

مدیریت مصرف در خانه با رعایت تاثیر تقاضاهای کنترل محیطی در تقاضاهای زمان محدود

امیر صمدی^۱، دانشجوی دکتری؛ حسین سعیدی^۲، استاد؛ محمد امین لطیفی^۳، استادیار؛ مهدی مهدوی^۴، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - samadi@cc.iut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - hsaidi@cc.iut.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - latify@cc.iut.ac.ir

۴- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان - ایران - m_mahdavi@cc.iut.ac.ir

چکیده: در این مقاله براساس تقسیم‌بندی تقاضاها و در نظر گرفتن ویژگی‌های شخص خانه‌دار، به ارائه یک مدل جدید برای سیستم مدیریت مصرف در خانه‌های هوشمند آینده پرداخته می‌شود. پس از تعریف دو نوع از تقاضاهای خانگی که عبارتند از تقاضاهای زمان محدود و تقاضاهای کنترل محیطی، با ارائه روندی استدلالی، تابع مطلوبیت سهمی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. تابع مطلوبیت ارائه شده دارای این ویژگی خاص است که می‌تواند براساس نیازها و خصوصیات فردی شخص خانه‌دار شکل‌دهی شود. همچنین مدل معرفی شده برای تابع مطلوبیت به گونه‌ای است که تأثیر فعال سازی هم‌زمان دو تقاضای زمان محدود و کنترل محیطی را در نظر گرفته و به همین جهت روش سنتی جمع کردن مطلوبیت‌ها را با ضرب جایگزین کرده است. نشان می‌دهیم که برای داشتن برنامه‌ریزی بهینه تقاضاهای خانگی، لازم است برای هر تقاضا مقادیر چهار پارامتر خاص مشخص و به سیستم برنامه‌ریز مرکزی مستقر در خانه هوشمند اطلاع داده شود. با توسعه روابط ریاضی، مدلی مبتنی بر برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح (MINLP) ارائه می‌شود که امکان حل مسئله را با نرم‌افزارهای تجاری در دسترس فراهم می‌کند. با تعریف چند سناریو براساس شرایط شبه‌واقعی، مدل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بررسی نتایج عددی، نشان‌دهنده قابل قبول بودن آن‌ها از نظر بهینگی و تطابق با شرایط واقعی در تجارب انسانی است. نتایج به دست آمده مؤید امکان به‌کارگیری مدل جدید برای مدیریت مصرف در خانه‌های هوشمند آینده است.

واژه‌های کلیدی: شبکه‌های هوشمند، پاسخ‌گویی تقاضا، سیستم‌های مدیریت انرژی در خانه هوشمند، تابع مطلوبیت.

Smart Home Energy Management based on Tasks Interaction

Amir Samadi¹, PhD student; Hossein Saidi², Professor; Mohammad Amin Latify³, Assistant Professor; Mehdi Mahdavi⁴, Associate professor

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, samadi@cc.iut.ac.ir

2- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, hsaidi@cc.iut.ac.ir

3- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, latify@cc.iut.ac.ir

4- Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, m_mahdavi@cc.iut.ac.ir

Abstract: In this paper we introduced two types of common household demand, time limited and controlling demands. In this model based on the idea of mutual interaction between these two demands, we propose a new model for home load management. After assigning an innovative concave utility-function model for each demand, we change the common method of summing up the individual utility-functions with multiplication. The introduced model is developed as a MINLP problem that can be successfully handled by available commercial software. The analysis of the numerical examples indicates that they are acceptable in terms of optimality and compliance with actual conditions in human experience.

Keywords: Smart grids, demand response (DR), smart home energy management systems, task classification, utility function.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۸

نام نویسنده مسئول: محمد امین لطیفی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اصفهان - دانشگاه صنعتی اصفهان - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

از دیگر کاستی‌های مهم در کارهای قبلی عدم ارایه یک تابع مطلوبیت مشخص برای هر دسته از دستگاه‌های خانگی بوده که هنوز به‌عنوان یک مسئله تحقیقاتی مطرح است [۲۲]. در حالی که در برخی از کارها مانند [۷] و [۲۰]، نویسندگان از توابع ساده خطی برای تعریف تابع مطلوبیت مورد نظر خود استفاده کرده‌اند، در برخی دیگر مانند [۵]، [۱۸] و [۱۹]، نویسندگان یک الگو و شکل کلی از توابع درجه دو یا لگاریتمی را صرفاً به‌عنوان مثال جهت استفاده در تحلیل‌ها، آورده‌اند. تنها شرط در انتخاب تابع برای این مقالات محدب بودن تابع بوده که به این ترتیب تغییر در شکل تابع تاثیری در اهداف مقاله نخواهد داشت.

در این مقاله با داشتن نگاهی تازه به مقوله مصرف خانگی، به معرفی مدلی جدید برای برنامه‌ریزی مصارف در خانه هوشمند آینده پرداخته می‌شود. نحوه تقسیم‌بندی مصارف در این مقاله به‌گونه‌ای است که در تعریف خود شامل دو گروه مهم از دستگاه‌های معمول در خانه‌ها خواهد بود. با فرض این که اصولاً هر مصرف خانگی یک تقاضا از طرف شخص خانه‌دار تلقی شود، پس از تعریف دو نوع از تقاضاهای خانگی یعنی تقاضاهای زمان محدود و تقاضاهای کنترل محیطی، با ارایه روندی استدلالی، تابع مطلوبیت سهموی به آن‌ها اختصاص داده می‌شود.

تابع مطلوبیت ارایه‌شده دارای این ویژگی خاص است که می‌تواند بر اساس نیازها و خصوصیات فردی شخص خانه‌دار شکل‌دهی شود. همچنین مدل معرفی‌شده برای تابع مطلوبیت به‌گونه‌ای است که تأثیر فعال‌سازی هم‌زمان این دو تقاضا را در نظر گرفته و به همین جهت روش سنتی جمع‌کردن مطلوبیت‌ها را با ضرب جای‌گزین کرده است. نشان داده می‌شود که برای داشتن برنامه‌ریزی بهینه تقاضاهای خانگی، لازم است برای هر تقاضا مقادیر چهار پارامتر که هر کدام دارای تعریف خاص بوده، مشخص و به سیستم برنامه‌ریز مرکزی مستقر در خانه هوشمند اطلاع داده شود.

با توسعه روابط ریاضی، مدلی مبتنی بر بهینه‌سازی غیرخطی آمیخته با اعداد صحیح^۴ (MINLP) ارائه می‌شود که امکان حل روابط را با نرم‌افزارهای رایانه‌ای فراهم می‌کند. با تعریف چند سناریو بر اساس شرایط شبه‌واقعی به ارزیابی مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود.

لازم به ذکر است که هدف اصلی ما در این مقاله تدوین چارچوب برای برنامه‌ریزی مصارف تعریف شده توسط خانه‌دار، است که در آن اطلاعات مربوط به تعرفه برق به‌صورت مدل تعرفه زمان مصرف^۵ (TOU) دریافت می‌شود. در این مدل، تعرفه برق مصرفی برای یک روز آینده توسط شرکت توزیع برق مشخص شده و به اطلاع مشترکین خانگی رسانده می‌شود. بنابراین زمینه اصلی این پژوهش در ارتباط با مباحث مدل‌های اقتصادی و برنامه‌های پاسخ‌گویی بار به‌طور خاص نیست.

در بخش دوم این مقاله به تشریح مدل پیشنهادی برای دسته‌بندی مصارف خانگی و نوع تابع مطلوبیت متناسب به هر دسته پرداخته

در طراحی خانه‌های هوشمند، یک سیستم مدیریت مصرف مرکزی وجود دارد که علاوه بر دریافت تقاضاهای مصرف خانگی از بخش مصرف، به‌طور خودکار با واحدهای رایانه‌ای مرکز توزیع برق در ارتباط بوده و تعرفه زمانی برق را دریافت می‌نماید [۱]. این سیستم با تکیه بر این اطلاعات و با رعایت قیود و شرایط تعریف‌شده، اقدام به تولید یک برنامه‌ریزی مناسب برای فعال‌سازی مصارف و تقاضاهای مشترک خانگی یا همان خانه‌دار^۲ می‌نماید.

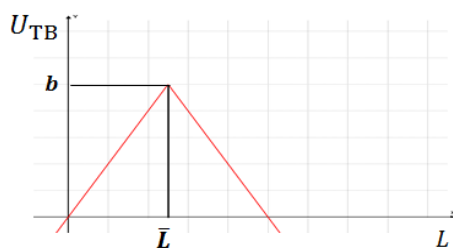
در کارهای قبلی انجام شده در زمینه مدیریت مصرف خانگی، چند مسئله مهم دیده می‌شود که ضرورت کار بیشتر روی آن‌ها احساس می‌شود. از جمله این مسائل، یکی نحوه دسته‌بندی تجهیزات و مصارف خانگی و دیگری ارایه یک مدل مناسب ریاضی برای تابع مطلوبیت^۳ هر دسته است.

کارهای انجام‌شده در مورد موضوع اول از نظر نوع نگاه به مسئله دارای تنوع زیادی است. به‌عنوان مثال در برخی از مقالات مانند [۶-۲]، نویسندگان تجهیزات خانگی را در بدو امر به کنترل‌پذیر (یا معمولی) و کنترل‌ناپذیر، تقسیم کرده‌اند. یک دستگاه کنترل‌ناپذیر دستگاهی است که به محض درخواست فعال شدن، فعال شده و بدون هیچ توقفی تا پایان به کار خود ادامه بدهد. دستگاه‌هایی همچون تلویزیون، رایانه و یا لامپ روشنایی جزء این دسته آورده شده‌اند. از طرف دیگر یک دستگاه کنترل‌پذیر یا معمولی، دستگاهی است که با دریافت درخواست از طرف خانه‌دار می‌تواند با تأخیر روشن شده و همچنین در میانه کار می‌تواند با وقفه روبرو شود. ماشین لباس شویی، ظرف‌شویی و نیز پمپ تخلیه استخر در این مجموعه آورده شده‌اند.

در [۷-۹]، فرض کنترل‌پذیری همه تجهیزات به این صورت مطرح شده است که استفاده از هر دستگاهی یا در حوزه زمان شیفت‌پذیر بوده و یا در سطح توان مصرفی شیفت‌پذیر (کنترل‌پذیر) است. ماشین لباس شویی برای شیفت‌پذیر زمانی و شارژر خودرو برای شیفت‌توانی مثال زده شده‌اند.

در ادامه مباحث مربوط به برنامه‌ریزی بهینه استفاده از تجهیزات خانگی، موضوع دومی که مطرح می‌شود نوع طرح مسئله بهینه‌سازی است. در پاره‌ای از مقالات مانند [۲]، [۴]، [۸]، [۱۰-۱۴]، صرفاً هزینه مالی برق مصرفی به‌عنوان هدف بهینه‌سازی در نظر گرفته شده و نویسندگان سعی دارند تا با کنترل مستقیم روی مصارف، تعادلی بین جمع هزینه مصارف و محدودیت‌های موجود برقرار نمایند.

از طرف دیگر در مقالات متعدد دیگر مانند [۵]، [۶]، [۱۹-۱۵] و [۲۰]، هنگام بحث در مورد مسئله بهینه‌سازی، نویسندگان علاوه بر موضوع اولیه هزینه مالی، موضوع انتقال یا بهره‌دریافتی خانه‌دار از اجابت تقاضاهای درخواستی وی را نیز در نظر گرفته‌اند. مقوله‌ای که در مقالات با اقتباس از مفاهیم موجود در علوم اقتصاد، تحت‌عنوان تابع مطلوبیت از آن یاد می‌شود [۲۱].



شکل ۱: نمایش مدل مثلثی تابع مطلوبیت

این امر این است که انسان‌ها نمی‌توانند برای مدت نامحدود به فعالیت ادامه دهند. به همین دلیل در این مقاله این گونه از فعالیت‌های انسان‌محور که در آن کاربرد یک دستگاه در کنار یک فرد معنی پیدا می‌کند "تقاضاهای زمان محدود" نامیده شده‌اند. مثال‌های دیگری از تقاضاهای زمان محدود عبارتند از: مطالعه (که در آن صرفاً دستگاه‌هایی مانند تهویه مطبوع کار می‌کند)، تماشا تلویزیون، کار با جاروی برقی، ورزش با تردمیل و غیره.

برای تعیین تابع مطلوبیت یک تقاضای زمان محدود به ویژگی اصلی این فعالیت‌ها که در تعریف آن‌ها مستتر است توجه می‌شود. این ویژگی عبارت است از تناسب میزان بهره‌وری خانه‌دار از دستگاه با طول زمان بهره‌برداری از آن. ساده‌ترین مدل ریاضی برای توصیف این تناسب، یک تابع مثلثی مانند شکل ۱، خواهد بود.

در این مدل، مطلوبیت تقاضا به صورت خطی نسبت به طول مدت فعالیت افزایش یافته تا این که زمان کار با دستگاه به حداکثر میزان قابل قبول برسد، جایی که نام آن نقطه اشباع یا آستانه خستگی گذاشته می‌شود. از این نقطه به بعد با افزایش مدت بهره‌برداری، به دلیل خستگی کاربر و عدم تمایل به ادامه کار، مطلوبیت حاصله نه‌تنها بیشتر نشده بلکه کاهش خواهد یافت. به این ترتیب رابطه ریاضی زیر را می‌توان به عنوان پیشنهاد اولیه برای مطلوبیت تقاضای زمان محدود ارائه نمود:

$$U_{TB}(L) = b \left[-\frac{1}{L} \left| L - \bar{L} \right| + 1 \right] \quad (3)$$

در اینجا U_{TB} میزان مطلوبیت، \bar{L} حداکثر زمان مطلوب کار با دستگاه و L طول مدت فعالیت با دستگاه (مثلاً رایانه) است.

در این نگاه به مطلوبیت، شیب منحنی پارامتری مهم بوده و در واقع نمایش‌گر میزان تمایل خانه‌دار به ادامه کار با دستگاه است. در ادبیات مربوط به علم اقتصاد خرد و در مبحث نظریه رفتار مشتری، شیب تابع مطلوبیت، اصطلاحاً مطلوبیت مرزی یا حاشیه‌ای نامیده شده و بیان‌گر میزان افزایش رضایت‌مندی مشتری به ازای مصرف یک واحد بیش‌تر از کالا یا خدمات مورد نظر است. در این نظریه، نرخ تغییرات مطلوبیت مرزی (یا همان مشتق دوم تابع مطلوبیت) همیشه باید منفی باشد که به قانون DMU^۶ شناخته می‌شود [۲۱]. طبق این قانون مطلوبیت مرزی در شروع بیشترین مقدار را داشته که به تدریج کاهش یافته و در نقطه‌ای موسوم به نقطه اشباع به صفر می‌رسد. مطلوبیت مرزی پس از این مرحله، منفی شده که مبین تولید کاهش رضایت‌مندی خواهد بود.

می‌شود. بخش سوم مقاله به موضوع تاثیر شرایط محیطی در مطلوبیت تقاضاهای زمان محدود و ترکیب تابع مطلوبیت کامل می‌پردازد. در بخش چهارم به تشریح مثال‌های عددی منطبق با مدل ارائه پرداخته شده و نتایج به دست آمده مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سرانجام در بخش آخر به جمع‌بندی مطالب و ذکر گام‌های بعدی پرداخته می‌شود.

۲- مدل کلی و نحوه تقسیم‌بندی دستگاه‌های خانگی

۲-۱- معرفی کلی

در این مقاله با فرض این که هر مصرف‌کننده برای ساس نوعی تقاضا از طرف خانه‌دار به وجود می‌آید، دستگاه‌های خانگی را براساس نوع تقاضای مرتبط با آن دسته‌بندی می‌شود. همچنین در این مقاله این واقعیت که برخی از تقاضاها بر برخی دیگر، از نظر میزان رضایت‌مندی خانه‌دار دارای تاثیر هستند، مورد توجه قرار گرفته است.

فرض دیگر مهم در این مقاله تعریف وجود یک محدوده کاری روزانه (مثلاً از ساعت ۸ صبح تا ۴ بعدازظهر) برای اجابت تقاضاهای خانه‌دار است. اندازه این بازه به تعداد مساوی برش زمانی با طول Δt تقسیم می‌شوند.

چنانچه مجموعه همه برنامه‌ریزی‌های ممکن در سیستم فوق‌الذکر X و متغیر TP به عنوان بهره‌نهایی مصرف‌کننده خانگی از اجابت تقاضاهای تعریف شده وی در نظر گرفته شود، آنگاه مسئله مدیریت مصرف در خانه هوشمند به یک مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر قابل تبدیل است:

$$TP = \max_{x \in X} \left(\sum_i U_i(x) - \sum_j Cost_j(x) \right) \quad (1)$$

s. t. CNTS

در رابطه فوق $U_i(x)$ تابع مطلوبیت تقاضای نام تحت برنامه‌ریزی X و نیز $Cost_j(x)$ هزینه فعال‌سازی دستگاه j ام تحت همان برنامه‌ریزی است. به این ترتیب:

$$Cost_j(x) = \Delta t \sum_t p_j^t(x) \lambda^t \quad (2)$$

که p_j^t توان دستگاه j ام در برش زمانی t ام و نیز λ^t تعرفه برق شهری در همان برش زمانی است.

۲-۲- تقاضاهای زمان محدود

فرض کنید یک خانه‌دار برای یکی از نیازهای روزانه خود مانند محاسبات، اینترنت، بازی و غیره، می‌خواهد از رایانه استفاده نماید. برای برنامه‌ریزی زمان فعال‌سازی این تقاضا، اولین قدم تعیین بازه مطلوب برای مدت زمان استفاده است. به عبارت دیگر باید معلوم شود برای چه فاصله زمانی این فعالیت رایانه‌ای برای خانه‌دار بیشترین مطلوبیت (رضایت‌مندی) و برای چه مدت کار کمترین مطلوبیت را در پی خواهد داشت.

به‌طور کلی هر تقاضایی که در آن یک دستگاه در کنار عامل انسانی فعال شود، در بازه زمانی عمل‌کرد با محدودیت روبرو خواهد بود. دلیل

نسبت مطلوبیت متناظر با این دو سطح یعنی پارامتر μ_{TB} ($0 \leq \mu_{TB} \leq 1$) نیز تصمیم‌گیری نماید. این بدان معنی است که از نظر شخص خانه‌دار، کاهش مدت بهره‌برداری از دستگاه از مقدار مطلوب به حداقل قابل قبول، چه میزان عدم رضایت در پی دارد. باتوجه به روابط قبلی به دست می‌آید:

$$U(L_{min}) = b_{TB} \mu_{TB} \quad (5)$$

و بنابراین:

$$a_{TB} = \frac{1 - \mu_{TB}}{(L_{min} - \bar{L})^2} \quad (6)$$

هر چه قدر که μ_{TB} ، بزرگ‌تر باشد، اثر کاهش طول مدت فعالیت تقاضا بر کاهش مطلوبیت کمتر بوده که این به معنی μ_{TB} پایین‌تر و نسبت به تغییرات زمان فعالیت خواهد بود. به همین جهت در این مقاله عبارت $(1 - \mu_{TB})$ شاخص حساسیت مطلوبیت نامیده شده است. در تحلیل‌های عددی نشان داده می‌شود که این عبارت تاثیر قابل توجهی بر نتایج برنامه‌ریزی مدیریت مصرف خواهد داشت.

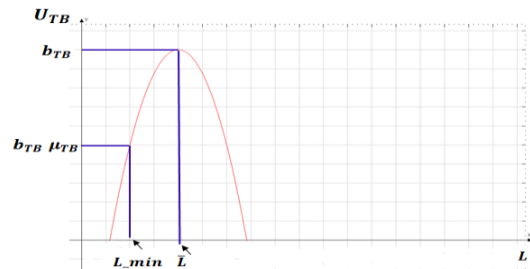
به این ترتیب خانه‌دار با مشخص کردن چهار پارامتر b_{TB} ، L_{min} ، \bar{L} و μ_{TB} ، برای یک تقاضای زمان محدود، تابع مطلوبیت مربوطه را به طور کامل و براساس ویژگی‌ها و نیازمندی‌های فردی خود تعیین می‌نماید.

به این ترتیب مشاهده می‌شود که مدل تابع مطلوبیت معرفی شده در این مقاله دارای این ویژگی است که علاوه بر این که با حس کلی انسانی نسبت به تغییرات تقاضا هم‌خوانی دارد، در عین حال با یکی از قوانین پایه در علم اقتصاد خرد یعنی DMU نیز در تطابق است. در عین حال شخص خانه‌دار قادر است میزان مطلوبیت و در واقع رضایت‌مندی خود از فعال شدن تقاضا را براساس نیازها و ترجیحات خود شکل دهد.

در مدل پیشنهادی این مقاله، تقاضاهای زمان محدود به صورت وقفه‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. این بدان معنی است که خانه‌دار فعالیت زمان محدود خود را ادامه داده تا به اتمام برسد. باین حال اگر خانه‌دار بخواهد در حین فعالیت تعریف شده، زمان‌های استراحتی را داشته یا این که بخواهد فعالیت دیگری را انجام دهد، وی می‌تواند تقاضا زمان محدود را به چند زیرفعالیت وقفه‌ناپذیر مجزا و کوچک‌تر تقسیم کرده به گونه‌ای که هر کدام دارای مشخصات و محدوده زمانی معینی باشند. بنابراین در این مقاله یک تقاضای زمان محدود همواره پیوسته و وقفه‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شود.

برای این که بتوان خاصیت وقفه‌ناپذیری را به صورت روابط ریاضی قابل فهم در اختیار نرم‌افزارهای بهینه‌سازی قرار داد، در این مقاله از مدل موسوم به برنامه‌ریزی غیرخطی توأم با اعداد صحیح (MINLP) استفاده شده است.

در ابتدا دو متغیر باینری مرتبط با تقاضای زمان محدود تعریف می‌شود. برای یک برش زمانی t ، $TB_{onst}(t) \in \{0, 1\}$ یک متغیر باینری است که فعال بودن یا نبودن تقاضای زمان محدود مورد نظر را مشخص می‌کند. همچنین متغیر باینری $TB_{fnst}(t)$ نشان‌دهنده وضعیت اتمام تقاضای زمان محدود در برش زمانی t است. به این ترتیب به منظور



شکل ۲: نمایش مدل مربعی برای تابع مطلوبیت یک فعالیت

در خصوص یک تقاضای زمان محدود، هنگامی که خانه‌دار در زمان شروع کار با دستگاه مورد نظر (مثلاً رایانه) قرار دارد، تمایل وی برای فعالیت، نسبتاً زیاد خواهد بود. این بدان معنی است که در این مقطع زمانی، خانه‌دار به‌ازای افزایش یک واحد زمانی بهره‌برداری بیشتر از دستگاه، مطلوبیت بیشتری را دریافت می‌نماید. اما به تدریج که مدت فعالیت خانه‌دار افزایش می‌یابد، تمایل وی برای طولانی‌تر کردن کار با دستگاه کمتر و کمتر شده تا جایی که در نزدیکی آستانه خستگی این تمایل تقریباً صفر خواهد بود. به عبارت دیگر در این مقطع، نرخ یا سرعت افزایش مطلوبیت به‌ازای افزایش مدت بهره‌برداری، به صفر نزدیک می‌گردد.

بر مبنای استدلال فوق، اکنون می‌توان تابع مطلوبیت را از حالت خطی ساده ارتقاء داده و به صورت یک تابع مربعی مثلاً یک سهمی شبیه شکل ۲، تبدیل کرد. تمام توصیف‌هایی که برای تفاوت نرخ تغییرات مطلوبیت در ابتدا و انتهای طول زمانی فعالیت ارائه گردید در شکل ۲، دیده می‌شود. بنابراین می‌توان تابع مطلوبیت یک تقاضای زمان محدود را به صورت زیر بهبود داد:

$$U_{TB}(L) = b_{TB}[-a_{TB}(L - \bar{L})^2 + 1] \quad (4)$$

در رابطه فوق، سه پارامتر مهم دیده می‌شود که با تنظیم در ست آن‌ها می‌توان تابع مطلوبیت را متناسب با شرایط و نیازهای شخصی خانه‌دار، شکل‌دهی کرد. قبلاً پارامتر \bar{L} تعریف شده است. اما پارامتر b_{TB} ، در واقع تعیین‌کننده بیش‌ترین میزان مطلوبیتی است که خانه‌دار می‌تواند از اجابت تقاضای خود به دست آورد. این پارامتر وابسته به خصوصیات فردی بوده و از شخصی تا شخص دیگر می‌تواند متفاوت باشد. باتوجه به این که در معادله بهینه‌سازی واحد (دیمانسیون) مؤلفه‌های جمع شونده مطلوبیت و هزینه باید از یک جنس باشد، لازم است واحد پارامتر b_{TB} را به نحوی تعریف نمود که با واحد بخش هزینه یکسان باشد. به همین دلیل در این مقاله نام این پارامتر "ارزش معادل پولی" گذاشته شده است.

ضریب a_{TB} ، فاکتور مهمی است که انحنای منحنی سهمی را بر مبنای شرایط و حساسیت‌های شخص خانه‌دار تنظیم می‌کند. این ضریب بر مبنای حداقل مدت بهره‌برداری قابل قبول یا L_{min} ، و میزان مطلوبیت متناظر با این مقدار، مشخص می‌گردد (شکل ۲). در واقع هنگامی که خانه‌دار برای تقاضای زمان محدود خود، حداکثر و حداقل مدت بهره‌برداری (L_{min}, \bar{L}) را مشخص می‌نماید، لازم است تا در مورد

می‌کند. بنابر این اگر $p_k(t)$ ، توان لحظه ای دستگاه مرتبط با تقاضا زمان محدود k و با توان نامی P_k باشد، می‌توان نوشت:

$$p_k(t) = P_k \times TBonst(t) \quad (11)$$

۲-۳- تقاضاهای کنترل محیطی

دومین گروه از تقاضاهایی که در این جا مورد بررسی قرار می‌گیرند، مربوط به آن دسته از دستگاه‌های خانگی هستند که عملکرد موردانتظار آن‌ها تنظیم یک پارامتر محیطی است. فعالیت این دستگاه‌ها به‌طور خودکار و بدون دخالت و همراهی انسان بوده و طول زمان فعالیت آن‌ها محدود به زمان نخواهد بود. به‌عنوان مثال شخص خانهدار در شرایط معمول مایل است به کمک دستگاه‌هایی مانند تهویه مطبوع، رطوبت ساز و یا حتی چراغ هوشمند شرایط محیطی را متناسب با نیاز خود تغییر دهند. این کار به افزایش میزان رضایت و در نتیجه افزایش مطلوبیت در یافتی وی کمک خواهد کرد. به‌ویژه اگر شخص خانهدار درگیر یک فعالیت زمان محدود مانند کار با رایانه و یا کار با جاروبرقی باشد، فعال کردن دستگاه‌های مذکور در حین انجام فعالیت می‌تواند تاثیر به‌سزایی در کیفیت فعالیت (و در واقع مطلوبیت در یافتی) وی داشته‌باشد.

در این مقاله این دسته از تقاضاها، تقاضاهای کنترل محیطی نامیده می‌شوند. مثال‌های دیگر از این دسته شامل تقاضای استفاده از یخچال، رطوبت‌ساز، چای‌ساز و یا حتی چراغ روشنایی هوشمند هستند.

دستگاه‌های کنترل محیطی معمولاً دارای توان لحظه‌ای متغیر هستند. توان این دستگاه‌ها به‌عنوان یک متغیر وابسته به شرایط محیطی و نیز در خواست‌های خانهدار در معادلات بهینه سازی وارد می‌گردد. اگر $p_m(t)$ توان لحظه‌ای و همچنین P_m^{min} و P_m^{max} بیشترین و کمترین توان مصرفی دستگاه کنترل محیطی m باشند، می‌توان نوشت:

$$P_m^{min} \leq p_m(t) \leq P_m^{max} \quad (12)$$

با فرض این که مقدار پارامتر محیطی موردنظر (مثلاً درجه حرارت محیط داخل اتاق) T_{EC} بوده و اگر از نظر خانهدار بازه قابل قبول $T^{min} \leq T_{EC} \leq T^{max}$ اعلام شده‌باشد، واضح است در هر حالت رابطه زیر برقرار باشد:

$$T^{min} \leq T^{in}(t) \leq T^{max} \quad (13)$$

که $T_{EC}(t)$ ، مقدار لحظه‌ای پارامتر محیطی موردنظر در برش زمانی t است.

ساده‌ترین مدل برای تخصیص میزان مطلوبیت و رضایت‌مندی خانهدار نسبت به تغییر پارامتر محیطی، یک مدل خطی می‌تواند باشد. درعین حال این تغییر مطلوبیت نسبت به پارامتر محیطی، نمی‌تواند در همه بازه آن خطی و یک‌نواخت باشد. در واقع با فرض این که خانهدار در مقدار خاصی از پارامتر محیطی مانند \bar{T}_{EC} بیشترین مطلوبیت را دریافت می‌کند، آن‌گاه در صورتی که مقدار پارامتر محیطی از این مقدار فاصله داشته‌باشد، میزان مطلوبیت دریافتی کمتر خواهد شد. بنابراین

پیاده‌سازی خاصیت پیوسته‌بودن یک تقاضای زمان محدود، روابط لازم بین متغیرها به‌صورت تعریف می‌شوند:

$$TBonst(t) \leq 1 - TBfnst(t), \quad \forall t \in E \quad (7a)$$

$$TBfnst(t) \geq TBonst(t-1) - TBonst(t), \quad \forall t \in E, t \geq 2 \quad (7b)$$

$$TBfnst(t) \geq TBfnst(t-1), \quad \forall t \in E, t \geq 2 \quad (7c)$$

اولین سطر از روابط فوق نشان می‌دهد که در صورت اتمام تقاضای زمان محدود، این تقاضا دیگر فعال نخواهد بود. از طرف دیگر اگر فعالیت هنوز تمام نشده‌باشد (ممکن است فعالیت آن تاکنون شروع شده یا هنوز آغاز نشده‌باشد)، دستگاه مربوطه می‌تواند روشن یا خاموش باشد. دومین سطر الزام می‌دارد وقتی تقاضا پایان می‌پذیرد، $TBfnst$ حتماً به صفر تغییر وضعیت داده که این به منزله توقف فعالیت خواهد بود. اما سومین سطر اطمینان می‌دهد هنگامی که تقاضای زمان محدود کامل شده‌باشد، پرچم پایان‌یافته‌بودن آن دائماً "۱" بوده و دستگاه مربوطه تا پایان ساعات کاری، روشن نخواهد شد.

طول زمان فعالیت تقاضای زمان محدود، با جمع متغیر وضعیت فعال بودن، در کل دوره برنامه‌ریزی به‌دست خواهد آمد. یعنی:

$$L = \sum_t TBonst(t) \quad (8)$$

اگر خانهدار چند تقاضای زمان محدود را برای ساعات کاری خود در روز تعریف نموده‌باشد، آن‌گاه لازم است:

$$TBonst_i(t) \times TBonst_j(t) = 0 \quad \forall i \neq j, \quad \forall t \in E \quad (9)$$

که $TBonst_i(t)$ و $TBonst_j(t)$ متغیرهای فعال بودن تقاضاهای زمان محدود i و j هستند. همچنین چنانچه خانهدار بخواهد بین تقاضاهای زمان محدود، زمانی برای بیکاربودن یا استراحت در نظر بگیرد، این وضعیت در شرایطی به‌وجود خواهد آمد که اصولاً هیچ تقاضای زمان محدودی فعال نباشد. به این ترتیب با فرض وجود مثلاً دو تقاضای زمان محدود ۱ و ۲، زمان‌های استراحت خانهدار از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$REonst(t) = [1 - TLonst_1(t)] * [1 - TLonst_2(t)], \quad \forall t \in E \quad (10)$$

که $REonst(t)$ برابر "۱" مشخص‌کننده وضعیت استراحت خانهدار و "۰" عدم استراحت است.

اگر یک فعالیت زمان محدود از نظر خانهدار صرفاً باید در زمان‌های خاصی برنامه‌ریزی شود، آن‌گاه منحنی ترجیح زمانی تعریف‌شده توسط وی به‌گونه‌ای است که صرفاً در زمان‌های موردقبول، دارای مقادیر غیرصفر بوده و در بقیه زمان‌ها صفر خواهد بود. به‌این ترتیب تابع مطلوبیت کار با رایانه عملاً در زمان‌های غیرمجاز دقیقاً صفر شده و در نتیجه در فرآیند بهینه‌سازی که توسط سیستم برنامه‌ریزی انجام می‌شود، این زمان‌ها به‌عنوان گزینه قابل قبول انتخاب نخواهند شد.

در حالت کلی، دستگاه برآورده‌کننده یک تقاضای زمان محدود دارای توان لحظه‌ای ثابت بوده و سیستم مدیریت انرژی برای برنامه‌ریزی این دستگاه‌ها نسبت به خاموش و روشن بودن آن‌ها تصمیم‌گیری

در رابطه فوق، متغیر $T^{in}(t)$ مقدار دما در داخل محیط (مثلاً اتاق) و $T^{out}(t)$ مقادیر همین پارامتر برای خارج محیط است. در واقع مقدار کمیت دما در داخل محیط (که مورد نظر ماست) برای هر لحظه یا برش زمانی t ، وابسته به مقدار دما در خارج محیط از یک سو و از سوی دیگر به عبارت $[\Delta t \times p_m(t)]$ ، یعنی میزان انرژی مصرفی دستگاه کنترلی دما در برش زمانی t است. ضریب α مشخص کننده نرخ تبادل دما بین دو محیط داخل و خارج بوده و واحد ندارد. همچنین ضریب β تعیین کننده بازدهی دستگاه کنترل محیطی در تبدیل انرژی به دما است. واحد این ضریب $^\circ\text{C}/\text{Wh}$ یا درجه سانتیگراد بر وات ساعت است. در شرایط تابستانی $\beta < 0$ و در شرایط زمستانی $\beta > 0$ خواهد بود.

۲-۴- تاثیر تقاضاهای کنترل محیطی

همان طور که اشاره شد در مدل پیشنهادی برای توابع مطلوبیت تقاضاهای خانگی، استفاده همزمان از دستگاههای کنترل محیطی، می تواند بر مطلوبیت تقاضاهای زمان محدود، تاثیر گذار باشد. از طرفی بررسی نحوه این تاثیر گذاری، خود می تواند یک موضوع مهم برای تحقیق بیشتر باشد.

اما در این مقاله برای در نظر گرفتن این موضوع، به جای روش سنتی جمع کردن تابع مطلوبیت های اصلی، ترکیب دو تقاضای زمان محدود و کنترل محیطی به عنوان یک تقاضا در نظر گرفته می شود. در این مدل تابع مطلوبیت درجه دو معرفی شده برای یک دستگاه کنترل محیطی با متغیر T_{EC} در بازه فعالیت تقاضای زمان محدود، در تابع مطلوبیت تقاضای زمان محدود ضرب می گردد. بدین ترتیب ابتدا تابع γ_{TB} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\gamma_{TB} = \frac{1}{L} \sum_t \{TB_{onst}(t) \times [-a_{EC}(T_{EC}(t) - \bar{T}_{EC})^2 + 1]\} \quad (18)$$

از رابطه فوق واضح است که چنانچه تقاضای زمان محدود در بهترین شرایط محیطی (یعنی $T_{EC}(t) = \bar{T}_{EC}$)، فعال گردد، آن گاه خواهد بود $\gamma_{TB} = 1$. اکنون می توان فرم کامل تابع مطلوبیت یک تقاضای زمان محدود را به صورت زیر ارائه نمود:

$$U_{TBunf} = b_{unf} \gamma_{TB} \theta_{TB} [-a_{TB}(L - \bar{L})^2 + 1] \quad (19)$$

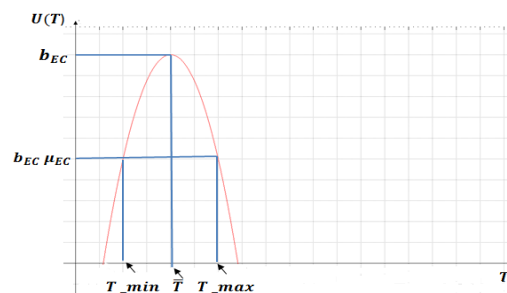
در رابطه فوق b_{unf} بیشترین بهره در یافتی (یا همان ارزش معادل پولی) است که خانه دار از فعالیت زمان محدود خود در مطلوب ترین طول کارکرد و در با کیفیت ترین شرایط محیطی به دست می آورد.

$$U_{TBunf}^{max} = b_{unf}$$

بنابراین:

۲-۵- بحث در کلیت مسئله

توابع مطلوبیت ذکر شده در این مقاله دارای این ویژگی هستند که می توان آن ها را متناسب با خصوصیات و شرایط فردی شخص خانه دار تطبیق داد. هر تابع درجه دو دارای چهار پارامتر اساسی بوده که توسط شخص خانه دار تعیین شده و شامل حداکثر و حداقل مقدار مطلوب،



شکل ۳: نمایش مدل مربعی برای تابع مطلوبیت یک تقاضای کنترل محیطی

یک تابع مثلثی مانند شکل ۱، نسبت به متغیر T_{EC} ، می تواند مدل مناسب تری برای تشریح رفتار مطلوبیت باشد.

اما همانند آنچه در مورد تقاضاهای زمان محدود ذکر شد و با استناد به قانون DMU، می توان گفت که شیب تابع مطلوبیت یا همان مطلوبیت مرزی نمی تواند در همه بازه تغییرات پارامتر محیطی یکسان باشد. این شیب باید به گونه ای تغییر کند که در نقطه اشباع یا نقطه دریافت بیشترین مطلوبیت به صفر برسد. بنابراین استدلال، می توان منحنی مطلوبیت را از حالت مثلثی ارتقاء داده و به صورت یک تابع مربعی به صورت شکل ۳، تبدیل کرد که تابع ریاضی متناظر با این مدل به صورت زیر خواهد بود:

$$U_{EC}(t) = [-a_{EC}(T_{EC}(t) - \bar{T}_{EC})^2 + 1], \quad (14)$$

در این رابطه ضریب a_{EC} ، به شکل دهی تابع مطلوبیت، متناظر با نیازها و ویژگی های فردی خانه دار کمک می کند. ضریب a_{EC} ، از پارامتر μ_{EC} ، استخراج شده که نسبت حداقل مطلوبیت قابل قبول (در T_{min} یا T_{max}) به بیشترین مطلوبیت (در \bar{T}_{EC}) است (شکل ۳). به این ترتیب می توان نوشت:

$$U_{EC}(T_{min}) = b_{EC} \mu_{EC} \quad (15)$$

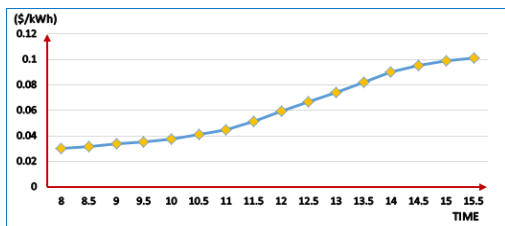
و بنابراین:

$$a_{EC} = \frac{1 - \mu_{EC}}{(T_{min} - \bar{T}_{EC})^2} \quad (16)$$

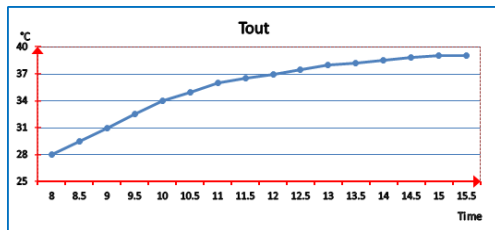
در تحلیل های عددی ارائه شده در فصول بعدی مقاله ملاحظه می شود که هر چه پارامتر μ_{EC} بزرگ باشد، شخص خانه دار انتفاع بیشتری از فعال سازی تقاضای کنترل محیطی دریافت کرده که این به معنی حساسیت پایین تر وی نسبت به تغییرات شرایط محیطی خواهد بود. به همین دلیل در این مقاله کمیت $1 - \mu_{EC}$ ، شاخص حساسیت محیطی نامیده می شود.

همچنین ذکر این نکته نیز ضروری است که در مورد تجهیزات کنترل دمایی، رابطه بین پارامتر تحت کنترل (مثلا دمای داخل اتاق) و انرژی مصرفی توسط دستگاه مربوطه (مثلا تهویه مطبوع) در منابع مختلف از جمله [۱۵] به صورت زیر آورده شده است:

$$T^{in}(t) = T^{in}(t-1) + \alpha [T^{out}(t) - T^{in}(t-1)] + \beta \Delta t \times p_m(t), \quad (17)$$



شکل ۴: نمودار تعرفه برق شهری استفاده شده در تحلیل‌ها، برگرفته از روند تغییرات مصرف کل برق سراسری کشور



شکل ۵: نمودار درجه حرارت بیرونی استفاده شده در تحلیل‌ها، براساس تغییرات درجه حرارت شهر اصفهان در

کاری روز برای سیستم مدیریت مصرف درون خانه هوشمند است. برای واقعی‌تر بودن نتایج و نیز تطابق بهتر با شرایط عملی در کشور ایران، یک نمونه تغییرات مصرف برق سراسری کشور در ایام تابستان و در ساعات کاری (۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر) انتخاب شده [۲۳]، که با اصلاح الگو و با یک مقیاس انتخابی به تعرفه پولی تبدیل شده است (شکل ۴).

به علاوه منحنی درجه حرارت محیط بیرونی براساس یک نمونه تغییرات درجه حرارت شهر اصفهان در ایام تابستان در همان بازه کاری ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر، در نظر گرفته شده است [۲۴]، (شکل ۵). نکته دیگر این که واحد پولی در همه سناریوها برای انطباق با معیارهای بین المللی، دلار (\$) در نظر گرفته شده اند.

همان گونه که ذکر شد هدف از ارایه این مقاله معرفی یک مدل برای برنامه ریزی تقاضاهای مشترک خانگی است که وی آن‌ها را برای یک بازه کاری در طول روز در نظر گرفته است. به این ترتیب ذکر دوره کاری ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر، صرفاً برای نمونه و روشن شدن کارایی و حل پذیر بودن مدل پیشنهادی است. تعمیم و گسترش دوره کاری برای ۲۴ ساعت به راحتی امکان پذیر است که البته به دلیل افزایش تعداد برش‌های زمانی ممکن است زمان محاسبات رایانه برای انجام فرآیند بهینه‌سازی را طولانی‌تر نماید.

خانه هوشمند مورد نظر در این سناریوها دارای یک خانه دار بوده که در سناریوی کامل شامل سه تقاضا خواهد بود. دستگاه‌های مرتبط با این سه تقاضا عبارتند از یک دستگاه رایانه و یک دستگاه جاروی برقی برای دو تقاضای زمان محدود و در نهایت یک دستگاه تهویه مطبوع تقاضای کنترل محیطی.

۲-۲- چند سناریوی ساده برای تقاضاهای زمان محدود

در این قسمت به منظور نمایش قابلیت‌های مدل پیشنهادی از نظر تطابق با شرایط واقعی، چند سناریوی ساده مورد آزمون قرار می‌گیرند.

نسبت حداقل کارایی و ارزش معادل پولی تقاضا هستند. اگر چه جای این سوال باقی است که یک خانه دار با چه دقتی می‌تواند این مقادیر شخصی را تعیین نماید، باین حال این موضوع از کلیت مدل پیشنهادی نخواهد کاست و می‌تواند زمینه تحقیقات بیشتر در این حوزه گردد. به این ترتیب در این مقاله و در همه تحلیل‌های بعدی فرض بر این است که شخص خانه دار همه پارامترهای لازم را با سلیقه شخصی تعیین و اعلام می‌دارد.

همچنین در مورد رویکرد مورد استفاده در اعمال تاثیر تقاضاهای کنترل محیطی در زمان محدود (یعنی روش ضرب مطلوبیت‌ها)، می‌توان ادعا کرد که این ایده از لحاظ نزدیک بودن به تجارب انسانی و نیز قابلیت پیاده‌سازی قابل قبول خواهد بود. اگر چه راه برای طرح روش‌ها و ایده‌های دیگر همچنان باز بوده و زمینه مقالات تحقیقی بعدی می‌تواند باشد.

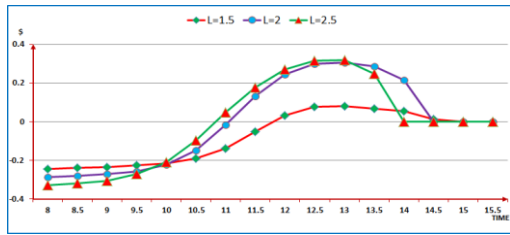
۳- مثال‌های عددی و بررسی نتایج

در این مقاله پس از معرفی روش جدید در برنامه‌ریزی مصارف خانگی، هدف بعدی این است که نشان داده شود این روش با استفاده از مدل *MINLP*، قابلیت حل توسط حل‌کننده‌های مرسوم و دردسترس را دارد. بنابراین در این فصل با ارایه یک سلسله آزمون‌های رایانه‌ای، به بررسی رفتار مدل پیشنهادی پرداخته شده تا مشخص شود برای سناریوهای شبه‌واقعی، اولاً در مدت زمان پردازش قابل قبول جواب حاصل می‌شود و ثانیاً با تحلیل نتایج آزمون‌ها نسبت به بهینه و یا حداقل شبه‌بهینه بودن آن‌ها می‌توان اطمینان حاصل نمود. این آزمون‌ها با استفاده از نرم‌افزار بهینه‌سازی *GAMS* نسخه ۲۴/۷ انجام شده است.

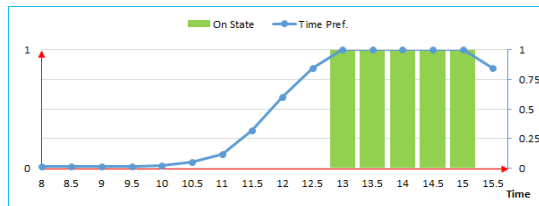
باتوجه به این که حصول اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی در حالت کلی کار دشواری است، در این مقاله برای انجام این امر به دو صورت عمل شده است. ابتدا در سناریوی الف یعنی فعال‌سازی رایانه و تهویه مطبوع، نتایج با برنامه‌نویسی عادی و در واقع با محاسبات غیرمبتنی بر فرآیند بهینه‌سازی به دست آمده است و سپس پاسخ‌های آن با پاسخ‌هایی که توسط نرم‌افزار *GAMS* تولید شده است، مقایسه گردیده است. باتوجه به انطباق هر دو سری از نتایج، به صحت جواب‌ها در این آزمون می‌توان اطمینان پیدا کرد. در مورد بقیه سناریوها، صحت‌سنجی از طریق بررسی روی نتایج و تحلیل رفتار سیستم از نظر انطباق با پیش‌بینی‌ها (مانند سناریوهای ب، ج و د) و یا منطقی و قابل توجیه بودن جواب‌ها (مانند دو حالت بررسی شده برای سناریوی ه) صورت گرفته است.

۳-۱- پیش‌فرض‌های سیستم و تنظیمات دستگاه‌ها

در سیستم خانه هوشمند مورد نظر فرض بر وجود یک دامنه زمانی برش بندی شده نیم‌ساعته و با دوره کاری روزانه از ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر است. همچنین فرض دیگر معلوم بودن تعرفه زمانی برق شهری در کل ساعات



شکل ۶: مقدار بهره نهایی برای همه زمان‌های شروع ممکن و طول‌های بهره‌برداری ممکن در آزمون الف



شکل ۷: زمان‌بندی کار با رایانه (منحنی ستونی) در مقابل ضرائب ترجیحی زمانی (منحنی آبی) در آزمون الف

■ آزمون الف (تقاضاهای کار با رایانه و تهویه مطبوع

هدف از این آزمون حصول اطمینان از صحت محاسبات بهینه‌سازی رایانه‌ای با نرم‌افزار GAMS است. برای این منظور ابتدا با برنامه رایانه ای مستقل بدون انجام بهینه‌سازی، مقدار بهره نهایی یا همان TP برای تمام زمان‌های ممکن شروع و نیز تمام طول‌های ممکن بهره‌برداری ($1/5$ ، 2 و $2/5$ ساعت) مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج مربوطه در شکل ۶ رسم شده‌است. از این شکل به‌خوبی دیده می‌شود که بالاترین میزان بهره برای وقتی است که طول زمان کار با رایانه $2/5$ ساعت و زمان شروع نیز ساعت ۱۳ بعدازظهر باشد.

در ادامه با حل مستقل معادلات بهینه‌سازی (رابطه ۲ و قیود وابسته) توسط نرم‌افزار GAMS، بهترین زمان فعال‌سازی تقاضا محاسبه شده که نتیجه آن به‌همراه ضرائب ترجیح زمانی در شکل ۷ آورده شده‌است. دیده می‌شود که نتیجه به‌دست‌آمده با آنچه در شکل ۶ آورده‌شده همخوانی کامل دارد. از مقایسه نتایج فوق می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌سازی رایانه‌ای برای مدل پیشنهادی می‌تواند در برگیرنده نتایج قابل قبول باشد. نتایج عددی این آزمون در جدول ۱، آمده‌است.

جدول ۱: نتایج عددی آزمون الف

Task working interval	Average temp. in working interval (°C)	Utility (\$)	Cost (\$)	Profit (\$)
۱۳ → ۵.۱۵ (۲/۵ hours)	۲۵/۵	۱/۳۸۳	۱/۰۶۶	۰/۳۱۷

■ سناریوی ب) تغییر شاخص حساسیت محیطی

در این قسمت تاثیر تغییرات شاخص حساسیت محیطی یا همان $(1 - \mu_{EC})$ بر روی نتایج برنامه‌ریزی تقاضای زمان محدود بررسی

در اولین قدم یک دستگاه رایانه به‌همراه سیستم تهویه مطبوع در شرایط تابستانی در نظر گرفته می‌شود. در این سناریو خانه‌دار درخواست کار با رایانه را برای مدت $2/5$ ساعت در بازه ساعات کاری روز (بین ۸ صبح تا ۴ بعد از ظهر) داده‌است. درعین حال وی زمان کار حداقل $1/5$ ساعت را با نسبت حداقل کارایی $\mu_{TB} = 0/5$ خواهد پذیرفت. این بدین معنی است که در صورت تقلیل زمان کار با رایانه (توسط سیستم برنامه‌ریزی‌کننده) وی صرفاً 50% کیفیت مورد نظر خود نسبت به زمان $2/5$ ساعت را دریافت خواهد کرد.

طبق آنچه گفته‌شده برای تقاضاهای زمان محدود فرض پیوستگی در نظر گرفته شده و بنابراین خانه‌دار به کار با رایانه ادامه داده تا تقاضا به‌طور کامل خاتمه یابد. به‌علاوه شخص خانه‌دار ضرائب ترجیح زمانی موردنظر خود برای کار با رایانه را به‌گونه‌ای اعلام کرده‌است که وی ترجیح می‌دهد این تقاضا در ساعات پایانی روز، یعنی بین یک تا چهار بعدازظهر، (بدون توجه به تعرفه برق) انجام دهد (شکل ۷). منظور از منحنی ترجیح زمانی ضرائب نرمالیزه شده‌ای است که میزان تاثیر فعال سازی تقاضا بر روی تابع مطلوبیت مربوطه را در مقاطع زمانی مختلف روز بیان می‌کند.

شرایط دمای محیطی مناسب برای کار با رایانه و نیز برای شرایط استراحت یا اصطلاحاً بیکاری، بین 22 درجه به‌عنوان بهترین دما و 30 درجه به‌عنوان بدترین دمای قابل قبول با ضریب کاهش بازدهی دمایی برابر $\mu_{EC} = 0/5$ ، اعلام شده‌است. این بدین معنی است افزایش دمای محیط از 22 به 30 درجه موجب کاهش 50% درصدی مطلوبیت دریافتی خانه‌دار خواهد بود. همچنین ارزش معادل پولی در نظر گرفته‌شده برای کار با رایانه (توام با فعالیت تهویه مطبوع) از طرف خانه‌دار برابر $b_{COM-unf} = 1\$/$ اعلام شده‌است. این عدد به این معنی است که از نظر خانه‌دار دو ساعت و نیم کار کردن با رایانه در دمای مطلوب 22 درجه برای وی حدود یک دلار ارزش معادل پولی دارد.

توان کاری رایانه برابر 300 وات فرض شده‌است. توان مصرفی دستگاه تهویه مطبوع با توجه به شرایط دمای محیط بیرونی بین صفر تا حداکثر 6000 وات متغیر بوده ولی در طول یک برش زمانی ثابت خواهد بود. همچنین ضرائب ترمودینامیکی این دستگاه برابر $\alpha = 0/5$ و $\beta = -0/0025 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$ ، اعلام شده‌است. علامت منفی به‌دلیل بودن در شرائط تابستانی است. ارزش معادل پولی تقاضای تهویه مطبوع در شرائط استراحت یا بیکاری برای هر برش زمانی برابر $b_{Rest} = 0/1\$/\text{h}$ است. این عدد به این معنی است که از نظر خانه‌دار هر یک ساعت استراحت در دمای مطلوب 22 درجه برای وی حدود یک دهم دلار ارزش معادل پولی داشته که جهت مقایسه $2/5$ ساعت آن برابر $0/25\$/$ خواهد شد. عددی که به‌مراتب کمتر از مقدار متناظر برای کار با رایانه برای $2/5$ ساعت است. این تفاوت در ارزش معادل پولی تاثیر مهمی در نحوه برنامه‌ریزی تقاضاها خواهد گذاشت که در آزمون‌های رایانه‌ای بخش‌های بعد قابل مشاهده است.

مطلوب بین حداکثر ۲/۵ ساعت و حداقل قابل قبول ۱/۵ ساعت را با نرخ کاهش مطلوبیت ۰/۵، اعلام کرده است. جهت استخراج و بررسی نتایج، ارزش معادل پولی جارو زدن یا همان b_{VC-unf} از ۰/۶ تا ۲/۴\$ با پله های ۰/۳\$ تغییر داده شده است. همچنین توان دستگاه جاروبرقی ثابت و برابر ۱/۵ کیلو وات در نظر گرفته شده است. در این سناریو نیز دستگاه تهویه مطبوع با همان تنظیمات سناریوی الف فعالیت خواهد کرد. نتایج در جدول ۳، آورده شده است.

جدول ۳: تاثیر تغییر ارزش معادل پولی در نتایج برنامه ریزی

b_{VC-unf} (\$)	Scheduling interval	Average temp. in working interval (°C)	Utility (\$)	Cost (\$)	Profit (\$)
۰/۶	۱۲/۵→۱۴/۵ (۲ hours)	۲۵/۶	۱/۰۱۷	۱/۱۴	-۰/۱۲۳
۰/۹	۱۲/۵→۱۴/۵ (۲ hours)	۲۴/۴	۱/۲۸۷	۱/۱۷۶	۱/۱۱
۱/۲	۱۳→۱۵ (۲ hours)	۲۳/۹	۱/۵۹۳	۱/۲۳۹	۰/۳۵۴
۱/۵	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۳/۸	۲/۰۰۷	۱/۳۸	۰/۶۲۷
۱/۸	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۳/۵	۲/۳۱۳	۱/۳۹۲	۰/۹۲۱
۲/۲	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۳/۳	۲/۶۱۹	۱/۴۰۱	۱/۲۱۸
۲/۴	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۳/۱	۲/۹۲۲	۱/۴۰۷	۱/۵۱۵

مشاهده می شود که با افزایش ارزش معادل پولی جاروبرقی زدن، زمان فعال سازی این تقاضا به سمت زمان های با ترجیح بهتر و شرایط محیطی مطلوب تر سوق داده می شود. در این روند، اگرچه هزینه با افزایش ارزش معادل پولی زیاد می شود، اما درعین حال مطلوبیت با نرخ بزرگ تری رشد کرده که در نتیجه بهره کلی افزایش پیدا می کند.

سناریوی (ه) برنامه ریزی همه تقاضاها

در این قسمت به عنوان آخرین آزمون، یک سناریوی کامل با راه اندازی هر سه تقاضای تعریف شده، اجرا می شود. همچنان فرض بر این است که سیستم خانه هوشمند صرفا دارای یک خانه دار بوده و بنابراین تقاضاهای زمان محدود دارای هم پوشانی نیستند. مقادیر ارزش پولی تقاضاها، بودجه خانه دار و نیز ظرفیت توان سیستم به شرح زیر هستند:

$$b_{COM-unf} = 1 \$, \quad b_{VC-unf} = 1/5 \$, \quad b_{AC} = 0/12 \$/h$$

$$Cost_{max} = 3 \$, \quad Q^{max} = 7kW$$

در این سناریو برای دو تقاضای زمان محدود زمان های ترجیحی از انتهای دوره روزانه به میانه دوره منتقل شده اند (بین ساعات صبح ۱۱ تا ۱۳ بعد از ظهر) تا رقابت بیشتری برای مصرف انرژی در این ساعات وجود داشته باشد. بقیه مشخصات تقاضاها، تنظیمات دستگاهها، تعرفه برق شهر و درجه حرارت بیرون مانند سناریوهای قبلی می باشند.

می گردد. در این آزمون همان تنظیمات اشاره شده در آزمون الف استفاده شده به جز این که $(1 - \mu_{EC})$ از صفر به یک به تدریج افزایش می یابد. نتایج در جدول ۲، آمده است.

جدول ۲: تاثیر تغییرات شاخص حساسیت محیطی در نتایج برنامه ریزی

ESI (1 - μ_{EC})	Scheduling interval	Average temp. in working interval (°C)	Utility (\$)	Cost (\$)	Profit (\$)
۰	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۳۰	۱/۴۴۶	۰/۸۴	۰/۶۰۶
۰/۲	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۹/۲	۱/۲۹۶	۰/۸۸۵	۰/۴۱۱
۰/۴	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۵/۷	۰/۳۶۸	۱/۰۳۵	۰/۳۳۳
۰/۶	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۴/۵	۱/۳۹۲	۱/۰۸۶	۰/۳۰۶
۰/۸	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۳/۸	۱/۴۰۷	۱/۱۱۳	۰/۲۹۴
۱	۱۳→۱۵/۵ (۲/۵ hours)	۲۳/۵	۱/۴۱۳	۱/۱۲۸	۰/۲۸۵

از روی نتایج جدول ۲، مشاهده می شود که با کاهش حساسیت محیطی، هزینه کل کاهش، مطلوبیت افزایش و در نتیجه بهره کلی خانه دار افزایش پیدا می کند. این امر البته به دلیل نیاز کمتر به فعالیت سیستم تهویه مطبوع در شرایط حساسیت پایین محیطی است. در نتیجه هرچه حساسیت خانه دار نسبت به تغییرات شرایط محیطی خود کمتر باشد، وی در نهایت بهره بیشتری را دریافت خواهد کرد. این نکته البته با تجارب عادی انسانی در تطابق است.

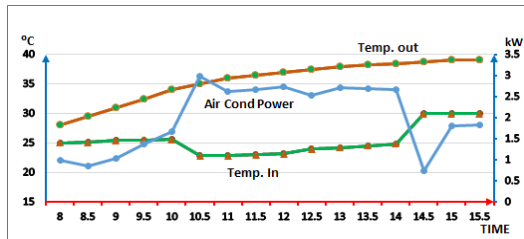
آزمون (ج) تغییر شاخص حساسیت مطلوبیت

آزمون بعدی در مورد تغییرات برنامه ریزی تقاضاها نسبت به تغییرات ضریب $(1 - \mu_{TB})$ یعنی همان شاخص حساسیت مطلوبیت است. باتوجه به اینکه نتایج این آزمون موید نتیجه گیری ارایه شده در انتهای آزمون ب است، به دلیل محدودیت فضا از ذکر جزئیات خودداری می گردد.

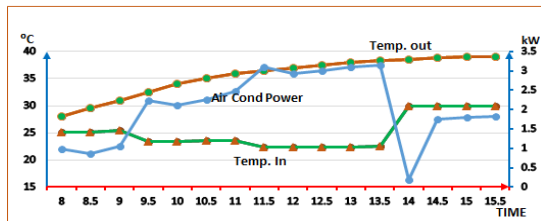
جمع بندی مطالب فوق این است که کاهش حساسیت خانه دار نسبت به بعضی خواسته های خود به بیش تر شدن سود و بهره نهای وی منجر خواهد گردید. این نتیجه گیری در تطابق با تجارب عادی انسانها در زندگی روزمره است.

سناریوی (د) تغییر ارزش معادل پولی

در این قسمت به بررسی تاثیر تغییر ارزش معادل پولی، در نتایج برنامه ریزی تقاضاها پرداخته می شود. برای این سناریو تقاضای زمان محدود کار با جاروبرقی انتخاب شده است. خانه دار برای این تقاضا نیز زمان



شکل ۸: تغییرات درجه حرارت داخل و خارج به همراه توان سیستم تهویه مطبوع در راهاندازی همه تقاضاها در حالت اول



شکل ۹: تغییرات درجه حرارت داخل و خارج به همراه توان سیستم تهویه مطبوع در راهاندازی همه تقاضاها در حالت دوم

هزینه پرداختی برای خانه‌دار است. این روند دلیل مناسبی برای این ادعاست که نتایج تولیدشده توسط بهینه‌سازی رایانه‌ای دارای جواب‌های بهینه و یا حداقل شبه‌بهینه است.

برای حالت دوم این سناریو، ارزش معادل پولی تقاضای کار با رایانه به دلخواه ۵ برابر کرده و به مبلغ $b_{COM_unf} = 5\$$ افزایش داده می‌شود. مقادیر عددی کلی در جدول ۵ و تغییرات درجه حرارت داخل و خارج به همراه توان سیستم تهویه مطبوع در شکل ۹ آورده شده‌اند.

جدول ۵: نتایج راه‌اندازی همه تقاضاها در حالت دوم

Profit (\$)	Cost (\$)	Total utility (\$)	Computer scheduling interval	Vacuum scheduling interval	Rest Times scheduling interval
۴/۵۵۶	۱/۱۸۲	۵/۷۳۹	۱۴ → ۱۱/۵ (Util=۴/۸۴۴ \$)	۱۱/۵ → ۹/۵ (Util=۰/۶۱۰ \$)	۱۶ → ۱۴, ۹/۵ → ۸ (Util=۰/۲۸۶ \$)

دیده می‌شود که با افزایش ارزش معادل پولی تقاضای رایانه چند تغییر نسبت به حالت اول رخ می‌دهد. اول این که مدت زمان فعال شدن تقاضای رایانه از ۲ ساعت به ۲/۵ ساعت افزایش و به سمت زمان‌های با ترجیح بالاتر (از ۱۱ تا ۱۳) انتقال یافته‌است. دوم این که متوسط دمای محیطی کار با رایانه به حدود ۲۲ درجه کاهش پیدا کرده‌است. بالاخره این که مقدار مطلوبیت در یافتی خانه‌دار برای کار با رایانه نیز بیش‌تر شده‌است. همه این تغییرات به دلیل افزایش ارزش معادل پولی این تقاضا می‌باشد که نشان‌دهنده تاثیر این پارامتر در برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تقاضاهای سیستم است.

همچنین در این سناریو نیز رفتار مشابه حالت قبل برای توان سیستم تهویه مطبوع دیده می‌شود. به ویژه یک افت قابل ملاحظه در ساعت پایانی فعال بودن دو تقاضای زمان محدود یعنی در ساعت ۱۴/۵ دیده می‌شود. این امر نشان‌دهنده تصمیم منطقی سیستم

این سناریو در دو حالت مختلف اجرا شده‌است. در حالت اول ارزش معادل پولی کار با رایانه همان مقدار $b_{COM_unf} = 1\$$ فرض می‌گردد. نتایج در جدول ۴ آورده شده‌اند.

جدول ۴: نتایج راه‌اندازی همه تقاضاها در حالت اول

Profit (\$)	Cost (\$)	Total utility (\$)	Computer scheduling interval	Vacuum scheduling interval	Rest Times scheduling interval
۱/۰۰۹	۱/۱۹۸	۲/۲۰۷	۱۴/۵ → ۱۲/۵ (Util=۰/۷۲۴ \$)	۱۲/۵ → ۱۰/۵ (Util=۱/۱۲۳ \$)	۱۶ → ۱۴/۵, ۱۰ → ۸ (Util=۰/۳۶۴ \$)

از نتایج مندرج در جدول ۴، مشاهده می‌شود که همه محدودیت‌های اولیه برآورده شده‌اند. یعنی اولاً هزینه کل از سقف تعیین شده کمتر بوده و ثانیاً متغیرهای اصلی هر دو تقاضای اصلی یعنی مدت فعالیت تقاضاهای زمان محدود، در محدوده حداقل و حداکثر مقدار تعریف شده قرار دارند. همچنین دوره عمل کرد هر دو تقاضای زمان محدود به صورت پیوسته و بدون هم‌پوشانی با یکدیگر قرار دارند. به علاوه زمان‌های در نظر گرفته شده برای فعال شدن تقاضاها، در اطراف بازه اعلام شده برای ترجیحات زمانی قرار دارد.

در شکل ۸، نمودار تغییرات درجه حرارت داخل و خارج اتاق به همراه تغییرات هم‌زمان توان سیستم تهویه مطبوع آورده شده‌اند. دیده می‌شود که دمای بازه کار با رایانه (از ساعت ۱۰/۵ تا ۱۲/۵) و کار با جاروبرقی (از ساعت ۱۲/۵ تا ۱۴/۵) حدود ۲۴ درجه است که از مقابل دمای زمان‌های استراحت (یعنی ۳۰ درجه) بیشتر است. دلیل این امر را باید در بیشتر بودن معادل پولی تقاضاهای اصلی نسبت به معادل پولی تقاضای استراحت دانست (یعنی در تفاوت بین مقادیر b_{AC} و b_{VC_unf} و b_{COM_unf}).

همچنین در این شکل به یک رفتار جالب در روند تغییرات توان سیستم تهویه مطبوع می‌توان پی‌برد. دیده می‌شود که این توان در ساعت ۱۰/۵ صبح یک صعود داشته و سپس با یک نزول تا ساعت ۱۴ یعنی پایان کار با رایانه و جاروبرقی تقریباً ثابت می‌ماند. پس از آن مقدار توان تهویه مطبوع در زمان‌های بعدی کاهش زیادی داشته و سپس با افزایش تا پایان دوره کاری باز ثابت می‌ماند.

دلیل این رفتار توان سیستم تهویه مطبوع را باید در این نکته بیان کرد که به دلیل فعال شدن دو تقاضای جاروبرقی و سپس کار با رایانه، با افزایش توان در ساعت ۱۰/۵، مقدار دما داخل اتاق کاهش یافته تا به سطح قابل قبول و بهینه برای این دو تقاضا برسد. با توجه به نسبتاً پایین بودن دمای اتاق در طول ساعات فعال بودن این دو تقاضا، هنگامی که در ساعت ۱۴/۵ هر دو تقاضا به پایان می‌رسند، دمای اتاق برای زمان بیکاری و استراحت خانه‌دار می‌تواند به مقدار بیش‌تری افزایش یافته و در واقع کیفیت دما بدتر شود. دلیل این امر در کمتر بودن ارزش معادل پولی زمان استراحت با مقدار متناظر برای زمان‌های فعال شدن کار با جاروبرقی و یا کار با رایانه است. به این ترتیب با نزول دفعی توان تهویه مطبوع عملاً اجازه داده می‌شود که دمای داخل به میزان زیادی افزایش یابد که این به معنی صرفه‌جویی قابل توجه در مصرف انرژی و در نتیجه

برنامه ریز برای استفاده از ذخیره سرمایه داخلی برای جبران فاصله دمای داخلی و بیرون اتاق در این ساعت است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله ضمن معرفی یک دسته بندی جدید برای مصارف خانگی براساس تعریف تقاضاهای خانگی، با ارایه دلایل منطقی، یک تابع مطلوبیت مناسب و منطبق با ویژگی های شخصی خانه دار، به هر دسته تخصیص داده شده است. همچنین با توسعه روابط ریاضی برای ساس برنامه ریزی غیرخطی توأم با اعداد صحیح، امکان حل روابط با تحلیل گره های رایانه ای فراهم شده است.

برای بررسی رفتار مدل پیشنهادی، مجموعه ای از سناریوها مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج مربوط به تاثیر برخی پارامترها مانند شاخص حساسیت و نیز ارزش معادل پولی، مؤید نکات مورد اشاره در مدل پیشنهادی هستند. مشاهده شد که حساسیت پایین خانه دار برای یک تقاضا، موجب کاهش هزینه و افزایش بهره کلی وی خواهد بود. همچنین مشاهده گردید که تقاضای با ارزش پولی بالاتر از مزایای بهتر و بیش تری در سیستم برخوردار خواهد گردید (فعال شدن در شرایط محیطی بهتر و یا در زمان های مرجح تر).

همچنین مشاهده شد که در فعال سازی هم زمان تقاضاهای زمان محدود با تقاضای تهویه مطبوع، توان سیستم تهویه متناسب با دمای مطلوب شخص خانه دار متغیر است. این توان در زمان های مختلف و بسته به شرایط زمانی و نوع تقاضای فعال شده دارای نوساناتی منطقی است که موجب مصرف بهینه انرژی و در نتیجه کاهش هزینه پرداختی می شود. جمع بندی نتایج به دست آمده از مثال های عددی بیان گر این است مدل پیشنهادی این مقاله برای مدیریت تقاضا، می تواند در خانه های هوشمند آینده مورد استفاده قرار گیرد.

در راستای تکمیل این تحقیق موضوعات مختلفی قابل طرح هستند. به عنوان مثال در نظر گرفتن تاثیر متقابل تقاضاها در یک سیستم خانه هوشمند با چند ساکن (چند کاربر) از عناوین جذاب است. به علاوه بررسی میزان ظرفیت سخت افزاری و محاسباتی مدل پیشنهادی جهت امکان استفاده در خانه های هوشمند آینده نیز از کارهای اساسی خواهد بود.

مراجع

- [1] scheduling in smart grid," IEEE Trans Smart Grid, vol. 4, pp. 1007-1016, 2013.
- [5] P. Samadi, H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. Wong, "Advanced demand side management for the future smart grid using mechanism design," IEEE Trans Smart Grid, vol 3, pp. 1170-1180, 2012.
- [6] M. Pedrasa, T. D. Spooner, I. F. MacGill, "Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services," IEEE Trans Smart Grid, vol 1, pp. 1170-1180, 2010.
- [7] K. M. Tsui, S. C. Chan, "Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing," IEEE Trans Smart Grid, vol. 3, pp. 1812-1821, 2012.
- [8] Z. Zhu, J. Tang, S. Lambotharan, W. H. Chin, Z. Fan, "An integer linear programming based optimization for home demand-side management in smart grid," In Proceedings of IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Jan. 2012.
- [۹] م. ضیایی، الف. کاظمی، م. فیروزآبادی، م. پروانیا، «تأمین پاسخ تقاضا از طریق پیاده سازی کنترل مستقیم بارهای تهویه مطبوع خانگی توسط خردفروشان توان»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۲، شماره ۱، صفحه ۳۸-۲۷، بهار ۱۳۹۱.
- [10] Sou KC, Weimer J, Sandberg H, Johansson KH. Scheduling smart home appliances using mixed integer linear programming. In Proceedings of 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), Dec. 2011.
- [11] O. Erdinc, "Economic impacts of small-scale own generating and storage units, and electric vehicles under different demand response strategies for smart households," Appl Energy, vol 126, pp. 142-150, 2014.
- [12] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, F. Aminifar, "Load commitment in a smart home," Appl Energy, vol 96m pp. 45-54, 2012.
- [13] P. Finn, M. O'Connell, C. Fitzpatrick, "Demand side management of a domestic dishwasher: Wind energy gains, financial savings and peak-time load reduction," Appl Energy, vol 101, pp. 678-685, 2013.
- [14] A. Anees, Y. Che, " True real time pricing and combined power scheduling of electric appliances in residential energy management system," Appl Energy, vol. 165, pp. 592-600, 2016.
- [15] N. Li, L. Chen, S. H. Low, "Optimal demand response based on utility maximization in power networks," In Proceedings of IEEE: Power and Energy Society General Meeting, 24-29 July, 2011.
- [16] Y. Zhang, M. Schaar, "Structure-aware stochastic load management in smart grids," In Proceedings of IEEE Infocom, 27 April-2 May 2014.
- [17] B. Jiang, Y. Fei, "Smart Home in smart microgrid: A cost-effective energy ecosystem with intelligent hierarchical agents," IEEE Trans Smart Grid, vol. 6, pp. 3-13, 2015.
- [18] D. Setlhaolo, X. Xia, J. Zhang, "Optimal scheduling of household appliances for demand response," Journal of Electric Power Systems Research, vol. 116, pp. 24-28, 2014.
- [19] B. Chai, Z. Yang, K. Gao, T. Zhao, "Iterative learning for optimal residential load scheduling in smart grid," Journal of Ad Hoc Networks, vol. 41, pp. 99-111, 2016.
- [20] A. H. Mohsenian-Rad, A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments, IEEE Trans Smart Grid, vol. 1, pp. 120-133, 2010.
- [21] R.E. Hall, M. Lieberman: Economics: Principles and applications, 6th Edition, Cengage Learning, 2012.
- [22] H. T. Roh, J. W. Lee, "Residential demand response scheduling with multiclass appliances in the smart grid," IEEE Trans Smart Grid, vol. 7, pp. 94-104, 2016.
- [۲۳] پایگاه اطلاع رسانی مرکز مطالعات و پژوهش های بنیادی (مسیر نما): <http://masirnama.ir/new/index.php/2014-10-28-22-32-52/194-1128>.
- [24] Yr online weather service: www.yr.no/place/Iran/Esfahan/Isfahan/
- [1] S. Nistor, J. Wu, M. Sooriyabandara, J. Ekanayake, "Capability of smart appliances to provide reserve services," Appl Energy, Vol.138, pp. 590-597, 2015.
- [2] Y. Huang, S. Mao, R. Nelms, "Adaptive electricity scheduling in microgrids," IEEE Trans Smart Grid, vol. 5, pp. 270-281, 2014.
- [۳] ع. محمدویسی، ع. ر. حاتمی، «ارائه چارچوبی برای مدیریت انرژی خانه هوشمند: برنامه ریزی بهینه تجهیزات خانگی و برنامه ریزی بهینه بهره برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۱، صفحه ۶۶-۵۳، بهار ۱۳۹۴.
- [4] P. Samadi, H. Mohsenian-Ra, V. Wong, R. Schober, " Tackling the load uncertainty challenges for energy consumption

زیر نویس ها

- ⁴ Mixed Integer Non Linear Programming
- ⁵ Time of Use Pricing
- ⁶ Diminishing Marginal Utility

- ¹ Home Energy Management
- ² Resident
- ³ Utility Function