تاریخ دریافت: ۱۸ خرداد ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۶ بهمن ۱۴۰۱ صفحات ۱ الی ۲۹

بهینه‌سازی چند هدفه ظرفیت و عملکرد سیستم تامین گرمایش و سرمایش گلخانه با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی ایران

علیرضا قادرتوتونچی
کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف
A.ghadertotonchi@energy.sharif.edu
ارمغان سلیمانیان
کارشناس ارشد مهندسی فناوری‌های انرژی، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف
armaghan.solemanian@energy.sharif.edu
گلناز افشون
کارشناس ارشد مهندسی انرژی و محیط زیست، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف
golnaz.afshoon@energy.sharif.edu
حسین خواجه‌چور
استادیار، دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف
khajehpour@sharif.edu

چکیده: در این مطالعه به بهینه‌سازی سیستم عرضه انرژی یک گلخانه با در نظر گرفتن دوازده اقلیم مختلف حاکم بر کشور ایران پرداخته شده است. بدین منظور یک مدل بهینه‌سازی دوهدفه خطی یکپارچه عرضه-تقاضای انرژی توسعه داده شده است که با دریافت برق، گاز و آب به کنترل شرایط دمایی درون گلخانه و تامین گرمایش، سرمایش و الکتریسیته مورد نیاز می‌پردازد. دو هدف یاد شده عبارت از کمینه‌سازی هزینه عملیاتی (با در نظر گرفتن نرخ تنزیل در یک دوره زمانی بیست ساله) و هزینه اولیه در کنار کمینه‌سازی انحراف دمای درون گلخانه از مقدار مطلوب است. هزینه اولیه تجهیزات انرژی، حاصل بررسی داده‌های تولیدکنندگان داخلی و بدست آوردن منحنی هزینه تجهیزات است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با توجه به شرایط اقلیمی حاکم، بهترین مناطق برای احداث گلخانه به ترتیب کرمان، تهران و اراک می‌باشد که هزینه کلی، با در نظر گرفتن دوره عمر بیست ساله، برای آنها در محدوده ده هزار دلار است.

واژه‌های کلیدی: سیستم انرژی گلخانه، بهینه‌سازی سیستم انرژی، بهینه‌سازی چندهدفه، سیستم چند حاملی انرژی، انرژی و اقلیم

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۱. مقدمه

براساس پیش‌بینی‌های سازمان ملل متحد، تقاضای مواد غذایی در جهان تا سال ۲۰۵۰، شصت درصد و تقاضای کل انرژی تا سال ۲۰۳۵، سی درصد افزایش خواهد یافت (سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد[۱]،۲۰۱۶). در نتیجه موارد یاد شده، بهره‌گیری از اصول توسعه پایدار در بخش کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. کشاورزی پایدار مفهومی است که در راستای توسعه پایدار شکل گرفت و با هر سه موضوع یاد شده در ارتباط است.

امروزه گلخانه‌ها راهکاری برای پاسخگویی به افزایش تقاضای جهانی غذا، در راستای کشاورزی پایدار به شمار می‌آیند. کاهش مصرف آب، بهبود راندمان تولید غذا، افزایش امنیت غذایی، امکان تولید انواع محصولات کشاورزی فارغ از آب و هوای منطقه از مزایای کشت گلخانه‌ای است (اسچیلن[۲] وهمکاران، ۲۰۱۸ و باریکاری[۳] و کوکار[٤]،۲۰۱۲) نکته حائز اهمیت این است که حفظ محیط گلخانه در شرایط مطلوب دمایی برای هر گیاه نیاز به مصرف انرژی دارد. مصرف انرژی میتواند تا ۵۰ درصد هزینه سالانه گلخانه را تشکیل دهد (شن[۵] و همکاران، ۲۰۱۸) به همین علت بهینه سازی مصرف انرژی گلخانه از اهمیت بسزایی برخوردار است. این مهم با توسعه مدل یکپارچه عرضه-تقاضای انرژی در دسترس خواهد بود. چنین مدلی با در نظر گرفتن رابطه دو سویه میان عرضه و تقاضا، به بهینه‌سازی ظرفیت سیستم‌های انرژی و عملکرد آنها در طول سال می‌پردازد و امکان مقایسه انواع استراتژی‌های مصرف انرژی را فراهم می‌نماید(کوس[۶] و همکاران، ۲۰۱۶).

با در نظر گرفتن اینکه شرایط محل احداث گلخانه همواره درحال تغییر است، مدل توسعه داده شده باید توانایی استفاده از روابط فیزیکی، مانند تبادل جرم و انرژی با محیط بیرون سیستم را داشته باشد

---

۱. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)
۲. Aschilean
۳. Bayrakcı
٤. Koçar
۱. Shen
۲. Cuce

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

(بات[۱]، ۱۹۹۳). بدین منظور در یک نگاه کلی، دو روش شبیه‌سازی و داده‌محور برای برآورد تقاضا انرژی در دسترس است (کیم[۲] و همکاران، ۲۰۱۷).

همانطور که اشاره شد، شرایط اقلیمی محل قرار گیری گلخانه بر نیاز گرمایش و سرمایش تاثیر بسزایی دارد(اسمائیلی و روشندل، ۲۰۲۰) که این مورد در این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است. سپس، تقاضای انرژی بدست آمده به همراه مشخصات تجهیزات در دسترس و محدودیت‌های محیط زیستی و اقتصادی و فنی، وارد مدل عرضه انرژی می‌شود. در مدل عرضه، سیستم انرژی به صورت یک درگاه چندحاملی یا هاب مدل‌سازی می‌شود و سپس براساس قیود و روابط موجود، اندازه بهینه تجهیزات و نحوه عملکرد بهینه آنها در طول بازه زمانی مورد نظر بدست می‌آید (صادقی و همکاران، ۲۰۱۹) خروجی مدل عرضه شامل ظرفیت و مصرف بهینه سیستم‌های انرژی است. مطالعات مختلفی به بهینه-سازی هاب انرژی پرداخته‌اند (گاجان[۳] و همکاران و رستگار و همکاران، ۲۰۱۷). به طور مثال در مطالعه (روشندل و هکاران، ۲۰۱۹) سیستم بهینه عرضه انرژی گلخانه با در نظر گرفتن سیستم تولید همزمان و پیل سوختی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مطالعه‌ای دیگر مدل عرضه انرژی بهینه با هدف بیشینه کردن تولید محصول توسعه داده شده است (گلزار و همکاران، ۲۰۲۱) سدر بهینه-سازی‌های انجام گرفته علاوه بر کمینه‌سازی هزینه انرژی می‌توان مسائل زیست محیطی را نیز در نظر گرفت. چنین رویکردی در مطالعه (همایونی و همکاران،۲۰۱۷) با در نظر گرفتن سیستم تولید همزمان توان، حرارت و سرمایش برای یک گلخانه در کشور ایران در نظر گرفته شده است. در مطالعه حاضر ، هدف توسعه مدل چند هدفه بهینه‌سازی عرضه-تقاضای انرژی و تحلیل حساسیت آن نسبت به شرایط اقلیمی مختلف کشور است.

---

۳. Bot
٤. kim
۱. Gajan

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

در مدل یکپارچه، بخش تقاضای انرژی به عنوان بخشی از قیود مدل بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. مدل توسعه داده شده دو هدف اصلی دارد که عبارت از حفظ دمای گلخانه در یک بازه قابل قبول و کمینه سازی هزینه انرژی است. این مدل با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی مختلف اجرا شده و تحلیل حساسیت انجام گرفته است.

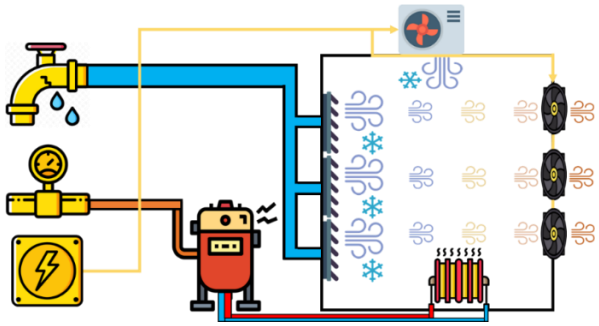
اکثر مطالعات مربوط به بهینه سازی هاب انرژی، تقاضای انرژی را به عنوان یک ورودی برون‌زا در نظر می گیرند که بخشی از مدل بهینه سازی نیست. برای پر کردن این شکاف، این مطالعه با هدف توسعه یک مدل بهینه‌سازی یکپارچه عرضه و تقاضا برای یک گلخانه انجام شد. برای انجام این کار، یک مدل بهینه‌سازی خطی دو هدفه ایجاد شده است که در آن هدف اول به حداقل رساندن هزینه اولیه (مربوط به اندازه واحدهای تبدیل انرژی) و عملیاتی (مربوط به مصرف انرژی) و هدف دوم کاهش انحراف دما از نقطه تنظیم شده است.

در بخش بعد روش مورد استفاده در این مطالعه بیان و در بخش سوم مفروضات مطالعه موردی معرفی شده است. در بخش چهارم به جمع‌بندی و بحث درباره نتایج بدست آمده پرداخته شده است. در نهایت بخش پنجم حاوی نتیجه گرفته شده در این مطالعه می‌باشد.

۲. روش پژوهش

در این مطالعه روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، برای بدست آوردن ظرفیت بهینه بویلر، چیلر، فن و پد، بکار گرفته شده است. در این بخش پس از توضیح ساختار کلی مدل، معادلات خطی مربوط به مدل هر تجهیز توضیح داده شده است. مقدار عددی پارامترهای به کار رفته در این معادلات در بخش سوم بررسی شده است. شکل ۱ نشان‌دهنده ساختار هاب آب و انرژی است. سه ورودی اصلی هاب الکتریسیته، گاز طبیعی و آب هستند. الکتریسیته در فن‌ها و چیلر ، گاز طبیعی در بویلر و آب در پدها استفاده می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل۱. ساختار هاب آب و انرژی برای کنترل دمای داخل گلخانه

۲.۱. بویلر

بویلرها از سیستم‌های گرمایش مرسوم درگلخانه‌ها به شمار می‌آیند. رابطه ۱ تولید حرارت بویلر را نشان می‌دهد (حسن‌الزمان و همکاران ۲۰۲۰).

$$Q_{h,Boiler}(t)[kWh] = V_{NG}(t)[m^3/h] \times LHV_{NG}[kWh/m^3] \times \eta_{Boiler} \quad (۱)$$

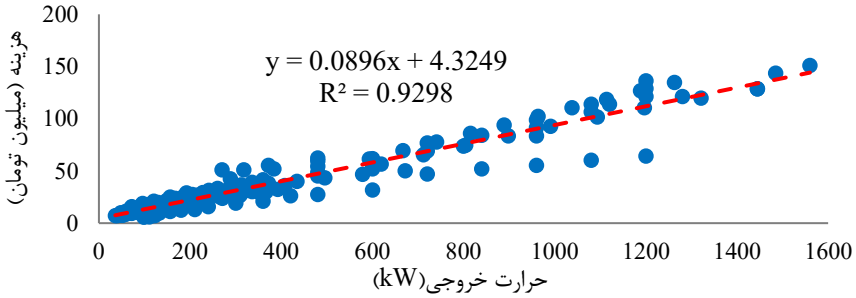
$$Q_{h,Boiler}(t) \leq Cap_{Boiler} \quad (۲)$$

$$Cap_{Boiler} \leq X_{Boiler} \times M \quad (۳)$$

بنابر رابطه ۱، حرارت تولیدی در هر ساعت ($Q_{h,Boiler}(t)$) برابر با حجم گاز طبیعی ورودی در آن ساعت ($V_{NG}(t)$) در ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی (LHV_{NG}) در بازدهی بویلر (η_{Boiler}) است. در این مطالعه ارزش حرارتی پایین گاز طبیعی ۹.۷ کیلووات ساعت بر مترمکعب و بازدهی بویلر بر ۹۰٪ در نظر گرفته شده است. رابطه ۲ بیان می‌کند که حرارت تولید شده باید از ظرفیت بویلر کمتر باشد. رابطه ۳ نیز نشان می‌دهد که اگر بویلر در سیستم نباشد مقدار متغیر باینری X_{Boiler} برابر با صفر خواهد بود و در غیر این صورت این قید، به دلیل بزرگ بودن M، اثری ندارد. از متغیر باینری برای بخش هزینه ثابت معادله معرفی شده در شکل ۲ استفاده می‌شود.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

شکل ۲ رابطه بین هزینه و حرارت خروجی از بویلر را نشان می‌دهد. داده‌های این نمودار از اطلاعات موجود در سایت‌های فروشندگان ایرانی تجهیزات گرمایشی جمع آوری شده است (دماتجهیز[۱]، ۲۰۲۱ و لئوتهویه[۲]، ۲۰۲۲). با در نظر گرفتن قیمت ۲۰ هزار تومان برای هر دلار، قیمت ثابت خرید بویلر معادل ۲۱۶.۲۴۵ دلار و هزینه متغیر ۴.۴۸ دلار به ازای هر کیلووات برآورد شده است.



شکل۲. تابع هزینه بویلر (ماخذ: (دماتجهیز، ۲۰۲۱ و لئوتهویه، ۲۰۲۲))

به کمک رابطه خطی بدست آمده، میتوان ظرفیت بهینه بویلر را بدست آورد. در ادامه تجهیزات سرمایشی توضیح داده شده‌اند.

۲.۲. چیلر

چیلر تراکمی، تجهیز کمکی برای خنک کردن فضای درون گلخانه و حفظ دمای آن در شرایط مطلوب است. برای مدل‌سازی این تجهیز از رابطه ۴ الی ۶ استفاده شده است. رابطه ۴، توان مصرفی را با توجه به ضریب عملکرد محاسبه می‌کند. رابطه ۵ بیان میکند که سرمایش تولید شده باید از ظرفیت چیلر کمتر باشد، از طرفی از آنجاییکه اطلاعات جمع‌آوری شده برای تخمین هزینه چیلر متعلق به چیلرهای زیر ۱۰۰ کیلووات بوده است، حداکثر ظرفیت چیلر برابر با ۱۰۰ کیلووات در نظر گرفته شده

۱. Damatajhiz
۲. Leotahvieh

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

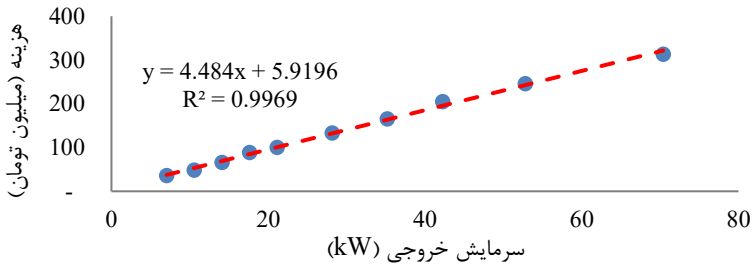
است. رابطه ۶ نشان می‌دهد که اگر چیلر در سیستم نباشد ($X_{Chiller} = ۰$) ظرفیت آن برابر صفر است و در صورت صفر نبودن متغیر باینری این قید بی‌اثر است.

$$Q_{c,Chiller}(t)[kWh] = W_{Chiller}(t)[kWh] \times COP_{Chiller} \quad (۴)$$

$$Q_{c,Chiller}(t) \leq Cap_{Chiller}, \qquad Cap_{Chiller} \leq ۱۰۰ \quad (۵)$$

$$Q_{c,Chiller}(t) \leq X_{Chiller} \times M \quad (۶)$$

در این مطالعه ، ضریب عملکرد برابر با ۴ فرض شده است (احمدی و خورانی، ۲۰۲۰ و چن،۲۰۱۵) همچنین مشابه بویلر، هزینه چیلر نیز با توجه به قیمت اعلام شده توسط تولیدکنندگان ایرانی به صورت یک معادله خطی بدست آمده است (احمدی و خورانی،۲۰۲۰ و مهتاب‌گستر، ۲۰۲۱). این معادله در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۳. تابع هزینه چیلر (ماخذ: (احمدی و خورانی،۲۰۲۰ و مهتاب گستر، ۲۰۲۱))

پس از تبدیل تابع بدست آمده به حسب دلار، هزینه ثابت چیلر برابر با ۲۹۵.۹۸ دلار و هزینه به ازای هر کیلووات ظرفیت سرمایشی برابر با ۲۲۴.۲ دلار خواهد بود. در ادامه سیستم سرمایشی اصلی در نظر گرفته شده که از نوع تبخیری است توضیح داده می‌شود.

۲.۳. فن و پد

عملکرد سیستم فن و پد بر مبنای اثر تبخیر است. در این سیستم آب به پدی که پشت یک فن، بر روی دیوار گلخانه، قرار دارد وارد می‌شود. با به کار افتادن فن هوا از پشت وارد شده و با عبور از پد خنک

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

می‌شود. از آنجاییکه عملکرد این سیستم به طور مستقیم بر تقاضای انرژی موثر است، اثر آن در معادله تقاضا دیده شده است. رابطه ۷ مدل تقاضا با در نظر گرفتن این مهم را نشان می‌دهد.

$$T_{in}(t) = \frac{۱۰۰۰Q(t) + U(t)A\left(T_{out}(t) - DT_{effective}(t)\right) + \rho_{air}VC_{air}T_{in}(t-۱)}{U(t)A + \rho_{air}VC_{air}} \quad (۷)$$

معادله ۷ با در نظر گرفتن تلفات حرارتی از سطح گلخانه و اینرسی حرارتی داخلی، به محاسبه دما و تقاضای انرژی گلخانه در هر ساعت می‌پردازد. در این رابطه منظور از $Q(t)$ حرارت دریافت شده از بویلر (با علامت مثبت) یا جذب شده توسط چیلر (با علامت منفی) برحسب kWh است. $U(t)$ ضریب کلی انتقال حرارت برحسب $\frac{W}{m^{۲}C}$ است، این پارامتر متغیر در نظر گرفته شده و رابطه مربوط به محاسبه آن در هر ساعت در معادله ۸ آورده شده است (رشید و همکاران، ۲۰۱۷). این رابطه نشان می‌دهد که با افزایش اختلاف دمای داخل و خارج، ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. منظور از $DT_{effective}(t)$، کاهش دمای موثر ایجاد شده توسط سیستم فن و پد است که از معادله ۹ محاسبه می‌شود. A و V به ترتیب نشان‌دهنده مساحت انتقال حرارت و حجم گلخانه می‌باشند. $T_{out}(t)$ دمای هوای محیط در لحظه t را نشان می‌دهد. VFR_f دبی حجمی فن نوع f را نشان می‌دهد. $Nfan_f(t)$ تعدادی از فن نوع f است که در ساعت t کار می‌کند. ACH نیز بیانگر تعداد تعویض هوا در یک ساعت برای عملکرد کارای سیستم فن و پد است، به نسبتی که حجم هوای تعویض شده کمتر از ACH مورد نیاز باشد، افت دمای گلخانه کمتر خواهد بود که این مورد در رابطه ۹ در نظر گرفته شده است. همچنین η_{FP} نمایانگر بازدهی سیستم فن و پد است که از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود. $DT_{max}(t)$ بیشترین مقدار کاهش دمای هوای بیرون توسط پد است که با توجه به رابطه ۱۱ بدست میاید. ρ_{air} و C_{air} نیز به ترتیب چگالی و ظرفیت گرمایی هوا را نشان می‌دهند.

$$U = \alpha|T_{in}(t) - T_{out}(t)| + U. \quad (۸)$$

$$DT_{effective}(t) = \frac{\sum_f [VFR_f \times Nfan_f(t)]}{V * ACH}\eta_{FP}DT_{max}(t) \quad (۹)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

$$\eta_{FP} = \frac{DT_{actual}(t)}{DT_{max}(t)} \quad (۱۰)$$

$$DT_{max}(t) = T_{out,dry}(t) - T_{out,wet}(t) \quad (۱۱)$$

دمای حباب خشک در هر ساعت به صورت برونزا و با توجه به داده‌های جمع‌آوری شده برای مناطق اقلیمی مختلف در دسترس است. دمای حباب‌تر نیز با در نظر گرفتن درصد رطوبت نسبی، از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شو(استال[۱]، ۲۰۱۱).

$$T_{wet} = T_{dry} * \tan^{-1}(۰.۱۵۱۹۷۷ * (RH + ۸.۳۱۳۶۵۹)^{۰.۵}) + tan^{-1}(T_{dry} + RH) - tan^{-1}(RH - ۱.۶۷۶۳۳۱) + ۰.۰۰۳۹۱۸۳۸ * RH^{۱.۵} * tan^{-1}(۰.۰۲۳۱۰۱ * RH) - ۴.۶۸۶۰۳۵ \quad (۱۲)$$

مقدار آب تبخیر شده برای کاهش دمای هوای ورودی از معادله ۱۳ بدست می‌آید که در آن L_v گرمای نهان تبخیر آب است و $m_{water}(t)$ مقدار آب تبخیر شده در هر ساعت است. مقدار آب تبخیر شده ($Rate_{Evaporation}$) محدود به مساحت پد (A_{pad}) است که در معادله ۱۴ آورده شده است. از طرفی با توجه به معادله ۱۵ مساحت پد دارای محدودیت است و نباید از $A_{pad,max}$ بیشتر شود، اگر مدل تصمیم به استفاده از فن و پد بگیرد متغیر باینری X_{fp} برابر با یک است و در غیر این صورت برابر با صفر خواهد بود. همچنین معادله ۱۶ تعداد فن نوع f که در ساعت t مشغول به کار است نباید از کل تعداد فن‌های نوع f بیشتر باشد. در ادامه با توجه به معادله ۱۷، حجم هوای جابه‌جا شده توسط فن‌ها باید حداکثر به اندازه تعداد تعویض هوای در نظر گرفته شده باشد.

$$\rho_{air} \times C_{air} \times \eta_{FP} \times DT_{max}(t) \times \sum_{f} [VFR_f \times Nfan_f(t)] = m_{water}(t) L_v \quad (۱۳)$$

$$\frac{m_{water}(t)}{Rate_{Evaporation}} \leq A_{pad} \quad (۱۴)$$

$$A_{pad} \leq X_{fp} \times A_{pad,max} \quad (۱۵)$$

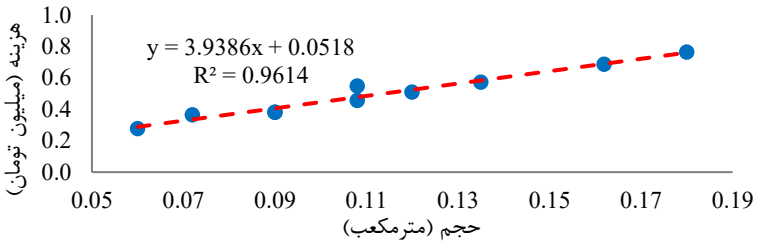
$$Nfan_f(t) \leq Numfan_f \quad (۱۶)$$

۱. stull

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

$$\sum_{f}[VFR_f \times Nfan_f(t)] \leq ACH \times V \quad (۱۷)$$

در پایان این بخش تابع هزینه پد براساس حجم آن، در شکل ۴، آورده شده است (کراپ[۱]، ۲۰۲۱).



شکل۴. تابع هزینه پد (ماخذ: (کراپ، ۲۰۲۱))

با توجه به این رابطه هزینه ثابت پد برابر با ۲.۵۹ دلار و هزینه متغیر برابر با ۱۹۶.۹۳ دلار بر متر مکعب می‌باشد. در ادامه این بخش معادلات مربوط به تعادل حرارتی و الکتریسیته توضیح داده شده‌اند.

۲.٤. تعادل حرارت و الکتریسیته

برای کنترل دمای گلخانه، انحراف دما از مقدار مطلوب کمینه شده است که به کمک رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود. انحراف دما به دو بخش مثبت (بیش از دمای تنظیم شده) و منفی (کمتر از دمای تنظیم شده) تقسیم می‌شود که در رابطه ۱۹ به ترتیب با TD_P و TD_N نشان داده شده‌اند. هدف مدل در کنار کاهش هزینه‌ها، کاهش مجموع این دو مقدار نیز می‌باشد. رابطه ۲۰ بیان می‌کند که دمای داخل باید حتما در بازه مشخصی باشد. رابطه ۲۱ تقاضای حرارت را نشان می‌دهد که در رابطه ۷ مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت رابطه ۲۲ با در نظر گرفتن مصرف توان (P_f) و تعداد فن نوع f فعال در لحظه t، در کنار توان مصرفی چیلر، به محاسبه مقدار برق دریافتی از شبکه می‌پردازد.

$$TD(t) = T_{in}(t) - T_{set}(t) \quad (۱۸)$$

۱. Crop

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

$$TD(t) = TD_P(t) - TD_N(t) \quad (۱۹)$$

$$T_{min} \le T_{in}(t) \le T_{max} \quad (۲۰)$$

$$Q(t) = Q_{h,Boiler}(t) - Q_{c,Chiller}(t) \quad (۲۱)$$

$$\sum_f [P_f \times Nfan_f(t)] + W_{Chiller}(t) = G_E(t) \quad (۲۲)$$

در بخش بعد تابع هدف مسئله معرفی شده است.

۲.۵. تابع هدف

تابع هدف مسئله در رابطه ۲۳ معرفی شده و در ادامه اجزای آن بررسی می‌شوند.

$$\min Cost = (۱ - \beta) \times (IC + OC) + \beta \sum_t [TD_P(t) + TD_N(t)] \quad (۲۳)$$

منظور از IC هزینه‌های اولیه و OC هزینه عملکردی تجهیزات است که از روابط ۲۴ و ۲۵ محاسبه می‌شوند. تابع یاد شده دارای دو هدف کمینه‌سازی هزینه و کنترل دما است که اهمیت هر یک توسط فاکتور وزن‌دهی β، که مقداری بین ۰ و ۱ دارد، مشخص می‌شود. هزینه اولیه شامل هزینه ثابت (FC) و متغیر (VC) مربوط به بویلر، چیلر و پد در شکل‌های ۲ تا ۴ محاسبه شده است. با توجه به اینکه دوره عمر گلخانه ۲۰ سال فرض شده است و پد باید هر ۵ سال تعویض شود پس ۴ تعویض پد وجود خواهد داشت که ضریب هزینه اولیه پد در رابطه ۲۴ است (تجرو و فرانکو ۲۰۲۱). همچنین از آنجاییکه معادله هزینه پد بر اساس حجم است، مساحت آن در ضخامت ضرب می‌شود.

$$\begin{aligned} IC = CRF[\, ۴\big(A_{pad} \times Pad_{thikness} \times VC_{Pad} + FC_{Pad} \times X_{FP}\big) \\ + \sum_f \big[Numfan_f \times C_f\big] \\ + (VC_{Chiller} \times Cap_{Chiller} + FC_{Chiller} \times X_{Chiller}) \\ + (VC_{Boiler} \times Cap_{Boiler} + FC_{Boiler} \times X_{Boiler})\,] \end{aligned} \quad (۲۴)$$

$$OC = \sum_t \big[P_{G_E}(t) \times G_E(t) + P_{G_{NG}} \times V_{NG}(t) + P_W \times m_{water}(t)\big] \quad (۲۵)$$

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

برای سالانه کردن هزینه اولیه از شاخص CRF، مطابق رابطه ۲۶ استفاده شده است. با فرض دوره عمر ۲۰ سال (n) و نرخ تنزیل ۱۵٪ (i)، مقدار CRF برابر با حدود ۰.۱۶ است.

$$CRF = \frac{i(۱+i)^n}{(۱+i)^n - ۱} \quad (۲۶)$$

در بخش بعد مشخصات گلخانه مفروض و مقدار پارامترها آورده شده‌اند.

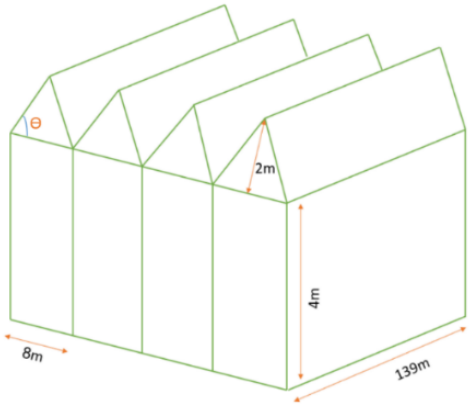
۳. مفروضات مطالعه موردی

این بخش به بیان مفروضات مدل یکپارچه بهینه‌سازی هاب آب و انرژی اختصاص دارد. در ابتدا ساختار گلخانه کشت گوجه فرنگی توضیح داده شده، سپس شرایط اقلیمی محل احداث مورد بررسی قرار گرفته است و در نهایت پارامترهای به کار رفته بیان شده‌اند. ساختار و ابعاد گلخانه در شکل ۵ نشان داده شده است.

جنس پوشش گلخانه شیشه در نظر گرفته شده است. برای محاسبه ضریب کلی انتقال حرارت در هر ساعت از رابطه ۸ استفاده شده است. در این رابطه، $U_.$ مقدار پایه ضریب را نشان می‌دهد که برابر با ۴ است و ثابت α برابر با ۰.۰۵ در نظر گرفته شده است (راشی[۱]د و همکاران،۲۰۱۷). همچنین زاویه θ برابر با ۳۰ درجه فرض شده است.

۱. Rasheed

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل۵. ساختار گلخانه در نظر گرفته شده

گلخانه مفروض در نواحی مختلف آب و هوایی با توجه به دسته‌بندی ارائه شده در مطالعه (حیدری و علیجانی،۱۳۷۸) مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس این دسته‌بندی، ایران دارای شش ناحیه اقلیمی اصلی است (که با حروف A تا F نامگذاری شده‌اند) که هر یک به زیرناحیه‌هایی تقسیم شده‌اند. جدول ۱ شهرهای منتخب هر ناحیه را نشان می‌دهد. اطلاعات آب و هوایی مربوط به هر کدام از این نواحی از مراجع (فنینگر [۱]و استافل[۲]، ۲۰۱۶) استخراج شده است. همچنین جدول ۲، مقدار عددی پارامترهای به کار رفته در مدل را نشان میدهد.

جدول ۱. شهرهای در نظر گرفته شده در هر ناحیه اقلیمی

ناحیه	شهر	میانگین دما	انحراف معیار دما	ناحیه	شهر	میانگین دما	انحراف معیار دما
A۱	رشت	۱۶/۰۹	۷/۶۸	C۳	شیراز	۱۶/۴	۱۱
A۲	بابلسر	۱۸/۳۵	۷/۴۸	D	بندرعباس	۲۷/۳	۸
B۱	تبریز	۹/۷	۱۰/۹	E۱	تهران	۱۲/۸	۱۰/۹
B۲	شاهرود	۱۱/۸	۱۰/۳	E۲	کرمان	۱۳/۷	۱۰
C۱	کرمانشاه	۱۴	۱۱/۷	F۱	سمنان	۱۶/۲	۱۱/۲
C۲	اراک	۱۲/۱	۱۱/۶	F۲	خوزستان	۲۶	۱۱/۸

۲. Pfenninger
۳. Staffell

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

جدول ۲. مقدار مفروض پارامترهای مدل یکپارچه هاب آب و انرژی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$LHV_{NG}\ [kWh/m^3]$	۹/۷	$P_{G_{NG}}\ [IRR/m^3]$	۹۲۰[5]
$\eta_{Boiler}\ [\%]$	۹۰	$COP_{Chiller}\ [-]$	۴
$T_{set}(t)\ [°C]$	۲۴[1]	$T_{min}\ [°C]$	۱۰
$T_{max}\ [°C]$	۳۰	$A\ [m^2]$	۴۴۴۸
$L_v\ [kJ/Kg]$	۲۵۴۳	$V\ [m^3]$	۲۳۰۰۰
$\rho_{air}\ [kg/m^3]$	۱/۲۲۵	$C_{air}\ [kJ/kg°C]$	۱/۰۰۶
$\eta_{FP}[\%]$	۸۰[2]	$Rate_{Evaporation}\ [L/m^2h]$	۲۴[6]
$Pad_{thikness}\ [m]$	۰/۱	$A_{pad,max}\ [m^2]$	۴۱۷[7]
$ACH\ [-]$	۵[3]	$P_W\ [IRR/m^3]$	۸۰۰۰
$C_f\ [Million\ Toman/fan]$	نوع ۱: ۰.۵۶۲[4] نوع ۲: ۰.۹۴	$P_f\ [W/fan]$	نوع ۱: ۱۶۵[4] نوع ۲: ۴۱۰
$VFR_f[m^3/h]$	نوع ۱: ۳۰۰۰[4] نوع ۲: ۱۱۲۰۰	$P_{G_E}(t)\ [IRR/kWh]$	ساعات کم‌باری: ۷۵.۵[8] ساعات میان‌باری: ۱۵۱ ساعات اوج بار: ۳۰۲

[1] با توجه به ناحیه دمایی رشد گوجه‌فرنگی (خسروی و پزشک پور، ۲۰۱۵)

[2] با توجه به مرجع (راویشانکار[1] و همکاران، ۲۰۲۱)

[3] با توجه به مرجع (کستانتین[2] و همکاران، ۲۰۲۱)

[4] با توجه به مراجع (شرکت دمنده و رجبی،۲۰۲۱)

[5] میانگین تعرفه فصل گرم و سرد مصوب سال ۱۴۰۰

[6] با توجه به مرجع (نلسون[3]، ۲۰۱۱)

[7] برابر با ۷۵٪ مساحت دیواره گلخانه شکل ۱

[8] تعرفه بخش کشاورزی سال ۱۳۹۹

۱. Ravishankar
۲. Costantino
۳. Nelson

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

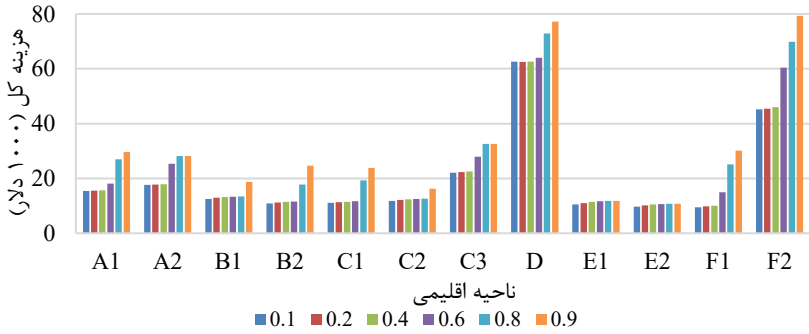
با توجه به مفروضات توضیح داده شده، مدل توسعه داده شده در نواحی اقلیمی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن در بخش بعد آورده شده است.

٤. بحث و جمع‌بندی

در این بخش به بررسی نتایج و مقایسه اقلیم‌ها پرداخته شده است. در ابتدا هزینه کل و پس از آن مصرف حامل‌های آب، برق و گاز بررسی شده‌اند. در نهایت ظرفیت بهینه مبدل‌های انرژی مورد بحث قرار گرفته است.

٤.۱. هزینه کل

هزینه کل، که مجموع رابطه ۲۴ و ۲۵ است، در شکل ۶ بر حسب β آمده است. این شاخص به سرمایه‌گذار دید کلی درباره هزینه سیستم انرژی در نواحی مختلف اقلیمی و تغییرات آن در اثر افزایش حساسیت به کنترل دما، می‌دهد. در این نمودار و نمودارهای آتی، رنگ‌های مختلف مقادیر مختلف β را نشان می‌دهند. هزینه اولیه و عملکردی در پیوست ۱ بررسی شده است.



شکل۶. ساختار گلخانه در نظر گرفته شده (ماخذ: محاسبات پژوهش)

همانطور که مشخص است، هزینه احداث و بهره‌برداری گلخانه در نواحی D (بندعباس) و F۲ (خوزستان) بسیار بالا است. از طرفی بهره‌برداری از گلخانه در نواحی E۱ (تهران) و E۲ (کرمان) دارای

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

کمترین هزینه است. همچنین ناحیه B۱ (تبریز) و C۲ (اراک) نیز برای این منظور مناسب هستند. عمده دلیل پایین بودن هزینه احداث و بهره‌برداری در ۴ ناحیه یاد شده، مناسب بودن دما و عدم نیاز به استفاده از چیلر است؛ به طوری که برای تهران و کرمان در هیچ یک از مقادیر β از چیلر استفاده نشده است و خنک‌سازی با کمک سیستم فن و پد بوده است. در تبریز و اراک نیز تنها در حالت $\beta = ۰.۹$ چیلر بکار گرفته شده است و در سایر موارد استفاده از فن و پد کافی بوده است.

٤.۲. مصرف آب، برق و گاز

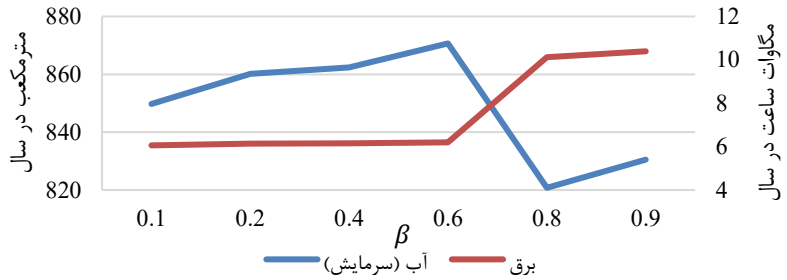
در این بخش مصرف بهینه آب، برق و گاز در نواحی اقلیمی بررسی شده، با در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای اهمیت کنترل دما، آورده شده است. جدول ۳ مصرف برق سالانه را نشان می‌دهد.

جدول ۳. مصرف برق (مگاوات ساعت در سال) در نواحی مختلف آب و هوایی (ماخذ: محاسبات پژوهش)

F۲	F۱	E۲	E۱	D	C۳	C۲	C۱	B۲	B۱	A۲	A۱	β
۱۳۶/۵	۷/۱۸	۳/۴۳	۳/۸۱	۲۱۲/۹۱	۲۲/۴۴	۴/۵	۶/۰۶	۳/۷۶	۳/۱۶	۳۵/۷۵	۱۵	۰/۱
۱۳۶/۵	۷/۲۵	۳/۵۴	۳/۸۹	۲۱۲/۵۴	۲۱/۹۲	۴/۵	۶/۱۴	۳/۸۸	۳/۴۶	۳۵/۷۵	۱۵	۰/۲
۱۳۷/۱۲	۷/۲۷	۳/۶۸	۴/۱	۲۱۲/۵	۲۱/۶۱	۴/۶۶	۶/۱۵	۳/۸۹	۳/۴۶	۳۵/۸۲	۱۵/۰۳	۰/٤
۱۵۲/۶۹	۱۲/۵	۳/۶۹	۴/۰۵	۲۱۳/۳۱	۲۵/۲۶	۴/۶	۶/۲	۳/۹	۳/۴۷	۴۲/۴۷	۱۶/۴۷	۰/٦
۱۵۶/۷۸	۱۹/۱	۳/۸	۴/۱۳	۲۱۶/۸۵	۲۷/۶۲	۴/۶	۱۰/۱۲	۶/۱۱	۳/۴۷	۸۷/۴۳	۱۹/۷۴	۰/۸
۱۵۸/۳	۲۰/۶۶	۳/۶۹	۴/۱۳	۲۱۷/۵	۲۷/۴۷	۶/۲	۱۰/۴	۶/۸۷	۴/۸۵	۴۳/۹	۲۰/۲۲	۰/۹

براساس نتایج بدست آمده، افزایش β منجر به رشد استفاده از چیلر و در نتیجه رشد مصرف برق شده است. لازم به ذکر است، استفاده از چیلر به جای فن و پد منجر به کنترل بهتر دمای درون سازه، افت مصرف آب و رشد مصرف برق می‌شود. این مورد در شکل ۷ برای ناحیه نمونه C۱ (کرمانشاه) نشان داده شده است. البته در برخی از موارد نیز این دو در کنار یکدیگر رشد داشته‌اند.

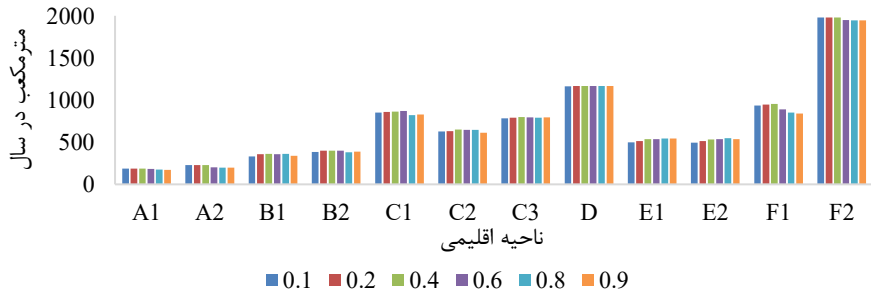
[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل۷. رابطه مصرف برق و آب در ناحیه C۱ با تغییرات β (ماخذ: محاسبات پژوهش)

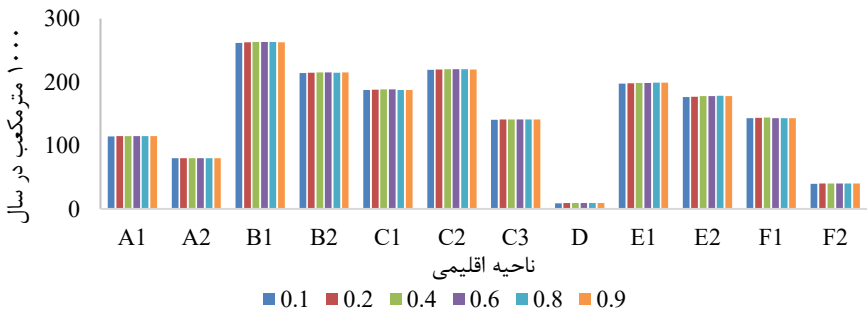
مصرف آب سیستم فن و پد شکل ۸ نشان داده شده است. براین اساس، مصرف آب در نواحی گرم D و F۲ بالا و در نواحی شمالی کشور یعنی A۱ و A۲ به نسبت پایین است. علت این امر نیاز سرمایشی کم این نواحی نیست بلکه پایین بودن پتانسیل استفاده از سرمایش تبخیری به دلیل بالا بودن رطوبت نسبی هوا است.

مصرف گاز در اقلیم‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که اشاره شد، مصرف گاز در نواحی E۱ و F۲ به دلیل بالا بودن دمای هوا در غالب اوقات، بسیار پایین است. از طرفی به طور کلی با افزایش حساسیت به دمای درون گلخانه مصرف گاز افزایش یافته است.



شکل۸. مصرف آب سرمایش تبخیری در نواحی مختلف اقلیمی (ماخذ: محاسبات پژوهش)

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل۹. مصرف گاز طبیعی در نواحی مختلف اقلیمی (ماخذ: محاسبات پژوهش)

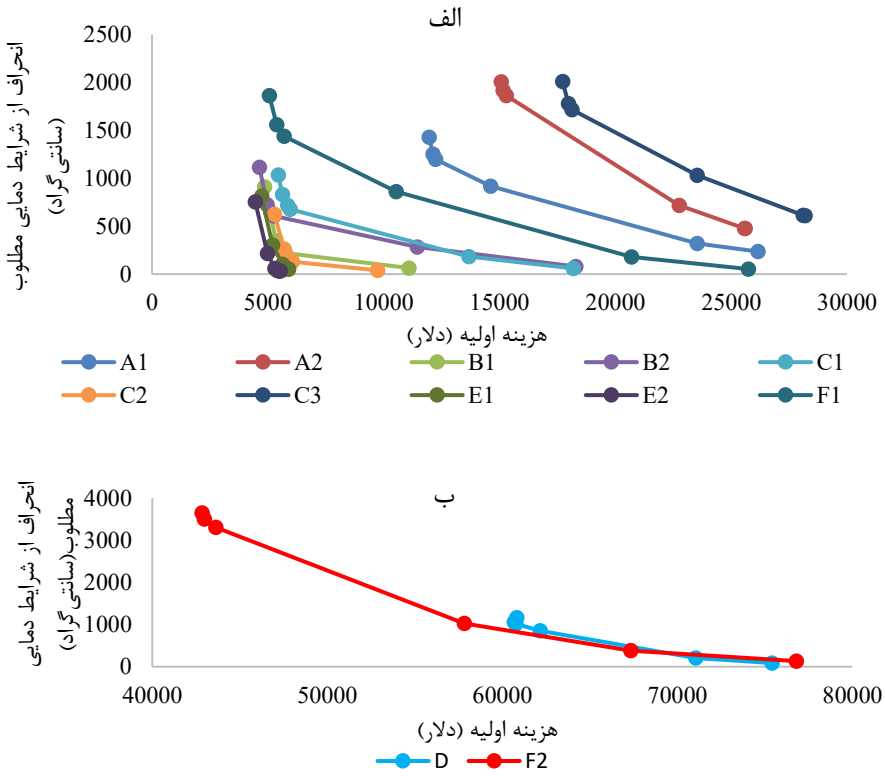
در ادامه منحنی پارتوی بهینه‌سازی‌های انجام گرفته آورده شده است.

٤.۳. جبهه پارتو

همانطور که در بخش ۲.۵ اشاره شد، بهینه‌سازی صورت گرفته در این مطالعه دارای دو هدف است. در این بخش منحنی پارتو نواحی اقلیمی، برحسب β رسم شده است. این منحنی نشان‌دهنده بده-بستان[۱] بین هزینه احداث و کنترل دما و در اثر تغییر β است. با افزایش β، هزینه اولیه بالاتر رفته و در مقابل انحراف از دمای ایده‌آل کاهش می‌یابد که این مورد در شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان داده شده است.

[۱] Trade off

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]



شکل۱۰. جبهه پارتو در نواحی اقلیمی مختلف (ماخذ: محاسبات پژوهش)

شایان ذکر است در این نمودار با حرکت از چپ به راست مقدار β افزایش می‌یابد. همانطور که از شکل ۷ مشخص است، نواحی F۲ و F۱ بیشترین واکنش را به تغییرات β داشته‌اند. این بدان معنا است که برای کنترل دمای داخل سازه در این نواحی، باید هزینه بیشتری صرف شود. از طرفی نواحی E۲ و E۱ کمترین واکنش را به تغییرات این پارامتر داشته‌اند به این معنا که با صرف هزینه کمتر در این نواحی، می‌توان کنترل بهتری روی دمای گلخانه داشت. لازم به ذکر است ظرفیت بهینه تجهیزات در پیوست ۲ آورده شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه هزینه‌های اولیه، عملکردی و کل احداث یک گلخانه در نواحی مختلف اقلیمی به صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه بررسی شد. بدین منظور، کشور ایران به ۱۲ ناحیه اقلیمی تقسیم و در هر بخش یک شهر به نمایندگی انتخاب و داده‌های آب و هوایی آن جمع‌آوری شد. شهرهای در نظر گرفته شده عبارت از رشت (A۱)، بابلسر (A۲)، تبریز (B۱)، شاهرود (B۲)، کرمانشاه (C۱)، اراک (C۲)، شیراز (C۳)، بندرعباس (D)، تهران (E۱)، کرمان (E۲)، سمنان (F۱) و خوزستان (F۲) هستند.

تجهیزات انرژی در دسترس شامل بویلر گازسوز برای تامین گرمایش، سرمایش تبخیری به کمک سیستم فن و پد و چیلر تراکمی است. برای بدست آوردن ظرفیت بهینه تجهیزات، مدل خطی یکپارچه هاب آب و انرژی، شامل بخش عرضه و تقاضای انرژی، توسعه داده شده است. به منظور تحلیل دقیق‌تر نتایج، از یک مدل دو هدفه استفاده شده است که هدف اول آن کمینه کردن هزینه سیستم انرژی و هدف ثانویه آن، حفظ دمای درون سازه در دمای مطلوب کاربر است.

پس از حل مدل، هزینه کل و مقدار مصرف حامل‌های آب، برق و گاز بدست آمده و مورد تحلیل قرار گرفت. بر این اساس، بیشترین هزینه در طی یک دوره عملکرد ۲۰ ساله مربوط به بندرعباس و خوزستان است که به ترتیب برابر با ۶۰ و ۵۰ هزار دلار است. بالا بودن نیاز سرمایشی، که منجر به افزایش ظرفیت چیلر می‌شود، علت اصلی هزینه زیاد سیستم انرژی در این نواحی است. همچنین کمترین هزینه مربوط به نواحی تهران و کرمان است که در محدوده ۱۰ هزار دلار قرار دارد. در این نواحی به ازای هیچیک از مقادیر β، نیاز به استفاده از سیستم سرمایش تراکمی نیست و سیستم تبخیری جوابگوی نیاز سرمایشی است.

در مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود که دقت مدل تقاضای انرژی استفاده شده افزایش یابد. همچنین به منظور درک بهتر اثر تغییرات آب و هوایی می‌توان از مدل‌های تصادفی برای بدست آوردن ظرفیت

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

بهینه تجهیزات استفاده نمود. استفاده از رویکردهای مبتنی بر بهینه‌سازی مقاوم نیز می‌تواند راهی برای درک عملکرد مدل در بدترین شرایط ممکن باشد.

٦. منابع

Costantino, A., Comba, L., Sicardi, G., Bariani, M., & Fabrizio, E. (۲۰۲۱). Energy performance and climate control in mechanically ventilated greenhouses: A dynamic modelling-based assessment and investigation. *Applied Energy*, *288*, ۱۱۶۵۸۳. https://doi.org/۱۰.۱۰۱۶/j.apenergy.۲۰۲۱.۱۱۶۵۸۳

Cuce, E., Harjunowibowo, D., & Cuce, P. M. (۲۰۱٦). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *64*, ۳٤–۵۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱٦,۰۵,۰۷۷

Damandeh company. (۲۰۲۱). *Damandeh Co. fan catalogue*. Damandeh Co. https://www.damandeh.com/۱۵۸/کاتالوگ.aspx

Damatajhiz Co. (۲۰۲۱). *Steel hot water boiler*. Damatajhiz. https://damatajhiz.com/categories/۱۷/دیگ-آبگرم-فولادی

Esmaeli, H., & Roshandel, R. (۲۰۲۰). Optimal design for solar greenhouses based on climate conditions. *Renewable Energy*, *145*, ۱۲۵۵–۱۲٦۵. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.renene.۲۰۱۹,۰٦,۰۹۰

FAO. (۲۰۱٦). Sustainable agricultural development for food security and nutrition: what roles for livestock? A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. July, ۱٤۰.

Garwood, P. (۲۰۱۹). *World hunger is still not going down after three years and obesity is still growing*. WHO; WHO. https://www.who.int/news/item/۱۵-۰۷-۲۰۱۹-world-hunger-is-still-not-going-down-after-three-years-and-obesity-is-still-growing-un-report

Ghosal, M. K., & Tiwari, G. N. (۲۰۰٤). Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Solar Energy*, *76*(۵), ٦۰۳–٦۱۳. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.solener.۲۰۰۳,۱۲,۰۰٤

Golzar, F., Heeren, N., Hellweg, S., & Roshandel, R. (۲۰۲۱). Optimisation of energy-efficient greenhouses based on an integrated energy demand-yield production model. *Biosystems Engineering*, *202*, ۱–۱۵. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.biosystemseng.۲۰۲۰,۱۱,۰۱۲

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

Ha, T., Lee, I. B., Kwon, K. S., & Hong, S. W. (۲۰۱۵). Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using building energy simulation model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *8*(٦), ۱۱٦–۱۲۷. https://doi.org/۱۰,۳۹٦۵/j.ijabe.۲۰۱۵۰۸۰٦,۲۰۳۷

Homayouni, F., Roshandel, R., & Hamidi, A. A. (۲۰۱۷). Techno-economic and environmental analysis of an integrated standalone hybrid solar hydrogen system to supply CCHP loads of a greenhouse in Iran. *International Journal of Green Energy*, *14*(۳), ۲۹۵–۳۰۹. https://doi.org/۱۰,۱۰۸۰/۱۵٤۳۵۰۷۵,۲۰۱٦,۱۲۱۷٤۱۷

Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorrow, G., & Denzer, A. (۲۰۲۰). Energy efficient operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *117*(January ۲۰۱۹), ۱۰۹٤۸۰. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.rser.۲۰۱۹,۱۰۹٤۸۰

Khosravi, K., & Pezeshkipour, P. (۲۰۱۵). *Tomato Cultivation Guide*. Agricultural education and promotion. https://doi.org/٦۳۵,٦٤۲

Kim, B. S., Kang, B. G., Choi, S. H., & Kim, T. G. (۲۰۱۷). Data modeling versus simulation modeling in the big data era: Case study of a greenhouse control system. *Simulation*, *93*(۷), ۵۷۹–۵۹٤. https://doi.org/۱۰,۱۱۷۷/۰۰۳۷۵٤۹۷۱۷٦۹۲۸٦٦

Leotahvieh Co. (۲۰۲۲). *Boiler and spa boiler*. Leotahvieh. https://leotahvieh.ir/۸۷-بویلر-و-دیگ-آبگرم#

Mahtab Gostar Co. (۲۰۲۱). *Chiller price*. Mahtab Gostar Co. https://cooling-tower.ir/چیلر/

Nelson, P. V. (۲۰۱۱). *Greenhouse Operation and Management* (۷th ed.). Pearson. https://www.pearson.com/us/higher-education/program/Nelson-Greenhouse-Operation-and-Management-۷th-Edition/PGM٦٤۷۷۸.html

Ouazzani Chahidi, L., Fossa, M., Priarone, A., & Mechaqrane, A. (۲۰۲۱). Evaluation of Supervised Learning Models in Predicting Greenhouse Energy Demand and Production for Intelligent and Sustainable Operations. In *Energies* (Vol. ١٤, Issue ١٩). https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/en۱۴۱۹۶۲۹۷

Pasban-Gajan, A., Moeini-Aghtaie, M., Parvini, Z., & Fotuhi-Firuzabad, M. (۲۰۱۷). Optimal scheduling of renewable-based energy hubs considering time-of-use pricing scheme. *2017 Smart Grid Conference (SGC)*, ۱–٦. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/SGC.۲۰۱۷,۸۳۰۸۸۷۱

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

Pfenninger, S., & Staffell, I. (۲۰۱٦). Long-term patterns of European PV output using ۳۰ years of validated hourly reanalysis and satellite data. *Energy*, *114*, ۱۲۵۱–۱۲٦۵. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.energy.۲۰۱٦,۰۸,۰٦۰

Rado Corp. (۲۰۲۱). *Pad price*. RadoCorp. yun.ir/om۲vac

Rajabi. (۲۰۲۱). *Damandeh fan price list*. Gatesanat. https://gatesanat.com/damande-price-list/

Rasheed, A., Lee, J., & Lee, H. (۲۰۱۷). Development of a model to calculate the overall heat transfer coeffcient of greenhouse covers. *Spanish Journal of Agricultural Research*, *5*(۱۱). https://doi.org/http://dx.doi.org/۱۰,۵٤۲٤/sjar/۲۰۱۷۱۵٤-۱۰۷۷۷

Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Zareipour, H., & Moeini-Aghtaieh, M. (۲۰۱۷). A Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *8*(۵), ۲۲۱۷–۲۲۲۷. https://doi.org/۱۰,۱۱۰۹/TSG.۲۰۱٦,۲۵۱۸۹۲۰

Ravishankar, E., Booth, R. E., Saravitz, C., Sederoff, H., Ade, H. W., & O'Connor, B. T. (۲۰۲۰). Achieving Net Zero Energy Greenhouses by Integrating Semitransparent Organic Solar Cells. *Joule*, *4*(۲), ٤۹۰–۵۰٦. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.joule.۲۰۱۹,۱۲,۰۱۸

Roshandel, R., Golzar, F., & Astaneh, M. (۲۰۱۸). Technical, economic and environmental optimization of combined heat and power systems based on solid oxide fuel cell for a greenhouse case study. *Energy Conversion and Management*, *164*, ۱٤٤–۱۵٦. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.enconman.۲۰۱۸,۰۲,۰۲۳

Sadeghi, H., Rashidinejad, M., Moeini-Aghtaie, M., & Abdollahi, A. (۲۰۱۹). The energy hub: An extensive survey on the state-of-the-art. *Applied Thermal Engineering*, *161*, ۱۱٤۰۷۱. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.applthermaleng.۲۰۱۹,۱۱٤۰۷۱

Sethi, V. P. (۲۰۰۹). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy*, *83*(۱), ۲۱–۳۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.solener.۲۰۰۸,۰۵,۰۱۸

Shah, M. M. (۲۰۰۸). Sustainable Development. *Encyclopedia of Ecology, Five-Volume Set*, ۳٤٤۳–۳٤٤٦. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/B۹۷۸-۰۰۸۰٤۵٤۰۵-٤,۰۰٦۳۳-۹

Shen, Y., Wei, R., & Xu, L. (۲۰۱۸). Energy consumption prediction of a greenhouse and optimization of daily average temperature. *Energies*, *11*(۱). https://doi.org/۱۰,۳۳۹۰/en۱۱۰۱۰۰٦۵

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

Staffell, I., & Pfenninger, S. (۲۰۱٦). Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*, *114*, ۱۲۲٤–۱۲۳۹. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.energy.۲۰۱٦,۰۸,۰٦۸

Stull, R. (۲۰۱۱). Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *50*(۱۱), ۲۲٦۷–۲۲٦۹. https://doi.org/۱۰,۱۱۷۵/JAMC-D-۱۱-۰۱٤۳,۱

Taki, M., Abdanan Mehdizadeh, S., Rohani, A., Rahnama, M., & Rahmati-Joneidabad, M. (۲۰۱۸). Applied machine learning in greenhouse simulation; new application and analysis. *Information Processing in Agriculture*, *5*(۲), ۲۵۳–۲٦۸. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.inpa.۲۰۱۸,۰۱,۰۰۳

Ted Goldammer. (۲۰۱۹). *Greenhouse Management A Guide to Operations and Technology*. Apex Publishers. http://www.greenhouse-management.com/

Yu, F. W., & Chan, K. T. (۲۰۰۵). Experimental determination of the energy efficiency of an air-cooled chiller under part load conditions. *Energy*, *30*(۱۰), ۱۷٤۷–۱۷۵۸. https://doi.org/https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.energy.۲۰۰٤,۱۱,۰۰۷

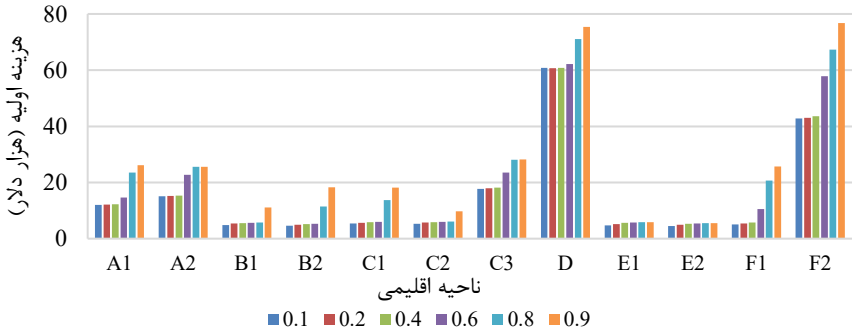
حیدری، ح.، و علیجانی، ب. (۱۳۷۸). طبقه‌بندی اقلیمی ایران با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره. *پژوهش‌های جغرافیایی*، *۳۷*، ۵۷–۷۴.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

۷. پیوست‌ها

۷.۱. پیوست ۱

هزینه اولیه سیستم بهینه انرژی، در نواحی مختلف و به ازای مقادیر مختلف پارامتر β در شکل ۱ نشان داده شده است. بر این اساس هزینه اولیه در محدوده ۱۰ الی ۶۰ هزار دلار (۲۰۰ الی ۱۲۰۰ میلیون تومان) قرار دارد.

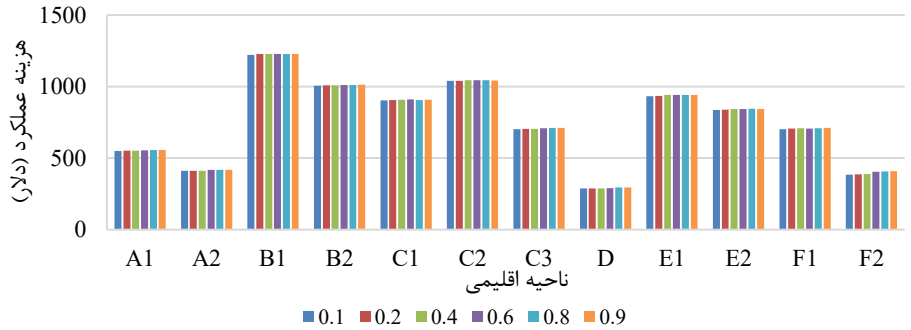


شکل پ.۱. هزینه اولیه در نواحی مختلف آب و هوایی با توجه به ظرفیت بهینه تجهیزات انرژی‌بر (ماخذ: محاسبات پژوهش)

مطابق شکل پ.۱، هزینه اولیه در نواحی B۱، B۲، C۱، C۲، E۱ و E۲ کمتر از ۱۰ هزار دلار است که منجر به اولویت داشتن این مناطق برای بررسی‌های آتی می‌شود. از آنجاییکه در مقادیر بالای β کنترل دمای گلخانه از اهمیت بالاتری برخوردار است، رشد این پارامتر منجر به افزایش ظرفیت سیستم انرژی و در نتیجه بالا رفتن هزینه اولیه می‌شود. در ادامه هزینه اولیه بررسی شده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

هزینه عملکردی شامل خرید آب، برق و گاز برای تامین نیازهای گرمایش و سرمایش گلخانه است. آب در پدهای خنک‌کننده، برق در چیلر و فن و گاز در بویلر مصرف می‌شود. هزینه عملکردی در نواحی مختلف و با فرض تغییرات β در شکل پ.۲ نشان داده شده است.



شکل پ.۲. هزینه عملکرد سالانه سیستم انرژی (ماخذ: محاسبات پژوهش)

با توجه به این شکل هزینه عملکرد سالانه، برخلاف هزینه اولیه، در ناحیه D۱ کمتر از سایر نواحی است. علت این امر این است که در این ناحیه (بندرعباس) نیاز به گرمایش بسیار پایین است در نتیجه مصرف گاز طبیعی از سایر نواحی بسیار کمتر است.

۷.۲. پیوست ۲

در این بخش ظرفیت بهینه تجهیزات که نتیجه بهینه‌سازی مدل یکپارچه عرضه-تقاضای هاب آب و انرژی هستند آورده شده است.

ناحیه	β	ظرفیت بویلر (kW)	ظرفیت چیلر (kW)	مساحت پد (m^2)	تعداد فن نوع ۱	تعداد فن نوع ۲
	۰/۱	۳۸۱/۰۸	۳۸/۳۵	۸/۱	۱	۱۰
	۰/۲	۴۱۷/۱۹	۳۸/۳۵	۸/۱	۱	۱۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

A۱	۰/۴	۴۴۲/۸	۳۸/۳۶	۸/۱	۱	۱۰
	۰/۶	۴۵۱/۵۵	۴۸/۸	۸/۰۷	۱	۱۰
	۰/۸	۴۵۶/۳۷	۸۸/۴	۸/۰۷	۱	۱۰
	۰/۹	۴۶۳/۲۷	۱۰۰	۸/۰۸	۱	۱۰
A۲	۰/۱	۲۹۵/۴۹	۵۴/۵	۶/۴	۱	۱۰
	۰/۲	۳۱۲/۷۱	۵۴/۵	۶/۴	۱	۱۰
	۰/۴	۳۳۳/۳۶	۵۴/۷	۶/۴	۱	۱۰
	۰/۶	۳۳۹/۲۹	۸۷/۸	۶/۵	۱	۱۰
	۰/۸	۳۶۰/۸۶	۱۰۰	۶/۶	۱	۱۰
	۰/۹	۳۶۵/۳۳	۱۰۰	۶/۶	۱	۱۰
B۱	۰/۱	۶۰۲/۵۷	۰	۱۹/۰۸	۰	۹
	۰/۲	۶۵۰/۳۲	۰	۲۱/۷۴	۱	۱۰
	۰/۴	۶۷۶/۵۶	۰	۲۲/۶۱	۱	۱۰
	۰/۶	۷۰۲/۸	۰	۲۲/۶۱	۱	۱۰
	۰/۸	۷۱۵/۸۱	۰	۲۳/۱۵	۱	۱۰
	۰/۹	۷۲۱/۵	۲۲/۳۳	۲۳/۲۲	۱	۱۰
B۲	۰/۱	۵۳۲/۰۵	۰	۱۹/۴۱	۱	۱۰
	۰/۲	۵۶۳/۲۱	۰	۲۱/۸	۱	۱۰
	۰/۴	۵۹۳/۶۸	۰	۲۲/۱۲	۱	۱۰
	۰/۶	۶۲۳/۹۷	۰	۲۲/۱۲	۱	۱۰
	۰/۸	۶۵۴/۵۸	۲۵/۸۵	۲۲/۱۲	۱	۱۰
	۰/۹	۶۷۳/۳۸	۵۵/۷۷	۲۲/۱۲	۱	۱۰
C۱	۰/۱	۵۰۶/۷۲	۰	۳۱/۱۱	۱	۱۰
	۰/۲	۵۳۱/۳۸	۰	۳۲/۰۸	۱	۱۰
	۰/۴	۵۷۴/۳۴	۰	۳۲/۳۹	۱	۱۰
	۰/۶	۵۸۹/۶۷	۰	۳۲/۹۱	۱	۱۰
	۰/۸	۶۱۲/۷۲	۳۲/۵۶	۳۳/۱۷	۱	۱۰

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

	۰/۹	۶۲۴/۵۳	۵۲/۳۹	۳۳/۱۷	۱	۱۰
C۲	۰/۱	۵۴۷/۴۴	۰	۲۶/۷۳	۱	۱۰
	۰/۲	۵۸۱/۲۵	۰	۳۰/۱۵	۱	۱۰
	۰/۴	۶۱۰/۳۵	۰	۳۱/۰۷	۱	۱۰
	۰/۶	۶۳۳/۱۷	۰	۳۰/۸۷	۱	۱۰
	۰/۸	۶۴۲/۶۹	۰	۳۱/۱	۱	۱۰
	۰/۹	۶۸۲/۲۹	۱۴/۰۷	۳۱/۷	۱	۱۰
C۳	۰/۱	۴۶۱/۶۴	۵۵/۸۹	۲۶/۶۹	۱	۱۰
	۰/۲	۴۹۶/۸۸	۵۵/۷۷	۲۸/۲۵	۱	۱۰
	۰/۴	۵۱۱/۹۳	۵۵/۶۷	۲۹/۵۳	۱	۱۰
	۰/۶	۳۳۰/۶۴	۷۹/۶۲	۲۹/۳۸	۱	۱۰
	۰/۸	۵۳۳/۴۸	۱۰۰	۲۸/۷۹	۱	۱۰
	۰/۹	۵۴۱/۷۲	۱۰۰	۲۹/۳۳	۱	۱۰
D	۰/۱	۱۰۲/۴۴	۲۶۰/۴۶	۱۲/۰۴	۱	۱۰
	۰/۲	۱۲۷/۲۸	۲۵۹/۱۷	۱۲/۵۳	۱	۱۰
	۰/۴	۱۴۳/۱۴	۲۵۹/۱۸	۱۲/۵۹	۱	۱۰
	۰/۶	۱۵۳/۳۹	۲۶۵/۱۸	۱۲/۵۹	۱	۱۰
	۰/۸	۱۶۰/۹۱	۳۰۴/۷	۱۲/۵۹	۱	۱۰
	۰/۹	۱۶۴/۸۶	۳۲۴/۰۹	۱۲/۶۱	۱	۱۰
E۱	۰/۱	۵۴۲/۵۶	۰	۲۱/۱۴	۱	۸
	۰/۲	۵۷۰/۵۱	۰	۲۴/۴۱	۱	۱۰
	۰/۴	۶۱۴/۹۶	۰	۲۷/۳۱	۱	۱۰
	۰/۶	۶۴۸/۵۱	۰	۲۷/۳۱	۱	۱۰
	۰/۸	۶۶۲/۴۹	۰	۲۷/۸۴	۱	۱۰
	۰/۹	۶۶۵/۱۱	۰	۲۷/۸۴	۱	۱۰
	۰/۱	۴۹۳/۳	۰	۲۱/۰۷	۱	۷
	۰/۲	۵۳۲/۰۲	۰	۲۴/۰۲	۲	۹

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]

E۲	۰/۴	۵۵۷/۵	۰	۲۶/۳۲	۱	۱۰
	۰/۶	۵۷۲/۰۹	۰	۲۶/۷۷	۱	۱۰
	۰/۸	۵۸۵/۴۴	۰	۲۷/۰۵	۱	۱۰
	۰/۹	۵۸۹/۳۸	۰	۲۷/۵۷	۱	۱۰
F۱	۰/۱	۴۳۸/۲۹	۰	۳۰/۱۶	۱	۱۰
	۰/۲	۴۷۶/۸۱	۰	۳۱/۹۷	۱	۱۰
	۰/۴	۵۱۶/۹۷	۰	۳۳/۶۷	۱	۱۰
	۰/۶	۵۲۷/۴۵	۲۰/۱۱	۳۳/۵۱	۱	۱۰
	۰/۸	۵۳۹/۸۳	۶۵/۴۶	۳۲/۷۶	۱	۱۰
	۰/۹	۵۴۰/۹۷	۸۸/۰۲	۳۲/۴۷	۱	۱۰
F۲	۰/۱	۲۴۰/۴	۱۷۰/۲۶	۳۲/۶۵	۱	۱۰
	۰/۲	۲۶۹/۲۷	۱۷۰/۲۸	۳۲/۶۵	۱	۱۰
	۰/۴	۳۱۳/۶۲	۱۷۲/۲۹	۳۲/۶۵	۱	۱۰
	۰/۶	۳۳۰/۶۴	۲۳۵/۴۴	۳۲/۲۹	۱	۱۰
	۰/۸	۳۴۸/۹۲	۲۷۷/۳۸	۳۲/۶۵	۱	۱۰
	۰/۹	۳۵۳/۴۳	۳۱۹/۷۳	۳۱/۸۱	۱	۱۰

لازم به ذکر است در ناحیه D (بندرعباس) و F۲ (خوزستان)، در نظر گرفتن حد بالای ۱۰۰ کیلووات برای ظرفیت چیلر منجر به نشدنی بودن مسئله بهینه‌سازی شود، به همین منظور در این دو ناحیه این قید در نظر گرفته نشده است.

[Downloaded from epprjournal.ir on 2026-10-05]