

برنامه‌ریزی تأمین انرژی گلخانه‌ها با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر در حالت ریزش‌بکه

سعید میرزامحمدی^{۱*}، آرمین جبارزاده^۲، مهران صالحی شهرابی^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

mirzamohammadi@iust.ac.ir

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

arminj@iust.ac.ir

^۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

salehi_me@ind.iust.ac.ir

چکیده: تغییرات اقلیمی و روند افزایشی جمعیت کشورها، اهمیت توسعه گلخانه‌ها برای موضوع امنیت غذایی در آینده را بیش از پیش مطرح ساخته است. یکی از مهم‌ترین ملاحظات در تولیدات محصولات گلخانه‌ای، نیاز به مصرف انرژی برای ایجاد شرایط محیطی مناسب گلخانه است. لذا در این پژوهش، مسئله برنامه‌ریزی تأمین انرژی گلخانه‌ها با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور ابتدا تعیین میزان بهینه به‌کارگیری واحدهای انرژی‌های تجدیدپذیر در کنار واحدهای ذخیره‌ساز انرژی با هدف کاهش هزینه‌ها در حالت ریزش‌بکه مدل‌سازی می‌شود. در ادامه، مدل عدد صحیح آمیخته غیرخطی (MINLP) ارائه شده، با بهره‌گیری از داده‌های سرعت متوسط باد و میزان تابش ماهیانه نور خورشید منطقه مکران و در نظر گرفتن ترکیبات مختلف پارامترهای هزینه‌ای، در قالب ۱۶ مسئله مختلف، حل و تحلیل می‌گردد. از جمله مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده از مسائل فوق، می‌توان به تعیین شرایط مقرون به صرفه بودن به‌کارگیری انرژی خورشیدی اشاره کرد که در صورت حداکثر ۲ برابر بودن هزینه سرمایه‌گذاری آن نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری CHP، توجیه اقتصادی دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهند تأثیر میزان منابع مختلف انرژی تجدیدپذیر در منطقه جغرافیایی مورد بررسی در کنار مقادیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری تعمیرات، می‌تواند منجر به عدم توجیه فنی-اقتصادی به‌کارگیری همزمان منابع مختلف تجدیدپذیر گردد.

واژه‌های کلیدی: گلخانه، ریزش‌بکه، برنامه‌ریزی انرژی، انرژی‌های تجدیدپذیر، مدل‌سازی ریاضی انرژی.

۱. مقدمه

در همین رابطه، در موضوع تولید انرژی و منابع انرژی نیز ملاحظات مختلفی مطرح است که از جمله مهم‌ترین آن‌ها بهره‌گیری از سوخت‌های فسیلی است که علاوه بر مشکلات زیست‌محیطی، با محدودیت منابع نیز روبه‌رو هستند. برای این منظور، امروزه استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر که آلاینده‌ی زیست‌محیطی نیز به دنبال نداشته باشند، نقش پررنگی در سبد انرژی کشورهای مختلف جهان به دست آورده است [۱۴ و ۱۵]، لذا موضوع به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی مورد نیاز گلخانه‌ها می‌تواند مطرح شود که در شکل (۱) می‌توان آن را مشاهده کرد:



در رابطه با به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر برای تأمین انرژی گلخانه‌ها ملاحظات مختلفی می‌تواند مطرح شود از جمله بررسی مقرون به صرفه بودن به‌کارگیری این نوع انرژی، ترکیب و نحوه به‌کارگیری منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر، مدل‌سازی انرژی مورد نیاز گلخانه‌ها با رویکرد کمینه‌سازی هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان، امکان‌سنجی به‌کارگیری هاب انرژی در ابعاد مختلف تک گلخانه یا مجتمع‌های گلخانه‌ای، و سایر جنبه‌های دیگر. اما بطور کلی موضوع برنامه‌ریزی انرژی گلخانه‌ها با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌ندرت مورد بررسی پژوهش‌های پیشین قرار گرفته است. در جدول (۱)، پژوهش‌های مرتبط که به موضوع برنامه‌ریزی انرژی در گلخانه‌ها پرداخته‌اند مشاهده می‌گردد.

آینده جهان و ادامه حیات انسانی در روی زمین با عوامل و محدودیت‌های چندانی مواجه است که مهم‌ترین آن رشد جمعیت در جهان به‌خصوص در کشورهای کمتر توسعه‌یافته می‌باشد. این افزایش رو به رشد جمعیت، نگرانی درباره کمبود منابع غذایی برای بشر را در پی داشته است. از این رو برای تأمین امنیت غذایی با چالش تولید بیشتر محصولات کشاورزی روبه‌رو بوده و استفاده از راهکارهای جایگزین را تبدیل به امری غیرقابل اجتناب کرده است. از جمله این راهکارها کشت در محیط‌های کنترل‌شده، کشت‌های هیدروپونیک، کشت زیر نایلون، معرفی گیاهان با نیاز آبی کمتر و تولید بیشتر، توسعه تراکم کشت، کم کردن دوره رشد گیاهان و استفاده از روش کم آبیاری برای تولید غذا را می‌توان نام برد.

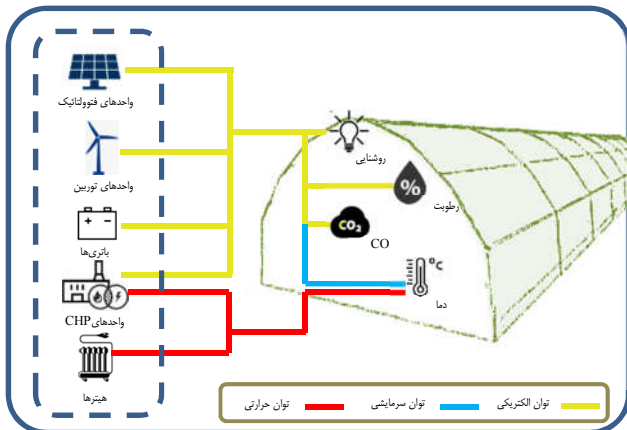
در همین راستا در سال‌های اخیر گلخانه‌های هیدروپونیک با بهره‌مندی از تکنولوژی رشد محصولات در آب و بدون نیاز به خاک بیش از سایر گلخانه‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۱]. محیط‌های گلخانه‌ای برای رشد محصولات خارج فصل نیازمند شرایط مطلوب آب‌وهوایی مقایسه کوچک مصنوعی متناسب با موقعیت جغرافیایی هستند [۲] که مهم‌ترین اجزای این شرایط آب‌وهوایی شامل دمای داخلی، میزان رطوبت، انتشار CO_2 و میزان نور است [۳]. در نتیجه یکی از مهم‌ترین موضوعات در تولیدات محصولات گلخانه‌ای، انرژی مورد نیاز و به‌عبارت دیگر هزینه‌های مربوط انرژی مصرفی برای ایجاد شرایط مناسب گلخانه برای تولید محصولات است. این موضوع باعث می‌گردد کشورها در برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه گلخانه‌ها، به موضوع امنیت انرژی به‌طور ویژه در کنار موضوع امنیت غذایی توجه کنند. در بررسی موضوع انرژی و گلخانه‌ها، بحث تعادل انرژی به‌خصوص از منظر گرمایشی و اثر آن بر ساختار گلخانه‌ها بیشتر مورد توجه پژوهش‌ها بوده [۴ و ۵] و در ادامه موضوعاتی نظیر تأثیر وضعیت آب‌وهوایی بیرون و درون گلخانه نیز در موضوع تعادل انرژی مورد بررسی قرار گرفته است [۶ و ۷]. برخی پژوهش‌ها نیز به موضوع رابطه میان انرژی ورودی و عملکرد محصولات در انواع گلخانه‌ها پرداخته و شاخص‌هایی نظیر انرژی خالص، نسبت انرژی، بهره‌وری انرژی و راندمان محصول را در مطالعات موردی مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند [۸-۱۱]. همچنین برخی از پژوهش‌ها نیز با استفاده از مدل‌ها و تکنیک‌های برآورد تقاضای انرژی [۱۲]، به موضوع برآورد میزان انرژی مورد نیاز گلخانه پرداختند [۱۳].

جدول (۱): پژوهش‌های مرتبط با موضوع برنامه‌ریزی انرژی در گلخانه‌ها

نویسندگان	سال	موضوع مورد بررسی مقاله	منابع انرژی		ارتباط با شبکه اصلی انرژی	رویکرد/روش
			تجدیدپذیر	تجدیدناپذیر		
گانگولی و همکاران [۲]	۲۰۱۰	مدل‌سازی و تحلیل گلخانه یکپارچه شده با سیستم تأمین توان الکتریکی	✓	✓	✓	برنامه‌ریزی ریاضی
پرزآلونسو و همکاران [۱۶]	۲۰۱۲	بررسی ماژول‌های PV برای تولید برق در روکش گلخانه‌ها	✓		✓	شبکه‌های عصبی مصنوعی
ایسن و یوکسل [۱۷]	۲۰۱۳	تجزیه و تحلیل گرمایش گلخانه توسط بیوگاز، انرژی خورشیدی و زمین گرمایی	✓		✓	تجزیه و تحلیل تجربی
کی‌آن و همکاران [۱۸]	۲۰۱۳	تجزیه و تحلیل گرمایش تأمین‌شده گلخانه توسط بیوگاز، انرژی خورشیدی و زمین گرمایی	✓		✓	برنامه‌ریزی ریاضی
رونی و دیمیترو [۱۹]	۲۰۱۵	تأمین انرژی گلخانه‌های هیدروپنیک با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر	✓		✓	تحلیل سیستم
بزچلوبی و همکاران [۳]	۲۰۱۵	بهینه‌سازی انرژی گلخانه با استفاده از سیستم‌های هاب انرژی در شبکه‌های هوشمند	✓	✓	✓	برنامه‌ریزی ریاضی
بیلدیریم و بیلیر [۲۰]	۲۰۱۷	ارزیابی امکان استفاده از انرژی تجدیدپذیر برای نیاز کل انرژی مورد نیاز گلخانه	✓		✓	برنامه‌ریزی ریاضی
آرابکوشار و همکاران [۲۱]	۲۰۱۷	ارائه سیستم ترکیبی برای کاهش نقش گرمایشی بخاری‌های دیزل در گلخانه‌ها	✓	✓	✓	برنامه‌ریزی ریاضی
هوسین و همکاران [۲۲]	۲۰۱۸	مدیریت بهینه انرژی گلخانه‌ها در هر دو حالت متصل به شبکه و ریزشبکه	✓	✓	✓	برنامه‌ریزی ریاضی
ژوانگ و همکاران [۲۳]	۲۰۱۹	مدل‌سازی طرح مدیریت انرژی چندمرحله‌ای تصادفی گلخانه‌ها	✓	✓	✓	فرایند تصمیم‌گیری مارکوف

مورد بررسی قرار دادند. مرجع [۱۷] برنامه‌ریزی انرژی گلخانه‌ها را دو حالت ریزشبکه و متصل به شبکه ارائه دادند. آن‌ها بهره‌گیری انرژی‌های تجدیدپذیر را برای تأمین انرژی مورد بررسی قرار داده و عدم قطعیت در انرژی‌ها تجدیدپذیر و میزان بار تقاضا را نیز در مدل لحاظ کردند. از مهم‌ترین تفاوت پژوهش حاضر با پژوهش‌های اشاره‌شده، عدم در نظر گرفتن انواع هزینه‌های مترتب به سیستم انرژی است. به نحوی که در مرجع [۳]، فقط هزینه‌های روزانه مصرف انرژی و هزینه (جریمه) ناشی از مازاد سقف مصرف روزانه انرژی در نظر گرفته شده و سایر هزینه‌ها نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نگهداری تعمیرات و هزینه کمبود انرژی لحاظ نشده است. در مرجع [۱۷] نیز هزینه‌های بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری دیده شده است که به تبع هزینه‌های نگهداری تعمیرات و کمبود و همچنین درآمد ناشی از

در میان پژوهش‌های جدول (۱)، پژوهش‌های [۳]، [۱۶] و [۱۷] ارتباط بیشتری با موضوع با پژوهش حاضر دارند. مرجع [۱۶] به بررسی به‌کارگیری انرژی تجدیدپذیر برای گلخانه‌ها در حالت ریزشبکه پرداختند. آن‌ها ابتدا اجزای انرژی بر گلخانه‌ها را که می‌تواند توسط انرژی‌های الکتریکی و حرارتی تأمین شود توصیف می‌کنند و در نهایت تصویر کلی از جریان مالی به‌کارگیری انرژی‌های تجدیدپذیر در گلخانه‌ها را ارائه می‌دهند. مرجع [۳] یک مدل بهینه‌سازی ریاضی گلخانه‌ها در بستر شبکه هوشمند ارائه دادند. هدف مدل‌سازی آن‌ها کمینه کردن هزینه انرژی و هزینه شارژ تقاضا با لحاظ کردن پارامترهای قیمت برق و پیش‌بینی شرایط آب‌وهوایی است. همچنین آن‌ها اثر عدم قطعیت قیمت برق و شرایط آب‌وهوایی را بر روی تجهیزات ذخیره‌ساز با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی مونت کارلو



شکل (۲): چگونگی تأمین انرژی‌های مورد نیاز گلخانه‌ها توسط منابع تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و هیترها

سیستم فوق در هر زمان بررسی می‌کند که تأمین بار از سوی واحدهای تجدیدپذیر و باتری‌ها و هیترها و یا توسط واحدهای CHP تأمین شود. عملکرد سیستم در هر ساعت برنامه‌ریزی را می‌توان در شکل (۳) مشاهده کرد.

با توجه به سیستم توصیف شده، در این مسئله فرضیات زیر حاکم است:

- تأمین بارهای مورد نیاز گلخانه بصورت ساعتی در طول روز و برای تمام ایام سال برنامه‌ریزی می‌شود.
- بار سرمایشی گلخانه توسط تجهیزات با توان الکتریکی تأمین می‌گردند.
- میزان بهره‌مندی از واحدهای انرژی و ذخیره‌سازها به نسبت یکسان از هر کدام از آن‌ها انجام می‌شوند.
- عدم تأمین بارهای مورد نیاز گلخانه متحمل هزینه خواهد بود.
- میزان تلفات انرژی از تولید تا مصرف، صفر در نظر گرفته شده است.
- ظرفیت باتری‌ها محدود فرض شده اما توان شارژ یا دشارژ باتری می‌تواند تا اندازه ظرفیتش انجام شود.
- سوخت مورد نیاز واحدهای CHP گاز طبیعی است.
- هزینه‌های مبدل انرژی ناچیز در نظر گرفته شده است.

با توجه به هدف مسئله و فرضیات حاکم بر مسئله، میزان بهره‌مندی از واحدهای تجدیدپذیر می‌تواند با و بدون هزینه فرض شود. در اینجا فرض می‌گردد تولید توان از منابع تجدیدپذیر بدون هزینه است. لذا در این حالت صرفاً هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری تعمیرات منابع تجدیدپذیر در نظر گرفته می‌شود و بدیهی است در صورت استفاده از هر واحد فتوولتائیک، تمام توان تولیدی آن واحد ممکن مورد استفاده قرار گیرد.

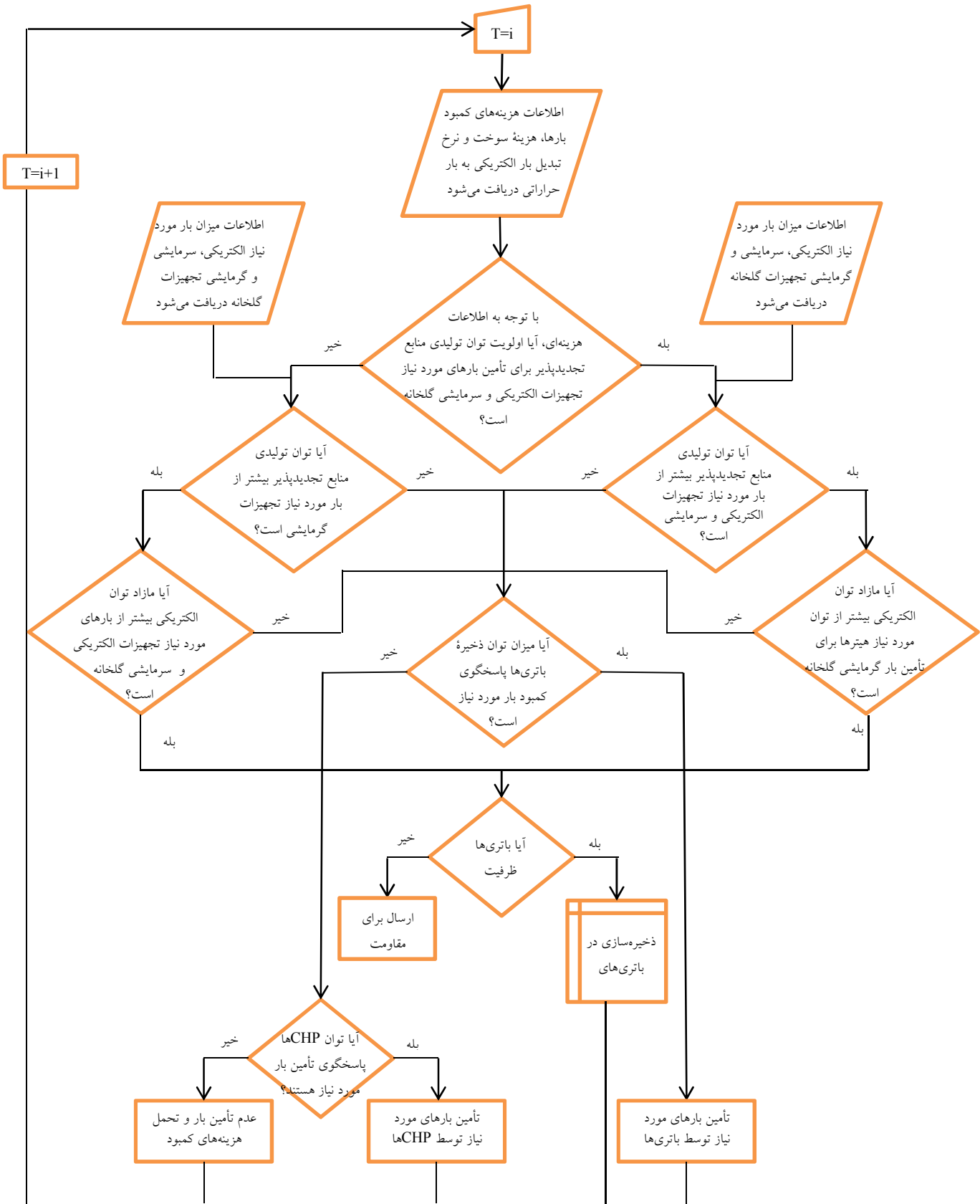
اسقاط تجهیزات در پایان پروژه نیز دیده نشده است. در همین رابطه، عدم در نظر گرفتن مفهوم ارزش زمانی پول و یکسان‌سازی مقیاس هزینه‌ها، باعث نادرست بودن جمع هزینه‌ها در تابع هدف پژوهش‌های اشاره شده است. همچنین عدم تعیین تعداد بهینه واحدهای انرژی و ذخیره‌ساز انرژی برای تأمین انرژی گلخانه‌ها از مهم‌ترین تفاوت‌های پژوهش‌های اشاره شده با پژوهش حاضر است.

در این پژوهش، مسئله برنامه‌ریزی تأمین انرژی گلخانه‌ها با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر مورد بررسی قرار خواهد گرفت. از آنجایی که بسیاری از مناطق گرمسیری، شرایط بسیار مناسبی را برای توسعه گلخانه‌ها دارند و در عین حال از انرژی شبکه اصلی بهره‌مند نیستند، تحلیل اقتصادی تأمین انرژی مورد نیاز گلخانه‌ها در حالت ریزشکبه برای منطقه مکران مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هدف اصلی این پژوهش تعیین تعداد بهینه به‌کارگیری واحدهای انرژی تجدیدپذیر و ذخیره‌سازها در کنار سیستم‌های پشتیبان انرژی برای کمینه‌سازی هزینه‌هاست. در این پژوهش، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نگهداری و تعمیرات، بهره‌برداری و عدم تأمین انرژی با استفاده از مفهوم ارزش خالص فعلی (NPV) در نظر گرفته شده است.

۲. تعریف مسئله

همان‌طور که اشاره شد، برای ایجاد شرایط مناسب رشد محصولات در گلخانه‌ها می‌بایست میزان دما، رطوبت، نور و میزان CO_2 محیط گلخانه را در بازه‌های مناسب قرار داشته باشد. هرکدام از این شرایط محیطی گلخانه نیازمند بارهای الکتریکی، سرمایشی و گرمایشی است که این بارها توسط منابع مختلف انرژی از جمله منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند صورت پذیرد.

از آنجایی که منابع تجدیدپذیر به‌واسطه شرایط محیطی در شبانه‌روز و در ایام مختلف سال، با محدودیت‌هایی برای تولید توان روبه‌رو هستند، از واحدهای CHP برای پشتیبانی تأمین بار استفاده می‌شود. عملکرد کلی سیستم مورد بررسی به این گونه است که توان الکتریکی تولیدشده توسط واحدهای فتوولتائیک، توربین‌های بادی و واحدهای CHP برای تأمین بارهای الکتریکی و سرمایشی، و توان حرارتی تولیدشده توسط واحدهای CHP و هیترها برای تأمین بارهای گرمایشی مورد نیاز گلخانه استفاده می‌شوند. شمای کلی سیستم مورد بررسی در شکل (۲) قابل مشاهده است.



شکل (۳): عملکرد سیستم در هر ساعت از برنامه‌ریزی تأمین انرژی گلخانه

۳. مدل‌سازی مسئله

۳.۱. نمادها

برای مدل‌سازی مسئله، ابتدا نمادهای به‌کاررفته معرفی می‌شوند و سپس اجزای مدل و روابط آن تشریح خواهند شد.

مجموعه‌ها			
$d = \{1,2, \dots, 365\}$	روزهای سال	h $= \{1,2, \dots, 24\}$	ساعات شبانه‌روز
		y $= \{1,2, \dots, n\}$	سال‌های دوره عمر پروژه
متغیرهای تصمیم			
N_{wd}	تعداد توربین‌های بادی	N_{pv}	تعداد پنل‌های فتوولتائیک
N_{chp}	تعداد CHP	N_{bt}	تعداد باتری
		N_{ht}	تعداد هیترها
متغیرهای کمکی			
$P_{chp_{hdy}}^h$	توان حرارتی خروجی CHP در ساعت h روز d سال y	$P_{chp_{hdy}}^e$	توان الکتریکی خروجی CHP در ساعت h روز d سال y
$P_{bt_{hdy}}^{ch}$	میزان شارژ باتری در ساعت h روز d سال y	$P_{ht_{hdy}}$	توان حرارتی خروجی هیتر در ساعت h روز d سال y
$P_{hdy}^{e'}$	میزان بار تأمین‌نشده الکتریکی در ساعت h روز d سال y	$P_{bt_{hdy}}^{dis}$	میزان دشارژ باتری در ساعت h روز d سال y
		$P_{hdy}^{h'}$	میزان بار تأمین‌نشده حرارتی در ساعت h روز d سال y
پارامترها			
C_{chp}^{Inv}	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری CHP	C_{pv}^{Inv}	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری پنل فتوولتائیک
C_{chp}^{PM}	هزینه نگهداری تعمیرات CHP	C_{pv}^{PM}	هزینه نگهداری تعمیرات پنل فتوولتائیک
C_{chp}^{fe}	هزینه سوخت CHP	R_{pv}	درآمد اسقاط تجهیزات پنل فتوولتائیک
R_{chp}	درآمد اسقاط تجهیزات CHP	$P_{pv_{hdy}}$	توان الکتریکی خروجی پنل فتوولتائیک در ساعت h روز d سال y
p_{chp}^{e-max}	حداکثر توان الکتریکی خروجی هر یک از واحدهای CHP	C_{wd}^{Inv}	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری توربین بادی
p_{chp}^{h-max}	حداکثر توان گرمایشی خروجی هر یک از واحدهای CHP	C_{wd}^{PM}	هزینه نگهداری تعمیرات توربین بادی
C_{ht}^{Inv}	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری هیتر	R_{wd}	درآمد اسقاط تجهیزات توربین بادی
C_{ht}^{PM}	هزینه نگهداری تعمیرات هیتر	$P_{wd_{hdy}}$	توان الکتریکی خروجی توربین بادی در ساعت h روز d سال y
R_{ht}	درآمد اسقاط تجهیزات هیتر	C_{bt}^{Inv}	هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری باتری
p_{ht}^{h-max}	حداکثر توان گرمایشی خروجی هر یک از هیترها	C_{bt}^{PM}	هزینه نگهداری تعمیرات باتری
π_e'	هزینه عدم تأمین بار مورد نیاز الکتریکی	R_{bt}	درآمد اسقاط تجهیزات باتری
π_h'	هزینه عدم تأمین بار مورد نیاز حرارتی	p_{bt}^{ch-max}	حداکثر توان شارژ باتری
A	سرمایه در دسترس	$P_{load_{hdy}}^e$	تقاضای بار الکتریکی
i	نرخ بهره	$P_{load_{hdy}}^h$	تقاضای بار حرارتی
		$P_{load_{hdy}}^c$	تقاضای بار سرمایشی

۲.۳. تابع هدف

تابع هدف در این مسئله، تعیین تعداد بهینه پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌ها، واحدهای CHP و هیترها برای تأمین بارهای مورد نیاز یک واحد گلخانه است. تعیین این مقادیر بهینه می‌بایست با کمینه‌سازی هزینه‌های سرمایه‌گذاری (C_{Inv}) و نگهداری تعمیرات تجهیزات مربوط به متغیرهای فوق (C_{PM})، هزینه ناشی از سوخت مصرفی واحدهای CHP (C_{Op})، هزینه ناشی از عدم تأمین بارهای مورد نیاز (C_{US}) و با در نظر گرفتن درآمد ناشی از اسقاط تجهیزات در پایان دوره (R_{Sv}) صورت پذیرد. در این حالت، مسئله با توجه به مؤلفه‌های هزینه و ضرایب تبدیل توان الکتریکی به توان سرمایشی و حرارتی و همچنین، سیستم مورد نظر به دنبال بررسی این موضوع است که تأمین بار مورد نیاز در ساعات کاهش توان تولیدی منابع تجدیدپذیر در برخی از ایام شبانه‌روز، توسط واحدهای CHP تأمین گردد و یا با افزایش تعداد باتری‌ها و واحدهای تجدیدپذیر، ذخیره مناسبی وجود داشته باشد. لذا این موضوع برنامه‌ریزی در هر ساعت، باید در کل دوره عمر پروژه در نظر گرفته شود تا تعداد بهینه واحدهای انرژی و ذخیره‌سازها برای کل دوره عملکردی تعیین شود. با توجه به توصیف سیستم مورد نظر با یک مسئله MINLP روبه‌رو هستیم که توابع هزینه و درآمد آن در یک افق n ساله از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\min(TC) = C_{Inv} + C_{PM} + C_{Op} + C_{US} - R_{Sv} \quad (1)$$

$$C_{Inv} = N_{pv}C_{pv}^{Inv} + N_{wd}C_{wd}^{Inv} + N_{bt}C_{bt}^{Inv} + N_{chp}C_{chp}^{Inv} + N_{ht}C_{ht}^{Inv} \quad (2)$$

$$C_{PM} = N_{pv}C_{pv}^{PM} + N_{wd}C_{wd}^{PM} + N_{bt}C_{bt}^{PM} + N_{chp}C_{chp}^{PM} + N_{ht}C_{ht}^{PM} \quad (3)$$

$$C_{Op} = \sum_{y=1}^n \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} N_{chp}C_{chp}^{fe}(P_{chp_{hdy}}^e + P_{chp_{hdy}}^h) \quad (4)$$

$$C_{US} = \sum_{y=1}^n \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} P_{hdy}^e \pi_e' + \sum_{y=1}^n \sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} P_{hdy}^h \pi_h' \quad (5)$$

$$R_{Sv} = N_{pv}R_{pv}^S + N_{wd}R_{wd}^S + N_{bt}R_{bt}^S + N_{chp}R_{chp}^S + N_{ht}R_{ht}^S \quad (6)$$

در روابط فوق، رابطه (۱) نشان‌دهنده هزینه کل سیستم (TC) است که از مجموع مقادیر هزینه‌ها منهای درآمد ناشی از اسقاط به دست می‌آید. در روابط (۲) و (۳) مقادیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نگهداری تعمیرات، متناسب با تعداد بهینه واحدهای به‌کارگرفته‌شده منابع انرژی و هزینه واحد هرکدام به دست می‌آید. در رابطه (۴) نیز هزینه عملیاتی متناظر با میزان سوخت مصرفی واحدهای CHP خواهد بود و میزان توان تولیدی الکتریکی و حرارتی آن بر اساس محدودیت‌ها و حالت بهینه تعیین می‌شود. در رابطه (۵) هزینه کمبود

نیز بر اساس مقدار بار تأمین‌نشده الکتریکی و حرارتی به دست خواهد آمد. همچنین در رابطه (۶) درآمد حاصل از اسقاط تجهیزات نیز متناسب با تعداد واحدهای منابع انرژی به دست خواهد آمد.

همان گونه که در روابط فوق مشاهده می‌شود، هزینه‌های سرمایه‌گذاری یک بار در ابتدای پروژه انجام می‌گردد درحالی‌که هزینه‌های نگهداری تعمیرات و عدم تأمین بارهای مورد نیاز چندین بار در طول پروژه به وجود می‌آیند. لذا برای همگن‌سازی ارزش هزینه‌های فوق از رویکرد ارزش خالص فعلی استفاده می‌شود. بدین منظور برای همگن‌سازی هزینه‌های نگهداری تعمیرات که هر ساله اتفاق می‌افتد، از رابطه (۷)، و برای همگن‌سازی درآمد حاصل از اسقاط تجهیزات که در پایان دوره اتفاق می‌افتد و همچنین همگن‌سازی هزینه عدم تأمین بارها که ممکن است در روزهای مختلفی به وجود بیاید، از رابطه (۸) استفاده می‌شود.

$$NPV = A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \quad (7)$$

$$NPV = F \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (8)$$

در نتیجه تابع هدف مسئله به صورت رابطه (۹) خواهد شد:

$$C_T = C_{Inv} + C_{PM} \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + \sum_{y=1}^n \left[\left(\sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} N_{chp}C_{chp}^{fe}(P_{chp_{hdy}}^e + P_{chp_{hdy}}^h) \right) \left(\frac{1}{(1+i)^y} \right) \right] + \sum_{y=1}^n \left[\left(\sum_{d=1}^{365} \sum_{h=1}^{24} P_{hdy}^e \pi_e' + P_{hdy}^h \pi_h' \right) \left(\frac{1}{(1+i)^y} \right) \right] + R_s \left[\frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (9)$$

۳.۳. قیود

اولین محدودیت مربوط به تعادل میان تولید و مصرف بار الکتریکی است که در معادله (۱۰) مشاهده می‌شود. با توجه به طرفین این محدودیت، حالات مختلفی بر اساس هزینه‌های تابع هدف می‌تواند در هر ساعت رخ دهد. در حالتی میزان توان تولیدشده منابع تجدیدپذیر آن ساعت می‌تواند پاسخگوی بار مورد نیاز تجهیزات الکتریکی و سرمایشی بوده و مازاد آن برای شارژ باتری و یا هیتر و یا هر دو تأمین شود. در حالت دیگر با کمبود توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، امکان استفاده از ظرفیت دشارژ باتری و یا تأمین بار توسط CHP صورت پذیرد. همچنین در صورت عدم تأمین بار مورد نیاز، کمبود بار مقدار مثبت دریافت خواهد کرد.

حداکثر ظرفیت تولید حرارت هیترا و CHP‌ها هستند.

$$N_{chp}P_{chp_{hdy}}^h + N_{ht}P_{ht_{hdy}} + P_{hdy}^{h'} = P_{load_{hdy}}^h ; \forall h, d, y \quad (15)$$

$$P_{ht_{hdy}} \leq P_{ht}^{max} ; \forall h, d, y \quad (16)$$

$$P_{chp_{hdy}}^h \leq P_{chp}^{h-max} ; \forall h, d, y \quad (17)$$

با توجه محدودیت سرمایه، رابطه (۱۸) میزان سرمایه در دسترس برای سرمایه‌گذاری را مشخص می‌کند.

$$N_{pv}C_{pv}^{Inv} + N_{wd}C_{wd}^{Inv} + N_{bt}C_{bt}^{Inv} + N_{chp}C_{chp}^{Inv} + N_{ht}C_{ht}^{Inv} \leq A ; \forall h, d, y \quad (18)$$

در انتها نیز برای اخذ مقادیر مجاز متغیرها، روابط زیر تعریف می‌شوند. همان‌گونه که مشخص است تعداد بهینه واحدهای انرژی مقادیر عدد صحیح می‌توانند اخذ کنند و سایر متغیرها نیز بزرگ‌تر مساوی صفر هستند.

$$N_{pv}, N_{wd}, N_{chp}, N_{bt}, N_{ht} \in \mathbb{Z}^+ \quad (19)$$

$$P_{bt_{hdy}}^{ch}, P_{bt_{hdy}}^{dis}, P_{hdy}^{e'}, P_{hdy}^{h'}, P_{ht_{hdy}}, P_{chp_{hdy}}^e, P_{chp_{hdy}}^h \geq 0 \quad (20)$$

۴. حل مدل و تحلیل حساسیت

با توجه به پارامترهای تعریف‌شده، در این قسمت با ارائه چندین مثال عددی به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی فوق پرداخته می‌شود. در همین رابطه، پروفایل تقاضای انرژی یک گلخانه در یک سال به همراه اطلاعات میزان تابش نور خورشید و متوسط سرعت باد سالانه منطقه مکران [۲۴] در اشکال (۴) و (۵) قابل مشاهده می‌باشند.

$$N_{pv}P_{pv_{hdy}} + N_{wd}P_{wd_{hdy}} + N_{bt}P_{bt_{hdy}}^{dis} + N_{chp}P_{chp_{hdy}}^e + P_{hdy}^{e'} = P_{load_{hdy}}^e + P_{load_{hdy}}^c + N_{bt}P_{bt_{hdy}}^{ch} + N_{ht}P_{ht_{hdy}} ; \forall h, d, y \quad (10)$$

با توجه به آنکه در رابطه (۱۰) میزان شارژ و یا دشارژ شدن باتری‌ها با یکدیگر ارتباط داشته و همچنین از وضعیت باتری در ساعات گذشته نیز متأثر هستند، قیود زیر برای ایجاد رابطه منطقی میان شارژ و دشارژ شدن باتری‌ها تعریف می‌شوند. رابطه (۱۱) بیانگر این موضوع است که در هر ساعت، باتری در حالت شارژ یا دشارژ می‌تواند قرار گیرد و همزمان هر دو حالت امکان‌پذیر نیست. رابطه (۱۲) نیز محدودیت توان شارژ باتری‌ها را بر اساس حداکثر ظرفیت باتری‌ها تعیین می‌کند. رابطه (۱۳) محدودیت میزان دشارژ شدن باتری‌هاست و بر اساس تفاوت مجموع میزان شارژ باتری‌ها از مجموع میزان دشارژ باتری‌ها در ساعات گذشته به دست می‌آید.

$$P_{bt_{hdy}}^{dis} \times P_{bt_{hdy}}^{ch} = 0 ; \forall h, d, y \quad (11)$$

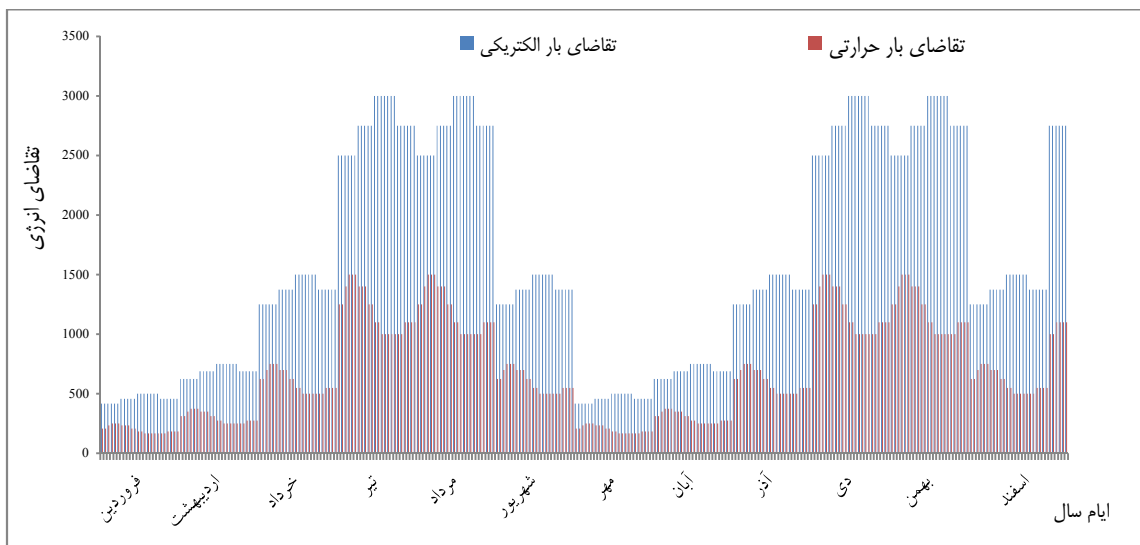
$$P_{bt_{hdy}}^{ch} \leq P_{bt}^{ch-max} ; \forall h, d, y \quad (12)$$

$$P_{bt_{hdy}}^{dis} \leq \sum_{h=1}^{24} P_{bt_{(h-1)dy}}^{ch} - \sum_{h=1}^{24} P_{bt_{(h-1)dy}}^{dis} ; \forall d, y \quad (13)$$

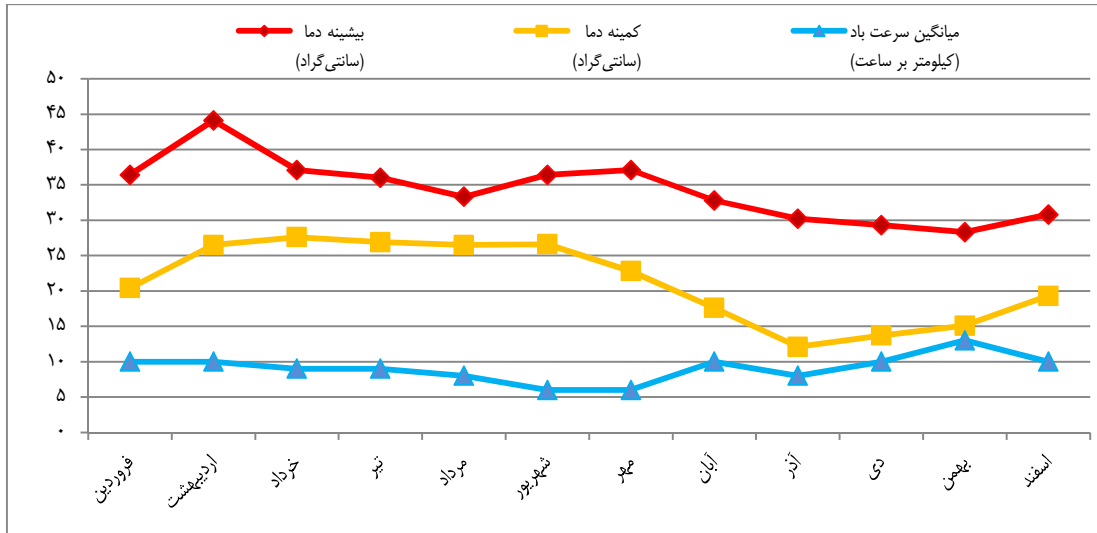
رابطه (۱۴) نیز محدودیت توان تولید الکتریسیته CHP‌هاست که بر اساس حداکثر ظرفیت توان تولید الکتریسیته CHP‌ها تعیین می‌کند.

$$P_{chp_{hdy}}^e \leq P_{chp}^{e-max} ; \forall h, d, y \quad (14)$$

برای تأمین بارهای حرارتی نیز مشابه تأمین بارهای الکتریکی قیود زیر تعریف می‌شود. رابطه (۱۵) مربوط به محدودیت تعادل تولید و مصرف توان حرارتی در هر ساعت است. رابطه (۱۶) و (۱۷) نیز



شکل (۴): نمودار تقاضای بار الکتریکی و حرارتی گلخانه در یک سال



شکل (۵): وضعیت دما و سرعت باد در منطقه احداث گلخانه‌ها

۱.۴. الگوریتم حل

پیشرفت‌های محاسباتی الگوریتم‌های حل‌کننده، با کارایی بالایی به حل مدل‌ها می‌پردازد. با توجه به ساختار MINLP مدل این پژوهش، نرم‌افزار متلب از حل‌کننده ژنتیک برای حل مدل استفاده کرده است. شکل (۶) منطق الگوریتم مورد استفاده در نرم‌افزار متلب برای حل مدل برای داده‌های با اندازه بزرگ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل فوق مشاهده می‌شود، الگوریتم در یک حالت شبیه‌سازی به‌ازای تمام ساعات پروژه اقدام به بررسی ظرفیت عرضه انرژی از منابع انرژی و هزینه‌های مترتب آن‌ها نموده و در هر زمان بررسی می‌کند که تأمین بار از سوی واحدهای تجدیدپذیر، و باتری‌ها و هیترها تأمین گردد و یا تأمین بار توسط واحدهای CHP نیز مورد نیاز است.

از آنجایی که مدل‌سازی ارائه‌شده برای برنامه‌ریزی انرژی به‌ازای هرکدام از ساعات روزهای ایام سال انجام می‌شود، با حجم بالای داده‌های تقاضای بار الکتریکی و حرارتی و همچنین داده‌های وضعیت تولید انرژی‌های تجدیدپذیر از منابع خورشیدی و بادی روبه‌رو هستیم. این اندازه مسئله از یک سو و ساختار مدل که از نوع MINLP است، از سوی دیگر باعث می‌گردد میزان محاسبات با رشد نمایی زیادی انجام شود. لذا با توجه به داده‌های فوق، مدل ارائه‌شده در اندازه واقعی با استفاده از نرم‌افزار متلب و جعبه‌ابزار بهینه‌سازی آن حل می‌گردد. جعبه‌ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار متلب با حل‌کننده‌های متنوع برای ساختارهای مختلف مدل‌های ریاضی و با استفاده از آخرین

```

1: Define the costs and conversion rate of the electricity to the heat
2: Define the required energy of the greenhouse's equipment
3: While h=1, d=1, y=1
4:   for h ∈ H, d ∈ D & y ∈ Y do
5:     if ((Ppvhdy + Pwdhdy) < Ploadhdyh + Ploadhdye) then
6:       if πe' > πh' or Costs of CHPs >> Costs of heaters then
7:         assignee power of photovoltaic and wind to electrical demand
8:       else if πe' < πh' or Costs of CHPs << Costs of heaters then
9:         assignee power of photovoltaic and wind to thermal demand
12:      else if ((Ppvhdy + Pwdhdy) > Ploadhdyh + Ploadhdye) then
13:        if batteries have enough capacity to storage then
14:          storage surplus power in batteries
15:        else
16:          send to resistance
17:        else if (Pbtdydis ≥ Ploadhdye + Ploadhdyh - (Ppvhdy + Pwdhdy)) then
18:          supply the required energy by batteries
19:        else if (Pchphdyh + Pchphdye ≥ Ploadhdye + Ploadhdyh - (Ppvhdy + Pwdhdy))
20:          supply the required energy by CHPs
21:        else
22:          shortage
23:        end if
24:      end for
25:    end while

```

شکل (۶): چارچوب حل مدل ارائه‌شده در مقیاس داده‌های بزرگ در نرم‌افزار متلب

برنامه‌ریزی تأمین انرژی گلخانه‌ها با محوریت انرژی‌های تجدیدپذیر در حالت ریزش‌بکه ۶۵

جدول (۱) نتایج حاصل از حل مدل با الگوریتم ژنتیک و حل مدل در نرم‌افزار گمز را با استفاده از یک رایانه همراه با مشخصات پردازنده 1.8GH و مقدار 4G حافظه موقت نشان می‌دهد. گفتنی است با توجه به MINLP بودن مدل، از حل‌کننده BARON در نرم‌افزار گمز استفاده شده است. همچنین از آنجایی که محدب بودن تابع هدف مسئله ریزش‌بکه شامل کمینه‌سازی هزینه‌ها و محدودیت‌های مربوطه آن از جمله شارژ و دشارژ باتری‌ها و تعادل عرضه و تقاضای انرژی در پژوهش‌های پیشین [۲۵] و [۲۶] اثبات شده است، می‌توان از سراسری بودن جواب بهینه به دست آمده اطمینان حاصل کرد.

برای بررسی صحت نتایج حاصل از الگوریتم ارائه شده در متلب، نتایج مدل در مقیاس یک سال با نرم‌افزار گمز محاسبه شده و با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک مقایسه می‌شود. برای محاسبه در نرم‌افزار گمز و امکان اجرای مدل در ساختار کوچک، یکی از راهکارهای کاهش حجم محاسبات با حفظ روایی پاسخ‌ها، کاهش حجم داده‌هایی است که به واسطه شرایط مسئله تکرار می‌شوند. برای نمونه در اینجا مشاهده می‌شود که میزان تابش نور خورشید و یا سرعت وزش باد، در بازه‌های مختلفی از ایام سال نظیر هر ماه، تغییرات معناداری نداشته و از حدود یکسانی در آن ماه برخوردارند.

جدول (۱): مقایسه نتایج حل مدل با استفاده از نرم‌افزارهای گمز و متلب برای یک سال

متلب (حل‌کننده GENETIC)		گمز (حل‌کننده BARON)			مقدار	پارامترها	مقدار	پارامترها	
مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)	مقادیر متغیرهای تصمیم	مقدار تابع هدف	زمان حل (ثانیه)					مقادیر متغیرهای تصمیم
۲۴۶۸۹۰	۱۰۵	$N_{pv} = 0,$ $N_{wd} = 10,$ $N_{bt} = 0,$ $N_{chp} = 2,$ $N_{ht} = 2,$	۲۴۶۸۹۰	۱۹/۴۷	$N_{pv} = 0,$ $N_{wd} = 10,$ $N_{bt} = 0,$ $N_{chp} = 2,$ $N_{ht} = 2,$	۱۵۰	C_{bt}^{Inv}	۸۰۰	C_{pv}^{Inv}
						۷.۵	C_{bt}^{PM}	۳۰	C_{pv}^{PM}
						۱۵	R_{bt}	۷۵	R_{pv}
						۱۵۰	C_{ht}^{Inv}	۶۰۰	C_{wd}^{Inv}
						۲۰	C_{ht}^{PM}	۶۰	C_{wd}^{PM}
						۱۵	R_{ht}	۱۰۵	R_{wd}
						۲۲۵	P_{chp}^{pe-max}	۲۰۰	C_{chp}^{Inv}
						۳۷۵	P_{chp}^{h-max}	۳۰	C_{chp}^{PM}
						۲۲۵	P_{bt}^{ch-max}	۲	C_{chp}^{fe}
						۱۵۰	P_{ht}^{h-max}	۴۵	R_{chp}

بادی نسبت به هم تعریف شده که در هر کدام از آن حالات، هزینه سوخت واحدهای CHP در سه حالت مقادیر ۲، ۲۰ و ۲۰۰ تعریف شده است. دسته دوم مسائل تعریف شده شامل مسائل ۷-۱۲، با فرض نزدیک‌تر شدن هزینه سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر و هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای CHP است. همچنین به منظور بررسی تأثیر اختلاف هزینه‌های سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر نسبت به یکدیگر، در این دسته از مسائل هزینه‌های سرمایه‌گذاری انرژی خورشیدی با اختلاف بیشتری نسبت به دسته مسائل قبل از هزینه سرمایه‌گذاری انرژی بادی، بالاتر در نظر گرفته شده است. برای این دسته از مسائل روابط هزینه‌های نگهداری تعمیرات و هزینه سوخت واحدهای CHP مشابه دسته اول است. در دسته آخر مسائل که شامل مسائل ۱۳-۱۶ است، به منظور بررسی اثر هزینه‌های واحدهای ذخیره‌ساز اقدام به تعریف مسائل دیگری شده است. نتایج مسائل فوق در جدول (۲) مشاهده می‌شود و در ادامه نتایج به دست آمده تحلیل خواهند شد.

۲.۴. نتایج محاسباتی

با توجه به داده‌های فوق و ترکیبات مختلف هزینه‌ای، ۱۶ مسئله مختلف برای بررسی نتایج مدل تعریف شده است. در دسته اول مسائل تعریف شده به منظور بررسی اثر تفاوت هزینه سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر و واحدهای CHP، در ۶ مسئله اول فرض بالا بودن قابل توجه هزینه سرمایه‌گذاری انرژی‌های تجدیدپذیر به هزینه سرمایه‌گذاری واحدهای CHP در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است این نسبت هزینه‌های سرمایه‌گذاری دربرگیرنده رابطه هزینه سرمایه‌گذاری انرژی‌های خورشیدی و بادی نسبت به یکدیگر است. بدین معنی که در این دسته علاوه بر فرض بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر به واحدهای CHP، فرض نزدیک بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر نیز در نظر گرفته شده است. بر اساس این تناسب هزینه‌های سرمایه‌گذاری، دو حالت برابری و دو برابر بودن هزینه‌های نگهداری تعمیرات انرژی‌های خورشیدی و

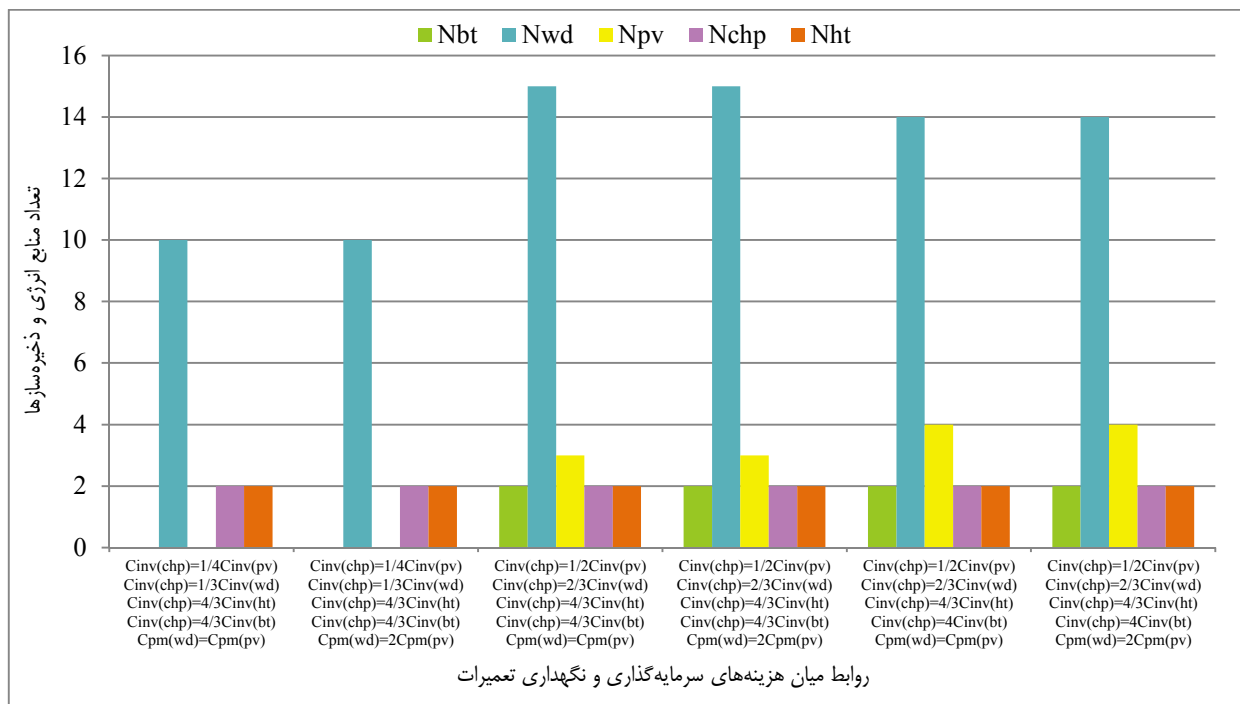
جدول (۲): مقادیر متغیرهای تصمیم و تابع هدف برای مسائل مختلف تعریف شده بر اساس مدل سازی ارائه شده

مقدار تابع هدف	مقادیر متغیرهای تصمیم	هزینه سوخت CHP	شماره مسئله	رابطه میان هزینه های تجدیدپذیرها	رابطه بین هزینه های سرمایه گذاری
2,418,578	$N_{pv} = 0, N_{wd} = 10, N_{bt} = 0, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	2	1	$C_{wd}^{PM} = C_{pv}^{PM}$	$C_{chp}^{Inv} = 1/4 C_{pv}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 1/3 C_{wd}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 4/3 C_{ht}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 4/3 C_{bt}^{Inv}$
21,811,014	$N_{pv} = 0, N_{wd} = 10, N_{bt} = 0, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	20	2		
223,654,329	$N_{pv} = 0, N_{wd} = 10, N_{bt} = 0, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	200	3		
2,451,576	$N_{pv} = 0, N_{wd} = 10, N_{bt} = 0, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	2	4		
21,877,075	$N_{pv} = 0, N_{wd} = 10, N_{bt} = 0, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	20	5		
240,926,568	$N_{pv} = 0, N_{wd} = 10, N_{bt} = 0, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	200	6		
1,009,082	$N_{pv} = 3, N_{wd} = 15, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	2	7	$C_{wd}^{PM} = C_{pv}^{PM}$	$C_{chp}^{Inv} = 1/2 C_{pv}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 2/3 C_{wd}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 4/3 C_{ht}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 4/3 C_{bt}^{Inv}$
9,212,343	$N_{pv} = 3, N_{wd} = 15, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	20	8		
9,464,645	$N_{pv} = 3, N_{wd} = 15, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	200	9		
998,407	$N_{pv} = 3, N_{wd} = 15, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	2	10		
9,055,037	$N_{pv} = 3, N_{wd} = 15, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	20	11		
9,076,122	$N_{pv} = 3, N_{wd} = 15, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	200	12		
981,188	$N_{pv} = 4, N_{wd} = 14, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	2	13	$C_{wd}^{PM} = C_{pv}^{PM}$	$C_{chp}^{Inv} = 1/2 C_{pv}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 2/3 C_{wd}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 4/3 C_{ht}^{Inv}$ $C_{chp}^{Inv} = 4 C_{bt}^{Inv}$
9,459,454	$N_{pv} = 4, N_{wd} = 14, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	20	14		
985,108	$N_{pv} = 4, N_{wd} = 14, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	2	15		
9,247,447	$N_{pv} = 4, N_{wd} = 14, N_{bt} = 2, N_{chp} = 2, N_{ht} = 2,$	20	16		

همان گونه که در جدول فوق مشاهده می شود، در خصوص سرمایه گذاری بر روی انرژی های خورشیدی، در حالتی که اختلاف هزینه سرمایه گذاری انرژی خورشیدی نسبت به سیستم های پشتیبان انرژی نظیر CHP بسیار بالا باشد، استفاده از آن مقرون به صرفه نیست. به همین سبب در مسائل ۱-۶، کمبود انرژی الکتریکی تولیدی از واحدهای CHP تأمین می شود و این موضوع باعث می گردد به رغم تعداد برابر واحدهای CHP در مسائل ۱-۱۲، در مسائل ۱-۶، مقدار تابع هدف بسیار بالاتر از مسائل ۷-۱۲ شود. همچنین در حالتی که اختلاف هزینه سرمایه گذاری انرژی خورشیدی به میزان نیمی از هزینه های سرمایه گذاری CHP ها باشد، استفاده از انرژی های خورشیدی دارای توجه می شود. در خصوص استفاده همزمان انرژی بادی و خورشیدی نیز مشاهده می شود میزان استفاده از انرژی بادی بسیار بیشتر از انرژی خورشیدی خواهد بود. از جمله دلایل این امر، فرض مناسب بودن سرعت باد و بهره مندی مناسب از انرژی باد در

طول روز به خصوص در ایام شب بوده است. همین امر سبب شده در ساعات شب که انرژی خورشیدی وجود ندارد، انرژی بادی استفاده شود و با وجود این توربین های بادی، در طول روز نیز تا حدود زیادی جوابگوی تأمین انرژی بوده و به همین دلیل، تعداد واحدهای انرژی خورشیدی پایین خواهد بود. اما این موضوع نیز مطرح است که اگر تعداد واحدهای انرژی خورشیدی زیاد نصب شده باشد و در کنار آن واحدهای ذخیره ساز انرژی نیز به تعداد کافی باشند، می توان برای تأمین انرژی در ساعات شب از انرژی ذخیره شده استفاده کرد. لذا مقایسه مابین هزینه انرژی خورشیدی و ذخیره ساز با هزینه های توربین های بادی به همراه در نظر گرفتن ظرفیت تولید انرژی هر واحد صفحه خورشیدی در مقایسه با توربین بادی نیز مطرح است. بدین منظور در مسائل ۱۳-۱۶، هزینه های باتری کم در نظر گرفته شد و مشاهده می گردد با افزایش تعداد باتری و تعداد واحدهای خورشیدی روبه رو می شویم. در عین حال با توجه به نزدیکی هزینه های بادی و

خورشیدی، ترکیب انرژی بادی و ذخیره‌سازها در پاسخ بهینه به دست می‌آیند. نتایج به‌دست‌آمده از اثر تغییرات مختلف پارامترها بر روی



شکل (۷): تعداد واحدهای انرژی و ذخیره‌سازها در حالت‌های $C_{chp}^{fe} = 2 \times 20 \times 200$

۵. نتیجه‌گیری و پژوهش‌های آینده

برای انرژی خورشیدی تا حداکثر دو برابر هزینه سرمایه‌گذاری CHP، می‌تواند توجیه‌پذیر باشد. همچنین از آنجایی که داده‌های مسائل مورد بررسی نشان‌دهنده وضعیت مناسب باد در ایام سال و شبانه‌روز را داشته‌اند، تعداد بالای منابع بادی نسبت به خورشیدی برای تأمین انرژی مورد نیاز در جواب‌های به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود.

در این پژوهش فرض شده است که میزان انرژی منابع تجدیدپذیر به‌صورت قطعی مشخص و در دسترس است. با توجه به عدم قطعیت میزان بهره‌گیری منابع تجدیدپذیر در واقعیت، ارائه مدل‌سازی با این عدم قطعیت می‌تواند از جمله پژوهش‌های آینده باشد. همچنین مدل‌سازی انجام‌شده در این پژوهش با فرض عدم وجود هزینه بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر بوده و در نظر گرفتن این هزینه در مدل‌سازی نیز از دیگر پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده است. بدین منظور می‌بایست میزان انرژی هر ساعت منابع تجدیدپذیر از یک پارامتر به یک متغیر تصمیم تغییر کند و حداکثر میزان استفاده از منابع تجدیدپذیر نیز در مدل لحاظ گردد. همچنین مدل‌سازی دوحده مسئله تعریف‌شده در این پژوهش که شامل اهداف کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم باشد، می‌تواند از جمله موضوعات پژوهش‌های آینده در نظر گرفته شود.

در این پژوهش، مسئله تأمین انرژی مورد نیاز توسعه گلخانه‌ها مورد توجه قرار گرفت و با بهره‌گیری از مفهوم ریزشکبه و استفاده از منابع تجدیدپذیر، مدل‌سازی تأمین انرژی گلخانه‌ها با هدف کمینه‌سازی ارائه شد. بدین منظور با در نظر گرفتن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نگهداری تعمیرات، سوخت مصرفی CHP و همچنین درآمد ناشی از اسقاط تجهیزات در پایان دوره، تعداد بهینه منابع انرژی تجدیدپذیرها و منابع انرژی پشتیبان (CHP) و ذخیره‌سازها تعیین می‌شوند. همچنین از آنجایی که هزینه‌ها و درآمدهای اشاره‌شده از نظر ارزش زمانی پول یکسان نیستند، با بهره‌گیری از مفهوم ارزش خالص فعلی اقدام به یکسان‌سازی مقادیر در تابع هدف مدل گردید. از سویی دیگر، مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم مسئله بسیار وابسته به میزان پارامترهای هزینه‌ای، مقادیر تقاضای انرژی و میزان انرژی‌های تجدیدپذیر در دسترس در ایام سال هستند. لذا در قالب ۱۶ مسئله مختلف و با در نظر گرفتن روابط مختلف میان اجزای هزینه‌ای منابع انرژی، اقدام به بررسی و تحلیل مقادیر مختلف متغیرهای تصمیم گردید. نتایج مسائل مختلف نشان می‌دهند حساسیت میزان هزینه‌های سرمایه‌گذاری منابع تجدیدپذیر نسبت به هزینه سرمایه‌گذاری CHP قابل توجه است و

مراجع

- [1] Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E. and MacCleery, B., *Greenhouse Design and Control*. CRC Press, 2014.
- [2] Ganguly, A., Misra, D. and Ghosh, S., "*Modeling and Analysis of Solar Photovoltaic-Electrolyzer-Fuel Cell Hybrid Power System Integrated with a Floriculture Greenhouse*", *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 11, pp. 2036-2043, 2010.
- [3] Bozchalui, M. C., Cañizares, C.A. and Bhattacharya, K., "*Optimal Energy Management of Greenhouses in Smart Grids*", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 6, No. 2, pp. 827-835, 2014.
- [4] Bambara, J. and Athienitis, A. K., "*Energy and Economic Analysis for the Design of Greenhouses with Semi-Transparent Photovoltaic Cladding*", *Renewable Energy*, Vol. 131, pp. 1274-1287, 2019.
- [5] Mirahmad, A., Sadrameli, S. M. and Jamekhorshid, A., "*A Comprehensive Study on a latent Heat Thermal Energy Storage System and its Feasible Applications in Greenhouses*", *Iranian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 33-45, 2016.
- [6] Marucci, A. and Cappuccini, A., "*Dynamic Photovoltaic Greenhouse: Energy Balance in Completely Clear Sky Condition during the Hot Period*", *Energy*, Vol. 102, pp. 302-312, 2016.
- [7] Chen, J., Xu, F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L. and Ai, Q., "*A Control Method for Agricultural Greenhouses Heating Based on Computational Fluid Dynamics and Energy Prediction Model*", *Applied Energy*, Vol. 141, pp. 106-118, 2015.
- [8] Heidari, M. D. and Omid, M., "*Energy Use Patterns and Econometric Models of Major Greenhouse Vegetable Productions in Iran*", *Energy*, Vol. 36, No. 1, pp. 220-225, 2011.
- [9] Mohammadi, A. and Omid, M., "*Economical Analysis and Relation between Energy Inputs and Yield of Greenhouse Cucumber Production in Iran*", *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 191-196, 2010.
- [10] Taki, M., Abdi, R., Akbarpour, M. and Mobtaker, H. G., "*Energy Inputs-Yield Relationship and Sensitivity Analysis for Tomato Greenhouse Production in Iran*", *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 59-67, 2013.
- [11] Tringovska, I., Yankova, V., Markova, D. and Mihov, M., "*Effect of Companion Plants on Tomato Greenhouse Production*", *Scientia Horticulturae*, Vol. 186, pp. 31-37, 2015.
- [12] Suganthi, L. and Samuel, A. A., "*Energy Models for Demand Forecasting—A Review*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 2, pp. 1223-1240, 2012.
- [13] Chen, J., Yang, J., Zhao, J., Xu, F., Shen, Z. and Zhang, L., "*Energy Demand Forecasting of the Greenhouses Using Nonlinear Models Based on Model Optimized Prediction Method*", *Neurocomputing*, Vol. 174, pp. 1087-1100, 2016.
- [14] Khare, V., Nema, S. and Baredar, P., "*Solar-Wind Hybrid Renewable Energy System: A Review*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 23-33, 2016.
- [15] Kumar, A., Sah, B., Singh, A. R., Deng, Y., He, X., Kumar, P. and Bansal, R. C., "*A Review of Multi Criteria Decision Making (MCDM) Towards Sustainable Renewable Energy Development*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69, pp. 596-609, 2017.
- [16] Pérez-Alonso, J., Pérez-García, M., Pasamontes-Romera, M. and Callejón-Ferre, A. J., "*Performance Analysis and Neural Modelling of A Greenhouse Integrated Photovoltaic System*", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 4675-4685, 2012.
- [17] Esen, M. and Yuksel, T., "*Experimental Evaluation of Using Various Renewable Energy Sources for Heating A Greenhouse*", *Energy and Buildings*, Vol. 65, pp. 340-351, 2013.
- [18] Kıyan, M., Bingöl, E., Melikoğlu, M. and Albostan, A., "*Modelling and Simulation of a Hybrid Solar Heating System for Greenhouse Applications Using Matlab/Simulink*", *Energy Conversion and Management*, Vol. 72, pp. 147-155, 2013.
- [19] Ronay, K. and Dumitru, C. D., "*Hydroponic Greenhouse Energy Supply Based on Renewable Energy Sources*", *Procedia Technology*, Vol. 19, pp. 703-707, 2015.
- [20] Yildirim, N. and Bilir, L., "*Evaluation of a Hybrid System*"

- for a Nearly Zero Energy Greenhouse*", Energy Conversion and Management, Vol. 148, pp. 1278-1290, 2017.
- [21] Arabkoohsar, A., Farzaneh-Gord, M., Ghezlbash, R. and Koury, R. N., "*Energy Consumption Pattern Modification in Greenhouses by a Hybrid Solar-Geothermal Heating System*", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 39, No. 2, pp. 631-643, 2017.
- [22] Hussain, A., Choi, I. S., Im, Y. H. and Kim, H. M., "*Optimal Operation of Greenhouses in Microgrids Perspective*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 3, pp. 3474-3485, 2018.
- [23] Zhuang, P., Liang, H. and Pomphrey, M., "*Stochastic Multi-Timescale Energy Management of Greenhouses with Renewable Energy Sources*", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 10, No. 2, pp. 905-917, 2018.
- [24] <http://irimo.ir/far/wd/2703>-دسترسی داده‌های اقلیمی تاریخی-بازدید شده در ۱۳۹۷/۱۱/۱۸.html
- [25] Rahim, S., Javaid, N., Khan, R. D., Nawaz, N. and Iqbal, M., "*A Convex Optimization Based Decentralized Real-Time Energy Management Model with the Optimal Integration of Microgrid in Smart Grid*", Journal of Cleaner Production, Vol. 1, No. 236, pp.1176-1188, 2019.
- [26] Zolfaghari, M., Ghaffarzadeh, N. and Ardakani, A. J., "*Optimal Sizing of Battery Energy Storage Systems in Off-Grid Micro Grids Using Convex Optimization*", Journal of Energy Storage, Vol. 23, pp.44-56, 2019.