

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک
رشته برق قدرت گرایش سیستم‌های قدرت

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در خانه هوشمند

نگارنده: محمد هادی عراقیان

استاد راهنما:

دکتر مرتضی رحیمیان

استاد مشاور:

دکتر محمد ضامن

شهریور ۱۳۹۸

تقديم به ساحت مقدس و نورانی حضرت فاطمة الزهرا سلام الله عليها

از زحمات، راهنمایی‌ها و حمایت‌های استاد گرانقدر جناب آقای دکتر مرتضی رحیمیان؛
و مشاوره و راهنمایی‌های راه‌گشای استاد گرامی جناب آقای دکتر محمد ضامن سپاس‌گزارم.
و تشکر صمیمانه از خانواده عزیزم که همراهی و همدلی آن‌ها برایم قوت قلب؛ و دعاها و
نظراتشان امیدبخش در پیمودن این مسیر بوده است.

تعهد نامه

اینجانب محمد هادی عراقیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت – گرایش سیستم‌های

قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و

حرارتی در خانه هوشمند تحت راهنمایی دکتر مرتضی رحیمیان متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

این پایان‌نامه به پیاده‌سازی سیستم مدیریت انرژی خانگی به منظور مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در یک خانه هوشمند، با در نظر گرفتن سطح رفاه ساکنین می‌پردازد. منابع انرژی خانه هوشمند شامل شبکه برق و گاز، آبگرمکن خورشیدی و واحد فتوولتائیک به همراه واحد ذخیره‌ساز، و همچنین بارهای الکتریکی و حرارتی شامل انواع انعطاف‌پذیر زمانی، انعطاف‌پذیر توانی و ثابت هستند. به منظور غلبه بر عدم قطعیت تولید منابع خورشیدی و دمای بیرونی، از دو مدل عدم قطعیت (۱) پیش‌بینی تک-سناریو و (۲) بازه‌های پیش‌بینی استفاده می‌شود. به این ترتیب، مسأله مدیریت انرژی به صورت مدل‌های بهینه‌سازی قطعی و مقاوم تبدیل می‌شود. با استفاده از اطلاعات واقعی تابش خورشید و دمای بیرونی استخراج شده از ریزشبکه برق هوشمند دانشگاه صنعتی شاهرود، دو مدل مدیریت انرژی پیاده‌سازی و مقایسه می‌شوند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، انتخاب یک استراتژی محافظه‌کارانه توسط مدل بهینه‌سازی مقاوم در مقایسه با مدل قطعی می‌تواند تضمین‌کننده اجرایی بودن تصمیم‌ها شود، هرچند این انتخاب باعث کاهش سطح رفاه ساکنین خواهد شد. همچنین در نظر گرفتن قیود پیوندی میان بارها و منابع انرژی، از یک طرف رفاه ساکنین را افزایش و از طرف دیگر، هزینه را نیز افزایش می‌دهد.

کلیدواژه: سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی، رفاه ساکنین، بهینه‌سازی قطعی،

بهینه‌سازی مقاوم.

مقاله مستخرج

عراقیان محمدهادی، رحیمیان مرتضی، ضامن محمد، "مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در خانه هوشمند با در نظر گرفتن رفاه کاربر و منابع تولید خورشیدی"، کنفرانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده، خرداد ۱۳۹۸، ص ۱۰۳، تهران، دانشگاه شهید بهشتی

فهرست موضوعی

فصل ۱	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ هدف پژوهش	۲
۳-۱ نوآوری پایان نامه	۴
۴-۱ مروری بر فصل های پایان نامه	۴
فصل ۲	۷
۱-۲ مقدمه	۸
۲-۲ مروری بر کارهای انجام شده در مدیریت انرژی خانگی	۹
۳-۲ جمع بندی و نتیجه گیری	۱۸
فصل ۳	۱۹
۱-۳ مقدمه	۲۰
۲-۳ ساختار خانه هوشمند	۲۰
۱-۲-۳ منابع انرژی	۲۰
۲-۲-۳ بارهای خانگی	۲۲
۳-۲-۳ سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی	۲۴
۳-۳ الگوریتم سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی	۲۵
۴-۳ مدل سازی ریاضی	۲۸
۱-۴-۳ مدل بهینه سازی قطعی	۲۸
۲-۴-۳ مدل سازی عدم قطعیت	۳۵
۳-۴-۳ مدل بهینه سازی مقاوم	۳۶
۴-۴-۳ جمع بندی و نتیجه گیری	۴۱
فصل ۴	۴۳

۴۴.....	۱-۴ داده‌های شبیه‌سازی
۴۴.....	۱-۱-۴ اطلاعات اولیه
۴۴.....	۲-۱-۴ پیش‌بینی تابش خورشیدی و دمای بیرونی
۵۱.....	۳-۱-۴ مشخصات منابع انرژی
۵۱.....	۴-۱-۴ قیمت‌گذاری انرژی
۵۲.....	۵-۱-۴ مشخصات بارهای خانگی
۵۴.....	۲-۴ طرح شبیه‌سازی
۵۵.....	۳-۴ نتایج شبیه‌سازی
۵۶.....	۱-۳-۴ بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی قطعی
۶۶.....	۲-۳-۴ بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه
۶۹.....	۳-۳-۴ بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه
۷۴.....	۴-۳-۴ بررسی اثر تغییرات استراتژی‌های محافظه‌کارانه بر روی هزینه‌ها
۷۹.....	فصل ۵
۸۰.....	۱-۵ مقدمه
۸۰.....	۲-۵ نتیجه‌گیری
۸۲.....	۳-۵ پیشنهادها
۸۵.....	پیوست‌ها
۹۱.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۳) دروازه الکتریکی - ارتباط بین منابع انرژی الکتریکی و بارهای الکتریکی ۲۱
- شکل (۲-۳) اتصالات بین منابع انرژی حرارتی و بارهای حرارتی ۲۱
- شکل (۳-۳) دسته‌بندی بارهای خانگی ۲۲
- شکل (۴-۳) خانه هوشمند و ارتباطات بین بارها، منابع و سیستم مرکزی ۲۵
- شکل (۵-۳) الگوریتم سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی ۲۷
- شکل (۱-۴) داده‌های گذشته (۲۵ روز) الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۵
- شکل (۲-۴) تابع خود همبستگی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۶
- شکل (۳-۴) تابع خود همبستگی جزئی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۶
- شکل (۴-۴) تابع خود همبستگی با تفاضل فصلی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۶
- شکل (۵-۴) تابع خود همبستگی جزئی با تفاضل فصلی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۷
- شکل (۶-۴) تابع خود همبستگی با تفاضل فصلی و غیر فصلی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۷
- شکل (۷-۴) تابع خود همبستگی جزئی با تفاضل فصلی و غیر فصلی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۷
- شکل (۸-۴) ACF و PACF خطاهای باقیمانده‌ی داده‌های الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۸
- شکل (۹-۴) توزیع نرمال خطاهای باقیمانده‌ی داده‌های الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی ۴۹
- شکل (۱۰-۴) پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای توان تابش خورشیدی در الف) ساعت ۷ ، ب) ساعت ۱۲ ۵۰
- شکل (۱۱-۴) پیش‌بینی تک‌نقطه‌ای دمای بیرونی در الف) ساعت ۱ ، ب) ساعت ۱۲ ۵۰
- شکل (۱۲-۴) پیش‌بینی بازه‌ای توان تابش خورشیدی در الف) ساعت ۷ ، ب) ساعت ۱۲ ۵۰
- شکل (۱۳-۴) پیش‌بینی بازه‌ای دمای بیرونی در الف) ساعت ۱ ، ب) ساعت ۱۲ ۵۱
- شکل (۱۴-۴) قیمت‌گذاری خرید/فروش انرژی الکتریکی از/به شبکه برق ۵۲
- شکل (۱۵-۴) پروفایل بارهای ثابت الف) الکتریکی ، ب) حرارتی ۵۴

- شکل (۴-۱۶) نمودارهای شبیه‌سازی مدل قطعی الف) دمای داخلی و بیرونی، ب) توان لوازم گرمایشی، ج) منابع و بارهای حرارتی، د) تغییرات توان مخزن آب، ه) انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن آب، ه) دمای آب داخل مخزن ۵۷
- شکل (۴-۱۷) برنامه‌ریزی بارهای الکتریکی با مدل قطعی و در دو قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲ ۵۹
- شکل (۴-۱۸) خرید/فروش توان الکتریکی از شبکه برق با مدل قطعی و قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲ ۶۰
- شکل (۴-۱۹) شارژ / دشارژ واحد ذخیره‌ساز الکتریکی با مدل قطعی و قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲ ۶۱
- شکل (۴-۲۰) انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره‌ساز با مدل قطعی و در دو قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲ ۶۲
- شکل (۴-۲۱) وضعیت بهره‌برداری از منابع حرارتی با مدل قطعی و در دو قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲ ۶۳
- شکل (۴-۲۲) برنامه‌ریزی بارهای همبسته در مدل قطعی الف) بدون قیود پیوندی، ب) با قیود پیوندی ۶۴
- شکل (۴-۲۳) دمای داخلی در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه ۶۶
- شکل (۴-۲۴) منابع انرژی حرارتی در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه ۶۷
- شکل (۴-۲۵) توان تولیدی فتوولتاییک در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه ۶۷
- شکل (۴-۲۶) خرید/فروش برق از/به شبکه در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه ۶۸
- شکل (۴-۲۷) شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه ۶۸
- شکل (۴-۲۸) دمای داخلی در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ مقدار حداکثر ۷۰
- شکل (۴-۲۹) منابع حرارتی در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ مقدار حداکثر ۷۱
- شکل (۴-۳۰) توان تولیدی فتوولتاییک در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ مقدار حداکثر ۷۲
- شکل (۴-۳۱) خرید/فروش برق از/به شبکه در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ مقدار ۷۳

شکل (۳۲-۴) شارژ / دشارژ واحد ذخیره‌ساز در الف) مدل قطعی ، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش

خورشیدی ۰/۴ ، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ حداکثر مقدار ۷۳

شکل (۳۳-۴) اثر تغییر پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی بر هزینه‌ها با قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱ ، ب) سناریو ۲ ۷۵

شکل (۳۴-۴) اثر تغییر پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی بر هزینه‌ها با قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱ ، ب) سناریو ۲ ۷۶

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۲) دسته‌بندی بارهای خانگی و مدل‌سازی رفاه کاربر توسط مراجع ۱۲
- جدول (۲-۲) مباحث مرتبط با نحوه مدل‌سازی مدیریت انرژی خانگی در مراجع ۱۶
- جدول (۱-۴) مشخصات منابع تجدیدپذیر ۵۱
- جدول (۲-۴) مشخصات بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی ۵۳
- جدول (۳-۴) مشخصات بارهای حرارتی انعطاف‌پذیر زمانی ۵۳
- جدول (۴-۴) اثر قیود پیوندی بر روی هزینه‌های الکتریکی، حرارتی و کل ۶۵
- جدول (۵-۴) مجموع انرژی منابع حرارتی در کل روز در شکل (۴-۳۰) ۷۲
- جدول (۶-۴) مجموع انرژی منابع الکتریکی در کل روز در شکل‌های (۴-۳۲) و (۴-۳۳) ۷۴

علائم و اختصارات مورد استفاده در مدل های ریاضی در این پایان نامه

مجموعه ها:

$$\begin{aligned} \Omega^{DO} & \text{ مجموعه ی متغیرهای مدل بهینه سازی قطعی شامل:} \\ & \{ p_t^{PV}, p_t^{SWH,+}, p_t^{SWH,-}, p_t^{GWH}, p_t^B, p_t^S, p_t^{CH}, p_t^{DH}, \\ & p_{i,t}, s_{i,t}, u_t, e_t^{ST}, e_t^{WT}, m_t^F, \theta_t^{IN}, \theta_t^{WT} \} \\ \Omega^{RO} & \text{ مجموعه ی متغیرهای مدل بهینه سازی مقاوم شامل:} \\ & \{ v_t^{PV}, v_t^{SWH}, \bar{v}_t^\theta, \underline{v}_t^\theta; \mu_t^{PV}, \mu_t^{SWH}, \bar{\mu}_{t,k}^\theta, \underline{\mu}_{t,k}^\theta; \gamma_t^{PV}, \gamma_t^{SWH}, \bar{\gamma}_t^\theta, \underline{\gamma}_t^\theta \} \\ \Omega^{TF} & \text{ مجموعه ی بارهای الکتریکی انعطاف پذیر زمانی} \\ \Omega^{PF} & \text{ مجموعه ی بارهای الکتریکی انعطاف پذیر توانی} \\ \Omega^{FX} & \text{ مجموعه ی بارهای الکتریکی ثابت} \\ \Psi^{TF} & \text{ مجموعه ی بارهای حرارتی انعطاف پذیر زمانی} \\ \Psi^{PF} & \text{ مجموعه ی بارهای حرارتی انعطاف پذیر توانی} \\ \Psi^{FX} & \text{ مجموعه ی بارهای حرارتی ثابت} \\ \Omega^{DL} & \text{ مجموعه ی بارهایی که بهره برداری از آنها با یکدیگر پیوند دارد} \end{aligned}$$

زیرنویس ها:

$$\begin{aligned} t & \text{ زیرنویس مربوط به بازه زمانی} \\ i & \text{ زیرنویس مربوط به بار خانگی} \end{aligned}$$

پارامترها:

$$\begin{aligned} P_t^{SR} & \text{ توان تابشی خورشید در بازه زمانی } t \text{ [KW/m}^2\text{]} \\ \bar{P}_t^{SR} & \text{ باند بالای توان تابشی خورشیدی پیش بینی شده در بازه زمانی } t \text{ [KW/m}^2\text{]} \\ \underline{P}_t^{SR} & \text{ باند پایین توان تابشی خورشیدی پیش بینی شده در بازه زمانی } t \text{ [KW/m}^2\text{]} \\ \bar{P}_i & \text{ بیشینه توان بار خانگی } i \text{ [KW]} \\ \underline{P}_i & \text{ کمینه توان بار خانگی } i \text{ [KW]} \\ F_{i,t} & \text{ توان الکتریکی مصرف شده توسط بار الکتریکی ثابت } i \text{ در بازه زمانی } t \text{ [KW]} \\ \bar{P}^{CH} & \text{ بیشینه توان مجاز شارژ واحد ذخیره ساز [KW]} \\ \bar{P}^{DH} & \text{ بیشینه توان مجاز دشارژ واحد ذخیره ساز [KW]} \end{aligned}$$

$\overline{P}^S$	بیشینه توان مجاز برای فروش به شبکه برق [KW]
$\overline{P}^B$	بیشینه توان مجاز برای خرید از شبکه برق [KW]
$\overline{P}^{GWH}$	بیشینه توان آبگرمکن گازی [KW]
$\overline{P}^{SWH,-}$	بیشینه توان حرارتی که می‌توان از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی دریافت کرد. [KW]
N_t	تعداد بازه‌های زمانی در طول روز
Δt	مدت زمان یک بازه زمانی
D_i	مدت زمان لازم برای اتمام وظیفه بارهای انعطاف‌پذیر زمانی
T_i^S	حداقل زمان درخواست داده شده توسط کاربر برای شروع بهره‌برداری از بارهای انعطاف‌پذیر زمانی
T_i^F	حداکثر زمان درخواست داده شده توسط کاربر برای اتمام بهره‌برداری از بارهای انعطاف‌پذیر زمانی
E^{ST}	ظرفیت واحد ذخیره‌ساز [KWh]
M^{WT}	ظرفیت مخزن آب [Kg]
λ_t^B	قیمت انرژی الکتریکی خریداری شده از شرکت برق در بازه زمانی t [Rial/KWh]
λ_t^S	قیمت انرژی الکتریکی فروخته شده به شرکت برق در بازه زمانی t [Rial/KWh]
λ_t^F	قیمت سوخت گاز در بازه زمانی t [Rial/m ³]
$\overline{\theta}^{IN}$	بیشینه دمای مورد انتظار ساکنین خانه هوشمند [°C]
$\underline{\theta}^{IN}$	کمینه دمای مورد انتظار ساکنین خانه هوشمند [°C]
θ_t^{OUT}	دمای بیرونی در بازه زمانی t [°C]
$\overline{\theta}_t^{OUT}$	باند بالای دمای بیرونی پیش‌بینی شده در بازه زمانی t [°C]
$\underline{\theta}_t^{OUT}$	باند پایین دمای بیرونی پیش‌بینی شده در بازه زمانی t [°C]
θ_i^{HW}	دمای آب گرم مورد نیاز برای بار حرارتی ثابت یا انعطاف‌پذیر زمانی i [°C]
θ^{CW}	دمای آب سرد ورودی به مخزن آب [°C]
$\overline{\theta}^{WT}$	بیشینه دمای مجاز برای مخزن آب [°C]
$\underline{\theta}^{WT}$	کمینه دمای مجاز برای مخزن آب [°C]
μ^{CH}	بازده تبدیل انرژی واحد ذخیره‌ساز (در حالت شارژ)
μ^{DH}	بازده تبدیل انرژی واحد ذخیره‌ساز (در حالت دشارژ)
COP^C	ضریب عملکرد کولرگازی در حالت سرمایش
COP^H	ضریب عملکرد کولرگازی در حالت گرمایش
ε	فاکتور اینرسی

η^{PV}	بازده پنل فتوولتاییک
η^{SWH}	بازده پنل آبگرمکن خورشیدی
η^{GWH}	بازده آبگرمکن گازی
η^{CO}	بازده کویل‌ها داخل مخزن آب
C^W	گرمای ویژه آب [KWh/Kg.°C]
HV^F	ارزش حرارتی سوخت گاز [KWh/m ³]
UA^{BL}	هدایت حرارتی ساختمان [KW/°C]
A^{PV}	مساحت سطح پنل فتوولتاییک [m ²]
A^{SWH}	مساحت سطح پنل آبگرمکن خورشیدی [m ²]
M_i	دبی آب گرم مورد نیاز برای بار حرارتی انعطاف‌پذیر زمانی i [Kg/t]
$M_{i,t}$	دبی آب گرم مورد نیاز برای بار حرارتی ثابت i در بازه زمانی t [Kg/t]
Γ^{PV}	پارامتر کنترل مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم به عدم قطعیت تابش خورشید به سطح پنل فتوولتاییک
Γ^{SWH}	پارامتر کنترل مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم به عدم قطعیت تابش خورشید به سطح پنل آبگرمکن خورشیدی
$\bar{\Gamma}_t^\theta, \underline{\Gamma}_t^\theta$	پارامترهای کنترل مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم به عدم قطعیت پارامتر دمای بیرونی (در معادله دمای داخلی) در بازه زمانی t

متغیرها:

$p_{i,t}$	توان مصرفی بار i در بازه زمانی t [KW]
p_t^{PV}	توان تولیدی فتوولتاییک در بازه زمانی t [KW]
$p_t^{SWH,+}$	توان حرارتی منتقل شده به مخزن آب توسط آبگرمکن خورشیدی در بازه زمانی t [KW]
$p_t^{SWH,-}$	توان حرارتی دریافتی از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی در بازه زمانی t [KW]
p_t^{GWH}	توان تولیدی توسط آبگرمکن گازی در بازه زمانی t [KW]
p_t^B	توان خریداری شده از شبکه برق در بازه زمانی t [KW]
p_t^S	توان فروخته شده به شبکه برق در بازه زمانی t [KW]
p_t^{CH}	توان منتقل شده به واحد ذخیره‌ساز (شارژ) در بازه زمانی t [KW]
p_t^{DH}	توان دریافت شده از واحد ذخیره‌ساز (دشارژ) در بازه زمانی t [KW]
$S_{i,t}$	متغیر باینری برای نشان دادن وضعیت بار i در بازه زمانی t (روشن=۱)
u_t	متغیر باینری برای نشان دادن وضعیت خرید/فروش در بازه زمانی t (خرید=۱)

e_t^{ST}	انرژی الکتریکی ذخیره شده در واحد ذخیره‌ساز در انتهای بازه زمانی t [KWh]
e_t^{WT}	انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن آب در انتهای بازه زمانی t [KWh]
θ_t^{IN}	دمای داخلی خانه در بازه زمانی t [°C]
θ_t^{WT}	دمای داخل مخزن آب در بازه زمانی t [°C]
m_t^F	دبی گاز مصرفی در آبگرمکن گازی در بازه زمانی t [m ³ /t]

فصل ۱

پیشگفتار

۱-۱ مقدمه

امروزه با افزایش مصرف‌کنندگان انرژی و بزرگ‌تر شدن مقیاس شبکه‌های انرژی، افزایش و توسعه تولید انرژی امری اجتناب‌ناپذیر است. هم‌راستا با افزایش تولید انرژی، توسعه بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و تولید پراکنده به منظور افزایش بهره‌وری از منابع انرژی، کاهش آلودگی، جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای و غیره در دستور کار بسیاری از کشورها از جمله ایران قرار گرفته است. از سوی دیگر، یکی از مشکلات بزرگ شرکت‌های توزیع، کنترل پیک بار می‌باشد که تا کنون سیاست‌های مختلفی برای آن ارائه شده است. در این بین باید به چند سوال مهم پاسخ داده شود. سوالاتی مانند: "برای حل مشکلات فوق تا چه میزان امکان افزایش سهم تولید میسر و پاسخگو خواهد بود؟" یا "افزایش سهم تولید تنها پاسخ این مساله می‌باشد؟" یا "روش‌های دیگری چون افزایش راندمان بارهای خانگی و یا جلوگیری از اتلاف انرژی و یا به بیان بهتر مدیریت انرژی در سمت تقاضا نیز می‌توانند پاسخ‌های خوبی برای حل این مشکلات باشند؟"

با توجه به سهم زیاد بارهای خانگی نسبت به بار کلی شبکه توزیع، ضرورت مدیریت انرژی در مقیاس خانگی محسوس است. عملیاتی شدن مفهوم بار پاسخگو در خانه‌های هوشمند میسر شده است. به دنبال آن با جابجایی و مدیریت بخش عمده‌ای از بارهای خانگی می‌توان مشکل پیک بار را حل نمود و مزایای بسیاری، هم برای مشترکین و هم برای شرکت‌های توزیع فراهم آورد. همچنین با مدیریت انرژی یکپارچه برق و حرارت، امکان استفاده بهینه از منابع پایدار و تجدیدپذیر مهیا، و بهره‌وری بهینه حامل‌های انرژی چون برق و گاز فراهم می‌شود.

۲-۱ هدف پژوهش

هدف این تحقیق، پیاده‌سازی سیستم مدیریت انرژی خانگی به منظور مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در یک خانه هوشمند، با در نظر گرفتن سطح رفاه ساکنین خانه می‌باشد. سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی دارای رابط کاربری برای دریافت اطلاعات مورد نیاز از

طرف ساکنین خانه می‌باشد. همچنین این سیستم، سایر اطلاعات مورد نیاز خود را از دیگر دستگاه-های اندازه‌گیری، اطلاعات گذشته و سیگنال‌های قیمت برق و گاز بدست می‌آورد. با داشتن این اطلاعات و نیز پیش‌بینی عدم قطعیت¹ منابع انرژی الکتریکی و حرارتی و دمای بیرونی، و اطلاعات بارهای الکتریکی و حرارتی، سیستم مدیریت انرژی می‌تواند برای ساعات پیش‌رو، تولید و مصرف انرژی را بصورت بهینه برنامه‌ریزی کند. سپس سیستم مدیریت انرژی، تصمیمات اتخاذ شده را برای اجرا به دستگاه‌های کنترلی، منابع انرژی و بارهای خانگی برنامه‌پذیر ارسال می‌کند. آن دسته از لوازم خانگی که قابلیت برنامه‌ریزی ندارند و استفاده از آن‌ها اثر مستقیمی روی رفاه کاربر می‌گذارد، مانند رایانه شخصی و آب گرم مورد نیاز برای مصارف بهداشتی، در فرآیند برنامه‌ریزی وارد نمی‌شوند و فقط تأمین مقدار انرژی مورد نیاز آن‌ها از جمله وظایف سیستم مدیریت انرژی می‌باشد. منابع انرژی خانه هوشمند مورد مطالعه، شامل آبگرمکن خورشیدی و واحد فتوولتائیک می‌باشد. برای افزایش قابلیت اطمینان تولید، منابع پشتیبان آبگرمکن گازی و شبکه برق برای هر کدام بصورت مجزا در نظر گرفته می‌شود. ارتباط و میزان مشارکت کاربر با سیستم مدیریت انرژی شامل صدور دستوراتی مانند تنظیم دمای مطلوب داخل خانه توسط رابط کاربری خواهد بود.

در این پایان‌نامه، مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی به صورت مسأله بهینه‌سازی، مدل‌سازی می‌شود. جهت پوشش عدم قطعیت، از دو روش قطعی و بهینه‌سازی مقاوم استفاده شده است. در مدل بهینه‌سازی قطعی، عدم قطعیت با پیش‌بینی تک-سناریو و در مدل بهینه‌سازی مقاوم، عدم قطعیت با پیش‌بینی بازه‌ای مدل شده‌اند. سؤالات اساسی که این پایان‌نامه بر اساس آن‌ها طراحی شده است، بصورت خلاصه شامل موارد زیر است:

- (۱) در نظر گرفتن یکپارچگی میان منابع و بارهای الکتریکی و حرارتی، در مدیریت انرژی خانگی چه مقدار اهمیت و ضرورت دارد؟

¹ Uncertainty

۲) اتخاذ سطوح مختلف استراتژی‌های محافظه‌کارانه در مقابل روش قطعی در مدیریت انرژی

خانگی، باعث چه تغییراتی در بهینه‌سازی مصرف و تولید انرژی می‌شود؟

۳) اتخاذ سطوح مختلف استراتژی‌های محافظه‌کارانه در مقابل روش قطعی در مدیریت انرژی

خانگی، چه اثری بر روی رفاه ساکنین خانه و هزینه‌های تمام شده، می‌گذارد؟

۳-۱ نوآوری پایان‌نامه

نوآوری اصلی این پژوهش شامل موارد زیر است:

۱- معرفی سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در خانه هوشمند به منظور

مدیریت یکپارچه بارها و منابع انرژی الکتریکی و حرارتی

۲- شیوه جدید در دسته‌بندی بارها، به همراه تعریف بارهای حرارتی بصورت برنامه‌پذیر و

برنامه‌ناپذیر

۳- استفاده از دو بار الکتریکی (کولر گازی) و حرارتی (سیستم شوفاژی) بصورت یکپارچه برای

گرمایش خانه

۴- بهره‌برداری همزمان از منابع تجدیدپذیر خورشیدی بصورت الکتریکی (پنل فتوولتاییک) و

حرارتی (آبگرمکن خورشیدی)

۵- نوآوری در مدل بهینه‌سازی مقاوم در معادلات دمای داخلی

۴-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

سایر فصل‌های پایان‌نامه به این شرح است. در فصل دوم، مباحث و موضوعات حوزه مدیریت

انرژی خانگی مطرح و سپس گزارشی از کارها و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه و مفاهیم مرتبط

با حوزه مدیریت انرژی خانگی ارائه می‌شود.

در فصل سوم، ابتدا به تشریح مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در خانه هوشمند پرداخته و بخش‌های مختلف خانه هوشمند مورد مطالعه و مباحث مرتبط با هرکدام معرفی خواهد شد. همچنین الگوریتم سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی تشریح و سپس مدل‌سازی ریاضی مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی با دو مدل بهینه‌سازی قطعی و مدل بهینه‌سازی مقاوم ارائه خواهد شد.

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی به همراه معرفی روش پیش‌بینی و نتایج حاصل از آن در فصل چهارم ارائه خواهد شد. بخش پایانی فصل چهارم شامل نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی خواهد بود. در فصل پنجم، پس از ارائه خلاصه‌ای از مباحث مطرح شده در پایان‌نامه، نتایج نهایی و پیشنهادات بیان خواهد شد.

فصل ۲

سیستم مدیریت انرژی خانگی:

مروری بر کارهای انجام شده

۱-۲ مقدمه

امروزه انرژی خانه‌های هوشمند از طریق منابع مختلف برق و حرارت مانند شبکه اصلی برق^۱ [۱] و [۲]، شبکه گازرسانی، سلول‌های سوختی^۲ [۲]، مولد همزمان برق و حرارت^۳ [۳]، آبگرمکن خورشیدی^۴ [۴] و واحد فتوولتاییک^۵ [۱] و [۲] و غیره می‌تواند تأمین شود. از مسائل مهمی که به آن پرداخته می‌شود، مدیریت این منابع و بارهای خانگی، به منظور بهینه‌سازی انرژی است. بخشی از انرژی خانه‌های هوشمند از منابع انرژی بیرونی که هزینه‌بر است و بخشی دیگر از منابع داخلی که می‌تواند درآمدزا باشد، تأمین می‌شود. با برنامه‌ریزی بهینه‌ی بارهای خانگی که قابلیت برنامه‌ریزی و پاسخگویی به قیمت انرژی را دارند، می‌توان بهره‌برداری از منابع انرژی را بهینه و هزینه قبض پرداختی کاربر را کاهش داد. بنابراین درک صحیح از انواع بارهای خانگی، نحوه استفاده کاربران از آن‌ها و چگونگی مدیریت و کنترل آن‌ها در مدیریت انرژی خانه‌های هوشمند، مهم خواهد بود. برنامه‌ریزی برای استفاده از بارهای خانگی، مشابه برنامه‌ریزی برای تولید و در مدار قرار گرفتن نیروگاه-هاست^۶؛ با این تفاوت که برنامه‌ریزی استفاده از لوازم خانگی مبتنی بر بهینه‌سازی مصرف انرژی است و به عواملی چون رفاه کاربر و قیود بارهای خانگی وابسته است، حال آن‌که برنامه‌ریزی در مدار قرار گرفتن واحدهای نیروگاهی قیودی به مراتب ساده‌تر و مرتبط با خود را دارد [۵].

از سوی دیگر ساکنین خانه‌ها برای استفاده از بارهای خانگی برنامه مورد انتظار خود را دارند و هرگونه تغییر در این برنامه‌ها بر نحوه زندگی و رفاه آن‌ها اثر مستقیم خواهد گذاشت. بعنوان مثال ساکنین مایل هستند همیشه دمای خانه در یک محدوده‌ی مناسب باشد و یا از بعضی از بارهای خانگی در ساعات مشخص یا بازه‌های زمانی مورد انتظارشان استفاده کنند، که نقض این خواسته‌ها اثر

¹ Main Grid (MG)

² Fuel Cells (FC)

³ Combined Heat and Power (CHP)

⁴ Solar Water Heater (SWH)

⁵ Photovoltaic (PV)

⁶ Unit Commitment

نامناسبی بر رفاه آنها می‌گذارد. پس در مدیریت انرژی خانه هوشمند رفاه کاربران نیز باید دیده شود چرا که از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲-۲ مروری بر کارهای انجام شده در مدیریت انرژی خانگی

در این بخش، کارهای انجام شده در مدیریت انرژی خانگی بررسی و موضوعات مطرح در این حوزه معرفی می‌شوند.

۱-۲-۲ دسته‌بندی بارهای خانگی

بهینه‌سازی مصرف انرژی به قیود بارهای خانگی نیز وابسته است. بنابراین به منظور شناخت بهتر و کنترل دقیق بارهای خانگی، باید آنها را بر اساس ویژگی‌های کاربردی و فنی دسته‌بندی کرد. مرجع [۶] لوازم خانگی را به سه دسته وقفه‌پذیر^۱، وقفه‌ناپذیر^۲ و حرارتی تقسیم کرده است. لوازم خانگی وقفه‌پذیر مانند خودروی الکتریکی برخلاف لوازم وقفه‌ناپذیر مانند لباسشویی، امکان وقفه در زمان بهره‌برداری را دارند؛ اما در هر دو دسته باید مدت زمان بهره‌برداری مورد نیاز برای اتمام وظیفه در طول دوره برنامه‌ریزی تمام شود. همچنین این مرجع بارهای حرارتی را شامل بارهایی که قابلیت وقفه تحت شرایط خاصی دارند، می‌داند. سیستم گرمایشی، هواسازها و یخچال، مثال‌هایی از این دسته از بارها هستند.

نویسندگان در مرجع [۷] بارها را به دو دسته قابل کنترل^۳ و غیرقابل کنترل^۴ تقسیم کرده‌اند. لوازم قابل کنترل مانند خشک‌کن، گرمایش و سرمایش محیطی و غیره را می‌توان با در نظر گرفتن رفاه کاربر کنترل کرد، اما کنترل کردن دسته دوم مانند لوازم سرگرمی، سیستم روشنایی، غذاسازها و غیره به علت عدم انعطاف‌پذیری رفاه کاربر غیرقابل کنترل هستند. نویسندگان در مرجع [۸] چهار

^۱ Interruptible

^۲ Non Interruptible

^۳ Controllable

^۴ Non Controllable

دسته تأخیرپذیر^۱، حرارتی، قابل قطع^۲ و بحرانی^۳ را برای تقسیم‌بندی بارهای خانگی در نظر گرفته‌اند. آن‌ها همچنین بارهای تأخیرپذیر را به دو دسته انعطاف‌پذیر^۴ و انعطاف‌ناپذیر^۵ مجزا کرده‌اند. بارهای تأخیرپذیر انعطاف‌پذیر مانند خودروی الکتریکی یا پمپ آب استخر، قابلیت تأخیر در زمان بهره‌برداری و وقفه در میان زمان استفاده یا کاهش توان مصرفی را دارند، در حالیکه بهره‌برداری از لوازم خانگی تأخیرپذیر انعطاف‌ناپذیر، مثل ماشین لباس‌شویی و ظرف‌شویی از شروع بهره‌برداری تا انتهای آن باید بدون وقفه باشد. توان مصرفی در بارهای حرارتی به منظور کنترل دمای داخل خانه قابل کنترل است. بارهای قابل قطع بارهایی هستند که امکان خاموش کردن آن‌ها بدون نیاز به روشن کردن مجدد آن‌ها وجود دارد و بارهای بحرانی نیز قابلیت برنامه‌ریزی ندارند.

مرجع [۹] نیز سه دسته‌ی بارهای قابل تنظیم^۶ مانند سیستم‌های هواساز، قابل قطع مانند ماشین لباس‌شویی و ثابت مانند سیستم روشنایی را برای دسته‌بندی بارهای خانگی در نظر گرفته، هرچند بارهای ثابت را در فرآیند برنامه‌ریزی مصرف لوازم خانگی وارد نکرده است. ساده‌ترین دسته-بندی را مرجع [۱۰] انجام داده است. این مرجع فقط سه بار خانگی آبگرمکن برقی، هواساز و ماشین-های شوینده را برای برنامه‌ریزی انتخاب کرده است.

۲-۲-۲ رفاه کاربر

یکی از مسایل مهمی که در بهینه‌سازی مصرف انرژی باید به آن توجه داشت، رفاه کاربران از مصرف انرژی می‌باشد. بهینه‌سازی مصرف انرژی نباید به گونه‌ای انجام شود که رفاه ساکنین خانه از سطح مطلوبی کمتر شود. بعنوان مثال در مرجع [۱] با اولویت دادن به بارهای خانگی، رفاه کاربر دیده شده است و یا در مرجع [۱۱] مداخله کاربر در برنامه‌ریزی لوازم خانگی به تعیین زمان روشن و

¹ Deferrable

² Curtailable

³ Critical

⁴ Flexible

⁵ Non Flexible

⁶ Regulate able

خاموش شدن یا تکمیل یک وظیفه در یک دوره مشخص محدود می‌شود. مراجع [۶] و [۱۰] نیز با دریافت یک محدوده‌ی زمانی از کاربر، مصرف انرژی بارهای کنترل‌پذیر را به نحوی برنامه‌ریزی کرده‌اند که بار مورد نظر در دوره‌ی درخواست داده شده به بهره‌برداری برسد.

یکی از نکات مهم در مساله رفاه، دمای داخلی مورد انتظار کاربر است. مراجع [۲]، [۶]، [۹]، [۱۰] و [۱۲] با دریافت محدوده دمایی مورد نیاز کاربر و ورود آن در مساله بهینه‌سازی به این مهم پاسخ داده‌اند. سیستم مدیریت انرژی پیشنهادی در مراجع [۲] و [۹] توان مصرفی سیستم هواساز را که در یک بازه مشخص قابل تغییر است، طوری انتخاب می‌کنند تا دمای داخلی در بازه دمایی مورد انتظار کاربر قرار بگیرد. مرجع [۶] محدوده‌ی دمایی مورد نیاز برای آب گرم را نیز دریافت می‌کند. مرجع [۱۰] سطح رفاه را تفاوت میان دمای فعلی با دمای هدف کاربر می‌داند. نویسندگان در مرجع [۱۲] دو محدوده دمایی متفاوت را در نظر گرفته‌اند. یک محدوده دمایی برای سیستم هواساز و یک محدوده‌ی دمایی دیگر برای کنترل توان مصرفی یخچال.

مرجع [۱۳] با اضافه کردن مؤلفه جریمه‌ی عدم رضایت در تابع هدف، دمای رفاهی کاربر را در نظر گرفته، و همچنین برای جلوگیری از بوجود آمدن وقفه در دوره بهره‌برداری از لوازم خانگی، مؤلفه جریمه‌ای متناظر با زمان استفاده از آن‌ها را در تابع هدف اضافه کرده است. مرجع [۱۴] رفاه کاربر را بصورت ترکیبی هم در تابع هدف و با یک تابع راحتی، و هم بصورت محدوده دمایی مورد انتظار برای سیستم هواساز و محدوده زمانی مورد انتظار کاربر برای بهره‌برداری لوازم خانگی وقفه‌پذیر و وقفه-ناپذیر، مدل کرده است.

مرجع [۸] با استفاده از یک الگوریتم، رفاه کاربر را در مساله مدیریت انرژی خانگی مدل کرده است. مشخص است که افزایش رفاه کاربر می‌تواند باعث افزایش مصرف انرژی شود و افزایش هزینه را به دنبال داشته باشد. نویسندگان در این مرجع ابتدا با تعریف هزینه برای رفاه، الگوریتم فوق را برای

ایجاد یک مصالحه^۱ بین هزینه تمام شده برای کاربر و هزینه رفاه او ارائه داده‌اند. بنابراین اطلاعات مهمی از سوی کاربران مانند دمای داخلی مورد انتظار، زمان دلخواه و یا محدوده زمانی مورد انتظار برای استفاده از بارهای خانگی و غیره باید در بهینه‌سازی مصرف انرژی مورد استفاده قرار گیرد. جدول (۱-۲) خلاصه‌ای از نحوه دسته‌بندی بارهای خانگی و مدل‌سازی رفاه کاربر توسط مراجع مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۱-۲) دسته‌بندی بارهای خانگی و مدل‌سازی رفاه کاربر

مدل‌سازی رفاه	دسته‌بندی بارهای خانگی	مرجع
محدوده دمایی مورد انتظار	تمرکز بر روی سیستم‌های هواساز	[۲]
توسط یک تابع	قابل کنترل / ثابت / قابل پرش	[۳]
محدوده دمایی مورد انتظار	قابل کنترل / غیر قابل کنترل	[۴]
بازه زمانی مورد انتظار	(تمرکز بر سیستم هواساز و آب گرم مصرفی)	
محدوده دمایی مورد انتظار	قابل کنترل حرارتی / قابل کنترل غیر حرارتی / غیر قابل کنترل	[۵]
محدوده دمایی مورد انتظار	وقفه‌پذیر / وقفه‌ناپذیر / حرارتی	[۶]
بازه زمانی مورد انتظار		
اولویت دهی بارها	قابل کنترل / غیر قابل کنترل	[۷]
محدوده دمایی مورد انتظار		
الگوریتم	تأخیرپذیر انعطاف‌پذیر / تأخیرپذیر انعطاف‌ناپذیر	[۸]
	حرارتی / قابل تعویض / بحرانی	
محدوده دمایی مورد انتظار	تأخیرپذیر / قابل تنظیم / ثابت	[۹]
محدوده دمایی مورد انتظار	شوینده‌ها / هواساز / آبگرمکن برقی	[۱۰]
بازه زمانی مورد انتظار		
محدوده دمایی مورد انتظار	بارهای الکتریکی و حرارتی قابل کنترل	[۱۲]
بازه زمانی مورد انتظار		
محدوده دمایی مورد انتظار	وقفه‌پذیر / وقفه‌ناپذیر	[۱۳]
بازه زمانی مورد انتظار		
ترم جریمه در تابع هدف		
محدوده دمایی مورد انتظار	خودکار / غیر خودکار	[۱۵]
بازه زمانی	غیر قابل کنترل / وقفه‌پذیر / وقفه‌ناپذیر / حرارتی	[۱۶]
محدوده دمایی مورد انتظار	قابل تعویض وقفه‌ناپذیر / قابل تعویض وقفه‌پذیر / چندگانه /	[۱۷]
بازه زمانی مورد انتظار	حرارتی / ثابت	
محدوده دمایی مورد انتظار	غیر قابل کنترل / قابل کنترل سوییچ / حرارتی کنترل	[۱۸]
بازه زمانی مورد انتظار		

¹ Tradeoff

۲-۲-۳ انتقال اطلاعات

پژوهش پیرامون مسایل مدیریت انرژی در سمت تقاضا و نزدیک به مصرف نیازمند اطلاعات دقیق از خانه‌ها، منابع و بارهای خانگی، وسایل نظارت و کنترل هوشمند و غیره می‌باشد. امروزه خانه‌های هوشمند مجهز به وسایل ارتباطی مختلفی جهت نظارت و کنترل بارها و منابع انرژی هستند. پروتکل‌های مختلفی همچون زیگبی^۱ [۱۹] و [۲۰]، اینفرارد^۲ [۱۹] و ارتباطات خط توان^۳ [۲۰] و غیره برای این ارتباطات مورد استفاده قرار می‌گیرد. نویسندگان در مرجع [۱۹] قابلیت کنترل تجهیزات اتاق را با استفاده از یک کنترل از راه دور اینفرارد و یک هاب زیگبی که قابلیت کدگذاری سیگنال‌های اینفرارد را دارد، ساده کرده‌اند. در مرجع [۲۰] نیز مازول اندازه‌گیری انرژی مبتنی بر فن آوری زیگبی برای دریافت اطلاعات و نظارت بر لوازم خانگی و روشنایی، و درگاه انرژی تجدیدپذیر مبتنی بر فناوری ارتباطات خط توان برای نظارت بر میزان تولید منابع تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از آنجایی که هدف این پایان‌نامه بررسی تکنولوژی‌ها و پروتکل‌های مختلف ارتباطی در خانه‌های هوشمند نیست، به همین مقدار اطلاعات بسنده می‌شود.

۲-۲-۴ مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی

همانطور که اشاره شد، خانه هوشمند می‌تواند با فروش انرژی الکتریکی تولید شده از منابع داخلی خود مانند واحد فتوولتاییک، توربین بادی و واحد تولید همزمان برق و حرارت، درآمد داشته باشد و قبض برق خود را کاهش دهد. در این بین سیستم مدیریت انرژی می‌تواند این کاهش هزینه را بیشینه کند. مراجعی مانند [۶]، [۱۲]، [۱۷] و [۲۱] با در نظر گرفتن فروش انرژی الکتریکی به شبکه و درآمدزا بودن آن، مساله مدیریت انرژی الکتریکی را مدل‌سازی کرده‌اند.

^۱ ZigBee

^۲ Infrared

^۳ Power Line Communication (PLC)

با بررسی‌های انجام شده مشاهده شد که برخی مراجع همچون [۱]، [۲]، [۱۳]، [۱۴]، [۱۷] و [۲۲] تنها منابع انرژی الکتریکی را برای بارهای خانگی در نظر گرفته‌اند. در این مراجع بارهای حرارتی مانند آب گرم مورد نیاز ساکنین دیده نشده است و در بعضی از آن‌ها همچون [۲]، [۱۳]، [۱۴] و [۱۷] فقط سیستم گرمایشی و سرمایشی خانه هوشمند دیده شده است. در مرجع [۱] سیستم مدیریت انرژی خانگی هوشمند برای برنامه‌ریزی مصرف لوازم خانگی بر اساس اولویت‌های مشتری و با در نظر گرفتن منابع انرژی تجدیدپذیر ارائه شده است. سیستم پیشنهادی، اولویت پویایی را به لوازم خانگی با توجه به نوع دستگاه و وضعیت فعلی آن اختصاص داده است. سپس بر اساس اولویت تعیین شده و با توجه به ظرفیت تولید انرژی تجدیدپذیر، دستگاه‌ها برنامه‌ریزی شده‌اند. در مرجع [۲] نیز روشی هوشمندانه برای برنامه‌ریزی مصرف لوازم گرمایشی و سرمایشی خانه هوشمند ارائه شده است. تمرکز این مرجع بر روی کنترل سیستم‌های گرمایش، تهویه مطبوع و هواسازها^۱ بوده است.

مرجع [۱۴] با در نظر گرفتن شبکه برق بعنوان تنها منبع انرژی الکتریکی، سیستم هواساز و بارهای وقفه‌پذیر و وقفه‌ناپذیر را بر اساس پاسخگویی بار به قیمت انرژی برنامه‌ریزی کرده است. با توجه به میزان بار و قیمت لحظه‌ای برق، هدف نویسندگان مرجع [۲۲] تعیین قوانین کنترل هماهنگ و بهینه برای تعداد مشخصی باتری می‌باشد، تا کل هزینه خرید برق از شبکه حداقل و قبض برق مشترک کمینه شود.

مراجع دیگری همچون [۴]، [۵]، [۶]، [۱۲]، [۱۶] و [۱۸] با در نظر گرفتن منابع انرژی الکتریکی مختلف، مدیریت انرژی خانه هوشمند را مدل کرده‌اند و نیز در مدل‌سازی خود آب گرم مورد نیاز ساکنین را بعنوان یک بار حرارتی در نظر گرفته‌اند. در این دسته تنها مرجع [۴] یک منبع غیر الکتریکی یعنی آبگرمکن خورشیدی را بعنوان منبع تأمین‌کننده آب گرم در نظر گرفته است،

¹ Heating, Ventilating, and Air-Conditioning (HVAC)

هرچند تنها منبع انرژی الکتریکی را شبکه برق فرض کرده است. مراجع دیگر یعنی [۵]، [۶]، [۱۲]، [۱۶] و [۱۸] از آبگرمکن برقی^۱ برای پاسخ‌گویی به نیاز آب گرم کاربر استفاده کرده‌اند.

مرجع [۴] با ادغام واحد آبگرمکن خورشیدی و چیلر جذبی، سرمایش، گرمایش و نیازمندی آب گرم برای خانه هوشمند را فراهم کرده است. هدف آن کاهش هزینه خرید انرژی الکتریکی از شبکه با در نظر گرفتن رفاه ساکنین می‌باشد. همچنین برای پشتیبانی آبگرمکن خورشیدی یک سیستم ثانویه نیز در نظر گرفته شده است تا در صورت کمبود انرژی خورشیدی، بتوان به نیاز آب گرم کاربر جواب داد. در این مرجع، بارهای کنترل‌پذیر مدیریت شده و از بارهای کنترل‌ناپذیر چشم‌پوشی شده است. عدم قطعیت تولید خورشیدی، دمای بیرونی و قیمت انرژی نیز در این مرجع در نظر گرفته شده است.

مرجع [۶] با در نظر گرفتن یک آبگرمکن برقی و یک منبع ذخیره آب گرم، نیازمندی ساکنین به آب گرم را پاسخ داده است. مرجع [۵] که برنامه‌ریزی بارها را مشابه برنامه‌ریزی تولید واحدهای نیروگاهی می‌داند، با در نظر گرفتن عدم قطعیت مقدار آب گرم مورد نیاز و قیمت انرژی الکتریکی، سعی در برنامه‌ریزی مصرف آب گرم مورد نیاز کاربران داشته است. منبع تأمین کننده آب گرم در این مرجع آبگرمکن برقی و تنها منبع انرژی الکتریکی شبکه برق است. مراجع [۱۲] و [۱۶] با در نظر گرفتن منابع انرژی الکتریکی همچون واحد خورشیدی، توربین بادی، شبکه برق و سیستم ذخیره‌ساز، به مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی یک خانه هوشمند و نیاز آب گرم ساکنین پرداخته‌اند.

نویسندگان مرجع [۱۲] با مدیریت بارهای کنترل‌پذیر الکتریکی و حرارتی و در نظر گرفتن رفاه ساکنین، هدف کاهش هزینه‌های کاربر را دنبال می‌کنند. مرجع [۱۸] با در نظر گرفتن منابع انرژی الکتریکی واحد فتوولتاییک و شبکه برق، مدیریت انرژی خانه هوشمند را مدل کرده است. در این مرجع سیستم هواساز برای فراهم کردن دمای مورد انتظار کاربر نیز مدل شده است. جدول (۲-۲) شامل خلاصه‌ای از مباحث مرتبط با نحوه مدل‌سازی مدیریت انرژی خانگی در مراجع مختلف است.

¹ Electric Water Heater (EWH)

جدول (۲-۲) مدل سازی مدیریت انرژی خانگی در مراجع

مرجع	مدل	عدم قطعیت	منابع انرژی		فروش انرژی الکتریکی	مدل سازی هواساز و دمای داخلی	آب گرم مصرفی
			الکتریکی	حرارتی			
[۲]	تصادفی	تولیدات	PV, ST ^۱ , MG	FC	✗	✓	✓
[۳]	تصادفی	تولید بار	PV, CHP, ST, MG	CHP	✗	✓	✗
[۴]	تصادفی	قیمت انرژی	MG	SWH	✗	✓	✓
[۵]	تصادفی	قیمت انرژی مصرف آب گرم	MG	EWH	✗	✗	✓
[۶]	مقاوم	تولید خورشیدی	PV, MG	EWH	✓	✗	✓
[۷]		-	MG	EWH			✓
[۸]	تصادفی	دمای بیرونی	MG	✗	✗	✓	✗
[۱۰]	قطعی	-	MG, ST	EWH	✗	✓	✓
[۱۲]	مقاوم	سرعت باد تابش	PV, MG, ST, W ^۲ , EV ^۳	EWH	✓	✓	✓
[۱۳]	قطعی	-	PV, ST, MG	✗	✗	✓	✗
[۱۴]	قطعی	-	MG	✗	✗	✓	✗
[۲۳]	قطعی	باد تابش توان مصرفی	PV, ST, MG, W	EWH	✗	✗	✓
[۱۵]	ژنتیک	-	PV, W, MG	EWH	✗	✗	✓
[۱۶]	مقاوم	رفتار کاربر	PV, W, MG, ST	EWH	✗	✗	✓
[۱۷]	تصادفی	قیمت انرژی بار	PV, ST, MG	✗	✓	✓	✗
[۱۸]	قطعی	قیمت انرژی	MG, PV	EWH	✗	✓	✓
[۲۱]	تصادفی	تولید خورشیدی بار	PV, ST, MG	EWH	✓	✗	✓

در مراجع فوق استفاده از یک منبع حرارتی که انرژی مورد نیاز آن غیر از منابع الکتریکی تامین شود وجود ندارد. تنها مرجع [۴] از آبگرمکن خورشیدی با یک سیستم پشتیبان برای تأمین بارهای حرارتی استفاده کرده است. اما در این مرجع، باز هم فقدان منابع دیگر الکتریکی محسوس

¹ Storag

² Wind Turbine

³ Electric Vehicle

است. چرا که وقتی صحبت از انرژی خورشیدی است، استفاده از یک پنل فتوولتاییک کنار آبگرمکن خورشیدی می‌تواند نتایج بهتری داشته باشد. بارهای حرارتی که قابل مدیریت هستند، در مراجع فوق به سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی و هواسازها بسنده شده‌اند و مابقی بارهای حرارتی از قبیل نیاز ساکنین به آب گرم در نهایت بصورت یک بار حرارتی ثابت و بدون قابلیت برنامه‌ریزی، تعریف شده‌اند. هرچند در برخی منابع از همین بارهای ثابت نیز صرف نظر شده است. بعنوان مثال، نشان داده خواهد شد که آب گرم مورد نیاز برای استحمام و یا گرمایش محیطی را می‌توان بصورت یک بار حرارتی با قابلیت برنامه‌ریزی تعریف کرد.

از سوی دیگر استفاده از بعضی از بارهای خانگی تابع و وابسته به دیگر بارها است. مثلاً دستگاه خشک‌کن باید بعد از ماشین لباسشویی مورد استفاده قرار بگیرد یا بار حرارتی مانند آب گرم مورد نیاز برای استحمام وابسته به بار الکتریکی مانند سشوار است. بارهای سرمایشی و گرمایشی نیز می‌توانند هم از طریق لوازم الکتریکی با منبع الکتریکی مانند هواسازها و کولرگازی و یا از طریق لوازم حرارتی با منبع حرارتی آب گرم مانند سیستم گرمایش از کف یا شوفاژ، و یا بصورت ترکیبی با هم، پاسخ داده شوند. بنابراین در نقاط مختلف یک نوع یکپارچگی در بارهای الکتریکی-الکتریکی و یا الکتریکی-حرارتی مشاهده می‌شود، که مدیریت این گونه از بارها نیازمند مدیریت یکپارچه بر روی منابع انرژی الکتریکی و حرارتی می‌باشد. به بیان ساده‌تر، ابتدا دو مسأله مجزا در نظر گرفته شود. مسأله اول مدیریت انرژی الکتریکی و مسأله دوم مدیریت انرژی حرارتی در خانه هوشمند است. بر همین اساس، هرکدام از این مسأله‌های بهینه‌سازی جواب بهینه و منحصر به فرد خود را دارند، اگر و تنها اگر بارها و منابع الکتریکی و حرارتی مستقل از هم در نظر گرفته شوند، که در برخی از شرایط چنین هم هست. اما طبق مطالب گفته شده و مثال‌های نقض بحث شده، بعضی از بارهای الکتریکی و حرارتی همبسته هستند و این مسأله است که باعث بوجود آمدن همبستگی در منابع انرژی نیز خواهد شد. یعنی برای مدیریت مصرف انرژی این دسته از بارها، باید هر دو منبع حرارتی و الکتریکی با هم و در یک مسأله

بهینه‌سازی یکپارچه دیده شوند. از این رو، سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی^۱ برای مدیریت انرژی در خانه هوشمند معرفی می‌شود.

۲-۳ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در خانه‌های هوشمند، بارهای الکتریکی و حرارتی وجود دارند که بهره‌برداری از آن‌ها همبسته است. این همبستگی میان بارها باعث بوجود آمدن همبستگی میان منابع انرژی الکتریکی و حرارتی نیز می‌شود. بنابراین برای مدیریت انرژی الکتریکی و حرارتی در یک خانه هوشمند، باید همبستگی میان منابع و بارهای الکتریکی و حرارتی دیده شود. بر همین اساس، این پایان‌نامه سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی را معرفی می‌کند. سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی، منابع و بارهای الکتریکی و حرارتی را با هم می‌بیند و برای نحوه بهره‌برداری از منابع انرژی و مصرف انرژی بارهای خانگی بصورت یکپارچه تصمیم‌سازی می‌کند.

¹ Integrated Electrical & Thermal Energy Management System (IETEMS)

فصل ۳

مدل سازی مساله مدیریت یکپارچه

انرژی الکتریکی و حرارتی

۱-۳ مقدمه

در این فصل، ابتدا اجزای مختلف خانه هوشمند مورد مطالعه در این پژوهش معرفی و پس از تشریح نحوه کارکرد سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی، الگوریتم این سیستم ارائه می‌شود. در بخش پایانی نیز مدل‌سازی ریاضی مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی ارائه و تشریح خواهد شد.

۲-۳ ساختار خانه هوشمند

خانه هوشمند مورد نظر در این پژوهش شامل سه بخش کلی منابع انرژی، بارهای خانگی و سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی است که در ادامه به تفصیل، شرح داده خواهند شد.

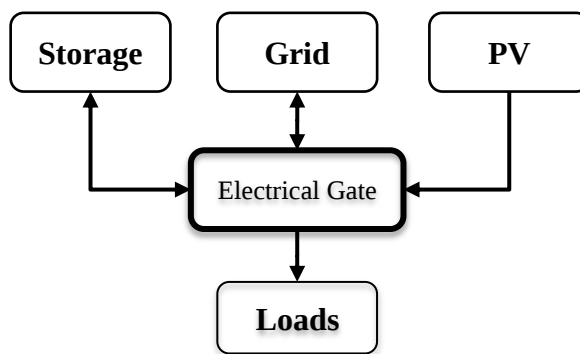
۱-۲-۳ منابع انرژی

منابع انرژی خانه هوشمند شامل منابع انرژی تجدیدپذیر خورشیدی یعنی واحدهای فتوولتاییک و آبگرمکن خورشیدی، شبکه برق، آبگرمکن گازی^۱ متصل به شبکه گازرسانی و واحد ذخیره‌ساز هستند.

واحد فتوولتاییک و شبکه برق به همراه واحد ذخیره‌ساز، انرژی الکتریکی مورد نیاز ساکنین خانه هوشمند را فراهم می‌کنند. قیمت‌های انرژی، میزان تولید واحد فتوولتاییک و مشخصات واحد ذخیره‌ساز در دسترس می‌باشد. ارتباط بین واحد فتوولتاییک، واحد ذخیره‌ساز، شبکه برق و بارهای خانگی از طریق دروازه الکتریکی^۲ نشان داده شده در شکل (۱-۳) می‌باشد. با توجه به قوانین مفروض، امکان خرید/فروش یا شارژ/دشارژ همزمان در این دروازه الکتریکی وجود ندارد.

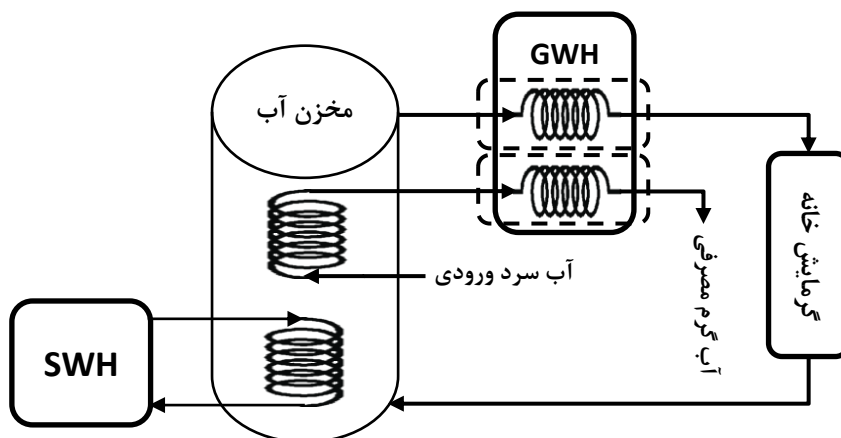
^۱ Gas Water Heater (GWH)

^۲ Electrical Gate



شکل (۱-۳) دروازه الکتریکی - ارتباط بین منابع انرژی الکتریکی و بارهای الکتریکی

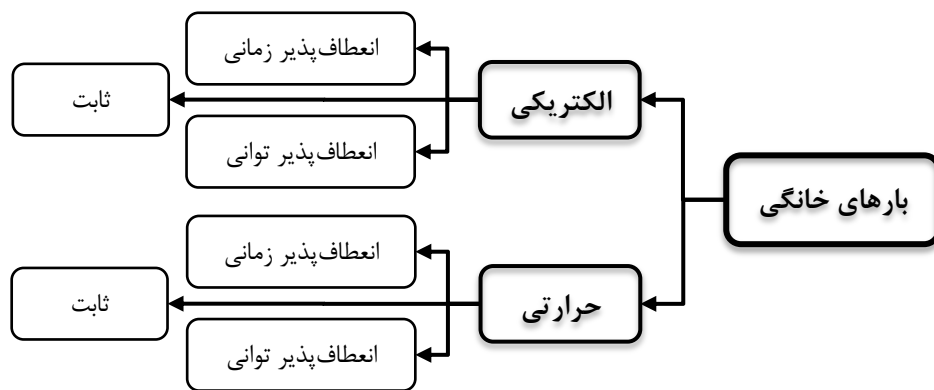
آبگرمکن خورشیدی و آبگرمکن گازی وظیفه تأمین آب گرم مورد نیاز بارهای حرارتی را بر عهده دارند. در واقع آبگرمکن گازی یک منبع پشتیبان برای آبگرمکن خورشیدی است، تا زمانی که انرژی خورشیدی کم یا صفر می‌باشد، نیاز ساکنین به آب گرم پاسخ داده شود. تبادل انرژی بین این دو منبع حرارتی و بارهای حرارتی از طریق کویل‌هایی با بازده بالا صورت می‌گیرد. شکل (۲-۳) این ارتباطات را نشان می‌دهد. در این شکل، واحد آبگرمکن خورشیدی از طریق کویل‌های موجود در مخزن آب، انرژی حرارتی جذب شده خورشیدی را به مخزن منتقل می‌کند. به این ترتیب، می‌توان مخزن آب را نیز یک ذخیره‌ساز انرژی حرارتی دانست. همچنین چنانچه انرژی حرارتی موجود در مخزن آب جوابگوی بارهای حرارتی خانه نباشد، سیستم پشتیبان، یعنی آبگرمکن گازی، کمبود انرژی حرارتی را جبران می‌کند.



شکل (۲-۳) اتصالات بین منابع انرژی حرارتی و بارهای حرارتی

۳-۲-۲ بارهای خانگی

در این پژوهش بارهای خانگی به دو دسته کلی بارهای الکتریکی و حرارتی تقسیم می‌شوند. بارهای الکتریکی که منبع انرژی آن‌ها منابع الکتریکی یعنی واحد فتوولتاییک، شبکه برق و واحد ذخیره‌ساز هستند. و بارهایی که از منابع انرژی حرارتی تأمین می‌شوند، بارهای حرارتی نامیده می‌شوند. بر اساس ویژگی‌های فنی و نحوه عملکرد، هر کدام از دسته‌های فوق به سه زیر دسته تقسیم می‌شوند. شکل (۳-۳) دسته‌بندی بارهای خانگی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳) دسته‌بندی بارهای خانگی

۳-۲-۲-۱ بارهای انعطاف‌پذیر زمانی^۱

بارهای انعطاف‌پذیر زمانی از امکان تغییر زمان مصرف در یک بازه زمانی برخوردارند. اما در زمان بهره‌برداری از آن‌ها نباید وقفه‌ای صورت پذیرد. در واقع این دسته از بارها بر اساس زمان شروع بهره‌برداری، انعطاف‌پذیر هستند. ماشین لباس‌شویی، ماشین ظرف‌شویی، اتو، سشوار و غیره در دسته بارهای الکتریکی، و آب گرم مورد نیاز برای استحمام در دسته بارهای حرارتی مثال‌هایی برای این نوع بارها هستند.

¹ Time-Flexible Loads (TF)

۳-۲-۲-۳ بارهای انعطاف‌پذیر توانی^۱

آن دسته از بارهایی که در هنگام بهره‌برداری از آنها امکان تغییر سطح توان مصرفی یا وقفه در بهره‌برداری آنها وجود دارد، در دسته بارهای انعطاف‌پذیر توانی قرار می‌گیرند. به بیان دیگر، این دسته از بارها از نظر سطح توان مصرفی انعطاف‌پذیر هستند. سیستم‌های سرمایشی/گرمایشی مانند کولرگازی در دسته بارهای الکتریکی و سیستم‌های گرمایشی مبتنی بر آب گرم در دسته بارهای حرارتی از این دسته بارها هستند.

۳-۲-۲-۳ بارهای ثابت^۲

بارهایی که ویژگی‌های دو دسته قبل را نداشته و زمان و مقدار مصرف انرژی آنها قابل برنامه‌ریزی نیست در گروه بارهای ثابت هستند. لوازم سرگرمی، تلویزیون، سیستم روشنایی و غیره در دسته بارهای الکتریکی، و آب گرم مورد نیاز برای مصارف بهداشتی و آشپزخانه در دسته بارهای حرارتی مثال‌هایی از این دسته از بارها هستند. زمان و مقدار مصرف انرژی این دسته از بارهای خانگی در دسترس سیستم مدیریت انرژی قرار می‌گیرد و سیستم مدیریت انرژی تنها وظیفه تأمین انرژی مورد نیاز آنها را برعهده دارد.

۳-۲-۲-۴ بارهای همبسته^۳

این دسته از بارها در واقع زیر مجموعه‌ای از بارهای خانگی تشریح شده در قسمت‌های قبلی هستند که بهره‌برداری از آنها همبسته می‌باشد. بارهای همبسته در بخش انعطاف‌پذیر زمانی شامل بارهایی می‌شوند که استفاده یکی بعد از اتمام بهره‌برداری از دیگری باید صورت پذیرد. مثلاً بار الکتریکی مانند سشوار باید بلافاصله بعد از بار حرارتی مانند استحمام، و یا بار الکتریکی مانند خشک‌کن باید بعد از بار الکتریکی مانند ماشین لباس‌شویی مورد بهره‌برداری قرار بگیرد. در بخش بارهای

^۱ Power-Flexible Loads (PF)

^۲ Fixed Loads (FX)

^۳ Linked Loads

انعطاف‌پذیر توانی، بارهایی که وظیفه گرمایش خانه هوشمند را بر عهده دارند در این زیر مجموعه قرار می‌گیرند. بعنوان مثال سیستم شوفاژی از دسته بارهای حرارتی انعطاف‌پذیر توانی و کولر گازی از دسته بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر توانی برای گرمایش خانه هوشمند، به هم متصل هستند.

۳-۲-۳ سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی

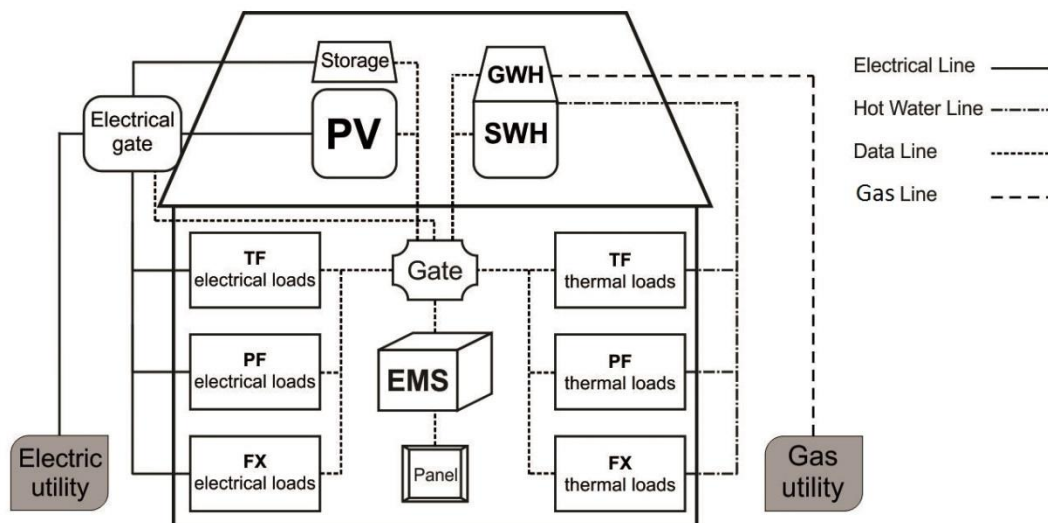
سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی مهم‌ترین بخش خانه هوشمند است و وظیفه تصمیم‌سازی در رابطه با نحوه و مقدار تولید و مصرف انرژی را بر عهده دارد. به منظور خلاصه‌گویی از این به بعد بجای سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی از عبارت «سیستم مرکزی» استفاده می‌کنیم. سیستم مرکزی، قابلیت کنترل و نظارت بر روی تمامی بارها و منابع انرژی را از طریق درگاه اطلاعات دارد. درگاه اطلاعات بخشی از سیستم مرکزی است که وضعیت بارها و منابع انرژی و سایر اطلاعات ضروری را به صورت زمان‌حقیقی^۱ به سیستم مرکزی ارسال و در مقابل دستورات سیستم مرکزی را نیز به سایر اجزا می‌فرستد.

سیستم مرکزی برای غلبه بر عدم قطعیت تابش خورشیدی و دمای بیرونی به ابزار پیش‌بینی مجهز شده است. واحد پیش‌بینی، اطلاعات تابش خورشیدی و دمای بیرونی را با استفاده از داده‌های گذشته بصورت زمان‌حقیقی پیش‌بینی و در اختیار سیستم مرکزی قرار می‌دهد. سیستم مرکزی برای تصمیم‌گیری نحوه مصرف انرژی در بازه زمانی t از داده‌های واقعی که از طریق دستگاه‌های اندازه‌گیری بدست می‌آورد، استفاده می‌کند و داده‌های پیش‌بینی شده تصمیم‌گیری آگاهانه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این پژوهش، تعامل ساکنین خانه هوشمند با سیستم مدیریت انرژی از طریق رابط کاربری که بصورت پنل در خانه هوشمند نصب شده است، صورت می‌گیرد. کاربران از این طریق می‌توانند محدوده‌ی دمایی مورد انتظار، بازه زمانی مورد انتظار برای استفاده از بارهای انعطاف‌پذیر زمانی،

¹ Real-Time

درخواست استفاده از بارهای ثابت در ساعات مختلف و سایر اطلاعات مورد نیاز را ثبت کنند تا سیستم مرکزی بتواند سطح رفاه ساکنین را در درجه مطلوبی حفظ نماید. از این طریق، رفاه کاربران نیز در نظر گرفته شده است. شکل (۳-۴) نمای شماتیک خانه هوشمند به همراه ارتباطات بین بارها، منابع و سیستم مرکزی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴) خانه هوشمند و ارتباطات بین بارها، منابع و سیستم مرکزی

۳-۳ الگوریتم سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی

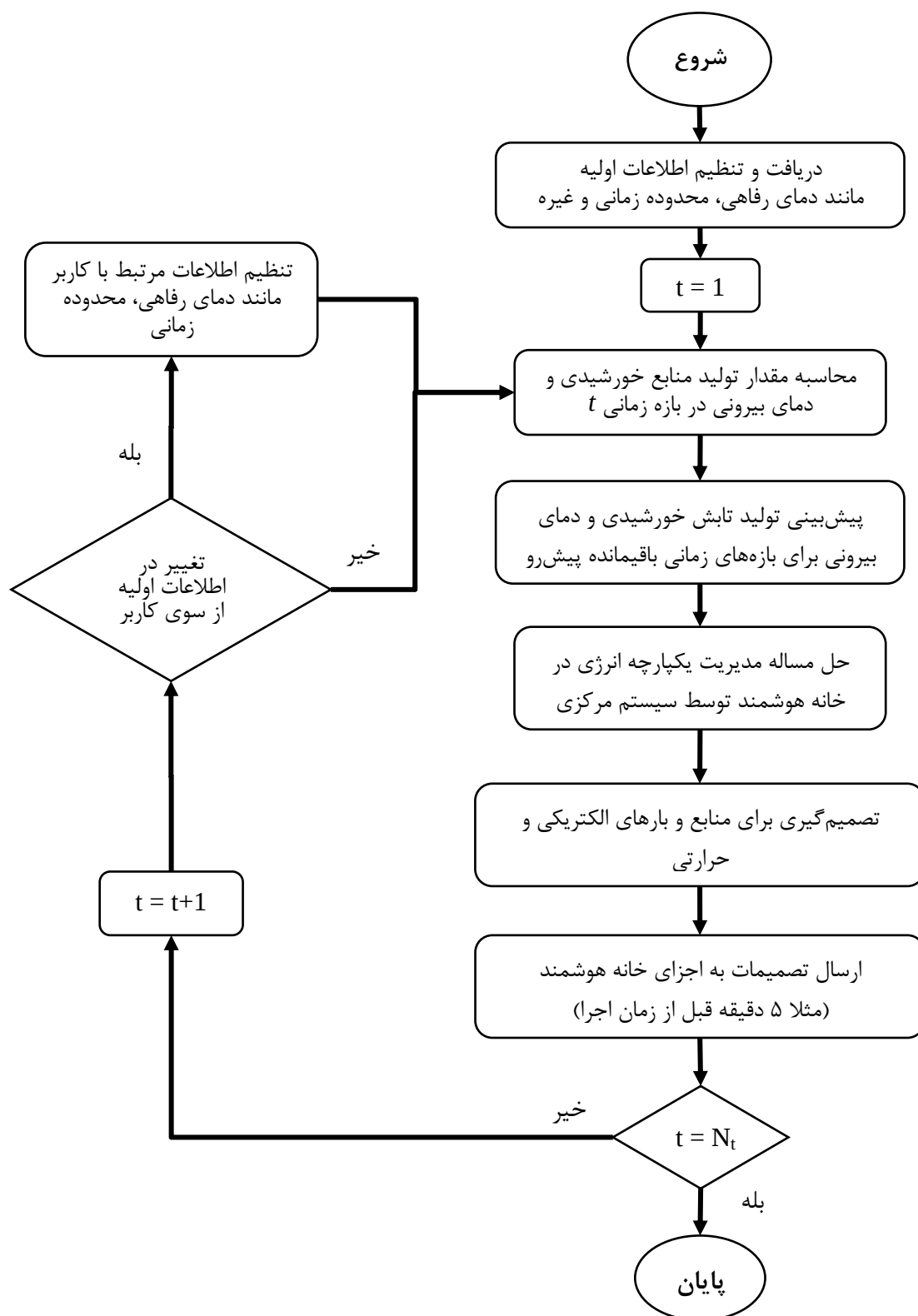
نحوه عملکرد سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی به شرح زیر می‌باشد:

(۱) تمامی اطلاعات اولیه از قبیل محدوده‌ی دمای مورد انتظار، محدوده‌ی زمانی مورد انتظار برای استفاده از بارهای انعطاف‌پذیر زمانی، برنامه زمانی بارهای ثابت، قیمت برق و گاز در بازه‌های زمانی مختلف، مقادیر اولیه متغیرها و غیره به سیستم مرکزی ارسال می‌شود.

(۲) مقدار دهی اولیه $t=0$.

(۳) مقادیر توان تولیدی در دسترس منابع خورشیدی و دمای خارجی در بازه زمانی t توسط سیستم مرکزی دریافت می‌شود.

- ۴) واحد پیش‌بینی با استفاده از اطلاعات گذشته، توان تابشی خورشید و دمای بیرونی را برای بازه‌های زمانی پیش رو تا انتهای روز پیش‌بینی و به سیستم مرکزی ارسال می‌کند.
- ۵) سیستم مرکزی با در دست داشتن اطلاعات مورد نیاز، مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی را حل می‌کند. سپس برای مقدار فروش یا خرید انرژی الکتریکی، میزان شارژ و یا دشارژ واحد ذخیره‌ساز الکتریکی، مقدار گاز مورد نیاز برای خرید و بهره‌برداری از بارهای الکتریکی و حرارتی تصمیم‌سازی می‌کند.
- ۶) تصمیمات نهایی برای اجرا به واحدهای کنترلی بارها و منابع انرژی، مثلاً ۵ دقیقه قبل از زمان اجرا، ارسال می‌شوند.
- ۷) مراحل ۳ الی ۶ برای باقی بازه‌های زمانی پیش رو تا انتهای بازه برنامه‌ریزی اجرا می‌شوند.
- الگوریتم فوق بصورت فلوچارت در شکل (۳-۵) نمایش داده شده است.



شکل (۳-۵) الگوریتم سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی

۴-۳ مدل سازی ریاضی

مسأله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی بصورت یک مسأله بهینه سازی مدل شده است. در ادامه دو مدل بهینه سازی قطعی و مقاوم نمایش و تشریح می شوند.

۱-۴-۳ مدل بهینه سازی قطعی^۱

در این بخش، مدل بهینه سازی قطعی مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی که بصورت زمان حقیقی نوشته شده است، نمایش و تشریح می شود.

$$\min_{\Omega^{DO}} \left\{ (\lambda_t^B \cdot p_t^B + \lambda_t^F \cdot m_t^F - \lambda_t^S \cdot p_t^S) \cdot \Delta t + \sum_{\tau=t+1}^{N_t} [(\lambda_\tau^B \cdot p_\tau^B + \lambda_\tau^F \cdot m_\tau^F - \lambda_\tau^S \cdot p_\tau^S) \cdot \Delta t] \right\} \quad (۱-۳)$$

تابع هدف (۱-۳) مجموع هزینه های انرژی الکتریکی و مقدار گاز خریداری شده از شبکه های برق و گاز، منهای درآمد حاصل از انرژی الکتریکی فروخته شده به شبکه برق را در افق برنامه ریزی مشخصی کمینه می کند. باید توجه داشت که تنها نتایج مربوط به بازه زمانی t ذخیره و اجرا می شوند و مابقی نتایج مربوط به افق زمانی تا انتهای روز جهت برنامه ریزی دقیق تر و داشتن دید نسبت به آینده در مدل ریاضی وارد شده اند.

معادلات (۲-۳)-(۳۶-۳) در زیر، مجموعه قیود مدل بهینه سازی قطعی را نشان می دهند. در این معادلات علامت $\{\}$ نشان دهنده عدم قطعیت پارامتر موجود در آن می باشد. همچنین بالانویس $\sim$ و زیرنویس 0 به ترتیب نشان دهنده مقدار واقعی پارامتر و مقدار اولیه متغیر مورد نظر هستند.

¹ Deterministic Optimization (DO)

subject to:

$$p_{\tau}^{PV} + p_{\tau}^B + p_{\tau}^{DH} = p_{\tau}^S + p_{\tau}^{CH} + \sum_{i \in \Omega^{TF} \cup \Omega^{PF} \cup \Omega^{FX}} p_{i,\tau} \quad \forall \tau \geq t \quad (2-3)$$

قیود (۲-۳) تعادل توان الکتریکی را در خانه هوشمند برقرار می‌کنند. در این قیود مجموع توان تولیدی واحد فتوولتاییک، توان خریداری شده از شبکه برق و توان حاصل از دشارژ واحد ذخیره‌ساز با مجموع توان مصرفی بارهای الکتریکی، توان فروخته شده به شبکه برق و توان مورد نیاز برای شارژ واحد ذخیره‌ساز برابر است. در ادامه، قیود (۳-۳)-(۱۱-۳) محدودیت‌های مربوط به منابع انرژی الکتریکی را نشان می‌دهند.

$$0 \leq p_{\tau}^{PV} \leq \tilde{p}_{\tau}^{SR} \cdot A^{PV} \cdot \eta^{PV} \quad \forall \tau = t \quad (3-3)$$

$$0 \leq p_{\tau}^{PV} \leq \{p_{\tau}^{SR}\} \cdot A^{PV} \cdot \eta^{PV} \quad \forall \tau > t \quad (4-3)$$

قیود (۳-۳) و (۴-۳) مربوط به محدودیت توان تولیدی واحد فتوولتاییک در بازه زمانی t و سایر بازه‌های زمانی باقیمانده می‌باشد. بیشنه توان قابل تولید توسط واحد فتوولتاییک از حاصل ضرب توان خورشیدی جذب شده، در مساحت پنل و در بازده پنل بدست می‌آید. از آنجایی که خانه هوشمند به ابزار نظارت هوشمند و زمان حقیقی مجهز است، مقدار توان تولیدی واحد فتوولتاییک در بازه زمانی t تقریباً مشخص و برای سایر بازه‌های زمانی تا انتهای روز دارای عدم قطعیت می‌باشد که در مدل قطعی با پیش‌بینی تک نقطه‌ای مدل می‌شود. به بیان دیگر مقدار توان تابش خورشیدی در بازه زمانی t بصورت مستقیم از حسگر خورشیدی نصب شده کنار پنل فتوولتاییک برای سیستم مرکزی ارسال می‌شود، اما توان تابشی خورشیدی در ساعات آینده از طریق ابزار پیش‌بینی، در دسترس سیستم مرکزی قرار می‌گیرد.

$$0 \leq p_{\tau}^B \leq \bar{P}^B \cdot u_{\tau} \quad \forall \tau \geq t \quad (5-3)$$

$$0 \leq p_{\tau}^S \leq \bar{P}^S \cdot (1 - u_{\tau}) \quad \forall \tau \geq t \quad (6-3)$$

قیود (۵-۳) و (۶-۳) به ترتیب، محدودیت خرید/فروش توان الکتریکی از/به شبکه برق را اعمال می‌کنند. در این قیود متغیر u برای جلوگیری از همزمانی خرید/فروش توان الکتریکی از/به شبکه برق استفاده شده است. این محدودیت‌ها بر اساس قراردادهای خرید/فروش میان مشترک برق و شرکت توزیع تعریف می‌شوند.

$$e_{\tau}^{ST} = e_{\tau-1}^{ST} + \mu^{CH} \cdot p_{\tau}^{CH} \cdot \Delta t - \frac{p_{\tau}^{DH} \cdot \Delta t}{\mu^{DH}} \quad \forall \tau \geq t \quad (۷-۳)$$

$$0 \leq e_{\tau}^{ST} \leq E^{ST} \quad \forall \tau \geq t \quad (۸-۳)$$

$$0 \leq p_{\tau}^{DH} \leq \bar{P}^{DH} \quad \forall \tau \geq t \quad (۹-۳)$$

$$0 \leq p_{\tau}^{CH} \leq \bar{P}^{CH} \quad \forall \tau \geq t \quad (۱۰-۳)$$

$$e_0^{ST} = e_{\tau=N_t}^{ST} \quad (۱۱-۳)$$

قیود (۷-۳)-(۱۱-۳) مربوط به محدودیت‌های واحد ذخیره‌ساز می‌باشند که در آن‌ها به ترتیب، تعادل انرژی واحد ذخیره‌ساز در بازه‌های زمانی بر اساس مرجع [۲۴]، محدودیت ظرفیت واحد ذخیره‌ساز، محدودیت مقدار دشارژ و شارژ، و تعادل انرژی واحد ذخیره‌ساز در ابتدای روز و انتهای روز نشان داده شده‌اند. قیود (۱۲-۳)-(۲۰-۳) در زیر، مجموعه محدودیت‌های منابع انرژی حرارتی را بررسی می‌کنند و بر اساس شکل (۲-۳) نوشته شده‌اند.

$$e_{\tau}^{WT} = e_{\tau-1}^{WT} + (p_{\tau}^{SWH,+} - p_{\tau}^{SWH,-}) \cdot \Delta t \quad \forall \tau \geq t \quad (۱۲-۳)$$

قیود (۱۲-۳) تعادل انرژی مخزن ذخیره آب را در بازه‌های زمانی نشان می‌دهد. در این معادله، انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن آب در هر بازه زمانی برابر است با مجموع انرژی ذخیره شده در بازه زمانی قبل و انرژی حرارتی تولید شده توسط آبگرمکن خورشیدی در بازه زمانی کنونی، منهای انرژی حرارتی منتقل شده از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی به بارهای حرارتی در بازه زمانی کنونی.

$$e_{\tau}^{WT} - e_{\tau-1}^{WT} = M^{WT} \cdot C^W \cdot (\theta_{\tau}^{WT} - \theta_{\tau-1}^{WT}) \quad \forall \tau \geq t \quad (13-3)$$

$$\underline{\theta}^{WT} \leq \theta_{\tau}^{WT} \leq \bar{\theta}^{WT} \quad \forall \tau \geq t \quad (14-3)$$

قیود (۱۳-۳) رابطه انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن آب را با دمای آب گرم داخل آن نشان می‌دهد. بر اساس قیود (۱۳-۳) افزایش انرژی داخلی آب موجود در مخزن آب، باعث افزایش دمای داخلی آن خواهد شد که این دمای محاسبه شده باید در محدوده‌ی دمای قیود (۱۴-۳) نیز باشد.

$$0 \leq p_{\tau}^{SWH,+} \leq \bar{p}_{\tau}^{SR} \cdot A^{SWH} \cdot \eta^{SWH} \cdot \eta^{CO} \quad \forall \tau = t \quad (15-3)$$

$$0 \leq p_{\tau}^{SWH,+} \leq \{p_{\tau}^{SR}\} \cdot A^{SWH} \cdot \eta^{SWH} \cdot \eta^{CO} \quad \forall \tau > t \quad (16-3)$$

قیود (۱۵-۳) و (۱۶-۳) به ترتیب، محدودیت توان تولیدی توسط آبگرمکن خورشیدی را در بازه زمانی t و سایر بازه‌های زمانی باقیمانده نشان می‌دهند. بیشنه توانی که می‌توان از آبگرمکن خورشیدی دریافت کرد، برابر با حاصل ضرب توان خورشیدی جذب شده، در مساحت پنل، در بازه پنل و در بازه کوئل است. مشابه قیود مربوط به واحد فتوولتاییک یعنی (۳-۳) و (۴-۳)، در این قیود هم مقدار توان تولیدی در بازه زمانی t واقعی و در باقیمانده بازه‌های زمانی دارای عدم قطعیت می‌باشد، که در مدل قطعی با پیش‌بینی تک نقطه‌ای مدل شده است.

$$p_{\tau}^{SWH,-} + p_{\tau}^{GWH} = \sum_{i \in \Psi^{TF} \cup \Psi^{PF} \cup \Psi^{FX}} p_{i,\tau} \quad \forall \tau \geq t \quad (17-3)$$

قیود (۱۷-۳) تعادل توان حرارتی میان تولید و مصرف را نشان می‌دهند. بر اساس این قیود، مجموع توان حرارتی مورد نیاز بارهای حرارتی از طریق توان حرارتی جذب شده از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی و آبگرمکن گازی می‌تواند تامین شود.

$$0 \leq p_{\tau}^{SWH,-} \leq \bar{p}^{SWH,-} \quad \forall \tau \geq t \quad (18-3)$$

$$0 \leq p_{\tau}^{GWH} \leq \bar{p}^{GWH} \quad \forall \tau \geq t \quad (19-3)$$

$$p_{\tau}^{GWH} = m_{\tau}^F \cdot HV^F \cdot \eta^{GWH} \cdot \eta^{CO} \quad \forall \tau \geq t \quad (20-3)$$

قیود (۲۰-۳)-(۱۸-۳) به ترتیب، محدودیت توان حرارتی جذب شده از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی، محدودیت تولید توان حرارتی توسط آبگرمکن گازی و رابطه توان حرارتی تولید شده با مقدار گاز مصرفی توسط آبگرمکن گازی را نشان می‌دهند.

قیود (۲۱-۳)-(۳۴-۳) بیانگر محدودیت‌های مربوط به بارهای خانگی هستند. به این ترتیب قیود (۲۱-۳) و (۲۲-۳) مرتبط با بارهای ثابت، قیود (۲۳-۳)-(۳۰-۳) مرتبط با بارهای انعطاف‌پذیر زمانی و قیود (۳۱-۳)-(۳۴-۳) مرتبط با بارهای انعطاف‌پذیر توانی می‌باشند.

$$p_{i,\tau} = F_{i,\tau} \quad \forall i \in \Omega^{FX}, \tau \geq t \quad (21-3)$$

$$p_{i,\tau} = \frac{M_{i,\tau} \cdot C^W \cdot (\theta_i^{HW} - \theta^{CW})}{\eta^{CO}} \quad \forall i \in \Psi^{FX}, \tau \geq t \quad (22-3)$$

قیود (۲۱-۳) و (۲۲-۳) به ترتیب مقدار توان الکتریکی مورد نیاز برای بارهای الکتریکی ثابت و مقدار توان حرارتی مورد نیاز برای بارهای حرارتی ثابت که بصورت آب گرم مصرفی برای مصارف بهداشتی و آشپزخانه می‌باشد را نشان می‌دهند.

$$p_{i,\tau} = \bar{P}_i \cdot s_{i,\tau} \quad \forall i \in \Omega^{TF}, \tau \geq t \quad (23-3)$$

$$p_{i,\tau} = \frac{M_i \cdot C^W \cdot (\theta_i^{HW} - \theta^{CW})}{\eta^{CO}} \cdot s_{i,\tau} \quad \forall i \in \Psi^{TF}, \tau \geq t \quad (24-3)$$

سیستم مرکزی از طریق قیود (۲۳-۳) و (۲۴-۳) به ترتیب، حالت روشن/خاموش بارهای الکتریکی و حرارتی انعطاف‌پذیر زمانی را مشخص می‌کند. قیود (۲۳-۳) که مربوط به بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی هستند با بیشینه توان مصرفی، و قیود (۲۴-۳) که مربوط به بارهای حرارتی انعطاف‌پذیر زمانی هستند با مقدار آب گرم مورد نیاز جهت استحمام مدل شده‌اند.

$$s_{i,\tau} = 0 \quad \forall i \in \Omega^{\text{TF}} \cup \Psi^{\text{TF}}, \tau < T_i^S \text{ or } \tau > T_i^F \quad (25-3)$$

$$s_{i,\tau} - s_{i,\tau-1} \leq s_{i,(\tau-1+D_i)} \quad \forall i \in \Omega^{\text{TF}} \cup \Psi^{\text{TF}}, \tau \geq t \quad (26-3)$$

$$\sum_{N_t} s_{i,\tau} = D_i \quad \forall i \in \Omega^{\text{TF}} \cup \Psi^{\text{TF}} \quad (27-3)$$

همانطور که قبلاً اشاره شد، بهره‌برداری از بارهای انعطاف‌پذیر زمانی می‌تواند در یک بازه زمانی مشخص که توسط ساکنین تعیین شده است، جابجا شود. بنابراین خارج از بازه تعیین شده وضعیت بهره‌برداری بار مورد نظر باید صفر، یعنی خاموش باشد، قانونی که در قیود (۲۵-۳) اعمال شده است. همچنین بهره‌برداری از این دسته از بارها باید بدون وقفه باشد، که این پیوستگی استفاده از بارهای انعطاف‌پذیر زمانی در قیود (۲۶-۳) نشان داده شده است. قیود (۲۷-۳) اتمام وظیفه بارهای انعطاف-پذیر زمانی را براساس مدت زمان مورد نیازشان ضمانت می‌کند.

$$\sum_i s_{i,\tau} \leq 1 \quad \forall i \in \Psi^{\text{TF}}, \tau \geq t \quad (28-3)$$

از آنجایی که ممکن است، درخواست استفاده از بارهای الکتریکی یا حرارتی چند بار در طول روز توسط ساکنین خانه هوشمند صورت پذیرد (مثل استحمام)، و نیز ممکن است بازه‌های زمانی اعلام شده از طرف کاربران برای استفاده از این بارها دارای هم‌پوشانی باشند، به منظور جلوگیری از بهره‌برداری بیش از ظرفیت موجود در یک بازه زمانی، قیود (۲۸-۳) معرفی شده‌اند. به عنوان مثال چنانچه تنها یک حمام در خانه موجود باشد و دو درخواست استحمام توسط ساکنین با هم‌پوشانی محدوده زمانی، داده شده باشد، این قیود مجوز استفاده حداکثر یکبار از استحمام، در هر بازه زمانی را اعلام می‌کند.

$$\left(\sum_{\tau=1}^{t-1} s_{i,\tau} / D_i \right) - s_{i',\tau} \geq 0 \quad \forall i, i' \in \Omega^{\text{DL}}, \tau \geq t \quad (29-3)$$

$$(\tau) \cdot (s_{i,\tau} + s_{i',\tau}) - (\tau - 1) \cdot (s_{i,\tau-1} + s_{i',\tau-1}) \geq 0 \quad \forall i, i' \in \Omega^{\text{DL}}, \tau \geq t \quad (30-3)$$

چنانچه قبل تر اشاره شد، بارهایی وجود دارند که به هم مرتبط بوده و بهره‌برداری از آن‌ها تابع شرایط خاصی از جمله پیوستگی یا تقدم و تأخر می‌باشد. مثلاً بار الکتریکی مانند سشوار باید بلافاصله بعد از بار حرارتی استحمام مورد استفاده قرار بگیرد. قیود پیوندی^۱ (۲۹-۳) و (۳۰-۳) این قوانین را نشان می‌دهند. قیود (۲۹-۳) تقدم و تأخر بهره‌برداری این دسته از بارها را نشان می‌دهند، به این صورت که بار i زودتر از بار i' استفاده می‌شود. پیوستگی بهره‌برداری از این بارها نیز در قیود (۳۰-۳) نشان داده شده است، به این صورت که بار i' بلافاصله بعد از اتمام وظیفه بار i قرار می‌گیرد.

$$\underline{P}_i \cdot s_{i,\tau} \leq p_{i,\tau} \leq \bar{P}_i \cdot s_{i,\tau} \quad \forall i \in \Omega^{\text{PF}} \cup \Psi^{\text{PF}}, \tau \geq t \quad (31-3)$$

قیود (۳۱-۳) کمینه/بیشینه مقدار توان مصرفی توسط بارهای انعطاف‌پذیر توانی را نشان می‌دهند. متغیر s برای خاموش کردن بار مورد نظر در صورت عدم نیاز، توسط سیستم مرکزی تعبیه شده است.

$$\theta_\tau^{\text{IN}} = \varepsilon \cdot \theta_{\tau-1}^{\text{IN}} + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\tilde{\theta}_\tau^{\text{OUT}} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,\tau} + p_{i',\tau} \cdot \text{COP}^H)}{UA^{\text{BL}}} \right) \quad \forall i \in \Psi^{\text{PF}}, i' \in \Omega^{\text{PF}}, \tau = t \quad (32-3)$$

$$\theta_\tau^{\text{IN}} = \varepsilon \cdot \theta_{\tau-1}^{\text{IN}} + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\{\theta_\tau^{\text{OUT}}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,\tau} + p_{i',\tau} \cdot \text{COP}^H)}{UA^{\text{BL}}} \right) \quad \forall i \in \Psi^{\text{PF}}, i' \in \Omega^{\text{PF}}, \tau > t \quad (33-3)$$

$$\underline{\theta}^{\text{IN}} \leq \theta_\tau^{\text{IN}} \leq \bar{\theta}^{\text{IN}} \quad \forall \tau \geq t \quad (34-3)$$

دمای داخلی در بازه زمانی t از طریق معادلات موجود در قیود (۳۲-۳)-(۳۳-۳) محاسبه می‌شود. در این قیود دمای داخلی در بازه زمانی t به دمای داخلی در بازه زمانی قبل، دمای بیرونی در بازه زمانی t ، مشخصات حرارتی ساختمان، توان مصرفی بارهای انعطاف‌پذیر توانی برای گرمایش یا سرمایش و فاکتور اینرسی وابسته است. در قیود (۳۲-۳) دمای داخلی بر اساس مقدار واقعی دمای بیرونی در بازه زمانی t و در قیود (۳۳-۳) دمای داخلی بر اساس مقدار دمای بیرونی پیش‌بینی شده

¹ Linking Constraints

در بازه‌های زمانی بعدی تا انتهای روز محاسبه می‌شود. دمای محاسبه شده در این قیود باید در محدوده‌ی دمایی مورد انتظار ساکنین خانه که در قیود (۳۴-۳) نمایش داده شده است، باشد. ذکر این نکته مهم است که قیود (۳۲-۳)-(۳۳-۳) برای حالت گرمایش خانه هوشمند نوشته شده‌اند. چنانچه حالت سرمایش مد نظر باشد، قیود (۳۵-۳)-(۳۴-۳) در زیر بجای قیود (۳۲-۳)-(۳۳-۳) مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

$$\theta_{\tau}^{\text{IN}} = \varepsilon \cdot \theta_{\tau-1}^{\text{IN}} + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\bar{\theta}_{\tau}^{\text{OUT}} - \frac{\sum_i p_{i,\tau} \cdot \text{COP}^C}{U_{\text{ABL}}} \right) \quad i \in \Omega^{\text{PF}}, \tau = t \quad (35-3)$$

$$\theta_{\tau}^{\text{IN}} = \varepsilon \cdot \theta_{\tau-1}^{\text{IN}} + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\{\theta_{\tau}^{\text{OUT}}\} - \frac{\sum_i p_{i,\tau} \cdot \text{COP}^C}{U_{\text{ABL}}} \right) \quad i \in \Omega^{\text{PF}}, \tau > t \quad (36-3)$$

واضح است که برای حالت سرمایش در قیود (۳۵-۳)-(۳۶-۳)، فقط کولر گازی با ضریب عملکرد حالت سرمایش مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۳-۴-۲ مدل سازی عدم قطعیت

در مدل قطعی، دو پارامتر تابش خورشیدی $\{P_{\tau}^{\text{SR}}\}$ و دمای بیرونی $\{\theta_{\tau}^{\text{OUT}}\}$ که دارای عدم قطعیت هستند، با پیش‌بینی تک نقطه‌ای مدل شده‌اند. این دو پارامتر به ترتیب در قیود (۳-۴)، (۳-۱۶)، (۳۳-۳) و (۳۶-۳) مشاهده می‌شوند. به منظور مدل سازی عدم قطعیت این دو پارامتر، مدل بهینه سازی مقاوم انتخاب می‌شود. در مدل بهینه سازی مقاوم برای هر پارامتر با عدم قطعیت، نیاز به یک بازه پیش‌بینی است. بنابراین، واحد پیش‌بینی برای هر کدام از پارامترهای مذکور یک بازه تغییرات پیش‌بینی می‌کند. بر همین اساس، در مدل بهینه سازی مقاوم، پارامتر دارای عدم قطعیت $\{P_{\tau}^{\text{SR}}\}$ با بازه پیش‌بینی $[P_{\tau}^{\text{SR}}, \bar{P}_{\tau}^{\text{SR}}]$ ، و پارامتر دارای عدم قطعیت $\{\theta_{\tau}^{\text{OUT}}\}$ با بازه پیش‌بینی $[\theta_{\tau}^{\text{OUT}}, \bar{\theta}_{\tau}^{\text{OUT}}]$ مدل سازی می‌شوند. هر مدل بهینه سازی مقاوم، دارای یک پارامتر کنترلی به منظور کنترل میزان مقاومت مدل به تغییرات پیش‌بینی است که در یک بازه مشخص قابل تغییر است.

انتخاب مقادیر بزرگتر برای این پارامتر کنترلی، به معنای افزایش مقاومت مدل و کاهش ریسک‌پذیری در برابر تغییرات است.

۳-۴-۳ مدل بهینه‌سازی مقاوم^۱

در این بخش مدل بهینه‌سازی مقاوم سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی که بصورت زمان‌حقیقی و بر اساس تئوری مرجع [۲۵] نوشته شده است، به نمایش گذاشته و تشریح خواهد شد. انتخاب مدل بهینه‌سازی مقاوم در برابر مدل‌های دیگر همچون مدل بهینه‌سازی تصادفی^۲ به دو دلیل بوده است. نخست آنکه، گرچه با مدل بهینه‌سازی تصادفی ممکن است بتوان به جواب بهتری برای تابع هدف نسبت به مدل بهینه‌سازی مقاوم رسید، اما اجرایی بودن جواب مساله فقط در سناریوهای استفاده شده محقق خواهد بود. این در حالی است که در مدل بهینه‌سازی مقاوم بدلیل فرض کردن یک بازه برای پارامتر با عدم قطعیت، جواب بدست آمده در شرایط مذکور قطعاً امکان‌پذیر خواهد بود. از سوی دیگر حل مساله با مدل بهینه‌سازی تصادفی به دلیل وجود تعداد زیادی سناریوی تولید شده، نیازمند زمان بیشتری نسبت به مدل بهینه‌سازی مقاوم است، که این مساله با توجه به زمان حقیقی بودن مدل ریاضی مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی مطرح شده بسیار مهم است. تشریح تئوری بهینه‌سازی مقاوم بر اساس مرجع [۲۵] در پیوست (۱) آورده شده است.

با در نظر گرفتن مدل عدم قطعیت در زیر بخش قبل، مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی (۱-۳)-(۳-۳۶) به صورت مدل بهینه‌سازی مقاوم به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\min_{\Omega^{DO} \cup \Omega^{RO}} (1 - 3) \quad (37-3)$$

Subject to:

$$\text{Constraints } (2-3)-(3-3), (5-3)-(15-3), (17-3)-(32-3), (34-3), (35-3) \quad (38-3)$$

¹ Robust Optimization Model (RO)

² Stochastic Optimization Model

تابع هدف (۳۷-۳) مشابه تابع هدف (۱-۳) می‌باشد، با این تفاوت که متغیرهای مرتبط با مدل بهینه‌سازی مقاوم به مجموعه متغیرهای مدل اضافه شده‌اند. قیود (۳۸-۳) شامل تمامی قیود مدل بهینه‌سازی قطعی است که در آن‌ها پارامتری با عدم قطعیت وجود ندارد.

$$p_{\tau}^{PV} + \Gamma^{PV} \cdot v_{\tau}^{PV} + \mu_{\tau}^{PV} \leq \frac{1}{2}(\bar{P}_{\tau}^{SR} + \underline{P}_{\tau}^{SR}) \cdot A^{PV} \cdot \eta^{PV} \quad \forall \tau > t \quad (39-3)$$

$$v_{\tau}^{PV} + \mu_{\tau}^{PV} \geq \frac{1}{2}(\bar{P}_{\tau}^{SR} - \underline{P}_{\tau}^{SR}) \cdot y_{\tau}^{PV} \quad \forall \tau > t \quad (40-3)$$

$$y_{\tau}^{PV} \geq A^{PV} \cdot \eta^{PV} \quad \forall \tau > t \quad (41-3)$$

قیود (۳۹-۳)-(۴۱-۳) برای عدم قطعیت موجود در قیود (۴-۳) نوشته شده‌اند و مقدار تولید توان الکتریکی توسط واحد فتوولتاییک را کمتر از مقدار توان در دسترس تضمین می‌کنند. پارامتر Γ^{PV} امکان کنترل میزان مقاومت مدل به شرایط مختلف را فراهم می‌کند و مقدار آن بدلیل وجود تنها یک ضریب با عدم قطعیت در قیود (۴-۳) در بازه $[0 \ 1]$ تغییر می‌کند. مقدار کمتر برای پارامتر Γ^{PV} به معنای نزدیک شدن توان در دسترس به میانگین بازه‌ی باندهای پیش‌بینی شده برای تولید توان پنل فتوولتاییک و صرف نظر کردن از انحراف از مقدار میانگین می‌باشد. مقدار بیشتر پارامتر Γ^{PV} به معنای کوچکتر بودن توان تولیدی از مقدار در دسترس است حتی اگر مقدار توان در دسترس از مقدار میانگین به اندازه $\Gamma^{PV} \times (\bar{P}_{\tau}^{SR} - \underline{P}_{\tau}^{SR})/2$ منحرف شود. بنابراین انتخاب مقدار $\Gamma^{PV} = 1$ به طور قطعی امکان‌پذیر بودن تولید توان واحد فتوولتاییک را در بدترین حالت تضمین می‌کند.

$$p_{\tau}^{SWH} + \Gamma^{SWH} \cdot v_{\tau}^{SWH} + \mu_{\tau}^{SWH} \leq \frac{1}{2}(\bar{P}_{\tau}^{SR} + \underline{P}_{\tau}^{SR}) \cdot A^{SWH} \cdot \eta^{SWH} \cdot \eta^{CO} \quad \forall \tau > t \quad (42-3)$$

$$v_{\tau}^{SWH} + \mu_{\tau}^{SWH} \geq \frac{1}{2}(\bar{P}_{\tau}^{SR} - \underline{P}_{\tau}^{SR}) \cdot y_{\tau}^{SWH} \quad \forall \tau > t \quad (43-3)$$

$$y_{\tau}^{SWH} \geq A^{SWH} \cdot \eta^{SWH} \cdot \eta^{CO} \quad \forall \tau > t \quad (44-3)$$

قیود (۴۲-۳)-(۴۴-۳) مشابه قیود (۳۹-۳)-(۴۱-۳) هستند و برای عدم قطعیت موجود در قیود (۱۶-۳) نوشته شده‌اند. متغیرهای y_{τ}^{PV} و y_{τ}^{SWH} که برای خطی سازی مدل بهینه‌سازی مقاوم استفاده شده‌اند به ترتیب در قیود (۴۱-۳) و (۴۴-۳) مشاهده می‌شوند.

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) + \sum_{k=1}^t (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \\
& + \frac{1}{2} \left[\sum_{k=t+1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot [\bar{\theta}_k^{OUT} + \underline{\theta}_k^{OUT}] \right] + \bar{\Gamma}_{\tau}^{\theta} \cdot \bar{v}_{\tau}^{\theta} \\
& + \sum_{k=t+1}^{\tau} \bar{\mu}_{\tau,k}^{\theta} \leq \bar{\theta}^{IN} - \varepsilon^{\tau} \cdot \theta_0^{IN} \quad \forall i \in \Psi^{PF}, i' \in \Omega^{PF}, \tau > t \quad (45-3)
\end{aligned}$$

$$\bar{v}_{\tau}^{\theta} + \bar{\mu}_{\tau,k}^{\theta} \geq \frac{1}{2} [\bar{\theta}_k^{OUT} - \underline{\theta}_k^{OUT}] \cdot \bar{y}_{N_t-(\tau-k)}^{\theta} \quad \forall \tau \geq k > t \quad (46-3)$$

$$\bar{y}_{\tau}^{\theta} \geq (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{N_t-\tau} \quad \forall \tau > t \quad (47-3)$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) + \sum_{k=1}^t (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \\
& + \frac{1}{2} \left[\sum_{k=t+1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot [\bar{\theta}_k^{OUT} + \underline{\theta}_k^{OUT}] \right] \\
& \geq \underline{\theta}^{IN} - \varepsilon^{\tau} \cdot \theta_0^{IN} + \bar{\Gamma}_{\tau}^{\theta} \cdot \underline{v}_{\tau}^{\theta} + \sum_{k=t+1}^{\tau} \underline{\mu}_{\tau,k}^{\theta} \quad \forall i \in \Psi^{PF}, i' \in \Omega^{PF}, \tau > t \quad (48-3)
\end{aligned}$$

$$\underline{v}_{\tau}^{\theta} + \underline{\mu}_{\tau,k}^{\theta} \geq \frac{1}{2} [\bar{\theta}_k^{OUT} - \underline{\theta}_k^{OUT}] \cdot \underline{y}_{N_t-(\tau-k)}^{\theta} \quad \forall \tau \geq k > t \quad (49-3)$$

$$\underline{y}_{\tau}^{\theta} \geq (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{N_t-\tau} \quad \forall \tau > t \quad (50-3)$$

قیود (45-3)-(50-3) برای عدم قطعیت موجود در قیود (33-3) نوشته شده‌اند. از آنجایی که

قیود (33-3) بصورت قیود مساوی نوشته شده‌اند و چون الگوی موجود در مرجع [25] برای قیود

نامساوی بیان شده است، برای تبدیل قیود (33-3) بصورت نامساوی، آن‌ها باید بصورت زیر در

نامساوی (34-3) ادغام شوند.

ابتدا با استفاده از (33-3) می‌توان نوشت:

$$\theta_1^{IN} = \varepsilon \cdot \theta_0^{IN} + (1-\varepsilon) \cdot \left(\{\theta_1^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,1} + p_{i',1} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) \quad \tau = 1 \quad (*4)$$

$$\theta_2^{IN} = \varepsilon \cdot \theta_1^{IN} + (1-\varepsilon) \cdot \left(\{\theta_2^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,2} + p_{i',2} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) \quad \tau = 2 \quad (*5)$$

$$\xrightarrow{(*4)in(*5)} \theta_2^{IN} = \varepsilon^2 \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot \left(\{\theta_1^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,1} + p_{i',1} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) \\ + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\{\theta_2^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,2} + p_{i',2} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right)$$

بصورت مشابه:

$$\xrightarrow{\tau=3} \theta_3^{IN} = \varepsilon^3 \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon^2 \cdot \left(\{\theta_1^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,1} + p_{i',1} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) \\ + (1 - \varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot \left(\{\theta_2^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,2} + p_{i',2} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) \\ + (1 - \varepsilon) \cdot \left(\{\theta_3^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,3} + p_{i',3} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right)$$

به کمک استقرا ریاضی برای حالت کلی می توان نوشت:

$$\theta_\tau^{IN} = \varepsilon^\tau \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \sum_{k=1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\{\theta_k^{OUT}\} + \frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) \quad (*6)$$

حال با توجه به اینکه قیود (۳-۳۳) برای $\tau > t$ نوشته شده اند، و پارامتر θ_τ^{OUT} فقط برای مقادیر

$\tau > t$ دارای عدم قطعیت است، معادله (*۶) باید بصورت زیر تصحیح شود:

$$\theta_\tau^{IN} = \varepsilon^\tau \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \left[\sum_{k=1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) + \sum_{k=1}^t \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \right. \\ \left. + \sum_{k=t+1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \{\theta_k^{OUT}\} \right] \quad \tau > t \quad (*7)$$

با توجه به معادله بالا، فقط جمله آخر، یعنی $\sum_{k=t+1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \{\theta_k^{OUT}\}$ ، دارای پارامتر عدم-

قطعیت است. بنابراین در هر بازه زمانی برنامه ریزی، تعداد $(\tau - t)$ پارامتر با عدم قطعیت وجود دارد.

حال با ادغام (*7) در قیود (۳-۳۴) می توان نوشت:

$$\underline{\theta}^{IN} \leq \varepsilon^\tau \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \left[\sum_{k=1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) + \sum_{k=1}^t \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \right. \\ \left. + \sum_{k=t+1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \{\theta_k^{OUT}\} \right] \leq \bar{\theta}^{IN}$$

معادله فوق به دو قسمت بصورت زیر تقسیم می شود:

$$\varepsilon^\tau \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \left[\sum_{k=1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) + \sum_{k=1}^t \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \right. \\ \left. + \sum_{k=t+1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \{\theta_k^{OUT}\} \right] \leq \bar{\theta}^{IN} \quad (*8)$$

$$\varepsilon^\tau \cdot \theta_0^{IN} + (1 - \varepsilon) \cdot \left[\sum_{k=1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \left(\frac{\sum_{i,i'} (p_{i,k} + p_{i',k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} \right) + \sum_{k=1}^t \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \right. \\ \left. + \sum_{k=t+1}^{\tau} \varepsilon^{\tau-k} \cdot \{\theta_k^{OUT}\} \right] \geq \underline{\theta}^{IN} \quad (*9)$$

قیود (۴۵-۳)-(۴۷-۳) جهت پوشش عدم قطعیت در معادله (*8) و قیود (۴۸-۳)-(۵۰-۳) جهت

پوشش عدم قطعیت در معادله (*9) نوشته شده اند. پارامترهای $\bar{\Gamma}_\tau^\theta$ و $\underline{\Gamma}_\tau^\theta$ امکان کنترل میزان مقاومت

مدل به شرایط مختلف را فراهم می کنند، و مقدار آن ها بدلیل وجود تعداد $(\tau - t)$ ضریب با عدم-

قطعیت در معادلات (*۷) و (*۸) در بازه $[0, (\tau - t)]$ تغییر می کند. بطور مشابه، متغیرهای $\bar{y}_\tau^\theta$ و

$\underline{y}_\tau^\theta$ که برای خطی سازی مدل بهینه سازی مقاوم استفاده شده اند به ترتیب در قیود (۴۷-۳) و (۵۰-۳)

مشاهده می شوند.

$$p_\tau^{PV}, p_\tau^{SWH}, v_\tau^{PV}, v_\tau^{SWH}, \bar{v}_\tau^\theta, \underline{v}_\tau^\theta, \mu_\tau^{PV}, \mu_\tau^{SWH}, \bar{\mu}_{\tau,k}^\theta, \underline{\mu}_{\tau,k}^\theta \geq 0 \quad \forall \tau > t \quad (51-3)$$

قیود (۵۱-۳) مثبت بودن متغیرهای موجود در مدل بهینه سازی مقاوم را نشان می دهد. باید

توجه شود که، قیود (۴۵-۳) و (۴۸-۳) برای حالت گرمایش خانه هوشمند نوشته شده اند. برای حالت

سرمایش قیود (۵۲-۳) و (۵۳-۳) زیر، جایگزین خواهند شد.

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \frac{\sum_i (-p_{i,k} \cdot COP^C)}{UA^{BL}} + \sum_{k=1}^t (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \\
& + \frac{1}{2} \left[\sum_{k=t+1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot [\bar{\theta}_k^{OUT} + \underline{\theta}_k^{OUT}] \right] + \bar{\Gamma}_{\tau}^{\theta} \cdot \bar{v}_{\tau}^{\theta} \\
& + \sum_{k=t+1}^{\tau} \bar{\mu}_{\tau,k}^{\theta} \leq \bar{\theta}^{IN} - \varepsilon^{\tau} \cdot \theta_0^{IN} \quad \forall i \in \Omega^{PF}, \tau > t \quad (52-3)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{k=1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \frac{\sum_i (-p_{i,k} \cdot COP^H)}{UA^{BL}} + \sum_{k=1}^t (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot \tilde{\theta}_k^{OUT} \\
& + \frac{1}{2} \left[\sum_{k=t+1}^{\tau} (1-\varepsilon) \cdot \varepsilon^{\tau-k} \cdot [\bar{\theta}_k^{OUT} + \underline{\theta}_k^{OUT}] \right] \\
& \geq \underline{\theta}^{IN} - \varepsilon^{\tau} \cdot \theta_0^{IN} + \underline{\Gamma}_{\tau}^{\theta} \cdot \underline{v}_{\tau}^{\theta} + \sum_{k=t+1}^{\tau} \underline{\mu}_{\tau,k}^{\theta} \quad \forall i \in \Omega^{PF}, \tau > t \quad (53-3)
\end{aligned}$$

۳-۴-۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این فصل مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در خانه هوشمند تشریح گردید. در معرفی ساختار خانه هوشمند مورد مطالعه و اجزای آن بیان شد، بارهایی وجود دارند که بهره‌برداری از آن‌ها دارای همبستگی است. این همبستگی میان بارهای الکتریکی و حرارتی، باعث بوجود آمدن همبستگی در بهره‌برداری از منابع الکتریکی و حرارتی نیز می‌شود. در بخش‌های بعدی، بر اساس ساختار معرفی شده، مدل بهینه‌سازی قطعی و مقاوم فرمول‌بندی شد. همچنین برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مدل بهینه‌سازی قطعی از پیش‌بینی تک-نقطه‌ای و برای مدل‌سازی عدم قطعیت در مدل بهینه‌سازی مقاوم از پیش‌بینی بازه‌ای استفاده شد.

مدل‌های ارائه شده دارای مزیت‌های زیر است:

(۱) مدل‌های ارائه شده می‌توانند برای بازه‌های زمانی مختلف برنامه‌ریزی، مورد استفاده قرار

بگیرند.

۲) برای مدل‌سازی اثر سیستم‌های گرمایش و سرمایش بر روی دمای خانگی، از مدل خطی استفاده شده است. همچنین، در فرمول‌بندی این معادلات در مدل بهینه‌سازی مقاوم نوآوری صورت گرفته است.

۳) بارهای الکتریکی را می‌توان با حداکثر و حداقل مقدار توان مورد نیاز معرفی کرد. بارهای حرارتی تنها با میزان آب گرم مورد نیاز تعریف می‌شوند.

۴) از آنجایی که مدل‌ها بصورت زمان‌حقیقی فرمول‌بندی شده‌اند، کاربر می‌تواند قبل از حل مسأله بهینه‌سازی توسط سیستم مرکزی در بازه زمانی کنونی، پارامترهای رفاهی خود را برای بازه‌های زمانی کنونی و بازه‌های زمانی آینده تغییر دهد. همچنین نتایج حاصل از حل مسأله بهینه‌سازی توسط سیستم مرکزی، بدلیل در دسترس بودن مقادیر واقعی پارامترهای مختلف در بازه زمانی کنونی، واقعی و قابل اجرا خواهند بود.

فصل ۴

شبیه‌سازی

۴-۱ داده‌های شبیه‌سازی

۴-۱-۱ اطلاعات اولیه

طول یک بازه زمانی برابر ۱ ساعت انتخاب شده است. بنابراین یک دوره برنامه‌ریزی، یعنی یک روز شامل ۲۴ بازه زمانی خواهد بود. مساله بهینه‌سازی یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی بصورت زمان حقیقی نوشته و اجرا می‌شود.

هدایت حرارتی ساختمان و فاکتور اینرسی استخراج شده از مرجع [۱۷] به شرح زیر است:

$$UA^{BL} = 1/R = 0.056 \left(\frac{kW}{^\circ C} \right)$$

$$\varepsilon \approx 0.9$$

سایر ثابت‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی، در زیر نمایش داده شده است:

$$C^w = 4200 \left(\frac{J}{kg^\circ C} \right) = 0.0012 \left(\frac{kWh}{kg^\circ C} \right)$$

$$HV = 38000 \left(\frac{kJ}{m^3} \right) = 10.56 \left(\frac{kWh}{m^3} \right)$$

همچنین دمای آب سرد ورودی به مخزن آب ۱۵ درجه سانتی‌گراد است. دمای داخلی اولیه خانه ۲۳ درجه سانتی‌گراد و دمای آب گرم مورد نیاز برای مصارف بهداشتی و استحمام به ترتیب ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است.

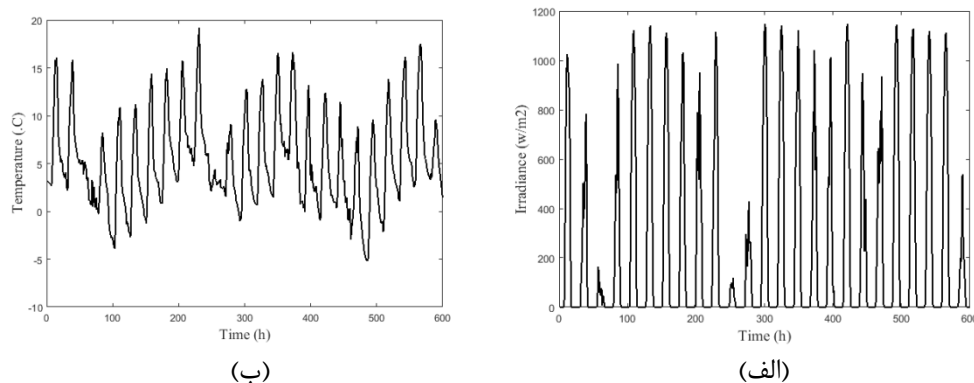
۴-۱-۲ پیش‌بینی تابش خورشیدی و دمای بیرونی

اطلاعات توان تابش خورشیدی و دمای بیرونی از ریز شبکه برق هوشمند دانشگاه صنعتی شاهرود [۲۶] در بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۱/۱۲ الی ۱۳۹۷/۱۲/۶ دریافت شده است. داده‌های مورد نظر به صورت دقیقه‌ای می‌باشند که پس از میانگین‌گیری ۶۰ دقیقه‌ای، به فرم ساعتی تبدیل شده‌اند. با

¹ 2019/Feb/01

² 2019/Feb/25

توجه به صفر یا ناچیز بودن بود توان تابشی در ساعات اولیه روز (۰ الی ۶) و آخر روز (۱۸ الی ۲۴)، داده‌های این ساعات در فرآیند پیش‌بینی تابش خورشیدی وارد نشده و مقدار آن‌ها صفر منظور می‌شود. پس دوره‌ی فصلی داده‌های تابش خورشیدی ۱۲ ساعت و دوره‌ی فصلی دمای بیرونی ۲۴ ساعت است. اشکال (۱-۴) و (۲-۴) این داده‌ها را در دو بازه زمانی گفته شده نشان می‌دهند.



شکل (۱-۴) داده‌های گذشته (۲۵ روز الف) تابش خورشیدی ، (ب) دمای بیرونی

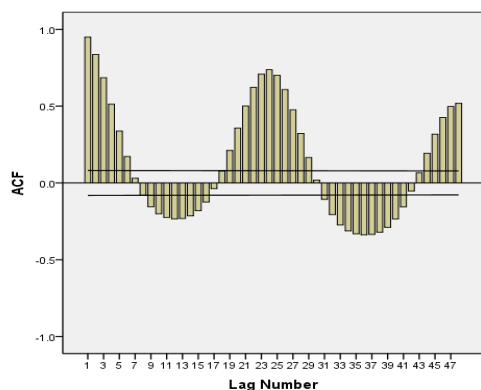
بر اساس این اطلاعات، توان تابش خورشیدی و دمای بیرونی برای روز ۱۳۹۷/۱۲/۷^۱ (روز ۲۶م) پیش‌بینی و در تحلیل مساله بهینه‌سازی مدیریت انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. پیش‌بینی اطلاعات بر اساس روش آریما^۲ به فرم $(p,d,q),(P,D,Q)_S$ انجام شده است. در ادامه، فرآیند شبیه‌سازی را بصورت مختصر تشریح و سپس نتایج حاصله برای روز پیش‌بینی شده نمایش داده می‌شوند. برای این منظور ابتدا داده‌های ساعتی به نرم‌افزار SPSS وارد و نمودارهای توابع خود همبستگی^۳ و خود همبستگی جزئی^۴ مشاهده می‌شوند. شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴) این نمودارها را نشان می‌دهد.

^۱ 2019/Feb/26

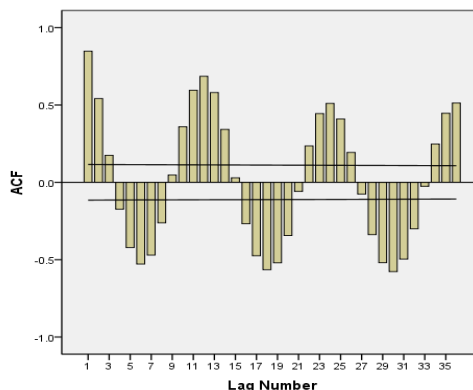
^۲ Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

^۳ Auto Correlation Function (ACF)

^۴ Partial Auto Correlation Function (PACF)

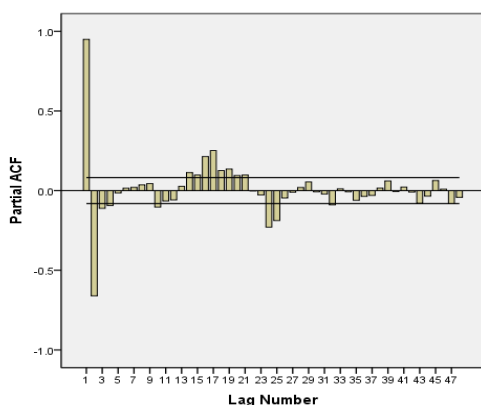


(ب)

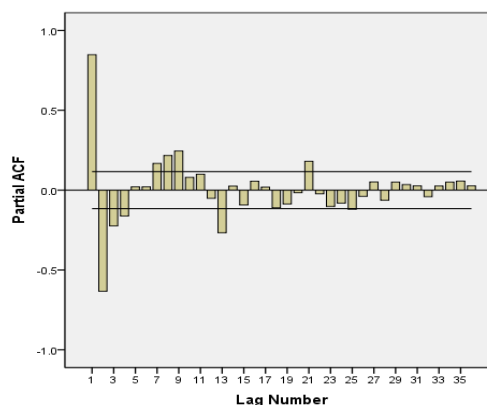


(الف)

شکل (۲-۴) تابع خود همبستگی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی



(ب)

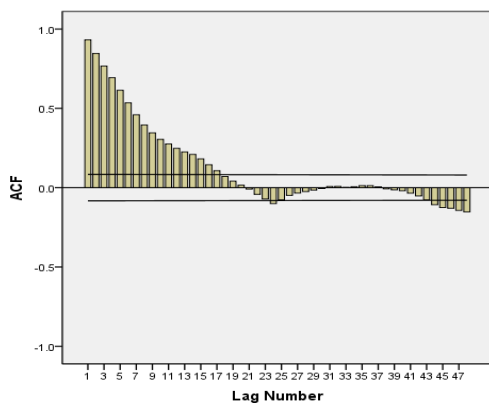


(الف)

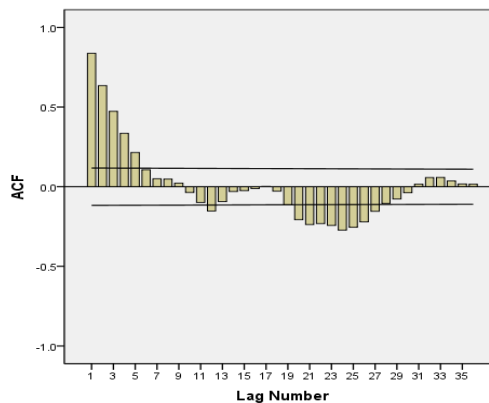
شکل (۳-۴) تابع خود همبستگی جزئی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی

با توجه به شکل (۲-۴)، نایستایی فصلی در داده‌ها مشاهده می‌شود. با یکبار تفاضل‌گیری

فصلی، مجدد دو نمودار در شکل‌های (۴-۴) و (۵-۴) به نمایش گذاشته شده است.

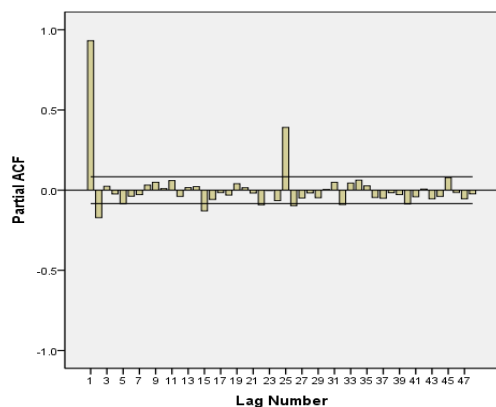


(ب)

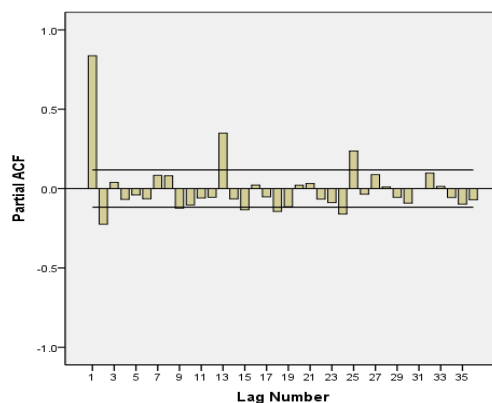


(الف)

شکل (۴-۴) تابع خود همبستگی با تفاضل فصلی الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی



(ب)

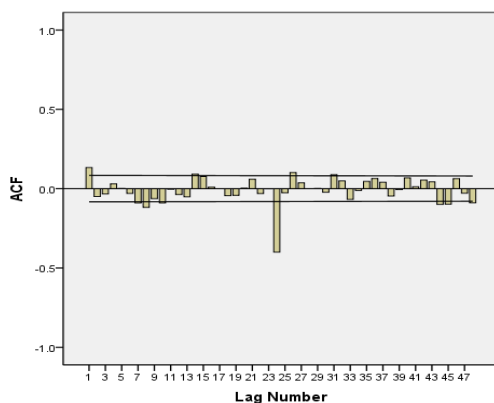


(الف)

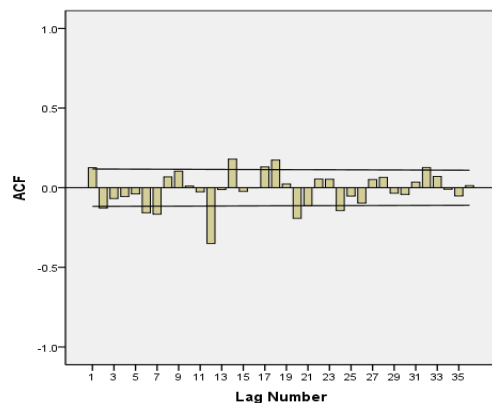
شکل (۴-۵) تابع خود همبستگی جزئی با تفاضل فصلی (الف) تابش خورشیدی ، (ب) دمای بیرونی

ناایستایی غیر فصلی در این داده‌ها هنوز مشاهده می‌گردد (شکل (۴-۴)). بنابراین یکبار هم

تفاضل‌گیری غیر فصلی باید انجام شود. نتیجه‌ی این فرآیند در شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) نشان داده شده است.

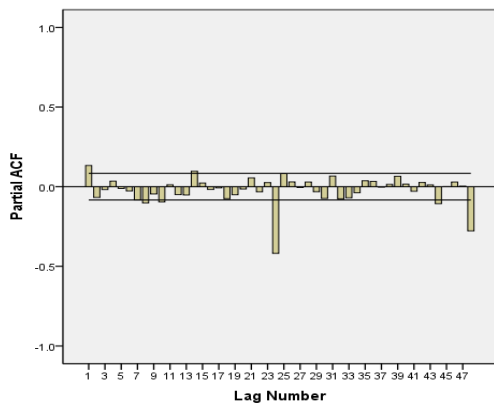


(ب)

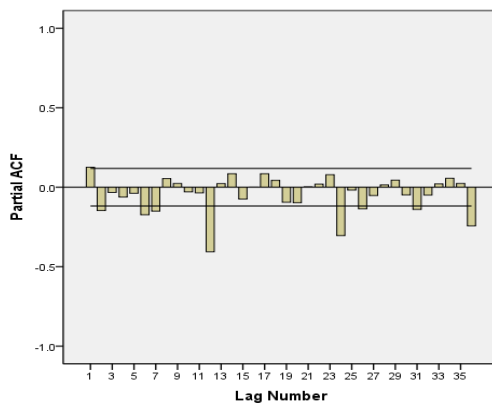


(الف)

شکل (۴-۶) تابع خود همبستگی با تفاضل فصلی و غیر فصلی (الف) تابش خورشیدی ، (ب) دمای بیرونی



(ب)



(الف)

شکل (۴-۷) تابع خود همبستگی جزئی با تفاضل فصلی و غیر فصلی (الف) تابش خورشیدی، (ب) دمای بیرونی

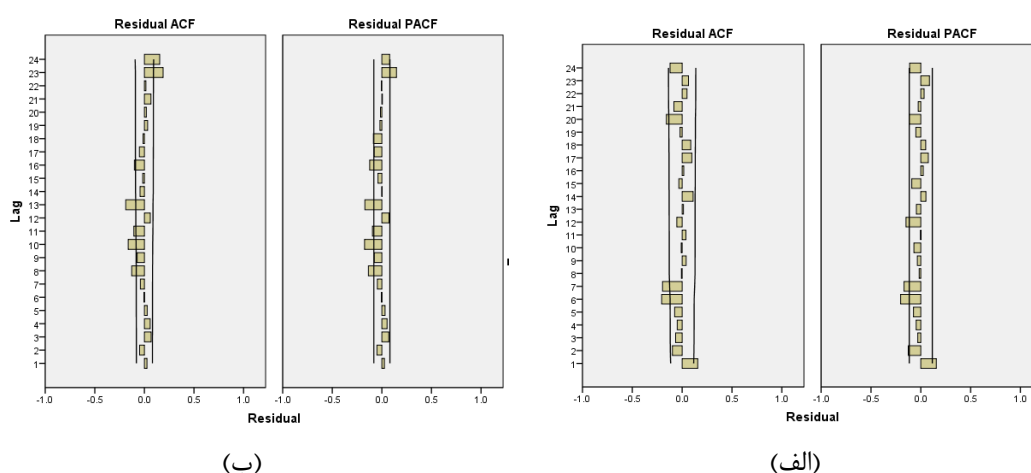
همانطور که مشاهده می‌شود رفتار داده‌ها ایستا شده است. بنابراین مقادیر زیر برای پارامتر تفاضل مدل آریما انتخاب می‌شود.

$$\text{Irradiance: } \begin{cases} d = 1 \\ D = 1 \end{cases} \quad \text{and} \quad \text{Temperature: } \begin{cases} d = 1 \\ D = 1 \end{cases}$$

اکنون با توجه شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷)، مقادیر دیگر مدل آریما یعنی AR و MA انتخاب می‌شود. بر همین اساس حداقل درجه برای MA فصلی و غیرفصلی، و AR فصلی و غیرفصلی به شرح زیر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \text{Irradiance} &: AR \begin{cases} p = 0 \\ P = 1 \end{cases}, \quad MA \begin{cases} q = 0 \\ Q = 1 \end{cases} \\ \text{Temperature} &: AR \begin{cases} p = 1 \\ P = 1 \end{cases}, \quad MA \begin{cases} q = 1 \\ Q = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

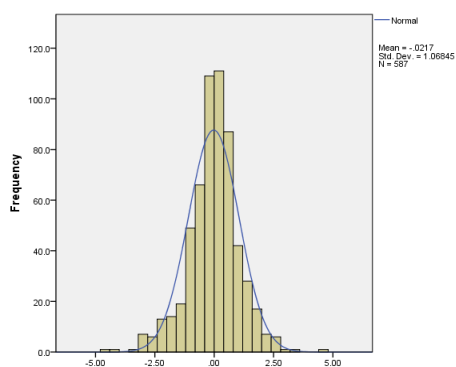
بنابراین، مدل‌های آریما انتخاب شده برای پیش‌بینی تابش خورشیدی $(0,1,0)$ ، $(1,1,1)_{12}$ و برای دمای بیرونی $(1,1,1)_{24}$ ، $(1,1,1)$ هستند. برای اطمینان بیشتر، مدل‌های انتخاب شده آزموده می‌شوند. برای این کار باید نمودارهای ACF، PACF و توزیع نرمال^۱ خطاهای باقیمانده^۲ ترسیم شوند. این نمودارها به ترتیب در شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) نشان داده شده‌اند.



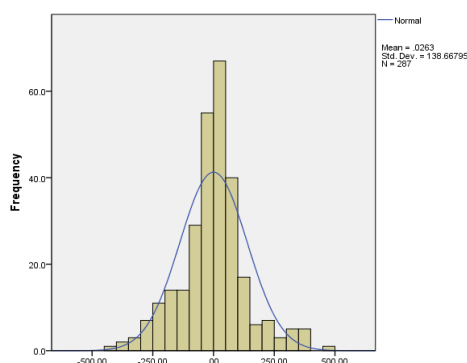
شکل (۴-۸) ACF و PACF خطاهای باقیمانده‌ی داده‌های الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی

¹ Normal Distribution

² Residual Errors



(ب)



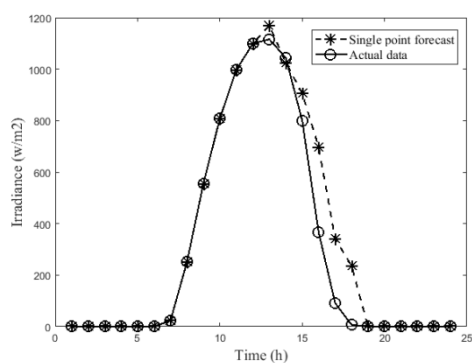
(الف)

شکل (۹-۴) توزیع نرمال خطاهای باقیمانده‌ی داده‌های الف) تابش خورشیدی ، ب) دمای بیرونی

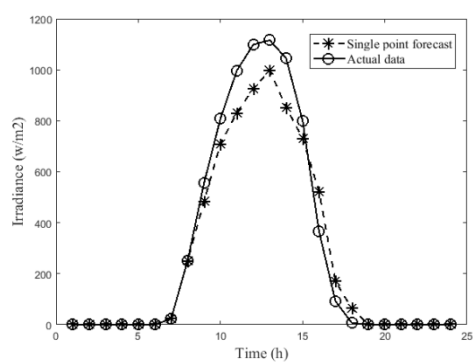
با توجه به ناچیز بودن خطاهای باقیمانده در شکل (۴-۸) و کم بودن میانگین خطا و انحراف معیار در شکل (۹-۴) مدل انتخاب شده مناسب می‌باشد. میانگین خطا در توزیع نرمال تابش خورشیدی و دمای بیرونی به ترتیب 0.0263 و -0.0217 و انحراف معیار در تابش خورشیدی w/m^2 138.66795 و در دمای بیرونی 1.06845 درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است.

از آنجایی که برنامه‌ریزی مصرف انرژی بصورت زمان حقیقی است، پیش‌بینی تابش خورشیدی و دمای بیرونی نیز باید بصورت زمان حقیقی انجام شود. در واقع منظور از زمان حقیقی در دسترس بودن اطلاعات واقعی در ساعت برنامه‌ریزی می‌باشد. به عنوان مثال، برای پیش‌بینی در ساعت ۱۲، اطلاعات تابش و دمای بیرونی چند دقیقه قبل از ساعت ۱۲ بصورت واقعی از طریق دستگاه‌های اندازه‌گیری به واحد پیش‌بینی ارسال می‌شود. واحد پیش‌بینی، اطلاعات این ساعت را به اطلاعات قبلی اضافه و با استفاده از این اطلاعات به روز شده، تابش خورشیدی و دمای بیرونی را برای ساعات پیش‌رو تا پایان روز پیش‌بینی می‌کند. بنابراین داده‌های ۱۲ ساعت پیش‌رو دارای عدم قطعیت هستند. برای نمونه، پیش‌بینی تک نقطه‌ای^۱ تابش خورشیدی در ساعت ۷ و ۱۲ در شکل (۴-۱۰) و پیش‌بینی تک نقطه-ای دمای بیرونی در ساعت ۱ و ۱۲ در شکل (۴-۱۱) نمایش داده شده‌اند.

¹ Single Point Forecast

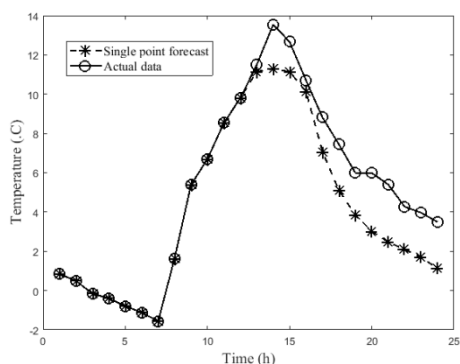


ب

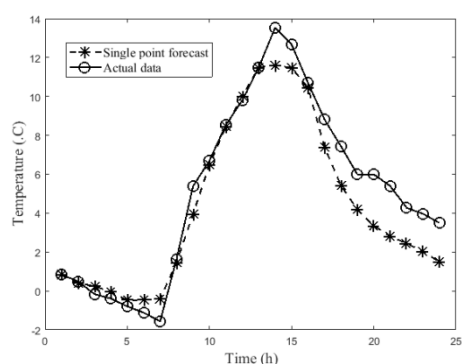


الف

شکل (۴-۱۰) پیش‌بینی تک نقطه‌ای توان تابش خورشیدی در الف) ساعت ۷، ب) ساعت ۱۲



ب



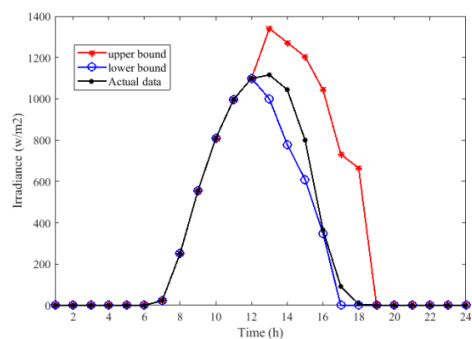
الف

شکل (۴-۱۱) پیش‌بینی تک نقطه‌ای دمای بیرونی در الف) ساعت ۱، ب) ساعت ۱۲

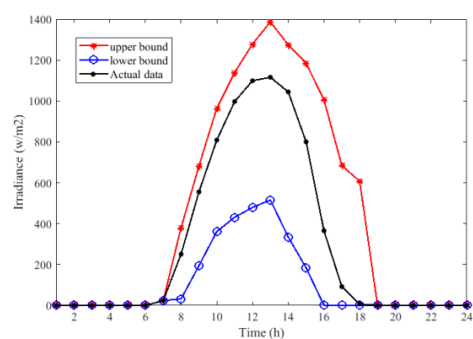
همچنین پیش‌بینی بازه‌ای تابش خورشیدی و دمای بیرونی برای استفاده در مدل بهینه‌سازی

مقاوم به ترتیب در شکل‌های (۴-۱۲) و (۴-۱۳) مشاهده می‌شوند. سطح اطمینان^۱ پیش‌بینی بازه‌ای

۰/۸ تعیین شده است.



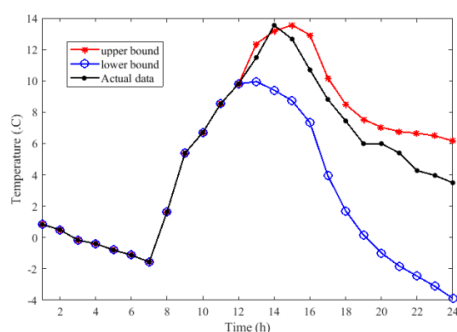
ب



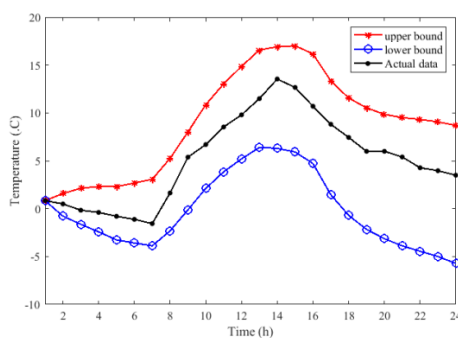
الف

شکل (۴-۱۲) پیش‌بینی بازه‌ای توان تابش خورشیدی در الف) ساعت ۷، ب) ساعت ۱۲

¹ Confidence level



ب



الف

شکل (۴-۱۳) پیش‌بینی بازه‌ای دمای بیرونی در الف) ساعت ۱، ب) ساعت ۱۲

۳-۱-۴ مشخصات منابع انرژی

مشخصات منابع انرژی تجدیدپذیر شامل پنل فتوولتایک و پنل آبگرمکن خورشیدی در جدول

(۴-۱) نشان داده شده‌اند.

جدول (۴-۱) مشخصات منابع تجدیدپذیر

قدرت نامی kw	بازده	مساحت سطح پنل m^2
PV	۱۴٪	۶.۵
SWH	۵۰٪	۸

همچنین یک واحد ذخیره‌ساز با ظرفیت ۱۰ kwh، محدودیت توانی شارژ و دشارژ ۱ kw و

بازده تبدیل انرژی ۹۰٪، و برای پشتیبانی آبگرمکن خورشیدی، آبگرمکن گازی بوتان مدل B۳۱۱۸

با توان ۲۴ kw و بازده ۸۰٪ در نظر گرفته شده است. مخزن آب نیز با گنجایش ۵۰۰ لیتر و حداکثر و

حداقل دمای مجاز ۹۰ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد تعیین شده است. بازده کویل‌ها نیز ۹۰٪ می‌باشد.

۴-۱-۴ قیمت‌گذاری انرژی

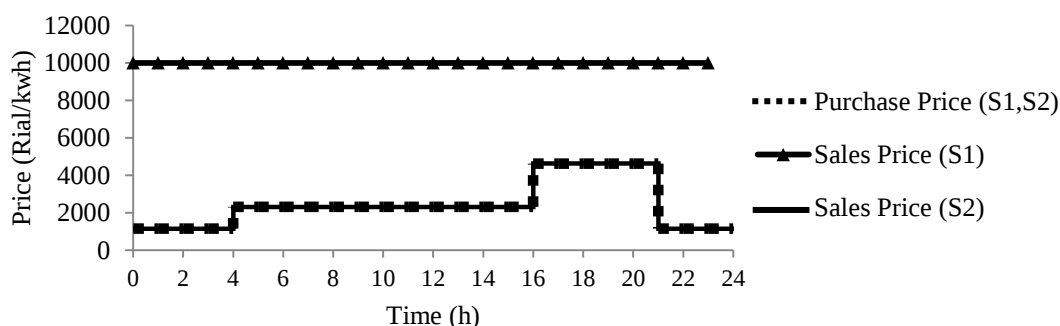
کشورهای گوناگون روش‌های مختلفی برای قیمت‌گذاری خرید/فروش انرژی الکتریکی دارند.

بعنوان مثال در کشور شیلی قیمت فروش انرژی الکتریکی به شبکه، ۵۰٪ قیمت خرید انرژی از شبکه،

و یا در کشور آلمان قیمت خرید و فروش انرژی الکتریکی برابر است [۲۷]. در ایران هم تا حال حاضر

قیمت خرید انرژی الکتریکی از شبکه بصورت روش زمان مصرف^۱ بوده و قیمت فروش انرژی الکتریکی به شبکه ثابت است.

در این پژوهش دو سناریوی قیمت‌گذاری در نظر گرفته شده است. در سناریوی اول (S1)، قیمت خرید انرژی الکتریکی از شبکه معادل قیمت‌گذاری زمان مصرف در ایران و قیمت فروش انرژی الکتریکی به شبکه، برابر مقدار ثابت ۱۰۰۰۰ Rial/kwh تعیین شده است. در سناریوی دوم (S2)، قیمت خرید انرژی الکتریکی مشابه سناریو اول و قیمت فروش انرژی الکتریکی به شبکه مانند کشور آلمان، برابر با قیمت خرید از شبکه فرض می‌شود. بر همین اساس، شکل (۴-۱۴) نشان‌دهنده قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی مورد استفاده در این پژوهش خواهد بود.



شکل (۴-۱۴) قیمت‌گذاری خرید/فروش انرژی الکتریکی از/به شبکه برق

محدودیت خرید/فروش انرژی الکتریکی از/به شبکه برق بر اساس قرارداد میان مشترک و شرکت توزیع برابر ۵ kw تنظیم شده است. همچنین، قیمت خرید هر متر مکعب گاز طبیعی از شبکه گازرسانی نیز برابر ۱۵۰۰ Rial/m³ تعیین شده است.

۴-۱-۵ مشخصات بارهای خانگی

بارهای انعطاف‌پذیر توانی شامل سیستم سرمایش و گرمایش هستند. دو دستگاه کولرگازی با قدرت ۱۸۰۰۰ Btu/h و ۲۴۰۰۰ و با ضرایب عملکرد ۳/۲۴ برای سرمایش و ۳/۴۱ برای گرمایش،

¹ Time of use (TOU)

تعیین شده‌اند. همچنین یک سیستم گرمایش شوفاژی با توان نامی ۱۴/۷۵ kw در کنار عملکرد گرمایش کولرگازی، وظیفه گرمایش خانه هوشمند را به عهده دارد.

مشخصات بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی شامل توان نامی، محدوده زمانی درخواست داده شده توسط کاربر و مدت زمان لازم برای اتمام وظیفه در جدول (۲-۴) به نمایش گذاشته شده است.

جدول (۲-۴) مشخصات بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی

توان نامی kw	دوره زمانی مورد نیاز	حداقل زمان شروع	حداکثر زمان اتمام	
۱.۸	۲	۱۴	۲۴	لباسشویی
۲.۵	۱	۱۴	۲۴	خشک‌کن
۱.۷	۲	۱۲	۱۹	ظرفشویی ۱
۱.۷	۲	۲۰	۲۴	ظرفشویی ۲
۱.۶	۱	۹	۲۰	جارو برقی
۱.۲	۱	۶	۸	سشوار ۱
۱.۲	۱	۶	۸	سشوار ۲
۱.۲	۱	۱۲	۱۷	سشوار ۳
۱.۲	۱	۱۷	۲۴	سشوار ۴
۲.۷	۱	۱۰	۲۰	اتو

همچنین، با توجه به تعداد درخواست‌های ساکنین برای بارهای حرارتی انعطاف‌پذیر زمانی (با فرض ۴ بار درخواست استحمام) جدول (۳-۴) شامل دبی آب گرم مورد نیاز بر اساس مرجع [۲۸]، مدت زمان مورد نیاز، حداقل زمان برای شروع و حداکثر زمان اتمام، برای این دسته از بارها تهیه شده است.

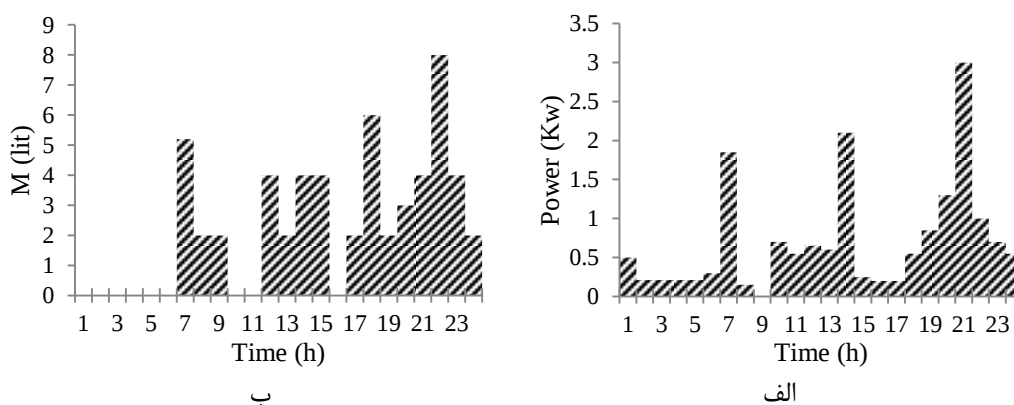
جدول (۳-۴) مشخصات بارهای حرارتی انعطاف‌پذیر زمانی

دبی آب گرم (lit/h)	دوره زمانی مورد نیاز	حداقل زمان شروع	حداکثر زمان اتمام	
۳۰	۱	۶	۸	استحمام ۱
۳۰	۱	۶	۸	استحمام ۲
۴۰	۱	۱۲	۱۷	استحمام ۳
۶۰	۱	۱۷	۲۴	استحمام ۴

همانطور که در جداول (۲-۴) و (۳-۴) مشاهده می‌شود، بارهای خانگی همبسته، استحمام و

سشوار با شماره‌های مشخص شده و ماشین لباس‌شویی و خشک‌کن می‌باشند.

بارهای ثابت الکتریکی شامل تلویزیون، رایانه، شارژر، سیستم روشنایی، لوازم سرگرمی، یخچال، مایکروویو و غیره، و بارهای ثابت حرارتی شامل مقدار آب گرم مورد نیاز برای سرویس بهداشتی و آشپزخانه هستند. پروفایل مقدار مصرف این بارها در طول یک روز در شکل (۴-۱۵) نمایش داده شده است. مقدار مصرف آب گرم در مصارف بارهای ثابت نیز از مرجع [۲۸] استخراج شده است.



شکل (۴-۱۵) پروفایل بارهای ثابت (الف) الکتریکی ، (ب) حرارتی

۲-۴ طرح شبیه‌سازی

هدف از انجام این شبیه‌سازی، بررسی نحوه عملکرد مدل بهینه‌سازی قطعی در شرایط مختلف و در برابر مدل بهینه‌سازی مقاوم است. برای این منظور سناریوهای زیر تعریف شده‌اند که بر اساس آن‌ها نتایج ارائه خواهند شد. توضیحات تفصیلی مربوط به هر سناریوی شبیه‌سازی در قسمت نتایج شبیه‌سازی ارائه خواهد شد.

(۱) بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی قطعی در حالات مختلف شامل:

- نحوه عملکرد سیستم‌های گرمایشی/سرمایشی و اثر آن‌ها بر روی دمای داخلی و منابع

انرژی حرارتی

- مقایسه اثر دو سناریوی قیمت‌گذاری بر روی برنامه‌ریزی بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی

- مقایسه اثر دو سناریوی قیمت‌گذاری بر روی بهره‌برداری از منابع انرژی
- بررسی و مقایسه اثر قیود پیوندی بر روی برنامه‌ریزی بارهای همبسته با حالت بدون قیود پیوندی

- بررسی و مقایسه اثر قیود پیوندی بر روی هزینه‌ها، با حالت بدون در نظر گرفتن قیود پیوندی

(۲) بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه (کمترین ریسک) شامل:

- مقایسه وضعیت دمای داخلی با مدل بهینه‌سازی قطعی
- مقایسه وضعیت بهره‌برداری از منابع انرژی با مدل بهینه‌سازی قطعی

(۳) بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه شامل:

- مقایسه وضعیت دمای داخلی با مدل بهینه‌سازی قطعی
- مقایسه وضعیت بهره‌برداری از منابع انرژی الکتریکی با مدل بهینه‌سازی قطعی

(۴) بررسی اثر تغییرات سطوح استراتژی‌های محافظه‌کارانه بر روی هزینه الکتریکی، هزینه حرارتی و مجموع و در دو سناریوی قیمت‌گذاری

۳-۴ نتایج شبیه‌سازی

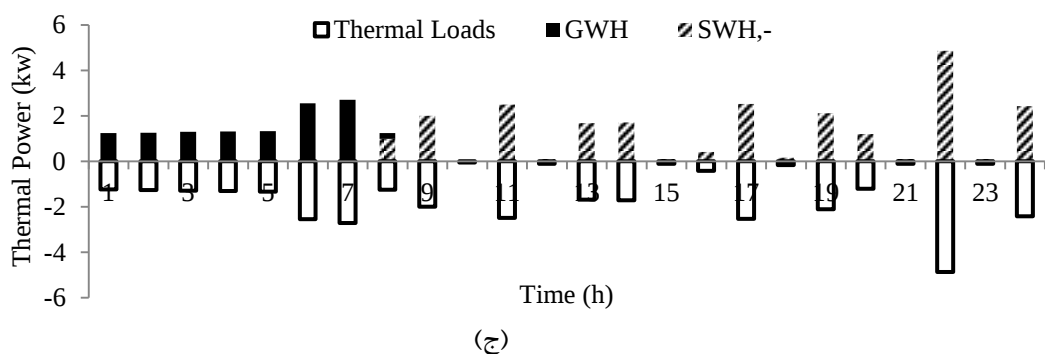
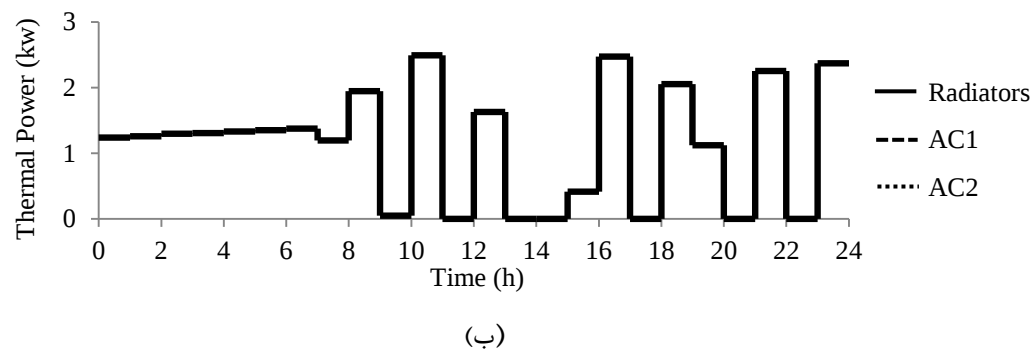
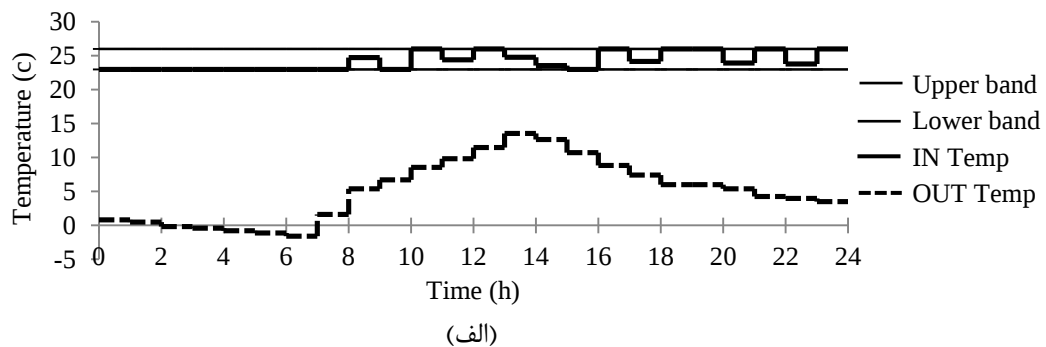
در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی بر اساس طرح ارائه شده در قسمت قبلی ارائه می‌گردد. شبیه‌سازی با استفاده از نرم افزار گمز^۱ انجام شده است و نتایج پس از ذخیره‌سازی در فایل اکسل، جهت نمایش آماده شده‌اند.

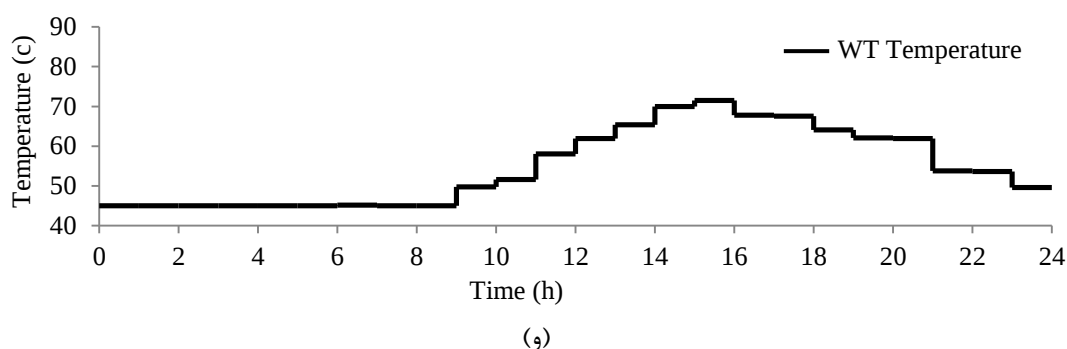
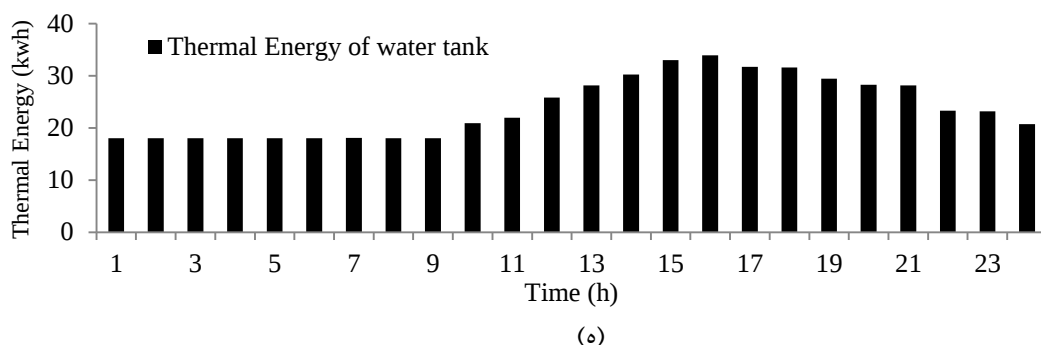
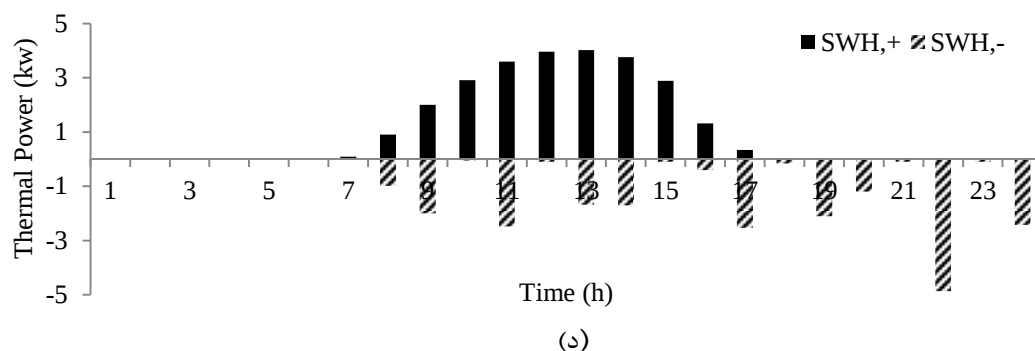
¹ Gams

۱-۳-۴ بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی قطعی

۱-۱-۳-۴ عملکرد سیستم‌های گرمایشی و اثر آن‌ها بر دمای داخلی و منابع انرژی حرارتی

در این قسمت پنج نمودار جهت بررسی و مقایسه به صورت زیر نمایش داده می‌شود. نمودار اول تغییرات دمای داخلی، دمای بیرونی و باندهای حداقل و حداکثر دمای داخلی (محدوده‌ی دمای مورد انتظار کاربر)، نمودار دوم تغییرات توان سیستم‌های گرمایشی، نمودار سوم منابع انرژی حرارتی و کل بارهای حرارتی و نمودارهای چهارم، پنجم و ششم به ترتیب تغییرات توان حرارتی داخل مخزن آب، انرژی حرارتی ذخیره شده در داخل مخزن آب و دمای آب داخل آن را نشان می‌دهند.



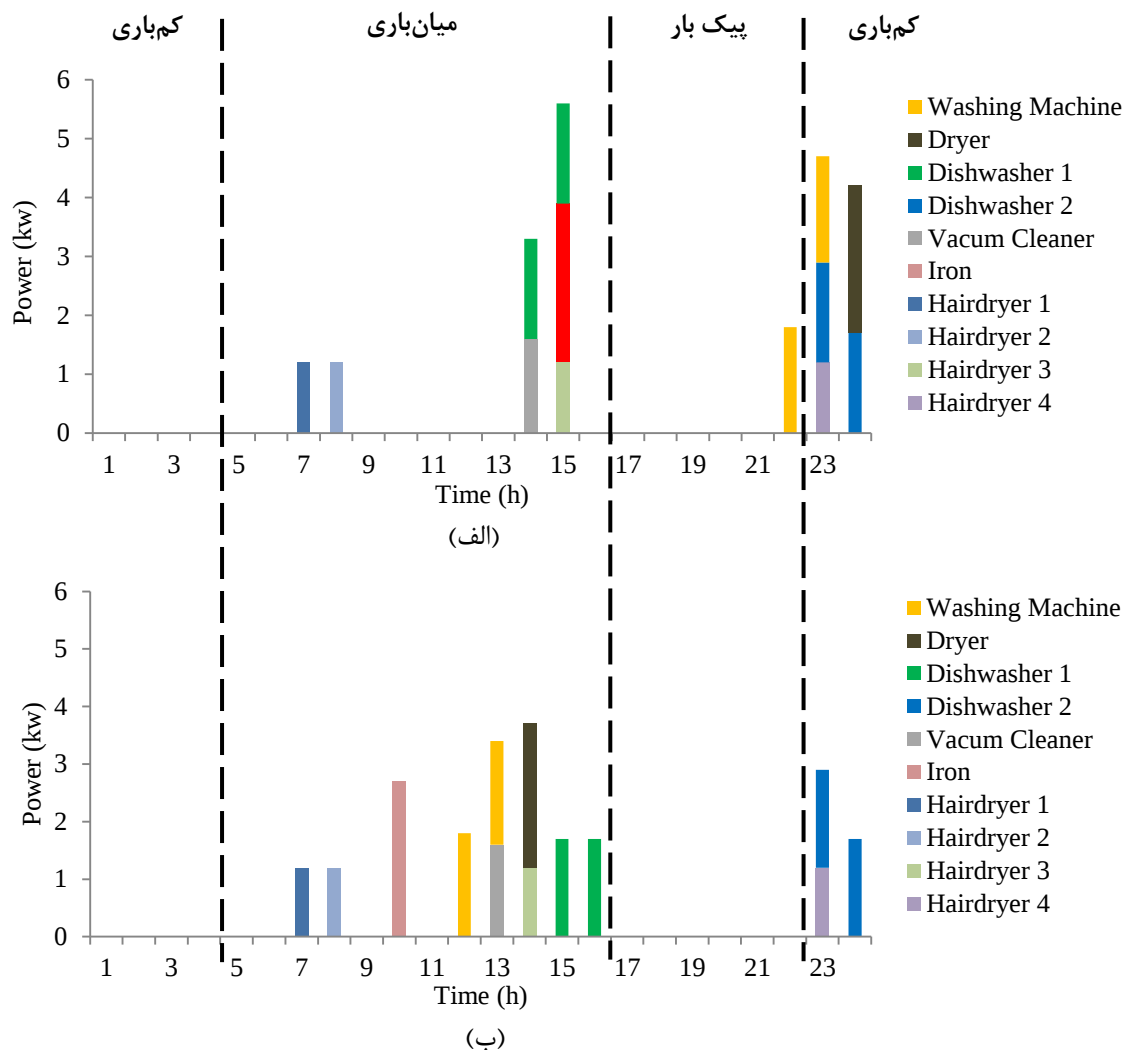


شکل (۱۶-۴) نمودارهای شبیه‌سازی مدل قطعی الف) دمای داخلی و بیرونی، ب) توان لوازم گرمایشی، ج) منابع و بارهای حرارتی، د) تغییرات توان مخزن آب، ه) انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن آب، ه) دمای آب داخل مخزن همانطور که در شکل (۱۶-۴) الف) مشاهده می‌شود، دمای داخلی در محدوده‌ی دمایی مورد انتظار کاربر حفظ شده است. همچنین، افزایش دمای داخلی در هر بازه زمانی با افزایش سطح توان مصرفی سیستم گرمایش رادیاتوری در همان بازه زمانی، در شکل (۱۶-۴) ب) همراه بوده است. با توجه به گران بودن هزینه خرید انرژی الکتریکی از هزینه خرید گاز، حتی در ارزان‌ترین زمان‌ها، بر اساس نتایج شکل (۱۶-۴) ب) سیستم مدیریت انرژی ترجیح داده است، فقط از سیستم گرمایش شوفاژی برای گرمایش استفاده کند و هر دو کولر گازی خاموش هستند. با بررسی نمودار (۱۶-۴) ج)

سیستم مدیریت انرژی فقط در زمان‌هایی که توان خورشیدی در دسترس نبوده (مانند بازه‌های زمانی ۱ الی ۷) یا انرژی حرارتی داخل مخزن، توانایی پاسخگویی به بارهای حرارتی را نداشته است (مانند بازه زمانی ۸)، اقدام به استفاده از سیستم پشتیبان یعنی آبگرمکن گازی کرده است. همچنین بر اساس شکل‌های (۴-۱۶) (ج و د) سیستم مرکزی در طول روز، با استفاده حداکثری از انرژی رایگان خورشیدی، در کنار پاسخگویی به همه بارهای حرارتی، سعی در ذخیره‌سازی آن بصورت افزایش سطح انرژی حرارتی در داخل مخزن در شکل (۴-۱۶) (ه) داشته، تا بتواند از این انرژی ذخیره شده در ساعات بعدی استفاده کند. در شکل (۴-۱۶) (د)، در بازه‌های زمانی که انرژی وارد شده به مخزن آب، یعنی SWH_+ بیشتر از انرژی خارج شده از مخزن آب یعنی SWH_- بوده است، سطح انرژی حرارتی در مخزن آب در شکل (۴-۱۶) (ه) افزوده شده است. این رویه باعث عدم نیاز به روشن کردن سیستم پشتیبان یعنی آبگرمکن گازی در شکل (۴-۱۶) (ج)، در ساعات بعد از اتمام تابش خورشیدی شده است. با توجه به نمودارهای (۲-۱۶) (ه) و (و) افزایش سطح انرژی حرارتی آب داخل مخزن آب، باعث افزایش سطح دمای آب داخل آن شده است. این دما بر اساس محدودیت اعمالی از طرف سیستم مدیریت انرژی از مقدار ۹۰ درجه سانتی‌گراد افزایش نیافته است.

۴-۳-۱-۲ اثر دو سناریوی قیمت‌گذاری بر روی برنامه‌ریزی بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی

در این بخش نحوه برنامه‌ریزی بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی در مدل قطعی و در دو سناریوی قیمت‌گذاری با هم مقایسه می‌شوند.



شکل (۴-۱۷) برنامه‌ریزی بارهای الکتریکی با مدل قطعی و در دو قیمت‌گذاری (الف) سناریو ۱، (ب) سناریو ۲

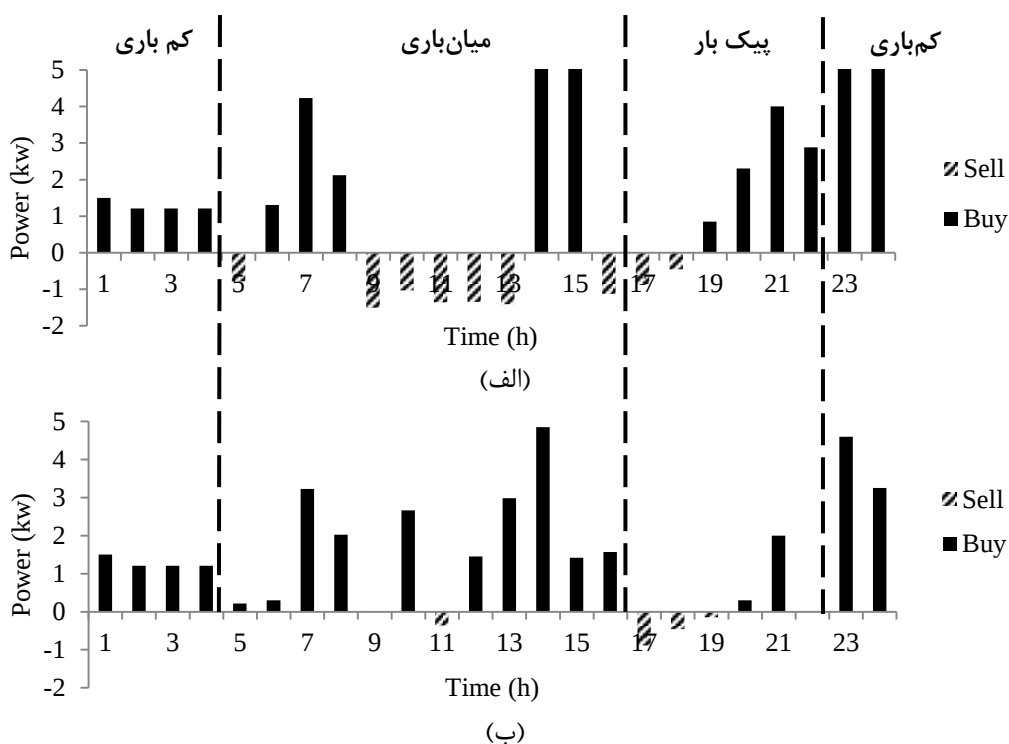
با توجه به هر دو نمودار در شکل (۴-۱۷)، مشاهده می‌شود که سیستم مدیریت انرژی بنحوی بهره‌برداری از بارهای الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی را برنامه‌ریزی کرده است که، مصرف انرژی این بارها در ساعات غیر پیک و ارزان‌تر انجام پذیرد. این رویه در سناریو دوم به دلیل اینکه هم قیمت خرید انرژی الکتریکی و هم قیمت فروش آن از نوع زمان مصرف و برابر هم هستند، نمود بیشتری دارد. مشاهده می‌شود که سیستم مرکزی، در سناریو دوم هیچ بار الکتریکی انعطاف‌پذیر زمانی را در ساعات پیک روشن نکرده است، که این یک مزیت خوب برای شرکت‌های توزیع نیز است.

استفاده از این دسته از بارها در همان محدوده زمانی که کاربر اعلام کرده (در جدول (۴-۲)) می‌باشد. پس سیستم مدیریت انرژی، رفاه کاربر را هم در نظر گرفته است. همچنین بار الکتریکی

خشک‌کن بلافاصله بعد از ماشین لباس‌شویی قرار گرفته است. به این معنا که قیود پیوندی در مورد این دو بار درست عمل کرده‌اند.

۳-۱-۳-۴ مقایسه اثر دو سناریوی قیمت‌گذاری بر روی بهره‌برداری از منابع انرژی

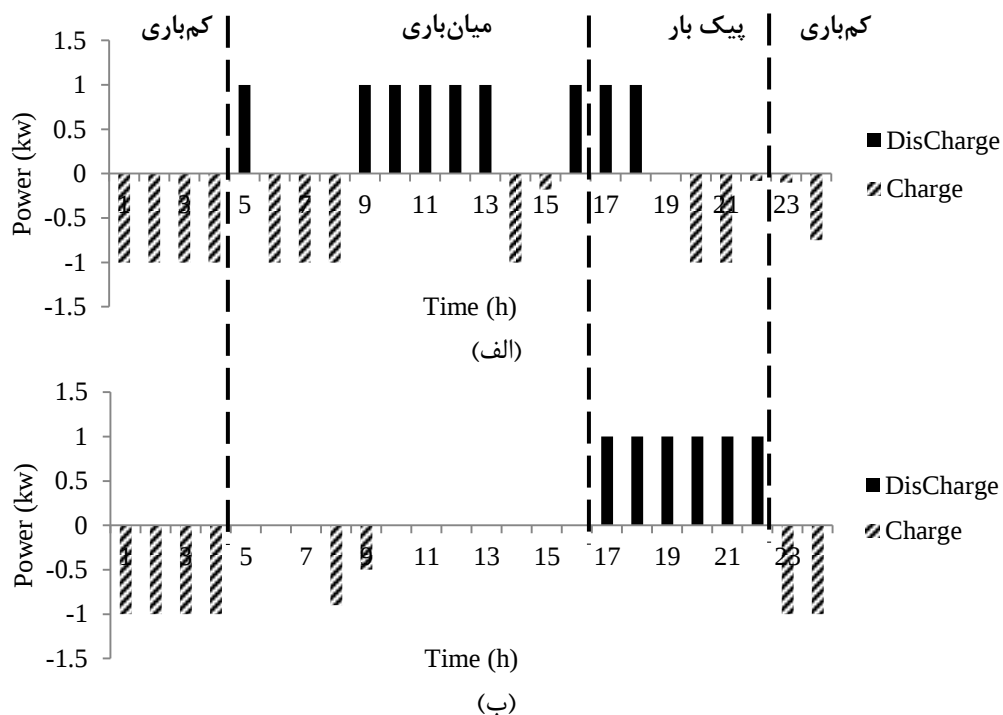
در این قسمت هرکدام از منابع انرژی بصورت جداگانه در دو حالت قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی با سناریوی اول و سناریوی دوم نمایش داده می‌شوند.



شکل (۴-۱۸) خرید/فروش توان الکتریکی از شبکه برق با مدل قطعی و قیمت‌گذاری (الف) سناریو ۱، (ب) سناریو ۲

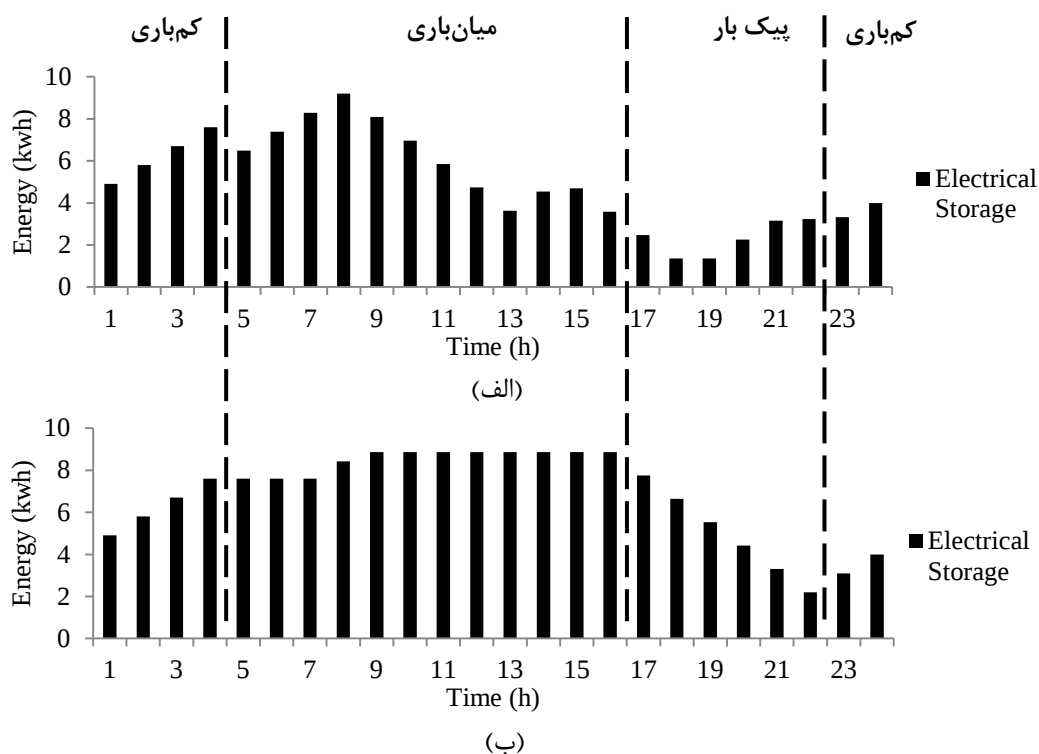
در شکل (۴-۱۸) (الف) با توجه به ارزان بودن قیمت خرید انرژی نسبت به فروش آن حتی در گران‌ترین ساعات در سناریو اول، سیستم مدیریت انرژی مشکلی از بابت خرید انرژی حتی در ساعات پیک بار ندارد، هرچند خرید کمتری در این ساعات انجام داده است. از سوی دیگر با توجه به برابر بودن قیمت خرید و فروش انرژی الکتریکی در سناریو دوم در ساعات مختلف، در شکل (۴-۱۸) (ب) سیستم مدیریت انرژی سعی در خرید بیشتر در ساعات غیر پیک و فروش بیشتر در ساعات پیک داشته است. مجموع خرید و فروش انرژی الکتریکی در ساعات پیک در سناریو اول به ترتیب ۱۰ kwh

و $1/34 \text{ kwh}$ ، و در سناریو دوم به ترتیب $2/3 \text{ kwh}$ و $1/5 \text{ kwh}$ است. بنابراین سیستم مدیریت انرژی با قیمت گذاری سناریوی دوم، ۷۷٪ کمتر نسبت به سناریو اول، انرژی الکتریکی از شبکه برق خریده و ۱۲٪ بیشتر انرژی الکتریکی به شبکه فروخته است. بنابراین، قیمت گذاری انرژی الکتریکی به روش سناریوی دوم، می تواند مزیت بیشتری برای شرکت های برق، مخصوصاً در ساعات پیک داشته باشد.



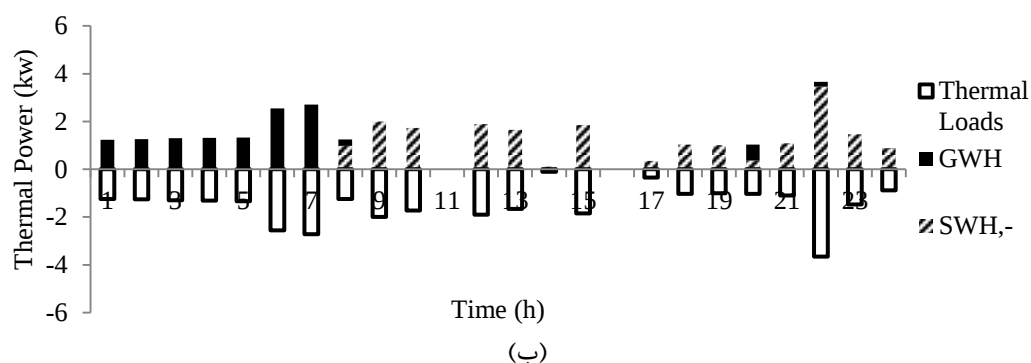
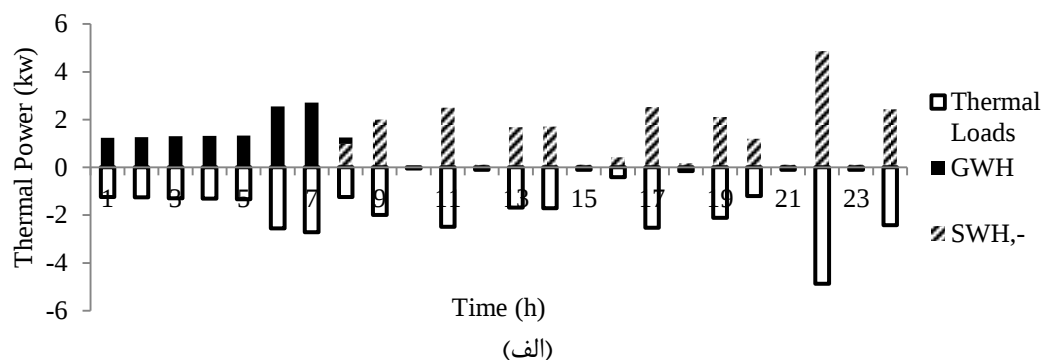
شکل (۴-۱۹) شارژ / دشارژ واحد ذخیره ساز الکتریکی با مدل قطعی و قیمت گذاری (الف) سناریو ۱ ، (ب) سناریو ۲

در شکل (۴-۱۹) (ب) مشاهده می شود که سیاست سیستم مدیریت انرژی در سناریوی دوم، شارژ بیشتر در ساعات غیر پیک و مخصوصاً کم باری، برای استفاده و دشارژ در ساعات پیک بار می باشد. سیستم مدیریت انرژی در سناریو اول یعنی شکل (۴-۱۹) (الف) نیز سعی در شارژ واحد ذخیره ساز در ساعات کم باری و دشارژ در سایر ساعات داشته است. بر همین اساس، سیستم مدیریت انرژی در ساعات پیک و در قیمت گذاری با سناریوی دوم حدود ۶۶٪ بیشتر از سناریو اول اقدام به دشارژ واحد ذخیره ساز کرده در حالیکه در قیمت گذاری سناریو دوم و در ساعات پیک اصلاً اقدام به شارژ واحد ذخیره ساز نکرده است. همچنین سیستم مدیریت انرژی در ساعات کم باری و در سناریوی دوم حدود ۵۷٪ بیشتر از سناریو اول اقدام به شارژ واحد ذخیره ساز کرده است.



شکل (۴-۲۰) انرژی ذخیره شده در واحد ذخیره‌ساز با مدل قطعی و در دو قیمت‌گذاری الف (سناریو ۱، ب) سناریو ۲

طبق توضیحات قسمت قبل، سیاست سیستم مدیریت انرژی در افزایش سطح انرژی واحد ذخیره‌ساز در ساعات کم‌باری و استفاده در ساعات پیک در سناریو دوم در شکل (۴-۲۰) (ب) به وضوح دیده می‌شود. سیستم مدیریت انرژی در سناریو اول در شکل (۴-۲۰) (الف) نیز، اقدام به افزایش سطح انرژی واحد ذخیره‌ساز در ساعات کم‌باری و ارزان قیمت کرده است. وضعیت سطح انرژی واحد ذخیره‌ساز در ساعات میان‌باری و در سناریو دوم تقریباً ثابت بوده و سیاست سیستم مدیریت انرژی، بیشتر حفظ انرژی ذخیره شده برای استفاده در ساعات پیک بوده است.



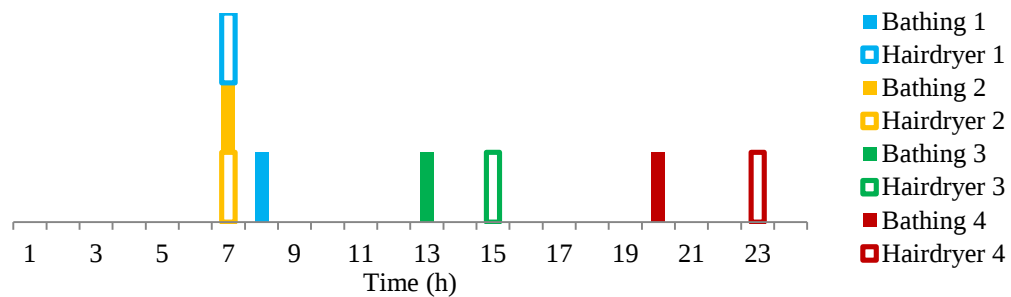
شکل (۴-۲۱) وضعیت بهره‌برداری از منابع حرارتی با مدل قطعی و در دو قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲

طبق نتایج شکل (۴-۲۱)، تغییر برنامه‌ریزی بارهای حرارتی و بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی، بر اثر تغییر سناریوی قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی کاملاً مشهود است. بنابراین، تغییر در سناریوهای قیمت‌گذاری، باعث تغییر در بهره‌برداری از منابع و بارهای حرارتی نیز خواهد شد. دلیل این امر، وجود یکپارچگی بین بارها و منابع انرژی الکتریکی و حرارتی که قبلاً بیشتر توضیح داده شده است، می‌باشد. مجموع انرژی حرارتی دریافت شده از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی و آبگرمکن گازی در سناریو اول به ترتیب ۲۳ kwh و ۱۱/۹۷ kwh، و در سناریو دوم به ترتیب ۱۹/۸۶kwh و ۱۲/۸۴ kwh است. بر همین اساس، سیستم مدیریت انرژی برای پاسخگویی به بارهای حرارتی در سناریو دوم، ۱۳/۶٪ کمتر از سناریو اول از انرژی حرارتی آب مخزن متصل به آبگرمکن خورشیدی استفاده و حدود ۶/۷٪ بیشتر از آبگرمکن گازی استفاده کرده است.

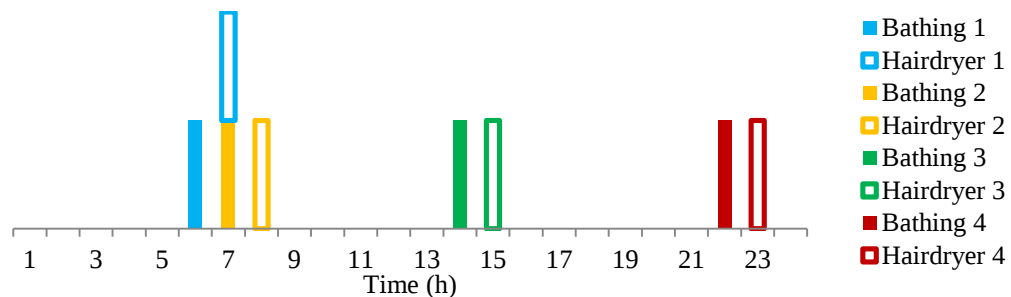
۴-۳-۱-۴ اثر قیود پیوندی بر روی برنامه‌ریزی بارهای همبسته

در این بخش برنامه‌ریزی بارهای همبسته در مدل قطعی و با دو حالت با قیود پیوندی و بدون

این قیود بررسی می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل (۴-۲۲) برنامه‌ریزی بارهای همبسته در مدل قطعی (الف) بدون قیود پیوندی ، (ب) با قیود پیوندی

با توجه به نمودارهای شکل (۴-۲۲)(الف)، بهم ریختگی بهره‌برداری از بارهای الکتریکی و حرارتی که همبسته هستند در حالت بدون استفاده از قیود پیوندی مشاهده می‌شود. این رویه، سبب کاهش سطح رفاه کاربر از بهره‌برداری از این دسته از بارها خواهد شد. طبق نمودار (۴-۲۲)(ب) هرکدام از بارهای الکتریکی (سشوار) بعد از بار حرارتی (استحمام) همبسته خود، طبق تعریف انجام شده، مورد استفاده قرار می‌گیرند، تا رفاه کاربر در این مورد نیز حفظ شود. اهمیت در نظر گرفتن قیود پیوندی و مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در این بخش نیز مشهود است.

۴-۳-۱-۵ اثر قیود پیوندی بر روی هزینه‌ها

در این بخش، هزینه الکتریکی، حرارتی و کل برای کاربر در کل روز، در مدل قطعی و با دو حالت با در نظر گرفتن قیود پیوندی و بدون آن مقایسه می‌شوند. بر همین اساس جدول (۴-۴) این مقایسه را نشان می‌دهد.

جدول (۴-۴) اثر قیود پیوندی بر روی هزینه‌های الکتریکی، حرارتی و کل

قیمت‌گذاری		بدون قیود پیوندی	با قیود پیوندی
سناریو اول	هزینه انرژی الکتریکی (ریال)	۱,۷۸۳	۸,۸۶۹
	هزینه انرژی حرارتی (ریال)	۲,۳۶۱	۲,۳۶۱
	هزینه کل (ریال)	۴,۱۴۴	۱۱,۲۳۰
سناریو دوم	هزینه انرژی الکتریکی (ریال)	۶۲,۵۴۳	۶۵,۸۴۰
	هزینه انرژی حرارتی (ریال)	۲,۳۶۱	۲,۵۳۲
	هزینه کل (ریال)	۶۴,۹۰۴	۶۸,۳۷۳

بر اساس جدول (۴-۴)، در نظر گرفتن قیود پیوندی در سناریوهای اول و دوم قیمت‌گذاری به ترتیب، باعث افزایش ۸۰ و ۵ درصدی هزینه انرژی الکتریکی، و افزایش ۶۳ و ۵ درصدی هزینه کل شده است. هزینه انرژی حرارتی در حالت با قیود پیوندی، فقط در سناریو دوم قیمت‌گذاری حدود ۶/۷٪ افزایش داشته است، درحالی‌که در سناریو اول قیمت‌گذاری، ثابت مانده است. دلیل این ثابت ماندن هزینه حرارتی را می‌توان ثابت بودن قیمت گاز در تمام بازه‌های زمانی دانست. به بیان دیگر، بر اساس شکل (۴-۲۱)، گرچه تغییر در قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی باعث تغییر در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع و بارهای حرارتی می‌شود، اما بدلیل ثابت بود قیمت گاز در ساعات مختلف، این تغییرات، باعث تغییر قبل توجه در هزینه انرژی حرارتی نخواهند شد. بنابراین، گرچه وجود قیود پیوندی برای حفظ رفاه کاربر ضروری است، اما باعث افزایش هزینه تمام شده‌ی کاربر می‌شوند. همچنین هزینه تمام شده برای کاربر در سناریو دوم نسبت به سناریو اول حدود ۸۳/۶٪ افزایش داشته است.

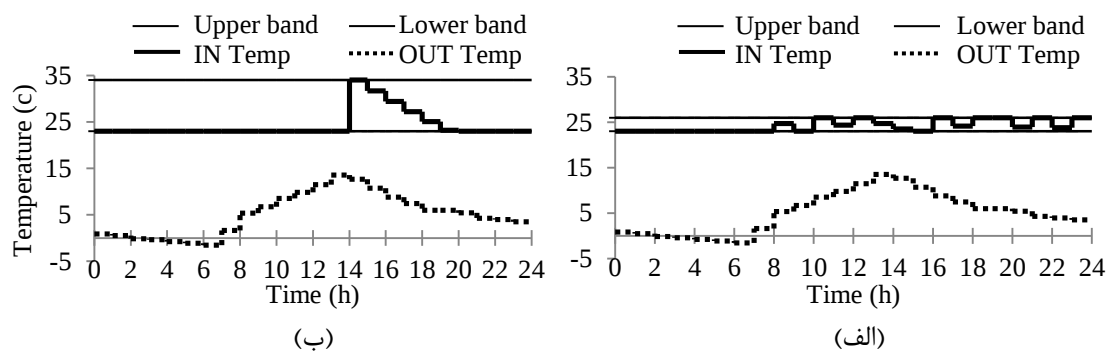
۲-۳-۴ بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه

مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه که معادل با پذیرش کمترین میزان ریسک است، یعنی مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده میزان مقاومت به تغییرات عدم قطعیت، در حداکثر مقدار خود تنظیم شوند. بر همین اساس و در این بخش، پارامترهای کنترل مقاومت در مدل بهینه‌سازی مقاوم به شرح زیر تنظیم می‌شوند:

$$\Gamma^{PV} = \Gamma^{SWH} = 1$$

$$\Gamma_{\tau}^{\theta 1} = \Gamma_{\tau}^{\theta 2} = \tau \quad \forall \tau > t$$

۱-۲-۳-۴ مقایسه وضعیت دمای داخلی با مدل بهینه‌سازی قطعی

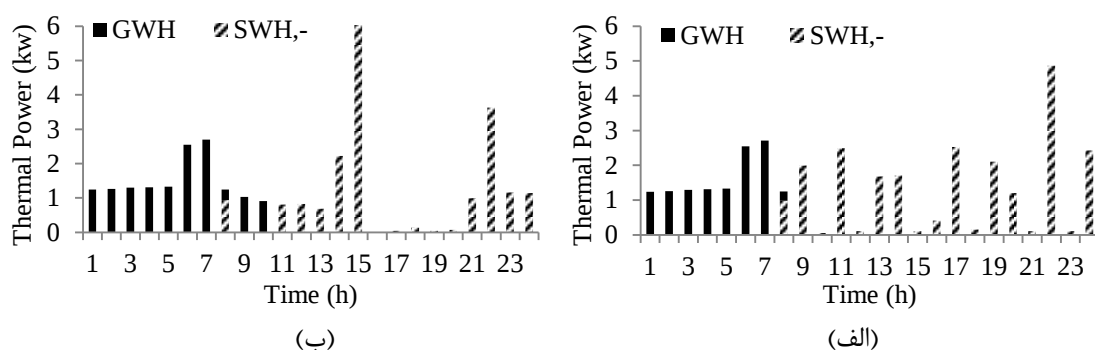


شکل (۴-۲۳) دمای داخلی در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه

طبق نتایج شکل (۴-۲۳)، به منظور بهینه‌سازی مصرف انرژی با استراتژی محافظه‌کارانه که به معنای پذیرش کمترین ریسک در عدم قطعیت مربوطه می‌باشد، کاربر باید محدوده‌ی دمای مورد انتظار خود را حدوداً ۷۲٪ افزایش دهد، که در غیر این‌صورت بهینه‌سازی مقاوم امکان‌پذیر نخواهد بود. به معنای دیگر، کاهش ریسک‌پذیری در بهینه‌سازی مصرف انرژی با کاهش سطح رفاه همراه خواهد بود. محدوده‌ی دمایی در مدل قطعی ۲۳ الی ۲۶ درجه سانتی‌گراد است، که در مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه به محدوده‌ی دمایی ۲۳ الی ۳۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است.

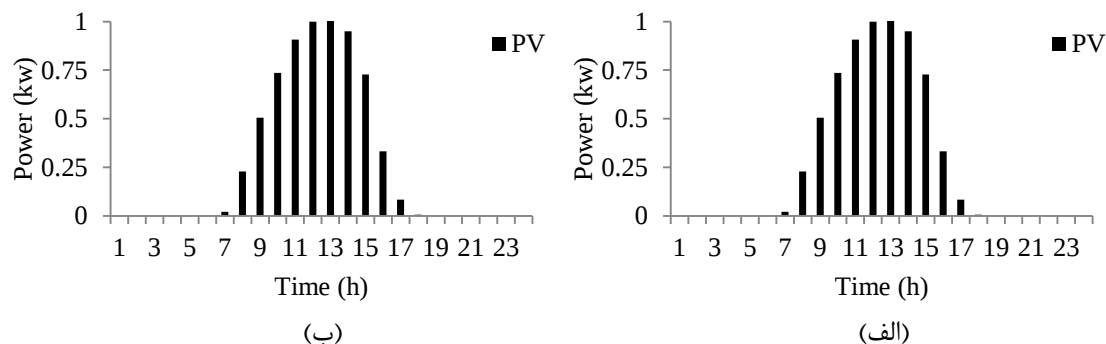
۲-۳-۴ مقایسه وضعیت بهره‌برداری از منابع انرژی با مدل بهینه‌سازی قطعی

در شکل (۴-۲۴)، تغییرات در بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی، در این دو حالت دیده می‌شود. مجموع انرژی خارج شده از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی و مجموع انرژی تولیدی آبگرمکن گازی به ترتیب در مدل قطعی ۲۳ kwh و ۱۱/۹۷ kwh و در مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه ۱۹/۵۳ kwh و ۱۳/۹۳ kwh است.



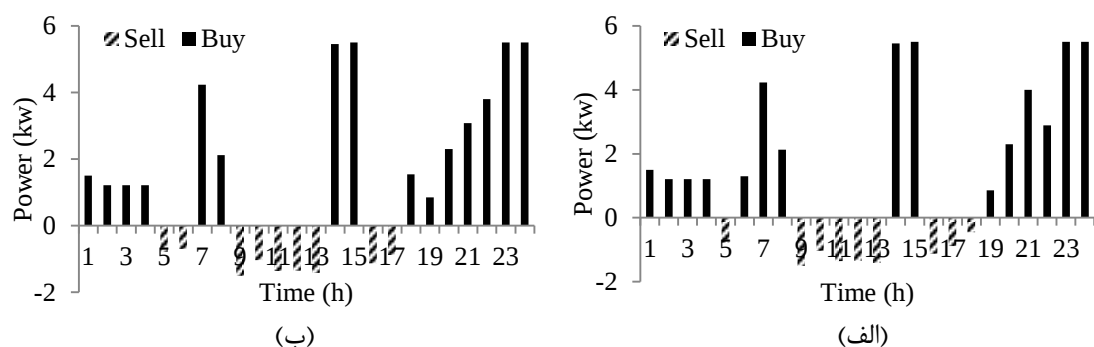
شکل (۴-۲۴) منابع انرژی حرارتی در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه

بر همین اساس، در مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه نسبت به مدل مقاوم، بهره‌برداری از آبگرمکن گازی حدود ۱۴٪ افزایش و بهره‌برداری از انرژی حرارتی مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی حدود ۱۷/۸٪ کاهش داشته است. دلیل این امر را می‌توان پیش‌بینی شرایط سخت‌تر در استراتژی محافظه‌کارانه دانست. بنابراین، اتخاذ استراتژی محافظه‌کارانه بر روی بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی اثر می‌گذارد، و باعث کاهش مقدار جذب انرژی حرارتی از مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی و افزایش مصرف انرژی آبگرمکن گازی، در برابر مدل قطعی می‌شود.



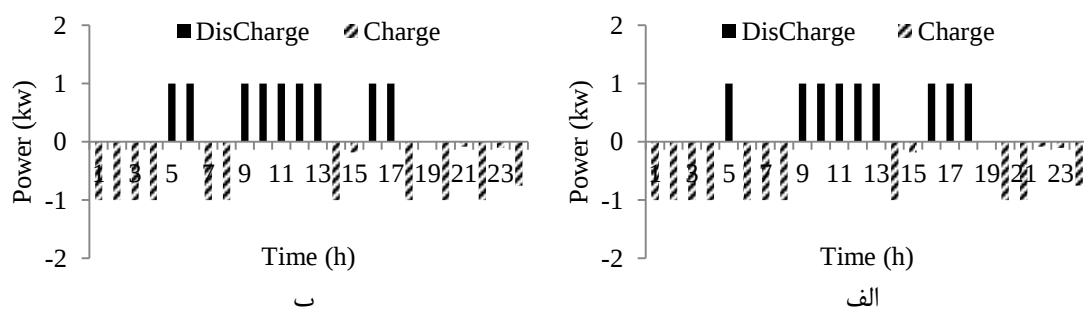
شکل (۴-۲۵) توان تولیدی فتوولتائیک در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه

بر خلاف شکل قبلی، در شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود که بین دو مدل بهینه‌سازی مقاوم و مدل قطعی، در بهره‌برداری از انرژی الکتریکی تولیدی توسط واحد فتوولتاییک، تفاوتی وجود ندارد. دلیل این امر، بهینه‌سازی بصورت زمان حقیقی است. در واقع در این روش چون در هر ساعت برنامه‌ریزی، اطلاعات واقعی از منابع در اختیار سیستم مدیریت انرژی قرار می‌گیرد و از طرفی استفاده حداکثری از انرژی رایگان خورشیدی صرفه اقتصادی نیز دارد (یعنی قابلیت فروش به شبکه دارد)، سیستم مدیریت انرژی اقدام به جذب تمام انرژی تولید شده می‌کند.



شکل (۴-۲۶) خرید/فروش برق از/به شبکه در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه

در شکل (۴-۲۶) مجموع خرید و فروش انرژی الکتریکی به ترتیب در مدل قطعی، $44/76 \text{ kwh}$ و $9/93 \text{ kwh}$ و در مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه 45 kwh و $10/17 \text{ kwh}$ است. بنابراین سیستم مدیریت انرژی در مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه نسبت به مدل قطعی حدود $5/0\%$ بیشتر انرژی الکتریکی از شبکه خریداری کرده و حدود $3/2\%$ بیشتر انرژی الکتریکی به شبکه فروخته است، که این اعداد نشان‌دهنده تغییرات کم در خرید و فروش انرژی الکتریکی در دو مدل است.



شکل (۴-۲۷) شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه

در شکل (۴-۲۷) بازه‌های زمانی شارژ و دشارژ واحد ذخیره‌ساز تغییر یافته است. دلیل این امر، تغییر در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از منابع و بارها در دو مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه و مدل قطعی است. اما مجموع انرژی شارژ و دشارژ در کل روز و در هر دو مدل بهینه‌سازی به ترتیب ۱۱.۱۱ و ۹ کیلووات‌ساعت است. دلیل این امر نیز وجود قیود (۳-۱۱) است که بر اساس آن، باید سطح انرژی ذخیره‌ساز در ابتدای روز با انتهای روز برابر باشد.

۴-۳-۳ بررسی عملکرد مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه

مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه یعنی مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده میزان مقاومت به تغییرات عدم‌قطعیت، در مقداری متوسط نسبت به کمترین و بیشترین مقدار خود تنظیم شوند. بر همین اساس و در این بخش، پارامترهای کنترل مقاومت در مدل بهینه‌سازی مقاوم به شرح زیر تنظیم می‌شوند:

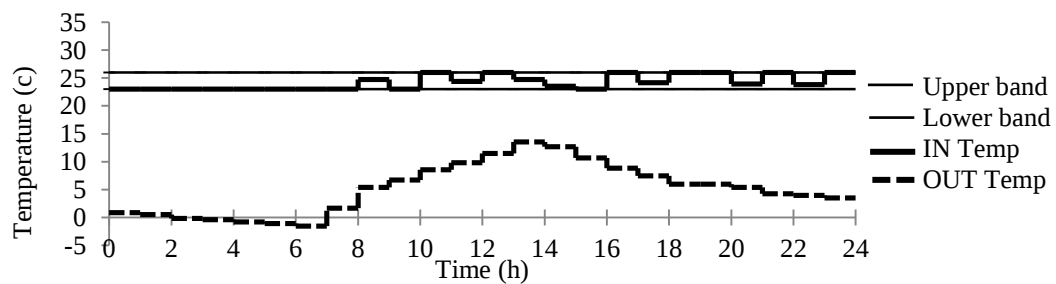
$$\Gamma^{PV} = \Gamma^{SWH} = 0.4$$

$$\Gamma_{\tau}^{\theta 1} = \Gamma_{\tau}^{\theta 2} = 0.4 \times \tau \quad \forall \tau > t$$

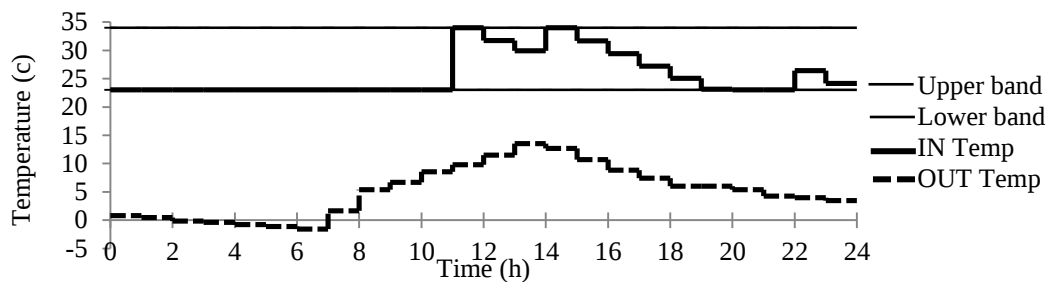
با توجه به اینکه مقادیر پارامترهای کنترل‌کننده مقدار مقاومت در این بخش در بیشترین مقدار خود تنظیم نشده‌اند، برای درک بهتر از میزان اثرگذاری آن‌ها، ابتدا پارامترهای کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت دمای بیرونی را در بیشترین مقدار و پارامترهای کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت تابش را در ۰/۴ مقدار حداکثر تنظیم، برنامه را اجرا و نتایج را ثبت کرده و مجدد بصورت برعکس برنامه اجرا و نتایج ثبت شدند. بنابراین در هرکدام از دو بخش زیر، سه نمودار به نمایش گذاشته می‌شوند. نمودار اول مربوط به مدل بهینه‌سازی قطعی، نمودار دوم مربوط به مدل بهینه‌سازی مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده عدم‌قطعیت تابش خورشیدی برابر ۰/۴ مقدار حداکثر و نمودار سوم مربوط به مدل بهینه‌سازی مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده عدم‌قطعیت دمای بیرونی برابر ۰/۴ مقدار حداکثر هستند.

۱-۳-۳-۴ مقایسه وضعیت دمای داخلی با مدل بهینه‌سازی قطعی

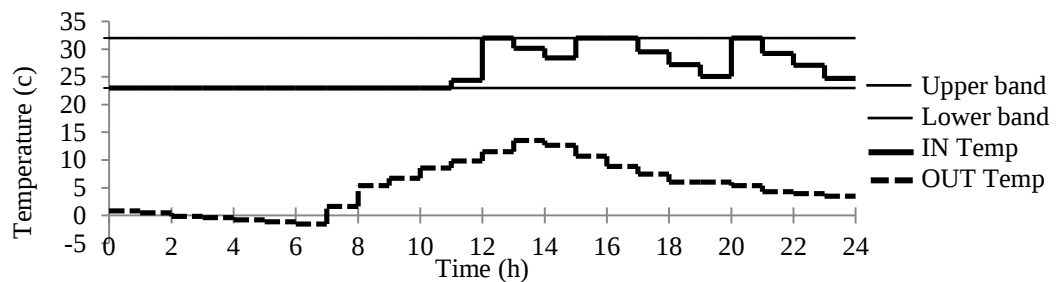
در شکل (۲۹-۴) از مقایسه نمودار (الف) و (ب) مشاهده می‌شود که کاهش پارامتر کنترل-کننده مربوط به عدم قطعیت تابش خورشیدی، بر روی محدوده‌ی دمایی مورد انتظار کاربر بی‌اثر است. اما با توجه به شکل‌های (۲۹-۴)(الف) و (ج)، کاربر در مدل مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه باید محدوده‌ی دمایی مورد انتظار خود را نسبت به مدل قطعی حدود ۶۶٪ افزایش دهد تا بهینه‌سازی مصرف انرژی امکان‌پذیر باشد.



الف



ب



ج

شکل (۲۸-۴) دمای داخلی در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار

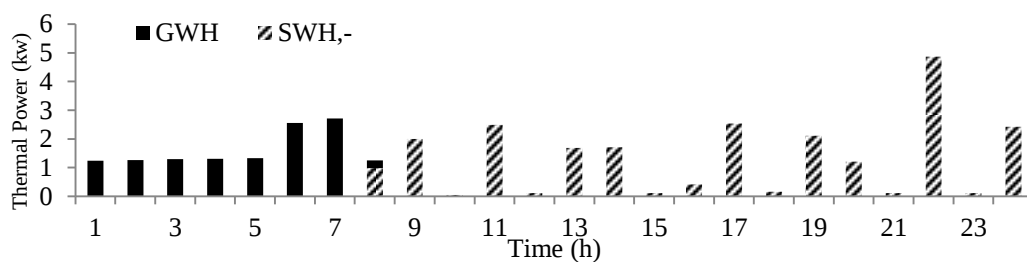
حداکثر، (ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ مقدار حداکثر

محدوده دمایی رفاهی در شکل (۲۸-۴)، در مدل قطعی ۲۳ الی ۲۶ درجه سانتی‌گراد است که در مدل بهینه‌سازی مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه به محدوده‌ی دمایی ۲۳ الی ۳۲ درجه

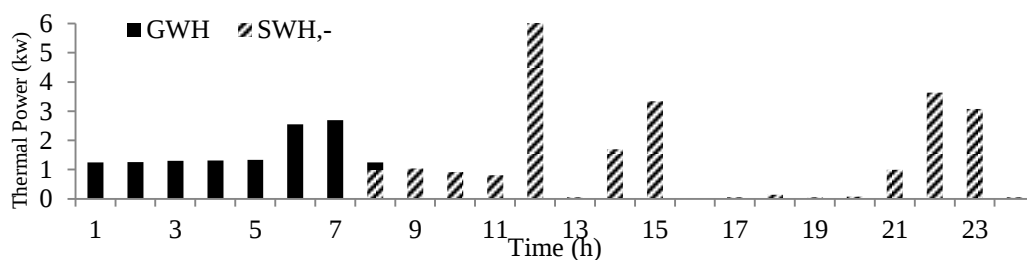
سانتی‌گراد افزایش یافته است. با توجه به نتایج شکل‌های (ب) و (ج) (۴-۲۸)، کاهش پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم قطعیت دمای بیرونی، محدوده دمایی مجاز در مدل مقاوم را به محدوده دمایی مورد انتظار کاربر نزدیک می‌کند. کاربر در مدل مقاوم با استراتژی محافظه‌کارانه باید محدوده دمایی مورد انتظار خود را حداقل ۷۷٪ افزایش دهد، حال آنکه در مدل مقاوم با استراتژی نسبتاً محافظه‌کارانه این رقم به حدود ۶۶٪، یعنی ۱۱٪ درصد کاهش، می‌رسد.

۴-۳-۲ مقایسه وضعیت بهره‌برداری از منابع انرژی با مدل بهینه‌سازی قطعی

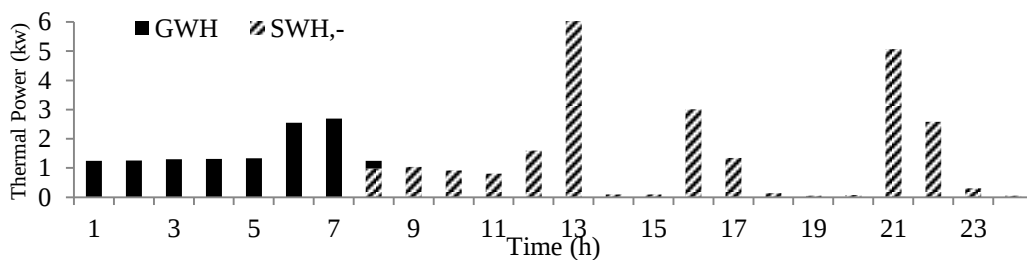
در شکل (۴-۲۹) با مقایسه نمودارها، تغییر در بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی در ساعات ۹ الی ۲۴ در سه مدل ارائه شده، مشهود است. همچنین بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی در ساعات اولیه روز، در هر سه نمودار تقریباً مشابه است.



(الف)



(ب)



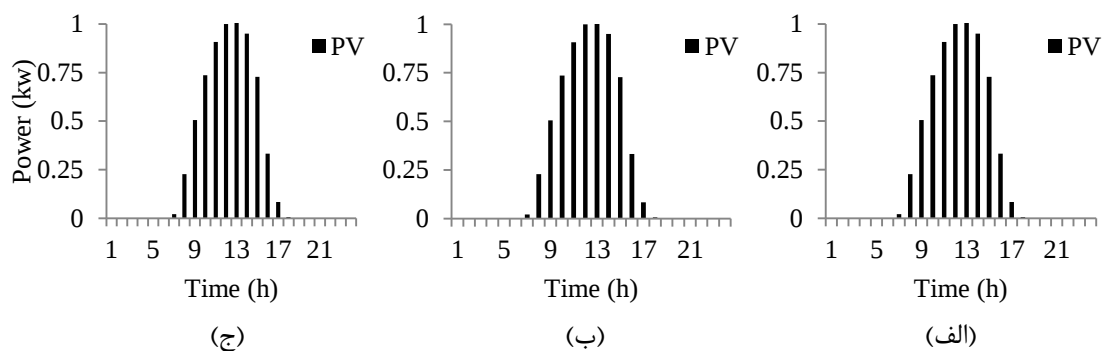
(ج)

شکل (۴-۲۹) منابع حرارتی در الف) مدل قطعی، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ مقدار حداکثر

جدول (۵-۴) مجموع انرژی منابع حرارتی در کل روز در شکل (۴-۳۰)

	(ج)	(ب)	(الف)
SWH,- (kwh)	۲۴.۷۵	۲۳.۸۴	۲۳
GWH (kwh)	۱۱.۹۵	۱۱.۹۴	۱۱.۹۷

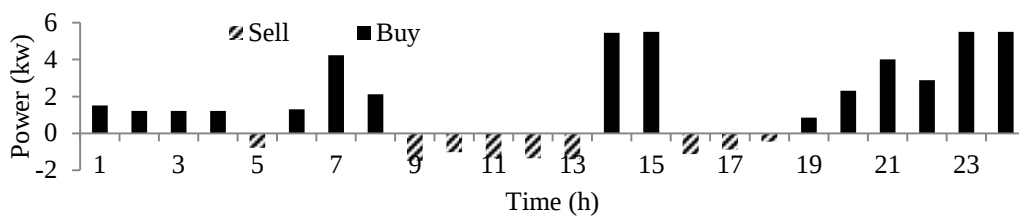
بر اساس جدول (۵-۴)، بهره‌برداری از آبگرمکن گازی در هر سه مدل تقریباً برابر است. اما بهره‌برداری از انرژی حرارتی مخزن آب متصل به آبگرمکن خورشیدی، در مدل مقاوم (ب) نسبت به مدل قطعی حدود ۳/۶٪ افزایش و در مدل مقاوم (ج) نسبت به مدل قطعی حدود ۷/۵٪ افزایش داشته است. با مقایسه نتایج شکل‌های (۴-۲۴) و (۴-۲۹)، کاهش پارامترهای کنترل‌کننده مربوط به عدم قطعیت‌های موجود، بهره‌برداری از منابع حرارتی را کمتر و به مدل قطعی نزدیک می‌کند.



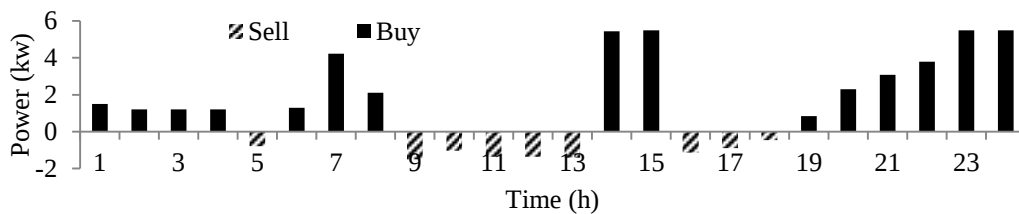
شکل (۴-۳۰) توان تولیدی فتوولتاییک در (الف) مدل قطعی، (ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر، (ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی ۰/۴ حداکثر مقدار

مشابه توضیحات شکل (۴-۲۵)، تغییر در پارامتر کنترل‌کننده مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم، باعث تغییر در بهره‌برداری از توان تولیدی پنل فتوولتاییک در شکل (۴-۳۰) نخواهد شد.

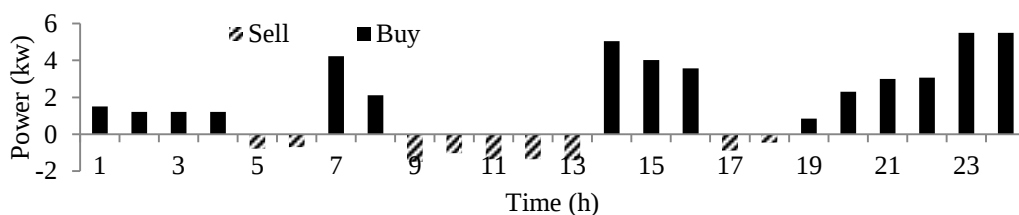
بر اساس نتایج شکل‌های (۴-۳۱) و (۴-۳۲)، بهره‌برداری از منابع انرژی الکتریکی شبکه برق و واحد ذخیره‌ساز در دو مدل مقاوم تقریباً مشابه مدل قطعی است. تفاوت جزئی در بهره‌برداری از این منابع انرژی الکتریکی در دو مدل (الف) و (ب) در شکل‌های (۴-۳۱) و (۴-۳۲)، فقط در ساعات پایانی روز مشاهده می‌شود. همچنین تفاوت در بهره‌برداری از این منابع انرژی، در دو مدل (الف) و (ج) بیشتر است.



(الف)

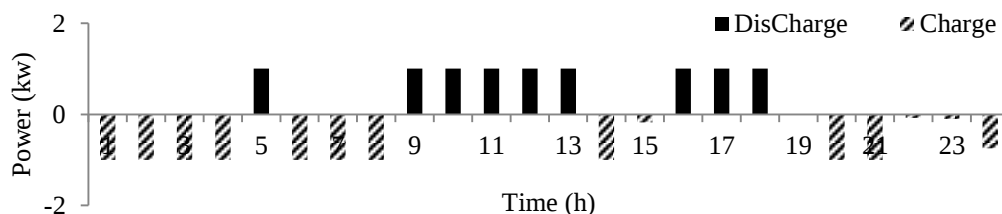


(ب)

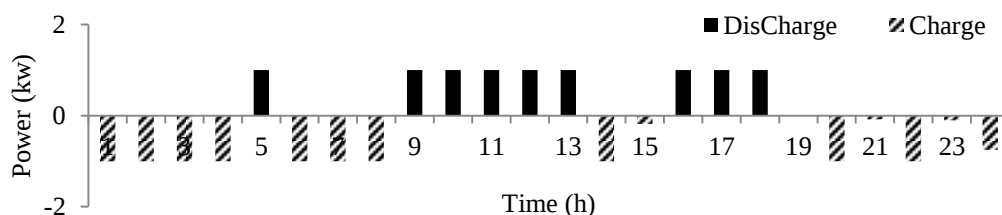


(ج)

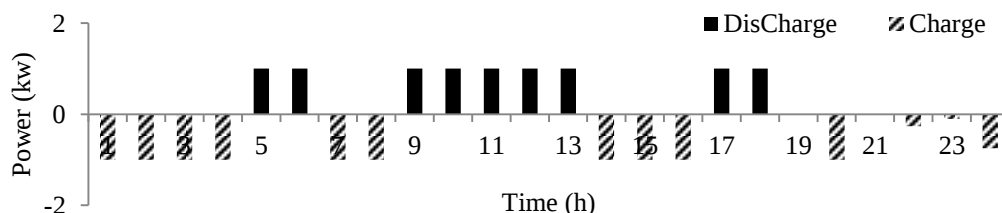
شکل (۴-۳۱) خرید/فروش برق از/به شبکه در الف) مدل قطعی ، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل کننده تابش خورشیدی ۰/۴ مقدار حداکثر ، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل کننده دمای بیرونی ۰/۴ حداکثر مقدار



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴-۳۲) شارژ / دشارژ واحد ذخیره ساز در الف) مدل قطعی ، ب) مدل مقاوم با پارامتر کنترل کننده تابش خورشیدی ۰/۴ ، ج) مدل مقاوم با پارامتر کنترل کننده دمای بیرونی ۰/۴ حداکثر مقدار

جدول (۴-۶) مجموع انرژی منابع الکتریکی در کل روز در شکل‌های (۴-۳۲) و (۴-۳۳)

	(الف)	(ب)	(ج)
Buy (kwh)	۴۴.۷۶	۴۴.۷۶	۴۴.۳۳
Sell (kwh)	۹.۹۳	۹.۹۳	۹.۵
Charge (kwh)	۱۱.۱۱	۱۱.۱۱	۱۱.۱۱
DisCharge (kwh)	۹	۹	۹

با توجه به جدول (۴-۶)، مجموع انرژی الکتریکی فروخته شده به شبکه برق و مجموع انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه برق در مدل (الف) با مدل (ب) برابر است. در مدل (ج) در برابر دو مدل دیگر (الف) و (ب)، سیستم مدیریت انرژی حدود ۱٪ کمتر انرژی الکتریکی از شبکه خریداری کرده و حدود ۴/۳٪ بیشتر انرژی به شبکه برق فروخته است. همچنین در جدول (۴-۶)، مشاهده می‌شود که مجموع انرژی شارژ و دشارژ در هر سه مدل برابر است. دلیل این امر وجود قیود (۳-۱۱) در مدل‌های بهینه‌سازی قطعی و مقاوم است. بنابراین، تفاوت نمودارها در شکل (۴-۳۲) فقط در بازه‌های زمانی شارژ و دشارژ می‌باشد، و مجموع انرژی شارژ و دشارژ در کل روز و در هر سه مدل برابر است.

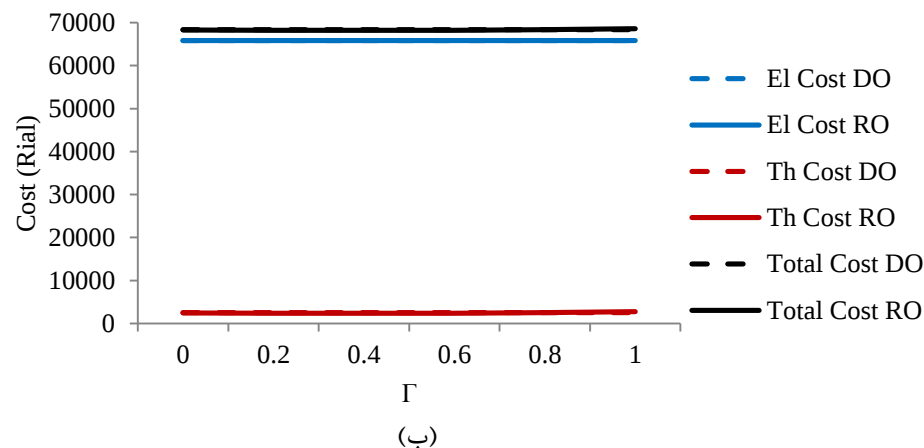
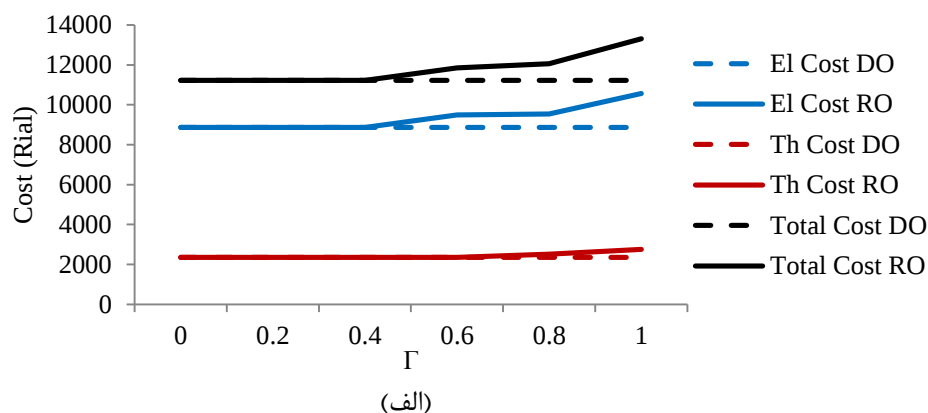
با توجه به اینکه در بخش ۴-۳-۳، پارامترهای کنترل‌کننده عدم‌قطعیت کوچکتر هستند، مشاهده گردید که نتایج مدل بهینه‌سازی مقاوم به نتایج مدل قطعی تقریباً نزدیک است. اما در هر صورت اثر پیش‌بینی شرایط نسبتاً محافظه‌کارانه در این نمودارها مشاهده می‌گردد.

۴-۳-۴ بررسی اثر تغییرات استراتژی‌های محافظه‌کارانه بر روی هزینه‌ها

اثر تغییرات استراتژی‌های محافظه‌کارانه بر روی هزینه تمام شده برای کاربر در این بخش مقایسه و بررسی می‌شود. برای این منظور ابتدا پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت دمای بیرونی ثابت و برابر بیشترین مقدار، و پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت تابش خورشیدی از کمترین مقدار به بیشترین مقدار، با پله‌های ۰/۲ افزایش داده و تغییرات مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج بخش ۴-۳-۲، با توجه به بیشینه بودن پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت دمای بیرونی،

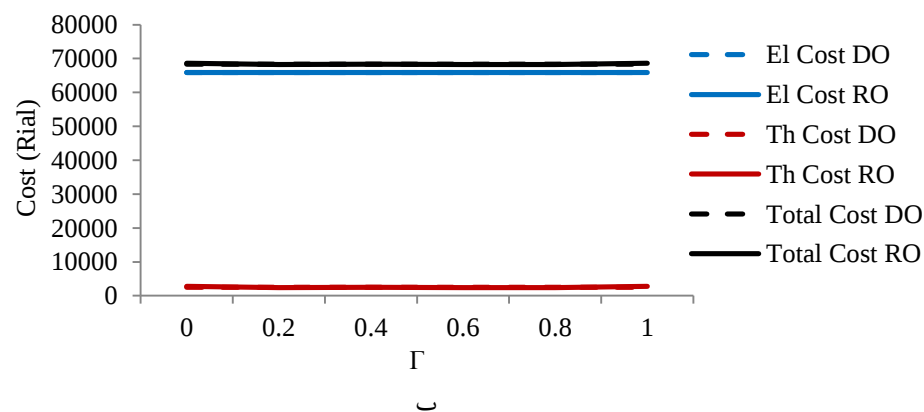
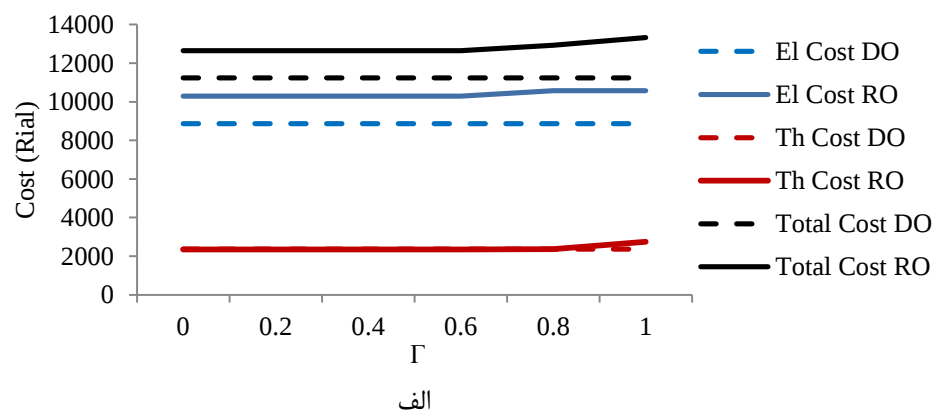
محدوده‌ی دمای رفاهی کاربر در این شرایط باید بر روی بازه ۲۳ الی ۳۴ درجه سانتی‌گراد تنظیم شود. نتایج این قسمت در شکل (۴-۳۳) نشان داده شده است.

در ادامه، همین عملیات با ثابت نگه داشتن پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم قطعیت تابش خورشیدی و برابر با بیشترین مقدار خود، و تغییر پارامتر کنترل‌کننده مربوط به دمای بیرونی صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج بخش ۴-۳-۳-۱ مشخص گردید که با کاهش پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم قطعیت دمای بیرونی، می‌توان محدوده‌ی دمای رفاهی کاربر را به محدوده‌ی مورد انتظارش نزدیک کرد. اما در این بخش، به منظور درک بهتر از نحوه اثرگذاری تغییر پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم قطعیت دمای بیرونی بر روی هزینه‌ها، محدوده‌ی دمای رفاهی کاربر ثابت و برابر بیشترین مقدار مجاز در نظر گرفته می‌شود. نتایج این قسمت نیز در شکل (۴-۳۴) نشان داده شده است. در هرکدام از موارد گفته شده، تغییرات در دو سناریوی قیمت‌گذاری نمایش داده می‌شوند.



شکل (۴-۳۳) اثر تغییر پارامتر کنترل‌کننده تابش خورشیدی بر هزینه‌ها با قیمت‌گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲

با مشاهده نتایج شکل (۴-۳۳) الف)، افزایش پارامتر کنترل کننده مربوط به عدم قطعیت تابش خورشیدی، باعث افزایش هزینه انرژی الکتریکی، حرارتی و هزینه کل می شود، که البته در این مورد، تغییرات هزینه انرژی حرارتی جزئی و کم است. در شکل (۴-۳۳) الف) افزایش هزینه انرژی الکتریکی و هزینه کل ناشی از افزایش پارامتر کنترل کننده مربوط به عدم قطعیت تابش، در برابر هزینه انرژی الکتریکی و هزینه کل در مدل بهینه سازی قطعی، از مقدار $\Gamma=0.4$ شروع شده است و در $\Gamma=1$ به حداکثر خود رسیده است. همچنین در این شکل، افزایش هزینه انرژی حرارتی ناشی از افزایش پارامتر کنترل کننده مربوط به عدم قطعیت تابش، در برابر هزینه انرژی حرارتی در مدل بهینه سازی قطعی، از مقدار $\Gamma=0.6$ شروع شده است. همچنین با توجه به نمودار (۴-۳۳) ب)، افزایش پارامتر کنترل کننده مربوط به عدم قطعیت تابش خورشیدی، با سناریو قیمت گذاری دوم، بر روی هزینه های الکتریکی، حرارتی و کل تقریباً بی اثر است، و تمام هزینه ها در مدل بهینه سازی مقاوم با هزینه ها در مدل قطعی تقریباً برابر شده اند.



شکل (۴-۳۴) اثر تغییر پارامتر کنترل کننده دمای بیرونی بر هزینه ها با قیمت گذاری الف) سناریو ۱، ب) سناریو ۲

بر اساس شکل (۴-۳۴) الف)، تغییر پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت دمای بیرونی، باعث افزایش هزینه الکتریکی، حرارتی و هزینه کل شده است. در شکل (۴-۳۴) الف) هزینه‌های الکتریکی و کل در مدل بهینه‌سازی مقاوم، در برابر مدل قطعی از مقدار $\Gamma=0$ دارای اختلاف مقدار هستند که این اختلاف مقدار از $\Gamma=0.6$ به بعد بیشتر می‌شود. دلیل این امر، بیشینه بودن پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت تابش خورشیدی است، که در شکل (۴-۳۳) الف) این اختلاف هزینه در $\Gamma=1$ مشاهده می‌شود. همچنین در این شکل، افزایش هزینه انرژی حرارتی ناشی از افزایش پارامتر کنترل‌کننده مربوط به عدم‌قطعیت دمای بیرونی، در برابر هزینه انرژی حرارتی در مدل بهینه‌سازی قطعی، از مقدار $\Gamma=0.8$ شروع شده است. در این شکل، به ازای $\Gamma<0.8$ هزینه انرژی حرارتی در دو مدل برابر است.

مشابه شکل (۴-۳۳) ب)، در مورد شکل (۴-۳۴) ب) نیز شاهد این هستیم که با انتخاب سناریو قیمت‌گذاری دوم، تغییر در پارامتر کنترل‌کننده دمای بیرونی نیز، اثر قابل توجهی بر روی هزینه‌ها نخواهد گذاشت و حتی هزینه‌ها در هر دو مدل برابر شده‌اند.

نتایج این بخش بطور خلاصه شامل موارد زیر است:

۱) با افزایش پارامترهای کنترل‌کننده مقاومت مدل مقاوم به عدم‌قطعیت‌های تابش خورشیدی و دمای بیرونی، هزینه‌های الکتریکی، حرارتی و کل افزایش می‌یابد. هرچند افزایش در هزینه حرارتی جزئی و کم است.

۲) اثر تغییر پارامتر کنترل‌کننده مقاومت مدل مقاوم به عدم‌قطعیت‌های تابش خورشیدی بر روی هزینه‌ها بیشتر از اثر تغییر پارامتر کنترل‌کننده مقاومت مدل مقاوم به عدم‌قطعیت-های دمای بیرونی است.

۳) تغییرات پارامتر کنترل‌کننده مقاومت در مدل بهینه‌سازی مقاوم، بر روی هزینه‌های انرژی، با انتخاب سناریوی قیمت‌گذاری دوم بی‌اثر می‌شود. در این مورد حتی هزینه‌های مدل قطعی و مدل بهینه‌سازی مقاوم یکسان می‌شوند.

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱ مقدمه

در این پایان‌نامه سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی به منظور مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در یک خانه هوشمند و با در نظر گرفتن رفاه ساکنین معرفی شد. در فصل دوم به مباحث مطرح در حوزه مدیریت انرژی خانگی در مراجع مختلف پرداخته شد. ابتدا با معرفی انواع دسته‌بندی بارها و نحوه در نظر گرفتن رفاه در مراجع مختلف، نحوه مدیریت انرژی و برنامه‌ریزی بهره‌برداری از لوازم خانگی در خانه هوشمند بیان و در انتها سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی معرفی گردید.

در فصل سوم، ابتدا به تشریح مساله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی در خانه هوشمند پرداخته شد. در این فصل بعد از معرفی اجزاء مختلف خانه هوشمند مورد نظر شامل منابع انرژی، بارهای خانگی و دسته‌بندی آن‌ها، نحوه عملکرد سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی بیان و الگوریتم مربوطه نیز معرفی گردید. در انتها نیز مدل‌سازی ریاضی مسأله مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی شامل مدل بهینه‌سازی قطعی و مدل بهینه‌سازی مقاوم ارائه شد.

در فصل چهارم، بعد از معرفی داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی در بخش‌های مختلف همچون داده‌های اولیه، پیش‌بینی دمای بیرونی و تابش خورشیدی، قیمت انرژی، اطلاعات منابع و بارها، نتایج حاصل از شبیه‌سازی بصورت کامل در بخش‌های مختلف ارائه و مورد بحث قرار گرفت.

۵-۲ نتیجه‌گیری

نتایج اصلی حاصل از این پایان‌نامه، به صورت خلاصه شامل موارد زیر است:

(۱) بارهای خانگی مختلفی وجود دارند که استفاده از آن‌ها دارای همبستگی می‌باشد، و باید توسط قیود پیوندی بررسی شوند. از این رو باید منابع انرژی و بارهای الکتریکی و حرارتی بصورت یکپارچه مدیریت شوند. هرچند این مدیریت یکپارچه باعث افزایش هزینه کل

کاربر نسبت به مدیریت انرژی بدون در نظر گرفتن یکپارچگی خواهد شد، اما رفاه کاربر از استفاده از این دسته از بارهای خانگی در درجه بهتری حفظ خواهد شد.

۲) افزایش مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم نسبت به عدم قطعیت دمای بیرونی، باعث افزایش بازه دمای رفاه کاربر می‌شود. به بیان دیگر کاربر باید محدوده‌ی دمایی بیشتری را انتخاب کند، اگر ریسک کمتری را می‌پذیرد. حداکثر این افزایش بازه دمایی در مدل بهینه‌سازی با استراتژی محافظه‌کارانه و برابر ۷۷٪ است.

۳) افزایش سطح مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم به عدم قطعیت تابش خورشیدی و دمای بیرونی، باعث افزایش هزینه‌های انرژی الکتریکی، حرارتی و کل خواهد شد.

۴) تغییر در میزان مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم به عدم قطعیت دمای بیرونی، بر روی بهره‌برداری از منابع انرژی الکتریکی بجز واحد فتوولتاییک، می‌تواند اثرگذار باشد، هرچند تغییر در میزان مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم نسبت به عدم قطعیت تابش خورشیدی، اثر کمتری می‌تواند داشته باشد.

۵) تغییر سناریوی قیمت‌گذاری انرژی الکتریکی هم بر روی بهره‌برداری از منابع انرژی الکتریکی و هم بر روی بهره‌برداری از منابع انرژی حرارتی، بدلیل در نظر گرفتن یکپارچگی میان مدیریت این منابع، اثر می‌گذارد. این تغییر بر روی پاسخگویی بار به قیمت انرژی، که نتیجه‌ی آن مدیریت نقاط پیک بار است نیز اثر می‌گذارد.

۶) انتخاب سناریوی قیمت‌گذاری دوم، می‌تواند اثر تغییر هزینه‌های انرژی را در مدل بهینه‌سازی مقاوم از بین ببرد. در این مورد حتی هزینه‌های مدل قطعی و مدل بهینه‌سازی مقاوم یکسان می‌شوند.

۳-۵ پیشنهادها

بر اساس مباحث مطرح شده در این پایان نامه، چند پیشنهاد جهت ادامه مطالعه و پژوهش به شرح زیر ارائه می گردد:

(۱) از آنجایی که این پژوهش برای یک واحد مسکونی انجام شده است، اجرای آن برای چندین واحد مسکونی بدلیل امکان وجود شباهت میان برنامه های بهینه سازی شده، ممکن است باعث بوجود آمدن مشکلاتی از قبیل پیک بار ناخواسته شود. همچنین از طرفی امروزه ساخت و ساز ساختمان ها به سمت چند واحدی و یا برج پیش می رود که در آن ها منابع انرژی مشترکی نیز وجود دارد. بر همین اساس یکی از پیشنهادات، توسعه سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی به منظور مدیریت انرژی یک مجتمع مسکونی، که یک بهره بردار مرکزی مسئولیت مدیریت انرژی را بر عهده دارد، است.

(۲) در این پژوهش فرض شد، اطلاعات بارهای ثابت از طریق کاربر به اطلاع سیستم مدیریت انرژی می رسد. ایجاد یک امکان برای این سیستم به منظور یادگیری الگوی مصرف کاربر در این دسته از بارها، باعث بهبود سطح اتوماسیون سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی خواهد شد.

(۳) استفاده از سایر منابع انرژی همچون، توربین بادی و تولید همزمان برق و حرارت بخصوص برای مدیریت انرژی یک مجتمع مسکونی.

(۴) بررسی اثرگذاری سیستم مدیریت انرژی خانگی بر روی ترانس های محلی و یا به صورت کلی، پارامترهای مهم شبکه توزیع.

(۵) بررسی اثر انواع قیمت گذاری های انرژی بر روی کنترل نقاط پیک شبکه توزیع در نقطه نزدیک به مصرف خانگی.

۶) با توجه به اینکه در سیستم مدیریت انرژی خانگی، قیود مرتبط با بارهای خانگی و رفاه ساکنین مطرح است، می‌توان با پژوهش پیرامون قیود دیگری در حوزه‌های مختلف دیگر، سیستم مدیریت یکپارچه انرژی الکتریکی و حرارتی را برای اهداف دیگری غیر از مسکونی، مانند تجاری، صنعتی، تفریحی و غیره توسعه داد.

پیوست‌ها

پیوست ۱: تئوری بهینه‌سازی مقاوم [۲۵]

مدل بهینه‌سازی قطعی در فصل ۳ را می‌توان بصورت کلی به شکل مساله خطی زیر نوشت:

$$\min_{x_j, \forall j} \sum_{j=1}^n \{c_j\} x_j \quad (پ-۱)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n \{a_{ij}\} \cdot x_j \leq b_i \quad i = 1, \dots, m \quad (پ-۲)$$

$$\sum_{j=1}^n d_{kj} \cdot x_j = e_k \quad k = 1, \dots, p \quad (پ-۳)$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j \quad j = 1, \dots, n \quad (پ-۴)$$

به منظور سادگی، فرض می‌کنیم عدم قطعیت فقط بر روی ضرایب c_j و a_{ij} که در بین علامت $\{\}$ قرار گرفته اند، اثر می‌گذارد. بنابراین، هیچ قید تساوی در معادلات بالا دارای عدم قطعیت نخواهد بود. توجه شود که در فصل ۳ قیود (۳-۳۰) و (۳-۳۳) که از نوع قیود تساوی هستند و دارای عدم قطعیت نیز می‌باشند، در بخش توضیحات مدل بهینه‌سازی مقاوم در همان فصل، ابتدا تبدیل به قیود نامساوی شده و سپس تئوری بهینه‌سازی مقاوم روی آن‌ها اعمال شده است. چنانچه ضریب b_i در قیود (پ-۲) نیز دارای عدم قطعیت باشد، این امکان وجود دارد که متغیر جدیدی مثل x_{n+1} تعریف شود و سپس قیود (پ-۲) را بصورت زیر نوشت و بر اساس آن مدل بهینه‌سازی مقاوم را پیاده‌سازی کرد:

$$\sum_{j=1}^n \{a_{ij}\} \cdot x_j - \{b_i\} \cdot x_{n+1} \leq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad (پ-۵)$$

$$1 \leq x_{n+1} \leq 1 \quad (پ-۶)$$

در تابع هدف مدل بهینه‌سازی قطعی در فصل سوم هیچ ضریب عدم‌قطعی وجود ندارد، اما در قیود نامساوی (۴-۳) و (۱۶-۳)، و نیز قیود (۳۱-۳) و (۳۴-۳) به ترتیب ضرایب P_t^{SR} و θ_t^{OUT} دارای عدم‌قطعی هستند (مشابه ضریب b_i).

هرکدام از ضرایب c_j و a_{ij} در تابع هدف و قیود نامساوی، از مقدار نامی خود در بازه‌های $[c_j - \hat{c}_j, c_j + \hat{c}_j]$ و $[a_{ij} - \hat{a}_{ij}, a_{ij} + \hat{a}_{ij}]$ که $\hat{c}_j \geq 0$ و $\hat{a}_{ij} \geq 0$ می‌توانند انحراف پیدا کنند. مجموعه‌های J_0 و $J_i, \forall i$ را به ترتیب بعنوان مجموعه‌های شامل همه‌ی ضرایب $\{c_j\}$ با $\hat{c}_j > 0$ ، و $\{a_{ij}\}$ با $\hat{a}_{ij} > 0, \forall i$ ، تعریف می‌کنیم.

اکنون با استفاده از تئوری مقاوم مطرح شده در مرجع [۲۵]، مدل بهینه‌سازی مقاوم مساله فوق را می‌نویسیم:

$$\min_{x_j, \forall j} \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j + \max_{\{S_0 \cup \{t_0\} \mid S_0 \subseteq J_0, |\Gamma_0| = |S_0|, t_0 \in J_0 \setminus S_0\}} \left\{ \sum_{j \in S_0} \hat{c}_j \cdot |x_j| + (\Gamma_0 - |\Gamma_0|) \cdot \hat{c}_{t_0} \cdot |x_{t_0}| \right\} \quad (۷-پ)$$

Subject to:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j + \max_{\{S_i \cup \{t_i\} \mid S_i \subseteq J_i, |\Gamma_i| = |S_i|, t_i \in J_i \setminus S_i\}} \left\{ \sum_{j \in S_i} \hat{a}_{ij} \cdot |x_j| + (\Gamma_i - |\Gamma_i|) \cdot \hat{a}_{it_i} \cdot |x_{t_i}| \right\} \leq b_i \quad \forall i \quad (۸-پ)$$

$$\sum_{j=1}^n d_{kj} \cdot x_j = e_k \quad \forall k \quad (۹-پ)$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j \quad \forall j \quad (۱۰-پ)$$

پارامترهای $\Gamma_0 \geq 0$ و $\Gamma_i \geq 0, \forall i$ به منظور کنترل میزان مقاومت مدل بهینه‌سازی مقاوم در برابر یک زیر مجموعه از داده‌های دارای عدم‌قطعی در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر این پارامترها به

ترتیب از بازه‌های $[0, |\Gamma_0|]$ و $[0, |\Gamma_i|], \forall i$ می‌تواند انتخاب شود. پارامتر Γ_0 میزان محافظه کاری را با توجه به زیر مجموعه ضرایب نامعین در تابع هدف کنترل می‌کند. به این ترتیب، پاسخ بهینه، بدترین حالت عملکرد تابع هدف را کمینه می‌کند، به این معنی که تعداد $|\Gamma_0|$ از ضرایب دارای عدم قطعیت در تابع هدف می‌تواند در فواصل در نظر گرفته شده تغییرات داشته باشند، و یک ضریب $\{c_j\}$ با مقدار $\hat{c}_j \cdot (\Gamma_0 - |\Gamma_0|)$ می‌تواند تغییر کند.

پارامتر Γ_i نیز سطح محافظت قید i ام را در برابر عدم قطعیت اعمال شده توسط یک زیر مجموعه از ضرایب دارای عدم قطعیت آن تنظیم می‌کند. بر همین اساس، هر قید i ام در برابر تمام انحرافات احتمالی که در آن‌ها ضرایب، می‌توانند تا تعداد Γ_i ضریب دارای عدم قطعیت و در فواصل مورد نظر متفاوت باشند، محافظت می‌شود، پس ضریب دارای عدم قطعیت $\{a_{ij}\}$ با مقدار $\hat{a}_{ij} \cdot (\Gamma_i - |\Gamma_i|)$ می‌تواند تغییر کند.

وجود عملگر قدر مطلق یعنی $|x_j|$ در مدل بهینه‌سازی مقاوم بالا، باعث غیر خطی شدن مدل می‌شود. برای خطی‌سازی، هرکدام از این عملگرهای قدر مطلق یعنی $|x_j|$ ، با متغیر کمکی y_j جایگزین و دو قید $-y_j \leq x_j \leq y_j$ و $y_j \geq 0$ نیز به قیود مدل بهینه‌سازی مقاوم اضافه می‌شوند. پس با استفاده از نظریه دوگانگی قوی، مدل استاندارد و غیر خطی بالا (معادلات (پ-۷) الی (پ-۱۰)) را می‌توان به مساله خطی زیر تبدیل کرد [۲۵]:

$$\min_{\Phi \cup \Phi^R} \sum_{j=1}^n c_j \cdot x_j + \Gamma_0 \cdot v_0 + \sum_{j \in J_0} \eta_{0j} \quad (\text{پ-۱۱})$$

$$\text{Subject to:} \quad (\text{پ-۱۲})$$

$$v_0 + \eta_{0j} \geq \hat{c}_j \cdot y_j \quad \forall j \in J_0 \quad (\text{پ-۱۳})$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j + \Gamma_i \cdot v_i + \sum_{j \in J_i} \eta_{ij} \leq b_i \quad \forall i \quad (\text{پ-۱۴})$$

$$v_i + \eta_{ij} \geq \hat{a}_{ij} \cdot y_j \quad \forall i, j \in J_i \quad (پ-۱۵)$$

$$-y_j \leq x_j \leq y_j \quad \forall j \quad (پ-۱۶)$$

$$v_0 \geq 0 \quad (پ-۱۷)$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \quad (پ-۱۸)$$

$$\eta_{0j} \geq 0 \quad \forall j \in J_0 \quad (پ-۱۹)$$

$$\eta_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in J_i \quad (پ-۲۰)$$

$$y_j \geq 0 \quad \forall j \quad (پ-۲۱)$$

$$\sum_{j=1}^n d_{kj} \cdot x_j = e_k \quad \forall k \quad (پ-۲۲)$$

$$\underline{x}_j \leq x_j \leq \bar{x}_j \quad \forall j \quad (پ-۲۳)$$

که در تابع هدف (پ-۱۱):

$$\Phi = \{x_j, \forall j\}$$

$$\Phi^R = \{v_0; y_j, \forall j \in J_0; v_i, \eta_{ij}, \forall i, j \in J_i\}$$

متغیرهای دوگان v_0 و η_{0j} مربوط به ضرایب دارای عدم قطعیت در تابع هدف (پ-۱) بوده، و

متغیرهای دوگان v_i و η_{ij} نیز مربوط به ضرایب دارای عدم قطعیت در قیود (پ-۲) هستند.

مراجع

- [1] J. Byun, I. Hong, and S. Park, "Intelligent Cloud Home Energy Management System Using Household Appliance Priority Based Scheduling Based on Prediction of Renewable Energy Capability," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 58, no. 4, pp. 1194–1201, Nov 2012.
- [2] H. Jo, S. Kim, and S. Joo, "Smart Heating and Air Conditioning Scheduling Method Incorporating Customer Convenience for Home Energy Management System," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 59, no. 2, pp. 316–322, May 2013.
- [3] S. Lee, B. Kwon, and S. Lee, "Joint Energy Management System of Electric Supply and Demand in Houses and Buildings," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2804–2812, Nov 2014.
- [4] H. T. Nguyen, D. T. Nguyen, and L. B. Le, "Energy Management for Households With Solar Assisted Thermal Load Considering Renewable Energy and Price Uncertainty," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 301–314, Jan 2015.
- [5] P. Du and N. Lu, "Appliance Commitment for House Hold Load Load Scheduling," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 2, pp. 411–419, June 2011.
- [6] C. Wang, Y. Zhou, B. Jiao, Y. Wang, W. Liu, and D. Wang, "Robust Optimization for Load Scheduling of a Smart Home With Photovoltaic System," *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 247–257, Sep 2015.
- [7] J. Abushnaf, A. Rassau, and W. Górnisiewicz, "Impact of Dynamic Energy Pricing Schemes on a Novel Multi-User Home Energy Management System," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 125, pp. 124–132, Aug 2015.
- [8] S. Althaher, P. Mancarella, and J. Mutale, "Automated Demand Response From Home Energy Management System Under Dynamic Pricing and Power and Comfort Constraints," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1874–1883, July 2015.
- [9] D. Zhang, S. Li, M. Sun, and Z. O'Neill, "An Optimal and Learning-Based Demand Response and Home Energy Management System," *IEEE Trans. Smart*

Grid, vol. 7, no. 4, pp. 1790–1801, July 2016.

- [10] Q. Hu and F. Li, “Hardware Design of Smart Home Energy Management System With Dynamic Price Response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1878–1887, Dec 2013.
- [11] Y. Ozturk, D. Senthilkumar, S. Kumar, and G. Lee, “An Intelligent Home Energy Management System to Improve Demand Response,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 694–701, Jun 2013.
- [12] F. Melhem, O. Grunder, Z. Hammoudan, and N. Moubayed, “Energy Management in Electrical Smart Grid Environment Using Robust Optimization Algorithm,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 3, pp. 2714–2726, May 2018.
- [13] M. Nizami and J. Hossain, “Optimal Scheduling of Electrical Appliances and DER units for Home Energy Management System,” *2017 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2017*, Nov 2017.
- [14] K. Tsui and S. Chan, “Demand Response Optimization for Smart Home Scheduling Under Real-Time Pricing,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1812–1821, Dec 2012.
- [15] Z. Zhao, W. Lee, Y. Shin, and K. Song, “An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1391–1400, Sep 2013.
- [16] C. Wang, Y. Zhou, J. Wu, J. Wang, Y. Zhang, and D. Wang, “Robust-Index Method for Household Load Scheduling Considering Uncertainties of Customer Behavior,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1806–1818, July 2015.
- [17] Y. Huang, L. Wang, W. Guo, Q. Kang, and Q. Wu, “Chance Constrained Optimization in a Home Energy Management System,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 252–260, Sep 2018.
- [18] V. Pilloni, A. Floris, A. Meloni, and L. Atzori, “Smart Home Energy Management Including Renewable Sources: A QoE-Driven Approach,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2006–2018, May 2018.

- [19] J. Han, C. Choi, and I. Lee, "More Efficient Home Energy Management System Based on ZigBee Communication and Infrared Remote Controls," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 57, no. 1, pp. 85–89, Feb 2011.
- [20] J. Han, C. Choi, W. Park, I. Lee, and S. Kim, "Smart Home Energy Management System including Renewable Energy Based on Zigbee and PLC," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 60, no. 2, pp. 198–202, May 2014.
- [21] Y. Iwafune, T. Ikegami, J. Fonseca, T. Oozeki, and K. Ogimoto, "Cooperative Home Energy Management Using Batteries for A Photovoltaic System Considering The Diversity of Households," *Energy Convers. Manag.*, vol. 96, pp. 322–329, May 2015.
- [22] Q. Wei, D. Liu, G. Shi, and Y. Liu, "Multi-Battery Optimal Coordination Control for Home Energy Management Systems Via Distributed Iterative Adaptive Dynamic Programming," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 7, pp. 4203–4214, July 2015.
- [23] A. Tascikaraoglu, A. Boynuegri, and M. Uzunoglu, "A Demand Side Management Strategy Based on Forecasting of Residential Renewable Sources: A Smart Home System in Turkey," *Energy Build.*, vol. 80, pp. 309–320, Sep 2014.
- [24] M. Rahimiyan, L. Baringo, and A. Conejo, "Energy Management of a Cluster of Interconnected Price-Responsive Demands," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 645–655, Mar 2014.
- [25] D. Bertsimas and M. Sim, "The Price of Robustness," *Oper. Res.*, vol. 52, no. 1, pp. 35–53, Jan-Feb 2004.
- [26] "<http://bitlab.shahroodut.ac.ir/Lab/ViewLab/6070>."
- [27] G. Ramírez-Sagner, C. Mata-Torres, A. Pino, and R. Escobar, "Economic Feasibility of Residential and Commercial PV Technology: The Chilean Case," *Renew. Energy*, vol. 111, pp. 332–343, Mar 2017.
- [28] ASHRAE, "ASHRAE Handbook, HVAC Applications Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (SI)," 2015.

Abstract

This thesis implements home energy management system to achieve the integrated management of electrical and thermal energy in a smart home, taking into account the residents welfare. Energy resources are electricity and natural gas networks, a solar water heater, a photovoltaic unit, and a storage unit. Electrical and thermal loads are categorized in three types: i) time-flexible loads, ii) power-flexible loads and iii) fixed loads. In order to overcome the uncertainties in the production of solar sources and the external temperature of the home, two different uncertainty models are used: i) single-scenario forecast, and ii) prediction intervals. Thus, the energy management problem is transformed into deterministic and robust optimization models. Using the real-world data of solar irradiance and external temperature collected from smart power microgrid at Shahrood University of Technology, two optimization models are implemented and compared. Based on the simulation results, choosing a conservative strategy through the robust optimization model compared to the deterministic model can guarantee the decision feasibility, but at the expense of reducing the level of residents welfare. Additionally, considering linking constraints among loads and sources, on one hand, rises the residents welfare, but on the other hand, increases energy costs.

Key words: Integrated electrical and thermal energy management system, Residents welfare, Deterministic optimization, Robust optimization.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

MSc Thesis in Electrical Power Systems Engineering

**Integrated Electrical and Thermal
Energy Management in Smart Home**

By: Mohammad Hadi Araghiyan

Supervisor:
Dr. Morteza Rahimiyan

Advisor:
Dr. Mohammad Zamen

September 2019