان نژاد^{۱*}، عبدالله راستگو^۲، ساسان قاسمی^۳

۱- استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

m-aryannezhad@tvu.ac.ir

۲- استادیار گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

a.rastgou@iauksh.ac.ir

۳- پژوهشگر پسادکتری گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، کردستان، ایران

ghasemi.sasan@gmail.com

چکیده: با توجه به اینکه وابسته‌بودن میزان تولید انرژی توربین‌های بادی و سلول‌های خورشیدی به سرعت باد و تابش خورشید، در این مقاله تبعات مالی کاهش سرعت باد و تابش خورشید در بهره‌برداری بهینه یک ریزشبکه هیبریدی متصل به شبکه اصلی تحلیل و بررسی شده است. همچنین، به منظور بررسی عملکرد اقتصادی و بهینه ریزشبکه، تفکیک بارهای مصرفی و مدیریت تقاضای مصرف‌کنندگان نیز در مدل‌سازی لحاظ شده است؛ به همین منظور، با استفاده از اطلاعات واقعی هواشناسی و کمک نرم‌افزار Homer و نتایج خروجی آن در بخش Hourly Data، مقدار تولید توربین بادی و سلول خورشیدی در هر ساعت به دست آمده‌اند. سپس با نرم‌افزار GAMS بهره‌برداری بهینه برای یک روز در حضور عناصر تجدیدپذیر انرژی، باتری، شبکه اصلی، و همچنین دیزل ژنراتور با در نظر گرفتن نایقینی در مقدار سرعت باد و تابش خورشید به همراه قید Demand response (DR) انجام می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند پیاده‌سازی مناسب مدیریت تقاضا و زمان مناسب شارژ و دشارژ باتری‌ها در ریزشبکه نقش اساسی در صرفه‌جویی مصرف انرژی الکتریکی، کاهش هزینه عملکرد و کاهش هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه اصلی در شرایط مختلف آب و هوایی دارد.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر، بهره‌برداری بهینه، ریزشبکه، صرفه‌جویی انرژی، مدیریت تقاضا.

۱-مقدمه

الکتریکی و افزایش و نوسان شدید قیمت سوخت‌های فسیلی، به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توجه فراوان شده است [۱]. امروزه تأمین انرژی داخلی واحدهای کوچک صنعتی، مراکز درمانی و بهداشتی، صنایع نظامی، و واحدهای پشتیبانی داده‌ها به صورت مستقل از شبکه اصلی اهمیت اساسی دارد [۲]. علاوه بر اینکه ریزشبکه رفتار شبکه اصلی را در مقابل اغتشاشات و خطاهای رخ داده خواهد داشت، دچار محدودیت‌های بیشتری نظیر نداشتن اینرسی و محدودیت در تأمین توان نیز هست [۳]. پس، این ریزشبکه‌ها باید قادر باشند در صورت قطع شدن شبکه اصلی یا کاهش تولید منابع انرژی تجدیدپذیر انرژی الکتریکی، انرژی بارهای ضروری را بدون وقفه تأمین کنند

با توجه به گسترش روزافزون شبکه‌های برق و رشد سالانه مصرف انرژی و همچنین، پدیده گرمایش کره زمین و تلفات بالای نیروگاه‌های سوخت فسیلی و هزینه‌های سنگین احداث نیروگاه و خطوط انتقال و توزیع انرژی

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

نام نویسنده مسئول: محسن آریان نژاد

نشانی نویسنده مسئول: ایران، تهران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، گروه مهندسی برق

[۴]؛ بنابراین، به منظور استفاده بهینه از انرژی تولیدی در ریزشبکه به بهره‌برداری بهینه و کنترل مصرف نیاز است تا از توان تولیدی ریزشبکه نه تنها بارهای آن تأمین توان شود، در ساعات کم مصرف نیز بتواند به شبکه اصلی توان خود را بفروشد و بخشی از هزینه‌های خود را نیز تأمین کند [۵].

نرم‌افزار **General Algebraic Modeling System (GAMS)** برای مدل‌سازی و تحلیل مسائل بهینه‌سازی خطی و غیرخطی و تجزیه و تحلیل سیستم‌های بزرگ و پیچیده کاربرد فراوانی دارد. این نرم‌افزار به طور گسترده‌ای برای مدل‌سازی، توسعه، و حل مسائل مختلف بهینه‌سازی سیستم‌های قدرت استفاده می‌شود. مؤلفه‌های مختلف آن مانند داده‌ها، متغیرها، قیدها، معادلات، تابع هدف و خروجی‌ها برای حل مسائل بهینه‌سازی در نرم‌افزار **GAMS** مدل‌سازی می‌شوند. سپس، حل‌کننده‌های مختلفی مانند برنامه‌ریزی خطی **LP**، برنامه‌ریزی غیرخطی **(NLP)**، برنامه‌ریزی باینری ترکیبی غیرخطی **(MINLP)** و برنامه‌ریزی باینری ترکیبی خطی **(MILP)** را متناسب با مسائل بهینه‌سازی ارائه می‌دهد. برخی از مسائل مانند بهینه‌سازی هزینه تولید، بهینه‌سازی مدیریت بار و توزیع انرژی الکتریکی بهینه با استفاده از این حل‌کننده‌های **GAMS** حل می‌شوند.

به دلیل کنترل ناپذیر بودن خروجی **PV**، عملکرد بهینه و اقتصادی ریزشبکه با نفوذ بالای سلول‌های خورشیدی از چالش‌های عمده‌ای برخوردار است؛ به همین علت، در [۶] یک روش بهینه‌سازی انرژی مشارکتی براساس شارژ و دشارژ باطری با هدف کمینه‌کردن هزینه عملکرد ریزشبکه هم در حالت جزیره‌ای و هم در حالت متصل به شبکه ارائه شده است. نتایج به دست آمده درباره ریزشبکه تحت مطالعه بیان‌کننده مؤثر و اقتصادی بودن روش ارائه شده است. در [۷] یک سیستم مدیریت انرژی برای کاهش تعرفه برق مصرفی ریزشبکه‌های صنعتی متشکل از باطری و منابع تجدیدپذیر انرژی پیشنهاد شده است. به همین منظور، مقدار شارژ و دشارژ باطری براساس ظرفیت ذخیره انرژی داخلی باطری تحت نایقینی منابع تجدیدپذیر انرژی تعیین شده است. در [۸] از سیستم غیرمتمرکز برای کنترل ولتاژ و فرکانس و از سیستم متمرکز برای مدیریت سیستم

ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. استفاده از این دو سطح از کنترل، برای تأمین عملکرد اقتصادی و ایجاد توازن توان تحت نایقینی بار مصرفی است. در [۹] از ۳ معیار عملکرد بهینه اقتصادی، کاهش آلاینده‌های محیطی و انجام بارزدایی برای مدیریت انرژی ریزشبکه استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند بارزدایی منجر به کاهش ۲/۳٪ میزان هزینه‌های ریزشبکه می‌شود و برای کاهش میزان آلاینده‌های محیطی باید منابع انرژی‌های تجدیدپذیر توسعه یابند.

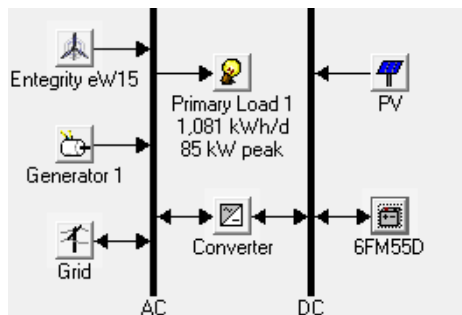
اگرچه در مراجع [۱-۹] و همچنین سایر مقالات، درباره بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه‌ها مطالعه فراوان شده، به موارد زیر به عنوان چالش‌های پیش رو برای بهره‌برداری بهینه در این مقالات به شکل هم‌زمان توجه نشده است:

- جزئیات محاسبه تعداد و ظرفیت تجهیزات ریزشبکه براساس اطلاعات واقعی آب و هوایی در منطقه جغرافیایی مدنظر و شاخص‌های بهینه‌شده‌ای مانند هزینه خالص فعلی کل **(Total net present cost)** و سرمایه اولیه **(Initial capital)** ارائه نشده است.

- شرایط آب و هوایی یک پارامتر متغیر و نامعین است؛ به خصوص با کاهش میزان تابش خورشید و یا کاهش سرعت باد، توان خروجی پنل خورشیدی و توربین بادی به شدت کم می‌شود. تحلیل و بررسی اثرات کاهش مقدار تابش خورشید و سرعت باد براساس اطلاعات واقعی آب و هوایی بر کاهش مقدار توان خروجی پنل خورشیدی و توربین بادی، نحوه تغییر مشارکت واحدهای مختلف تولیدکننده توان داخل ریزشبکه و تبعات مالی آن انجام نشده است. نکته مهم دیگر بحث سه تعرفه‌ای بودن هزینه برق مصرفی است که با مدل‌سازی دقیق این موضوع در کنار بحث پاسخگویی بار به شکل هم‌زمان مدل مدنظر را به واقعیت بسیار نزدیک‌تر می‌کند.

بنابراین، به منظور بررسی همه این موارد در یک مسئله واحد، ابتدا تعداد و ظرفیت تجهیزات ریزشبکه مبتنی بر شاخص‌های ذکر شده با نرم‌افزار **Homer** به دست می‌آید، سپس بهره‌برداری بهینه از این ریزشبکه با استفاده از نرم‌افزار **GAMS** طی ۲۴ ساعت برای یک روز کامل با در نظر گرفتن مدیریت تقاضا انجام می‌شود. هدف از این

همچنین، ریزشبه در حالت متصل به شبکه اصلی مدل شده است. با توجه به اینکه نرم‌افزار برای به دست آوردن قدرت خروجی توربین بادی و سلول‌های خورشیدی نیاز به اطلاعات آب و هوایی و مشخصات جغرافیایی دارد، از داده‌های هواشناسی مطابق اطلاعات منتشرشده از NASA Surface Meteorology and Solar Energy برای شهر سنندج استفاده شده است. در این مرحله از شبیه‌سازی، هدف به دست آوردن تعداد و ظرفیت تجهیزات ریزشبه براساس هزینه خالص فعلی کل و سرمایه اولیه است. هزینه خالص فعلی کل مهم‌ترین شاخصی است که نرم‌افزار Homer ریزشبه را به لحاظ تعداد و ظرفیت تجهیزات رتبه‌بندی می‌کند. این شاخص براساس سرمایه موردنیاز برای تأمین مالی، هزینه جایگزینی، تعمیر و نگهداری و ... محاسبه می‌شود. این هزینه‌ها در لینک وب‌سایت شرکت‌های سازنده این تجهیزات در نرم‌افزار Homer در دسترس است. تعداد و ظرفیت بهینه تجهیزات براساس شاخص حداقل هزینه خالص فعلی کل مطابق شکل (۲) و جدول (۱) است.



شکل (۱): مدل ریزشبه مدنظر در نرم‌افزار Homer

	PV (#W)	eW15	Gen1 (#W)	6FM55D	Conv. (#W)	Grid (#W)	Initial Capital	Total NPC
	25	1	50	50	50	280	\$ 220,600	\$ 649,347
	25	1	50	55	50	280	\$ 221,410	\$ 651,206
	23	1	50	50	50	280	\$ 219,600	\$ 651,370
	22	1	50	50	50	280	\$ 219,100	\$ 652,391
	25	1	50	60	50	280	\$ 222,220	\$ 653,065
	23	1	50	55	50	280	\$ 220,410	\$ 653,229
	22	1	50	55	50	280	\$ 219,910	\$ 654,250
	20	1	50	50	50	280	\$ 218,100	\$ 654,462
	25	1	50	65	50	280	\$ 223,030	\$ 654,924
	23	1	50	60	50	280	\$ 221,220	\$ 655,087
	22	1	50	60	50	280	\$ 220,720	\$ 656,109
	20	1	50	55	50	280	\$ 218,910	\$ 656,321
	18	1	50	50	50	280	\$ 217,100	\$ 656,563
	23	1	50	65	50	280	\$ 222,030	\$ 656,946
	22	1	50	65	50	280	\$ 221,530	\$ 657,968
	20	1	50	60	50	280	\$ 219,720	\$ 658,180
	18	1	50	55	50	280	\$ 217,910	\$ 658,422
	20	1	50	65	50	280	\$ 220,530	\$ 660,039
	25	1	75	50	50	280	\$ 233,100	\$ 660,158
	18	1	50	60	50	280	\$ 218,720	\$ 660,281
	13	1	50	50	50	280	\$ 214,600	\$ 661,930
	25	1	75	55	50	280	\$ 233,910	\$ 662,017
	25	1	50	50	60	280	\$ 229,600	\$ 662,102

شکل (۲): تعداد و ظرفیت تجهیزات ریزشبه مرتب‌شده

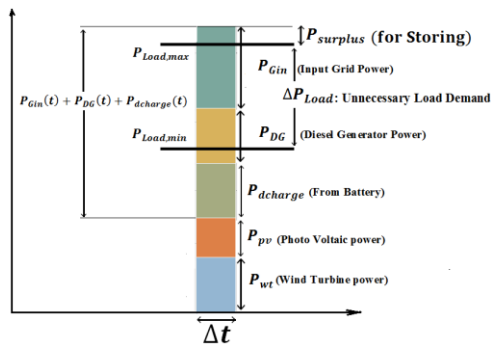
براساس هزینه خالص فعلی کل ریزشبه

بهینه‌سازی حداقل کردن هزینه‌های تحمیل‌شده و همچنین، افزایش درآمد ناشی از فروش انرژی ریزشبه به شبکه اصلی خواهد بود. در این مدل دینامیک شارژ و دشارژ باتری، قیود مربوط به شبکه، دیزل ژنراتور و کانورتور استفاده شده‌اند. مطابق اطلاعات آب و هوایی، تولید سلول خورشیدی و توربین بادی با در نظر گرفتن نایقینی در مقدار سرعت باد و تابش خورشید نیز با نرم‌افزار Homer به دست آمده و از طریق جداول به‌عنوان داده‌های ورودی به نرم‌افزار GAMS داده شده‌اند. با توجه به داده‌های ورودی نام‌برده شده، قیود دیزل ژنراتور، کانورتور، شبکه اصلی و همچنین دینامیک شارژ و دشارژ باتری و هزینه‌های سه تعرفه‌ای خرید برق از شبکه و قیمت فروش به آن و نیز تفکیک بارها به ضروری و غیرضروری و مدیریت تقاضا، برنامه بهینه‌سازی به انجام عملیات ریاضی برای کمینه‌کردن هزینه‌های یک ریزشبه در ۲۴ ساعت می‌پردازد و در خروجی میزان توان خریداری‌شده از شبکه اصلی، میزان فروش به آن در هر ساعت، و توان شارژ و دشارژ باتری‌ها را در خروجی در هر ساعت به دست می‌آورد و در نهایت، نشان می‌دهد دیزل ژنراتور در چه ساعاتی باید روشن و خاموش شود تا هزینه‌های ریزشبه کمینه شوند.

سایر بخش‌های این مقاله به‌صورت زیر تقسیم‌بندی شده‌اند: در بخش دوم به شبیه‌سازی ریزشبه هیبریدی در نرم‌افزار Homer پرداخته می‌شود. قسمت سوم شامل بهره‌برداری بهینه و مدل ریاضی ریزشبه متصل به شبکه اصلی است. بخش چهارم شامل بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS است و در نهایت، نتیجه‌گیری در قسمت پنجم انجام می‌شود.

۲- شبیه‌سازی ریزشبه هیبریدی

برای به دست آوردن اطلاعات اولیه برای بهره‌برداری بهینه نظیر میزان قدرت خروجی توربین بادی و سلول‌های خورشیدی به‌صورت روزانه و در هر ساعت از روز، ابتدا ریزشبه مدنظر به‌صورت شکل (۱) در نرم‌افزار Homer مدل می‌شود. این ریزشبه شامل توربین بادی، دیزل ژنراتور، کانورتور، سلول خورشیدی، و باتری است.



شکل (۳): نمودار مشارکت قسمت‌های مختلف ریزشبکه برای تأمین انرژی موردنیاز بار

با توجه به هزینه‌های متفاوت خرید انرژی از شبکه و تولید آن با دیزل ژنراتور و اینکه سطح تولید توربین بادی و سلول خورشیدی وابسته به شرایط آب و هوایی است و وابسته بودن تمامی این موارد به تغییرات بار و به تبع آن قید DR، حالت‌های متفاوتی ایجاد می‌شود. به‌منظور انجام مطالعات اقتصادی برای کمینه‌کردن هزینه تأمین انرژی موردنیاز بار در ریزشبکه به یک مدل ریاضی برای آن نیاز است که شامل تابع هدف، قیود بخش‌های مختلف آن و تابع هزینه دیزل ژنراتور باشد.

۳-۱-۳- مدل ریاضی ریزشبکه و قیود آن

۳-۱-۱-۳- تابع هدف

به‌منظور کمینه‌کردن هزینه تأمین انرژی بار به یک تابع هدف شامل هزینه‌های موردنیاز برای تأمین انرژی بار نیاز است [۱۲]. این هزینه‌ها شامل هزینه خرید انرژی به صورت ۳ تعرفه‌ای از شبکه و هزینه سوخت دیزل ژنراتور و هزینه ثابت حفظ و نگهداری تجهیزات ریزشبکه در طی روز است که معادله آن به صورت رابطه (۱) است و هدف از آن بهره‌برداری بهینه از یک ریزشبکه در ۲۴ ساعت است [۱۳]. هدف از رابطه (۱) و قیود مربوطه آن، به دست آوردن نحوه شارژ و دشارژ باطری، تبادل توان با شبکه و روشن و خاموش شدن دیزل ژنراتور و مینیمم‌کردن Operational Cost است [۱۴].

جدول (۱): پارامترهای ریزشبکه تحت مطالعه برحسب

کیلووات

PV	WT	Battery	DG
25	50	33	50

۳- بهره‌برداری بهینه از ریزشبکه متصل به شبکه اصلی

با توجه به اینکه تعرفه خرید برق از شبکه اصلی در ساعات مختلف روز متفاوت است (قیمت سه تعرفه‌ای برق) و همچنین، هزینه تولید انرژی با دیزل ژنراتور تابع هزینه سوخت مصرفی آن است و این واقعیت که ذخیره انرژی در ذخیره‌کننده‌ها محدود است، تأمین انرژی با هر سطح توان و ترکیبی دلخواه از عناصر مختلف تولیدکننده انرژی دارای هزینه‌ای متفاوت از سایر موارد خواهد بود [۱۰]. به این منظور، به یک روش اقتصادی تأمین انرژی بار نیاز است که براساس کمینه‌کردن تابع هزینه تأمین انرژی بار به دست آمده باشد تا از این طریق یک ترکیب روشمند و اقتصادی برای تأمین انرژی بار مبتنی بر حداقل‌سازی هزینه تولید انرژی به دست آید [۱۱]. در این مدل مشخص فرض می‌شود حداکثر ۱۰ کیلووات در هر ساعت بخشی از بار غیرضروری و حذف‌شدنی است که به صورت یک قید DR در برنامه اضافه خواهد شد؛ بنابراین، بار به دو فیدر جداگانه بار ضروری که همواره باید تغذیه شود و بار غیرضروری، تفکیک شده است. بارهای مازاد و غیرضروری در فیدر دوم قرار می‌گیرند و به صورت قید در برنامه DR تعریف شده و بخشی از آن حذف‌شدنی است. معمولاً برای حفظ پایداری شبکه در هنگام وقوع اغتشاش نیز بار غیرضروری حذف‌شدنی است. شکل (۳) مشارکت واحدهای مختلف برای تأمین توان بار را نشان می‌دهد.

$$0 \leq P_{\text{charge}}(t) \leq X_{\text{charge}} \times P_{\text{charge,max}} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{\text{dcharge}}(t) \leq X_{\text{dcharge}} \times P_{\text{dcharge,max}} \quad (6)$$

$$X_{\text{charge}} + X_{\text{dcharge}} \leq 1 \quad (7)$$

در رابطه فوق $P_{\text{charge}}(t)$ و $P_{\text{dcharge}}(t)$ به ترتیب توان موردنیاز برای شارژ و دشارژ باطری هستند. به منظور مشخص بودن سطح ذخیره انرژی باطری به منظور شارژ یا دشارژ آن از این قید استفاده می‌شود و برای افزایش عمر باطری همواره دست کم ۴۰٪ از انرژی را به صورت ذخیره در باطری حفظ می‌کند [۱۳].

۴-۱-۳- قیود شبکه

شبکه نیز یکی از منابع تأمین انرژی ریزشبکه است که در هر لحظه می‌توان انرژی را از شبکه اصلی بر مبنای قیمت سه تعرفه‌ای خرید یا به آن فروخت؛ بنابراین، X_{Gin} و X_{Gout} به صورت باینری تعریف شده که یا صفر یا ۱ هستند و قیود آن به صورت زیرند:

$$0 \leq P_{\text{Gin}}(t) \leq X_{\text{Gin}} \times P_{\text{Gin,max}} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{\text{Gout}}(t) \leq X_{\text{Gout}} \times P_{\text{Gout,max}} \quad (9)$$

$$X_{\text{Gin}}(t) + X_{\text{Gout}}(t) \leq 1 \quad (10)$$

$P_{\text{Gin,max}}$ و $P_{\text{Gout,max}}$ به ترتیب ماکزیمم توان قابل خرید از شبکه و فروش به شبکه اصلی است و معمولاً معادل با سطح قدرت خروجی ترانسفورماتور نصب شده بین ریزشبکه و شبکه اصلی است [۱۳].

۴-۱-۵- قید DR:

با توجه به نوع مصرف‌کننده‌ها، آنها به دو گروه مصرف‌کننده‌های ضروری و غیرضروری طبقه‌بندی می‌شوند. ΔP_{Load} مطابق شکل (۳) بیان‌کننده مقدار بار غیرضروری است که این مقدار در اینجا ۱۰ کیلووات در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه حذف بار غیرضروری تنها در ساعات خاص و به مقدار نیاز ضرورت دارد، از طریق انتخاب مناسب $X_{\text{DR}}(t)$ در هر ساعت مقدار بار غیرضروری قابل حذف تعیین می‌شود.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{24} (C_{\text{in}} P_{\text{Gin}} - C_{\text{out}} P_{\text{Gout}} + P_{\text{RF}} \times F(t)) \quad (1)$$

که در رابطه مقابل:

t : زمان برحسب ساعت، P_{Gin} : انرژی خریداری شده از شبکه، C_{in} : هزینه خرید برق از شبکه، P_{Gout} : انرژی فروخته شده به شبکه، C_{out} : قیمت فروش برق به شبکه، $F(t)$: مقدار مصرف سوخت، P_{RF} : قیمت هر لیتر سوخت، و $P_{\text{RF}} \times F(t)$: هزینه مصرف سوخت دیزل ژنراتور در هر ساعت است. در هر سیستم قدرت باید تولید و مصرف باهم همواره در تعادل باشند؛ بنابراین، این قاعده به صورت قید تعریف می‌شود که بیان‌کننده مجموع توان‌های ورودی به باس AC برابر با مجموع توان خروجی آن است [۱۳].

۴-۱-۲- قیود دیزل ژنراتور

معمولاً ۲ محدودیت برای دیزل ژنراتور در نظر می‌گیرند؛ یکی شامل محدودیت در افزایش یا کاهش تولید توان دیزل ژنراتور در هر ساعت است و آن را با Ramp Rate نشان می‌دهند و دیگری حداکثر قدرت خروجی دیزل ژنراتور است. آنها با دو قید به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$0 \leq P_{\text{DG}}(t+1) - P_{\text{DG}}(t) \leq rr \quad (2)$$

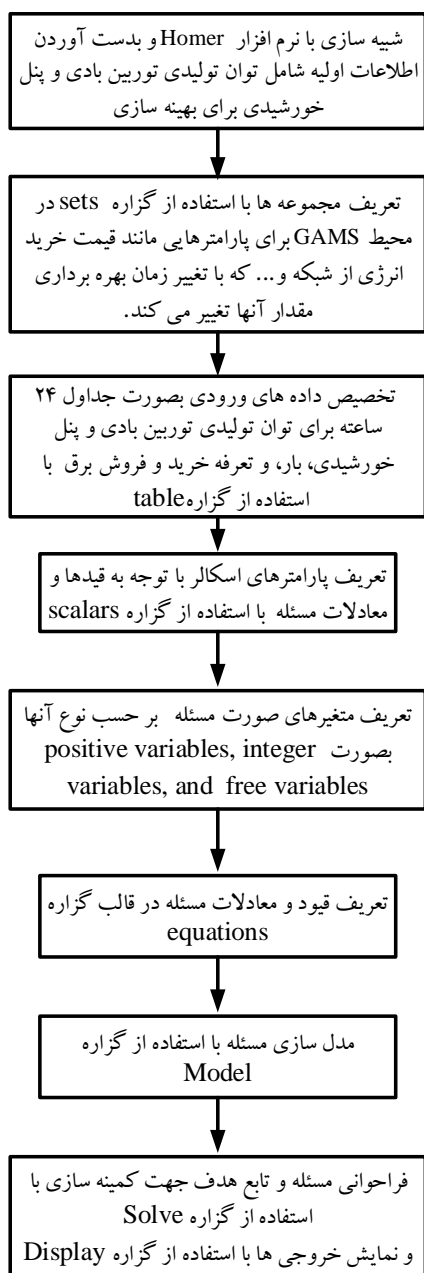
$$0 \leq P_{\text{DG}}(t) - P_{\text{DG}}(t+1) \leq rr \quad (3)$$

$$0 \leq P_{\text{DG}}(t) \leq P_{\text{DG,max}} \quad (4)$$

که در رابطه فوق $P_{\text{DG,max}}$ حداکثر توان خروجی دیزل ژنراتور و rr برابر با Ramp Rate است که برحسب (kW/h) است [۱۳].

۴-۱-۳- قیود باطری:

باطری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی، هم قادر به ذخیره انرژی و هم قادر به تأمین توان است؛ اما در هر لحظه می‌تواند شارژ یا دشارژ شود؛ بنابراین، در معادله‌های (۵) و (۶) X_{dchar} و X_{char} به صورت باینری تعریف می‌شوند؛ یعنی یا صفر یا ۱ هستند [۱۵].



شکل (۴) فلوچارت مراحل بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS

$$P_{DR}(t) = X_{DR}(t) \times \Delta P_{Load} \quad (11)$$

$$0 \leq X_{DR}(t) \leq 1 \quad (12)$$

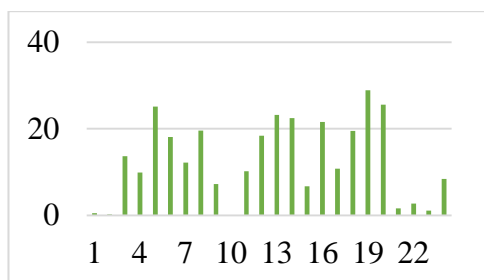
با توجه به اینکه از بار کل ریزشبکه به اندازه $P_{DR}(t)$ با دادن مشوق به مصرف‌کننده کاسته شده است، قید هزینه آن به صورت زیر در تابع هزینه کلی اضافه خواهد شد:

$$\text{Min} \sum_{t=1}^{24} \left(C_{in} P_{Gin} - C_{out} P_{Gout} + P_{Rf} \times F(t) + C_{DR} \times P_{DR}(t) \right) \quad (13)$$

که در این رابطه C_{DR} هزینه پرداخت‌شده هر کیلووات ساعت انرژی به مشتری بابت خاموشی به بخشی از بار آن است.

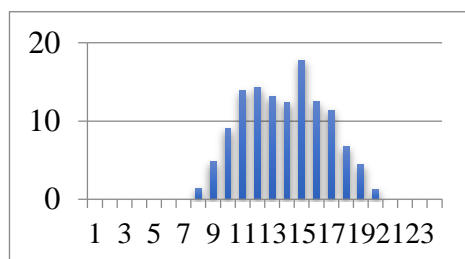
۴- بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS

با توجه به روابط نوشته‌شده برای مدل ریاضی ریزشبکه و قیدهای مربوط به آن، دیاگرام مربوط به مراحل مختلف بهینه‌سازی با نرم‌افزار GAMS به صورت شکل (۴) است. داده‌های ورودی مسئله GAMS به صورت جداول در برنامه بهینه‌سازی وارد می‌شوند. برای این کار توان تولیدی در هر ساعت توسط توربین بادی و پنل خورشیدی را که در بخش Hourly output نرم‌افزار Homer به دست آمده است، به صورت جدول به نرم‌افزار GAMS داده می‌شود. با توجه به اطلاعات ورودی و داده‌های هواشناسی داده‌شده به نرم‌افزار Homer که در بخش ۲ بیان شد، تولید توربین بادی و پنل خورشیدی در مکان انتخاب‌شده برای روز اول ماه August سال ۲۰۲۲ مطابق شکل‌های (۵) و (۶) به دست می‌آید.



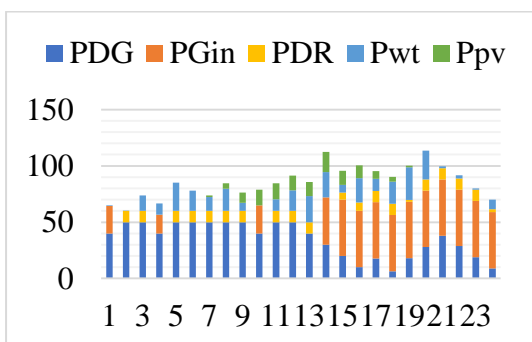
شکل (۵): قدرت خروجی توربین بادی بر حسب کیلووات طی ۲۴ ساعت روز

در این قسمت، حداکثر ۱۰ کیلووات توان به‌عنوان بار غیرضروری در نظر گرفته می‌شود. با پرداخت هزینه جریمه عدم تأمین انرژی بار به میزان ۴۵ تومان در هر کیلووات ساعت به بخشی از بار غیرضروری، بار درخواستی کاهش داده می‌شود. در حالت نرمال آب و هوایی مطابق قیود عنوان‌شده هزینه بهره‌برداری در یک روز از ریزشبکه ۱۱۴۸۰۰ تومان است. چون قیمت فروش انرژی به شبکه اصلی خیلی بیشتر از مقدار در نظر گرفته شده برای DR است، ریزشبکه برای سود بیشتر کل بار مازاد را حذف کرده است تا بتواند انرژی تولیدی خود را برای دریافت سود بیشتر به شبکه اصلی بفروشد و از این طریق هزینه‌های خود را کاهش دهد. با حذف قید مربوط به DR در برنامه و تأمین کل بارهای ضروری و غیرضروری، هزینه بهره‌برداری در یک روز از ریزشبکه ۱۸۴۴۵۰ تومان خواهد شد. شکل‌های (۸) و (۹) میزان تولید انرژی و همچنین خرید و فروش برق در ساعات مختلف شبانه‌روز را نشان می‌دهد.

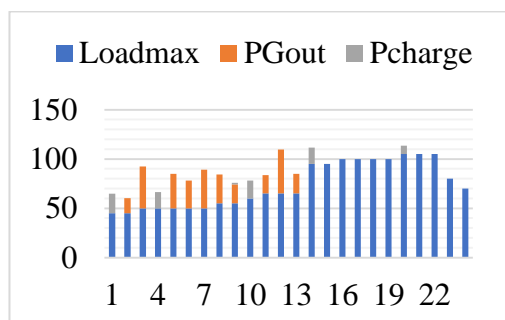


شکل (۶): قدرت خروجی سلول خورشیدی بر حسب کیلووات طی ۲۴ ساعت روز

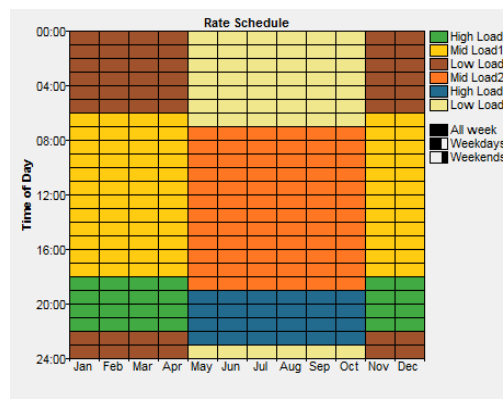
شکل (۷) ساعات مختلف کم باری، میان باری و اوج بار را در فصل‌های مختلف سال نشان می‌دهد. با توجه به ساعات‌های مختلف کم باری، میان باری و اوج بار، هزینه خرید برق از شبکه به صورت سه تعرفه‌ای در نظر گرفته شده است. برای کاهش مقدار تقاضا در اوج مصرف یا هنگامی که تولید توان تجدیدپذیر کم است، از قید DR برای حذف بخش غیرضروری بار استفاده شده است تا هزینه خرید انرژی از شبکه کاهش یابد. برای ماه August سال ۲۰۲۲ از ساعت ۷ تا ۱۹ تعرفه می‌انباری، تعرفه اوج بار از ساعت ۱۹ تا ۲۳ و تعرفه کم باری از ساعت ۲۳ تا ۷ صبح محاسبه شده است. در اوج بار نرخ ۴۵ تومان به‌عنوان جریمه هر کیلووات ساعت و در ساعات کم باری ۲۲ تومان به‌عنوان تخفیف مدنظر قرار می‌گیرد. قیمت هر کیلووات ساعت در میان باری نیز ۱۱۲ تومان در نظر گرفته شده است. بسته به فصول مختلف سال، مکان و آب و هوا و سایر ویژگی‌های آن منطقه این زمان‌بندی‌ها چندساعتی قابل جابه‌جایی است. در این حالت قیمت فروش هر کیلووات ساعت به شبکه ۸۰۰ تومان در نظر گرفته شد.



شکل (۸): نحوه مشارکت تأمین‌کننده‌های انرژی ریزشبکه در بهره‌برداری بهینه با تابش خورشید و سرعت باد در حالت نامی

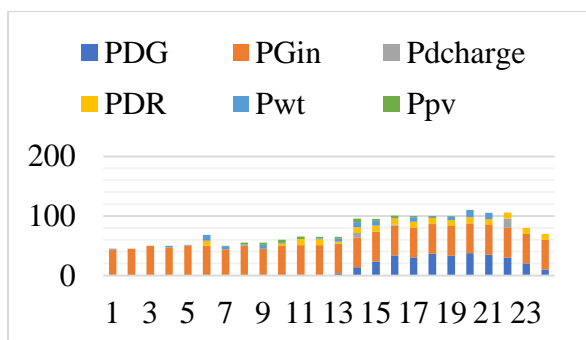


شکل (۹): نحوه تأمین انرژی موردنیاز بار در هر ساعت و شارژ باتری و فروش انرژی به شبکه در ساعات مختلف روز



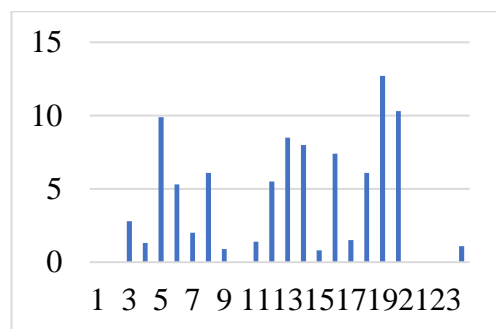
شکل (۷): ساعات مختلف کم باری-اوج و میان باری به صورت دو دوره ۶ ماهه

توربین بادی نیز از 28.9(kW) به 12.7(kW) کاهش می‌یابد؛ بنابراین، کاهش تولید توان توربین بادی به‌ازای ۲۵٪ کاهش سرعت باد بسیار درخور ملاحظه است. با کاهش ۲۵٪ در تابش روزانه خورشید یا همان Daily Radiation، میانگین روزانه تولید توان توسط سلول خورشیدی از 5.125(kW) به 1.754(kW) کاهش می‌یابد و همچنین پیک تولید انرژی PV از 17.8(kW) به 6(kW) کم می‌شود. با توجه به پایدارنبودن شرایط آب و هوایی در صورت نبودن حاشیه اطمینان بالا، تولید انرژی ریزشبه‌ها در این‌گونه موارد می‌تواند یک‌باره به‌شدت کاهش یابد و تولید داخلی ریزشبه‌ها از مصرف آن بسیار کمتر شود. با واردکردن اطلاعات به‌دست‌آمده برای قدرت خروجی سلول خورشیدی و توربین بادی در نرم‌افزار GAMS، بهره‌برداری بهینه از ریزشبه‌ها برای ۲۴ ساعت در شرایط جدید آب و هوایی به‌صورت زیر خواهد بود. همان‌گونه که از شکل‌های (۱۰) و (۱۱) پیداست، با کاهش سطح تولید سلول خورشیدی و توربین بادی هزینه عملکرد روزانه ریزشبه‌ها از ۱۱۴۸۰۰ تومان به بیش از ۲۶۲۱۲۰ تومان می‌رسد. با حذف قید مربوط به DR در برنامه و تأمین کل بارهای ضروری و غیرضروری ریزشبه‌ها، هزینه بهره‌برداری در یک روز به ۳۲۱۰۰۳ تومان خواهد رسید. شکل (۱۲) نشان‌دهنده افزایش سهم دیزل ژنراتور و شبکه به سبب کاهش سهم تولید سلول خورشیدی و توربین بادی نسبت به حالت تولید نامی آنها است. در شکل (۱۳) نیز با توجه به کاهش شدید تولید انرژی تجدیدپذیر در ریزشبه‌ها سهم فروش انرژی به شبکه اصلی صفر است.

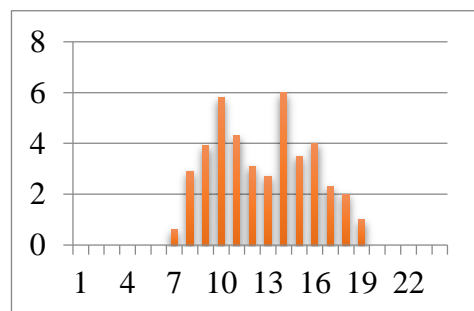


شکل (۱۲): نحوه مشارکت واحدهای مختلف تولیدکننده انرژی ریزشبه‌ها در بهره‌برداری بهینه با ۲۵٪ کاهش در تابش خورشید و سرعت باد

با توجه با تأثیر منفی بالای کاهش سرعت باد و تابش خورشید بر تولید توربین بادی و پنل خورشیدی، نایقینی در سرعت باد و میزان تابش خورشید به‌صورت کاهش در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، به‌منظور بررسی تبعات مالی تأثیر تغییرات روزانه آب و هوا بر عملکرد ریزشبه‌ها این بار مستقیماً سرعت باد و میزان تابش خورشید را در نرم‌افزار Homer، ۲۵٪ کم می‌کند و اثر آن در بهره‌برداری بهینه بررسی و مطالعه می‌شود. با کاهش ۲۵٪ در میزان سرعت باد و تابش خورشید قدرت خروجی توربین بادی و پنل خورشیدی به‌صورت شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آید.



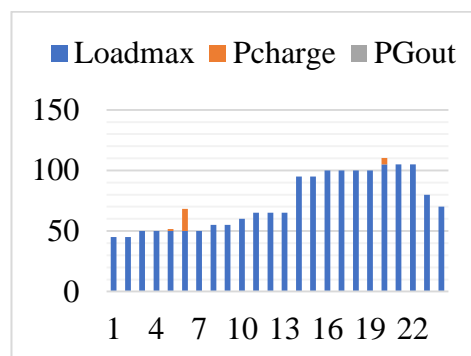
شکل (۱۰): قدرت خروجی توربین بادی با ۲۵٪ کاهش در سرعت باد نسبت به حالت نامی به‌دست‌آمده با Homer



شکل (۱۱): نمودار تغییرات قدرت خروجی سلول خورشیدی با ۲۵٪ کاهش در تابش خورشید نسبت به حالت نامی به‌دست‌آمده با Homer

با مقایسه شکل‌های (۱۰) و (۱۱) با شکل‌های (۵) و (۶) پیداست که کاهش ۲۵٪ در سرعت باد و تابش خورشید منجر به کاهش بسیار زیادی در قدرت خروجی توربین بادی و پنل خورشیدی می‌شود. با کاهش ۲۵٪ در سرعت باد، تولید متوسط روزانه توان توربین بادی از 12.82(kW) به 3.8167(kW) کاهش می‌یابد. همچنین، پیک تولید توان

- [3] H. R. E.-H. M. S. Y. AbubakarShaabana, "Decomposition based multiobjective evolutionary algorithm for PV/Wind/Diesel Hybrid Microgrid System design considering load uncertainty," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 52-69, 2021.
- [4] N. Eghtedarpour and E. Farjah, "Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid," *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp. 1494-1505, 2014.
- [5] Y. B. A Rafiee, H Bevrani, T Kato, "Robust MIMO Controller Design for VSC-based Microgrids: Sequential Loop Closing Concept and Quantitative Feedback Theory," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021.
- [6] X. Zhang, C. Huang, and J. Shen, "Energy Optimal Management of Microgrid with High Photovoltaic Penetration," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022.
- [7] D. H. Vu, K. M. Muttaqi, and D. Sutanto, "An integrated energy management approach for the economic operation of industrial microgrids under uncertainty of renewable energy," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, pp. 1062-1073, 2020.
- [8] W.-G. Lee, T.-T. Nguyen, H.-J. Yoo, and H.-M. Kim, "Consensus-Based Hybrid Multiagent Cooperative Control Strategy of Microgrids Considering Load Uncertainty," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 88798-88811, 2022.
- [9] L. Zhang, Y. Yang, Q. Li, W. Gao, F. Qian, and L. Song, "Economic optimization of microgrids based on peak shaving and CO2 reduction effect: A case study in Japan," *Journal of Cleaner Production*, vol. 321, p. 128973, 2021.
- [10] A. H. V.-H. B. H.-M. Kim, "Resilience-Oriented Optimal Operation of Networked Hybrid Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, 2019.
- [11] K. R. C. C. C. R. Zhang, "Energy Cooperation Optimization in Microgrids With Renewable Energy Integration," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, 2018.
- [12] C. J. Dongfeng Yang, Guwei Cai, Deyou Yang, Xiaojun Liu,, "Interval method based optimal planning of multi-energy microgrid with uncertain renewable generation and demand," *Applied Energy*, vol. 277, 2020.
- [13] Z. X. Xiaohong Guan, and Qing-Shan Jia, "Energy-Efficient Buildings Facilitated by Microgrid," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 1, 2010.
- [14] S. M. M. Liaqat Ali, Hamed Bizhani, Arindam Ghosh,, "Optimal planning of clustered microgrid using a technique of cooperative game theory,," *Electric Power Systems Research*, vol. 183, 2020.
- [15] P. L. Mansour Alramlawi, "Design Optimization of a Residential PV-Battery Microgrid With a Detailed Battery Lifetime Estimation Model," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, 2020. *Industry Applications*, vol. 46, 2020. Battery Lifetime Estimation Model," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, 2020.



شکل (۱۳): نحوه تأمین انرژی موردنیاز بار در هر ساعت و شارژ باتری و فروش انرژی به شبکه در ساعات مختلف روز

منظور از بهینه‌سازی مصرف انرژی انتخاب الگوها، اتخاذ و به‌کارگیری روش‌ها و سیاست‌هایی در مصرف انرژی الکتریکی است. ساختمان‌های مسکونی بخش مهمی از مصرف‌کنندگان انرژی الکتریکی به‌شمار می‌آیند. ورود تکنولوژی سیستم مدیریت هوشمند به ساختمان‌های مسکونی، تا حدودی مصرف انرژی الکتریکی را بهینه کرده است.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در ریزشبکه تحت مطالعه، با کاهش ۲۵٪ در سرعت باد و تابش خورشید، پیک تولید توربین بادی حدود ۵۶٪ و پیک تولید پنل خورشیدی ۶۶٪/۳ کاهش می‌یابد. این مقدار برای تولید متوسط روزانه توربین بادی حدود ۷۰٪/۳ کاهش و برای تولید متوسط روزانه پنل خورشیدی حدود ۶۵٪/۸ کاهش در توان تولیدی است. تبعات مالی کاهش ۲۵٪ در سرعت باد و تابش خورشید منجر به افزایش حدود ۱۲۸٪ هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی با قید DR و افزایش ۱۷۹٪/۶ هزینه خرید انرژی از شبکه اصلی بدون قید DR برای ریزشبکه تحت مطالعه می‌شود.

مراجع

- [1] M. G. Moein Borghei, "Optimal planning of microgrids for resilient distribution networks,," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 128, 2021.
- [2] D. D. Bineeta Mukhopadhyay, "Optimal multi-objective expansion planning of a droop-regulated islanded microgrid," *Energy*, vol. 218, 2021.

