

# مدل سازی و بهینه سازی انرژی ساختمان های هوشمند

مرتضی کلی وندی  
مسعود کیشانی فراهانی  
سعید صفائیان

پروژه مدل سازی

خرداد ۱۴۰۰



## خلاصه:

انرژی یکی از مهمترین نیازهای انسان است و بسیاری از کشورها با مشکلات زیادی در تأمین منابع انرژی روبرو هستند. برخی از روش‌های ارائه این منابع باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند. با توجه به مصرف بالای انرژی در ساختمان‌ها، تلفات بالای انرژی و همچنین انتشار CO<sub>2</sub> در تولید انرژی به صورت متمرکز، ارائه یک سیستم ترکیبی غیر متمرکز با در نظر گرفتن بهینه‌سازی استفاده از انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد نیاز است. این مطالعه به طور یکپارچه از تولید انرژی‌های تجدیدپذیر، ذخیره انرژی و هوشمندسازی ساختمان برای کاهش مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> استفاده می‌کند. با استفاده از MILP، ما یک مدل ریاضی برای بررسی شرایط اقتصادی علاوه بر کاهش در مصرف انرژی و انتشار CO<sub>2</sub> ارائه دادیم و آن را با نرم افزار GAMS حل کردیم.

## ۱- مقدمه:

کشورها در سراسر جهان به دلیل تغییرات آب و هوایی، افزایش جمعیت و نبود الگوی مصرف مناسب با کمبود انرژی روبرو هستند (۱). در حال حاضر، ساختمان‌ها حدود ۴۰٪ از انرژی در جهان را مصرف می‌کنند و این نشان از اهمیت قابل توجه بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها دارد (۲). استفاده از سوخت‌های فسیلی از یک سو منجر به کاهش منابع غیر تجدیدپذیر و از سوی دیگر، آلودگی محیط زیست. بر اساس آماری که مرکز آمار ایران ارائه داده است، از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، سالانه ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلیون تن CO<sub>2</sub> با توجه به کل مصرف انرژی این کشور تولید می‌شود. بنابراین، مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی به منظور حفظ منابع انرژی، کاهش اثرات انتشار گازهای گلخانه‌ای و کاهش هزینه‌های اقتصادی ضروری است. بر اساس تحقیقات مرکز آمار ایران، این کشور ۴۱٫۳۷٪ از کل مصرف انرژی خود و همچنین ۵۰٪ از توان الکتریکی‌اش را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ به بخش‌های خانگی، تجاری و عمومی اختصاص داده است (۳). در حاضر پژوهش‌هایی در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی ساختمان با استفاده از یک نوع فن آوری یا ترکیبی از فن آوری‌ها و روش‌های مختلف انجام شده است. استفاده از ریز شبکه‌ها (Micro grids) برای تولید انرژی در مکانی که مصرف کننده نهایی قرار دارد، با هدف جلوگیری از هزینه‌های انتقال انرژی از راه دور می‌تواند منافع اقتصادی و زیست محیطی ایجاد کند. ساختمان با انرژی صفر (The zero - energy building)، مفهوم دیگری است که برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان مورد استفاده قرار گرفته است که طی چند سال گذشته توجه بسیاری را به خود جلب کرده و اکنون به عنوان هدف آینده در طراحی ساختمان در نظر گرفته شده است (۴). تولید و ذخیره انرژی به عنوان یکی از مهمترین مسائل رفاهی بشر در طول زندگی روزمره مطرح شده است و همین سبب افزایش تقاضای انرژی می‌شود، برای

همین بشر نیازمند به هوشمند سازی شبکه و استفاده از انرژی های تجدید پذیر دارد (۵). خانه هوشمند یک مفهوم قابل استفاده در زمینه شبکه هوشمند است که نقش مهمی در برنامه ریزی مدل های کنترل خانه هوشمند دارد. خانه های هوشمند به عنوان ساختمانهایی مجهز به تجهیزات هوشمندی هستند که با استفاده از کانالهای ارتباطی مثل اینترنت اشیا (IOT) با یکدیگر هماهنگ می شوند تا مجموعه ای از اهداف مفید را برای کاربران نهایی انجام دهند. به طور کلی، خانه هوشمند خانه ای است که شامل مجموعه ای از سیستم های به هم پیوسته است که امکان کنترل و نظارت بر بخشهای مختلف را در هر زمان فراهم می کند.

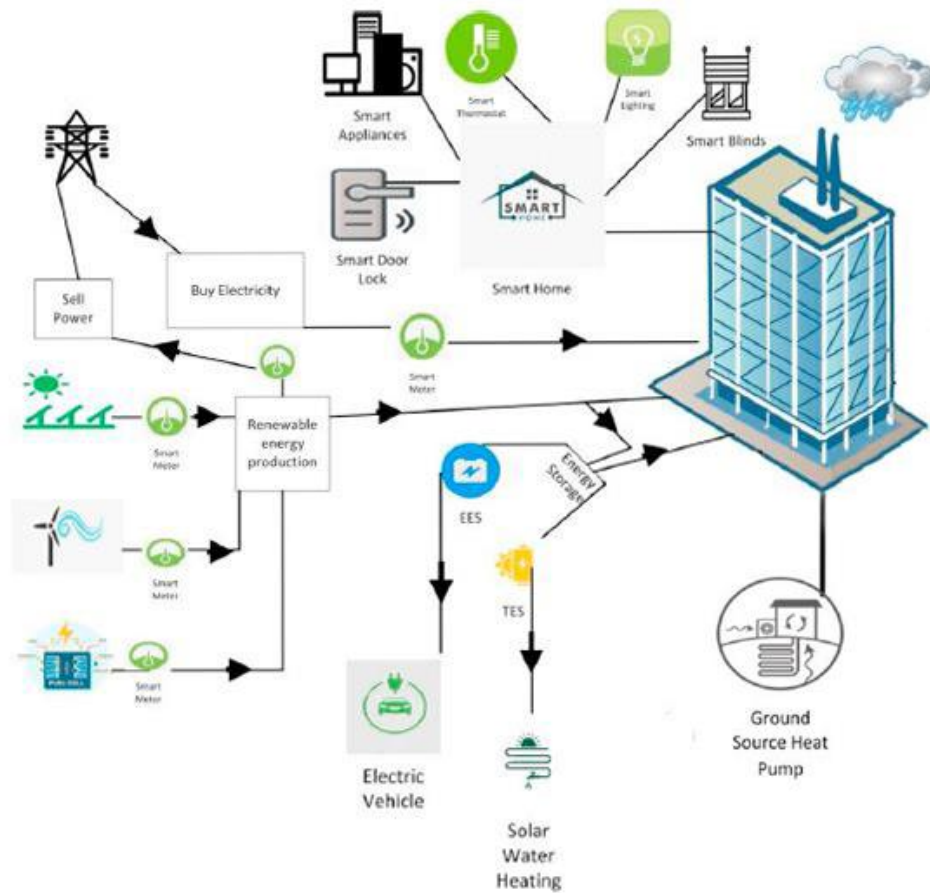
این پروژه با ایجاد یک میکرو شبکه برای تولید انرژی، ذخیره انرژی و استفاده از هوشمند سازی ساختمان هزینه آن در ساختمان را بهینه و به حداقل می رساند. بنابراین، احتمال کاهش مصرف انرژی، هزینه های انرژی و انتشار CO2 افزایش می یابد. بر اساس، از نتایج مدل می توان به مصرف کنندگان نهایی، سرمایه گذاران و سیاست گذاران کمک کند تا تصمیم بهتری در مورد سرمایه گذاری و سیاست گذاری برای بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش انتشار CO2 در ساختمان ها بگیرند.

## ۲- روش شناسی

### ۲-۱- مدل بهینه سازی انرژی

این پروژه یک مدل برای بهینه سازی مصرف انرژی برای ساختمان ارائه داده است که در شکل ۱ تعریف شده است. مدل ارائه شده شامل فن آوری های تجدید پذیری از جمله PV، ST، WT، FC، GSHP برای تولید انرژی، سیستم های ذخیره ساز انرژی الکتریکی و حرارتی و استفاده از تجهیزات هوشمند برای هوشمند سازی ساختمان، با هدف کاهش مصرف انرژی ساختمان به کار گرفته شدند. و همچنین میکرو شبکه متصل به شبکه محلی می باشد.

شکل (۱): مدل بهینه سازی مصرف انرژی یک ساختمان هوشمند



## ۲-۱-۱- تولید انرژی به صورت تجدید پذیر

انرژی مورد نیاز ساختمان را می توان از طریق سلول های خورشیدی الکتریکی و حرارتی، توربین های بادی و سلول های سوختی تأمین کرد. در مورد سلول های سوختی فقط در شرایط بحرانی که ساختمان به شبکه انرژی محلی متصل نباشد استفاده شده است.

### ۲-۱-۱-۱- سلول های خورشیدی (Solar cells & Solar Thermal)

مقدار انرژی تولید شده توسط سلول های خورشیدی به میزان تابش خورشیدی در زمان های مختلف، بازده سلول های خورشیدی و مساحت سلول های خورشیدی نصب شده بستگی دارد (۶). در این مدل، سلول های خورشیدی را می توان بر روی زمین یا سقف ساختمان نصب کرد. تولید الکتریسیته با استفاده از سلول های خورشیدی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E_{PV}(t) = A_{PV} \eta_{PV} R_t * (1hour)$$

جایی که  $E_{PV}(t)$  مقدار انرژی تولید شده توسط سلول های خورشیدی در زمان  $t$  است.  $A_{PV}$  مساحت سلول های خورشیدی است و  $\eta_{PV}$  بازده سلول های خورشیدی را نشان می دهد.  $R_t$  همچنین میزان تابش خورشید بر روی سلول های خورشیدی را در زمان  $t$  نشان می دهد. همینطور برای سلول های خورشیدی **Solar Thermal** مقدار انرژی تولید شده  $E_{ST}(t)$  به صورت معادله زیر می باشد.

$$E_{ST}(t) = A_{ST} \eta_{ST} R_t * (1hour)$$

#### ۲-۱-۱-۲- توربین های بادی (Wind Turbine)

$E_{WT}(t)$  مقدار تولید انرژی توسط توربین بادی وابسته به مساحت تحت پوشش روتور ( $A_{WT}$ ، بر حسب متر مربع)، بازده توربین  $\eta_{WT}$ ، ارتفاع توربین بادی و تراکم هوا در آن نقطه ( $\rho$ ، کیلوگرم در متر مکعب) و سرعت باد ( $V_t$ ) در زمان  $t$  است که می تواند با استفاده از معادله زیر محاسبه شود (۷).

$$E_{WT}(t) = \frac{1}{2} \rho A_{WT} \eta_{WT} V_t^3 * (1hour)$$

با در نظر گرفتن  $D$  به عنوان قطر پره های توربین بادی، مساحت تحت پوشش روتور توسط رابطه زیر به دست می آید:

$$A_{WT} = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2$$

#### ۲-۱-۱-۳- سلول های سوختی (Fuel cells)

پیل سوختی یکی از بهترین فناوری ها برای سیستم تولید انرژی غیر متمرکز در ساختمان است. سلول سوختی هیدروژن در مدل پروژه، برای تأمین کمبود انرژی در ساختمان به منظور افزایش ثبات شبکه تولید انرژی تجدید پذیر استفاده شده است. در صورت عدم دسترسی به شبکه انرژی محلی و همچنین در صورت عدم تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان از طریق سلول خورشیدی و توربین بادی تأمین می شود. انرژی تولید شده توسط سلول سوختی قابل ذخیره سازی نیست و مستقیماً در ساختمان مصرف می شود. مقدار تولید انرژی توسط سلول سوختی

هیدروژن ( $E_{FC}(t)$ ) به بازده سلول سوختی ( $\eta_{FC}$ ) و مقدار ورودی هیدروژن ( $P_t^{FC}$ ) به سلول سوختی در زمان  $t$  بستگی دارد که بر اساس معادله زیر محاسبه می شود (۸):

$$E_{FC}(t) = \eta_{FC} P_{FC} * (1\text{hour})$$

## ۲-۱-۲- سیستم ذخیره ساز انرژی

انواع مختلف فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی با توانایی جذب انرژی از شبکه انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای متداول هستند. ذخیره انرژی باعث ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضای انرژی می شود و شبکه انرژی را به عنوان مکملی مناسب برای انرژی های تجدید پذیر انعطاف پذیرتر و قابل اطمینان تر می کند. مدل پروژه هر دو سیستم ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی را در نظر گرفته است.

### ۲-۱-۲-۱- سیستم ذخیره انرژی الکتریکی (The electrical energy storage system)

ذخیره انرژی الکتریکی می تواند برای مدیریت پیک تقاضا مفید باشد زیرا سرمایه گذاری مناسبی برای انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان شبکه انرژی است. نرخ شارژ و دشارژ و حالت شارژ براساس مشخصات فنی سیستم ذخیره انرژی الکتریکی محدود است. به همین ترتیب، برای آسیب نرسیدن به سیستم ذخیره انرژی الکتریکی، میزان شارژ و دشارژ نمی تواند از حد ذخیره بیشتر شود. این سیستم پس از پایان هر دوره (به طور معمول یک دوره ۲۴ ساعته) و جلوگیری از تجمع خالص توان الکتریکی، به حالت اولیه شارژ باز می گردد. مقدار اولیه شارژ حداقل انرژی است که می تواند تقاضا را در مواقع اضطراری تأمین کند (۹). مدل پروژه از سیستم ذخیره انرژی الکتریکی برای ذخیره انرژی تولید شده توسط سلول خورشیدی فتوولتائیک و توربین بادی (مصرف نشده) برای تأمین انرژی مورد نیاز ساختمان استفاده کرده است.

### ۲-۲-۱-۲- سیستم ذخیره انرژی حرارتی (The thermal energy storage system)

از سیستم ذخیره انرژی گرمایی می توان برای کاهش زمان پیک تقاضای برق و هزینه های بالای پیک استفاده کرد، که سبب امنیت شبکه و کارایی می گردد. مثل سیستم ذخیره انرژی الکتریکی، این نوع سیستم ذخیره سازی از نظر میزان شارژ و دشارژ، سطح انرژی ذخیره شده و شرایط عملیاتی نیز محدود شده است. به همین ترتیب، این سیستم ذخیره انرژی گرمایی پس از هر دوره ۲۴ ساعته با حداقل انرژی مورد نیاز برای پاسخ به شرایط اضطراری به حالت اولیه برمی گردد (۱۰).

## ۲-۱-۳- پمپ حرارتی با منبع زمینی (GSHP)

پمپ حرارتی منبع زمینی، یک فن آوری تجدید پذیر بسیار کارآمد است که برای گرم کردن و خنک سازی محیط ساختمان استفاده می شود. دما در اعماق زمین نسبتاً ثابت است به طوری که در زمستان / تابستان نسبت به هوا گرمتر / سردتر است. پمپ حرارتی منبع زمینی در زمستان گرما را از زمین به ساختمان منتقل می کند، در حالی که در تابستان گرما را از ساختمان به زمین منتقل می کند و در نتیجه باعث خنک شدن محیط ساختمان می شود. این به طور بالقوه مصرف انرژی ساختمان را کاهش می دهد، که می تواند به ترتیب کاهش ۵۰٪ و ۴۰٪ انرژی مصرف شده توسط سیستم های سرمایشی و گرمایشی تلقی شود. GSHP به پاسخگویی به تقاضای بار شبکه کمک می کند تا قابلیت اطمینان شبکه انرژی را افزایش دهد. یکی دیگر از مزایای GSHP کاهش انتشار گاز CO<sub>2</sub> سالانه از ۱۸۰۰ کیلوگرم به ۴۰۰۰ کیلوگرم است. استفاده از فن آوری GSHP در ساختمان تقریباً ۴۳٪ از تقاضای بار برای خنک سازی ساختمان در تابستان و ۹۷٪ یا تقریباً کل تقاضای بار برای سیستم گرمایشی را تأمین می کند (۱۱). این فناوری به تعادل تولید و مصرف انرژی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه ای کمک می کند. بنابراین مدل پروژه از پمپ حرارتی منبع زمینی با هدف کاهش تقاضای بار ساختمان استفاده کرده است.

## ۲-۱-۴- ساختمان هوشمند

خانه های هوشمند، خانه را با استفاده از شبکه های ارتباطی مانند اینترنت و یا اینترنت اشیا کنترل می کنند. کنترل تجهیزات خانگی مختلفی مانند لوازم خانگی، پنجره ها و کرکره ها باعث کاهش مصرف انرژی می شود و سبب راحتی ساکنان خانه فراهم می شود. استفاده از سیستم های نظارتی با معیارهایی هوشمند برای مصرف انرژی تجهیزات خانگی و میزان انرژی تولید شده توسط فناوری های تولید انرژی تجدید پذیر در یک خانه هوشمند به مصرف بهینه انرژی کمک می کند (۱۲). مساله مهم دیگر خانه های هوشمند برنامه ریزی با کمک الگوریتم های هوشمند، با هدف ارائه بهترین انتخاب مصرف توان الکتریکی در هر دستگاه هوشمند در یک زمان خاص برای کاهش مصرف انرژی است. در مدل پروژه از لوازم خانگی هوشمند (به عنوان مثال یخچال، لباسشویی و ...)، نورپردازی هوشمند، کرکره های هوشمند، قفل ها و درهای هوشمند و اینترنت اشیا برای برقراری ارتباط و کنترل قسمت های مختلف ساختمان استفاده شده است.

مصرف انرژی لوازم خانگی هوشمند با مصرف متغیر نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_i(t) = A_i * T_i * K_{i,t}$$

$K_{i,t}$  نشان دهنده حالت روشن یا خاموش بودن دستگاه  $i$  در زمان  $t$  است.

اولویت اول تولید انرژی در محل تأمین انرژی ساختمان، تأمین تقاضای انرژی ساختمان به طور کامل و همچنین ایجاد تعادل در تولید و مصرف انرژی در مدل پروژه بود. در مواردی که بیش از حد انرژی تولید می شود، می توان انرژی اضافی را به شبکه برق محلی صادر کرد و از این طریق برای ساختمان درآمد کسب کرد.

## ۲-۲- مدل ریاضی:

اولین تابع هدف، به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی و نگهداری برای هر بخش شامل دو قسمت ضرب شده در یکدیگر است. با توجه اهداف پروژه، که کاهش در مصرف انرژی، هزینه ها و انتشار CO2 است، اولین تابع هدف هزینه های عملیاتی و همچنین تعمیر و نگهداری برای تولید انرژی، ذخیره سازی و درآمد حاصل از فروش انرژی از هزینه ها کسر می شود. را در نظر می گیرد. تابع هدف دوم کاهش انتشار CO2 را در نظر می گیرد و این به میزان انرژی خریداری شده از شبکه بستگی دارد. دومین تابع هدف به حداقل رساندن انتشار CO2 است، تابع هدف دوم علاوه بر تلاش برای کاهش انتشار CO2، عملکرد تابع هدف اول را تکمیل می کند و باعث کاهش واردات انرژی از شبکه می شود.

## Objective Function 1



$$\begin{aligned}
Min z = & \sum_t C_{PV}^{OM}(t)E_{PV}(t) + \sum_t C_{ST}^{OM}(t)E_{ST}(t) \\
& + \sum_t C_{WT}^{OM}(t)E_{WT}(t) \\
& + \sum_t C_{FC}^{OM}(t)E_{FC}(t) + \sum_t C_{Egrid}^{Buypower}(t)E_{IMP}(t) \\
& + \sum_t C_{EES}^{OM}(t)E_{EES}(t) + \sum_t C_{TES}^{OM}(t)E_{TES}(t) \\
& - \sum_t C_{Egrid}^{Sellpower}(t)E_{EXP}(t)
\end{aligned}$$

Objective Function 2

$$Min z = \sum_t P_{CO2}(t)E_{IMP}(t)$$

## ۲-۲-۲- محدودیت‌ها:

محدودیت های مدل پروژه شامل محدودیت هایی در تولید انرژی، ذخیره انرژی، هوشمند سازی، ریز شبکه و GSHP است که به شرح زیر بیان می شود.

## ۲-۲-۳- محدودیت‌ها در تولید انرژی های تجدیدپذیر

در اینجا محدودیت های مربوط به فناوری های تولید انرژی فتوولتائیک، حرارتی خورشیدی، توربین بادی و سلول های سوختی با توجه به شرایط لازم برای هر فناوری وجود دارد.

دو محدودیت زیر به ترتیب میزان تولید انرژی توسط سلولهای فتوولتائیک و خورشیدی است که باید مقدار مشخصی داشته باشند.

$$E_{Min}^{PV} \leq E_{PV}(t) \leq E_{Max}^{PV}$$

$$E_{Min}^{ST} \leq E_{ST}(t) \leq E_{Max}^{ST}$$

محدودیت زیر مربوط به تولید انرژی تجدیدپذیر توسط توربین بادی می باشد. این انرژی تولیدی به سرعت باد، بازده توربین باد، ناحیه تحت پوشش پره توربین بادی، سرعت برش و سرعت قطع بستگی دارد.

$$E_{WT}(t) \leq \begin{cases} \frac{1}{2} * \frac{1}{1000} * \rho S_{WT} \eta_{WT} * \frac{6}{\pi} (v^3)_{ave} & \forall t: V^{Cut-in} \leq V_t \\ \leq V^{Cut-out} \\ 0 & \forall t: V_t \leq V^{Cut-in}, : V_t \geq V^{Cut-out} \end{cases}$$

تولید انرژی توسط توربین بادی باید مقدار مشخصی داشته باشد، که با معادله زیر نشان داده شده است.

$$E_{Min}^{WT} \leq E_{WT}(t) \leq E_{Max}^{WT}$$

محدودیت زیر، تولید انرژی توسط سلول سوختی هیدروژن را بر اساس بازده سلول سوختی و مقدار هیدروژن وارد شده به سلول سوختی نشان می دهد.

$$E_{FC}(t) \leq \eta_{FC} P_{FC}(t)$$

محدودیت زیر، حداکثر و حداقل میزان انرژی تولید شده توسط سلول سوختی در زمان t را تعیین می کند. لازم به ذکر است که حداقل میزان انرژی تولید شده سلول سوختی صفر در نظر گرفته شده است.

$$E_{Min}^{FC} \leq E_{FC}(t) \leq E_{Max}^{FC}$$

دو محدودیت زیر نشان می دهند، هنگامی الکتریسیته توسط پیل سوختی هیدروژن تولید می شود که انرژی تولید شده با سلول فتو ولتائیک، توربین بادی و برق وارد شده از شبکه برق محلی نتوانند به طور کامل تقاضای برق ساختمان را تامین کنند. به همین دلیل برای تولید انرژی با استفاده از پیل سوختی، مصرف انرژی ساختمان برابر با مقدار انرژی تولید شده توسط سیستم های تولید انرژی به علاوه مقدار انرژی تولید شده توسط پیل سوختی

برای رفع کمبود تقاضا در زمان  $t$  است. در غیر این صورت ، مصرف انرژی ساختمان کمتر یا برابر با انرژی تولید شده توسط سیستم های PV، WT، FC و همچنین مقدار انرژی وارداتی از شبکه است.

$$\forall t: P^{FC}(t) = 0. \quad E_{SH}^C(t) \leq E_{WT}(t) + E_{PV}(t) + E_{IMP}(t)$$

$$\forall t: P^{FC}(t) > 0. \quad E_{SH}^C(t) \leq E_{WT}(t) + E_{PV}(t) + E_{IMP}(t) + E_{FC}(t)$$

محدودیت زیر برای میزان انرژی تولید شده توسط پیل سوختی هیدروژن است که ذخیره نمی شود و مستقیماً به شبکه برق خانگی برای مصرف منتقل می شود. این مقدار همیشه کمتر یا برابر با مصرف انرژی ساختمان در زمان  $t$  است.

$$E_{FC}(t) \leq E_{SH}^C(t)$$

## ۲-۲-۴- محدودیت ها برای ذخیره انرژی

با در نظر گرفتن سیستم های ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی ، محدودیت های هر سیستم به نوبه خود معرفی می شوند. توجه داشته باشید که ، همانطور که در محدودیت های EES و TES توضیح داده شده است ، ما نمی توانیم همزمان شارژ و دشارژ داشته باشیم. محدودیت زیر سطح انرژی را در سیستم EES در زمان  $t$  (KWh) در نظر می گیرد که در آن انرژی الکتریکی ذخیره شده توسط EES در زمان  $t$  برابر با مقدار توان الکتریکی ذخیره شده در  $(t-1)$  به علاوه مقدار توان الکتریکی شارژ شده، منهای مقدار توان الکتریکی دشارژ توسط سیستم. این بدان معنی است که سطح انرژی EES در ابتدای روز نباید کمتر از سطح اولیه انرژی باشد که برای پاسخگویی به شرایط اضطراری لازم است.

$$L_{EES}(t) = L_{EES}(t-1) + (\eta_{EES}^C E_{EES}^C(t) - \eta_{EES}^{DC} E_{EES}^{DC}(t) - S_{EES})$$

محدودیت ها زیر به ترتیب برای میزان شارژ، میزان دشارژ، میزان انرژی ذخیره شده و شرایط عملیاتی هستند.

$$Y_{EES}^C(t)E_{EESMin}^C \leq E_{EES}^C(t) \leq Y_{EES}^C(t)E_{EESMax}^C$$

$$Y_{EES}^{DC}(t)E_{EESMin}^{DC} \leq E_{EES}^{DC}(t) \leq Y_{EES}^{DC}(t)E_{EESMax}^{DC}$$

$$L_{EESMin} \leq L_{EES}(t) \leq L_{EESMax}$$

$$Y_{EES}^C + Y_{EES}^{DC} \leq 1$$

همچنین محدودیت‌های زیر هم مثل ذخیره ساز انرژی برای سیستم ذخیره ساز حرارتی (TES) می باشند.

$$L_{TES}(t) = L_{TES}(t-1) + (\eta_{TES}^C E_{TES}^C(t) - \eta_{TES}^{DC} E_{TES}^{DC}(t) - S_{TES})$$

$$Y_{TES}^C(t)E_{TESMin}^C \leq E_{TES}^C(t) \leq Y_{TES}^C(t)E_{TESMax}^C$$

$$Y_{TES}^{DC}(t)E_{TESMin}^{DC} \leq E_{TES}^{DC}(t) \leq Y_{TES}^{DC}(t)E_{TESMax}^{DC}$$

$$L_{TESMin} \leq L_{TES}(t) \leq L_{TESMax}$$

$$Y_{TES}^C + Y_{TES}^{DC} \leq 1$$

## ۲-۲-۶- محدودیت‌ها ساختمان هوشمند

در ساختمان‌های هوشمندی که در این پروژه در نظر گرفته شده است باید تعادل بین تولید انرژی و مصرف انرژی حتما وجود داشته باشد. بنابراین در محدودیت تعادل انرژی زیر، مقدار انرژی تولید شده توسط سیستم های PV، WT، FC و انرژی وارد شده از شبکه و دشارژ انرژی الکتریکی ناشی از سیستم های EES باید برابر با مقدار مصرف انرژی ساختمان (به عنوان مثال، مقدار کل انرژی مصرف شده توسط وسایل هوشمند ساختمان، GSHP، مقدار شارژ انرژی در سیستم های EES و میزان انرژی فروخته شده به شبکه) باشد.

$$E_{IMP}(t) + E_{WT}(t) + E_{PV}(t) + E_{FC}(t) + E_{EES}^{DC}(t) = A_{GSHP}^P(t) + E_{EES}^C(t) + E_{EXP}(t) + A_C(t)$$

مقدار تولید انرژی گرمایی (ST) و ذخیره انرژی گرمایی (TES) هنگام تخلیه برابر است با مقدار انرژی گرمایی (TES) هنگام شارژ و مقدار انرژی گرمایی مصرف شده توسط آبگرمکن خورشیدی و منجر به محدودیت تعادل در فرم زیر می‌شود.

$$E_{TES}^{DC}(t) = E_{ST}(t) + E_{TES}^C(t) + A_{HW}(t)$$

محدودیت زیر میزان انرژی مصرف شده در یک خانه هوشمند را تعیین می‌کند.

$$E_{SH}^C(t) = A_C(t) + A_{GSHP}^P(t)$$

در این پروژه، لوازم خانگی هوشمند در نظر گرفته شده به دو دسته تقسیم می‌شوند: لوازم خانگی که ۲۴ ساعته کار می‌کنند در حالی که دارای مصرف انرژی به طور مداوم هستند و لوازم با مصرف انرژی متغیر. مصرف انرژی لوازم خانگی هوشمند در ساختمان شامل هر دو نوع است که نباید بیشتر از حداکثر میزان مصرف انرژی در ساختمان باشد. محدودیت زیر نشان دهنده میزان انرژی مصرف شده توسط وسایل هوشمند در زمان  $t$  مربوط به مصرف انرژی در لوازمی است که ۲۴ ساعته کار می‌کنند (یعنی یخچال، فریزر ...) و آنهایی که در زمان‌های متغیر کار می‌کنند (به عنوان مثال، سیستم روشنایی، تلویزیون، کامپیوتر ...) را نشان می‌دهد. این مقدار کمتر یا برابر با حداکثر میزان مصرف انرژی در یک خانه هوشمند است.

$$A_C(t) = A_{C.fix}(t) + \sum_i^N A_i(t)$$

$$A_C(t) \leq E_{SH}^C(t)$$

محدودیت زیر نمایانگر عرضه و تقاضای انرژی یک خانه هوشمند است.

$$A_C(t) \leq E_{IMP}(t) + E_{WT}(t) + E_{PV}(t) + E_{FC}(t) + E_{EES}^{DC}(t) - A_{GSHP}^P(t) - E_{EES}^C(t) - E_{EXP}(t)$$

## ۷-۲-۲- محدودیت‌های میکروشبکه ( microgrid )

محدودیت های زیر مربوط به خرید برق از شبکه، فروش برق به شبکه و شرایط عملیاتی میکرو شبکه است.

$$\forall t \quad 0 \leq E_{IMP}(t) \leq Y_{IMP}(t)E_{buy}$$

$$\forall t \quad 0 \leq E_{EXP}(t) \leq Y_{EXP}(t)E_{sell}$$

$$\forall t \quad Y_{IMP}(t) + Y_{EXP}(t) = 1$$

همچنین محدودیت زیر مقدار انرژی فروخته شده به شبکه را نشان می دهد.

$$\forall t \quad E_{EXP}(t) \leq E_{WT}(t) + E_{PV}(t) + E_{FC}(t)$$

## ۸-۲-۲- محدودیت‌های پمپ حرارتی با منبع زمینی (GSHP)

در دو محدودیت زیر مربوط به مقدار انرژی مصرف شده توسط پمپ حرارتی با منبع زمینی و حالت سیستم خنک کننده یا گرم کننده وجود دارد.

$$\forall t \quad A_{GSHP}^P(t) = (Y_{heat}A_{heat}) + (Y_{cool}A_{cool})$$

$$\forall t \quad \text{if } A_{cool} > 0 \quad A_{GSHP}^P(t) = A_{cool}$$

$$\forall t \quad \text{if } A_{heat} > 0 \quad A_{GSHP}^P(t) = A_{heat}$$

$$\forall t \quad Y_{heat} + Y_{cool} = 1$$

### ۳- ساختمان مورد مطالعه (case study)

پروژه حاضر به مطالعه موردی ساختمانی با شرایط آب و هوایی تهران در ایران پرداخته است. داده‌های تغییر اقلیم (نور خورشید و سرعت باد)، از داده‌های تاریخی تهیه شده از سایت نینجا (۱۳) در سال ۲۰۱۹، در چهار سناریو در فصل بهار تا زمستان استخراج شد. برنامه ریزی زمانی برای استفاده از وسایل برقی هوشمند برای هر ساعت و در طی یک دوره ۲۴ ساعته مشتق شده از مقاله‌های ذکر شده در متن ارائه شده است. پارامترهای فنی و هزینه‌های عملیاتی و نگهداری تجهیزات مورد استفاده در مطالعه موردی از مقالات تحقیق قبلی استخراج شده است که در ادامه توضیح داده شده است (۱۴).

سلول‌های فتوولتائیک (PV) با انرژی ۱۰ کیلووات ساعت و بازده ۰,۱۵، بر روی زمین نصب شده‌اند و مساحت مورد استفاده برای نصب سلول‌های خورشیدی (PV) ۷۰ متر مربع است. هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ۰/۰۰۵ دلار بر کیلووات ساعت است و همچنین حداکثر و حداقل تولید ۱۰ کیلووات ساعت و صفر برای این نوع سلول خورشیدی می‌باشد. سلول‌های حرارتی خورشیدی (ST) با انرژی ۲ کیلووات ساعت و بازده ۰,۱۵ که بر روی زمین نصب شده‌اند و مساحت مورد استفاده برای نصب سلول‌های خورشیدی (ST) ۱۲ متر مربع است، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ۰/۰۰۵ دلار بر کیلووات ساعت است و باری این نوع از سلول خورشیدی حداکثر و حداقل تولید ۲ کیلووات ساعت و صفر می‌باشد. یک توربین بادی با انرژی ۷ کیلووات ساعت، بازده ۰,۲۶، سرعت cut-in ۳ متر بر ثانیه، سرعت cut-out ۳۰ متر بر ثانیه، سرعت نامینال ۱۰ متر بر ثانیه و قطر ۶ متر برای روتور ژنراتور در نظر گرفته شد. هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ۰,۰۰۵ دلار بر کیلووات ساعت و حداکثر و حداقل تولید برای توربین بادی ۷ کیلووات ساعت و صفر می‌باشد. مساحت روتور توربین بادی ۲۸ متر مربع است. هنگامی که سرعت باد کمتر از سرعت cut-in است، تولید انرژی صفر خواهد بود و همچنین هنگامی که سرعت باد بالاتر از سرعت cut-out است، توربین بادی متوقف می‌شود و تولید انرژی صفر می‌شود. یک پیل سوختی با بازده ۰,۶۵ با توجه به هزینه عملیاتی و نگهداری ۱,۵۴ دلار بر کیلووات ساعت با توجه به هزینه هیدروژن ورودی در نظر گرفته شد، دقت شود که هزینه عملیاتی و نگهداری سلول سوختی، برای تولید یک کیلووات ساعت انرژی در نظر گرفته شده است. جدول ۱ خلاصه داده‌های مربوط به سیستم‌های ذخیره انرژی الکتریکی و حرارتی را نشان می‌دهد.

جدول (۱):

	O\$M	Capacity(KW)	Charge efficiency	Discharge efficiency	Self-Discharge(KW)
EES	0.005	12	95%	95%	0.02
TES	0.001	10	75%	75%	0.032

EES در نظر گرفته شده برای مدل این پروژه از نوع لیتیوم یون می باشد که داده ها را از مقاله (۱۵) استخراج شده اند. حداقل و حداکثر انرژی الکتریکی ذخیره شده در حالت charge توسط سیستم EES ،  $\frac{3}{4}$  و ۱۲ کیلووات ساعت می باشد و حداقل و حداکثر میزان discharge توسط سیستم EES ،  $\frac{1}{4}$  و ۱۲ کیلووات ساعت می باشد. داده های سیستم TES در نظر گرفته شده از مقاله (۱۳) استخراج شده است. حداقل و حداکثر انرژی الکتریکی ذخیره شده در حالت charge توسط سیستم TES ،  $\frac{2}{5}$  و ۱۰ کیلووات ساعت می باشد و حداقل و حداکثر میزان discharge توسط سیستم TES ، ۰ و ۱۰ کیلووات ساعت می باشد.

زمان مشخص برنامه ریزی شده ۲۴ ساعته در یک گروه با مصرف انرژی ثابت دسته بندی می شود. در جدول ۲ خلاصه ای از داده های مصرف انرژی برای وسایل هوشمند وجود دارد. دامنه و مدت زمان استفاده از هر دستگاه نیز در جدول مشخص شده است که از منابع مختلف به دست آمده است (۱۶).

جدول (۲):

وسيله برقی هوشمند	مصرف انرژی (KW)	زمان (h)
یخچال	۰,۱۵	۲۴
ماشین لباس شویی	۱	۱
ماشین ظرفشویی	۱,۴	۱
خشک کننده	۱,۸	۱
لامپ های هوشمند	۰,۱۴	۶
ترموستات هوشمند	۰,۰۱	۲۴
لوازم اینترنت	۰,۰۱	۲۴
پرده های هوشمند	۰,۱۲	۱
سنسورها	۰,۰۱	۲
ماشین هیبرید	۱,۱۶	۳
تلویزیون هوشمند	۰,۳	۵



اجاق برقی	۱,۵	۲
لپ تاپ	۰,۱	۲
کامپیوتر	۰,۳	۳
اتو	۱,۱	۱
ماشین تمیزکننده خلا	۰,۶۵	۱
ماکروفر	۰,۹	۱
برنج پز	۰,۶	۱
چای ساز	۱	۱
توستر	۰,۸	۱

حد بالای خرید انرژی از شبکه و همچنین فروش انرژی به شبکه، به ترتیب ۲۰ و ۱۰ کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، هزینه خرید انرژی از شبکه ۰,۰۶ دلار کیلووات ساعت و درآمد فروش حاصل از انرژی های سبز تولید شده در ساختمان به شبکه ۰,۰۸ دلار کیلووات ساعت می باشد. پمپ حرارتی منبع زمینی (GSHP) مورد نظر یک پمپ است که ۲۴۰ متر طول دارد و در عمق ۶۰ متری زمین قرار گرفته است. GSHP دارای یک قدرت خطی ۰,۰۵ کیلو وات بر متر است و کل قدرت گرمایش آن ۱۱ کیلووات تخمین زده می شود. داده های مربوط به GSHP از مقاله (۱۷) استخراج شده است. این فناوری شامل سیستم های گرمایشی و سرمایشی ساختمان است و فقط یکی از آنها می تواند در یک زمان خاص فعال باشد. داده های مربوط به انرژی مصرف شده توسط سیستم های سرمایشی و گرمایشی به ترتیب ۲ و ۱,۸ کیلو وات بر ساعت و مساحت ۱۶۰ متر مربع در نظر شده است. همچنین هزینه عملیاتی و نگهداری ۰,۰۱ دلار بر کیلو وات ساعت در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱- معرفی سناریوهای در نظر گرفته شده

در حقیقت ، شرایط تولید انرژی به ویژگی آب و هوایی هر منطقه بستگی دارد، از جمله نور خورشید برای تولید انرژی توسط سلول های خورشیدی و سرعت باد برای تولید انرژی توسط توربین بادی. علاوه بر سرعت باد ، میزان انرژی تولید شده توسط توربین بادی به تراکم هوا ( $\rho$ ) بستگی دارد که خود به فشار، دما و رطوبت هوا بستگی دارد زیرا در هر فصل متفاوت است. همه سناریوها در نظر گرفته شده در این پروژه بر اساس شرایط آب و هوایی در فصول مختلف در شرایط خاص آب و هوایی و تراکم خاص هوا و در هر فصل تعریف شده اند. داده های مربوط به شرایط آب و هوایی در ۴ فصل برای یک دوره ۲۴ ساعته در تهران استفاده شد. با در نظر گرفتن اهداف مدل

از جمله بهینه سازی مصرف انرژی، کاهش هزینه های انرژی، کاهش انتشار کربن دی اکسید و مقدار انرژی تولید شده یا وارد شده از شبکه در سناریوهای مختلف بررسی شده است و در ادامه به آنها پرداخته می شود.

### ۳-۲-۱- سناریوی ۱:

در این سناریو (فصل بهار)، شرایط آب و هوایی از نظر نور خورشید و سرعت باد در شرایط مناسبی برای تولید انرژی قرار داشت. بنابراین، این سناریو در ماه مه، زمانی که شرایط آب و هوایی آفتابی و گاهی بارانی بوده است، بررسی شده است. سرعت باد و میزان تابش خورشید در جدول ۳ نشان داده شده است. تراکم هوا در این سناریو ۱,۲۲۵ می باشد. داده های حاصل، از تحقیق انجام شده توسط سایت (۱۴) استخراج شده است.

جدول (۳):

زمان (h)	سرعت باد (m/s)	تابش خورشید ( $\text{kw/m}^2$ )
۱	۳,۱۲۱	۰
۲	۲,۹۷۹	۰
۳	۲,۷۳۹	۰
۴	۲,۵۹۸	۰
۵	۲,۵۴۳	۰
۶	۲,۴۲۹	۰
۷	۲,۱۸۵	۰
۸	۱,۶۱۶	۰,۱۸۷
۹	۲,۰۴۲	۰,۴۳۶
۱۰	۲,۸۹۹	۰,۶۶۳
۱۱	۴,۰۲۷	۰,۸۳۴
۱۲	۴,۷۶۹	۰,۹۴۲
۱۳	۴,۹۵۴	۰,۹۴۶
۱۴	۴,۸۷۵	۰,۹۰۸
۱۵	۴,۵۴۴	۰,۷۸۵
۱۶	۳,۶۰۹	۰,۶۰۹

۱۷	۳,۱۵۵	۰,۴۰۲
۱۸	۲,۴۸۹	۰,۱۸۴
۱۹	۱,۷۴۷	۰,۰۰۷
۲۰	۱,۸۷۶	.
۲۱	۲,۱۷۶	.
۲۲	۲,۱۹۱	.
۲۳	۲,۳	.
۲۴	۲,۳۸۶	.

### ۳-۲-۳- سناریوی (فصل تابستان) ۲ :

در این سناریو ، شرایط آب و هوایی در ماه اوت، زمانی که نور خورشید مناسب بود، مورد بررسی قرار گرفت. تراکم هوا در این سناریو ۱,۰۳۸۴ می باشد.

### ۳-۲-۳- سناریوی (فصل پاییز) ۳ :

شرایط آب و هوایی این سناریو به این صورت است که حداقل تولید انرژی توسط سلولهای خورشیدی را دارد، در حالی که سرعت باد می تواند توربین های بادی را به درستی قادر به تولید انرژی و تأمین نیازهای انرژی در ساختمان کند. اما نور خورشید به دلیل روزهای بارانی بسیار کم می باشد. تراکم هوا در این سناریو ۱,۰۷۶۲ می باشد.

### ۳-۲-۴- سناریوی (فصل پاییز) ۴ :

شرایط آب و هوایی با حداقل تولید انرژی توسط سلولهای خورشیدی مانند سناریو ۳ برای ۲۴ ساعت همراه بوده است. این کاهش تولید انرژی توسط سلول های خورشیدی منجر به استفاده از شبکه انرژی محلی برای تأمین انرژی مورد نیاز در ساختمان شده است. این سناریو در فصل زمستان، هنگامی که به دلیل روزهای بارانی، نور خورشید بسیار کم بود، در نظر گرفته شد. تراکم هوا در این سناریو ۱,۰۲۰۵ می باشد.

جدول (۴):

Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Level	Level	Level	Level
-1.1936	-0.3347	3.2	4.2514

## ۴-۱- تحلیل سناریوی اول

در مجموع ۸۷,۷ کیلووات انرژی الکتریکی در این سناریو تولید شده است، که در آن سهم‌های PV، WT، ST و GSHP به ترتیب ۷۲، ۲,۷، ۱۲,۴۲ و ۳۶ کیلووات بوده است. میزان تولید پیل سوختی نیز به دلیل تولید انرژی مناسب توسط سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی صفر می‌باشد. همچنین سلول خورشیدی حرارتی (ST) و پمپ زمین گرمایی به دلیل هزینه تعمیرات و نگه‌داری بالا صفر می‌باشد. کل انرژی وارداتی از شبکه، کل انرژی فروخته شده به شبکه و کل انرژی مصرفی در ساختمان به ترتیب ۵۵,۳۵، ۶۶,۹۴ و ۵۹,۳۹ کیلووات می‌باشد. بر اساس جدول ۴، در این سناریو هزینه کل یا همان تابع هدف منفی شده است، که می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان با فروش انرژی به شبکه حدود ۱,۱۹ دلار درآمد کسب نموده است. دقت شود که علامت منفی به معنی کسب درآمد است. در واقع با توجه به مقدار انرژی فروخته‌شده به شبکه، مدل درآمد کسب کرده‌است و مقدار درآمد هزینه‌های مختلف را پوشش می‌دهد (به عنوان مثال هزینه برق از شبکه محلی و یا هزینه عملیاتی).

## ۴-۲- تحلیل سناریوی دوم

در این سناریو در مجموع حدود ۸۴,۳۳ کیلووات انرژی تولید شده است، که در آن سهم‌های PV، WT، ST و GSHP به ترتیب ۷۰، ۴,۷، ۸,۸۱ و ۴۸ کیلووات بوده است. میزان تولید پیل سوختی نیز به دلیل تولید انرژی مناسب توسط سلول‌های خورشیدی و توربین‌های بادی صفر می‌باشد. همچنین سلول خورشیدی حرارتی (ST) و پمپ زمین گرمایی به دلیل هزینه تعمیرات و نگه‌داری بالا صفر می‌باشد. کل انرژی وارداتی از شبکه، کل انرژی فروخته شده به شبکه و کل انرژی مصرفی در ساختمان به ترتیب ۶۲,۳۹، ۶۲,۲۳ و ۷۱,۳۹ کیلووات می‌باشد. بر اساس جدول ۴، در این سناریو هزینه کل یا همان تابع هدف منفی شده است، که می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان با فروش انرژی به شبکه حدود ۰,۳۳ دلار درآمد کسب نموده است. دقت شود که علامت منفی به معنی کسب درآمد است.

#### ۴-۳- تحلیل سناریوی سوم

شرایط آب و هوایی سناریوی سوم در پاییز در نظر گرفته شده است. در مجموع ۸,۵۳ کیلووات انرژی الکتریکی در این سناریو تولید شده است. که در آن سهم‌های PV, WT, ST و GSHP به ترتیب ۶,۰۹ ، ۱,۴۰ ، ۱,۰۴ و ۲۷,۶ کیلووات بوده است. میزان تولید پیل سوختی نیز به دلیل تولید انرژی مناسب توسط سلول های خورشیدی و توربین های بادی صفر می باشد. همچنین سلول خورشیدی حرارتی (ST) و پمپ زمین گرمایی به دلیل هزینه تعمیرات و نگه داری بالا صفر می باشد. کل انرژی وارداتی از شبکه، کل انرژی فروخته شده به شبکه و کل انرژی مصرفی در ساختمان به ترتیب ۵۲,۸۲، ۳,۸۳ و ۵۲,۱۹ کیلووات می باشد. بر اساس جدول ۴، در این سناریو هزینه کل یا همان تابع هدف منفی شده است، که میتوان نتیجه گرفت که ساختمان با فروش انرژی به شبکه حدود ۱,۱۶ دلار هزینه صرف نموده است. دقت شود که علامت مثبت به معنی صرف هزینه است.

#### ۴-۴- تحلیل سناریوی چهارم

شرایط آب و هوایی سناریوی چهارم در زمستان در نظر گرفته شده است. در مجموع ۱۹,۲۶ کیلووات انرژی الکتریکی در این سناریو تولید شده است. که در آن سهم‌های PV, WT, ST و GSHP به ترتیب ۴,۹ ، ۲,۹ ، ۱۱,۳۸ و ۴۳,۲ کیلووات بوده است. میزان تولید پیل سوختی نیز به دلیل تولید انرژی مناسب توسط سلول های خورشیدی و توربین های بادی صفر می باشد. همچنین سلول خورشیدی حرارتی (ST) و پمپ زمین گرمایی به دلیل هزینه تعمیرات و نگه داری بالا صفر می باشد. کل انرژی وارداتی از شبکه، کل انرژی فروخته شده به شبکه و کل انرژی مصرفی در ساختمان به ترتیب ۶۳,۰ و ۶۳,۰۶ کیلووات می باشد. بر اساس جدول ۴، در این سناریو هزینه کل یا همان تابع هدف منفی شده است، که میتوان نتیجه گرفت که ساختمان با فروش انرژی به شبکه حدود ۴,۲۵ دلار هزینه صرف نموده است. دقت شود که علامت مثبت به معنی صرف هزینه است.

#### ۴-۵- تحلیل و مقایسه سناریوها با یکدیگر

با توجه به تأثیرات زیاد شرایط آب و هوایی بر روی مدل پیشنهادی، چهار سناریو با شرایط مختلف آب و هوایی در چهار فصل در نظر گرفته شده است. مدل پروژه از نظر کاهش مصرف انرژی، واردات انرژی از شبکه محلی و هزینه های عملیاتی و نگهداری مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که مدل پروژه باعث کاهش مصرف انرژی و هزینه ساختمان شده است. دو سناریوی اول علاوه بر اهداف به حداقل رساندن، از فروش انرژی (به عنوان سود در صورت عدم نیاز به خرید آب از شبکه) درآمد کسب کرده است. دقت شود که با توجه به

استفاده از وسایل هوشمند و کم مصرف، میزان مصرف انرژی کاهش پیدا می کند. برای شرایط بحرانی که امکان وارد کردن انرژی از شبکه وجود ندارد، سلول سوختی می تواند ۱۰۰٪ انرژی مورد نیاز ساختمان را تأمین کند، در واقع هدف به کارگیری از سلول سوختی هم به همین دلیل ذکر شده می باشد. البته اسفاده از سلول سوختی سبب افزایش بالای هزینه ها شود که این افزایش هزینه ممکن است به دلیل افزایش هزینه های بالای عملیاتی پیل های سوختی و افزایش قیمت هیدروژن مورد استفاده در تولید انرژی باشد. بر این اساس، به کارگیری پیل های سوختی زمانی پیشنهاد می شود که فقط در شرایط بحرانی (زلزله، سیل، طوفان و غیره)، جایی که انرژی واردات از شبکه امکان پذیر نیست، استفاده شود. از طرف دیگر، هزینه های عملیاتی و نگهداری برای همه سناریوها بطور قابل توجهی کاهش یافته است. برای سناریوهای ۱ تا ۲، هزینه ها از طریق سود حاصل از فروش انرژی به شبکه جبران شده است، بنابراین مدل درآمد کسب کرده است.

#### منابع

- (۱): Namany, S., et al. (2019). Optimisation of the energy, water, and food nexus for food security scenarios. *Computers & Chemical Engineering*, 129, Article 106513.
- (۲): Zhang, D., et al. (2013). Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid. *Energy Conversion and Management*, 74, 209–222.

- (۳): Statistical Center of Iran; 2017[Available from: <https://www.amar.org.ir/>.
- (۴): Wells, L., et al. (2018). A review of net zero energy buildings with reflections on the Australian context. *Energy and Buildings*, 158, 616–628.
- (۵): Palomares, V., et al. (2012). Na-ion batteries, recent advances and present challenges to become low cost energy storage systems. *Energy & Environmental Science*, 5(3), 5884–5901.
- (۶): Akbari, K., et al. (2016). Optimal design of distributed energy system in a neighborhood under uncertainty. *Energy*, 116, 567–582.
- (۷): Zhang, D., et al. (2013). Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid. *Energy Conversion and Management*, 74, 209–222.
- (۸): Sichilalu, S., et al. (2016). Optimal control of a fuel cell/wind/PV/grid hybrid system with thermal heat pump load. *Solar Energy*, 135, 59–69.
- (۹): Pooranian, Z., et al. (2018). Scheduling distributed energy resource operation and daily power consumption for a smart building to optimize economic and environmental parameters. *Energies*, 11(6), 1348.
- (۱۰): Arteconi, A., et al. (2012). State of the art of thermal storage for demand-side management. *Applied Energy*, 93, 371–389.
- (۱۱): Sichilalu, S., et al. (2016). Optimal control of a fuel cell/wind/PV/grid hybrid system with thermal heat pump load. *Solar Energy*, 135, 59–69.
- (۱۲): Liu, Z., et al. (2019). Application and suitability analysis of the key technologies in nearly zero energy buildings in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 329–345.
- (۱۳): Stojkoska, B. L. R., & Trivodaliev, K. V. (2017). A review of internet of things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 140, 1454–1464.

(١٣): Zhang, D., et al. (2016). Economic and environmental scheduling of smart homes with microgrid: DER operation and electrical tasks. *Energy Conversion and Management*, 110, 113–124.

(١٤): <https://www.renewables.ninja/>

(١٥): Zhang, Y., Zhang, T., Wang, R., Liu, Y., & Guo, B. (2015). Optimal operation of a smart residential microgrid based on model predictive control by considering uncertainties and storage impacts. *Solar Energy*, 122, 1052–1065.

(١٦): THE ELECTROPAEDIA IS WRITTEN AND MAINTAINED BY BARRIE LAWSON.  
AVAILABLE FROM: [HTTPS://WWW.MPOWERUK.COM/ELECTRICITY\\_DEMAND.](https://www.mpoweruk.com/electricity_demand.htm)  
HTM.

(١٧): Franco, A., & Fantozzi, F. (2016). Experimental analysis of a self consumption strategy for residential building: The integration of PV system and geothermal heat pump. *Renewable Energy*, 86, 1075–1085.