تاریخ دریافت: ۲۶ دی ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۲۵ تیر ۱۴۰۰ صفحات ۳۹ الی ۷۶

ارائه یک مدل ریاضی مبتنی بر تشویق و قیمت برای مدیریت بار در ساختمان‌های مسکونی هوشمند

حسین طالبی[۱]، عالیه کاظمی*[۲]، حامد شکوری گنجوی[۳]

[۱] دکتری مدیریت تحقیق در عملیات، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲]دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۳]دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران

چکیده: افزایش مصرف انرژی از جمله مسائل کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است. مدیریت انرژی در سمت تقاضا سبب می‌شود با اعمال مشوق‌ها و محدودیت‌هایی در قیمت انرژی، مصرف‌کنندگان را به سمت مصرف منطقی سوق داد. از جمله راهکارهایی که در بخش ساختمان جهت مدیریت مصرف می‌توان اعمال نمود به‌کارگیری فناوری‌های جدید و ایجاد ساختمان‌های هوشمند است. در این پژوهش با بررسی مبانی نظری موجود در حوزه مدیریت سمت تقاضا و ساختمان‌های هوشمند، مدلی جدید توسعه داده شده است تا مصرف‌کننده و تولیدکننده انرژی الکتریکی را به اهداف مورد نظر شامل کاهش هزینه الکتریکی، کاهش قله مصرف و افزایش رفاه مصرف‌کننده برساند. مدل طراحی شده یک مدل ریاضی چندهدفه است و از ویژگی‌های آن در مقایسه با مدل‌های پیشنهادی قبلی، استفاده از ترکیب برنامه‌های مبتنی بر تشویق (برنامه پاسخگویی بار اضطراری) و برنامه‌های مبتنی بر قیمت (قیمت زمان استفاده) از برنامه‌های پاسخگویی بار به طور همزمان است. نتایج حاصل نشان می‌دهد با اجرای مدل پیشنهادی، به میزان ۳۴ درصد از قله بار الکتریکی و تقریباً ۲۰ درصد از هزینه‌های مصرف‌کننده کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: مدیریت سمت تقاضا، مدیریت بار، ساختمان هوشمند، برنامه پاسخگویی بار اضطراری، برنامه قیمت زمان استفاده

* نویسنده مسئول، پست الکترونیک: aliyehkazemi@ut.ac.ir

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

مقدمه

بر کسی پوشیده نیست که انرژی یکی از حیاتی‌ترین عناصر در توسعه اجتماع انسانی است و بدون وجود انرژی، زندگی انسان در ابعاد مختلف دچار اختلال می‌شود. پس از توسعه صنایع و با گسترش فعالیت‌های تولیدی و ورود انرژی به بخش‌های مختلف از جمله صنایع، حمل و نقل، مصارف خانگی و کشاورزی، سرعت در مصرف انرژی رو به فزونی نهاده و عدم تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی را به دنبال داشته است و حتی در ادامه این روند نیز انتظار می‌رود تقاضای انرژی دارای رشد پرشتاب باشد. بر اساس اطلاعات آژانس بین‌المللی انرژی[1]، میزان مصرف انرژی تا سال ۲۰۲۰ افزایشی حدود ۳۰ درصد را نسبت به دهه گذشته و افزایشی در حدود ۸۰ درصد نسبت به دو دهه گذشته داشته است که نشان از رشد مصرف انرژی دارد. بنابر پیش‌بینی‌های این آژانس انتظار می‌رود با توجه به نیاز روزافزون کشورها به انرژی این روند کماکان رو به رشد باشد. آنچه اکنون به عنوان یکی از بزرگترین مشکلات جهانی، بشر را تهدید می‌کند، بحران کمبود انرژی و آلودگی هوا بر اثر استفاده از سوخت‌های فسیلی است و بر این اساس یکی از مهم‌ترین مباحثی که در چند دهه گذشته مورد توجه اکثر محققان در کشورهای پیشرفته و صنعتی قرار گرفته است جلوگیری از اتلاف منابع انرژی به جهت حل این مشکلات است. اهمیت این بحث همزمان با بروز بحران انرژی در سال‌های نخست دهه هفتاد میلادی، زمانی که تقاضا برای منابع انرژی افزایش یافت روشن شد (ریور، ۲۰۰۵). کشورهایی که در آن دهه وابستگی زیادی به انرژی داشتند به این فکر افتادند که با به‌کارگیری روش‌هایی به مدیریت مصرف انرژی بپردازند. از طرفی در

[1] IEA: International Energy Agency

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

آن دوران آغاز انقلاب صنعتی و حضور پر رنگ سوخت‌های فسیلی به عنوان تامین‌کننده انرژی در این جوامع، ضرورت اتخاذ راهکارهایی را جهت مدیریت مصرف انرژی به این کشورها گوشزد می‌کرد.

کشورهای توسعه یافته که به اهمیت بخش انرژی و مسائل مربوط به آن پی برده بودند دریافتند که مدیریت انرژی تنها توسط تولیدکنندگان انجام نمی‌شود و به اهمیت بخش مصرف‌کنندگان در مدیریت این منبع نیز پی برده شد و مفهومی تحت عنوان مدیریت سمت تقاضا[1] به وجود آمد که تمرکز آن بر روی کنترل مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان است. مدیریت سمت تقاضا یک برنامه مدیریتی مربوط به برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل تمامی فعالیت های اجرایی است که اثرات مطلوبی را بر روی مصرف انرژی می گذارد. در واقع مدیریت سمت تقاضا شامل مجموعه فعالیت‌هایی است که توسط دولت برای تغییر مقدار یا زمان مصرف انرژی توسط مصرف‌کنندگان برای نیل به مزایای رفاه اجتماعی انجام می‌شود (ریور، ۲۰۰۵).

صنعت برق به عنوان یکی از مهمترین منابع انرژی از این قاعده مستثنی نبوده و با توجه به مصرف رو به رشد بخش‌های مختلف از این انرژی، در هر کشوری و به خصوص در کشورهای در حال توسعه نیازمند برنامه‌ریزی است تا تعادل بین عرضه و تقاضا حفظ شود. آمارهای آژانس بین‌المللی انرژی نشان می‌دهد میزان مصرف انرژی الکتریکی در جهان تا سال ۲۰۲۰ به ۲۷۵۰۰ تراوات ساعت رسیده است که این میزان رشدی در حدود ۱۲۰ درصد را نسبت به دهه گذشته نشان می‌دهد. علاوه بر این پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که این میزان مصرف در سال ۲۰۳۰ به حدود ۳۵۰۰۰ تراوات ساعت و در سال ۲۰۴۰ به حدود ۴۲۰۰۰

[1]DSM: Demand Side Management

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

تراوات ساعت خواهد رسید که به ترتیب نسبت به سال ۲۰۲۰ رشدی معادل ۲۷ و ۵۳ درصدی را نسبت به امروز خواهند داشت (گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، ۲۰۲۰).

علی رغم رشد پرشتاب تقاضای انرژی، باید به این نکته توجه داشت که ساخت نیروگاه‌ها و خطوط انتقال انرژی طی مدت زمانی طولانی انجام می‌شود و نمی‌تواند در کوتاه مدت جوابگوی تقاضا باشد و بنابراین موجب عدم تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی می‌گردد که ضمن بوجود آوردن وضعیت دشوار در یک کشور مانعی در جهت برنامه‌های توسعه‌ای می‌شود. همچنین رشد بی‌رویه انرژی موجب افزایش قله‌بار الکتریکی و یا به عبارتی قله مصرف خواهد شد که بروز چنین اتفاقی آسیب‌هایی را برای تامین کنندگان انرژی الکتریکی و نیروگاه‌ها جهت جلوگیری از خاموشی‌های گسترده در ساعاتی خاص به وجود خواهد آورد که علاوه بر از دست دادن رفاه مصرف‌کنندگان موجب هزینه‌های بالایی در بخش مصرف می‌شود.

با توجه به موارد گفته شده ضروری است تدابیری اتخاذ شود تا برنامه‌های مدیریت مصرف در جهت کنترل بحران انرژی با دقتی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش در راستای مدیریت مصرف انرژی به ارائه مدلی پرداخته شده است که بتوان انرژی الکتریکی را در ساختمان‌های مسکونی هوشمند بر مبنای مدل های مدیریت سمت تقاضا و با توجه به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر مدیریت کرد.

ایده اصلی هوشمندسازی خانگی این است که کلیه وسایل الکترونیکی خانه را به یکدیگر و در یک شبکه به نحوی به هم وصل کرد که بتوان آن‌ها را از یک رابط مشترک کنترل کرد و با هم در ارتباط قرار داد. لازم به توضیح است که

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

اگرچه فناوری‌های لازم برای اتوماسیون خانگی جهت هوشمندسازی هم‌اکنون هم در دسترس هستند، اما هزینه‌های اقتصادی و نیز دیدگاه مصرف‌کنندگان مانع از گسترش آن می‌شوند. بر اساس آمارهای ارائه شده تا سال ۲۰۱۲ در آمریکا ۱/۵ میلیون خانه خود را به سیستم اتوماسیون هوشمند مجهز کرده‌اند که این آمار تا پایان سال ۲۰۱۸ به ٤٥ میلیون خانه رسیده است (آمار سازمان تحقیقاتی ABI**، ۲۰۱۲؛ کاوال، ۲۰۱۸). در ایران نیز اگرچه پروژه-های هوشمندسازی خانه‌های مسکونی عمری کمتر از یک دهه دارند اما مزایای ناشی از هوشمند سازی سبب می‌شود تا تحقیقات بیشتری در این خصوص صورت بگیرد. بر اساس آمارهای سازمان بهره‌وری ایران بیشتر منازل مسکونی در ایران به طور متوسط به میزان ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلوات ساعت برحسب مترمربع انرژی مصرف می‌کنند که این میزان مصرف در دسته میزان مصرف غیرقابل قبول قرار گرفته است و می‌توان با اقداماتی از جمله هوشمندسازی، بسیاری از منازل را به دسته میزان مصرف قابل قبول رساند.**

بر این اساس و در جهت هوشمندسازی خانه‌های مسکونی انواع مختلف بارهای خانگی از نظر ماهیت مانند بارهای کنترل‌پذیر[1] و بارهای غیرکنترل‌پذیر به همراه سیستم تولید انرژی خورشیدی و برنامه قیمت زمان استفاده[2] و برنامه پاسخگویی بار اضطراری[3] به عنوان برنامه‌های پاسخگویی بار[4] در نظر گرفته شده است. در این برنامه شرکت‌کنندگان بابت قطع بار در مواقع اضطراری که در آن‌ها قابلیت اطمینان سیستم در خطر است مبلغی را به عنوان جایزه دریافت

[1] Controllable loads and uncontrollable loads
[2] TOU: Time Of Use
[3] EDRP: Emergency Demand Response Program
[4] DR: Demand Response

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

می‌کنند. مبلغ پاداش از پیش اعلام می‌شود و شرکت در این برنامه کاملا اختیاری است و اگر مشترک در برنامه شرکت نکند جریمه‌ای را پرداخت نمی-کند.

در ادامه مقاله، پس از بررسی مبانی نظری و پیشینه پژوهش به روش‌شناسی پژوهش پرداخته شده است. سپس مدل ریاضی متناسب با مساله پژوهش طراحی و حل شده و یافته‌های حاصل از حل مدل تشریح شده است و در نهایت به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهای تحقیق پرداخته شده است.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

امروزه استفاده از سوخت های فسیلی بالاترین درصد تامین انرژی را در دنیا به خود اختصاص داده است و با توجه به رو به اتمام بودن این نوع انرژی، جامعه بشری به مرور متوجه شده است که باید تدابیری را اتخاذ کند تا از سایر منابع انرژی که تجدیدپذیر باشند استفاده کند؛ چرا که انرژی‌های تجدیدپذیر علاوه بر ماندگاری نه تنها در کاهش گرمایش جهانی موثر است، بلکه فرصت‌های اقتصادی تازه ای برای فراهم کردن انرژی میلیون ها انسانی که در نقاط دوردست کره زمین همچنان بدون دسترسی به انرژی زندگی می‌کنند فراهم می‌کند. همانگونه که پیشتر نیز ذکر شد بخش زیادی از انرژی مصرفی الکتریکی در بخش‌های مسکونی استفاده می‌شود و لذا توجه ویژه به بارهای خانگی جهت کنترل مصرف ضروری است. از طرفی بستری که با توجه به رشد علم و فن-آوری فراهم شده زیرساخت های ارتباطی و اطلاعاتی است که سبب هوشمندشدن سیستم‌های قدرت می‌گردد و می‌توان از آن در جهت بهینه‌سازی مصارف استفاده نمود (تیا و همکاران، ۲۰۱۳ و تیل و همکاران، ۲۰۰۷).

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

خانه‌های هوشمند نمونه‌ای است که می‌توان از آن برای مدیریت مصرف با ایجاد زیرساخت‌های ارتباطاتی بهره گرفت. خانه هوشمند شامل یک شبکه داخلی است که با به‌کارگیری فن‌آوری‌های ارتباطی بی‌سیم رایج، تمام تجهیزات خانه را در محیط خانه تحت کنترل دارد و با مدیریت آن سبب کاهش هزینه‌ها و افزایش رفاه و کیفیت زندگی خانوار می‌گردد (آشور و عطیه، ۲۰۱۰). خانه‌هایی که امکان استفاده از سیستم های انرژی تجدیدپذیر و همچنین کنترل بارهای مصرفی را فراهم می‌کنند و از سویی دیگر با اجرای برنامه‌های مدیریت مصرف نقشی موثر در کاهش هزینه‌های خانوار و افزایش رفاه آنان دارند.

نخستین پژوهش‌ها در زمینه ارتباطات خانه هوشمند در بخش انرژی توسط سورندرن و رییدˡ (۲۰۰۵) انجام شد و پیشنهادی مبنی بر هوشمندسازی لوازم ارائه شد تا سیاست‌گذاران انرژی بتوانند ضمن بهبود زیرساخت‌های اساسی زمینه را برای ورود انرژی‌های تجدیدپذیر به خانه فراهم کنند و همچنین مشتریان قادر باشند کنترل تصمیمات مربوط به استفاده از انرژی در خانه را به دست بگیرند.

چنج[2] و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از برنامه زمان‌محور تعرفه زمان استفاده به برنامه‌ریزی زمانبندی بهینه استفاده از وسایل پرداخته و یک مدل عدد صحیح خطی[3] را طراحی نمودند که منجر به کاهش هزینه‌های ساختمان و بهبود نسبت ضریب بار[4] شد. محمد[5] و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از ترکیب برنامه قیمت

---

[1] Surendran and Reid
[2] Cheng
[3] LIP: Linear Integer Programming
[4] Load Factor
[5] Muhammad

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

زمان واقعی[1] و قیمت زمان بحرانی[2] به برنامه زمانبندی استفاده از وسایل خانگی در یک خانه هوشمند پرداختند. نتایج نشان داد هزینه‌های مصرفی به صورت موثری کاهش می‌یابد. مولا و همکاران (۲۰۱۹) به ارائه مدلی با هدف برنامه‌ریزی تعیین زمان بهره‌برداری بهینه لوازم پرداختند و یک مدل ریاضی چندهدفه ارئه دادند تا با استفاده از سیستم تولید انرژی پراکنده ضمن تامین بخشی از انرژی خانه، اهداف مورد نظر شامل بهینه‌سازی هزینه انرژی مصرفی و قله بار و ضریب بار براورده شود. الایسی[3] (۲۰۱۹) یک مدل ریاضی تک هدفه برای کاهش هزینه‌های مصرف‌کننده پیشنهاد داد و بر اساس برنامه‌ریزی زمانبندی استفاده از لوازم ترموستاتی شامل آبگرمکن و تهویه هوا و یخچال و فریزر، هزینه‌های مصرفی خانه کاهش می‌یافت. در این راستا از باتری به عنوان ذخیره‌ساز و از سیستم فتوولتائیک[4] به عنوان انرژی پراکنده استفاده شد. شکوری و کاظمی (۲۰۱۷) مدلی را برای کاهش هزینه‌های مصرفی خانوار و همچنین کاهش قله بار پیشنهاد دادند. در این پژوهش با در نظرگرفتن تعرفه زمان استفاده از وسایل خانه، بهترین زمان برای استفاده از لوازم خانگی مشخص می‌شود. برای برنامه‌ریزی در خصوص توان بهینه مبادله شده بین اجزای خانه، وو و ژیا[5] (۲۰۱۵) به ارائه مدلی تک هدفه و بر مبنای برنامه کنترل مستقیم بار[6] پرداختند و راه حلی بهینه برای بهره‌برداری از سیستم‌های پنل خورشیدی ارائه دادند تا حداکثر استفاده از انرژی تجدیدپذیر در راستای اهداف در نظر گرفته

---

[1] RTP: Real Time Pricing
[2] CPP: Critical Peak Pricing
[3] AL Essa
[4] PV: Photovoltaic System
[5] Wu and Xia
[6] DLC: Direct Load Control

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

شده حاصل شود. ازونگلو[1] و همکارانش (۲۰۱٤) به مدیریت یک خانه هوشمند مسکونی پرداخته و با استفاده از تکنولوژی‌های ارتباطی موجود در یک خانه هوشمند مدلی را پیشنهاد دادند تا بتوان در میزان هزینه‌های انرژی مصرفی صرفه جویی کرد. شکوری و دهناد (۲۰۱۳)، یک مدل چندهدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح برای مدیریت هوشمند بار الکتریکی در خانه‌های هوشمند با رعایت ترجیحات مصرف‌کننده ارائه دادند. نتایج نشان داد با اجرای مدل پیشنهادی می‌توان ضمن ثابت نگه داشتن قله‌بار الکتریکی، هزینه‌های مصرف-کننده را نیز کاهش داد. دو و لو[2] (۲۰۱۱) یک مدلی ریاضی تک هدفه برای کاهش هزینه‌های مصرفی خانوار ارائه نمودند. آنها با توجه به عدم قطعیت در مورد پیش‌بینی قیمت در زمان استفاده و همچنین میزان آب گرم موردنیاز خانوار، از روش بهینه‌سازی دینامیکی تصادفی استفاده کردند. امینیان و جدید (۱۳۹۵) مدیریت انرژی در ساختمان‌های هوشمند با قابلیت داد و ستد انرژی و ایجاد تعادل بین ساختمان‌های هوشمند در امر تبادل انرژی را به عنوان راه-حلی برای افزایش مشارکت مصرف‌کنندگان در امر مدیریت مصرف و بهبود بهره‌وری انرژی در ساختمان‌های مسکونی مورد بررسی قرار دادند. در مدل پیشنهادی برنامه‌ریزی مصرف برق در ساختمان‌های هوشمند و بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع تولید انرژی به صورت برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح بررسی شد.

در جدول ۱ پیشینه پژوهش به صورت خلاصه ارائه شده است.

[1] Uzunoglu
[2] Du and Lu

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

جدول ۱: پیشینه پژوهش

ردیف	نویسنده و سال	نوع مدل ریاضی	روش مدیریت طرف تقاضا	تعداد اهداف		نوع برنامه‌ریزی	
				تک هدفه	چند هدفه	زمانبندی وسایل	تبادل انرژی
۱	چنج و همکاران، ۲۰۲۰	ILP	TOU/RTP		❊	❊	
۲	محمد و همکاران، ۲۰۱۹	ILP	RTP/CPP		❊	❊	
۳	مولا و همکاران، ۲۰۱۹	MINLP[1]	TOU		❊	❊	
۴	الییسا، ۲۰۱۹	ILP	RTP	❊		❊	
۵	شکوری و کاظمی، ۲۰۱۷	MILP[2]	TOU		❊	❊	
۶	وو و ژیا، ۲۰۱۵	ILP	TOU/DLC	❊			❊
۷	ازنگلو، ۲۰۱۴	MILP	TOU	❊		❊	
۸	شکوری و دهناد، ۲۰۱۳	MILP	TOU		❊	❊	
۹	دوو و لو، ۲۰۱۱	ILP	RTP	❊			❊
۱۰	امینیان و جدید، ۱۳۹۵	MILP	RTP	❊			❊
پژوهش حاضر		MILP	EDRP/TOU		❊	❊	❊

بررسی تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که در اکثر تحقیقات قبلی از برنامه‌های مبتنی بر قیمت در مدل‌سازی استفاده شده است و اکثر مدل‌های ارائه شده تک هدفه هستند. همچنین نوع برنامه‌ریزی به کار گرفته شده از نوع برنامه‌ریزی زمانبندی وسایل بوده است. در پژوهش حاضر ضمن در نظر گرفتن اهداف متنوع، برنامه پاسخگویی بار شامل برنامه تعرفه‌زمان استفاده از انرژی (برنامه زمان محور) و برنامه پاسخگویی بار اضطراری (برنامه تشویق محور) به طور همزمان در نظر گرفته شده است. بر این اساس ضمن در نظرگرفتن امکان تبادل انرژی، زمان بهینه برای استفاده از وسایل خانگی مشخص می‌شود. رفاه

[1] MILP: Mixed-integer nonlinear programming
[2] MILP: Mixed Integer Linear Programing

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

مصرف‌کننده نیز مورد نظر است و از انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی نیز استفاده می‌شود. نوآوری‌هایی که پژوهش حاضر را از پژوهش‌های پیشین متمایز می‌سازد عبارتند از:

- **استفاده همزمان از برنامه‌های مبتنی بر تشویق و برنامه تعرفه زمان استفاده از مجموعه برنامه‌های پاسخگویی بار**
- **در نظرگرفتن همزمان بهینه‌سازی زمان استفاده از وسایل خانگی و بهینه‌سازی میزان توان مبادله شده بین اجزای خانه**
- **در نظر گرفتن اهداف مختلف موردنظر تولیدکننده و مصرف کننده انرژی**

روش شناسی پژوهش

پژوهش حاضر بر اساس هدف، پژوهشی کاربردی است و رویکردی توسعه‌ای دارد و از نظر چگونگی جمع آوری داده‌ها تحقیقی غیرآزمایشی است و رویکردی کی دارد و به صورت تک مقطعی داده‌ها گردآوری شده‌اند (سرمد و همکاران، ۱۳۸۵). در این پژوهش در گام اول به بررسی و مرور ادبیات و مبانی نظری پرداخته شده است و در گام دوم مدلسازی ریاضی انجام شده است. مدل ارائه شده یک مدل برنامه‌ریزی عددصحیح مختلط چندهدفه است. در گام بعد داده‌های مورد نیاز پژوهش از سازمان‌های مربوطه شامل وزارت نیرو و سازمان هواشناسی کشور، سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر ایران، شرکت توزیع نیروی برق تهران و آژانس بین المللی انرژی گردآوری شد. سپس به توسعه و حل مدل ریاضی ارائه شده در قالب یک نمونه که ساختمانی در شهر تهران است پرداخته شده است تا کارایی و اعتبارسنجی مدل بررسی شود. در

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

نهایت با بررسی نتایج حاصل از حل مدل و تحلیل آن پیشنهادهایی برای مدیریت مصرف انرژی در ساختمان‌های هوشمند ارائه می‌شود.
قابل ذکر است مدل ارائه شده در این پژوهش محدود به مکان خاصی نیست و برای هر ساختمان هوشمند در هر مکانی با داشتن پارامترهای مدل قابل اجرا است.

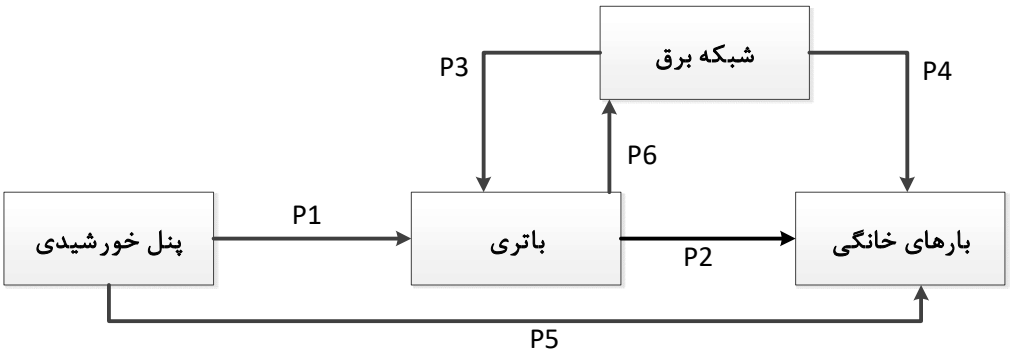
تعریف مساله و طراحی مدل

در این پژوهش ساختمان مسکونی، انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از دو بخش شبکه برق و سیستم انرژی خورشیدی به عنوان منبع تولیدکننده انرژی الکتریکی تجدیدپذیر تامین می‌کند. برای افزایش قابلیت اطمینان در سیستم انرژی خورشیدی و همچنین کاهش هزینه‌های مصرف برق از شبکه، یک ذخیره‌ساز الکتریکی (باتری) نیز در نظر گرفته شده است. بارهای الکتریکی این خانه به سه دسته بارهای الکتریکی به شرح زیر تفکیک شده‌اند:

- **بارهای کنترل‌پذیر قابل جابجایی در زمان مانند ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی و اتو**
- **بارهای الکتریکی کنترل‌پذیر قابل تغییر در قدرت که بین دو محدوده، قابل تنظیم می‌باشند مانند پمپ آب و خودروی الکتریکی**
- **بارهای الکتریکی کنترل‌ناپذیر مانند تهویه هوا، یخچال، اجاق و تلویزیون**

تبادل توان الکتریکی بین بخش‌های مختلف را می‌توان بر اساس فلش‌های مشخص شده به صورت شکل ۱ نشان داد.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]



شکل ۱: ارتباطات انرژی در یک خانه (وو و همکاران، ۲۰۱۵ و آرورا و چانا ۲۰۱۵)

در شکل ۱ نشانگرهای P1 **تا** P6 **عبارتند از**:

P1: **توان الکتریکی که پنل خورشیدی در باتری ذخیره می‌کند تا در مواقع لزوم استفاده شود.**

P2: **میزان توان الکتریکی که بارهای خانگی از باتری استفاده می‌کنند.**

P3: **میزان توان الکتریکی ذخیره شده در باتری توسط شبکه برق**

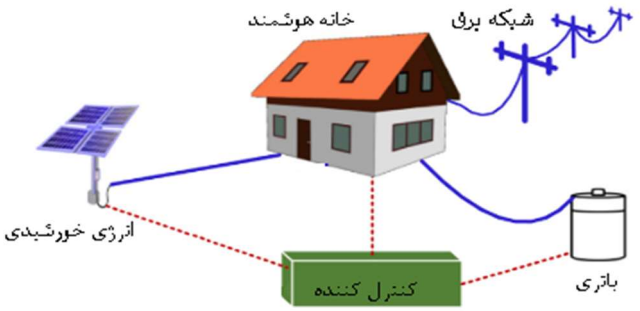
P4: **میزان توان الکتریکی که بارهای خانگی از شبکه دریافت می‌کنند.**

P5: **میزان توان الکتریکی که بارهای خانگی از پنل خورشیدی دریافت می‌کنند.**

P6: **میزان توان الکتریکی که در مواقع لزوم (اوج مصرف) به شبکه برق فروخته می‌شود.**

شکل ۲ دسترسی خانه هوشمند مورد نظر در این پژوهش به انرژی الکتریکی را نشان می‌دهد که با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز و همچنین انرژی دریافتی از شبکه سراسری برق به تامین نیازهای الکتریکی پرداخته می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]



شکل ۲: نیازهای انرژی الکتریکی در یک خانه هوشمند

مفروضات پژوهش عبارتند از:

۱- خانه مورد نظر هوشمند می‌باشد. به عبارتی با بسترهای هوشمند بیسیم کلیه بارهای خانگی امکان اتصال به کنترلر مرکزی جهت کنترل را دارا هستند.

۲- انرژی الکتریکی موردنیاز خانه هوشمند از شبکه سراسری برق و انرژی تجدیدپذیر خورشیدی تامین می‌شود.

۳- امکان فروش انرژی الکتریکی طبق برنامه‌های تشویقی مدیریت سمت تقاضا به شبکه سراسری برق وجود دارد.

٤- سیستم ذخیره‌ساز انرژی (باتری) برای ذخیره اضافی انرژی و به‌کارگیری از آن در مواقع لزوم به تجهیزات اضافه شده است.

٥- تجهیزاتی که در یک خانه هوشمند مورد استفاده قرار می گیرند به صورت هوشمند کنترل می شوند و به شبکه هوشمند خانگی متصل هستند.

٤-۱ متغیرهای تصمیم و پارامترهای مدل

در این بخش متغیرها و پارامترهای مدل معرفی خواهند شد:

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

متغیرها

$p_{buy}(h)$	انرژی دریافتی از شبکه برق در زمان h
P_EDRP (h)	انرژی الکتریکی کاهش یافته در زمان h در اثر شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری
$p_{sell}(h)$	انرژی الکتریکی فروخته شده به شبکه برق در زمان h
P1(h)	انرژی الکتریکی که پنل خورشیدی در زمان h در باتری ذخیره می‌کند.
P2(h)	انرژی الکتریکی که بارهای خانگی در زمان h از باتری دریافت می‌کنند.
P3(h)	انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری توسط شبکه برق در زمان h
P4(h)	انرژی الکتریکی که بارهای خانگی از شبکه در زمان h دریافت می‌کنند.
P5(h)	انرژی الکتریکی که بارهای خانگی در زمان h از پنل خورشیدی دریافت می‌کنند.
P6(h)	انرژی الکتریکی که در زمان h به شبکه برق فروخته می‌شود.
EPL	قله بار الکتریکی
St_a	زمان شروع به کار وسیله کنترل‌پذیر a ام
En_a	زمان پایان کار وسیله کنترل‌پذیر a ام
$p_{dch}(h)$	انرژی دشارژ شده باتری در زمان h
$p_{ch}(h)$	انرژی شارژ شده باتری در زمان h
SOC(h)	وضعیت انرژی موجود در باتری در زمان h
E(h)	مقدار اصلاح خط بار پایه در زمان h
$C_a(h)$	انرژی الکتریکی مصرفی وسیله a در زمان h
C(h)	کل انرژی مصرفی در ساعت h توسط بارهای خانگی

متغیرهای دودویی

$U_a(h)$	کارکرد بار کنترل‌پذیر a ام در زمان h (اگر کار کند ۱ و در غیر اینصورت ۰)
U_a	بردار عدد صحیح دو دویی بارهای کنترل‌پذیر
x(h)	رابطه شارژ شدن باتری در زمان h (اگر باتری در حال شارژ شدن باشد ۱ و در غیر اینصورت ۰ است.)
y(h)	رابطه دشارژشدن باتری درزمان h (اگر باتری درحال دشارژ شدن باشد ۱ و در غیراینصورت ۰)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

$o(h)$	رابطه خرید انرژی از شبکه درزمان h (اگر درحال دریافت انرژی باشیم ۱ و در غیراینصورت ۰)
$n(h)$	رابطه فروش انرژی به شبکه درزمان h (اگر درحال فروش انرژی باشیم ۱ و در غیراینصورت ۰)

پارامترها

$T_{buy}(h)$	تعرفه انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه در زمان h
$T_{sell}(h)$	تعرفه فروش انرژی الکتریکی به شبکه در زمان h
$Re(h)$	پاداش شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری در زمان h
$OTPS_a$	زودترین زمان ترجیحی شروع وسیله کنترل‌پذیر a
$OTPE_a$	دیرترین زمان ترجیحی پایان کار وسیله کنترل‌پذیر a
l_a	طول زمان انجام عملیات وسیله کنترل‌پذیر a
$CBL(h)$	خط بار پایه مصرف‌کننده[1] در زمان h
$p_{pv}(h)$	انرژی الکتریکی تولیدی توسط پنل خورشیدی در زمان h
P_a^{total}	ماتریس الگوی جابجایی بارهای کنترل‌پذیر قابل جابجایی در زمان
DR_a	انرژی مورد نیاز روزانه وسیله a ام
η_{ch}	بازده شارژ باتری
η_{dch}	بازده دشارژ باتری
$\underline{SOC}$	حداقل انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری
$\overline{SOC}$	حداکثر انرژی الکتریکی ذخیره شده در باتری
$\overline{p_{ch}}$	حداکثر ظرفیت شارژ باتری
$\overline{p_{dch}}$	حداکثر ظرفیت دشارژ باتری
$P_a(h)$	انرژی الکتریکی ثابت مصرفی بار کنترل‌پذیر قابل جابجایی a در زمان h
$\overline{P_a}$	بیشینه توان الکتریکی مصرفی بار کنترل‌پذیر قابل تغییردر قدرت a
$\underline{P_a}$	حداقل توان الکتریکی مصرفی بار کنترل‌پذیر قابل تغییردر قدرت a
TC	دمای سلول خورشیدی

[1] Customer baseline load

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

$T_a(h)$	دمای محیط در زمان h
$Wi(h)$	سرعت باد در زمان h
$I_{pv}(h)$	شدت تابش خورشید در زمان h
η_{Tref}	بازدهی سلول خورشیدی
β_{Tref}	ضریب ثابت دمایی
$Tref$	دمای کار استاندارد سلول خورشیدی
η	بازده هر واحد سلول خورشیدی
AC	سطح سلول خورشیدی
η_{in}	نرخ بازدهی مبدل
$\overline{P_{Pv}}$	حداکثر ظرفیت سلول‌های خورشیدی
$P_{solar}(h)$	انرژی تولیدشده توسط سلول خورشیدی در زمان h
$\overline{p_{sell}}$	بیشینه توان الکتریکی فروخته شده به شبکه
$\overline{p_{buy}}$	بیشینه توان الکتریکی خریداری شده
P_a^*	توان الکتریکی ثابت موردنیاز بار کنترل ناپذیر a
$AVG(p_{buy})$	متوسط کل توان مصرفی
WTR_{AVg}	متوسط مدت زمان انتظار بارهای کنترل‌پذیر
$Max\left(p_{buy}(h)\right)$	حداکثر انرژی مصرفی در زمان h

۲-٤ مدل ریاضی

در این بخش مدل ریاضی ارائه شده است. روابط (۱) تا (۳) نشان دهنده اهداف پژوهش هستند که به ترتیب عبارتند از حداقل‌کردن هزینه انرژی الکتریکی مصرفی خانوار، حداقل‌کردن قله بار و حداکثر کردن رفاه مصرف‌کننده در استفاده از وسایل الکتریکی خانگی بر اساس روابط (٤) و (٥). قابل ذکر است مقادیر مربوط به پارامترهای $p_{buy}(h)$ و $p_{sell}(h)$ در تابع هدف (۱) با استفاده از

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

داده‌های مربوط به تعرفه و قوانین خرید و فروش برق وزارت نیرو و داده‌های مربوط به $\mathrm{Re(h)}$ **از سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره وری انرژی برق استخراج شده است.**

$$\mathrm{Min\ F1} = \mathrm{TE}C = \sum_{\mathrm{h}=1}^{24}\{\mathrm{T_{buy}(h)} * \mathrm{p_{buy}(h)} - \mathrm{T_{sell}(h)} * \mathrm{p_{sell}(h)} - \mathrm{P_{EDRP}(h)} * \mathrm{Re(h)}\} \quad (۱)$$

رابطه (۱) میزان هزینه پرداختی نهایی توسط مصرف‌کننده به ریال را نشان می‌دهد که از سه بخش تشکیل شده است. بخش اول یعنی $\mathrm{T_{buy}} * \mathrm{p_{buy}}$ **هزینه خرید برق از شبکه را محاسبه می‌کند، بخش دوم که با** $\mathrm{T_{sell}} * \mathrm{p_{sell}}$ **نشان داده شده است، دریافت ناشی از فروش برق را در زمان‌های مورد نیاز نظیر اوج بار نشان می‌دهد و در بخش سوم** $\mathrm{P_{EDRP}} * \mathrm{Re}$ **پاداش ناشی از مشارکت مصرف‌کننده در برنامه پاسخگویی بار اضطراری را محاسبه می‌کند.**

$$\mathrm{Min}\ F2 = EPL \quad (۲)$$

$$\mathrm{Min\ F3} = WTR_{AVg} = \frac{\sum_{a=1}^{n}(St_a - OTPS_a)}{\sum_{a=1}^{n}(OTPE_a - OTPS_a - l_a)} \quad , \quad \forall a \in TSA \quad (۳)$$

رابطه (۲) قله بار الکتریکی را نشان می‌دهد. در رابطه (۳) با حداقل‌سازی زمان انتظار بارهای کنترل‌پذیر می‌توان رفاه کاربر را در استفاده از وسایل افزایش داد (ناصر و همکاران، ۲۰۱۹؛ مولا و همکاران، ۲۰۱۹؛ بین و همکاران، ۲۰۱۵). به عبارتی هرچه زمان شروع استفاده از وسیله کنترل‌پذیر مورد نظر مصرف‌کننده (St_a) **به زمان شروع ترجیحی اعلام شده** $(OTPS_a)$ **نزدیک‌تر باشد، رفاه بیشتر می‌شود. مقدار** $\mathrm{WTR}_{\mathrm{A}vg}$ **همواره بین صفر و یک است. اگر مقدار** $\mathrm{WTR}_{\mathrm{A}vg} = 0$ **شود به این معنی است که بهترین حالت برای ترجیح مصرف‌کننده در نظر گرفته شده است و وسیله کنترل پذیر دقیقاً موقعی مورد استفاده**

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

قرار گرفته است که مصرف کننده تمایل داشته است استفاده کند و اگر $\mathrm{WTR_a} = 1$ شود به معنی این است که برنامه‌ریزی در آخرین لحظات برای استفاده مصرف‌کننده از بار کنترل‌پذیر صورت گرفته است و از رفاه مصرف کننده دور شده است.

در رابطه (٤) و (٥) مقدار $U_a(h)$ متغیری دو دویی است که اگر بار کنترل پذیر قابل جابجایی در زمان aام در زمان h عمل کند مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر خواهد گرفت.

$$\mathrm{St_a} = \sum_{h=OTPS_a}^{OTPE_a - l} h * U_a(h) \quad , \qquad \forall \mathrm{a} \in \mathrm{TSA} \tag{٤}$$

$$\sum_{h=OTPS_a}^{OTPE_a - l} U_a(h) = 1 \quad , \quad \forall\ U_a \in \{0,1\}, \quad \forall\ a \in TSA \tag{٥}$$

رابطه (٦) میزان بار کاهش یافته در اثر شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری را محاسبه می‌کند. در این برنامه شرکت‌کنندگان بابت قطع بار در مواقع اضطراری که قابلیت اطمینان سیستم در خطر است مبلغی را به عنوان جایزه دریافت می‌کنند. مبلغ پاداش از پیش اعلام می‌شود و شرکت در این برنامه کاملا اختیاری است و اگر مشترک در برنامه شرکت نکند جریمه ای را پرداخت نمی‌کند. بنابراین پس از اعلام نیاز به کاهش بار، شرکت‌کنندگان می‌توانند از هزینه تشویقی صرف‌نظر کرده و مصرف خود را کاهش ندهند. روش اندازه‌گیری میزان پاداش در برنامه‌های پاسخگویی بار بر اساس اختلاف دو عامل خط مبنا[1] و بار مصرف شده است. بار مبنا، میانگین بار ۵ روز اخیر مصرفی مشترک قبل از اجرای برنامه‌های پاسخگویی بار است و بار مصرف شده، توان

[1] Customer Base-line Load

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

مصرف اندازه‌گیری شده در زمان رویداد برنامه پاسخگویی بار است. اختلاف بار مبنا از بار مصرف شده نیز بیانگر بار کاهش یافته است.

$$P_{EDRP}(h) = [CBL(h) + E(h)] - \mathrm{p_{buy}(h)} \ , \qquad \forall h \in H \qquad (٦)$$

رابطه (۷) مجموع انرژی موردنیاز بارهای الکتریکی را در خانه هوشمند نشان می‌دهد. محدودیت شماره (۸) همانگونه که در شکل ۱ نیز مشخص است نشان می‌دهد که نیازهای انرژی الکتریکی هر یک از بارهای خانگی باید از یکی از سه منبع شبکه و یا باتری و یا سیستم انرژی خورشیدی تامین شود.

$$C(h) = \sum_{a=1}^{n} C_a(h) \ , \qquad \forall\, h \in H \qquad (۷)$$

$$\sum_{a=1}^{n} C_a(h) = P4(h) + P2(h) + P5(h) \qquad (۸)$$

در رابطه (۹) نشان داده شده است که حداکثر به اندازه EPL **انرژی مصرف می‌شود و رابطه (۱۰) نیز تضمین می‌کند که انرژی مورد نیاز بارهای الکتریکی در زمان مورد نظر در دسترس باشند (لوکشگوپتا و همکاران ,۲۰۱۹ ;شکوری و کاظمی ,۲۰۱۷).**

$$p_{buy}(h) \le EPL \ , \qquad \forall h \in H \qquad (۹)$$

$$\sum_{h=1}^{24} C_a(h) = DR_a \ , \qquad \forall a \in A \qquad (۱۰)$$

رابطه (۱۱) نشان می‌دهد که کل نیازهای انرژی الکتریکی بارهای خانگی باید از یکی از سه منبع شبکه و یا باتری و یا سیستم انرژی خورشیدی تامین شود. قابل ذکر است $C_a(h)$ در رابطه (۸) میزان مصرف بارهای خانگی a**ام (کنترل پذیر یا کنترل ناپذیر) را به تفکیک در زمان** h **محاسبه می‌کند، و $C(h)$ در رابطه (۱۱) مصرف کلیه بارها را همزمان در زمان** h **محاسبه می‌کند.**

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

$$C(h) = P2(h)+P4(h) + P5(h) \quad , \quad \forall h \in H \tag{۱۱}$$

روابط (۱۲) تا (۱٦)وضعیت تبادلات انرژی بین بخش‌های مختلف خانه را با توجه به شکل (۱) مشخص می‌کنند. به ترتیب روابط (۱۲) تا (۱٤) میزان انرژی دریافتی از پنل خورشیدی، انرژی دشارژ شده از باتری، انرژی خریداری شده از شبکه، انرژی فروخته شده به شبکه و میزان شارژی باتری را از منابع مختلف مشخص می‌کند.

$$p_{pv}(h) = P1(h) + P5(h) \tag{۱۲}$$

$$p_{dch}(h) = P6(h) + P2(h) \tag{۱۳}$$

$$p_{buy}(h) = P3(h) + P4(h) \tag{۱٤}$$

$$p_{sell}(h) = P6(h) \tag{۱۵}$$

$$p_{ch}(h) = P3(h) + P1(h) \tag{۱٦}$$

رابطه (۱۷) تا (۱۹) مدل‌سازی مربوط به بارهای کنترل‌پذیر قابل جابجایی در زمان را مشخص می‌کند. مقدار U_a یک متغیر دودویی است و اگر بار کنترل‌پذیر قابل جابجایی در زمان h روشن باشد مقدار یک و در غیر اینصورت مقدار صفر را خواهد گرفت. P_a^{total} در رابطه (۱۸)، ماتریسی است که الگوی جابجایی بارهای کنترل‌پذیر قابل جابجایی در زمان را مشخص می‌کند و بر اساس این ماتریس می‌توان الگوی جابجایی بارهای کنترل پذیر قابل جابجایی در زمان را بر اساس ترجیحات مصرف کننده مشخص کرد. رابطه (۱۹) نشان می‌دهد که تنها یک متغیر $U_a(h)$ مقدار غیرصفر و برابر با ۱ می‌گیرد. به عبارتی این رابطه مشخص می‌کند که زمان شروع به کار بارکنترل پذیر قابل جابجایی در زمان چه ساعتی است و با مشخص شدن مقدار $U_a(h)$ که متغیری دودویی است و با استفاده از ماتریس P_a^{total} الگوی مصرفی بار کنترل پذیر مورد نظر بر

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

اساس رابطه (۱۷) شکل خواهد گرفت. یعنی رابطه (۱۷) میزان توان مصرفی بارهای کنترل‌پذیر در هر ساعت را محاسبه می‌کند.

$$C_a(h) = U_a * P_a^{total} \ , \ U(h) = [U_a(1), U_a(2), \dots . U_a(24)] \ , \ \forall\, a \in TSA \quad (۱۷)$$

$$P_a^{total} = \begin{bmatrix} P_a(1) & P_a(24) & \dots & P_a(2) \\ P_a(2) & P_a(1) & \dots & P_a(3) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_a(24) & P_a(23) & \dots & P_a(1) \end{bmatrix} \ , \ \forall\ a \in TSA \quad (۱۸)$$

$$\sum_{h=1}^{24} U_a(h) = 1 \ , \ \forall\ U_a \in \{0,1\}, \ \forall\ a \in TSA \quad (۱۹)$$

رابطه (۲۰) مربوط به بارهای کنترل‌پذیر قابل تغییر در قدرت است. بارهای کنترل‌پذیر قابل تغییر در قدرت بین دو مقدار حداقل و حداکثر توان مصرفی خود قرار می‌گیرند. بر این اساس حل مدل مشخص خواهد کرد که در چه زمانی و بر اساس کدام قدرت کار کنند.

$$\underline{P_a} \le C_a(h) \le \overline{P_a} \ , \ \forall\ a \in PSA \ , \ \forall\ h \in [h_a^{\,s}, h_a^{\,s+1}, \dots . h_a^{\,e}] \quad (۲۰)$$

رابطه (۲۱) مربوط به بارهای غیر قابل کنترل است. این نوع بارها یک میزان ثابت توان مصرفی دارند که با $P_a^{\,*}$ مشخص شده‌اند. در این محدودیت مشخص شده است که بارهای کنترل‌ناپذیر در ساعت مورد نظر به اندازه موردنیاز خود انرژی مصرفی در اختیار داشته باشند.

$$C_a(h) \ge P_a^{\,*} \ , \ \forall\ a \in NSA \ , \ \forall\ h \in [h_a^{\,s}, h_a^{\,s+1}, \dots . h_a^{\,e}] \quad (۲۱)$$

رابطه (۲۲) مدل‌سازی مربوط به محدودیت پنل خورشیدی را نشان می‌دهد. طبق این رابطه انرژی خروجی سیستم سلول‌های خورشیدی در هر روز بر حسب ضرایب ثابت (η_{in} و η_{Tref} و β_{Tref}) و پارامترهایی مثل سرعت باد (wi)، شدت تابش خورشید (I_{pv}) و دمای محیط (T_a) محاسبه می‌شود. وابستگی میان

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

دمای سلول خورشیدی و پارامترهای ذکر شده بر اساس مقاله شوینگ (۲۰۱۳) استخراج شده است.

$$P_{pv}(h) = \eta_{in}\big(\eta_{Tref}\big[1 - \beta_{Tref}(T_a(h) + I_{pv}(h) * e^{-3.473-0.0594*wi(h)} - Tref)\big] * I_{pv}(h) * AC\big) \quad (۲۲)$$

روابط (۲۳) تا (۲۷) مدل‌سازی مربوط به ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهد و به کمک این محدودیت ها همچنانکه در شکل (۱) نیز مشخص است انرژی در ساعات لزوم در باتری ذخیره می‌شود و در ساعات مورد نیاز به شبکه فروخته می‌شود و یا در شبکه خانگی مصرف می‌شود. رابطه (۲۷) نشان می‌دهد در یک زمان مشخص، ذخیره‌ساز یا حالت شارژشدن و حالت دشارژ شدن است و امکان اینکه شارژ و دشارژ شدن به طور همزمان وجود ندارد.

$$SOC(h) = SOC(h-1) + \eta_{ch} * p_{ch}(h) * \Delta h - \left(\frac{1}{\eta_{dch}}\right) * p_{dch}(h) * \Delta h \,, h \geq 1 \quad (۲۳)$$

$$\underline{SOC} \leq SOC(h) \leq \overline{SOC} \quad (۲٤)$$

$$0 \leq p_{ch}(h) \leq \overline{p_{ch}} * x(h) \quad , \quad x(h) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (۲۵)$$

$$0 \leq p_{dch}(h) \leq \overline{p_{dch}} * y(h) \quad , \quad y(h) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (۲٦)$$

$$x(h) + y(h) \leq 1 \quad (۲۷)$$

روابط (۲۸) تا (۳۰) محدودیت‌های مربوط به تبادلات انرژی با شبکه را نشان می‌دهند. رابطه (۳۰) نشان می‌دهد در یک زمان مشخص، می‌توان از شبکه برق خرید و یا به شبکه برق فروخت و امکان خرید و فروش به طور همزمان وجود ندارد.

$$0 \leq p_{sell}(h) \leq \overline{p_{sell}} * o(h) \quad , \quad o(h) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (۲۸)$$

$$0 \leq p_{buy}(h) \leq \overline{p_{buy}} * n(h) \quad , \quad n(h) = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \quad (۲۹)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

$$o(h) + n(h) \leq 1 \qquad (۳۰)$$

حل مدل

با توجه به اینکه مدل مذکور یک چندهدفه است برای حل مدل از روش برنامه‌ریزی آرمانی[1] استفاده شده است. برنامه‌ریزی آرمانی از کاربردی‌ترین روش‌های تحقیق در عملیات است که برای اولین بار توسط چارنز و کوپر (۱۹۹۵) ارائه گردید. در برنامه‌ریزی آرمانی راه حرکت همزمان به سوی چندین هدف (حتی متضاد با هم) مهیا می‌گردد. روش برنامه‌ریزی آرمانی به منظور ارضای نسبی اهداف زمانی که تصمیم گیرنده نمی‌تواند تمام اهداف را بصورت دلخواه ارضا کند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این راستا، پس از مشخص کردن میزان انحراف از آرمان‌ها، تابع هدف جدیدی با هدف کمینه کردن مجموع میزان انحراف از آرمان‌ها تشکیل می‌شود و اهداف قبلی به عنوان محدودیت به مساله اضافه می‌شوند. قابل ذکر است برای مشخص کردن آرمان برای هر تابع هدف، مساله یک بار با تابع هدف مورد نظر حل شده است و بهترین مقدار برای آن تابع هدف به دست آمده است. این مقدار به عنوان آرمان برای تابع هدف مذکور در نظر گرفته شده است. مدل پیشنهادی با استفاده از داده‌های واقعی مصرفی یک منزل مسکونی با مشخصات جدول ۲ حل شده است.

[1]GP: Goal Programming

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

جدول ۲: وسایل خانگی و الگوی توان مصرفی (شکوری و کاظمی، ۲۰۱۷)

نوع بار	وسیله	زمان استفاده	مدت زمان (ساعت)	مصرف (کیلووات)
بار کنترل پذیر قابل جابجایی در زمان	ماشین لباسشویی	۲۴ ساعته	۲	ساعت اول ۱ ساعت دوم ۱ ترجیح مصرف کننده: ۱۳ الی ۱۸
	ماشین ظرفشویی	۲۴ ساعت	۲	ساعت اول ۱ ساعت دوم ۰/۸ ترجیح مصرف کننده: ۱۷ الی ۲۲
	اتو	۱۸ الی ۲۳	۱	۱/۴ ترجیح مصرف کننده: ۱۸ الی ۲۳
بار کنترل ناپذیر	تهویه هوا	۱۰ الی ۲۰	۱۰	۱/۵
	یخچال	۱۲ ال ۲۴	۲۴	۰/۱۰۴
	اجاق	۶ الی ۷ و ۲۰ الی ۲۱	۱	۰/۹
	تلویزیون	۲۱ الی ۲۴	۳	۰/۱۶
بار کنترل پذیر قابل تغییر در قدرت	خودرو الکتریکی	۲۰ الی ۹	۴	۰/۱ –۱/۶
	پمپ آب	۲۴ ساعت	۷	۰/۱۲۵ – ۰/۹

این داده‌ها مربوط به خانه‌ای هوشمند در یک منطقه مسکونی در شهر تهران است که برنامه‌ریزی در آن برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در روز بعد و بر اساس ترجیحات اعلام شده مصرف‌کننده است. به عنوان مثال بارهای ماشین لباسشویی، ماشین ظرفشویی و اتو که به عنوان بارهای کنترل‌پذیر قابل جابجایی در زمان دسته‌بندی شده‌اند این قابلیت را دارند تا در طول روز و بر اساس زمان ترجیحی اعلام شده از سوی مصرف‌کننده جابجا شوند. اگر چه می‌توان از ماشین لباسشویی در ۲٤ ساعت شبانه روز استفاده کرد اما مصرف‌کننده ترجیح داده است تا از این وسیله در ساعات ۱۳ الی ۱۸ استفاده کند و از طرفی مدت زمان کارکرد ماشین لباسشویی ۲ ساعت است که در هر ساعت به اندازه ۱

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

کیلووات توان مصرف می‌کند. در ارتباط با این نوع وسیله هر چه از ساعت ابتدایی ترجیحی یعنی ساعت ۱۳ دورتر شویم و زمان شروع به کار آن را به ساعت انتهایی نزدیک شود نشان‌دهنده کاهش رفاه مصرف‌کننده است. سایر بارهای متعلق به این گروه نیز همین وضعیت را دارند. بارهای کنترل ناپذیر مانند تهویه هوا، یخچال، اجاق و تلوزیون قابلیت جابجایی را ندارند و دقیقا باید در زمان اعلام شده شروع به کارکنند و پایان یابند. پمپ‌آب و خودروی الکتریکی نیز که در دسته بار کنترل پذیر قابل تغییر در قدرت قرار می‌گیرند باید در مدت زمان اشاره شده کارکنند. این نوع بارها می‌توانند با توان مختلف در طول زمان مشخص شده شارژ شوند.

اطلاعات مربوط به تعرفه خرید و فروش انرژی در جدول ۳ و جدول ٤ نمایش داده شده است. لازم به توضیح است که تعرفه‌ها بر اساس تعرفه‌های مشترکین خانگی سال ۱۳۹۹ مناطق عادی برای یکی از روزهای فصل تابستان که بیشترین مصرف را در بین سایر فصل‌ها داراست و میزان متوسط مصرف ماهانه ۳۰۰ کیلووات ساعت و کمتر دارند استخراج شده‌اند. همچنین فرض شده است خانه هوشمند در شهر تهران قرار دارد. ضمناً به میزان بار کاهش یافته نسبت به خط بار پایه مصرف‌کننده (بار مبنا) در ساعت‌های قله بار نیز پاداش مشارکت تعلق میگیرد. میزان پاداش مشارکت نسبت به بار کاهش یافته به ازای هر کیلووات برابر ۲۰۰۰ ریال در هر ساعت است. ساعات قله بار ساعت ۲۰ الی ٢٤ و ساعات کم باری ۲ الی ۱۰ صبح است. سایر ساعات به عنوان ساعات میان باری در نظر گرفته می‌شود. سایر اطلاعات مورد نیاز شامل دما و سرعت باد و شدت تابش

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

خورشید نیز از اداره هواشناسی دریافت شده‌اند. پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، مدل ریاضی پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار GAMS[1] اجرا شد.

جدول ۳: تعرفه های خرید انرژی از شبکه در فصل تابستان (وزارت نیرو، ۱۳۹۹)

انرژی مصرفی ماهانه (کیلووات ساعت)	قیمت پایه (ریال بر کیلووات ساعت)
۰ تا ۱۰۰	۵۶۱
مازاد بر ۱۰۰ تا۲۰۰	۶۵۴
مازاد بر ۲۰۰ تا۳۰۰	۱۴۰۲
مازاد بر ۳۰۰ تا۴۰۰	۲۵۲۲
مازاد بر ۴۰۰ تا۵۰۰	۲۸۹۸
مازاد بر ۵۰۰ تا۶۰۰	۳۶۴۵
مازاد بر۶۰۰	۴۰۲۰

جدول ٤: تعرفه فروش انرژی به شبکه (وزارت نیرو، ۱۳۹۹)

ظرفیت	تعرفه (ریال بر کیلووات ساعت)
۱۰۰ کیلووات و کمتر	۹۱۰۰
۲۰ کیلووات و کمتر	۱۰۴۰۰

یافته‌های پژوهش

در جدول ۵ نتایج حاصل از حل مدل به تفکیک اهداف نشان داده شده است. در بهترین حالت میزان هزینه‌ها برای یک شبانه‌روز ۲۱۵۸۲/٦۳۷ ریال و میزان رفاه مصرف‌کننده (مقدار کمتر میزان مطلوب را نشان می‌دهد) ۰/۱ و قله بار الکتریکی ۲/۱۲۹ است. مدل برنامه‌ریزی آرمانی استفاده شده در حل مدل این پژوهش تلاش می‌کند تا حداقل انحرافات را از مقادیر گفته شده داشته باشد.

[1] GAMS: General Algebraic Modeling System

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

ذکر این نکته ضروری است که در برنامه‌ریزی‌ها فرض شده است امکان فروش انرژی به شبکه وجود دارد و امکان مشارکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری نیز فراهم است و مصرف‌کننده در برنامه پاسخگویی بار اضطراری مشارکت می‌کند.

جدول ۵: نتایج حاصل از حل مدل به تفکیک اهداف مورد نظر

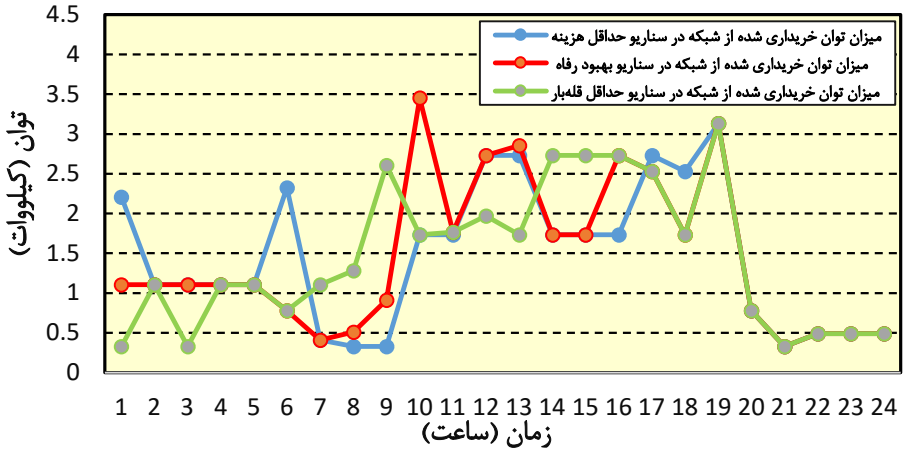
هدف	هزینه (ریال در یک شبانه‌روز)	رفاه مصرف کننده	قله بار الکتریکی (کیلووات)
هزینه (ریال در یک شبانه‌روز)	۲۱۵۸۲/۶۳۷	۰/۲	۳/۲۰۴
رفاه مصرف کننده	۲۴۰۴۲/۰۲۸	۰/۱	۳/۲۳۵
قله بار الکتریکی (کیلووات)	۲۴۱۲۳/۰۱۲	۰/۳	۲/۱۲۹

شکل ۳ وضعیت خرید انرژی از شبکه در ساعات مختلف از روز را بر اساس اهداف متفاوت نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است با استفاده از اهداف متفاوت می‌توان برنامه‌ریزی‌های متفاوتی را برای خرید انرژی از شبکه در نظر گرفت.

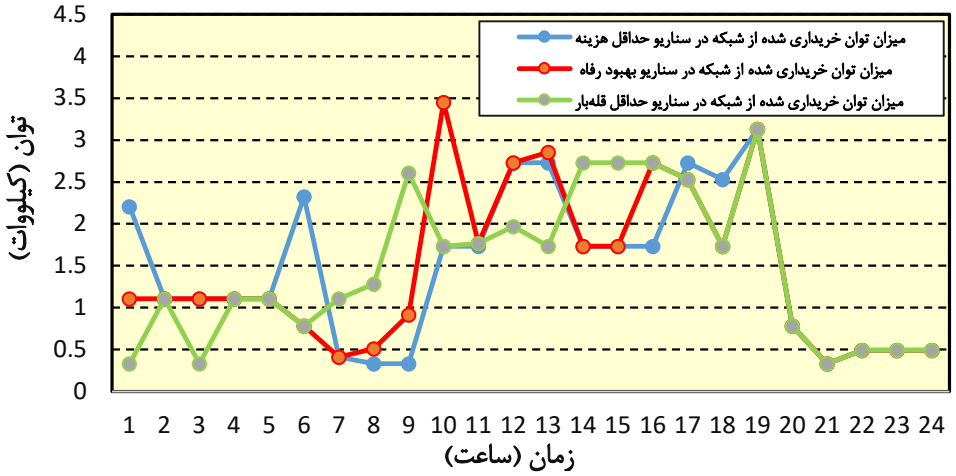
در شکل ٤ وضعیت مصرف وسایل الکتریکی در ساعات مختلف روز بر اساس اهداف متفاوت نمایش داده شده است. اختلاف توان مصرفی ناشی از مصرف وسایل در خانه که در شکل ٤ نمایش داده شده است با وضعیت خرید انرژی از شبکه که در شکل ۳ نمایش داده شده است به وسیله انرژی ذخیره شده در باتری و یا مستقیماً توسط سیستم انرژی خورشیدی تامین می‌گردد. همانگونه که پیشتر ذکر شد در مدل ارائه شده علاوه بر برنامه‌ریزی زمان استفاده از وسایل

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

در خانه هوشمند، به برنامه‌ریزی تبادل توان بین اجزای متفاوت خانه هوشمند نیز تاکید شده است.



شکل ۳: وضعیت خرید انرژی از شبکه با اهداف متفاوت



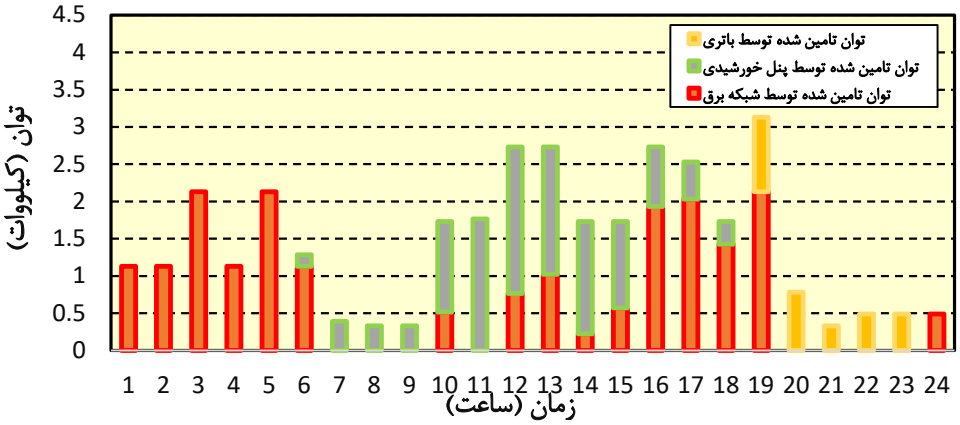
شکل ٤: وضعیت میزان مصرف وسایل در خانه هوشمند در ساعات مختلف با در نظرگرفتن اهداف متفاوت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

جدول ٦ نتایج حل مدل را با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی نشان می‌دهد. در اینجا میزان اهمیت تمام اهداف یکسان در نظر گرفته شده است. در شکل ٥ نیز می‌توان میزان نیاز مصرف‌کننده به انرژی در ساعات مختلف در یک شبانه روز و نحوه تامین آن از بخش‌های مختلف را ملاحظه کرد.

جدول ٦: نتایج حاصل از حل مدل با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی

هدف	هزینه (ریال در یک شبانه روز)	رفاه مصرف‌کننده	قله‌بار الکتریکی (کیلووات)
نتایج	۲۱۹٤۹/۰۷۹	۰/۱	۲/۱۲۹



شکل ٥: میزان نیاز مصرف کننده به انرژی مصرفی روزانه و نحوه تامین

جدول ۷ حالتی را نشان می‌دهد که مصرف‌کننده تمایل نداشته است در برنامه پاسخگویی بار اضطراری شرکت کند. در این صورت از مقایسه با جدول ٦ مشخص است مصرف‌کننده به دلیل اینکه از پاداش ناشی از شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری صرف‌نظر کرده است هزینه‌ها به میزان قابل توجهی

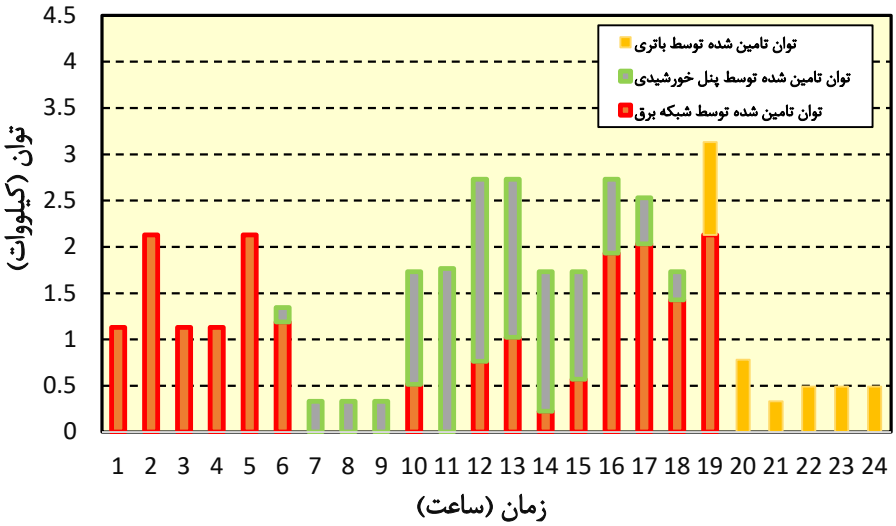
[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

افزایش داشته است. شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری در ساعات اوج مصرف می‌تواند مزایایی هم برای مصرف کننده و هم تولیدکننده ایجاد کند.

جدول ۷: برنامه‌ریزی بهینه با سناریو شرکت نکردن در برنامه پاسخگویی بار اضطراری

هدف	هزینه (ریال در یک شبانه روز)	رفاه مصرف کننده	قله‌بار الکتریکی (کیلووات)
نتایج	۲۳۵۱۸/۷۰۲	۰/۱	۲/۱۲۹

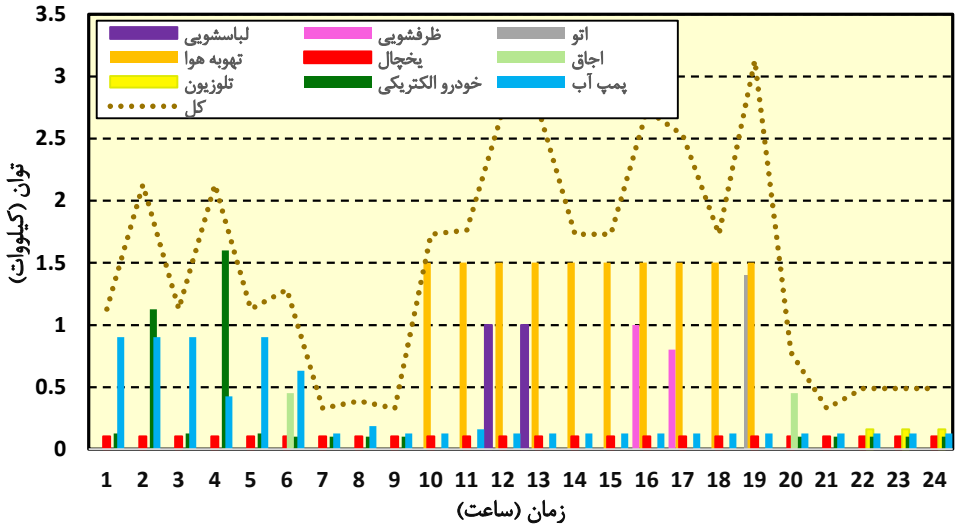
شکل ٦ میزان نیاز مصرف‌کننده به انرژی روزانه و نحوه تامین آن را در حالتی نشان می‌دهد که مصرف کننده تمایلی نداشته در برنامه پاسخگویی بار اضطراری که یک برنامه داوطلبانه است شرکت کند و از پاداش ناشی از مشارکت در آن استفاده کند.



شکل ٦: میزان نیاز مصرف کننده به انرژی روزانه و نحوه تامین آن بر اساس سناریو شرکت نکردن در برنامه پاسخگویی بار اضطراری

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

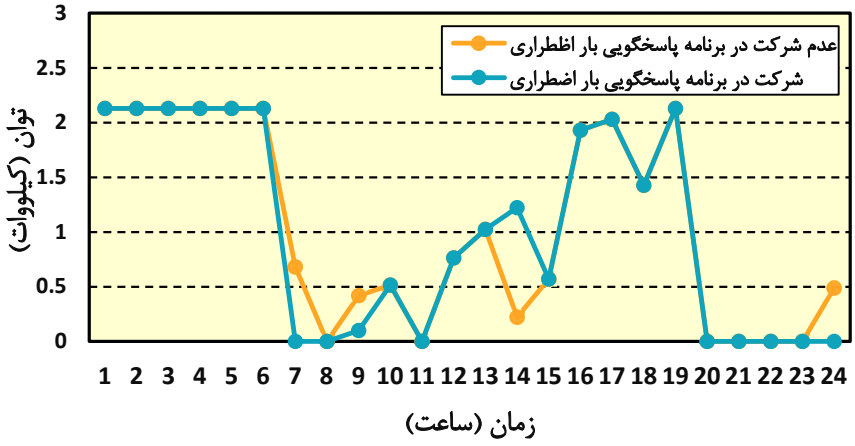
در شکل ۷ کارکرد وسایل مختلف در زمان‌های متفاوت شبانه روز نمایش داده شده است. در اینجا می‌توان نحوه تنظیم بارهای قابل جابجایی در زمان و بارهای قابل تغییر قدرت را مشاهده نمود. به عنوان مثال بارهایی نظیر خودروی الکتریکی یا پمپ آب که از جمله بارهای قابل تغییر در قدرت هستند به نحوی در طول روز تغذیه شده‌اند که در ساعات غیرقله با حداکثر توان خود و در ساعات قله مصرف با حداقل توان خود مشغول به کار باشند تا اهداف مد نظر در پژوهش برآورده شوند. بارهایی نظیر ماشین لباسشویی و ماشین ظرفشویی که از جمله بارهای قابل تغییر در زمان هستند نیز همچنانکه مشخص است به نحوی برنامه‌ریزی شده‌اند تا علاوه بر اینکه زمان مصرفشان به جهت کاهش هزینه و برآورده کردن هدف کاهش حداقل هزینه از زمان‌های اوج مصرف فاصله گرفته است، در قالب زمان‌های اعلام شده از مصرف کننده قرار گرفته‌اند تا رفاه مصرف‌کنندگان در استفاده از چنین وسایلی نیز در نظر گرفته شود.



شکل ۷: وضعیت کارکرد وسایل الکتریکی در ساعات مختلف روز

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

شکل ۸ وضعیت خرید انرژی را در ساعات مختلف روز در صورت شرکت در برنامه پاسخگویی باراضطراری و یا عدم شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری نشان می‌دهد و همچنانکه مشخص است در صورتی که مصرف‌کننده در برنامه پاسخگویی بار اضطراری شرکت نکند در ساعات قله مصرف، نسبت به کاهش بار خود اقدام نکرده و این عامل سبب افزایش هزینه‌های مصرف‌کننده می‌شود و از طرفی نیز ممکن است مشکلاتی برای تولیدکننده انرژی الکتریکی در تامین انرژی الکتریکی در ساعات اوج ایجاد شود.



شکل ۸: برنامه‌ریزی خرید انرژی در ساعات مختلف روز

براساس شکل ۸ حداکثر قله بار به اندازه ۲/۱۲۹ کیلووات است که در ساعات ۱ تا ٦ و ساعت ۱۹ اتفاق افتاده است. کمترین میزان صفر است و در این ساعات انرژی مورد نیاز خانه توسط انرژی ذخیره شده در باتری و یا انرژی تولید شده پنل‌های خورشیدی تامین می‌شود. به عبارتی در ساعات ۷ الی ۹ و ۱۱ که ساعات غیر اوج و ۲۰ الی ۲٤ که ساعات قله مصرفی است از شبکه برق، انرژی خریداری

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

نشده است تا هزینه کل کاهش یابد. همچنین چنانچه از شکل ۷ مشخص است، نیاز مصرف در ساعت ۱۹ به اندازه ۳/۱۲۹ بوده است بر اساس شکل ۸ قله بار در این زمان برابر با ۲/۱۲۹ است. چراکه اختلاف انرژی مورد نیاز خانه از طریق سیستم تبادل انرژی (باتری) در خانه هوشمند تامین می‌شود.

بر مبنای مدل ارائه شده، مصرف‌کننده قادر است میزان هزینه‌های خود را با مشارکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری که یک برنامه اختیاری و داوطلبانه است، به میزان ۱۹/۵ درصد کاهش دهد. همچنین اگر مصرف‌کننده تمایل نداشته باشد در برنامه پاسخگویی بار اضطراری شرکت کند، با توجه به برنامه‌ریزی زمان استفاده از وسایل خانگی می‌تواند به میزان ۵ درصد هزینه‌های خود را کاهش دهد و تمامی این موارد با درنظرگرفتن رفاه مصرف‌کننده است. همچنین بر مبنای مدل ارائه شده قله بار الکتریکی از ۳/۲۳۵ به ۲/۱۲۹ (۳٤ درصد) کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مساله مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی بارهای خانگی در یک خانه هوشمند مورد بررسی قرار گرفت و یک مدل برنامه‌ریزی خطی عددصحیح مختلط چندهدفه برای مدیریت بار در ساختمان‌های مسکونی هوشمند ارائه شد. خروجی این مدل زمان شروع به کار وسایل الکتریکی و همچنین وضعیت تبادل انرژی در خانه هوشمند را ارائه می‌دهد. این مدل شامل اهداف چندگانه‌ای است که هم مصرف‌کننده و هم تولیدکننده را در نظر می‌گیرد. اهداف در نظر گرفته شده شامل حداقل کردن هزینه انرژی مصرفی مصرف‌کننده و حداقل کردن قله‌بار الکتریکی با در نظر گرفتن هدف رفاه

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

مصرف کننده است. مدل ارائه شده برنامه‌های زمان محور و مشوق محور شامل برنامه قیمت زمان استفاده و برنامه پاسخگویی بار اضطراری که از مجموعه برنامه‌های پاسخگویی بار هستند را به طور همزمان در نظر می‌گیرد. ضمن استفاده از انرژی خورشیدی و باتری، تبادل انرژی بین قسمت‌های مختلف خانه و شبکه برق نیز امکان‌پذیر است.

نتایج اجرای مدل برای یک خانه هوشمند در شهر تهران، نشان داد هزینه‌های مصرف‌کننده در صورت شرکت در برنامه پاسخگویی بار اضطراری نسبت به قبل حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. قله بار الکتریکی نیز به میزان حدود ۳٤ درصد کاهش می‌یابد. همچنین در صورتی که مصرف‌کننده در برنامه پاسخگویی بار اضطراری مشارکت نکند به دلیل زمانبندی مناسب برای استفاده از وسایل، به میزان حدود ۵ درصد هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

با توجه به نتایج حاصل به سیاستگذاران پیشنهاد می‌شود با اجرای برنامه‌های متنوع پاسخگویی بار، شامل برنامه‌های مشوق محور و همچنین برنامه‌های قیمت زمان استفاده که در این پژوهش به آن پرداخته شد، در راستای تحقق سیاست‌های کلی اصلاح الگوی مصرف شامل هدفگذاری برای کاهش شاخص شدت انرژی به حداقل یک دوم میزان کنونی در برنامه ششم توسعه گام بردارند.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن عدم اطمینان مربوط به برخی از پارامترهای مدل نظیر میزان تولید انرژی خورشیدی، مدل را توسعه داد. همچنین پیشنهاد می‌گردد اهداف دیگری از جمله حداکثرکردن ضریب بار نیز در نظر گرفته شود و مدل برای چندین ساختمان هوشمند به طور همزمان اجرا و نتایج آن بررسی شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

تقدیر و تشکر

این مقاله، نتیجه طرح تحقیقاتی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) با کد ۹۹۰۱۸۶۱۹ است و همچنین مورد حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (CISSC) بوده است.

منابع:

- **اعلمی، حبیب‌اله، یوسفی، غلامرضا و پارسامقدم، محسن (۱۳۸۷)، تاثیر برنامه‌های پاسخ گویی بار بر منحنی مصرف برق روزانه کشور، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، ٦ (٤)، ۳۰۸ - ۳۱٦.**
- **امینیان، مهدی و جدید، شهرام (۱۳۹۵)، مدیریت انرژی بهینه در ساختمان‌های هوشمند با قابلیت داد و ستد انرژی، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، ۱۳ (۳)، ۱۰۵ - ۱۱٦.**
- **سرمد، زهره، بازرگان، عباس و حجازی، الهه (۱۳۸۵)، روش‌های تحقیق در علوم رفتاری، تهران: انتشارات آگاه.**
- **شرکت توزیع نیروی برق استان تهران،** https://www.tvedc.ir
- **سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق،** http://www.satba.gov.ir
- **سازمان هواشناسی کشور،** https://www.irimo.ir
- **وزارت نیرو، تعرفه و قوانین و مقررات فروش برق،** https://tariff.moe.gov.ir

ABI Research (2012). 1.5 Million Home Automation Systems Installed in the US This Year. www.abiresearch.com.

- Ashour. H.. & Attia. I. I. (2010). Energy Saving Through Smart Home. The Online Journal on Power and Energy Engineering (OJPEE).
- Al Essa. M. J. M. (2019). Home energy management of thermostatically

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

controlled loads and photovoltaic-battery systems. Energy. 176. 742–752.
- Bin. Z.. Khan. M. A.. Javaid. N.. Mahmood. A.. Khan. Z. A.. & Alrajeh. N. (2015). A generic demand-side management model for smart grid. International Journal of Energy Research. 39(7). 954–964.
- Charnes. A., Cooper, W. W., & Ferguson, R. O. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. Management science, 1(2), 138-151.
- Chen. X.. Wei. T.. & Hu. S. (2013). Uncertainty-aware household appliance scheduling considering dynamic electricity pricing in smart home. IEEE Transactions on Smart Grid. 4(2). 932–941 .
- Cheng. P. H.. Huang. T. H.. Chien. Y. W.. Wu. C. L.. Tai. C. S.. & Fu. L. C. (2020). Demand-side management in residential community realizing sharing economy with bidirectional PEV while additionally considering commercial area. International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 116.
- Cavvale, M. (2018). The Impact Of The Digital Revolution On The Smart Home Industry.
- Dehnad, A., & Shakouri G., H. (2013). A novel model of intelligent electrical load management by goal programming for smart houses, respecting consumer preferences. Energy and Power Engineering, 5, 622-627.
- Du. P.. & Lu. N. (2011). Appliance commitment for household load scheduling. IEEE Transactions on Smart Grid. 2(2). 411–419.
- ESMAP. (2005). Deman-side management in China restructured power industry. The Word Bank (ESMAP).
- International Energy Agency report (2020), Electricity consumption, World 1990-2020, https://www.iea.org
- Lokeshgupta. B.. & Sivasubramani. S. (2019). Multi-objective home energy management with battery energy storage systems. Sustainable Cities and Society. 47.
- Molla. T.. Khan. B.. Moges. B.. Alhelou. H. H.. Zamani. R.. & Siano. P. (2019). Integrated energy optimization of smart home appliances with cost-effective energy management system. CSEE Journal of Power and Energy Systems. 5(2). 249–258.
- Muhammad. H.. Javaid. N.. Khan. zahoor ali. Mussadaq. F.. Akhtar. M.. & Abbas. reza abid. (2019). Towards Efficient Energy Management in a

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]

Smart Home Using Updated Population. In International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 33(926), 39-52.
- River. C. (2005). Primer on demand side management. Report for the World Bank.
- Reed. W. L. (2005). Toward a sustainable energy future. Paper presented at the 23rd West Coast Energy Management Congress 2005, EMC 2005, 1-4. Retrieved from www.scopus.com
- Schwingshackl. C.. Petitta. M.. Wagner. J. E.. Belluardo. G.. Moser. D.. Castelli. M.. & Tetzlaff. A. (2013). Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation. Energy Procedia. 40. 77-86.
- Shakouri G.. H.. & Kazemi. A. (2017). Multi-objective cost-load optimization for demand side management of a residential area in smart grids. Sustainable Cities and Society. 32. 171–180.
- Surendran. K. S., & Leung, H. (2005). An analog spread-spectrum interface for power-line data communication in home networking. IEEE Transactions on Power Delivery, 20(1), 80-89.
- doi:10.1109/TPWRD.2004.838468
- Taele. B. M., Gopinathan, K. K., & Mokhuts'oane, L. (2007). The potential of renewable energy technologies for rural development in Lesotho. Renewable Energy, 32(4), 609-622.
- Tascikaraoglu. A.. Boynuegri. A. R.. & Uzunoglu. M. (2014). A demand side management strategy based on forecasting of residential renewable sources: A smart home system in Turkey. Energy and Buildings. 80. 309–320.
- Yu. T.. Kim. D. S.. & Son. S. Y. (2013). Optimization of scheduling for home appliances in conjunction with renewable and energy storage resources. International Journal of Smart Home. 7(4). 261–272.
- Weather Underground Commercial company: https://www.wunderground.com
- Wang. C.. Zhou. Y.. Jiao. B.. Wang. Y.. Liu. W.. & Wang. D. (2015). Robust optimization for load scheduling of a smart home with photovoltaic system. Energy Conversion and Management. 102. 247–257.

Wu. Z.. Tazvinga. H.. & Xia. X. (2015). Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system. Applied Energy. 148. 294–304.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2025-07-04]