

کاهش شدت انرژی در بیمارستان پس از پیاده‌سازی سیستم مدیریت انرژی با در نظر گرفتن ترجیحات فازی مصرف‌کننده

حامد شکوری گنجوی^۱، عالیه کاظمی^{۲*}

۱- دانشیار، گروه مهندسی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع و سیستم‌ها، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران

پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۸

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۴

چکیده

مراکز خدمات عمومی ارائه می‌کنند، مانند بیمارستان‌های دولتی، از جمله مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی الکتریکی هستند که لازم است مصرف انرژی آن‌ها مدیریت شود. در این پژوهش با در نظر گرفتن ترجیحات مصرف‌کننده و تعرفه قیمت انرژی الکتریکی، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی برق بیمارستان‌ها ارائه شده است. در یک مطالعه موردی، فهرستی از دستگاه‌های مورد استفاده توسط یک مصرف‌کننده نمونه دریافت شده و با تعیین مشخصات دستگاه‌ها و ترجیحات کاربران آن‌ها، مدل برنامه‌ریزی و زمان‌بندی برای آن‌ها اجرا شده است. سه سناریوی کمینه‌سازی اوج انرژی مصرفی (مدیریت اضافه‌بار)، کمینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی و تلفیق سناریوهای اول و دوم، به عنوان اهداف پیاده‌سازی سیستم مدیریت انرژی، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند. نهایتاً شاخص شدت انرژی، قبل و پس از بهینه‌سازی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان داد میزان کاهش شدت انرژی در سناریوی تلفیقی که هر دو هدف را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد، بیشتر است.

کلیدواژه‌ها: مدیریت مصرف انرژی؛ بیمارستان؛ ساختمان‌های هوشمند؛ بهینه‌سازی؛ برنامه‌ریزی آرمانی فازی.

۱- مقدمه

تأمین امنیت عرضه انرژی در دنیا از مسائل راهبردی پیش روی تمامی دولت‌هاست. در کنار محور مدیریت سمت عرضه انرژی، بخشی که کمتر به آن توجه شده است، بخش مدیریت سمت تقاضای انرژی است [۱]. مدیریت صحیح سمت تقاضا منجر به مصرف کمتر انرژی و کاهش شدت مصرف انرژی^۱ می‌شود. شدت مصرف انرژی شاخصی جهانی است که انرژی موردنیاز برای تولید مقدار معینی از کالاها و خدمات را در هر کشوری محاسبه می‌کند و برحسب عرضه انرژی اولیه یا مصرف نهایی انرژی محاسبه می‌شود. این شاخص، معمولاً، در سطح کلان مورد استفاده قرار گرفته و درجه بهینه بودن استفاده از انرژی در یک کشور را نشان می‌دهد. آمارهای رسمی نشان می‌دهد که شدت مصرف انرژی در ایران نسبت به متوسط جهانی پنج برابر بیشتر است. تداوم رشد مصرف انرژی با شرایط کنونی می‌تواند زیان‌بار باشد [۲]. مصرف انرژی بخش خانگی، تجاری و عمومی که بیمارستان‌ها نیز جزء این گروه هستند، در سال ۱۳۹۳، معادل ۴۴۶/۱ میلیون بشکه نفت خام، یعنی معادل ۳۸/۴٪ از کل مصرف نهایی کشور بوده است و این میزان، گروه ذکرشده را در صدر مصرف‌کننده‌های انرژی در کشور قرار داده است.

کشورهای پیشرفته صنعتی، طی دهه‌های اخیر، با پیش‌بینی دشواری‌ها و محدودیت‌های کنونی، اقدامات حساب‌شده‌ای برای صرفه‌جویی در میزان مصرف و بهینه‌کردن آن انجام داده‌اند و شدت مصرف انرژی در این کشورها کاهش یافته است. با توجه به بالا بودن شدت انرژی در ایران و عدم مدیریت صحیح انرژی در بیمارستان‌ها، ارائه راه‌کاری برای بهینه‌سازی انرژی در بیمارستان‌ها برای کاهش هرچه بیشتر مصرف انرژی که خود باعث کاهش هزینه و هدررفت منابع ملی است، امری مهم به‌شمار می‌رود.

پژوهش حاضر در راستای مدیریت صحیح انرژی، مدلی ریاضی را برای مدیریت مصرف برق در بیمارستان‌ها ارائه داده است. در این پژوهش بر تعرفه‌های زمان استفاده به‌عنوان مشوق‌های مدیریت طرف تقاضا^۲ تمرکز شده است. با وجود چنین تعرفه‌هایی، مصرف‌کنندگان طی ساعت‌های مختلف، مبالغ متفاوتی را برای انرژی

1. Energy Intensity
2. Demand Side Management

الکتریکی پرداخت می‌کنند و همین امر مصرف‌کننده را جهت کاهش مصرف برق رهنمود می‌سازد. در ادامه، پس از بررسی پیشینه پژوهش، مدل ریاضی پیشنهادی ارائه شده است. سپس این مدل برای بیمارستانی در شهر تهران اجرا و نتایج آن ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- پیشینه پژوهش

در زمینه بهره‌وری انرژی، پاسخ به تقاضا یک برنامه اساسی در سطح توزیع شناخته می‌شود. مصرف‌کنندگان که به‌طور سنتی به پرداخت نرخ ثابت برای انرژی الکتریکی عادت کرده‌اند، می‌توانند مصرف انرژی الکتریکی خود را با توجه به تعرفه‌های زمان استفاده^۱، به‌طور عمده، مدیریت کنند [۳؛ ۴]. در سال ۲۰۰۶، پیرکو مدیریتی از مصرف انرژی بر اساس تعرفه قیمت انرژی الکتریکی متغیر با زمان را ارائه داد که در کاهش اوج توان مصرفی تأثیر داشت [۵] اما با این وجود، توازن برقرار کردن در بین بارهای ساختمان فقط در صورتی امکان‌پذیر بود که مصرف‌کنندگان هم بتوانند و هم مشتاق باشند تا از اطلاعات تعرفه‌ها بهره‌جویند. وو و همکاران از الگوریتم شبکه‌های عصبی برای تغییر زمان بار در یک کارخانه پتروشیمی [۶] و نه‌ریر و همکاران از منطق فازی برای تغییر زمان بار در حیطة یک سیلندر آب گرم استفاده کردند [۷]. بیشتر روش‌های استفاده‌شده رویکرد بهینه‌سازی داشتند. اولین ملاحظات مربوط به چگونگی رفتار سیستم مدیریت مصرف انرژی در محدوده خانه‌های مسکونی در اوایل دهه ۱۹۹۰ مطرح شد [۸]. در سال ۲۰۰۹، تومپروس و همکاران نیز یک طبقه‌بندی از بارهای خانگی ارائه داده و یک معماری شبکه با امکان پیاده‌سازی عمومی از برنامه‌های کاربردی صرفه‌جویی انرژی برای محیط خانه را توصیف کردند [۹]. همچنین ژو و همکاران، در سال ۲۰۱۲، روش مدیریت طرف تقاضا با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح را پیشنهاد دادند [۱۰]. مکانیزم پیشنهادی توسط آن‌ها اوج ساعتی مصرف را مینیمم و به‌طور هم‌زمان نیازمندی‌های هرکدام از وسایل خانگی را نیز تأمین می‌کرد اما هزینه انرژی الکتریکی را مورد توجه قرار نداده بود. در سال‌های اخیر، محققین مختلفی

1. Time of Use Tariff (ToU Tariff)

مدلهایی را برای مدیریت مصرف انرژی در ساختمان‌ها و اکثراً، برای بخش خانگی ارائه داده‌اند. این تحقیقات اغلب یک مدل بهینه‌سازی ریاضی برای حداقل کردن هزینه انرژی الکتریکی [۱۱-۲۱] و یا برای حداقل کردن اوج^۱ مصرف [۲۲؛ ۲۳] ارائه داده‌اند. در مقاله حاضر با در نظر گرفتن تعرفه‌های زمان استفاده در ۲۴ ساعت شبانه‌روز، مسئله حداقل کردن هزینه انرژی الکتریکی و حداقل کردن اوج مصرف به‌طور هم‌زمان مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، ترجیحات فازی مصرف‌کننده نیز در نظر گرفته شده و مدل برای بیمارستانی ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- مدل‌سازی

در این تحقیق، بارهای بیمارستانی به سه دسته اصلی طبقه‌بندی شده‌اند؛ این سه دسته شامل: بارهای بیمارستانی قابل انتقال در زمان^۲، بارهای بیمارستانی با قابلیت جابه‌جایی توان مصرفی^۳ و بارهای غیرقابل جابه‌جایی^۴ هستند. جدول ۱ فهرست پارامترها و جدول ۲ فهرست متغیرهای به‌کاررفته در مسئله برنامه‌ریزی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ فهرست عوامل مدل

مؤلفه‌ها	توضیحات	مؤلفه‌ها	توضیحات
L	مجموعه بارهای بیمارستانی	p_l	حداقل توان مصرفی برای بارهای PCLs
H	مجموعه ۲۴ ساعت شبانه‌روز	\bar{p}_l	حداکثر توان مصرفی برای بارهای PCLs
n	تعداد بارهای بیمارستانی	p_l^h	توان ثابت مصرفی بار l ام در ساعت h ام
DR_l	انرژی موردنیاز برای بار l ام	P_l	بردار الگوی توان مصرفی برای بارهای TCLs
h_l^s	ساعت شروع به کار بار l ام	p_l^{total}	کلیه شیفت‌های بردار P_l
h_l^e	ساعت اتمام کار بار l ام	t^h	تعرفه ساعت h ام
p_l^*	مقدار توان مصرفی ثابت برای بارهای NCLs	T	بردار تعرفه‌های زمان استفاده

1. Peak
2. Time Changeable Loads (TCLs)
3. Power Changeable Loads (PCLs)
4. Non Changeable Loads (NCLs)

جدول ۲ فهرست متغیرهای مدل

متغیرها	توضیحات	متغیرها	توضیحات
PPC	اوج ساعتی توان مصرفی	U_l	بردار سوییچ کنترلی بار ۱ ام در ۲۴ ساعت شبانه‌روز
c_l^h	توان مصرفی بار ۱ ام در ساعت h ام	c^h	مقدار کل توان مصرفی در ساعت h ام
u_l^h	سوییچ کنترلی روشن و خاموش برای بار ۱ ام در ساعت h ام	C^h	بردار کل توان مصرفی در ساعت h ام شامل همه بارهای ساختمان
C_l	بردار توان مصرفی بار ۱ ام در ۲۴ ساعت شبانه‌روز		

بارهای قابل‌جابه‌جایی در زمان (TCLs) می‌توانند در مسئله تغییر زمان بارها شرکت کنند و شاید یک‌بار کارکرد آن‌ها در طول شبانه‌روز برای مصرف‌کننده کفایت کند. در اصل، کنترل‌کننده هوشمند و حل مسئله برنامه‌ریزی است که مشخص می‌کند با توجه به اهداف تعیین‌شده، چه زمانی برای شروع به کار این بارها مناسب است؛ بارهایی نظیر MRI^۱، رادیولوژی و سونوگرافی^۲ از جمله این بارها هستند. برای بارهایی با قابلیت جابه‌جایی توان مصرفی (PCLs)، مانند الکتروشوک^۳ و بنت پرتابل^۴، اندازه‌گیر هوشمند می‌تواند برنامه‌ای با قابلیت انعطاف در توان مصرفی برای آن‌ها طراحی کند که نیاز مصرف انرژی روزانه آن‌ها را تأمین نماید. این نوع بارها معمولاً دارای یک نیاز انرژی روزانه ثابت برای انجام عملیات خود هستند و در زمره بارهای شارژی هستند؛ به‌عنوان مثال، یک نمونه الکتروشوک نیاز به شارژ شدن به‌اندازه ۳ کیلووات ساعت در طول روز دارد، درحالی‌که شارژر هوشمند آن می‌تواند در بازه توانی بین ۰/۲ تا ۱ کیلووات توان مصرف کند، در این صورت، این کنترلر هوشمند است که با بهینه‌سازی‌ای که انجام می‌دهد، مشخص می‌کند که آیا بهتر است با حداقل توان مصرفی در بازه زمانی بیشتر بار را شارژ کند یا با حداکثر توان مصرفی در بازه زمانی کوتاه بار را شارژ کند. این تصمیم‌گیری با حل مدل ریاضی و در نظر گرفتن اهدافی همچون حداقل کردن اوج توان یا حداقل کردن هزینه انرژی انجام می‌شود. برای بارهای غیرقابل‌جابه‌جایی (NCLs)

1. Magnetic Resonance Imaging (MRI)

2. Sonography machine

3. Electroconvulsive machine

4. Portable Ventilator machine

مانند ونتیلاتور^۱ و ساکشن^۲ که مصرف توان و زمان عملکرد ثابتی دارند، مسئله بهینه‌سازی، تأمین انرژی موردنیاز روزانه آن‌ها را تضمین می‌کند. شکل ۱، نمودار سیستم مدیریت بارهای بیمارستانی را نشان می‌دهد. در این شکل، کنترلر هوشمند با دریافت ترجیحات مصرف‌کننده ضمن حفظ رفاه مصرف‌کننده در استفاده از بارهای NCLs، برنامه کنترلی برای بارهای TCLs و PCLs را ارائه می‌دهد.

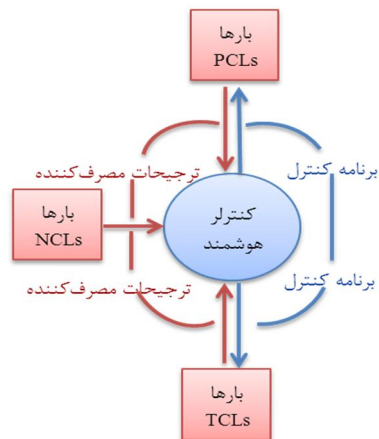
مکانیزم برنامه‌ریزی مصرف می‌تواند به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی مطرح شود. در مرحله اول، هدف نهایی را حداقل کردن اوج توان مصرفی در هر ساعت در نظر گرفته و مدل به شرح زیر است:

$$\min PPC \quad (۱)$$

$$\text{s.t } \sum_{l \in L} c_l^h \leq PPC, \quad \forall h \in H, \quad (۲)$$

$$\sum_{h \in H} c_l^h = DR_l, \quad \forall l \in L \quad (۳)$$

$$c_l^h \geq 0 \quad (۴)$$



شکل ۱ نمودار سیستم مدیریت بارهای بیمارستانی

1. Ventilator machine
2. Suction machine

در این مدل، بردار c_i^h متغیر برنامه‌ریزی شده است که توان مصرفی برای بار l ام را در زمانی مشخص $h \in H, H = [1, 2, \dots, 24]$ از شبانه‌روز مشخص می‌کند. متغیر PPC اوج ساعتی مصرف توان برای بارها را نشان می‌دهد. تابع هزینه در نظر گرفته شده در مسئله بهینه‌سازی بالا، حداقل کردن با وجود محدودیت‌های (۲) الی (۴) است. اوج ساعتی مصرف باید از مجموع توان مصرفی برنامه‌ریزی شده برای همه بارها در آن ساعت، بزرگ‌تر یا مساوی آن باشد. به همین علت، محدودیت (۲) خود به‌تنهایی نماینده ۲۴ محدودیت است. برای هر بار بیمارستانی مطابق با جدول ترجیحات مصرف‌کننده نیاز مصرف انرژی روزانه^۲ باید فراهم شود. میزان توان مصرفی بارها c_i^h باید یک عبارت غیر منفی باشد؛ به این معنی که $c_i^h \geq 0$. در اینجا، واحد تقسیم‌بندی زمان را هر یک ساعت در نظر گرفته‌ایم و بنابراین، بردار C_l خود دارای ۲۴ درایه است. امکان افزایش تقسیم‌بندی زمانی در این مدل وجود دارد اما نیازی به آن نبود. اکنون که نیازمندی‌های بارهای بیمارستانی مدل‌سازی شد، نیاز است که ترجیحات مصرف‌کننده در قالب محدودیت‌هایی به مسئله بهینه‌سازی اضافه شود. برای بارهای متعلق به گروه NCLs (بارهای غیرقابل‌جابه‌جایی)، میزان مصرف آن‌ها مقداری ثابت است (معمولاً در دفترچه راهنما این بارها مقدار مصرف آن‌ها برحسب کیلووات بر ساعت نوشته شده است). این مقدار ثابت با نماد p_l^* نشان داده شده است. مصرف‌کننده مطابق جدولی که در اختیار ما قرار می‌دهد و ترجیحات خود را در آن نوشته، برای این بارها یک زمان شروع و یک زمان پایان عملیات مشخص کرده که زمان شروع و پایان به ترتیب با h_i^s و h_i^e نمایش داده شده است؛ بنابراین، این محدودیت می‌تواند مطابق رابطه زیر نوشته شود:

$$c_i^h \geq p_l^*, \quad \forall l \in NCLs, \quad \forall h \in [h_i^s, h_i^{(s+1)}, \dots, h_i^e] \quad (5)$$

برای بارهای متعلق به گروه PCLs، یک رنج توان مصرفی داریم که به ترتیب، حداقل توان مصرفی (بار آماده‌به‌کار) و حداکثر توان مصرفی (حداکثر توان در حال

1. Peak Power Consumption (PPC)
2. Demand Requirement (DR_l)

کار) با نمادهای \bar{p}_1 و p_1 مشخص شده است. حال با در نظر گرفتن ترجیح مصرف‌کننده برای زمان شروع و پایان کار بار، می‌توان این محدودیت را به شکل زیر نوشت:

$$p_1 \leq c_i^h \leq \bar{p}_1, \forall i \in \text{PCLs}, \forall h \in [h_1^s, h_1^{(s+1)}, \dots, h_1^e] \quad (۶)$$

بارهای متعلق به گروه TCLs را با میزان نیاز مصرف انرژی روزانه DR_1 در نظر می‌گیریم. اگر فقط بخواهیم به محدودیت (۳) بسنده کنیم، مسئله بهینه‌سازی تضمین می‌کند که انرژی روزانه موردنیاز این بار در طول ۲۴ ساعت، به‌اندازه DR_1 تأمین می‌شود؛ برای مثال، اگر MRI به‌اندازه ۲/۶ کیلووات‌ساعت برای انجام عملیات خود انرژی نیاز داشته باشد، محدودیت (۳) تأمین این مقدار انرژی را تضمین می‌کند. اما کل این انرژی می‌تواند توسط توزیع توان‌های مختلف تأمین شود؛ برای مثال، بردار C_i متعلق به MRI می‌تواند برای ۶ ساعت به‌اندازه ۰/۴۳ کیلووات توان مصرف کند و در باقیمانده زمان، دارای توان مصرفی صفر باشد. این نتیجه می‌تواند یکی از نتایج به‌دست‌آمده از حل مدل باشد. واضح است که چنین تعبیری در مورد عملکرد MRI صحیح نیست، معمولاً در مشخصات بارهای TCLs، توان مصرفی در ساعت‌های کاری بار ذکر شده است. MRI مثال بالا، برای ساعت اول کاری خود به‌اندازه ۱ کیلووات و برای ساعت دوم کاری خود به‌اندازه ۱/۶ کیلووات توان مصرف می‌کند و لذا این دسته از بارهای بیمارستانی باید برای انجام عملیات خود از الگوی توان مصرفی خود تبعیت کنند. بنابراین، وجود محدودیت (۳) به‌تنهایی برای عملکرد صحیح بارهای TCLs کافی نیست. اگر توان مصرفی در الگوی مصرف توان این بارها در ساعت h م برای بار i ام با نماد p_i^h نمایش داده شود، با فرض اینکه یک بار دارای الگوی مصرف توان ثابت است، از بردار $\mathbf{P}_i = [p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^{24}]^T$ برای نمایش این الگو استفاده می‌شود. برنامه بردار C_i ، دقیقاً باید مشابه با یکی از شیفت‌های بردار الگوی مصرف توان باشد. لذا کل شیفت‌هایی که برای بردار \mathbf{P}_i موجود است، به شرح زیر بوده و در قالب ماتریسی به نام $\mathbf{P}_i^{\text{total}}$ نشان داده شده است:

$$\mathbf{P}_I^{\text{total}} = \begin{bmatrix} p_I^1 & p_I^{24} & \dots & p_I^3 & p_I^2 \\ p_I^2 & p_I^1 & \dots & p_I^4 & p_I^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_I^{24} & p_I^{23} & \dots & p_I^2 & p_I^1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

محدودیتی که در بالا شرح داده شد به‌تنهایی نمی‌تواند در مسئله برنامه‌ریزی خطی شرکت کند. از این رو، از چارچوب برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای ساخت مدل این محدودیت بهره گرفته می‌شود. برای ارائه برنامه مصرف توان برای بارهای TCLs نیازمند معرفی یک بردار از اعداد باینری (۰ یا ۱) هستیم. اگر بار l در ساعت h روشن شود، عبارت u_l^h معادل یک می‌شود و در غیر این صورت، صفر است. مجموع کل این متغیرها در قالب بردار $\mathbf{U}_I = [u_I^1, u_I^2, \dots, u_I^{24}]^T$ نشان داده شده است. این بردار به‌عنوان یک سوئیچ کنترلی برای بارهای TCLs عمل می‌کند؛ چراکه این بردار تنها یک عنصر غیرصفر دارد که برابر با ۱ بوده و این ویژگی در رابطه زیر نشان داده شده است:

$$\sum_{h \in H} u_l^h = 1, u_l^h \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in \text{TCLs} \quad (8)$$

اکنون می‌توان طرح برنامه توان مصرفی برای این بارها (C_l) را به شرح زیر نوشت:

$$C_l = \mathbf{P}_I^{\text{total}} \mathbf{U}_I, \quad \forall l \in \text{TCLs} \quad (9)$$

از آنجایی که یکی دیگر از توابع هدفی که در این مقاله به آن پرداخته شده است، تابع هدف هزینه انرژی مصرفی است، نیاز است که قیمت انرژی الکتریکی را برحسب کیلووات در ساعت‌های مختلف شبانه‌روز داشته باشیم. در جدول ۳ فهرستی از تعرفه قیمت برق در طی ساعات مختلف شبانه‌روز ارائه شده است. برای به کار بردن این تعرفه‌ها در مدل مسئله از بردار $\mathbf{T} = [t^1, t^2, \dots, t^{24}]^T$ استفاده شده است؛ برای

مثال، مطابق با جدول ۱، $t^3 = 0.0363 \text{ \$/kw}$ است و این یعنی در بازه زمانی بین ۲ تا ۳ صبح هر کیلووات معادل 0.0363 دلار هزینه دارد.

جدول ۳ تعرفه قیمت انرژی الکتریکی [۲۴]

بازه زمانی استفاده (ساعت)	قیمت انرژی (\$/Kw)	بازه زمانی استفاده (ساعت)	قیمت انرژی (\$/Kw)	بازه زمانی استفاده (ساعت)	قیمت انرژی (\$/Kw)
۱-۰	۰/۰۴۰۳	۸-۹	۰/۰۵۷۷	۱۶-۱۷	۰/۰۶۰۰
۲-۱	۰/۰۳۷۷	۹-۱۰	۰/۰۶۷۶	۱۷-۱۸	۰/۰۹۴۳
۳-۲	۰/۰۳۶۳	۱۰-۱۱	۰/۰۶۸۹	۱۸-۱۹	۰/۰۹۲۸
۴-۳	۰/۰۳۷۲	۱۱-۱۲	۰/۰۶۶۰	۱۹-۲۰	۰/۰۷۰۲
۵-۴	۰/۰۳۸۱	۱۲-۱۳	۰/۰۶۶۰	۲۰-۲۱	۰/۰۶۰۶
۶-۵	۰/۰۳۹۹	۱۳-۱۴	۰/۰۶۶۰	۲۱-۲۲	۰/۰۵۳۴
۷-۶	۰/۰۵۱۳	۱۴-۱۵	۰/۰۶۳۵	۲۲-۲۳	۰/۰۴۶۶
۸-۷	۰/۰۵۶۴	۱۵-۱۶	۰/۰۶۳۵	۲۳-۲۴	۰/۰۴۴۵

برای نوشتن تابع هدف لازم است بردار $C^h = [c^1, c^2, \dots, c^{24}]$ (جمع مصرف توان کلیه بارها در هر ساعت) معرفی شود. هرکدام از درایه‌های این بردار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$c^h = \sum_{l=1}^n c_l^h \quad \forall h \in H \quad (10)$$

تابع هدف حداقل کردن هزینه انرژی را می‌توان مطابق فرمول زیر در نظر گرفت:

$$\min C^h \times T \quad (11)$$

هر دوی این مسائل برنامه‌ریزی از درجه اهمیت مساوی برخوردارند، اما ممکن است در مواردی این درجه اهمیت مساوی نباشد؛ در این‌گونه موارد می‌توان با وارد کردن ضرایب وزنی در حل مسئله با ابزار برنامه‌ریزی آرمانی، این تفاوت در اهمیت را دخیل کرد. در انتهای این بخش، هر دو مسئله برنامه‌ریزی با در نظر گرفتن محدودیت‌های (۲) الی (۱۰) به‌طور مجزا بازنویسی شده است: مسئله برنامه‌ریزی برای حداقل کردن اوج توان مصرفی:

$$\begin{aligned} & \min PPC \\ & \text{s.t. } \sum_{l \in L} c_l^h \leq PPC, \quad \forall h \in H \\ & \sum_{h \in H} c_l^h = DR_l, \quad \forall l \in L \\ & c_l^h \geq p_l^*, \quad \forall l \in NCLs, \quad \forall h \in [h_l^s, h_l^{(s+1)}, \dots, h_l^e] \\ & \underline{p}_l \leq c_l^h \leq \bar{p}_l, \quad \forall l \in PCLs, \quad \forall h \in [h_l^s, h_l^{(s+1)}, \dots, h_l^e] \\ & \mathbf{P}_l^{\text{total}} = \begin{bmatrix} p_l^1 & p_l^{24} & \dots & p_l^3 & p_l^2 \\ p_l^2 & p_l^1 & \dots & p_l^4 & p_l^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_l^{24} & p_l^{23} & \dots & p_l^2 & p_l^1 \end{bmatrix} \quad (12) \\ & \sum_{h \in H} u_l^h = 1, \quad u_l^h \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in TCLs \\ & C_l = \mathbf{P}_l^{\text{total}} U_l, \quad U_l = [u_l^1, u_l^2, \dots, u_l^{24}]^T, \quad \forall l \in TCLs \\ & c_l^h \geq 0 \end{aligned}$$

مسئله برنامه‌ریزی برای حداقل کردن هزینه انرژی الکتریکی مصرفی بر اساس تعرفه‌های زمان استفاده:

$$\begin{aligned}
 & \min C^h \times T \\
 & C^h = [c^1, c^2, \dots, c^{24}], T = [t^1, t^2, \dots, t^{24}]^T \\
 & c^h = \sum_{l=1}^n c_l^h \quad \forall h \in H \\
 & \text{s.t.} \quad \sum_{l \in L} c_l^h \leq PPC, \quad \forall h \in H \\
 & \sum_{h \in H} c_l^h = DR_l, \quad \forall l \in L \\
 & c_l^h \geq p_l^*, \quad \forall l \in NCLs, \quad \forall h \in [h_1^s, h_1^{(s+1)}, \dots, h_1^e] \\
 & \underline{p}_l \leq c_l^h \leq \bar{p}_l, \quad \forall l \in PCLs, \quad \forall h \in [h_1^s, h_1^{(s+1)}, \dots, h_1^e] \\
 & \mathbf{P}_1^{\text{total}} = \begin{bmatrix} p_1^1 & p_1^{24} & \dots & p_1^3 & p_1^2 \\ p_1^2 & p_1^1 & \dots & p_1^4 & p_1^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_1^{24} & p_1^{23} & \dots & p_1^2 & p_1^1 \end{bmatrix} \\
 & \sum_{h \in H} u_l^h = 1, \quad u_l^h \in \{0, 1\}, \quad \forall l \in TCLs \\
 & C_l = \mathbf{P}_1^{\text{total}} U_l, \quad U_l = [u_l^1, u_l^2, \dots, u_l^{24}]^T, \quad \forall l \in TCL \\
 & c_l^h \geq 0
 \end{aligned} \tag{۱۳}$$

۴- نتایج حاصل از اجرای مدل

مدل پیشنهادی با دریافت اطلاعات مربوط به یک بیمارستان در شهر تهران اجرا و مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مربوط به ترجیحات مصرف‌کننده و تعرفه قیمت انرژی الکتریکی نیز مشخص است. در مرحله اول، مشخصات گروهی از بارهای بیمارستانی و نیازهای مصرف هرکدام از آن‌ها در قالب جدولی از مسئولین بیمارستان مورد مطالعه دریافت شد. همچنین ترجیحات استفاده از بارهای بیمارستانی نیز به همراه مشخصات بارهای مورداستفاده (میزان انرژی الکتریکی مصرفی در هر ساعت) دریافت شد. جدول ۴، فهرستی از مشخصات بارهای بیمارستانی به همراه ترجیحات فازی مصرف‌کننده در زمان استفاده از آن‌ها را نشان می‌دهد. چهار دستگاه اول از نوع غیرقابل انتقال در زمان بوده و نیاز به

انرژی دستگاه‌های ۶، ۷ و ۸ نیز در هر ساعت از روز قابل تأمین است. ترجیح مصرف‌کننده در مورد بازه زمانی عملکرد دستگاه‌های شماره ۵ و ۹ به صورت عدد فازی بیان و مطابق با جدول ۵ در نظر گرفته شده است. در این بخش، کل نیاز به توان مصرفی و الگوی توان مصرفی هر کدام از بارها با در نظر گرفتن محدودیت‌های بخش قبل مدل‌سازی شده است و مدل برنامه‌ریزی به دست آمده که یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط است، به وسیله نرم‌افزار ^۱GAMS حل‌کننده ^۲CPLEX اجرا شده است.

جدول ۴ ترجیحات مصرف‌کننده و مشخصات بارها

شماره بار	بار بیمارستانی	انرژی مورد نیاز روزانه (kwh)	بازه زمانی عملکرد بار	مشخصات توان مصرفی بار (kwh)	نوع بار
۱	آنژیوگرافی	۱۲/۵	۸-۱۲/۱۴-۱۸	۱/۳۵	NCL
۲	ونتیلاتور	۵/۵۲	۲۴ ساعت	۰/۲۳	NCL
۳	ساکشن	۲/۴	۷ صبح و ۸ شب	۱/۲	NCL
۴	مانیتور	۱/۲	۲۱-۲۳	۰/۴	NCL
۵	الکتروشوک	۳	حدوداً ۷ شب تا حدوداً ۸ صبح	حداقل ۰/۱ و حداکثر ۱	PCL
۶	بنت پرتابل	۶	نیازش فراهم شود.	حداقل ۰/۱۲ و حداکثر ۰/۸	PCL
۷	MRI	۲/۶	۲ ساعت	ساعت اول ۱ و ساعت دوم ۱/۶	TCL
۸	رادیولوژی (X-Ray)	۲	۲ ساعت	هر ساعت ۱	TCL
۹	سونوگرافی	۱/۲۳	حدوداً ۷ تا ۹ صبح / حدوداً ۶ تا ۱۰ شب	۱/۲۳	TCL

1. General Algebraic Modeling System
2. Solver

جدول ۵ ترجیحات فازی مصرف‌کننده برای دستگاه‌های شماره ۵ و ۹

شماره دستگاه	دستگاه خانگی	بازه زمانی عملکرد دستگاه	عدد فازی در نظر گرفته شده
۵	الکتروشوک	حدوداً ۷ شب تا حدوداً ۸ صبح	
۹	سونوگرافی	حدوداً ۷ تا ۹ صبح / حدوداً ۶ تا ۱۰ شب	

رابطه (۲) و (۴) برای کلیه بارها نوشته شده است. همچنین برای هرکدام از سه نوع بار موجود در جدول، مدل‌سازی یک بار به‌عنوان نمونه در اینجا آورده شده است.

مدل‌سازی نمونه بارهای NCL؛ بار شماره ۱ (آنژیوگرافی):

$$\sum_{h \in H} c_1^h = DR_1 \rightarrow c_1^1 + c_1^2 + \dots + c_1^{24} = 13.5 \quad (14)$$

$$c_1^h \geq p_1^*, \quad \forall h \in [h_1^{10}, h_1^{11}, \dots, h_1^{19}] \rightarrow \begin{cases} c_1^8 \geq 1.35 \\ \vdots \\ c_1^{12} \geq 1.35 \\ c_1^{14} \geq 1.35 \\ \vdots \\ c_1^{18} \geq 1.35 \end{cases} \quad (15)$$

مدل‌سازی نمونه بارهای PCLs؛ بار شماره ۵ (الکتروشوک):

$$\sum_{h \in H} c_5^h = DR_5 \rightarrow c_5^1 + c_5^2 + \dots + c_5^{24} = 3 \quad (16)$$

$$p_5 \leq c_5^h \leq \bar{p}_5, \forall h \in [h_5^{19}, \dots, h_5^{24}, h_5^1, \dots, h_5^8] \rightarrow$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.1 \leq c_5^{18} \leq 1 \\ \vdots \\ 0.1 \leq c_5^{24} \leq 1 \\ 0.1 \leq c_5^1 \leq 1 \\ \vdots \\ 0.1 \leq c_5^9 \leq 1 \end{array} \right. \quad (17)$$

مدلسازی نمونه بارهای TCLs؛ بار شماره ۸ (رادیولوژی):
 با توجه به جدول ۴، ماتریس تغییر^۱ را برای الگوی توان مصرفی بار تشکیل
 می‌دهیم و سپس محدودیت مربوطه را می‌نویسیم:

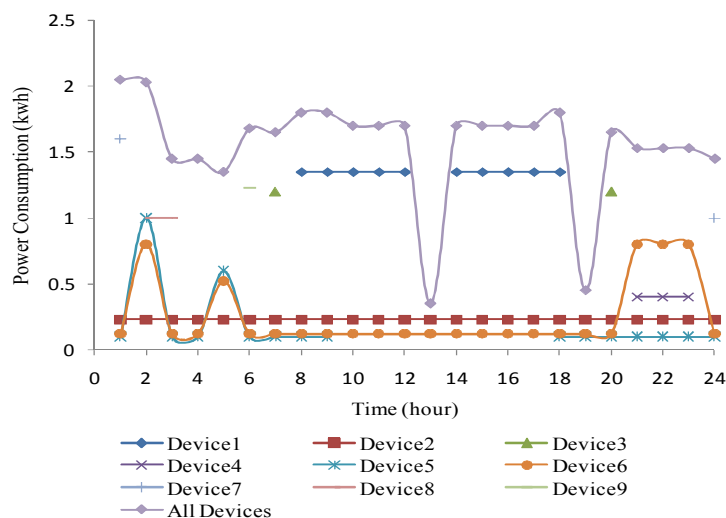
$$\mathbf{P}_8^{\text{total}} = \begin{bmatrix} p_8^1 & p_8^2 & \dots & p_8^{23} & p_8^{24} \\ p_8^2 & p_8^3 & \dots & p_8^{24} & p_8^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ p_8^{24} & p_8^1 & \dots & p_8^{22} & p_8^{23} \end{bmatrix} \rightarrow \mathbf{P}_8^{\text{total}} = \begin{bmatrix} 1.6 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 1.6 & 0 & & \vdots & 0 \\ 0 & 1 & 1.6 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1.6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\sum_{h \in H} u_8^h = 1, u_8^h \in \{0, 1\} \rightarrow u_8^1 + u_8^2 + \dots + u_8^{24} = 1 \quad (19)$$

$$C_8 = \mathbf{P}_8^{\text{total}} U_8 \rightarrow \begin{array}{l} c_8^1 = 1.6 \times u_8^{24} + 1 \times u_8^1 \\ c_8^2 = 1.6 \times u_8^1 + 1 \times u_8^2 \\ \vdots \\ c_8^{24} = 1.6 \times u_8^{23} + 1 \times u_8^{24} \end{array} \quad (20)$$

کلیه محدودیت‌های مربوط به ۹ بار بیمارستانی، مشابه نمونه‌های آورده شده در این بخش، مدل‌سازی شده‌اند و با به کار بردن آن‌ها در رابطه‌های مدل‌سازی (۱۲)، مسئله برنامه‌ریزی حداقل کردن اوج توان مصرفی و در رابطه‌های مدل‌سازی (۱۳)، مسئله برنامه‌ریزی حداقل کردن هزینه انرژی الکتریکی تشکیل شده‌اند. هر دوی این مسائل حل و نتایج آن مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند و سرانجام از طریق ابزار برنامه‌ریزی آرمانی، دو هدف به صورت توأمان در نظر گرفته شده، نتایج به دست آمده و با نتایج قبلی مقایسه شده است.

نمودارهای شکل ۲، توزیع توان مصرفی ۹ بار بیمارستانی در مطالعه موردی را برای سناریو اول - حداقل کردن اوج توان مصرفی تحت مدل‌سازی (۱۲) - نشان می‌دهد. با این توزیع توان مصرفی، حداکثر اوج توان مصرفی در بهینه‌ترین حالت خود در ساعت ۱ بامداد اتفاق می‌افتد و برابر با ۲/۰۵ کیلووات است. حداقل اوج توان مصرفی در ساعت ۱ بعدازظهر اتفاق می‌افتد و برابر با ۰/۳۵ کیلووات است. این مسئله می‌تواند دارای جواب بهینه چندگانه باشد و توزیع مصارف توان دیگر نیز منجر به همین جواب شود اما آنچه را که در این مطالعه موردی می‌توان تأکید کرد، این است که امکان کاهش اوج توان مصرفی از مقدار ۲/۰۵ کیلووات وجود ندارد.



شکل ۲ سناریوی اول؛ نمودارهای توزیع توان ۹ بار بیمارستانی

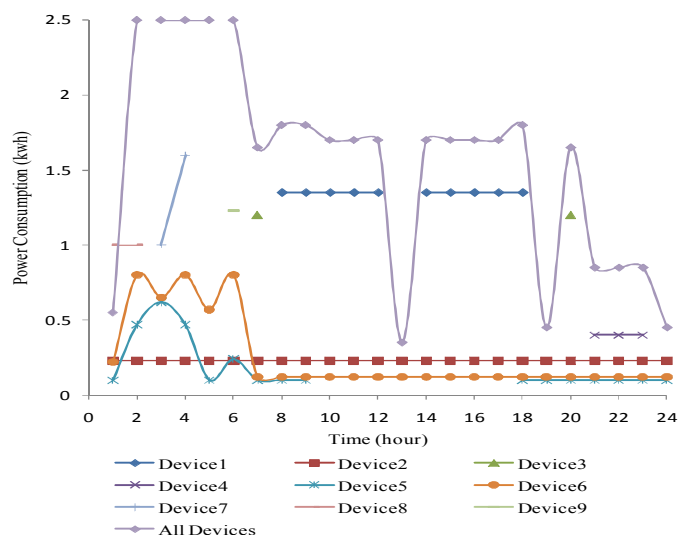
با استفاده از جدول ۱ و اعمال تعرفه‌های زمان استفاده، هزینه پرداختی مصرف‌کننده در طول یک شبانه‌روز برابر است با:

$$\sum_{h=1}^9 c^h \times t^h = 2.11 \quad \text{USD} \quad (21)$$

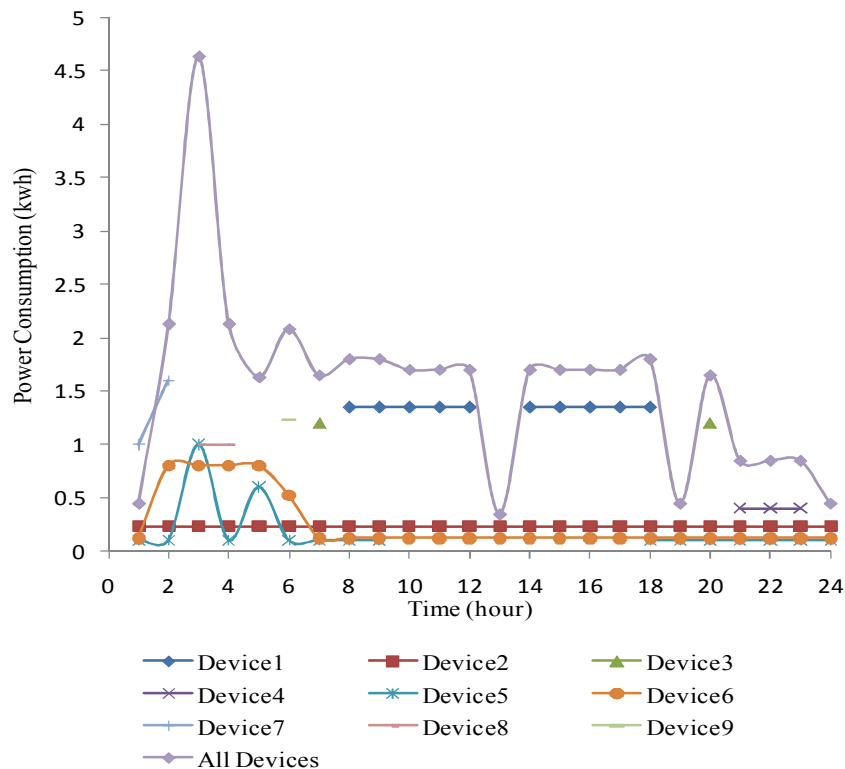
اگر فرض شود که مصرف‌کننده همین روند را برای روزهای دیگر استفاده کند، هزینه ماهانه قابل پرداخت برای او برابر است با:

$$2.76 \times 30 = 63.28 \quad \text{USD} \quad (22)$$

نمودارهای اشکال ۳ و ۴ توزیع توان مصرفی ۹ بار بیمارستانی در مطالعه موردی را برای سناریو دوم - حداقل کردن هزینه انرژی الکتریکی تحت مدل‌سازی (۱۳) - نشان می‌دهند. در شکل ۳، اوج توان مصرفی ۱/۳ کیلووات و در شکل ۴، ۵ کیلووات در نظر گرفته شده است.



شکل ۳ سناریوی دوم؛ نمودارهای توزیع توان ۹ بار بیمارستانی با اوج ۲/۵ کیلووات

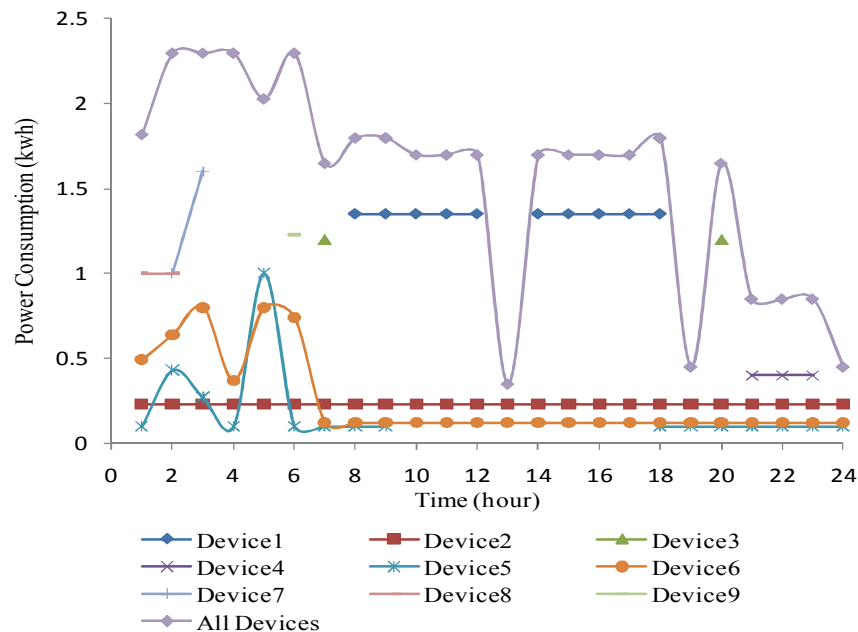


شکل ۴ سناریوی دوم؛ نمودارهای توزیع توان ۹ بار بیمارستانی با اوج ۵ کیلووات

برای سناریوی دوم با اوج توان مصرفی معادل ۲/۵ کیلووات، توان مصرفی کلیه بارها در حداقل مقدار و حداکثر مقدار خود، به ترتیب برابر با ۰/۳۵ کیلووات در ساعت ۱ بعدازظهر و ۲/۵ کیلووات در ساعات ۲ تا ۶ صبح است. قرار دادن حداکثر اوج توان مصرفی، موجب می‌شود بارها با توزیع مناسب و با توجه به تعرفه قیمت برق از مقدار ۲/۵ کیلووات ساعت تجاوز نکنند. نکته مهم در مورد اجرای سناریو با اوج توان مصرفی ۵ کیلووات این است که توان مصرفی کلیه بارها در حداقل مقدار و حداکثر مقدار خود، به ترتیب برابر با ۰/۳۵ کیلووات در ساعت ۱ بعدازظهر و ۴/۶۳ کیلووات در ساعت ۳ بعدازظهر است. قرار دادن حداکثر اوج توان مصرفی برابر با ۵ کیلووات برای این بارها تا حدی غیرمنطقی است؛ زیرا حل مدل، دیگر امکان جابه‌جایی یا انتقال زمانی برای

هیچ‌کدام از بارها را ندارد و با توجه به تعرفه‌های قیمت، قرار دادن هر مقدار بیش از $4/63$ کیلووات برای حداکثر اوج توان مصرفی به همین جواب منجر می‌شود. برای سناریوی دوم با اوج توان $2/5$ کیلووات، هزینه ماهانه پرداختی برابر $62/09$ دلار و برای سناریوی دوم با اوج توان 5 کیلووات هزینه ماهانه پرداختی برابر 62 دلار است. سناریوی دوم با دو مقدار مختلف از اوج توان مصرفی بررسی شد و در هر دو حالت نیز پیک توان مصرفی از کمترین مقدار ممکن اوج که در سناریوی یک برابر $2/05$ کیلووات بود، بیشتر در نظر گرفته شد. بنابراین انتظار می‌رود که هزینه ماهانه انرژی مصرفی در سناریوی دوم برای هر دو مقدار اوج، از سناریوی یک کمتر باشد. با محاسبه‌ای ساده به این نتیجه می‌رسیم که اگر حداقل اوج توان مصرفی ($2/05$ کیلووات) را به اندازه $0/45$ کیلووات افزایش داده شده و به $2/5$ کیلووات برسد (به عبارتی با افزایش $21/95$ درصدی اوج توان مصرفی)، می‌توان به اندازه $2/03$ درصد در هزینه انرژی صرفه‌جویی کرد و از سویی، این افزایش ناچیز اوج توان نمی‌تواند به بارهای بیمارستانی صدمه‌ای بزند یا موجب استهلاک آن‌ها شود و علاوه بر آن، فشار زیادی هم برای تأمین این مقدار توان برای بارها به تأمین‌کننده تحمیل نمی‌شود اما اگر افزایش غیرمعقول حداقل اوج توان مصرفی برابر $2/95$ کیلووات مدنظر قرار گیرد، یعنی اوج توان برابر با $2/05 + 2/95 = 5$ کیلووات در نظر گرفته شود، می‌توان از لحاظ هزینه‌ای، $2/23$ درصد نسبت به سناریوی اول صرفه‌جویی کرد. افزایش $143/9$ درصدی اوج فقط برای رسیدن به صرفه‌جویی در هزینه‌ها به اندازه $0/21$ درصد بیشتر از حالت قبل توجیه‌پذیر نیست.

نمودارهای شکل ۵، توزیع توان مصرفی ۹ بار بیمارستانی در مطالعه موردی را برای سناریو سوم - در نظر گرفتن توأمان حداقل کردن اوج توان و حداقل کردن هزینه انرژی با استفاده از ابزار برنامه‌ریزی آرمانی - نشان می‌دهد.



شکل ۵ سناریوی سوم: نمودارهای توزیع توان ۹ بار بیمارستانی
(تلفیق سناریوهای اول و دوم)

در سناریوی سوم، پیک توان مصرفی در بازه زمانی ۲ تا ۶ صبح برابر با مقدار ۲/۰۵ کیلووات است و برخلاف سناریوی ۱، این اوج مصرف فقط محدود به یک ساعت خاص نیست، یعنی یکنواخت‌سازی مصرف توان در طول شبانه‌روز انجام شده است و این امر، از اضافه‌بار زیاد می‌کاهد. علاوه بر این، مدل برنامه‌ریزی، پیک توان مصرفی را در ساعات با تعرفه‌های قیمت پایین قرار داده است که علاوه بر تأمین نیاز بار و ترجیحات مصرف‌کننده، صرفه‌جویی اقتصادی را هم در بر دارد. در این سناریو نیز میزان حداقل و حداکثر توان مصرفی، به ترتیب برابر با ۰/۳۵ کیلووات و ۲/۰۵ کیلووات است و بنابراین، نقاط قوت سناریوهای اول و دوم در نظر گرفته شده است. برای سناریوی سوم هزینه ماهانه پرداختی برابر با ۶۲/۲۶ دلار است و مصرف‌کننده ضمن پرداخت این هزینه از حداقل اوج توان مصرفی هم بهره می‌برد. شدت انرژی مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{مقدار مصرف انرژی}^1 = \frac{\text{مقدار مصرف انرژی}^1}{\text{ارزش افزوده}^2} = \text{شدت انرژی} \quad (23)$$

$$\text{ارزش افزوده} = \text{هزینه‌های غیرانسانی}^3 - \text{درآمد}^4 = \text{ارزش افزوده} \quad (24)$$

مقدار مصرف انرژی در تمام سناریوها یکسان و برابر با ۳۷/۴۵ کیلووات ساعت است. در سناریو سوم، مقدار شدت انرژی بیش از سایر سناریوها کاهش می‌یابد؛ چراکه هزینه بهای قدرت (با توجه به تابع هدف اول) و همچنین هزینه انرژی مصرفی (با توجه به تابع هدف دوم) به‌طور هم‌زمان کاهش می‌یابد. بررسی نتایج حاصل از اجرای سه سناریو مذکور در بالا نشان‌دهنده عملکرد بهتر سناریوی سوم در جهت کاهش شدت انرژی در بیمارستان مورد مطالعه است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، برتری مدل پیشنهادی در این تحقیق نسبت به مدل‌های مورد بررسی در بخش پیشینه پژوهش، در نظر گرفتن دو هدف حداقل‌کردن هزینه مصرف‌کننده و به‌طور هم‌زمان حداقل‌کردن اوج مصرف برق است. توجه به هر دو هدف به‌طور هم‌زمان، منجر به کاهش شدت انرژی شد. کاهش شدت انرژی شاخصی است که نشان‌دهنده مدیریت صحیح طرف تقاضای انرژی است. تلاش در جهت کاهش هر چه بیشتر شدت مصرف انرژی در کشوری همچون ایران که این شاخص پنج برابر متوسط جهانی است، امری ضروری و مهم است. قابل‌ذکر است مدل پیشنهادی به‌غیر از بیمارستان‌ها برای سایر ساختمان‌ها همچون ساختمان‌های مسکونی و تجاری نیز قابل‌اجرا است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی ریاضی برای اصلاح الگوی مصرف انرژی برق در بیمارستان‌ها ارائه شد. توابع هدف شامل حداقل‌کردن اوج مصرف انرژی و حداقل‌کردن هزینه برق و محدودیت‌هایی همچون الزامات انرژی روزانه و ترجیحات مصرف‌کننده با استفاده

1. Energy Consumption (E.C)
2. Value Added (V.AD)
3. Non-labor Cost
4. Revenue

از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدل‌سازی و سه سناریوی مختلف با توجه به توابع هدف در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد سناریوی تلفیقی که هر دو هدف را به‌طور هم‌زمان در نظر می‌گیرد، سناریوی برتر است و موجب کاهش بیشتر شدت انرژی می‌شود. مدل پیشنهادی برای مدیریت هوشمند مصرف برق قابلیت اجرایی دارد و اجرای آن در بیمارستان‌ها توصیه می‌شود.

۶- منابع

- [1] Mirfakhreddiny S.H., Babaei M. H., Morovati S. A., Predicting Energy Consumption of Iran via a Hybrid Model of Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms and Comparing It with Traditional Models. Management Researches in Iran; 2013: 17(2), 50-53.
- [2] Alavi K. Energy consumption optimization in medical centers, rethinking in architecture of a hospital. MED & LA Engineering Magazine; 2012 : 138, 50-53.
- [3] Albadi MH, El-Saadany EF. Demand response in electricity markets: an overview. In: IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting; 2007.
- [4] Lui TJ, Stirling W, Marcy HO. Get smart. IEEE Power Energy Mag 2010; 8: 66-78.
- [5] Pyrko J. Load demand pricing - case studies in residential buildings. In: International Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting Conference 2006.
- [6] Wu TY, Shieh SS, Jang SS, Liu CCL. Optimal energy management integration for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies. IEEE Trans Power Systems 2005; 20:1431-9.
- [7] Nehrir MH, LaMeres B.J, Gerez V, A customer-interactive electric water heater demand-side management strategy using fuzzy logic, IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting 1.1999: 433 - 436.
- [8] Wacks K. Utility load management using home automation. IEEE Trans Consumer Electron 1991; 37:168-74.

- [9] Tompros S, Mouratidis N, Draaijer M, Foglar A, Hrasnica H. Enabling applicability of energy saving applications on the appliances of the home environment. *IEEE Network* 2009; 23: 8–16.
- [10] Zhu Z, Tang J, Lambbotharan S, Chin WH, Fan Z. An Integer Linear Programming Based Optimization for Home Demand-side Management in Smart Grids. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies 2012*.
- [11] Adika, C.O., & Wang, L. (2014). Smart charging and appliance scheduling approaches to demand side management. *Electrical Power and Energy Systems*, 57, 232–240.
- [12] Chavali, P., Yang, P., & Nehorai, A. (2014). A distributed algorithm of appliance scheduling for home energy management system. *Proceedings of the IEEE transactions on smart grid*, 282–290.
- [13] Galvan-Lopez, E., Harris, C., Trujillo, L., Rodriguez-Vazquez, K., Clarke, S., & Cahill, V.(2014). Autonomous demand-side management system based on Monte Carlo tree search. *Proceedings of the 2014 IEEE International Energy Conference(ENERGYCON)*, 1263–1270.
- [14] Missaoui, R., Joumaa, H., Ploix, S., & Bacha, S. (2014). Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System. *Energy and Buildings*, 71, 155–167.
- [15] Lu, Y., Wang, S., Sun, Y., & Yan, C. (2015). Optimal scheduling of buildings with energy generation and thermal energy storage under dynamic electricity pricing using mixed-integer nonlinear programming. *Applied Energy*, 147, 49–58.
- [16] Shirazi, E., Zakariazadeh, A., & Jadid, S. (2015). Optimal joint scheduling of electrical and thermal appliances in a smart home environment. *Energy Conversion and Management*, 106, 181–193.
- [17] Zhang, D., Evangelisti, S., Lettieri, P., & Papageorgiou, L. G. (2015). Energy consumption scheduling of smart homes with micro grid under multi-objective optimization. *Computer Aided Chemical Engineering*, 37, 2441–2446.

- [18] Steen, D., Tuan, L. A., & Carlson, O. (2016). Effects of network tariffs on residential distribution systems and price-responsive customers under hourly electricity pricing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 617–626.
- [19] Ma, K., Yao, T., Yang, J., & Guan, X. (2016). Residential power scheduling for demand response in smart grid. *Electrical Power and Energy Systems*, 78, 320–325.
- [20] Ozkan, H. A. (2016). Appliance based control for Home Power Management Systems. *Energy*, 114, 693–707.
- [21] Ogunjuyigbe, A. S. O., Ayodele, T. R., & Akinola, O. A. (2017). User satisfaction-induced demand side load management in residential buildings with user budget constraint. *Applied Energy*, 187, 352–366.
- [22] Vardakas, J. S., Zorba, N., & Verikoukis, C. V. (2014). Performance evaluation of power demand scheduling scenarios in a smart grid environment. *Energy and Buildings*, 75, 133–148.
- [23] Caprino, D., Vedova, M. L. D., & Facchinetti, T. (2015). Peak shaving through real-time scheduling of household appliances. *Applied Energy*, 142, 164–178.
- [24] www.nyiso.com