

روشی دومرحله‌ای برای مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های هوشمند با رویکرد بهبود سطح رفاه اجتماعی و اثر مدیریت سمت تقاضا

جواد ابراهیمی^۱، دانشجوی دکتری، محمد عابدینی^۲، استادیار، محمدمهدی رضایی^۳، استادیار، مهدی نصری^۴، استادیار

۱- دانشجوی دکتری رشته برق، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

javad.ebrahimi@iaukhsh.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه آیت اله بروجردی، بروجرد، ایران

m.abedini@abru.ac.ir

۳- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

mm.rezaei@iaukhsh.ac.ir

۴- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

nasri_me@iaukhsh.ac.ir

چکیده: از جمله راهکارهایی که برای افزایش رضایت مصرف کنندگان در سیستم قدرت استفاده می‌شوند برنامه‌های مدیریت مصرف هستند. برای اجرای این برنامه‌ها از روش‌های متفاوتی استفاده شده است که اغلب تعداد محدودی از بارها را در چند نوع خاص پوشش می‌دهند. در این مقاله از روش جابجایی بار برای مدیریت مصرف ریزشبکه‌ی هوشمند استفاده شده که این مسئله با اهداف کاهش پیک بار سیستم و هزینه‌های مشترکین برای بارهای متنوع در شبکه توسط الگوریتم ازدحام ذرات با ضرایب سینوسی و کسینوسی (H-PSO-SCAC)^۱ حل شده، سپس اثر اجرای برنامه پیشنهادی بر تولید ریزشبکه‌ها در بازار باهدف بهبود سطح رفاه اجتماعی موردبررسی قرار گرفته است. شبیه‌سازی‌ها روی شبکه‌ی هوشمندی شامل سه ریزشبکه‌ی خانگی، تجاری و صنعتی انجام شده که دارای انواع مختلفی از بارهای قابل کنترل هستند. نتایج حاکی از آن است که برنامه‌ی پیشنهادی موجب کاهش پیک بار، هزینه‌ی مشترکین و هزینه‌های تولید شده و تعادل بار و بهبود سطح رفاه اجتماعی از دید بهره‌بردار را به دنبال دارد.

واژه‌های کلیدی: بارهای قابل کنترل، شبکه‌ی هوشمند، رفاه اجتماعی، الگوریتم H-PSO-SCAC، مدیریت سمت تقاضا DSM^۲

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: محمد مهدی رضایی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: اصفهان، خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر دانشکده فنی و مهندسی، طبقه سوم

متغیر	تعریف
$Objective(t)$	مقدار پروفیل بار هدف در زمان t
$P_{Load}(t)$	پروفیل بار نهایی بعد از اجرای برنامه در زمان t
$Forecast(t)$	مصرف پیش‌بینی‌شده در زمان t
$Connect(t)$	مقدار بارهای قابل‌کنترلی هستند که در زمان t وصل
$Disconnect(t)$	مقدار بارهای قابل‌کنترلی هستند که در زمان t قطع
X_{kit}	تعداد وسایل از نوع k است که از پله زمانی i به t منتقل شده‌اند
D	تعداد انواع وسایل
$P_{(1+l)k}$ و P_{1k}	توان مصرفی در پله‌های زمانی ۱ و $1+l$
j	دوره کلی مصرف برای وسیله‌ی نوع k
X_{ktq}	تعداد بارهای قابل‌کنترل نوع k هستند که از زمان t به q عقب‌افتاده‌اند
m	حداکثر زمان به تأخیر انداختن مجاز بارهای قابل‌کنترل که در اینجا ۱۲ ساعت منظور گردیده است.
$Ctrlable(i)$	تعداد بارهای قابل‌کنترل از نوع k ام در بازه زمانی i ام
N	تعداد کل بازه‌های زمانی
$P_{load_{g,t}}$	بار مصرفی ریزشبه g در ساعت t
Pr_{Pload}	قیمت برق در ساعت t
$Costdg_{n,t}$	هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری از DG n ام در ساعت t
$Udg_{n,t}$	متغیر صفر یا یک که حضور یا عدم حضور DG در برنامه‌ریزی
$STCdg_n$	هزینه راه‌اندازی گرم یا سرد
$Pdg_{n,t}$	توان تولیدی DG، n ام در ساعت t
S_{hn} و S_{cn}	به ترتیب هزینه راه‌اندازی سرد و گرم
T_{noff}	مدت‌زمان خاموش بود واحد
T_{ncold} و T_{ndown}	ترتیب مدت‌زمان حداقل خاموشی و مدت‌زمان سرد شدن واحد n ام
P_{min} و P_{max}	به ترتیب حداقل و حداکثر توان تولیدی DG
a,b,c	ضرایب تابع هزینه DG ها
P_{load_i}	توان بار i ام در ریزشبه
P_{loss}	تلفات شبکه
$P_{load_{l,t}}$	توان بار محلی l شبکه اصلی در ساعت t
Pr_{Pload}	قیمت برق در ساعت t
$Pmg_{i,stg,t}$	توان برنده‌شده ریزشبه i ام در پله stg در ساعت t ام
$Prmg_{i,stg,t}$	قیمت برنده‌شده در بازار توسط ریزشبه در ساعت t و پله stg
U_{it}	متغیر صفر یا یک مربوط به حضور یا عدم حضور ریزشبه در بازار
$Costdg_{n,t}$	هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری از DG n ام در ساعت t
$Udg_{n,t}$	متغیر صفر یا یک است که حضور یا عدم حضور DG های شبکه اصلی در برنامه‌ریزی را بیان می‌دارد
$Prdg_{n,t}$	توان برنده‌شده DG های شبکه اصلی n در ساعت t
$Pdg_{n,t}$	قیمت برنده‌شده DG شبکه اصلی در ساعت t
$Pmaxmg_{i,stg,t}$	حداکثر توانی ارائه شده ریزشبه در بازار
r_2 و r_1	اعدادی تصادفی در بازه‌ی $[0, 1]$ با توزیع یکنواخت
c_2 و c_1	ضرایب یادگیری الگوریتم
V_t^d و X_t^d	موقعیت و سرعت ذرات
$pbest$	بهترین موقعیت قبلی ذره
$gbest$	بهترین موقعیت کل ذرات گروه
M_j	شماره تکرار فعلی
M_{max}	شماره حداکثر تکرار
w'_{ij} و w_{ij}	ضرایب شتاب وزنی دینامیکی ذرات
u	مقدار تابع تناسب اصلی در تکرار اول
$iter$	شماره تکرار فعلی
$f(j)$	تابع تناسب ذره j ام
ρ	عددی تصادفی بین ۰ و ۱

متغیر	تعریف
$Objective(t)$	مقدار پروفیل بار هدف در زمان t
$P_{Load}(t)$	پروفیل بار نهایی بعد از اجرای برنامه در زمان t
$Forecast(t)$	مصرف پیش‌بینی‌شده در زمان t
$Connect(t)$	مقدار بارهای قابل‌کنترلی هستند که در زمان t وصل
$Disconnect(t)$	مقدار بارهای قابل‌کنترلی هستند که در زمان t قطع
X_{kit}	تعداد وسایل از نوع k است که از پله زمانی i به t منتقل شده‌اند
D	تعداد انواع وسایل
$P_{(1+l)k}$ و P_{1k}	توان مصرفی در پله‌های زمانی ۱ و $1+l$
j	دوره کلی مصرف برای وسیله‌ی نوع k
X_{ktq}	تعداد بارهای قابل‌کنترل نوع k هستند که از زمان t به q عقب‌افتاده‌اند
m	حداکثر زمان به تأخیر انداختن مجاز بارهای قابل‌کنترل که در اینجا ۱۲ ساعت منظور گردیده است.
$Ctrlable(i)$	تعداد بارهای قابل‌کنترل از نوع k ام در بازه زمانی i ام
N	تعداد کل بازه‌های زمانی
$P_{load_{g,t}}$	بار مصرفی ریزشبه g در ساعت t
Pr_{Pload}	قیمت برق در ساعت t
$Costdg_{n,t}$	هزینه راه‌اندازی و بهره‌برداری از DG n ام در ساعت t
$Udg_{n,t}$	متغیر صفر یا یک که حضور یا عدم حضور DG در برنامه‌ریزی
$STCdg_n$	هزینه راه‌اندازی گرم یا سرد
$Pdg_{n,t}$	توان تولیدی DG، n ام در ساعت t
S_{hn} و S_{cn}	به ترتیب هزینه راه‌اندازی سرد و گرم
T_{noff}	مدت‌زمان خاموش بود واحد
T_{ncold} و T_{ndown}	ترتیب مدت‌زمان حداقل خاموشی و مدت‌زمان سرد شدن واحد n ام
P_{min} و P_{max}	به ترتیب حداقل و حداکثر توان تولیدی DG

۱- مقدمه

سال‌ها است انرژی الکتریکی به جزء تفکیک‌ناپذیر زندگی بشر تبدیل شده است و تمام کارهای روزمره چه در زندگی شخصی افراد و چه در صنایع تولیدی، کشاورزی و غیره به نحوی با این انرژی رابطه‌ی نزدیکی دارد، از طرفی با پیشرفت روزافزون فناوری، افزایش روند مصرف انرژی و رشد سریع جمعیت این رابطه بیشتر هم می‌شود. همچنین، تغییر نیازهای بشر و پیشرفت‌های علمی و صنعتی سبب شده تا به برق با کیفیت بالاتری نیاز باشد [۱]. لذا به شبکه‌ی قدرتی نیاز داریم تا بتواند کیفیت برق را تضمین کند و نیازهای متغیر مشترک را به خوبی پاسخ دهد. این نیازها تعریفی جدید را برای شبکه‌ی برق ایجاد می‌کند که از آن با نام شبکه‌ی هوشمند یاد می‌شود. در یک دید کلی، می‌توان شبکه‌ی هوشمند را به صورت مجموعه‌ای از زیرساخت‌های شبکه‌ی قدرت با شبکه‌ی گسترده‌ی مخابراتی تعریف کرد [۲].

می‌توان برای شبکه‌ی هوشمند به لحاظ زیرساختی چهار دسته زیرساخت در نظر گرفت: زیرساخت اطلاعاتی هوشمند، زیرساخت ارتباطی، زیرساخت حفاظتی و زیرساخت مدیریتی که در اینجا بحث اصلی بر روی زیرساخت مدیریتی است. زیرساخت مدیریتی: شبکه‌ی هوشمند از شارش دوطرفه‌ی الکتریسیته و اطلاعات پشتیبانی می‌کند و از این رو برای تحقق اهداف مدیریتی مناسب است. اهداف مدیریتی مختلفی برای شبکه‌ی هوشمند در نظر گرفته شده است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: بهبود بازده انرژی، کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، حفظ تعادل تولید و مصرف، کنترل آلاینده‌های کربنی و افزایش کارایی سیستم هستند.

راهکار پیشنهادی برای رسیدن به اهداف فوق معمولاً استفاده از برنامه‌ی مدیریت مصرف است. این برنامه‌ها از سوی شرکت‌های برق ارائه داده شده و مصرف‌کنندگان به آن‌ها پاسخ می‌دهند که اجرای این برنامه‌ها با تعامل مستقیم با مصرف‌کنندگان امکان‌پذیر است. اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف می‌تواند از صرف هزینه‌های اضافی جهت ایجاد زیرساخت‌های تولید، انتقال و توزیع جلوگیری نماید [۳]. در مراجع مختلف روش‌ها و استراتژی‌های مختلفی با اهداف گوناگون جهت مدیریت مصرف پیشنهاد شده که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

در [۴] از روش برنامه‌ریزی خطی برای اجرای مدیریت مصرف به روش کنترل مستقیم برای افزایش بهره‌وری سیستم استفاده شده است. که در آن رضایت و اولویت مشترکین نادیده گرفته شده است.

همچنین در [۵] یک روش قیمت‌گذاری نقطه‌ای برای مدیریت مصرف در شبکه مسکونی ارائه شده است که بازم در این روش تنوع بار کم بوده و رضایت مشترکین در نظر گرفته نشده است.

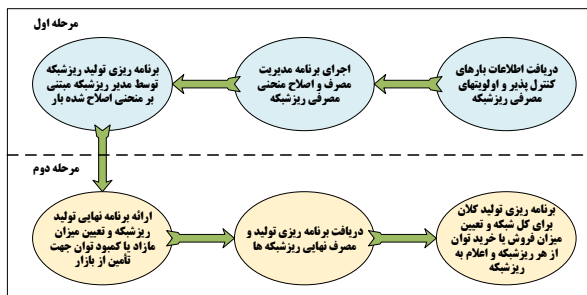
در برخی کارها برنامه‌های مدیریتی ارائه شده به شکلی است که این برنامه‌ها میزان کاهش بارهای مجاز برای کنترل را در روز بعد بررسی می‌کنند و محل مناقصه در بازار برق را به گونه‌ای معرفی می‌-

کنند که پیک بار را جابجا نمایند [۶]. یا مثلاً در [۷] یک روش کنترل مستقیم بار برای مدیریت مصرف آبگرمکن‌های خانگی و سیستم خنک‌کننده ارائه شده است، این روش با برنامه‌ریزی خطی اجرا شده و تنوع بار در آن محدود به دو نوع خاص از بارها است. یا در [۸] یک روش جدید برای اجرای مدیریت هماهنگ احتمالاتی انرژی بین شبکه توزیع و ریزشبکه‌های متصل شده بر مبنای نظریه بازی‌ها ارائه شده است. در این روش همچنین تنوع الگوی مصرفی بارها محدود است. همچنین در [۹] شیوه مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن قیود پخش بار با استفاده از یک الگوریتم ترکیبی پیشنهاد شده است هم چنین، برنامه پاسخ‌گویی بار باهدف هموار کردن منحنی بار و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت روش پیشنهادی بر روی ریزشبکه‌های چندگانه، با استفاده از نرم‌افزارهای GAMS و MATLAB شبیه‌سازی شده است. در این روش هم فقط سود خرده‌فروشان مدنظر بوده است. در [۱۰] از روش سیستم‌های چندعاملی برای مدیریت مصرف در شبکه هوشمند استفاده شده است، در این مقاله هدف کاهش پیک بار، مسطح کردن منحنی بار و کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم بوده است. از مشکلات روش سیستم‌های چندعاملی پیچیده بودن و زمان‌بر بودن آن است که اجرای آن در شبکه هوشمند را سخت می‌کند. همچنین بعضی مراجع مثل [۱۱] برای مدیریت مصرف روش نظریه بازی را پیشنهاد داده‌اند، در این روش هدف کاهش نرخ پیک بار به میانگین بار و هزینه انرژی در سیستم بوده است. از دیگر روش‌های کاربردی در این زمینه روش‌های هوش مصنوعی است که مثلاً در [۱۲] از روش الگوریتم ژنتیک برای مدیریت مصرف در سه ریزشبکه تجاری، مسکونی و صنعتی استفاده شده است، که البته در این مقاله فقط بحث مدیریت مصرف مطرح شده و مدیریت تولید نادیده گرفته شده است. در [۱۳] از روش ارگانیسم همزیست برای مدیریت مصرف استفاده شده اما در این روش بازمه مسئله مدیریت مصرف فقط دیده شده است و به اثر آن در تولید هیچ اشاره‌ای نشده است. در مرجع [۱۴] نیز مسئله مدیریت مصرف باهدف بهبود سطح رفاه اجتماعی و افزایش سوددهی شرکت‌های توزیع توسط روش برنامه‌ریزی مختلط آمیخته با عدد صحیح MILP^۲ حل شده است.

همچنین یکی دیگر معضلاتی که امروزه اهمیت برنامه‌های مدیریتی را زیاده‌تر می‌کند هزینه بالای تولید، انتقال و آلاینده‌های زیست‌محیطی است. از این رو، در [۱۵] مسئله مدیریت مصرف با استفاده از ترکیب روش فازی و ازدحام ذرات برای بهبود سوددهی و ضریب کارایی سیستم توزیع حل شده است. در این مرجع تنها سود تولیدکننده مدنظر بوده و تنوع بار هم در شبکه خیلی کم است.

در [۱۶] از روش منطق فازی برای مدیریت ریزشبکه‌ها و مدیریت مصرف در شبکه استفاده شده است در این مرجع هدف افزایش رضایت مشتری و کاهش هزینه‌های سالانه بهره‌برداری است. همچنین در [۱۷] از روش منطق فازی در ترکیب با الگوریتم ازدحام ذرات برای

نهایتاً در این مقاله استراتژی مدیریتی پیشنهادی روی شبکه‌ای شامل سه ریزشبهه‌ی: تجاری، مسکونی و صنعتی با بارهای متنوع توسط روش H-PSO-SCAC در دو مرحله مطابق شکل (۱) باهدف کاهش صورتحساب مشترکین و بهبود سطح رفاه اجتماعی از دید DSO اجرا شده است.



شکل (۱): استراتژی دومرحله‌ای مدیریتی

در ادامه‌ی مقاله در قسمت ۲ استراتژی مدیریتی تولید و تقاضا به همراه توابع و قیود آن‌ها شرح داده شده است، در قسمت ۳ به بیان شرح الگوریتم پرداخته شده، در قسمت ۴ به بررسی نتایج شبیه‌سازی پرداخته شده و در قسمت ۵ نیز نتیجه‌گیری مقاله آورده شده است.

۲- شرح استراتژی مدیریتی مصرف و تولید

۱-۲- استراتژی مدیریتی مصرف

برنامه‌های مدیریت مصرف، شامل دو استراتژی مدیریت بار و مدیریت انرژی هستند. در مدیریت بار هدف تغییر رفتار مصرف‌کنندگان است که در شبکه‌ی هوشمند با استفاده از زیرساخت-های هوشمند می‌توان انواع روش‌های کاهش پیک بار را اجرا نمود. در مدیریت انرژی هدف مصرف مناسب انرژی است، به صورتی که از حداقل مقدار انرژی بیشترین بازدهی گرفته شود. استراتژی مدیریت مصرفی که در این مقاله عنوان شده بر پایه‌ی مدیریت بار است. در اینجا روش جابه‌جایی بار باهدف کاهش پیک بار و هزینه‌های مصرف‌کننده، برای استفاده در شبکه‌ی هوشمند گسترش داده شده است. نحوه‌ی اجرای استراتژی مدیریتی به‌صورت طرح‌واره در شکل (۲) نشان داده شده است.

۱. ارسال درخواست اتصال بار به سرور رابط.
۲. ارسال تقاضای بار مربوط به کنترل‌کننده مرکزی و بررسی اولویت و زمان اتصال بار توسط کنترل‌کننده مرکزی.
۳. ارسال پاسخ و دستورات کنترلی از کنترل‌کننده مرکزی به سرور رابط.
۴. اعلام پاسخ کنترل‌کننده مرکزی به بار و اعمال دستور کنترلی لازم روی بار.

برنامه‌ریزی بهینه در ریزشبهه‌ها و کاهش هزینه بهره‌برداری استفاده شده است. مرجع [۱۸] از روش ترکیبی آموزش فازی و سیستم‌های چندعاملی برای مدیریت انرژی یک ریزشبهه در حالت جدا از شبکه استفاده کرده است. در این مقاله نتایج حاکی از آن است که روش پیشنهادی قادر به تأمین قابلیت اطمینان و همچنین امنیت سیستم تغذیه در حالت عملکرد جزیره‌ای است درحالی‌که تعادل تولید و مصرف برقرار است. همچنین در [۱۹] از روش نظریه بازی‌ها برای برنامه‌ریزی تولید و افزایش سطح رضایت مشترکین استفاده شده است روش نظریه بازی البته پیچیدگی‌ها خاص خود را دارد که اجرای آن در شبکه را مشکل می‌کند. روش‌های سلسله مراتبی نیز از دیگر روش‌ها برای انجام برنامه‌های مدیریت مصرف هستند در [۲۰] از یک روش سلسله مراتبی برای افزایش سطح رفاه اجتماعی از دید بهره‌بردار و مشترک استفاده شده است که در آن البته تنوع بار و دوره مصرف آن‌ها کم است. روش‌های سلسله مراتبی را همچنین می‌توان با روش‌هایی مثل نظریه بازی ترکیب نمود که در [۲۶] چنین روشی برای مدیریت مصرف در یک شبکه هوشمند استفاده شده است. در این مقاله بازی استکالبرگ برای اجرای برنامه مدیریتی انتخاب شده که سازوکار نسبتاً پیچیده‌ای دارد. از طرفی در [۲۷] یک روش دومرحله‌ای احتمالاتی برای برنامه‌ریزی تولید باهدف افزایش قابلیت اطمینان شبکه هوشمند به اجرا درآمده که بار خاصی در این شبکه مدنظر نبوده است. در [۲۸] هم یک برنامه مدیریت مصرف بارهای خانگی در حضور انواع منابع تولید پراکنده انجام شده است که در آن اثر منابع ذخیره‌کننده و خودروهای برقی در مدیریت مصرف شبکه لحاظ شده است. همچنین برخی مراجع مثل [۲۹] هم با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های هوش مصنوعی مثل ازدحام ذرات و جهش قورباغه سعی شده تا در شبکه توزیع هوشمند هزینه‌های تولید، بهره‌برداری و تلفات انرژی حداقل گردد. که البته در این مقاله بازهم صرفاً منافع سمت تولید در نظر گرفته شده است.

از مطالعه مراجع فوق می‌توان دریافت که کارهای انجام شده صرفاً برنامه‌های مدیریتی را روی یک گروه خاص و محدود از بارها انجام داده‌اند و همچنین اکثراً فقط اثر برنامه مدیریتی را روی سمت تولید یا تقاضا بررسی نمودند. لذا در این مقاله سعی شده تا جهت برطرف نمودن کاستی‌های موجود و توجه به جوانب نادیده گرفته شده کارهای زیر انجام شود:

- اجرای برنامه مدیریت مصرف و تولید با در نظر گرفتن سطوح مختلف و متنوعی از بارهای کنترل‌پذیر در شبکه توزیع به‌صورت یکپارچه
- پیاده‌سازی مسئله مدیریتی دو مرحله‌ای مدیریت مصرف و تولید با استفاده از الگوریتم H-PSO-SCAC
- برنامه‌ریزی تولید با در نظر گرفتن اثر برنامه پیشنهادی مصرف و بررسی اثر آن در تغییر سطح رفاه اجتماعی از دید بهره‌بردار سیستم توزیع DSO^۴ به صورت همزمان

$$Disconnect(t) = \sum_{q=t+1}^{t+m} \sum_{k=1}^D X_{ktq} \cdot P_{1k} + \sum_{l=1}^{j-1} \sum_{q=t+1}^{t+m} \sum_{k=1}^D X_{k(t-1)q} \cdot P_{(1+l)k} \quad (4)$$

نهایتاً تابع تناسب به‌گونه‌ای انتخاب‌شده که منحنی بار نهایی الگوریتم تا حد امکان نزدیک به منحنی بار هدف به دست آید که به‌صورت رابطه‌ی (۵) تعریف می‌شود.

Max:

$$F_{DSM} = \frac{1}{1 + \sum_{t=1}^{24} (P_{Load}(t) - Objective(t))^2} \quad (5)$$

F_{DSM} تابع هدف مدیریت مصرف است، توجه کنید که در این مقاله اولویت اتصال بارها در هر ناحیه برای حفظ بیشتر حریم خصوصی مشترک بیشتر در ساعاتی که مشترک متقاضی بار است در نظر گرفته‌شده است.

این مسئله توسط قیود زیر محدودشده است [۱۲]:

تعداد وسایل منتقل‌شده نمی‌تواند مقدار منفی به خود بگیرند که رابطه (۶) مبین آن است.

$$X_{kit} > 0 \quad \forall i, j, k \quad (6)$$

مطابق با رابطه (۷) تعداد وسایل منتقل‌شده از یک پله زمانی نمی‌تواند بیشتر از وسایل مجاز برای کنترل در آن پله زمانی باشند.

$$\sum_{t=1}^N X_{kit} \leq Ctrlable(i) \quad (7)$$

زمان‌های اتصال بارهای قابل کنترل فقط می‌تواند به تأخیر انداخته شوند که قید آن به شکل رابطه (۸) بیان می‌گردد:

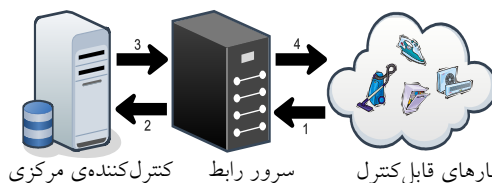
$$X_{kit} = 0 \quad \forall i > t \quad (8)$$

حداکثر زمان مجاز برای به تأخیر انداختن مصرف برای تمام وسایل به‌صورت رابطه (۹) است:

$$X_{kit} = 0 \quad \forall (i-t) > m \quad (9)$$

۲-۲- استراتژی مدیریتی تولید

در این مقاله برای مدل کردن بازار از الگوریتم تسویه بازار استفاده شده است. این الگوریتم روشی است که مدیر بازار در آن پیشنهادهاى برنده عرضه و تقاضا و نیز قیمت تسویه بازار را تعیین می‌کند. با این روش پیشنهادهاى مصرف‌کننده‌ها به‌صورت نزولی و عرضه به‌صورت افزایشی در یک منحنی قیمت-توان تنظیم‌شده و محل برخورد این منحنی‌ها تعیین‌کننده برنده‌ها و نیز قیمت تسویه بازار خواهد بود. هدف از اجرای بازار در این مقاله اجرای برنامه‌ی مشارکت نیروگاه‌ها با در نظر گرفتن قیود بهره‌برداری ریزشبکه‌ها و DG^3 ها باهدف بیشینه کردن رفاه اجتماعی (سوددهی تولیدکنندگان) است [۲۱]. در بازار اجراشده در این مقاله ریزشبکه‌ها و DG های شبکه اصلی به‌عنوان



شکل (۲): مدل سیستم مدیریت بار

برنامه‌ی مدیریت مصرف زمان اتصال هر بار قابل کنترل را در شبکه به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که پروفیل بار نهایی به پروفیل باری که توسط مدیر شبکه ارائه‌شده نزدیک گردد درحالی‌که اولویت مصرف برای وسایل مشترکین نیز رعایت شود.

۲-۱-۱- تابع هدف و قیود مسئله مدیریت مصرف

تابع هدف در این مسئله شامل کاهش اختلاف میان پروفیل بار هدف و پروفیل بار نهایی بعد از اجرای برنامه‌ی مدیریت مصرف ارائه‌شده است که به‌صورت رابطه (۱) قابل‌نوشتن است.

$$Minimize \sum_{t=1}^N (P_{Load}(t) - Objective(t))^2 \quad (1)$$

همچنین $P_{Load}(t)$ از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$P_{Load}(t) = Forecast(t) + Connect(t) - Disconnect(t) \quad (2)$$

بارهایی که در زمان t وصل شده‌اند ($Connect(t)$) خود از دو قسمت تشکیل‌شده‌اند، اول بارهای قابل‌کنترلی که از زمان مصرفشان از زمان‌های قبل از زمان t به زمان t منتقل شده‌اند، پس اولین ساعت از الگوی مصرفشان در بار زمان t مؤثر است و دوم بارهایی که زمان مصرفشان از زمان‌های قبل از زمان t به زمان t منتقل نشده است بلکه انتقال زمان مصرفشان به زمان‌های قبل از زمان t بوده، پس ساعات بعدی از الگوی مصرفشان در بار زمان t مؤثر است. رابطه (۳) بیان‌کننده‌ی $Connect(t)$ است.

$$Connect(t) = \sum_{i=1}^{t-1} \sum_{k=1}^D X_{kit} \cdot P_{1k} + \sum_{l=1}^{j-1} \sum_{i=1}^{t-1} \sum_{k=1}^D X_{ki(t-1)} \cdot P_{(1+l)k} \quad (3)$$

به‌طور مشابه $Disconnect(t)$ نیز شامل دو قسمت است: کاهش در بار به علت تأخیر در زمان‌های اتصال تجهیزاتی که در ابتدا فرض شده است شروع مصرف آن‌ها در پله زمانی t است و کاهش در بار علت تأخیر در زمان‌های اتصال تجهیزاتی که انتظار می‌رفته است شروع مصرف آن‌ها در پله‌های زمانی بعد از t است. $Disconnect(t)$ به شکل رابطه (۴) فرمول شده است.

۲-۲-۲- تابع هدف و قیود مدیریت تولید در شبکه اصلی و اجرای بازار

در شبکه اصلی تعدادی بار محلی وجود دارند که با منحنی قیمت-توان پله‌ای تقاضای خود را در بازار ارائه می‌دهند. ریزشکه‌ها مازاد تولید خود را تحت منحنی قیمت-توان سه پله‌ای به‌عنوان پیشنهاد به بازار برق ساعتی ارائه می‌دهند. بازار رقابتی برق بین شرکت‌کنندگان توسط اپراتور بازار باهدف بیشینه کردن رفاه اجتماعی اجرا می‌شود و پس از تسویه بازار مقادیر تخصیص داده شده به هر شرکت‌کننده را اعلام می‌کند. درنهایت هر ریزشکه، میزان بار ساعتی خود را اصلاح کرده و دوباره برنامه‌ریزی تولید داخلی خود را انجام می‌دهند. تابع هدف در اجرای بازار از دید DSO بیشینه کردن رفاه اجتماعی است. رفاه اجتماعی به‌صورت مجموع مقدار تفاضل درآمدها و هزینه‌ها در ۲۴ ساعت تعریف می‌شود (رابطه (۱۶)) [۲۱].

Max:

$$F_G = \sum_{t=1}^{24} \sum_{l=1}^5 \{Pload_{l,t} \cdot Pr_{Pload}\} - \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^3 \sum_{sg=1}^3 \{Pmg_{i,sg,t} \cdot Prmg_{i,sg,t} \cdot U_{i,t}\} - \sum_{t=1}^{24} \sum_{n=1}^3 \{Costdg_{n,t} + Prdg_{n,t} \cdot Pdg_{n,t}\} \times Udg_{n,t} \quad (16)$$

از طرفی قیود حاکم بر این سطح مدیریت به شرح زیر است. توان ارائه شده توسط ریزشکه‌ها در بازار دارای مقدار محدودی است که در هر پله از تابع قیمت-توان اعمال می‌شود و مطابق با رابطه (۱۷) بیان می‌شود:

$$0 \leq Pmg_{i,sg,t} \leq P \max mg_{i,sg,t} \cdot U_{i,t} \quad (17)$$

در هر بازه زمانی، مقدار تولید می‌تواند کوچک‌تر مساوی مجموع بارهای هر ریزشکه باشد مطابق با رابطه (۱۸):

$$\sum_{i=1}^n PG_i \leq \sum_{i=1}^k Pload_i + Ploss \quad (18)$$

چراکه هدف در اینجا سود بهره‌بردار است. سایر قیود برای DG های شبکه اصلی مشابه با قیود حاکم بر DG ها در ریزشکه‌ها در نظر گرفته شده است. لذا در مرحله اول برنامه‌ریزی تابع هدف (۱۹) و در مرحله دوم تابع هدف (۲۰) بهینه خواهد شد:

$$Max: w_1 \cdot F_{DSM} + w_2 \cdot F_{MG} \quad (19)$$

$$Max: F_G \quad (20)$$

که در رابطه (۱۹) w_1 و w_2 ضرایب وزنی مربوط به تابع هدف مدیریت مصرف و برنامه‌ریزی داخلی ریزشکه است. همچنین F_{MG} و F_{DSM} توابع هدف مربوط به مدیریت مصرف و مدیریت تولید داخلی ریزشکه‌ها هستند و F_G نیز تابع هدف بهبود

تولیدکننده و بارهای شبکه اصلی به‌عنوان سمت تقاضا با پیشنهادهای خود شرکت می‌کنند البته ریزشکه‌ها مازاد توان خود را بر اساس منحنی بار اصلاح شده پس از اجرای مدیریت مصرف برای شرکت در بازار پیشنهاد می‌دهند. لذا استراتژی مدیریت تولید دارای دو مرحله است مرحله اول برنامه‌ریزی داخلی ریزشکه و مرحله دوم برنامه‌ریزی کلی شبکه اصلی و اجرای بازار.

۲-۲-۱- تابع هدف و قیود مدیریت تولید در ریزشکه‌ها

تابع هدف در اجرای برنامه‌ریزی تولید از دید ریزشکه‌ها بیشینه کردن سوددهی تولیدکنندگان ریزشکه است. این تابع برای هر ریزشکه به‌صورت مجموع مقدار تفاضل درآمدها و هزینه‌ها در ۲۴ ساعت تعریف می‌شود که در رابطه (۱۰) آورده شده است [۲۱].

Max:

$$F_{MG} = \sum_{t=1}^{24} \{Pload_{g,t} \cdot Pr_{Pload}\} - \sum_{t=1}^{24} \sum_{n=1}^5 \{Costdg_{n,t} \cdot Udg_{n,t}\} \quad (10)$$

$Costdg_{n,t}$ هزینه راهاندازی و بهره‌برداری از DG n ام در ساعت t که بر طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌گردد.

$$Costdg_{n,t} = \{c_n \cdot Pdg_{n,t}^2 + b_n \cdot Pdg_{n,t} + a_n\} + \{STCdg_n \cdot [1 - Udg_{n,t-1}] \cdot Udg_{n,t}\} \quad (11)$$

هنگام راهاندازی یک واحد حرارتی نیز دو حالت ممکن زیر را مطابق رابطه (۱۲) خواهیم داشت:

$$STCdg_n = \begin{cases} S_{cn} & \text{if } T_{noff} \leq T_{ndown} + T_{ncold} \\ S_{hn} & \text{if } T_{noff} > T_{ndown} + T_{ncold} \end{cases} \quad (12)$$

در مسئله فوق قیود زیر باید رعایت شوند:

منابع تولید پراکنده از نظر کمترین و بیشترین مقدار تولید دارای محدودیت فنی هستند که مطابق رابطه (۱۳) بیان می‌شوند:

$$P \min dg_n \leq Pdg_{n,t} \leq P \max dg_n \quad (13)$$

در هر بازه زمانی، مقدار تولید باید مساوی مجموع بارهای هر ریزشکه باشد مطابق با رابطه (۱۴):

$$\sum_{i=1}^n Pdg_i = \sum_{i=1}^k Pload_i + Ploss \quad (14)$$

مجموع حداکثر توان واحدهای حاضر در مدار ($P \max dg_k$) بیشتر یا مساوی مجموع بار و ذخیره‌ی چرخان باشد. به عبارتی در هر ساعت باید قید رابطه (۱۵) برقرار شود:

$$\sum_{k=1}^i P \max dg_k \geq \sum_{i=1}^k Pload_i + \%10 \times \sum_{i=1}^k Pload_i \quad (15)$$

۳- شرح الگوریتم H-PSO-SCAC

یکی از جدیدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی که در سال ۲۰۱۸ معرفی شده است [۲۲] الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ضرایب سینوسی و کسینوسی H-PSO-SCAC است. هر ذره در الگوریتم ازدحام ذرات از سه بردار d بعدی تشکیل شده است در مرحله‌ی ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله‌ی قبلی ساخته می‌شوند. به‌صورت خلاصه روابطی که سرعت موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارت‌اند از روابط (۲۱) و (۲۲):

$$V_i^d = V_i^d + c_1 \times r_1 (pbest_i^d - X_i^d) + c_2 \times r_2 (gbest_i^d - X_i^d) \quad (21)$$

$$X_i^d = X_i^d + V_i^d \quad (22)$$

که رابطه (۲۱) به‌روزرسانی سرعت ذرات و رابطه (۲۲) به‌روزرسانی موقعیت ذرات را انجام می‌دهد.

r_1 و r_2 باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کامل‌تری روی فضا انجام پذیرد.

C_1 ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل C_2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع است. از رابطه (۲۱) می‌توان به این نتیجه رسید که، هر ذره به هنگام حرکت جهت حرکت قبلی خود بهترین موقعیتی را که در آن قرار داشته و بهترین موقعیتی را که توسط کل جمع تجربه شده است را در نظر می‌گیرد و این روند در یک چرخه تکراری تا رسیدن به جواب بهینه ادامه می‌یابد. بااین‌حال الگوریتم ازدحام ذرات دارای یک مشکل اساسی است و آن هم عدم همگرایی مناسب و به دام افتادن در بهینه محلی است. در این مقاله برای غلبه بر این مشکل از الگوریتم بهینه‌سازی جدید ازدحام ذرات سینوسی و کسینوسی (H-PSO-SCAC) استفاده شده است. در الگوریتم H-PSO-SCAC برای بهبود در فرآیند جستجو تغییراتی به شرح ذیل در الگوریتم انجام شده است. روابط (۲۳) و (۲۴) معرف ضرایب تغییر یافته C_1 و C_2 هستند.

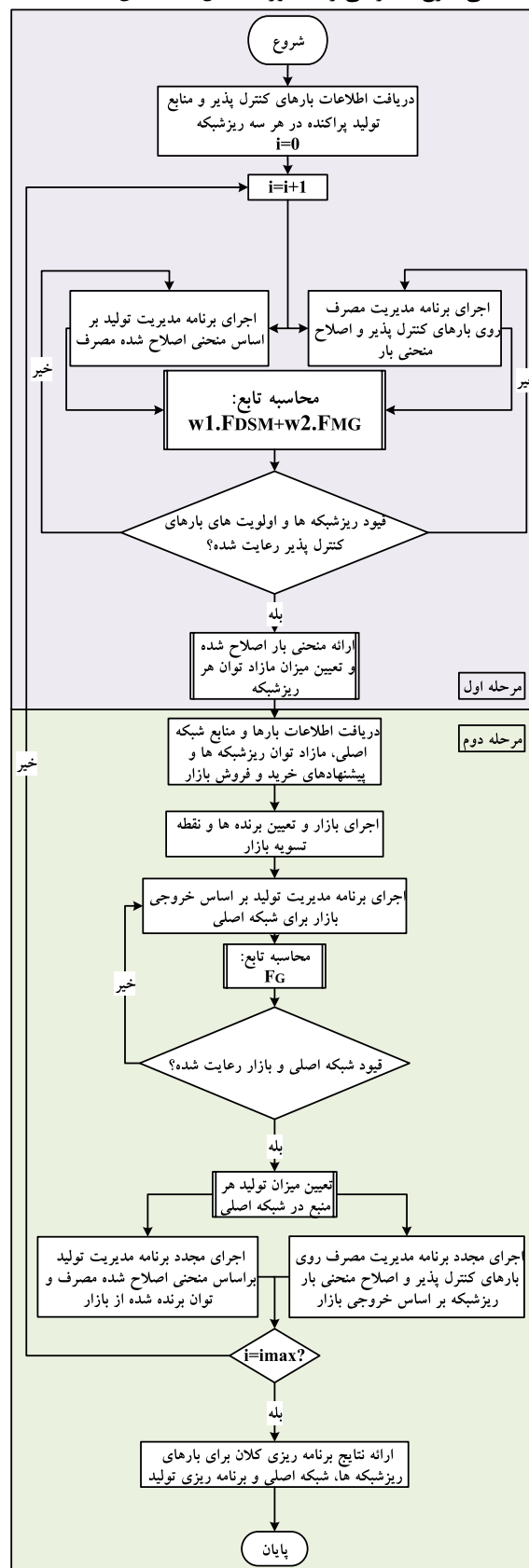
$$C_1 = \xi \times \sin\left(\left(1 - \frac{M_j}{M_{\max}}\right) \times \frac{\pi}{2}\right) + \delta \quad (23)$$

$$C_2 = \xi \times \cos\left(\left(1 - \frac{M_j}{M_{\max}}\right) \times \frac{\pi}{2}\right) + \delta \quad (24)$$

ضرایب C_1 و C_2 در پیدا کردن راه‌حل بهینه با سرعت و دقت زیاد خیلی مؤثر هستند. ξ ضرایب ثابت تجربی هستند که به ترتیب ۰.۵ و ۲ در نظر گرفته شده‌اند.

همچنین برای بهبود الگوریتم در مراحل پیدا کردن مکان بهینه محلی، جستجوی فضای مسئله و یافتن مکان بهینه کلی تغییراتی روی متغیرها به‌صورت روابط (۲۵) و (۲۶) داده می‌شود:

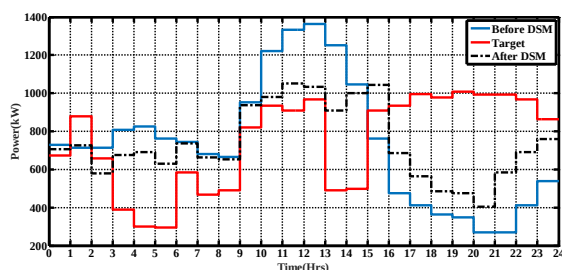
سطح رفاه اجتماعی از دید بهره‌بردار شبکه است. نهایتاً می‌توان روند نمای کلی طرح مدیریتی را به‌صورت شکل (۳) نشان داد.



شکل (۳): روند نمای حل مسئله

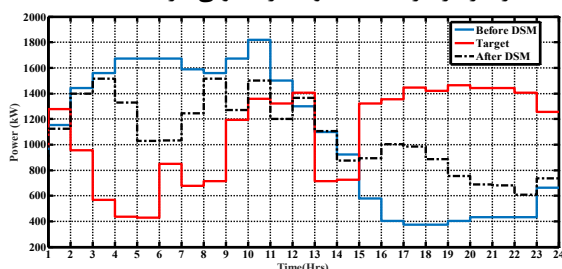
۲ ۷

با اجرای برنامه مدیریتی پیشنهادی توسط الگوریتم H-PSO-SCAC مشاهده می‌شود که پروفیل بار نهایی تا حد زیادی به پروفیل بار هدف که توسط مدیر شبکه ارائه داده شده بود نزدیک شده است و همچنین روش پیشنهادی می‌تواند تعداد زیادی از بارهای قابل کنترل را از انواع مختلف پوشش دهد. بعد از اجرای این روش برای ناحیه مسکونی مشاهده می‌شود که صورتحساب مشترکین از مبلغ روزانه ۲۳۰۲/۹۰ دلار به مبلغ ۱۹۱۵/۱ دلار کاهش می‌یابد؛ یعنی حدود ۳۸۷/۸ دلار کاهش هزینه روزانه که این معادل ۱۶/۸ درصد کاهش هزینه در ناحیه مسکونی است. نمودار مربوط به پروفیل بار برای این ناحیه در شکل (۵) آورده شده است.



شکل (۵): پروفیل بار برای ناحیه مسکونی

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود بعد از انجام برنامه مدیریت مصرف پیک بار در ریزشبه مسکونی به شدت کاهش یافته و منحنی بار مسطح‌تر شده است و تا حد زیادی به منحنی بار هدف نزدیک شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای ناحیه تجاری در شکل (۶) نشان داده‌شده و در نتیجه صورتحساب تجهیزات ناحیه تجاری برای یک روز از ۳۶۲۶/۶۰ دلار به ۲۹۳۰/۷۰ دلار تغییر یافته که این ۱۹/۲ درصد کاهش در هزینه‌های مشترک را نشان می‌دهد یعنی مشترکین علاوه بر این که نسبت به حالت قبل مصرف متوسط بیشتری داشتند حدود ۶۹۵/۹ دلار نیز در هزینه‌های خود صرفه‌جویی کرده‌اند.



شکل (۶): پروفیل بار برای ناحیه تجاری

همانطور که نتایج نشان می‌دهند در ریزشبه تجاری میزان کاهش هزینه روزانه مشترکین کاهش بیشتری نسبت به ریزشبه مسکونی دارد. به نظر می‌رسد هرچه دوره مصرف بارهای شبکه بیشتر است هزینه قبض مشترکین کاهش بیشتری دارد. همچنین نتایج برای ناحیه صنعتی در شکل (۷) نمایش داده‌شده است. هزینه تجهیزات ناحیه صنعتی بدون استراتژی مدیریت سمت تقاضا ۵۷۱۲ دلار برای یک روز است در حالی که با استفاده از استراتژی مدیریت سمت تقاضا ۴۵۴۲/۲۲

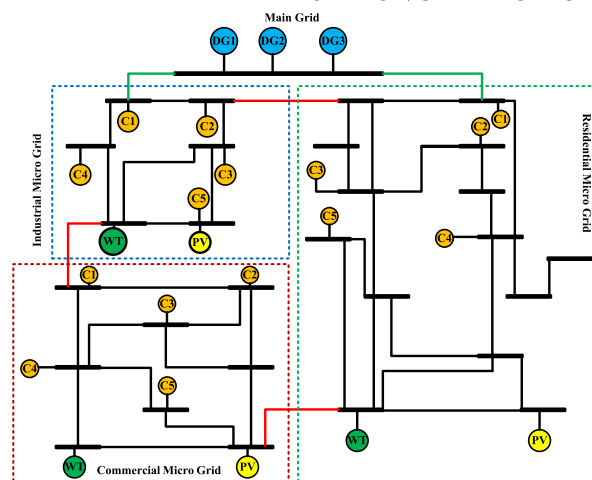
$$X_i^d = X_i^d \times w_{ij} + V_i^d \times w'_{ij} + \rho \times gbest^d \times w_{ij} \quad (25)$$

$$w_{ij} = \frac{\exp(f(j)/u)}{1 + \exp(-f(j)/u)^{iter}} \quad (26)$$

$$w'_{ij} = 1 - w_{ij}$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

برای نشان دادن اثر روش جابجایی بار، الگوریتم شرح داده‌شده روی شبکه‌ای هوشمندی دارای سه سطح از مشترکین، یعنی: مشترکین مسکونی، تجاری و صنعتی مطابق مرجع [۱۳] پیاده شده است و هر ریزشبه دارای یک واحد تولید خورشیدی و یک واحد تولید بادی و ۵ واحد تولید حرارتی است؛ که اطلاعات واحدهای حرارتی و بادی و خورشیدی به ترتیب مطابق با مراجع [۲۳-۲۵] هستند. سپس برای مشاهده اثر برنامه‌ریزی مدیریت مصرف روی بازارهای رقابتی فرض شده است که ریزشبه‌های فوق خود در شبکه-ای شامل پنج بار کشسان و سه منبع تولید پراکنده قرار دارند [۲۳]؛ که در شکل (۴) دیاگرام آن نمایش داده‌شده است.



شکل (۴): دیاگرام ریزشبه چندگانه پیشنهادی برای اجرای برنامه مدیریتی [۱۲]

شبیه‌سازی این مقاله توسط نرم‌افزار متلب ۲۰۱۴ و یک دستگاه رایانه Core i7 با حافظه محاسباتی ۸ گیگابایت انجام شده است. به این صورت که ابتدا کدهای روش شیفت بار در محیط اسکریپت به صورت تابع نوشته شده و سپس توسط تحلیل گر الگوریتم H-PSO-SCAC که برنامه آن نیز توسط خود نویسندگان نوشته شده به اجرا درآمده است. کلیه تحلیل‌گرها در این مقاله توسط خود نویسندگان برنامه نویسی شده و از هیچ ماژول آماده‌ای استفاده نشده است. در جدول (۱) نیز پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات با ضرایب سینوسی و کسینوسی آورده شده است.

جدول (۲): پارامترهای الگوریتم H-PSO-SCAC

تعداد جمعیت	۱۰۰
تعداد تکرار	۶۰۰
δ	۰.۵

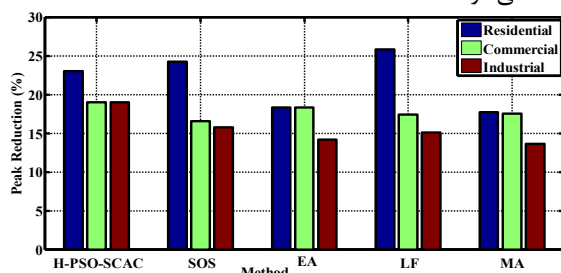
همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است با افزایش تعداد بارهای قابل کنترل در شبکه الگوریتم قادر است تا میزان پیک بحرانی بار را خیلی بیشتر و بهتر کاهش دهد.

جدول (۴): مقایسه درصد کاهش هزینه

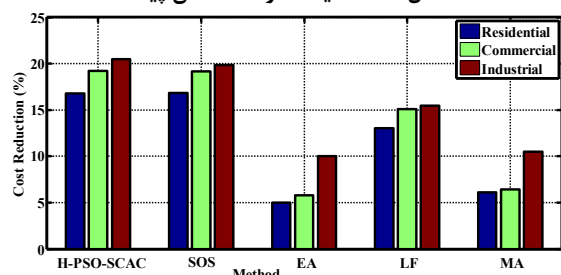
کاهش هزینه %	کاهش هزینه %	کاهش هزینه %	کاهش هزینه %	کاهش هزینه %
[مقاله]	SOS [۱۳]	LF [۱۱]	MA [۱۰]	EA [۱۲]
۱۶/۸	۱۶/۸۶	۱۳/۰۳	۶/۱	۵/۰
۱۹/۲	۱۹/۱۷	۱۵/۱۱	۶/۴	۵/۸
۲۰/۵	۱۹/۸۴	۱۵/۴۴	۱۰/۵	۱۰/۰
	صنعتی	تجاری	مسکونی	

اما همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، افزایش سطح و دوره مصرف اثر مستقیم روی کاهش هزینه قبض مشترکین در سه ناحیه دارد. به صورتی که همانطور که مشهود چون دوره مصرف در ریزشبکه صنعتی از دو شبکه دیگر به ترتیب مسکونی و بعد تجاری بیشتر است لذا بیشترین صرفه جویی در هزینه برق مصرفی را در ریزشبکه صنعتی شاهد هستیم.

از طرفی از مقایسه نتایج در جدول‌های (۳) و (۴) می‌توان دریافت که الگوریتم پیشنهادی در خیلی از نواحی توانسته نسبت به سایر روش‌ها در کاهش هزینه صورتحساب مشترک و کاهش پیک مصرف به‌خوبی عمل نماید؛ که در شکل‌های (۸) و (۹) این مسئله بهتر نمایش داده می‌شود.



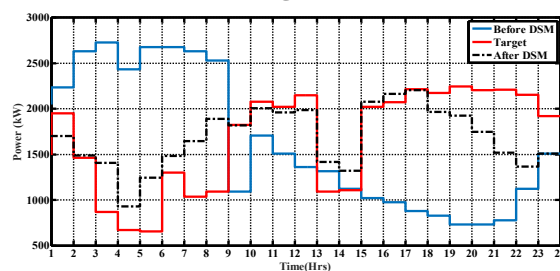
شکل (۸): مقایسه درصد کاهش پیک



شکل (۹): مقایسه درصد کاهش هزینه

همچنین با توجه به شکل (۱۰) ضریب بار بعد از انجام برنامه مدیریتی افزایش می‌یابد که این خود نشان‌دهنده افزایش بهره‌وری شبکه است، به عبارت ساده‌تر متوسط مصرف انرژی افزایش یافته اما پیک زیاد نشده است.

دلار است که منجر به کاهش ۲۰/۵ درصدی هزینه‌های مشترکین و حدود ۱۱۶۹/۷۸ دلار صرفه‌جویی برای این ناحیه شده است.



شکل (۷): پروفیل بار برای ناحیه صنعتی

باز هم با توجه به نتایج به دست آمده در شکل (۷) برای ریزشبکه صنعتی در مقایسه با دو ریزشبکه دیگر، میزان کاهش هزینه قبض مشترکین ناحیه صنعتی از همه بیشتر بوده است در واقع با افزایش سطح بار و دوره مصرف مشترکین، میزان اثربخشی اجرای برنامه DSM در شبکه افزایش می‌یابد و سود بیشتری را به مشترکین می‌رساند. همچنین نتایج شبیه‌سازی در جدول (۲) نشان می‌دهند که مدیریت سمت تقاضا هم برای مشترک و هم برای شرکت‌های تولیدی مناسب و به‌صرفه است. در مورد آزمایش‌شده با توجه به جدول (۲) هر مشترک ۱۶ تا ۲۰ درصد صرفه‌جویی در هزینه‌های خود انجام می‌دهد و شرکت‌های تولیدکننده صرفه‌جویی قابل توجهی با برنامه‌ریزی بهینه انجام خواهند داد که این میزان برای نواحی مسکونی از دیگر نواحی بیشتر است.

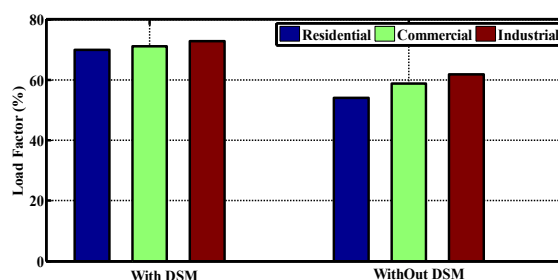
جدول (۲): نتایج اجرای برنامه‌ی مدیریت مصرف

کاهش هزینه تولید (%)	کاهش پیک (%)	کاهش هزینه مصرف (%)	صورتحساب با DSM بدون (\$)	صورتحساب بدون (\$)	ناحیه
۱۶/۳	۲۳	۱۶/۸	۱۹۱۵	۲۳۰۲	مسکونی
۱۵/۲۵	۱۹	۱۹/۲	۲۹۳۰	۳۶۲۶	تجاری
۱/۵۸	۱۹	۲۰/۵	۴۵۴۲	۵۷۱۲	صنعتی

در جدول (۳) و (۴) نیز نتایج مشترک این مقاله با سایر مراجع مقایسه شده که نشان‌دهنده قدرتمندتر بودن الگوریتم H-PSO-SCAC برای حل مسئله‌ی مدیریت مصرف، کاهش پیک بار و صورتحساب مشترکین نسبت به سایر الگوریتم‌های پیشنهادی مانند الگوریتم‌های فراابتکاری EA^۶، سیستم‌های چندعاملی MA^۷، تابع لگاریتمی LF^۸ و الگوریتم جستجوی ارگانیسم همزیست SOS^۹ است.

جدول (۳): مقایسه درصد کاهش پیک

کاهش پیک %	کاهش پیک %	کاهش پیک %	کاهش پیک %	کاهش پیک %
[مقاله]	SOS [۱۳]	LF [۱۱]	MA [۱۰]	EA [۱۲]
۲۳/۲	۲۴/۲۲	۲۵/۸۵	۱۷/۷	۱۸/۳
۱۹/۶	۱۶/۸۵	۱۷/۴۱	۱۷/۵۵	۱۸/۳
۱۹	۱۵/۷۹	۱۵/۱۳	۱۳/۶۱	۱۴/۲
	صنعتی	تجاری	مسکونی	



شکل (۱۰): تغییر ضریب بار برای سه ناحیه

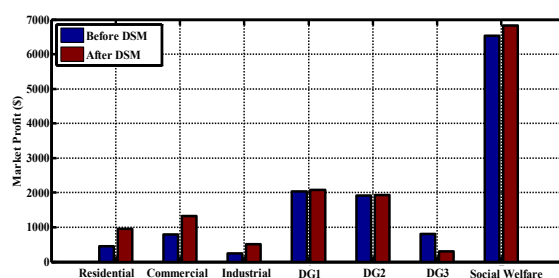
مطابق جدول (۲) نتایج نشان می‌دهند که بعد از اجرای برنامه‌ی مدیریتی در سمت مصرف ریزشکه مسکونی قادر خواهد بود تا حدود ۱۶/۳۷ درصد در هزینه‌های تولید صرفه‌جویی کند. همچنین ریزشکه تجاری و صنعتی نیز به ترتیب ۱۵/۲۵ و ۱/۵۸ درصد از هزینه‌های تولید حرارتی خود را کاهش می‌دهند. درصد کمتر کاهش هزینه در ریزشکه صنعتی به دلیل بیشتر بودن سطح مصرف، مصرف‌کنندگان این ناحیه و نوع الگوی مصرفشان است. در واقع هرچه سطح مصرف و دوره مصرف برای مشترک طولانی‌تر باشد سودآوری برنامه‌های مدیریت مصرف نیز افزایش می‌یابد.

در ادامه با فرض اینکه تمامی خریدوفروش توان پس از تسویه بازار به‌صورت حراج باقیمت واحد تسویه بازار انجام‌گرفته باشد، در جدول (۵) خلاصه‌ای از میزان سود عوامل شرکت‌کننده در بازار به‌صورت عددی و برحسب دلار در دو سناریوی مختلف آورده شده است.

جدول (۵): سود تولیدکنندگان قبل از اجرای مدیریت مصرف (\$)

بعد از مدیریت مصرف	قبل از مدیریت مصرف	
۹۵۷۰۶.۲	۴۵۶۷۵.۵۷	ریزشکه مسکونی
۱۳۲۶۵۱.۲	۷۸۹۴۱.۲۴	ریزشکه تجاری
۵۰۶۸۳	۲۴۳۲۰.۴۶	ریزشکه صنعتی
۲۰۷۷۹۱.۸	۲۰۳۳۰۰	DG1
۱۹۳۶۰۷.۳	۱۹۲۲۶۵	DG2
۳۰۵۵۷	۸۰۵۵۹.۹۹	DG3
۶۸۳۲۹۱.۷	۶۵۲۷۶۷.۱	رفاه اجتماعی

آنچه مشهود است، زمانی که پیک بار سیستم کاهش می‌یابد هزینه بهره‌برداری ژنراتورها نیز به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد و به دنبال آن سوددهی و سطح شاخص رفاه اجتماعی از دید بهره‌بردار زیاده‌تر می‌شود. همچنین در شکل (۱۱) تغییرات سود ریزشکه‌ها و منابع تولید پراکنده قبل و بعد از مدیریت مصرف نمایش داده شده است.



شکل (۱۱): تغییرات سود ریزشکه‌ها و منابع در بازار

که نشان‌دهنده اثرگذار بودن برنامه‌ریزی مدیریت سمت تقاضا در رقابت بین شرکت‌های تولید توان GENCO^۱ ها است.

از طرفی چون DGها با استفاده از مشتق تابع درجه دوم مربوط به هزینه بهره‌برداری خود اقدام به قیمت دهی در بازار می‌کنند، لذا DGهایی می‌توانند در رقابت با ریزشکه‌های برنده شوند و سود بیشتری کسب کنند که قیمت حاشیه‌ای بهتری و پایین‌تری ارائه دهند لذا در این میان DGهایی مثل DG3 که نتواند قیمت مناسبی در بازار ارائه دهد بعد از مدیریت مصرف معمولاً سود زیادی کسب نمی‌کنند.

با توجه به نتایج جدول (۵) و همچنین با توجه به شکل (۱۱) می‌توان دریافت که اجرای بازار در شبکه موردنظر در حالتی که مدیریت مصرف پیشنهادی در شبکه انجام‌شده است باعث افزایش میزان سوددهی تولیدکنندگان ریزشکه‌ها می‌شود اما برای شبکه‌هایی با بارهای بزرگ مانند ریزشکه صنعتی افزایش سودی به دنبال ندارد چراکه حجم بارهای داخلی آن قدر است که تولیدکننده نمی‌تواند در رقابت انجام‌شده نقشی ایفا کند همچنین اجرای برنامه‌ی دومرحله‌ای شامل مدیریت مصرف باعث افزایش سطح رفاه اجتماعی در شبکه از دید بهره‌بردار سیستم شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک برنامه‌ی مدیریتی دومرحله‌ای برای سمت تولید و مصرف به شکل همزمان شرح داده شد. برنامه‌ی به‌کاربرده شده یک روش قدرتمند بر پایه جابجایی بار است که به شکل ریاضی به‌عنوان مسئله‌ی بهینه‌سازی فرمول نویسی و برای پیاده‌سازی آن از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ضرایب سینوسی و کسینوسی H-PSO-SCAC استفاده شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که الگوریتم مشروح توانایی دارد تا تعداد زیادی از بارهای قابل کنترل از انواع مختلف را در برنامه شرکت دهد و به شکل قابل توجهی به‌طور همزمان هم پیک بار شبکه هوشمند و هم هزینه‌های بهره‌برداری را کاهش دهد.

درواقع برنامه مدیریتی دومرحله‌ای پیشنهادی در این مقاله می‌تواند به شکل همزمان نیازهای سمت مصرف و تولید را در یک قاب به‌صورت جامع جای‌داده و باعث افزایش سود و رضایت‌مندی در هر دو سمت گردد که درواقع باعث تشویق تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به شرکت در برنامه‌های مدیریتی این چنینی می‌شود.

البته این مسئله را می‌توان در ابعاد دیگری نیز ادامه داد، مثلاً برخی عدم قطعیت‌های مربوط به بارها و منابع تولید پراکنده را که در این مقاله در نظر گرفته نشده است به مسئله اضافه نمود و یا اینکه بحث ورود خودروهای برقی و اثر آن‌ها در برنامه مدیریت مصرف به‌عنوان بار و تولیدکننده نیز یکی از دیگر مباحثی است که در ادامه این کار مقاله می‌توانند موردبحث قرار گیرند.

مراجع

- operation", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 9, No. 1, July 2017.
- [17] P.Li, D.Xu, Z.Zhou, WJ.Lee, B.Zhao, "Stochastic optimal operation of microgrid based on chaotic binary particle swarm optimization", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 1, May 2015.
- [18] P.Kofinas, AI.Dounis, GA.Vouros, "Fuzzy Q-Learning for multi-agent decentralized energy management in microgrids", Applied energy, Vol. 219, No. 1, January 2018.
- [19] K.Wang, H.Li, S.Maharjan, Y.Zhang, S.Guo, "Green energy scheduling for demand side management in the smart grid", IEEE Transactions on Green Communications and Networking, Vol. 2, No. 2, January 2018.
- [20] D.Li, WY.Chui, H.Sun, HV.Poor, "Multiobjective optimization for demand side management program in smart grid", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 14, No. 4, December 2017.
- [21] M.Shahidehpour, H.Yamin, Z.Li, "Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management", John Wiley & Sons, May 2003.
- [22] K.Chen, F.Zhou, L.Yin, S.Wang, Y.Wang and F.Wan, "A hybrid particle swarm optimizer with sine cosine acceleration coefficients", Information Sciences, Vol.422, January 2018.
- [23] T.Logenthiran, D.Srinivasan, AM.Khambadkone, "Multi-agent system for energy resource scheduling of integrated microgrids in a distributed system", Electric Power Systems Research, Vol. 81, No. 1, January 2011.
- [24] R.Caldon, AR.Patria, R.Turri, "Optimisation algorithm for a virtual power plant operation", In39th International Universities Power Engineering Conference, August 2005.
- [25] IS.Bae, JO.Kim, "Phasor discrete particle swarm optimization algorithm to configure micro-grids", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 7, No. 1, April 2012.
- [26] H.Alsalloum, L. Merghem-Boulahia & R.Rahim, "Hierarchical system model for the energy management in the smart grid: A game theoretic approach", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 21, March 2020.
- [27] M.Rahmani, S.H.Hosseini & M.Abedi, "Stochastic two-stage reliability-based Security Constrained Unit Commitment in smart grid environment", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 22, June 2020.
- [۲۸] نوجوان صیاد. "مدیریت مصرف انرژی الکتریکی و حرارتی در مجتمع‌های مسکونی". نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ۸، شماره ۳، ۱۳۹۸.
- [۲۹] لطفی حسین، قاضی رضا، نقیعی سیستانی محمد باقر. "استراتژی بهینه مدیریت انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند با در نظر گرفتن اثر منابع تولید پراکنده و واحدهای ذخیره انرژی". نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ۸، شماره ۳، ۱۳۹۸.
- [1] Q. Li and M. Zhou, "The future-oriented grid-smart grid", Journal of Computers, Vol. 6, No. 1, January 2011.
- [2] P. Agrawal, "Overview of DOE microgrid activities", Symposium on Microgrid, Montreal, Vol. 23, January 2006.
- [3] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, No. 3, August 2011.
- [4] K.H. Ng and G. B. Sheblé, "Direct Load Control-A Profit-Based Load Management Using Linear Programming," IEEE Transaction on Power System, vol. 13 May 1998.
- [5] F. C. Schweppe and B. Daryanian, "Algorithms for a spot price responding residential load controller", IEEE Transaction on Power System, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [6] M. Shahidehpour, H. Yamin, and Z. Li, "Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management", Wiley-IEEE Press, New York 2002.
- [7] Z.N.Popovic and D.S.Popovic, "Direct load control as a market-based program in deregulated power industries", In Proc IEEE Power Tech Conf, Bologna, Vol. 3, June 2003.
- [۸] فردینی امیر، احمدیان علی، علی اکبر گلکار مسعود.، "مدیریت بهینه انرژی یک شبکه توزیع متصل شده به ریزشبکه‌های مختلف بر مبنای نظریه بازی‌ها"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ۷، شماره ۲، ۱۳۹۷.
- [۹] تقی زادگان کلانتری نوید، حمزه اقدم فرید، "مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های چندگانه با در نظر گرفتن قیود پخش بار و پاسخ‌گویی بار"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال ۶، شماره ۲، ۱۳۹۶.
- [10] T.Logenthiran, D.Srinivasan, TZ.Shun, "Multi-agent system for demand side management in smart grid", In IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2011.
- [11] B.Saravanan, "DSM in an area consisting of residential, commercial and industrial load in smart grid", Frontiers in Energy, Vol. 9, No. 2, June 2015.
- [12] T.Logenthiran, D.Srinivasan, TZ.Shun, "Demand side management in smart grid using heuristic optimization", IEEE transactions on smart grid, Vol. 2, No. 3, June 2012.
- [13] V.Mukherjee, "Day-ahead demand side management using symbiotic organisms search algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 14, May 2018.
- [14] Z.Bao, Q.Zhou, Z.Yang, Q.Yang, L.Xu, T.Wu, "A multi time-scale and multi energy-type coordinated microgrid scheduling solution—Part I: Model and methodology", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 30, No. 5, November 2014.
- [15] M.Yu, W.Huang, N.Tai, X.Zheng, Z.Ma, Y.Wang, "Advanced microgrid and its multi-objective regulation strategy for shore supply", The Journal of Engineering, Vol. 2017, No. 13, 2017.
- [16] J.Chen, W.Zhang, J.Li, W.Zhang, Y.Liu, B.Zhao, Y.Zhang, "Optimal sizing for grid-tied microgrids with consideration of joint optimization of planning and

زیر نویس ها

-
- ¹ Hybrid Particle Swarm Optimization Sine Cosine Acceleration Coefficients
 - ² Demand Side Management
 - ³ Mixed Integer Linear Programming
 - ⁴ Distribution System Operator
 - ⁵ Distribution Generation
 - ⁶ Evolutionary Algorithm
 - ⁷ Multi Agent
 - ⁸ Logarithmic Function
 - ⁹ Symbiotic Organisms Search
 - ¹⁰ Generation Company