مدلی جدید برای تامین انرژی شرکت توزیع برق در محیط رقابتی مبتنی بر ریسک

هادی صفری فارمد[1,2] ، مدیر دفتر تحقیقات ، حبیب رجبی مشهدی[1]، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه فردوسی مشهد- مشهد- ایران
h-mashhadi@um.ac.ir
۲- شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان رضوی- مشهد- ایران
h.safari.f@stu.um.ac.ir

چکیده: هدف این مقاله ارائه مدلی جدید برای تامین انرژی یک شرکت توزیع برق در محیط رقابتی مبتنی بر ریسک با در نظر گرفتن بارهای قابل قطع و منابع تولید پراکنده می‌باشد. برای تحقق این هدف راهکاری دو گامی مطرح شده است. در گام نخست مدلسازی واقع‌گرایانه بار قابل قطع و تاثیر آن بر روی مسأله بررسی و نشان داده شده است که چگونه فرضیات واقع‌گرایانه برای مدلسازی بارهای صنعتی به عنوان بار قابل قطع می‌تواند بر روی مدلسازی و حل مسأله تاثیر گذار باشد. در گام دوم مسأله تامین انرژی شرکت توزیع در قالب یک مسأله بهینه‌سازی دو سطحی با در نظر گرفتن فرضیات واقع‌گرایانه در محیط مبتنی بر ریسک مدلسازی شده و روشی ابتکاری برای حل آن ارائه شده است. روش معرفی شده بر روی شبکه نمونه (شبکه توزیع برق شهرستان مشهد) پیاده‌سازی شده و نتایج عددی آن ارائه گردیده است. علاوه بر جدید بودن روش ارائه شده، نتایج مطالعات انجام شده در این مقاله به دلیل جامعیت مدلسازی و دقت جوابها می‌تواند برای شرکتهای توزیع برق کشور مورد استفاده قرار گیرد.

واژه های کلیدی: توزیع انرژی الکتریکی، بار قابل قطع، تولید پراکنده، برنامه ریزی تامین انرژی، ریسک، بهینه سازی.

A Novel Risk-based Energy Acquisition Model for A Distribution Company

Hadi Safari Farmad, and Habib Rajabi Mashhadi

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۳/۸/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۶/۰۴

نام نویسنده‌ی مسئول : حبیب رجبی مشهدی

نشانی نویسنده‌ی مسئول : مشهد – میدان آزادی – گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

۱- مقدمه

۱-۱- انگیزه تحقیق

یکی از مسائل مهمی که شرکتهای توزیع برق در محیط رقابتی با آن مواجه هستند، برنامه‌ریزی روزانه تامین انرژی الکتریکی است. یک شرکت توزیع[۱] (Disco) معمولا با خرید انرژی از بازار عمده فروشی[۲] تقاضای مشتریان (مصرف کنندگان نهائی) را تامین می‌کند. با در نظر گرفتن بارهای قابل قطع[۳] (IL) و واحدهای تولید پراکنده[۴] (DG)، شرکت توزیع دارای انتخابها و تعاملات بیشتری در بازار خواهد بود. در واقع شرکت توزیع می‌تواند علاوه بر تامین انرژی مورد نیاز از طریق بازار عمده فروشی، بخشی از انرژی را از طریق بارهای قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده نیز تامین کند. شرکتهای توزیع در برنامه‌ریزی روزانه تامین انرژی خود با دو مسأله غیر قطعی تغییرات بار و نوسانات قیمت نیز روبرو می‌باشند که این مسائل احتمال زیان ناشی از نحوه تصمیم شرکت توزیع را برای برنامه ریزی تامین انرژی به دنبال خواهد داشت و لذا شرکتهای توزیع در برنامه ریزی روزانه تامین انرژی خود با مسأله حداکثر کردن سود در محیط مبتنی بر ریسک مواجه هستند. مدلسازی واقع‌گرایانه بار قابل قطع نیز تاثیر به سزائی بر روی مدلسازی و حل مسأله دارد. در این مقاله هدف، مدلسازی برنامه‌ریزی یک شرکت توزیع برق در بازار روز-بعد[۵] برای تامین انرژی روزانه در محیط رقابتی مبتنی بر ریسک با در نظر گرفتن بارهای قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده با لحاظ کردن مدل واقع‌گرایانه برای بار قابل قطع است.

۱-۲- مروری بر ادبیات موضوع

مطالعات بار قابل قطع عموما در دو حوزه دسته بندی می‌شود. بخش وسیعی از مسائل مطرح شده به طراحی مکانیزم‌های انگیزشی مناسب برای مشارکت مصرف‌کنندگان در برنامه‌های پاسخگوئی بار پرداخته‌اند[1]. بخش دیگری از مطالعات به بررسی تاثیر بار قابل قطع بر روی عملکرد بازار بویژه تاثیر آن بر جهش قیمت پرداخته‌اند[2]. برنامه‌های استفاده از بار قابل قطع در بسیاری از کشورها بطور وسیع اجرا می‌شود. در آمریکا ERCOT[۶] سالانه حدود ۱۹۶MW بار قابل قطع را دربرنامه های خود دارد[3]. NERC[۷] در سال ۲۰۱۳ حدود ۲۶۹ MW کاهش پیک از طریق قراردادهای بار قابل قطع داشته است[4]. در ایران نیز وزارت نیرو برنامه بار قابل قطع را از طریق طرح‌هائی نظیر کشاورز همکار و صنایع همکار اجرا می‌کند. واحدهای تولید پراکنده بر عملکرد بازار بویژه وقتی تراکم در خطوط انتقال رخ می‌دهد، تاثیر به سزائی دارند. واحدهای تولید پراکنده در مدیریت بار، به عنوان تثبیت کننده نوسانات شدید قیمت و کاهش‌دهنده پیک آن در بازار آزاد برق نیز نقش مهمی دارند[5]. در [6] برنامه‌ریزی تامین انرژی شرکت توزیع در محیط رقابتی مطرح شده است که تنها یک مدل تک دوره‌ای است. در [7] مدل چند دوره‌ای اکتساب انرژی در نظر گرفته شده است، اما فرضیاتی مانند در نظر گرفتن مدل درجه دوم برای توابع هزینه بارهای قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده، در نظر گرفتن یک نوع بار قابل قطع، در نظر گرفتن یک نوع قرارداد برای بار قابل قطع (ثابت در تمام ساعات) و در نظر گرفتن یک نوع واحد تولید پراکنده، مدلسازی و حل مسأله را از واقعیت دور کرده است.

۱-۳- هدف، روش و نوآوری

این مقاله مدلی چند دوره‌ای برای تامین انرژی شرکت توزیع در محیط رقابتی مبتنی بر ریسک با در نظر گرفتن موارد زیر معرفی می‌کند.

۱- بار قابل قطع به دو صورت بار قابل قطع قیمت پایین[۸] (LIL) که مربوط به خرید بار قابل قطع بدون اطلاع از زمان در دسترس نبودن انرژی و نیز میزان آن است و بار قابل قطع قیمت بالا[۹] (HIL) که در این حالت بار قابل قطع از قبل خریداری نمی‌شود بلکه در صورت وقوع خاموشی و در دسترس نبودن انرژی و یا نوسانات شدید قیمت از آن استفاده می‌شود، در نظر گرفته شده است.

۲- مدل واقع‌گرایانه برای بار قابل قطع لحاظ شده است.

۳- واحدهای تولید پراکنده به صورت واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت شرکت توزیع[۱۰] (DDG) و واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار (IDG)[۱۱]، که مالکیت آنها با شرکت توزیع نمی‌باشد، در نظر گرفته شده‌اند.

۴- ریسک حاکم بر مسأله با توجه به غیر قطعی بودن تغییرات بار و نوسانات قیمت در نظر گرفته شده است.

مدل ارائه شده به صورت یک مسأله بهینه‌سازی دوسطحی توسط الگوریتم پیشنهادی حل شده و نتائج شبیه‌سازی بر روی شبکه واقعی ارائه شده است.

۱-۴- ساختار مقاله

در ادامه در بخش دوم این مقاله ساختار کلی بازار برق مورد نظر و در بخش سوم مدلسازی بار صنعتی به عنوان بار قابل قطع مطرح شده است. بخش چهارم به ارائه مدل تامین انرژی شرکت توزیع پرداخته و بخش پنجم الگوریتم پیشنهادی حل مسأله را بیان نموده است. در

[۱] - Distribution Company
[۲] - Wholesale
[۳] - Interruptible Load
[۴] - Distributed Generation
[۵] - Day-Ahead
[۶] - Electric Reliability Council Of Texas
[۷] -North Electric Reliability Council
[۸] - Interruptible load with low Price
[۹] - Interruptible Load with high Price
[۱۰] – Disco-owned distributed generation unit
[۱۱] - Investor-owned distributed generation unit

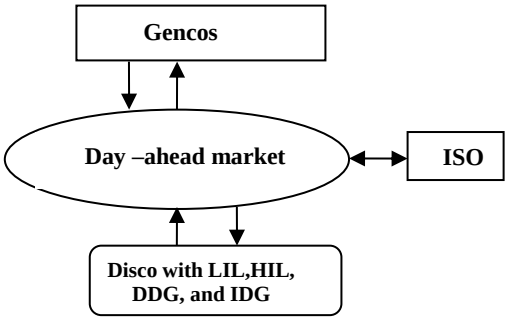
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

بخش ششم شبکه نمونه برای مطالعه معرفی شده و نهایتا بخش هفتم نتیجه را ارائه داده است.

۲- ساختار کلی بازار برق

ساختار کلی بازار مورد نظر در شکل (۱) نشان داده شده است. در این ساختار، شرکتهای تولید برق[۱۲] (Genco) انرژی الکتریکی را از طریق پیشنهاددهی [۱۳] به بازار ارائه می‌کنند.



شکل (۱) ساختار کلی بازار

اطلاعاتی که شرکت‌های تولید برق در اختیار اپراتور مستقل سیستم[۱۴] قرار می‌دهند عبارتند از:

- حداقل و حداکثر میزان توان تولیدی
- قیمت پیشنهادی برای توان تولیدی قابل عرضه
- حداقل و حداکثر شیب افزایش تولید[۱۵]
- حداقل و حداکثر شیب کاهش تولید[۱۶]

شرکت توزیع تامین تقاضای مشترکین (مصرف‌کنندگان نهائی) را معمولا با خرید انرژی از بازار عمده فروشی انجام می‌دهد. در صورت بروز نوسان در قیمت بازار، شرکت توزیع می‌تواند با به مدار آوردن واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت خود و نیز بکارگیری بار قابل قطع قیمت پائین و واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار از بالا رفتن قیمت جلوگیری کند و در شرائط اضطراری نیز از بار قابل قطع قیمت بالا بهره ببرد. قیمت بار قابل قطع قیمت پائین به نرخ وقوع خطا و شرائط اضطراری بستگی ندارد و شرکت توزیع قرارداد این نوع بار را به صورت عقد قرارداد برای درخواست حداقل و حداکثر میزان انرژی درخواستی انجام می‌دهد. در حالیکه قیمت بار قابل قطع قیمت بالا شدیدا احتمالاتی است و از آن در شرائط اضطراری استفاده می‌شود و تنها در صورتی که قطع شود به آن خسارت پرداخت خواهد شد و در صورت عدم قطع هیچ پرداختی صورت نخواهد گرفت. واحدهای تولید پراکنده براساس سیگنال قیمت حاشیه‌ای محلی (LMP)[۱۷] وارد بازار می‌شوند .

اطلاعاتی که شرکت‌های توزیع در اختیار اپراتور مستقل سیستم قرار می‌دهند عبارتند از:

- حداکثر دیماند (نمودار بار مصرفی در هر ساعت)
- حداقل و حداکثر میزان بار قابل قطع قیمت پائین
- تابع هزینه بار قابل قطع قیمت پائین
- حداقل و حداکثر میزان تولید و تابع هزینه واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار

۳- مدلسازی بار مدیریت پذیر صنعتی

در اغلب بخشهای صنعتی انرژی الکتریکی مهمترین منبع انرژی صنعت به شمار می‌رود. بسیاری از مشترکین صنعتی می‌توانند با برنامه‌ریزی مناسب، بخشی از مصارف انرژی الکتریکی خود را از ساعات اوج مصرف به دیگر ساعات و ترجیحا" به ساعات کم‌باری انتقال دهند و از مکانیزم-های تشویقی استفاده کنند. در بسیاری از صنایع بین زیرفرایندهای تولید ارتباط وجود دارد. بارهای صنعتی را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: بارهای مدیریت‌پذیر که می‌توانند در برنامه‌های مدیریت بار شرکت داشته باشند و خود به چهار دسته بارهای مستقل از فرایند، بارهای وابسته به فرایند، بارهای وابسته به میزان ذخیره و بارهای ترتیبی تقسیم می‌شوند و همچنین بارهای زمان ثابت (مانند مصارف روشنائی) که در بازه زمانی خاصی رخ می‌دهند و نقش چندانی در برنامه‌های مدیریت بار ندارند. برای مدلسازی ریاضی بار مدیریت پذیر، فرمول‌بندی بر اساس نمایش زمان گسسته افق زمانی H (مثلا یک روز) انجام می‌شود. حوادثی نظیر شروع و پایان فرایند ها تنها در مرزهای بازه‌های زمانی مجاز هستند[8] .

$$\sum_{i=1}^{N_I} t_i = T \qquad (۱)$$

متغیر باینری I_{mi} بیان می‌دارد که یک زیر فرایند[۱۸] (Sp) در یک بازه فعال است یا خیر.

$$I_{mi} = \begin{cases} 1 & \text{زیر فرایند m در بازه i روشن} \\ 0 & \text{زیرفرایند m در بازه i خاموش} \end{cases} \qquad (۲)$$

نیاز است که حداقل میزانی از تولید (محصول) نهائی در افق زمانی مورد نظر صورت پذیرد.

$$\sum_{i=1}^{N_I}\sum_{m=1}^{N_{SP}} \left(P_{mi} * t_{mi} * I_{mi}\right) \geq Q \qquad (۳)$$

حداکثر میزان ذخیره نیز محدود است.

$$\sum_{i=1}^{N_I}\left[\sum_{m=1}^{N_{SP}}\left(P_{mi} * t_{mi} * I_{mi}\right) - \sum_{r=1}^{N_{SP}}\left(q_{ri} * t_{ri} * I_{ri}\right)\right] \leq S_m \qquad (۴)$$

محدودیت حداکثر تقاضا نیز باید در مدیریت بارها لحاظ گردد.

$$\sum_{i=1}^{N_I}\left(\frac{EP_{mi}}{pf_{mi}}\right) * I_{mi} \leq KVA_{mi} \qquad (۵)$$

توان ورودی هر ماشین بر حسب کیلووات عبارت است از:

$$EP_{mi} = \left\{\left(R_m * UF_{mi}\right) / E_{mi}\right\} * I_{mi} \qquad (۶)$$

[۱۲] – Generation Company
[۱۳] - Bidding
[۱۴] – Independent system operator
[۱۵] – Ramping-up
[۱۶] – Ramping-down
[۱۷] - Locational Marginal Pricing
[۱۸] – Sub process

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

هدف، حداقل سازی هزینه مصرف انرژی الکتریکی است.

$$\min\sum_{i=1}^{N_L}\sum_{m=1}^{N_{sp}}\left[\left(EP_{mi}*t_{mi}*I_{mi}*C_i\right)+\left\{C_{ai}*I_{ai}\right\}*t_i\right] \qquad (۷)$$

متغیر تصمیم I_a بیان می‌دارد که زیرفرایندها در بازه‌های زمانی مورد نظر برای مدیریت بار انتخاب می‌شوند یا خیر.

$$I_{ai}=\begin{cases}1 & \text{انجام مدیریت بار}\\ 0 & \text{عدم انجام مدیریت بار}\end{cases} \qquad (۸)$$

۴- مسأله تامین انرژی

برای مدلسازی مسأله تامین انرژی از روش بهینه‌سازی دوسطحی استفاده شده است که در زیرمسأله بالائی سود شرکت توزیع حداکثر می‌شود در حالی که زیرمسأله پائینی تسویه بازار توسط اپراتور مستقل سیستم را طوری بهینه‌سازی می‌کند که هزینه تولید ژنراتورها (تولید توان توسط شرکت‌های تولید برق) و جبران سازی بارهای قابل قطع قیمت پائین حداقل شود.

۴-۱- مدل تسویه بازار

فرض می‌شود که اپراتور مستقل سیستم بازار را از طریق پخش بار اقتصادی مقید[۱۹] تسویه می‌کند طوری که هزینه تولید ژنراتورها (تولید توان توسط شرکت‌های تولیدی) و جبران سازی بارهای قابل قطع قیمت پائین حداقل شود (معادله (۱۷)). تابع پیشنهاد قیمت واحدهای تولیدی به صورت معادله (۹) فرض می‌شود.

$$\rho_{G,ik}(p_{G,ik})=2\alpha_{ik}p_{Gik}+\beta_{ik} \quad i\in GS, k\in TS \qquad (۹)$$

بنابراین تابع هزینه واحدهای تولیدی به صورت معادله (۱۰) است:

$$C_{G,ik}(p_{G,ik})=(\alpha_{ik}p_{Gik}{}^2+\beta_{ik}p_{Gik}+\gamma_{ik})u_{ik} \qquad (۱۰)$$

$$u_{ik}=\begin{cases}0 & \textit{unit has no generation}\\ 1 & \textit{unit generates}\end{cases} \qquad (۱۱)$$

$$i\in GS, k\in TS$$

محدودیت‌های ظرفیت واحدهای تولیدی (نامعادله (۱۸))، شیب تولید (نامعادلات (۲۰) و (۲۱)) باید لحاظ شود. توابع قیمت پیشنهادی واحدهای تولیدی با روشهائی نظیر شبکه عصبی و نظریه بازی‌ها و با توجه به پیش‌بینی بار و قیمت‌های حاشیه‌ای محلی که توسط اپراتور مستقل سیستم منتشر می‌گردد، قابل حصول است. محدودیت‌های شیب تولید مسأله را چند دوره‌ای کرده و پارامتر در مدار آوردن واحدها[۲۰] بین ساعت‌های متوالی همبستگی ایجاد می‌کند. محدودیت بارهای قابل قطع قیمت پائین (نامعادله (۲۲)) و واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار (نامعادله (۲۳)) نیز بایددر نظر گرفته شوند. پخش بار DC (معادله (۲۴)) و تعادل بار (معادله (۲۵)) هم در نظر گرفته می‌شوند. متغیرهای تصمیم در این مدل عبارتند از $p_{G,ik}$ ، $p_{ij,k}$، $p_{IDG,ik}$ و $p_{LIL,ik}$

۴-۲- مدل تصمیم شرکت توزیع

برای مدلسازی، دوره زمانی ۲۴ ساعته در نظرگرفته شده است. ایستگاه‌های انتقال (ابتدای فیدرهای فشار متوسط) نقطه تامین انرژی شرکت توزیع از بازار عمده فروشی هستند. شرکت توزیع واحدهای تولید پراکنده تحت ماکیت خود و بارهای قابل قطع قیمت بالا را به بازار پیشنهاد نمی‌دهد، بلکه از آنها در مواقع اضطراری و زمانی که LMP بالا است استفاده می‌کند. سود شرکت توزیع از اختلاف بین هزینه انرژی خریداری شده و انرژی فروخته شده به مشترکین (مصرف‌کنندگان نهائی) حاصل می‌شود (معادله (۲۶)). هدف شرکت توزیع حداکثر کردن سود است، در حالی که محدودیت‌های بار قابل قطع قیمت بالا (نامعادله (۳۰)) و منابع تولید پراکنده تحت مالکیت شرکت توزیع (نامعادله (۳۱)) رعایت شود. متغیرهای تصمیم در این مدل عبارتند از $p_{DDG,ik}$ و $p_{HIL,ik}$.

۴-۳- ریسک در تامین انرژی شرکت توزیع

شرکت‌های توزیع در برنامه‌ریزی روزانه تامین انرژی خود با دو مسأله غیر قطعی تغییرات بار و نوسانات قیمت روبرو می‌باشند. ریسک به احتمال زیان ناشی از سرمایه‌گذاری و یا تصمیم اشاره دارد. یکی از شاخص‌های ارزیابی ریسک شاخص ارزش در معرض خطر[۲۱] (VaR) است که یک معیار آماری برای محاسبه حداکثر زیان مورد انتظار از اجرای یک تصمیم در دوره زمانی معین و با احتمال مشخص (سطح اطمینان معلوم) است. یکی از مشکلات این شاخص ناتوانی آن در تمیز قائل شدن بین یک زیان ممکن که اندکی بزرگتر از آن است و یک زیان ممکن که خیلی بزرگتر از آن باشد است. (در بازار برق که قیمت دارای جهش و توزیع پارامترها غیر خطی است، این مسأله وجود دارد.) برای غلبه بر این مشکل، در این مقاله از مفهوم ارزش در معرض خطر مشروط[۲۲] (CVaR) استفاده شده است که میزان مورد انتظار زیان داده شده که بیشتر از زیان حتمی است را نشان می‌دهد. اگر h(X,Y) زیان متناظر با بردار تصمیم X فرض شود که از مجموعه معین Ω در فضای R^n انتخاب شده است و Y نیز یک بردار تصادفی در R^m و معرف عدم قطعیت‌ها باشد و با فرض اینکه Y در R^m توزیع احتمالی با چگالی p(Y) دارد، احتمال h(X,Y) از یک مقدار آستانه α بیشتر نخواهد بود.

$$\psi(X,\alpha)=\int_{h(X,Y)\le\alpha}p(Y)dY \qquad (۱۲)$$

$$\alpha_\beta(X)=\min\{\alpha\in R:\psi(X,\alpha)\ge\beta\} \qquad (۱۳)$$

[۱۸] – Constraint economic dispatch

[۱۹] – Unit commitment

[۲۱] - Value-at-Risk

[۲۲] - Conditional Value-at-Risk

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

$$\phi_\beta(X)=\frac{1}{1-\beta}\int_{h(X,Y)\geq\alpha_\beta(X)} h(X,Y)\,p(Y)\,dY \qquad (۱۴)$$

که $\alpha_\beta(X)$ و $\Phi_\beta(X)$ به ترتیب معرف VaR و CVaR در یک سطح احتمال داده شده $\beta\in(0,1)$ هستند. با توجه به آنکه شکل تحلیلی تابع چگالی احتمال p(Y) در معادله (۱۴) ممکن است معلوم نباشد، این معادله به صورت زیر تقریب زده می‌شود:

$$\hat{\phi}_\beta(X)=\alpha+\frac{1}{l(1-\beta)}\sum_{k+1}^{l}h((X,Y_k)-\alpha)^+ \qquad (۱۵)$$

$$(t)^+=\begin{cases} t & \forall t\succ 0 \\ 0 & \forall t\leq 0\end{cases} \qquad (۱۶)$$

که Y_k معرف نمونه k ام از داده‌های نمونه است که می‌تواند از طریق داده‌کاوی و یا شبیه‌سازی مونت کارلو[۲۳] بدست آید.

۵- حل مسأله برنامه ریزی تامین انرژی شرکت توزیع

مدل تامین انرژی شرکت توزیع، معادلات (۹) – (۲۳) یک مسأله بهینه‌سازی دوسطحی است که در زیرمسأله بالائی سود شرکت توزیع حداکثر می‌شود در حالیکه زیرمسأله پائینی تسویه بازار توسط اپراتور مستقل سیستم را طوری بهینه‌سازی می‌کند که هزینه تولید ژنراتورها (تولید توان توسط شرکت‌های تولیدی) و جبران‌سازی بارهای قابل قطع قیمت پائین حداقل شود.

۵-۱- بهینه سازی دو سطحی

در مسائل دوسطحی[۲۴] (BP) بهینه‌سازی زیرمسأله بالائی با توجه به متغیرهای تصمیم بهینه‌سازی زیرمسأله پائینی صورت می‌پذیرد. در حالت کلی ممکن است توابع هدف و یا قیود BP خطی و مشتق پذیر و یا حتی در همه نواحی پیوسته و محدب نباشند. هنگامی که توابع هدف و قیود توابع درجه دوم هستند، مسأله را می‌توان با روش‌های ریاضی متعددی حل کرد[9]، اما وقتی که توابع هدف و قیود خطی، گسسته و یا فرم های خاص، مانند آنچه در شکل (ض۲-۴) نشان داده شده است، باشند، همگرایی و سرعت همگرایی و لذا دقت جوابها تحت تاثیر قرار خواهد گرفت. برای غلبه بر این مشکل الگوریتم حل ابتکاری پیشنهاد شده است. [10] .

۵-۲- روش ابتکاری حل مسأله برنامه‌ریزی تامین انرژی

فلوچارت روش ابتکاری حل مسأله که "بهینه‌سازی دوسطحی توسط الگوریتم ژنتیک"[۲۵] (GABLO) نامیده شده است، در [10] نشان داده شده است.

ایده اساسی روش معرفی شده به این صورت است که در مرحله اول، جمعیت اولیه طوری انتخاب می‌شود که قیود رعایت شوند. سپس در زیرمسأله پائینی نسل‌ها با توجه به تابع برازندگی ارزیابی می‌شوند تا پاسخ بهینه توسط عملگر ژنتیک جستجو گردد. پس از مقداردهی اولیه جمعیت زیرمسأله بالائی (US)[۲۶] ، اعضای کاندید از زیرمسأله پایینی (LS)[۲۷] به جمعیت افزوده می‌شوند. عملگرهای انتخاب[۲۸]، تقاطع[۲۹] و جهش[۳۰] مشابه روش الگوریتم ژنتیک معمولی هستند. عملگر مرتب سازی[۳۱] طوری طراحی شده است که اولویت انتخابی بزرگتر را به اعضای با برازندگی بیشتر در جمعیت می‌دهد. زمانی که اپراتور تکامل[۳۲] احضار می‌شود، این جمعیت به ترتیب نزولی بر اساس برازندگی طوری مرتب می‌شود که اعضای اصلح (اعضای دارای برازندگی بیشتر) در ابتدای جمعیت و اعضای عادی (اعضای دارای برازندگی کمتر) در انتهای جمعیت قرار می‌گیرند. یک جمعیت نخبه[۳۳] خارجی برای حفظ اعضای برگزیده از هر دو جمعیت در نظر گرفته می‌شود. بعد از انجام عملگر تکامل در هر نسل، در صورتیکه اعضای این جمعیت برگزیده برازندگی بیشتری داشته باشند، جایگزین اعضای فعلی خواهند شد.

۵-۳- مدلسازی مسأله برنامه‌ریزی تامین انرژی

مسأله تامین انرژی یک مسأله بهینه‌سازی دوسطحی است.

زیرمسأله پائینی:

$$min\left[\left(\sum_{i=1}^{Ng}\sum_{k=1}^{24}(\alpha_{ik}\,p_{Gik}{}^2+\beta_{ik}\,p_{Gik}+\gamma_{ik})u_{ik}\right)+\left(\sum_{i=1}^{NIL}\sum_{k=1}^{24}CLIL_{i,k}\right)+\left(\sum_{i=1}^{NIDG}\sum_{k=1}^{24}C_{IDG,ik}\right)\right] \qquad (۱۷)$$

s.t.

$$p_{G,ik}{}^{\min}\leq p_{G,ik}\leq p_{G,ik}{}^{\max} \qquad (۱۸)$$

$$-p_{ij,k}{}^{\min}\leq p_{ij,k}\leq p_{ij,k}{}^{\max} \qquad (۱۹)$$

$$p_{G,ik}-p_{G,i(k-1)}\leq Ru_{G,ik} \qquad (۲۰)$$

$$p_{G,i(k-1)}-p_{G,ik}\leq Rd_{G,ik} \qquad (۲۱)$$

---

[۲۳] - Monte Carlo Simulation
[۲۳] – Bilevel Problem
[۲۶] – Genetic Algorithm For Bilevel Optimization
[۲۷] – Upper subproble
[۲۷] – Lower subproblem
[۲۷] – Select
[۲۸] – Crossover
[۲۹] – Mutation
[۳۰] – Sort
[۳۱] – Co-evolutionary
[۳۲] – Elite

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

$$P_{LIL,ik}^{\min} \le P_{LIL,ik} \le P_{LIL,ik}^{\max} \quad (۲۲)$$

$$P_{IDG,ik}^{\min} \le P_{IDG,ik} \le P_{IDG,ik}^{\max} \quad (۲۳)$$

$$\sum_{i=1}^{B}\sum_{j=1}^{B} p_{ij} x_{ij} = 0 \quad (۲۴)$$

$$p_{G,ik} - (p_{D,ik}^{\max} - p_{ILL,ik} - p_{ILH,ik} - p_{DDG,ik} - p_{IDG,ik}) + \sum_{j=1}^{B(i)} p_{ij,k} = 0$$
$$j \in B(i), i \in B, k \in TS \quad (۲۵)$$

زیرمسأله بالائی:

$$B = \left[\left(\sum_{i=1}^{N_D}\sum_{k=1}^{24} (\lambda_k (P_{D,ik}^{\max} - P_{LIL,ik} - P_{HIL,ik}) \right) - \left(\sum_{i=1}^{N_D}\sum_{k=1}^{24} \left[\begin{array}{l} \rho_{Dik} . (P_{D,ik}^{\max} - P_{LIL,ik} - P_{HIL,ik} \\ - P_{DDG,ik} - P_{IDG,ik}) \end{array} \right] \right) - \sum_{i=1}^{N_D}\sum_{k=1}^{24} (C_{HILik} + C_{DDG,ik}) \right] \quad (۲۶)$$

$$F = -B \quad (۲۷)$$

$$\max E(B) \quad (۲۸)$$

$$\min_{q,\alpha} CVaR = \alpha + \frac{1}{l(1-\beta)} \sum_{k=1}^{l} (F^k - \alpha)^+ \quad (۲۹)$$

s.t.

$$P_{HIL,ik}^{\min} \le P_{HIL,ik} \le P_{HIL,ik}^{\max} \quad (۳۰)$$

$$P_{DDG,ik}^{\min} \le P_{DDG,ik} \le P_{DDG,ik}^{\max} \quad (۳۱)$$

$$and\ constrains\ (18)-(25)$$

$$E(B) \ge \beta_0 \quad (۳۲)$$

که E اپراتور امید، β_0 حد پائین درآمد مورد انتظار، l تعداد کل نمونه‌ها (ساعتها) ، F^k زیان تصمیم k امین نمونه (ساعت k ام) و کمیت α سطح اطمینان است. متغیرهای تصمیم در زیرمسأله پائینی عبارتند از $p_{G,ik}$, $p_{ij,k}$, $p_{IDG,ik}$, $p_{LIL,ik}$ و متغیرهای تصمیم زیرمسأله بالائی عبارتند از $p_{DDG,ik}$, ، α $p_{HIL,ik}$.

۶- مطالعه موردی

برای مطالعه موردی شبکه توزیع برق شهرستان مشهد مورد استفاده قرار گرفته است. شرکت توزیع نیروی برق شهرستان مشهد مسئولیت توزیع انرژی الکتریکی در شهرستان‌های مشهد، طرقبه و شاندیز با تعداد حدود یک میلیون مشترک را به عهده دارد.

۶-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه

شکل ساده شده سیستم مورد مطالعه (شکل (ض۲-۱)) هشت باسه و شامل سه تولیدکننده عمده برق، شش بار قابل قطع و چهار واحد تولید پراکنده است. سیستم مورد نظر از طریق چهار ایستگاه انتقال/توزیع تغذیه می‌شود. در ناحیه تحت پوشش این سیستم شرکت سیمان مشهد به عنوان بار قابل قطع قیمت بالا در برنامه‌های بار قابل قطع مشارکت دارد که برای مدلسازی واقع‌گرایانه مورد استفاده قرار گرفته است. فرایند تولید (شکل (ض۲-۲)) شامل سه بخش عمده است. مواد اولیه وارد سنگ‌شکن شده و بعد از اختلاط اولیه توسط نوار نقاله وارد سیلوی مواد خام خواهد شد و سپس به همراه سنگ سیلیس و سنگ آهگ و سنگ آهن وارد آسیاب مواد شده و بعد از این مرحله مواد پس از عبور از پیش‌گرمکن وارد کوره شده و تبدیل به کلینکر می‌شود. در مرحله بعد مواد کلینکر شده بعد از عبور از منطقه خنک کن با گچ و پوزولان مخلوط شده و وارد آسیاب سیمان شده، به صورت پودر وارد سیلوهای سیمان و از طریق بارگیرخانه به صورت فله و پاکتی در بارگیرخانه بارگیری و به مشتری تحویل می‌گردد. شکل (ض۲-۳) درصد مصرف انرژی الکتریکی در هریک از سه بخش را نشان می‌دهد. شرکت سیمان می‌تواند سه بخش مذکور را به صورت مجزا برنامه‌ریزی کند. این شرکت در سه شیفت کاری در روز تولیدی در حدود ۲۰۰۰ تن دارد (در حدود ۸۳/۳ تن در ساعت). ضریب بار در دو شیفت اول ۸۳٪ و در شیفت سوم ۶۳٪ می باشد. تجهیزات برحسب کنترل‌پذیری به پنج گروه تقسیم می‌شوند که شامل ۱۱ زیرفرایند مطابق جدول (ض۲-۱) است. مصارف اداری و روشنائی روزانه در دو شیفت اول ۷۳ KWh و در شیفت سوم ۹۸ KWh است. از حل مسأله بهینه‌سازی (معادله (۸) بخش (۳)) نتیجه می‌شود که شرکت سیمان مشهد می‌تواند در برنامه بار قابل قطع به صورت شکل (ض۲-۴) مشارکت کند. t_1 شروع برنامه مدیریت بار است. سایر اطلاعات مربوط به سیستم مورد مطالعه در جداول (ض۲-۲)- (ض۲-۶) و پروفایل بار مصرفی در شکل (ض۲-۵) نشان داده شده است.

۶-۲ یافته ها

برای مطالعه موردی، شبکه توزیع برق شهرستان مشهد استفاده شده است. فرضیات زیر در این مطالعه لحاظ شده اند.

- بهای برق پر داختی توسط مشترکین به صورت زیر است:

(1$ = 31000 Rials)

$$\lambda = \begin{cases} 1.5\, Rials/Wh \ \ at \quad 6:00-19:00 \\ 2.1\, R1als/Wh \ \ at \quad 19:00-23:00 \\ 0.9\, Rials/Wh \ \ at \quad 23:00-6:00 \end{cases}$$

- توابع هزینه بعضی از بار های قابل قطع مرتبه دوم یا خطی فرض می‌شود.

$$C_{LIL} = \kappa 1 \,.P^2{}_{ILL} + \kappa 2 \,.\nu.P_{\ ILL} + \kappa 3 \quad (۳۳)$$

$$C_{HIL} = \tau 1 \,.P^2{}_{HIL} + \tau 2 \,.\nu.P_{\ HIL} + \tau 3 \quad (۳۴)$$

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

- توان اکتیو واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت شرکت توزیع به روش در مدار آوردن واحدها مدیریت می‌شود و در محل‌های از پیش تعیین شده نصب می‌باشند و تابع هزینه آن ها معلوم است.

$$C_{DDG}=\sum_{k=1}^{24}\left[\sum_{i=1}^{N_{DDG}} b1_{ik}.STC_i+b2_{ik}.SDC_i+B1_i.d_{ik}+B2_i.P_{DDGik}\right] \quad (۳۵)$$

- واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار با شرکت توزیع قرارداد دو جانبه با قیمت از پیش معلوم دارند.

$$C_{IDG}=\sum_{k=1}^{24}\left[\sum_{i=1}^{IDG} \gamma 1_i.P^2{}_{IDGik}+\gamma 2_i.P_{\ IDGik}+\gamma 3_i\right] \quad (۳۶)$$

- استراتژی شرکت توزیع در تامین انرژی به میزان تقاضای مشترکین و قیمت‌های حاشیه‌ای محلی بازار بستگی دارد .
- سطح اطمینان (α) معادل ۹۰٪ و حداقل سود مورد انتظار ۲۰٪ فرض شده است.

با توجه به شکل (ض۲-۵) ملاحظه می‌شود که تقاضا[۳۴] در ساعت‌های قبل از ۱۸:۰۰ و بعد از ۲۳:۰۰ به آرامی افزایش می یابند. در این ساعات می‌توان از تاثیر شیب تولید[۳۵] بر روی LMP صرف نظر کرد. برای تحلیل دو حالت در نظر می‌گیریم.

حالت اول: سه دوره زمانی پیوسته ۲۰:۰۰-۱۹:۰۰-۱۸:۰۰ را در نظر می‌گیریم در این حالت محدودیت شیب تولید برای برخی از واحدهای تولیدی و نیز محدودیت انتقال توان برای برخی از خطوط فعال است. این سه دوره زمانی با یکدیگر وابستگی دارند.

۱- G3 در مقایسه با G2،G1 و G4 واحد گران قیمتی است. بنابراین تولید آن باید حتی الامکان کم باشد. اگر بار، در باس۳ افزایش یابد، تولید G3 افزایش می‌یابد در حالیکه تولید سایر ژنراتور ها (واحدهای ارزانتر) به دلیل وقوع تراکم در خطوط انتقال کاهش می‌یابد که منجر به بالا رفتن LMP می‌شود.

۲- در ساعت ۱۸:۰۰ تولید G3 به محض مواجه شدن با محدودیت شیب تولید افزایش می‌یابد. وقتی افزایش بار در باس ۱ رخ دهد، تولید G3 تغییری نخواهد کرد. بنابراین علیرغم اینکه محدودیت‌های شیب تولید فعال هستند، LMP ها کمتر هستند. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که کاهش تولید واحدهای ارزانتر یا افزایش تولید واحدهای گرانتر می‌تواند منجر به وقوع کمتر تراکم گردد. با توجه به اینکه LMP ها در ساعت ۱۸:۰۰ کمتر هستند، شرکت توزیع علاقه دارد که انرژی بیشتری از بازار عمده فروشی تامین کند بنابراین تمایل به اجرای برنامه‌های بار قابل قطع قیمت پائین کمتر است. در ساعت ۱۹:۰۰ محدودیت‌های شیب تولید تاثیر کمتری دارند. با افزایش تقاضا و به دلیل محدودیت شیب تولید در ساعت ۲۰:۰۰، LMP ها خیلی بالا هستند، بنابراین برای حداکثر شدن سود شرکت توزیع بار قابل قطع قیمت پائین بیشتری لازم است. همین تحلیل را می‌توان برای دوره سه ساعته ۲۳:۰۰-۲۲:۰۰-۲۱:۰۰ نیز بکار بست.

حالت دوم: در این حالت نقش بارهای قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده در حالتی که در سیستم تراکم رخ می‌دهد و محدودیت‌های شیب نیز فعال هستند در چهار حالت در نظر گرفته می‌شود.

۲-الف شرکت توزیع بار قابل قطع و واحد تولید پراکنده ندارد.

۲-ب شرکت توزیع بار قابل قطع ندارد اما واحد تولید پراکنده دارد.

۲-ج شرکت توزیع بار قابل قطع دارد اما واحد تولید پراکنده ندارد.

۲-د شرکت توزیع هم بار قابل قطع و هم واحد تولید پراکنده دارد.

۱-در حالت ۲-الف تراکم منجر به بالا رفتن LMP ها می شود، سود شرکت توزیع با توجه به این که بار قابل قطع و واحد تولید پراکنده ندارد و باید تامین انرژی را از بازار عمده فروشی با قیمت‌های بالا انجام دهد، منفی خواهد بود.

۲- در حالت ۲-ب وقتی قیمت‌های بازار بالا است، شرکت توزیع ترجیح می‌دهد که از واحدهای تولید پراکنده بهره ببرد که این مساله باعث کاهش میزان تفاضا و لذا کاهش قابل توجه LMP ها نسبت به حالت ۲-الف خواهد شد و در نتیجه سود شرکت توزیع افزایش می‌یابد و این بدان معناست که وقوع تراکم تمایل شرکت توزیع به استفاده از واحدهای تولید پراکنده را افزایش می‌دهد.

۳- علاوه بر واحدهای تولید پراکنده، بار قابل قطع نیز منبع مفیدی برای مقابله با تراکم می‌باشد، همچنانکه در حالت ۲-د نشان داده شده است، وقتی که میزان تقاضای شرکت توزیع کاهش می یابد، LMP ها نسبت به حالت ۲-الف کمتر خواهد بود که اهمیت قراردادهای بار قابل قطع را نشان می‌دهد. باید توجه داشت که قیمت HIL نسبت به LIL بالاتر است بنابراین عموما استفاده از LIL ترجیح داده می‌شود.

۴- وقتی واحدهای تولید پراکنده و بارهای قابل قطع وجود دارند(حالتهای ۲-الف، ۲-ب و ۲-ج)، هزینه کمتری به واحدهای تولیدی پرداخت می‌شود و این مسأله از قیمت‌دهی استراتژیک[۳۶] واحدهای تولیدی و ممانعت از ارائه توان[۳۷] جلوگیری می‌کند.

مقایسه بین استراتژی‌های بهینه و سود شرکت توزیع و هزینه پرداختی به واحدهای تولیدی و LMP در باس‌های مختلف و نیز تاثیر بار قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده بر CVaRدر جدول (ض۲-۷) نشان داده شده است.

۷- نتیجه

در این مقاله، روش جدیدی برای تصمیم گیری یک شرکت توزیع برای اکتساب انرژی در بازار روز- بعد در محیط رقابتی مبتنی بر ریسک با لحاظ کردن بارهای قابل قطع و واحدهای تولید پراکنده مطرح شد. یکی از مهم ترین مفاهیمی که معرفی شد، توجه به فرضیات واقع-گرایانه برای مدلسازی بار قابل قطع است. روش پیشنهادی می‌تواند برای به دست آوردن درک خوبی از مدل سازی بار قطع به کار رود که در مطالعات مربوط به برنامه‌ریزی اکتساب انرژی شرکت‌های توزیع در

[۳۴] – Demand

[۳۵] – Ramping limit

[۳۶] – Strategic Pricing

[۳۷] – Withholding

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

محیط واقعی مفید است. نتایج به دست آمده به اپراتور مستقل بازار و شرکت توزیع در اتخاذ بهترین تصمیم کمک می‌کند. علاوه بر جدید بودن روش ارائه شده، نتایج مطالعات انجام شده در این مقاله به دلیل جامعیت مدلسازی و دقت جوابها می‌تواند برای شرکت‌های توزیع برق کشور مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، مفهوم پیشنهادی می‌تواند به سادگی در سیستم متشکل از چند شرکت توزیع نیز مورد استفاده قرار گیرد.

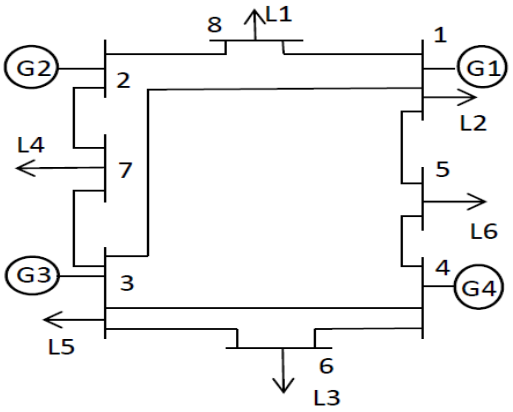
۱- فهرست علائم

اندیس مربوط به ساعتها	K	تولید پذیرفته شده واحدهای تولیدی	P_G
اندیس مربوط به باسها	i,j	حداقل توان تولیدی واحد تولیدی	P_G^{min}
ضرائب تابع هزینه واحدهای تولیدی (Genco)	α,β,γ	حداکثر توان تولیدی واحد تولیدی	P_G^{max}
شیب افزایشی تولید	R_{uG}	مجموعه بازه های زمانی	N_I
شیب کاهشی تولید	R_{dG}	مجموعه زیرفرایندها	N_{SP}
متغیر مربوط به در مدار آمدن واحدهای تولیدی	U	افق زمانی	T
توان انتقالی از خط i-j	$P_{i,j}$	بازه زمانی	t
حد اقل توان انتقالی از خط i-j	$P_{i,j}^{min}$	متغیر تصمیم باینری زیرفرایند	I
حد اکثرتوان انتقالی از خط i-j	$P_{i,j}^{max}$	نرخ تولید در زیرفزایند.	P_{mi}
راکتانس خط i-j	$X_{i,j}$	خروجی زیرفرایند	q_{mi}
تعداد باسهای تولید	N_g	بازده ماشین آلات زیرفرایند	E_{mi}
حد اکثر تقاضا (demand)شرکت توزیع	$P_D^{max`}$	ضریب بهره‌وری ماشین آلات زیرفرایند	UF_{mi}
تعداد باسها	B	محدودیت حداکثر تقاضا (دیماند)	KVA_{mi}
تعداد باسهای متصل به باس i	$B(i)$	توان الکتریکی ورودی برحسبkW	EP_{mi}
تعداد حلقه های مستقل	L	ظرفیت نامی ماشین آلات زیرفرایند بر حسب .kW	R_{mi}
تعداد شاخه ها	BS	ضریب قدرت	pf_{mi}
تعداد شاخه های حلقه مستقل l	BSl	میزان ذخیره در انتهای زیرفرایند	S
تعداد باسهای تغذیه شبکه توزیع	BD	هزینه انرژی الکتریکی	C_i
تعداد باسهای بار قابل قطع قیمت پائین (LIL)	BLI	هزینه مدیریت بار	C_{ai}
تعداد باسهای بار قابل قطع قیمت بالا (HIL)	BHI	واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت شرکت توزیع	DDG
تعداد واحدهای تولیدی (Genco)	GS	واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار	IDG
مجموعه ساعتها	TS	توان تولیدیDDG	P_{DDG}
LMPپرداختی به واحد تولیدی (Genco)	ρ_G	توان تولیدی IDG	P_{IDG}
قیمت بازار برق(LMPپرداختی توسط شرکت توزیع)	ρ_D	متغیرهای باینری روشن شدن، خاموش شدن و به مدار آمدن DDG	b1,b2,d
تقاضای خالص شرکت توزیع	P_D		
میزان بار قابل قطع قیمت پائین پذیرفته شده	P_{LIL}	هزینه روشن شدن DDG	STC
حداقل بار قابل قطع قیمت پائین	P_{LIL}^{min}	هزینه خاموش شدن DDG	SDG
حداکثر بار قابل قطع قیمت پائین	P_{LIL}^{max}	هزینه بهره برداری بی بار DDG	B1
ضریب ارزش بار قابل قطع قیمت پائین	ν	هزینه متغیر بهره برداری DDG	B2
ضرائب تابع هزینه بار قابل قطع قیمت پائین	k_1,k_2,k_3	ضرائب تابع پیشنهاد قیمت IDG	$\gamma1,\gamma2,\gamma3$
میزان بار قابل قطع قیمت بالای پذیرفته شده	P_{HIL}	حداقل توان تولیدی توسط DDG	P_{DDG}^{min}
حداقل بار قابل قطع قیمت بالا	P_{HIL}^{min}	حداکثر توان تولیدی توسط DDG	P_{DDG}^{max}
حداکثر بار قابل قطع قیمت بالا	P_{HIL}^{max}	حداقل توان تولیدی توسط IDG	P_{IDG}^{min}
ضرائب تابع هزینه بار قابل قطع قیمت پائین	t_1,t_2,t_3	حداکثر توان تولیدی توسط IDG	P_{IDG}^{max}
قیمت خرده فروشی برق (توسط شرکت توزیع)	λ		

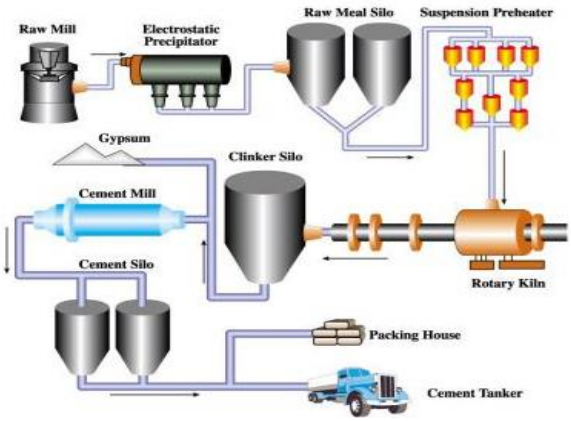
[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

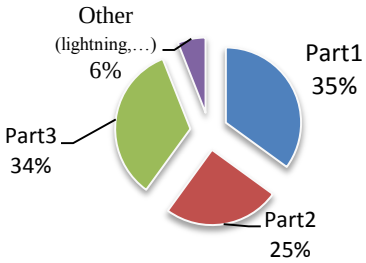
۲- اطلاعات سیستم مورد مطالعه



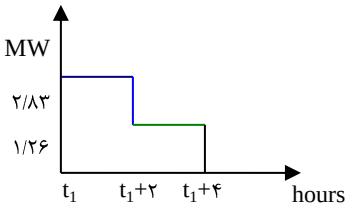
شکل (ض۲-۱) دیاگرام تک خطی سیستم مورد مطالعه



شکل (ض۲-۲) فرایند تولید سیمان



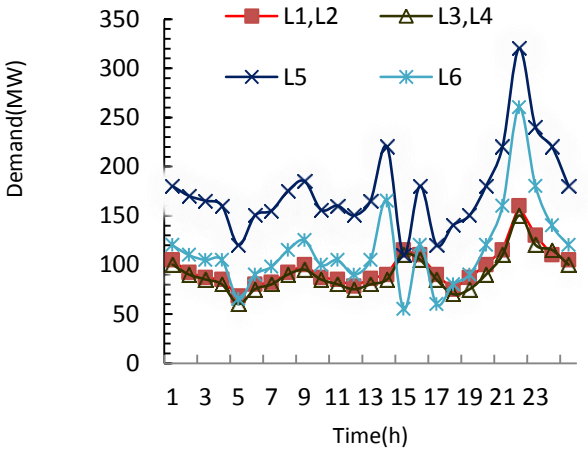
شکل (ض۲-۳) درصد مصرف انرژی در فرایند تولید سیمان



شکل (ض۲-۴) نحوه مشارکت شرکت سیمان مشهد در بازار بار قابل قطع

زیرفرایند	بازده	ضریب بهره‌برداری	مصرف برق KWh/t	ظرفیت تولید t/hr
Sp_1, Sp_2	٪۹۰	۰/۹۵	۲/۴	۲۰۰
Sp_3	٪۸۵	۰/۹	۲۸	۱۷۵
Sp_4, Sp_5, Sp_6	٪۹۰	۰/۹	۱۴/۶	۱۷۰
Sp_7, Sp_8	٪۷۵	۰/۸۵	۲۳/۴	۱۶۵
Sp_9, Sp_{10}	٪۹۰	۰/۹	۴۳/۵	۱۵۰
Sp_{11}	٪۹۵	۰/۹۸	۱/۱	۱۲۰

جدول (ض۲-۱) زیرفرایندهای تولید سیمان



شکل (ض۲-۵) نمودار بار مصرفی سیستم مورد مطالعه

جدول (ض۲-۲) مشخصات واحدهای تولید پراکنده تحت مالکیت سرمایه‌گذار

IDG	P_{IDG}^{max} (MW)	P_{IDG}^{min} (MW)	Γ_3	γ_2	γ_1
IDG1	۲/۴	۰/۵	۰/۰۱۲	۰/۲۷	۰/۲۳
IDG2	۴/۲	۰/۸	۰/۰۲۳	۰/۶۷	۰/۸۷

جدول (ض۲-۳) مشخصات واحدهای تولید پراکنده شرکت توزیع

جدول (ض۲-۴) مشخصات تولید کنندگان عمده برق (Genco)

DDG	P_{DDG}^{max} (MW)	P_{DDG}^{min} (MW)	B_2	B_1	SDG (hour)	STC (hour)
DDG1	۲/۱	۰/۵	۰/۰۵۲	۰/۰۲۳	۰/۶۷	۰/۵
DDG2	۳/۲	۰/۵	۰/۰۵۲	۰/۰۲۳	۰/۶۷	۰/۵

Genco	γ (\$/h)	β (\$/MWh)	α (\$/((MW)^{2}h))	P_{max} (MW)	P_{min} (MW)
G1	۶۸۵	۵۴/۷۶	۰/۰۹	۶۰۰	۰
G2	۷۱۲	۶۵/۵۷	۰/۱۳	۱۶۰	۰
G3	۸۴۰	۷۶/۵۳	۰/۲۱	۱۶۰	۰
G4	۶۵۰	۴۶/۹۴	۰/۰۷	۴۵۰	۰

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

جدول (ض۲-۵) مشخصات خطوط انتقال

خط	محدودیت انتقال توان(MW)	X (p.u.)	به باس	از باس
۱	۳۴	۰/۰۹۰	۳	۱
۲	۱۲۰	۰/۰۲۰	۵	۱
۳	۴۰	۰/۰۲۵	۸	۱
۴	۲۰	۰/۰۲۵	۷	۲
۵	۳۲	۰/۰۲۰	۸	۲
۶	۱۲	۰/۰۵۵	۴	۳
۷	۱۲۰	۰/۰۲۵	۶	۳
۸	۱۶	۰/۰۱۲	۷	۳
۹	۲۳	۰/۰۲۰	۵	۴
۱۰	۳۲	۰/۰۲۳	۶	۴

جدول (ض۲-۶) مشخصات بارهای قابل قطع

بار	باس	ضریب ارزش(٪)	K3 or τ3	K2 or τ2	K1 or τ1	حداکثر مقدار قطع	حداقل مقدار قطع	نوع بار
IL1	۸	۰/۹۳	۰/۰۲۱	۱۲	۰/۰۱	۱۲MW حداکثر ۴ ساعت	۲/۵ MW	HIL
IL2	۵	۰/۶۷	۰	۵۳۰	۰	۱۱/۲ MW	۱/۷۵MW	LIL
IL3	۶	۰/۹۱	۰	۳۵۰	۰	۱۰ MW	۰/۵ MW	LIL
IL4	۱	۰/۷۴	۰	۲۴۰	۰	۱۴/۶MW	۲/۳ MW	LIL
IL5	۵	87/0	۰	۳۵۰	۰	۱۱/۳MW	۱ MW	LIL
IL6	۷	مانند شکل (ض۲-۴) و پرداخت بر اساس LMP				۲/۸۳MW	۱/۲۶ MW	HIL

جدول (ض۲-۷) نتائج سناریوهای مختلف

سناریو	۲-الف	۲-ب	۲-ج	۲-د
بار قابل قطع قیمت پائین(MW)	۰	۰	۲۱/۲	۳۴/۰۳
بار قابل قطع قیمت بالا(MW)	۰	۰	۱۴/۸۳	۲/۹۳
DG تحت مالکیت شرکت توزیع(MW)	۰	۲/۱	۰	۵/۳
DG تحت مالکیت سرمایه‌گذار(MW)	۰	۶/۶	۰	۶/۶
بازار عمده فروشی(MW)	۱۱۸۵/۲	۱۱۷۶/۹	۱۱۴۹/۱۷	۱۱۳۶/۳۴
جمع کل(MW)	۱۱۸۵/۲	۱۱۸۵/۲	۱۱۸۵/۲	۱۱۸۵/۲
سود شرکت توزیع($)	-۷۳۶/۴۱	۵۶۳/۵۷	۱۹۷۸/۶۴	۲۷۳۸/۶۴
هزینه پرداختی به واحدهای تولید عمده($/h)	۱۰۰۱۶۵/۷۳	۹۷۴۵۶۱/۲۷	۸۱۲۳۵/۵۲	۶۲۸۴۳/۸۱
LMPدر Bus1 ($/MWh)	۲۵/۳۴	۲۴/۳۹	۲۱/۸۶	۱۸/۷۶
LMP در Bus2 ($/MWh)	۱۶۲/۸۴	۱۳۲/۵۷	۷۴/۶۱	۶۵/۳۱
LMP در Bus3 ($/MWh)	۱۳۵/۴۲	۱۰۶/۶۴	۸۲/۱۴	۶۹/۴۳
LMP در Bus4 ($/MWh)	۳۲/۸۷	۲۹/۳۱	۲۴/۱۲	۱۹/۰۸
LMP در Bus5 ($/MWh)	۲۳/۶۴	۲۴/۵۷	۲۲/۰۱	۲۰/۴۹
LMP در Bus6 ($/MWh)	۲۷/۴۶	۲۳/۸۲	۲۰/۵۷	۲۱/۶۹
LMP در Bus7 ($/MWh)	۱۲۵/۳۷	۸۷/۲۳	۶۷/۲۴	۵۸/۲۶
LMP در Bus8 ($/MWh)	۲۸/۹۷	۲۹/۳۴	۲۷/۲۱	۲۲/۳۷
CvaR ($)	۹۵۸/۱۵	۳۹۱/۳۷	۱۸۷/۷۲	۴۳/۲۳

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]

مراجع

[1] M. Yousefi Ramandi, K. Afshar, and N. Bigdeli, *Unit commitment considering position of interruptible load in energy and reserve simultaneous market*, International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering, June 2014, vol. 2, pp. 1–10.

[2] P. M. Sotkiewicz and J. M. Vignolo, *Nodal pricing for distribution networks: efficient pricing for efficiency enhancing DG*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 21, May 2006, pp. 1013-1014.

[3] D. Lawrence and B. Neenan, *The status of demand response in New York*, IEEE Power Eng. Soc. General Meeting proc., 2009, vol. 4, pp. 2270–2274.

[4] NERC *Operating Policy-IO on Interconnected Operations Services*, Draft-3.1, February 2013.

[5] J. Liu, M. Salama, and R. Mansour, *Identify the impact of distributed resources on congestion management*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, pp. 1998–2005, Jul. 2005.

[6] Haghighat H. and Kennedy S.W., *A Bilevel Approach to Operational Decision Making of a Distribution Company in Competitive Environments*, IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, pp. 1797–1807, Nov. 2012.

[7] Haiying Li., Yuzeng Li and Zuyi Li, *A multi period energy acquisition model for distribution company with distribution generation and interruptible load*, IEEE Trans Power Syst., vol. 22, pp. 588–596, Nov. 2007.

[8] S. Ashok and Rangan Banerjee, *An Optimization Mode for Industrial Load Management*, IEEE Trans Power Syst., vol. 16, pp. 879–883, Nov. 2001.

[9] Jahan, M.S. and Amjady, N., *Solution of large-scale security constrained optimal power flow by a new bi-level optimisation approach based on enhanced gravitational search algorithm*, Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol.:7, pp. 1481 – 1491, December 2013.

[10] H. Safari Farmad and H. Rajabi Mashhadi, *Effects of Interruptible Load on Decision Making of a Distribution Company in Competitive Environments*, Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering, Vol. 11, No. 1, March 2015.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2025-06-28]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1394.4.1.1.4]