ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست محیطی بکارگیری سیستم CHP با موتور احتراق داخلی برای واحدهای مسکونی در اقلیم‌های گوناگون ایران

ترانه طاهری [۱]، محمدبهشاد شفیعی [۲]، سورنا ستاری [۳]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۵

چکیده:

در این مقاله فرض بر این است که سیستم Micro-CHP با محرکه موتور احتراق داخلی، بخشی از تقاضاهای گرمایش فضا، آب گرم و برق را برای یک ساختمان مسکونی ۳ طبقه تک واحدی در اقلیم‌های گوناگون ایران تامین کند.

به این منظور پس از ارزیابی بارهای گرما و برق ساختمان بر اساس داده های اقلیمی هر مکان و مشخصات ساختمان، ظرفیت بهینه موتور احتراق داخلی و بویلر کمکی در هر اقلیم از طریق نرم افزار تخمین زده شد. در این تحقیق برای تحلیل اقتصادی، کلیه شاخصهای ارزیابی اقتصادی نظیر ارزش فعلی خالص، نرخ بازده داخلی، زمان بازگشت سرمایه محاسبه شد.

فرضیات شامل فروش برق به شبکه با نرخی برابر با میزان خرید آن، مطابق پله مصرفی و اختصاص اعتباری معادل ۳۰ دلار به ازای کاهش هر تن گاز گلخانه ای حاصل از اجرای پروژه بوده است. با شرایط یاد شده زمان بازگشت سرمایه درهر سه اقلیم به کمتر از ۴ سال و در اقلیم معتدل به ۳ سال رسید.

سایر شرایط از جمله خریداری نشدن برق مازاد و اختصاص نیافتن اعتبار کاهش گازهای گلخانه ای و خریداری شدن برق مازاد تولیدی سیستم با قیمتهای آزاد نیز منظور و تحلیل شدند. نتایج حاکی از تأثیر چشمگیر افزایش قیمت خرید برق تولیدی این سیستم‌ها و تخصیص اعتبار کاهش گازهای گلخانه ای بر کاهش زمان بازگشت سرمایه بود که نقش حمایتی دولت را در ترویج این سیستم‌ها در کشور نشان می دهد.

کلمات کلیدی:

موتور احتراق داخلی، تولید همزمان، اقلیم، زمان بازگشت سرمایه، کاهش گازهای گلخانه ای

۱) ترانه طاهری، دانشجوی دکتری مهندسی انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی ، واحد علوم و تحقیقات دانشگاه آزاد اسلامی
taheri.iau@gmail.com

۲) محمد بهشاد شفیعی، دانشیار دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف (نویسنده مسئول)
behshad@sharif.edu

۳) سورنا ستاری، استادیار دانشکده انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری

مقدمه

فناوری گرما و توان ترکیبی (CHP) که به نام‌های دیگری از جمله تولید همزمان نیز معروف است، به تولید همزمان گرما و توان از منبع سوختی واحد اطلاق می شود. این فناوری که از محک زمان سربلند بیرون آمده است مزایای مهمی را از جمله افزایش بازدهی کلی ترمودینامیکی سیستم، کاهش هزینه های کلی مصرف انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در بردارد[۱۰]. این فناوری چنانچه بدرستی به کار رود، می‌تواند به تمام ادعاهای مطرح شده درمورد آن، یعنی مقرون بصرفه بودن، بازدهی بالا داشتن و زیست محیطی بودن جامه عمل بپوشاند [۹].

سیستم‌های بزرگ CHP سالهاست برای گرمایش منطقه ای و در صنایع با استفاده از توربین‌های بخاری و گازی و موتورهای احتراق داخلی به کار می روند و ظرفیتهای خروجی چند صد کیلووات تا چند مگاوات را دربر می گیرند [۱۰]. اخیراً تمایل زیادی به بهره گیری از این سیستم‌ها در مقیاس مینی (تا ظرفیت چند کیلووات) و میکرو (تا ظرفیت ۱/۵ کیلووات) ایجاد شده است تا گرما و توان را برای ساختمانها تأمین کند. البته در دستورالعمل سیستم تولید همزمان اروپا، مبنای تعریف Micro-CHP بر پایه سیستم تولید همزمان با حداکثر ظرفیت کمتر از ۵۰kWe است. یکی از انگیزه های چنین رویکردی مسئله مصرف بالای انرژی در بخش خانگی است که این میزان در انگلستان به یک سوم مصرف نهایی انرژی می رسد[۶]. در ایران بخش خانگی بخش عمده ای از مصرف کل انرژی نهایی کشور را به خود اختصاص داده است. مصرف بالای انرژی و همچنین تعداد زیاد مشترکین بخش خانگی باعث شده است در سالهای اخیر طرحهای پژوهشی گسترده ای بر امکان بکارگیری فناوری‌های تولید همزمان در مجتمعهای مسکونی بزرگ و حتی اخیراً بر تولید توان در یک واحد مسکونی کوچک متمرکز شوند. در تحقیقی ظرفیت بهینه ژنراتور برای یک خانوار در ژاپن حدود ۲ کیلووات همراه با ذخیره گرمایی حدود ۱۰ kWh و مصرف ماهانه ۲۸۰ kWh انرژی الکتریکی برآورد شد[۸].

از دهه ۸۰ میلادی،که شرکت کوچکی به نام ترمکس[1] یک واحد تولید ترکیبی ۱۰ kw با استفاده از موتور فورد با سوخت گاز طبیعی ساخت، تاکنون طراحی مولدهای ترکیبی تغییر اندکی یافته است. در سیستم یادشده، مبادله‌کن گرمای کوئل‌دار (سیم‌پیچ دار) مثل واسطی بین خنک‌کن موتور و آبی که باید گرم می‌شد عمل می‌کرد، در عین حال، مبادله‌کن گاز خروجی ۱۰ درصد آخر گرمای موتور را از خروجی می‌گرفت[۲].

سیستم‌های Micro-CHP مناسب و موجود در بخش خانگی شامل سیستم های تولید همزمان با محرکه موتورهای احتراق داخلی، میکروتوربین، پیل سوختی و موتور استرلینگ هستند .به دلیل فناوری توسعه یافته، طبیعت سازگار، دسترس پذیری و قابلیت اعتماد بالا و هزینه کم، محرکه انتخابی برای کاربردهای تولید همزمان خانگی موتورهای احتراق داخلی هستند.

1) Thermex

لازم به ذکر است که موتورهای استرلینگ نیز اگر صرفا از نقطه نظر اقتصادی به مساله نگاه نکنیم، با موتورهای دیزلی قابل رقابت هستند. آنها بازده حرارتی بسیار بالایی دارند. مواد ناشی از احتراق در این موتورها با اجزای متحرک در موتور در تماس نیست، بنابراین، سایش کم و درنتیجه عمر آنها طولانی است. همچنین موتورهای استرلینگ بدون سر و صدا و ارتعاش کار می‌کنند و به تدریج با کاهش قیمت و رفع مشکلات راه اندازی بکارگیری آنها در سیستم‌های تولید همزمان رو به گسترش است.

در این مقاله فرض بر این است که سیستم Micro-CHP با محرکه موتور احتراق داخلی، تمام یا بخشی از تقاضاهای گرمایش فضا، آب گرم و برق ساختمان را تامین کند. در اینجا بارهای سرمایشی ساختمان در نظر گرفته نشده است .چنانچه تقاضای برق ساختمان از برق تولیدی سیستم بیشتر باشد، مقدار کمبود برق از شبکه خریداری می شود و چنانچه برق تولیدی سیستم از تقاضای برق ساختمان بیشتر باشد، این مقدار مازاد با توجه به ضوابط وزارت نیرو در دستورالعمل مولدهای مقیاس کوچک به شبکه صادر می شود.از گرمای بازیافتی حاصل از گازهای خروجی و آب خنک کاری موتور برای تامین تقاضای حرارتی ساختمان استفاده می شود. در صورتی که تقاضای حرارتی ساختمان بیشتر از حرارت بازیافتی موتور باشد، کمبود گرما به وسیلهٔ بویلر کمکی جبران و در صورتی که مقدار گرمای بازیافتی موتور بیشتر ازتقاضای حرارتی ساختمان باشد، این مقدار مازاد در جو تخلیه می شود[۳].

تحلیل تقاضای انرژی

گام اساسی در طراحی سیستم تولید چندگانه، منظور کردن تغییرات زمانی تقاضای انرژی با توجه به عوامل گوناگونی چون مکان، آب و هوا، عایق‌بندی ساختمان، الگوی مصرف و ... است. به این ترتیب، روشهای چندی وجود دارد؛ از بهره‌گیری از شاخصهای مصرف متوسط گرفته تا استفاده از داده‌های قبضها و یا بکارگیری روشهای ساده‌شده‌ای که تأثیر عوامل مهم خارجی را با روشهای اندازه‌گیریهای میدانی ادغام می کنند و روشهایی که مقدار زیادی اطلاعات را برای تعیین تقاضای ساعتی هر دو انرژی حرارتی و برق به کار می گیرند. انتخاب هر روش به دقت لازم در آن مطالعه بستگی دارد. یکی از متداول ترین روشهای برآورد تقاضای الکتریسیته، استفاده از اطلاعات قبضهاست. بارهای گرمایش و سرمایشی نیز با استفاده از اطلاعات زیادی همچون مشخصات ساختاری ساختمان، اقلیم، الگوی مصرف، میزان اشغال‌شدگی و ... مشخص می‌شوند.

تقاضای برق و حرارت

به منظور انتخاب ظرفیت مناسب سیستم تولید همزمان برق و حرارت، تعیین میزان تقاضای برق و حرارت ضروری است. بر این اساس، لازم است که منحنی های تقاضای توان الکتریکی و حرارتی واحدهای مسکونی استخراج گردد. عموما در کشور تقاضای اصلی حرارت در بخش خانگی به علت نیاز به پخت و پز، آب گرم مصرفی و تأمین حرارت سیستم گرمایشی بوده و تقاضای برق جهت استفاده در سیستم روشنایی، تجهیزات و سیستم سرمایشی ساختمان است. بدین ترتیب، در بخش خانگی نوع و نحوه بهره گیری از این سیستم‌ها به تقاضای برق و حرارت واحد مسکونی وابسته است.

جدول ۱) دسته بندی اقلیمی استانهای کشور

دسته بندی اقلیمی استانهای کشور	
استان	**اقلیم**
مرکزی	**سرد**
آذربایجان شرقی	
آذربایجان غربی	
کرمانشاه	
کردستان	
همدان	
چهار محال و بختیاری	
لرستان	
ایلام	
کهگیلویه و بویر احمد	
زنجان	
اردبیل	
خراسان رضوی	
خراسان شمالی	
گیلان	**معتدل و مرطوب**
مازندران	
گلستان	
خوزستان	**گرم و مرطوب**
هرمزگان	
بوشهر	
فارس	**گرم و خشک**
کرمان	
یزد	
سمنان	
قم	
خراسان جنوبی	
اصفهان	
قزوین	
تهران	

یکی از اصلی ترین عوامل مؤثر بر تقاضای مصرف انرژی در بخش خانگی، تغییرات آب و هوایی و یا به عبارت دیگر، بار حرارتی و برودتی حاصل از آنهاست. به همین دلیل، در تحلیل فنی- اقتصادی استفاده از Micro-CHP لحاظ کردن تفاوتهای اقلیمی کشور اهمیت بسیار دارد. در تحلیلهای انجام شده در این مقاله، ایران به چهار اقلیم سرد، گرم و خشک، معتدل و مرطوب و گرم و مرطوب تقسیم بندی شده که در جدول (۱) استان های دارای شبکه گاز شهری هر یک از این اقلیم ها آورده شده است[۲].

بار حرارتی

گرمای تولیدی در سیستم های Micro-CHP باید با میزان تقاضای حرارت واحد مسکونی مطابقت داشته باشد. با وجود این، اطلاعات دقیقی از میزان بار حرارتی ساعتی بخش خانگی در چهار اقلیم مفروض در دست نیست. بنابراین، در این مطالعه میزان تقاضای حرارت بر واحد متر مربع در بخش خانگی در هر اقلیم در یک روز تخمین زده می شود .با توجه به اینکه این تخمین بر مبنای میزان مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی است، از هر اقلیم یک استان (که گاز رسانی به بخش خانگی در آنها به طور کامل انجام شده) به نمایندگی انتخاب شده است که این تخمین برای انرژی مورد نیاز برای گرمایش منازل اقلیم گرم و مرطوب) به علت مرسوم بودن تجهیزات برقی جهت گرمایش معتبر نیست.

اختلاف تقاضای حرارت در فصول سرد و گرم در اقلیم های کشور سبب شد که در این مطالعه عمدتا تقاضای حرارت آب گرم مصرفی به وسیله سیستم تولید همزمان گرما و توان تأمین و تقاضای حرارت برای گرمایش فضاها در فصول سرد به وسیله یک بویلر پشتیبان تأمین شود . بدین ترتیب، در اقلیم سرد استان آذربایجان شرقی، در اقلیم گرم و خشک، استان تهران، در اقلیم گرم و مرطوب، استان خوزستان و در اقلیم معتدل و مرطوب استان گیلان انتخاب می شوند.

تقاضای اصلی حرارت در بخش خانگی کشور شامل آب گرم مصرفی و گرمایش فضاهای داخلی خانه در نظر گرفته می شود .میزان آب گرم مصرفی با توجه به جمعیت هر استان و در نظرگرفتن میزان معمول ۱۱۰ لیتر آب گرم مصرفی در روز برای هر نفر جمعیت شهری و۶۰ لیتر در روز برای هر نفر جمعیت روستایی به دست می آید[۲].

جدول۲) تخمین میزان تقاضای حرارت جهت گرمایش اقلیم های سرد، گرم و خشک، معتدل و مرطوب[۲]

اقلیم	سرد	گرم و خشک	معتدل و مرطوب
استان	آذربایجان شرقی	تهران	گیلان
نوع	شهری	شهری	شهری
زیر بنا (m2)	۶۴۱۱۹۶۳۴	۳۰۶۰۱۰۰۷۸	۳۱۹۸۳۵۷۲
مصرف گاز طبیعی(kWh/m2.y)	۲۶۸۱۴	۱۱۲۱۷۸	۱۳۴۲۴
سرانه مصرف گاز طبیعی(kWh/m2.y)	۴۱۸	۳۶۶	۴۱۹
سرانه انرژی تولید آب گرم(kWh/m2.y)	۱۰۵	۱۱۲	۱۱۳
سرانه انرژی گرمایش(kWh/m2.y)	۳۱۳	۲۵۴	۳۰۶

روش تحلیل

برنامه‌هایی که در رده ابزارهای غربالگری قرار می‌گیرند فقط بار گرمایشی و الکتریکی متوسط ماهانـه را لازم دارنـد و هدف از بکارگیری آنها این است که ارزیابی کنند آیا سیستم CHP مفروض برای منظوری خاص عملی است یـا نـه. تنهـا پس از آنکه این تحلیل جواب مثبت دهد، طراحی دقیق سیستم صورت می‌پذیرد.

سه ابزار نرم افزاری به نام‌های تحلیلگر انرژی ساختمان[1] (BEA) (۲۰۰۴)، محاسبه‌گر آماده[2] (۲۰۰۶) و کـوجن پـرو[3] (۲۰۰۴)، برحسب شرایط ورودی و قابلیتها ارزش‌گذاری شده‌اند (Downe،۲۰۰۲). محاسبه‌گر آماده که تعویض بویلر(دیـگ بخار) و چیلر را با بویلری جدید و چیلری جذبی تحلیل می‌کند، داده‌های ورودی زیادی را مـی‌طلبـد کـه بـه بـویلر موجـود مربوط است. از طرف دیگر، کوجن پرو که همین هدف را دنبال می کند، اطلاعـات پـارامتری خیلـی کمـی از سـاختمان را می‌طلبد، اما در برآورد صرفه‌جویی‌های قابل بازیابی محتاط است. در نهایت BEA به اطلاعات زیادی درباره ساختمان نیـاز دارد، زیرا شبیه‌سازی دقیقی را اجرا می‌کند. این ابزار را نمی‌توان ابزاری غربالگری تلقی کرد، زیرا شبیه‌سازی ساعتی انجـام می‌دهد[۱۰].

نرم‌افزار مناسب دیگری که از برنامه چندکاربرگی خودکار بهره مـی‌بـرد، RETScreen (۲۰۰۶) اسـت کـه CHP و سیستم‌های انرژی منطقه‌ای را تحلیل می‌کند. برای شبیه‌سازی در این نرم‌افزار، مقادیر ماهانه بارهای گرمایش، سرمایش و توان و همچنین مشخصات تجهیزات لازم است. (۱۰) این نرم‌افزار قابلیت افزودن انواع متفاوت تجهیزات CHP را (چـه از پایگاه داده‌های موجود چه از موارد جدید) دارد و می‌تواند هزینه‌های در طول عمر و انتشار گازهـای گلخانـه‌ای را محاسـبه کند. اعتبار این نرم‌افزار از طریق مشاوران مستقل تأیید و با سایر روشها مقایسه شده است. این نرم افـزار از نـرم افزارهـای پیشتاز بویژه در زمینه انرژی‌های پاک است که در ۲۱۲ کشور جهان بـه ۳۵ زبـان بـه کـار مـی‌رود و بـا دارا بـودن پایگـاه داده‌های اقلیمی و محصولات اکثر تولید کنندگان تجهیزات تجدید پذیر، ابزارهای مفیدی جهت ارزیـابی فنـی، اقتـصادی و زیست محیطی پروژه در اختیار کاربران قرار می‌دهد[۱۱].

تحلیل زیست محیطی و اقتصادی در محیط نرم افزار

مقولات زیست محیطی

در نیروگاههای حرارتی که سهم عمده ای در تأمین نیاز الکتریسیته جوامع مختلف دارند، به‌طور متوسط تنها یک سوم

---

1) Building Energy Analyzer
2) Ready Reckoner
3) Co gen Pro

انرژی سوخت ورودی به انرژی مفید الکتریسیته تبدیل می‌شود. در کشور ایران بازده معمول نیروگاههای حرارتی چیزی در حدود ۳۴ درصد است. در این نیروگاهها مقدار زیادی انرژی حرارتی از طرق مختلف مانندچگالنده، دیگ بخار، برج خنک کن، پمپ‌ها و سامانه لوله کشی موجود در تأسیسات و ....، به هدر می رود. از این گذشته، در شبکه‌های انتقال برق کشور انرژی الکتریسیته تولیدی تلف می‌شود که اگر تولید برق در محل مصرف آن انجام شود، عملا این مقدار اتلاف وجود نخواهد داشت.

استفاده هر چه بیشتر از گرمای آزاد شده در حین فرایند احتراق سوخت باعث افزایش بازده انرژی، کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های مربوط به تأمین انرژی اولیه می گردد.

از حرارت اتلافی بازیافت شده از این سامانه‌ها می توان برای مصارف گرمایشی، سرمایشی و بسیاری از فرایندهای صنعتی استفاده نمود. تولید همزمان برق و حرارت، می تواند علاوه بر افزایش بازده و کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش انتشار گازهای آلاینده و گلخانه ای شود.

سیستم‌های تولید همزمان از طرفی با حذف اتلافات توزیع و انتقال برق سراسری که سیار بالا و حدود ۲۰ درصد می‌شود و از طرف دیگر، با افزایش بازده کلی در کاهش گازهای گلخانه ای نقش مهمی دارند. یکی از ویژگیهای نرم افزار RETScreen قابلیت محاسبه میزان کاهش گازهای گلخانه ای است[۱۱]. چنانچه اعتباری به ازای این کاهش منظور شود، در مقرون بصرفه شدن پروژه مؤثر خواهد بود. این اعتبار متغیر بوده و در کشورهای مختلف در حدود ۲۰ تا ۹۰ دلار است[۱۲].

تأثیر افزایش بازده انرژی در کاهش آلودگی زیست محیطی

در سامانه‌های CHP بازده انرژی به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در سامانه‌های متداول امروزی معمولا از کل انرژی ورودی به سامانه تنها یک پنجم یعنی معادل ۲۰ درصد به انرژی مفید تبدیل می شود. البته بازده ترمودینامیکی نیروگاههای چرخه ترکیبی پیشرفته تا حدود زیادی افزایش یافته و به ۴۰ تا ۵۰ درصد می‌رسد. با وجود این، تلفات زیادی در خطوط انتقال نیرو و مصارف داخلی نیروگاهها وجود دارد که تقریبا اجتناب ناپذیر است.

البته باید دقت داشت که یکی از مسائل زیست محیطی سیستم‌های تولید همزمان ایجاد آلودگی در محل است. از ملاحظات اساسی در هر سیستم CHP می‌توان به اینکه موتور CHP چه انتشاراتی تولید می‌کند و چه راهبردهای کنترلی برای کیفیت هوا ضروری است، اشاره کرد. از جمله آلاینده های جوی حاصل از موتورهای گازی می‌توان از اکسیدهای نیتروژن (No2)، کربن‌مونوکسید (CO) ، هیدروکربن‌ها (HC) و اکسیدهای گوگرد (So2)،آلدئیدها (CHO) و مواد معلق ۱۰ میکرونی و کوچکتر (PM10) نام برد. این آلاینده‌های جوی در کاربردهای سوخت گازی در مقایسه با کاربردهای سوخت مایع در غلظتهای بی‌اندازه کمتری پیدا می‌شوند. همچنین با توجه به اینکه موتورهای رفت و برگشتی یا

پرسوزند (غنی سوز) یا کم‌سوز، نوع موتور روی اقدامات کنترل انتشارات آن تأثیر دارد. به‌طور کلی، موتور احتراق کم‌سوز سطوح خیلی کمتری از آلاینده‌های جوی را عرضه می‌کند.

از جمله اقدامات کنترلی آلودگی هوا تصفیه گاز خروجی دربرگیرنده کاهش سطوح آلاینده‌های جوی در خروجی اگزوز با "پاکسازی" این آلاینده‌ها از بخار خروجی است. کاتالیزگرها روشی معمول در کاهش میزان آلاینده‌ای جوی حاضر درگاز خروجی است. انواع معمول کاتالیزگر شامل کاتالیزگرهای سه‌راهه و کاهش کاتالیزوری گزینشی‌اند[۹].

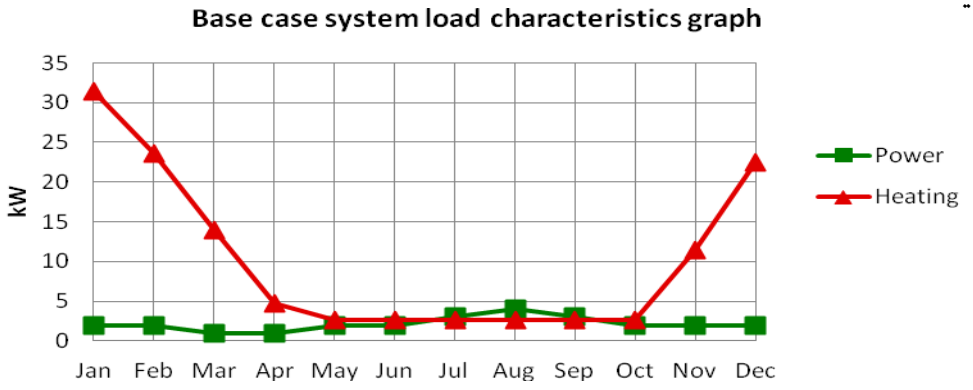
از دیگر راهبردهای پیشنهادی جهت کاهش هر چه بیشتر آلودگی در این سیستم‌ها، بهره‌گیری از سوختها و فناوریهای پاک به صورت مکمل است.

تحلیل اقتصادی

یکی دیگر از قابلیت‌های نرم‌افزار انرژی‌های تجدید پذیر این است که به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد از طریق فرایند امکان‌سنجی اولیه مقرون بصرفه بودن پروژه را تا حدودی پیش‌بینی کنند. چنانچه پروژه بالقوه حائز شرایط بود، تحلیل امکان‌سنجی مفصل‌تری لازم می‌شود. در نرم‌افزار بخشی به کاربرگ خلاصه وضعیت مالی اختصاص دارد که برای هر پروژه ارزیابی شده، وجود دارد. این کاربرگ تحلیل مالی شامل ۵ بخش انرژی سالانه، پارامترهای مالی، هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌های پروژه و امکان‌سنجی مالی و نمودار جریان نقدی سالانه است .

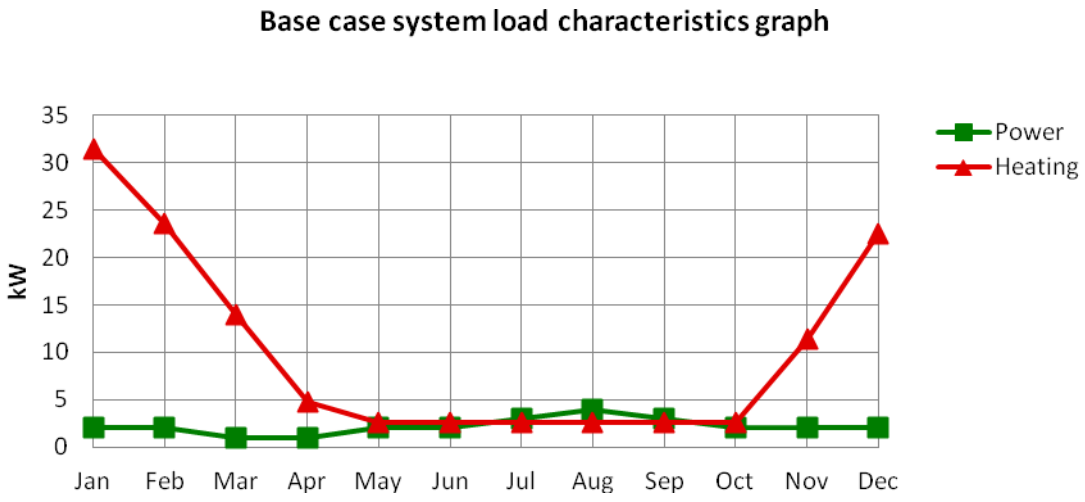
بخش توازن انرژی و هزینه‌ها و صرفه‌جویی‌های پروژه در قالب کاربرگ‌های مدل انرژی، تحلیل هزینه و تحلیل کاهش گازهای گلخانه‌ای مرتبط با هر پروژه عرضه می شود. علاوه بر این بخش، امکان سنجی مالی پروژه بر مبنای داده‌هایی که کاربر در بخش پارامترهای مالی وارد می‌کند، صورت می گیرد. بخش جریان نقدی سالانه به کاربر امکان می‌دهد جریان انباشت نقدی را قبل و بعد از مالیات در طول عمر پروژه مشخص کند.

یافته ها

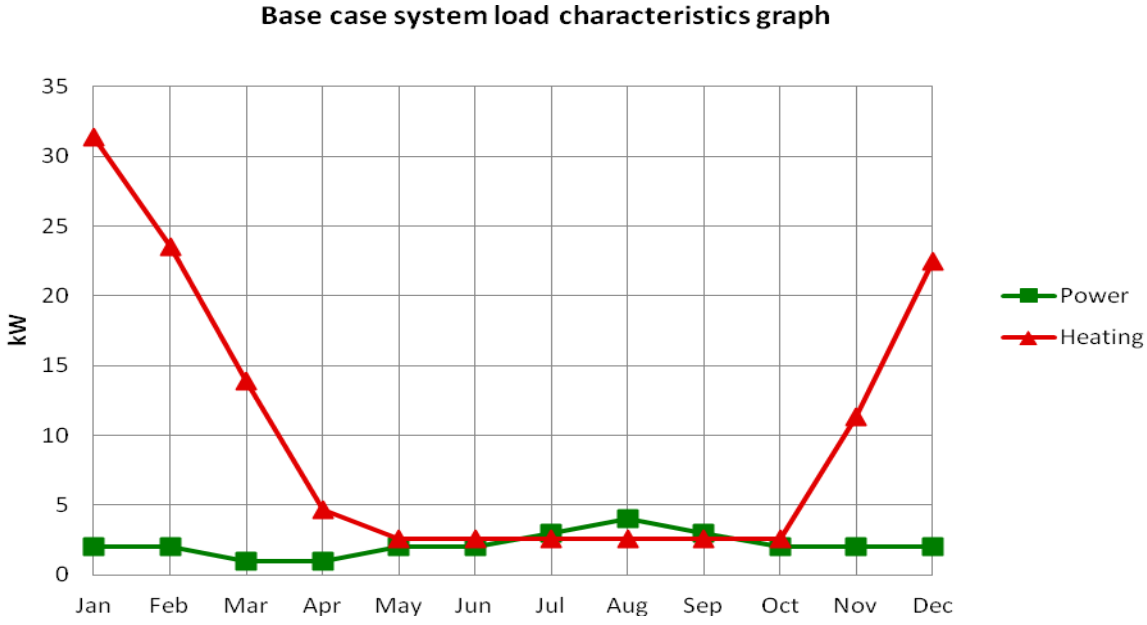


نمودار۱) تقاضای توان و حرارت در اقلیم گرم و خشک(RETScreen)

برای هریک از این اقلیمها داده های آب و هوایی از پایگاه داده هـای آب و هـوایی موجـود در مـدل تولیـد همزمـان RETScreen وارد شد. روش‌شناسی بکاررفته در مدل با رهیافت ساده ای ارائه شده است. در این سطح، داده‌هـای تقاضـا به صورت متوسط ماهانه ارائه می‌شوند. بر اساس ورودی‌هـای اقلیمـی فـوق و مشخـصات سـاختمان و همچنـین متوسـط تقاضاهای برق و حرارت، نرم افزار نمودارهای زیر را ترسیم می‌کند.



نمودار۲) تقاضای توان و حرارت در اقلیم معتدل و مرطوب(RETScreen)



نمودار۳) تقاضای توان و حرارت در اقلیم سرد(RETScreen)

متناسب با بار الکتریکی و حرارتی هر اقلیم، ظرفیت موتور احتراق داخلی و ظرفیت بویلر کمکی برآورد شد. میزان بارهای متوسط الکتریکی و حرارتی و متناسب با آن ظرفیتهای متناظر سیستم محرکه تولید همزمان و بویلر کمکی و سایر نتایج فنی بکارگیری سیستم یاد شده حاصل از نرم افزار در جدول (۳) خلاصه شده است. لازم به ذکر است که برای هر چهار اقلیم، مطالعه صورت گرفته شامل ارزیابی بکارگیری سیستم تولید همزمان از نوع موتور احتراق داخلی به صورت مرکزی برای یک ساختمان مسکونی ۳ طبقه تک واحدی، با سطح زیربنای ۱۵۰ متر مربع به ازای هر واحد بوده است.

جدول ۳) ویژگیهای سیستم تولید همزمان از نوع موتور احتراق داخلی برای سه اقلیم بررسی شده

تحلیل انرژی	اقلیم		
ویژگیهای سیستم و نتایج	تهران	تبریز	رامسر
بار متوسط الکتریکی سالانه(شامل سرمایش)(kW)	۱/۶	۱/۵	۲/۴
بار سرانه حرارتی(شامل گرمایش فضا و آب گرم)(W/m^2)	۹۰	۱۱۰	۱۰۵
بار گرمایشی اوج مصرف سالانه(kW)	۴۱	۵۰	۴۷
بار گرمایشی اوج مصرف پس از اقدامات صرفه جویی(kW)	۳۲	۴۰	۳۸
ظرفیت موتور احتراق داخلی(kW)	۳/۵	۳	۴/۵
طول عمر موتور احتراق داخلی(Yr)	۱۰	۱۰	۱۰
میزان بازیابی حرارتی(%)	۷۸/۶	۷۸/۶	۸۰
گرمای تحویلی سالانه موتور احتراق داخلی(MWh)	۳۴	۳۶	۴۶
ظرفیت بویلر کمکی(kW)	۳۳	۴۰	۳۸

از جمله مزایای بهره‌گیری از این نرم‌افزار برای ارزیابی مالی پروژه‌ها، این است که ارزیابی مراحل گوناگون پروژه را برای تصمیم‌گیری ساده می‌کند. کاربرگ خلاصه وضعیت مالی با پارامترهای ورودی نظیر هزینه اجتناب شده انرژی، نرخ تنزیل، میزان وام و پارامترهای خروجی محاسبه شده اقتصادی نظیر نرخ بازده داخلی، زمان بازگشت سرمایه، ارزش خالص فعلی، میزان صرفه‌جویی حاصل به تصمیم گیران پروژه امکان می‌دهد پارامترهای مالی گوناگون را بررسی کنند [۱۱].

در این مطالعه محاسبات اقتصادی با فرضیات زیر صورت گرفت:

ابتدا قیمت خرید گاز طبیعی و برق از شبکه براساس پله مصرفی مندرج در قبضها، بر اساس بار حرارتی و الکتریسیته ساختمان قرار داده شد و قیمت فروش برق به شبکه نیز برابر با همین تعرفه منظور شد. این شرایط برای هر سه اقلیم تعریف و نتایج اقتصادی به دست آمد که نمودارهای جریان نقدینگی برای هریک از اقلیمها با شرایط مذکور ارائه شده است. همچنین شاخصهای اقتصادی خروجی نیز با نرم افزار محاسبه و در جدول (۴) ارائه شد.

سپس به منظور مقایسه سایر شرایط احتمالی و دست یافتن به عوامل مؤثر در مقرون بصرفه شدن پروژه، کلیه احتمالات موجود در قالب دو سناریوی اصلی و چندین حالت منظور و در نرم افزار وارد شد. در سناریوی اول، قیمت خرید برق و گاز طبیعی از شبکه ثابت و مطابق پله مصرفی فرض شد و نتایج به ازای تغییر قیمت فروش برق به شبکه و نیز به ازای تخصیص اعتبار به ازای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای برای ۲۴ حالت گوناگون به دست آمد. نرم افزار برای هریک از مجموعه این ورودی‌ها اجرا شد.

جدول زیر مفروضات و نتایج اقتصادی و زیست محیطی حاصل از اجرای پروژه در نرم افزار را برای هر سه اقلیم نشان می دهد[۵ و۷].

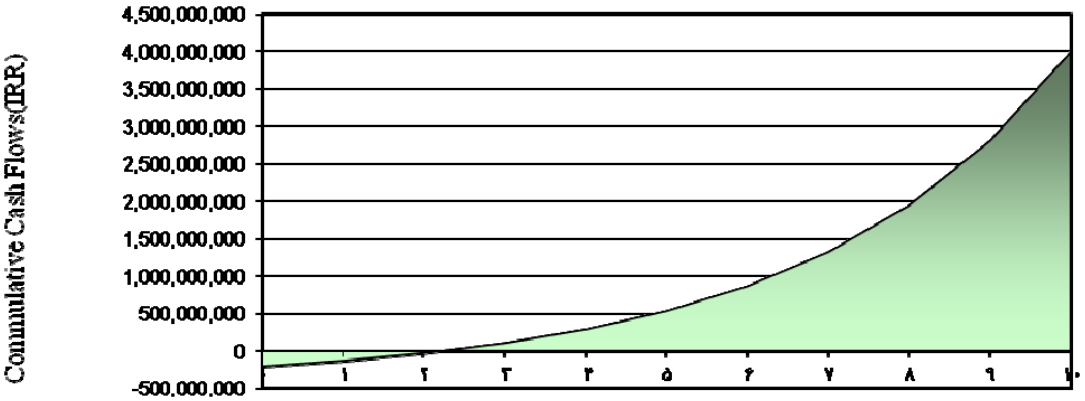
جدول ٤) مفروضات و نتایج اقتصادی و زیست محیطی حاصل از اجرای پروژه در نرم افزار برای هر سه اقلیم

تحلیل زیست محیطی و اقتصادی	اقلیم		
مفروضات و نتایج	تهران	تبریز	رامسر
کاهش سالانه گازهای گلخانه ای($Ton\ CO_2$)	۲۳/۵	۳۰/۴	۳۹/۲
میزان اعتبار به ازای کاهش گازهای گلخانه ای (Rial /Ton CO2)	۹۰۰۰۰۰		
هزینه سوخت گاز طبیعی(Rial/m3)	۵۰۰		
هزینه سیستم موتور احتراق داخلی(Rial)	۱۲۰۰۰۰۰۰۰	۹۰۰۰۰۰۰۰	۱۵۰۰۰۰۰۰۰
هزینه سیستم گرمایش کمکی(Rial)	۳۵۰۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰۰۰
کل هزینه اولیه(Rial)	۲۱۰۰۰۰۰۰۰	۱۸۵۰۰۰۰۰۰	۲۵۰۰۰۰۰۰۰
هزینه سالانه(Rial)	۱۶۶۶۶۰۰۰	۱۱۰۰۰۰۰۰	۱۴۰۰۰۰۰۰
نرخ تورم(%)	۴۰		
زمان بازگشت سرمایه(Yr)	۳/۴	۷۳،	۳
نقطه سربه سر شدن سود و هزینه(Yr)	۲/۲	۵۲،	۲/۱
نرخ بازگشت داخلی(%)	۶۸	۵۷	۶۹

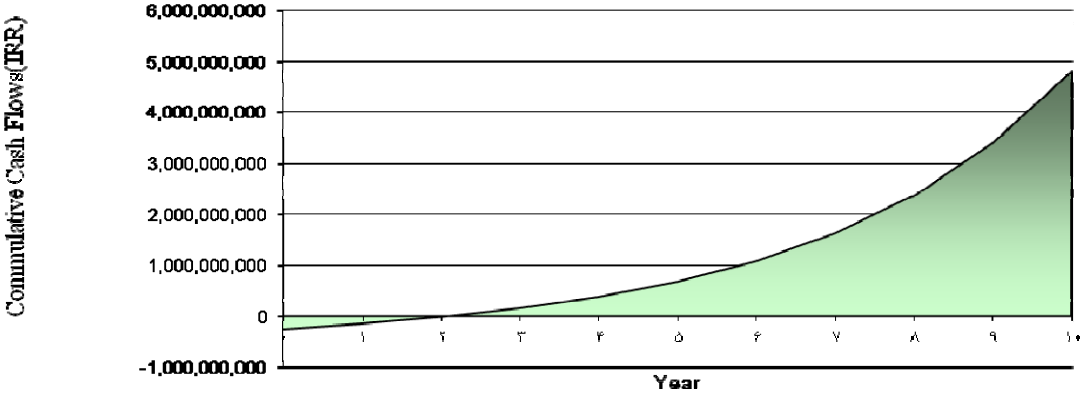
از میان حالتهای اجرا شده، بدترین حالت مربوط به وضعیتی می شود که هیچ اعتباری به ازای کاهش گازهای گلخانه‌ای منظور نشود و برق مازاد تولیدی سیستم CHP به شبکه فروخته نشود یا رایگان به شبکه تزریق شود که در این

حالت، میزان زمان بازگشت سرمایه به ۹ سال افزایش می یابد. سایر شرایط مربوط به فروش برق به شبکه با قیمتهای پیش از یارانه (۱۰۰ Rial/kWh) ؛ برابر با قیمت خرید برق،مطابق دستورالعمل وزارت نیرو برای خرید برق CHP (یعنی۳۰۰ ریال + یک چهارم قیمت سوخت مصرفی)، طبق قیمت آزاد، و قیمت بر اساس پله مربوط به بیشترین مصرف گذاشته شد. میزان اعتبار به ازای کاهش گازهای گلخانه ای نیز صفر ریال (یعنی وضعیتی که هیچ اعتباری تعلق نگیرد)، تا میزان معادل ۲۰ ، ۳۰ و ۹۰ دلار که میزان متغیر و متداول آن در کشورهای مختلف است[۱۲] منظور شد.

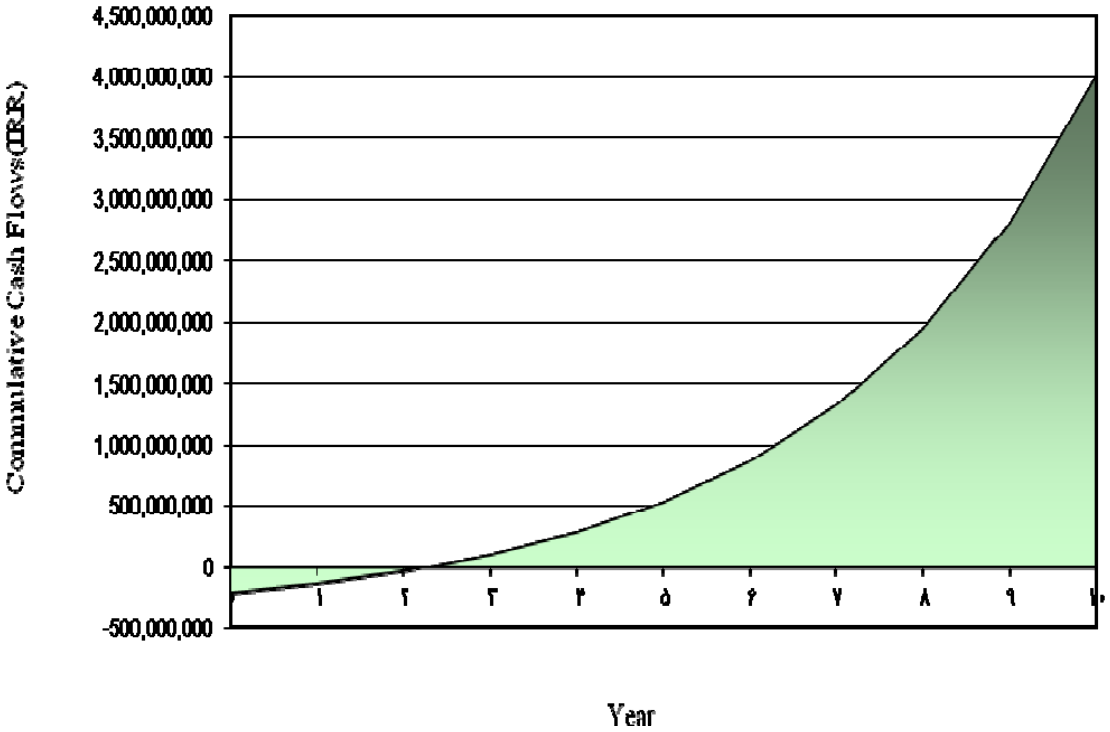
در نهایت، در پژوهش حاضر برای نزدیک شدن به شرایط واقعی ، نمودار انباشت نقدینگی برای قیمتهای خرید برق و گاز طبیعی طبق تعرفه تعریف شده بر حسب پله مصرفی مندرج در قبضها منظور شده و قیمت فروش برق به شبکه نیز برابر با قیمت خرید آن از شبکه قرار داده شده است و میزان اعتبار ۳۰ دلار به ازای کاهش گازهای گلخانه ای تخصیص یافته است که با این شرایط، زمان بازگشت سرمایه زیر ۴ سال، همان طور که در نمودار ها مشاهده می‌شود، برای هر سه اقلیم دست یافتنی است .



نمودار٤) انباشت نقدی در طول عمر برای اجرای سیستم در اقلیم گرم و خشک



نمودار٥) انباشت نقدی در طول عمر برای اجرای سیستم در اقلیم معتدل و مرطوب

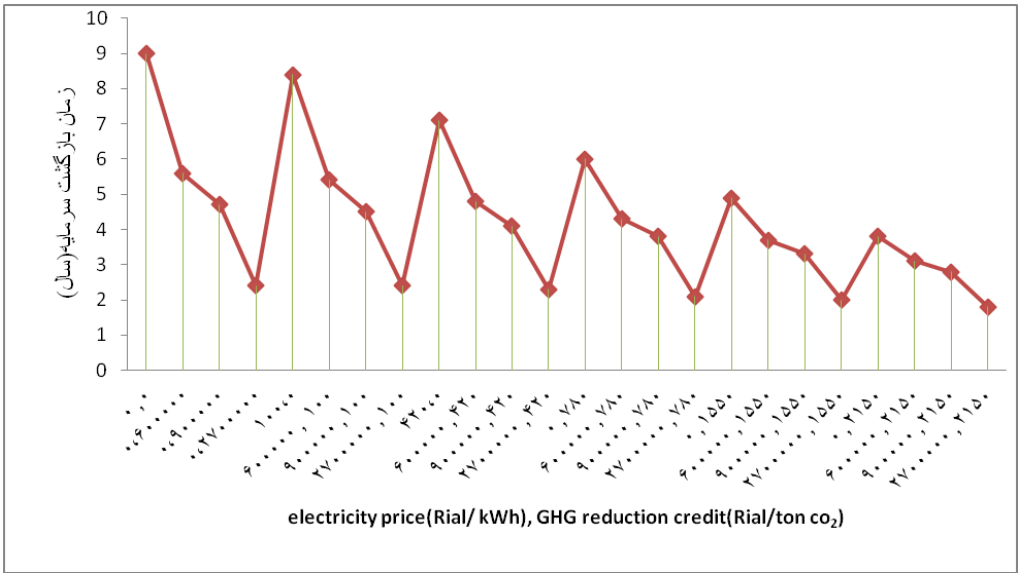


نمودار ٦) انباشت نقدی در طول عمر برای اجرای سیستم در اقلیم سرد

جدول(۵)سناریوی اول.ستون افقی قیمت فروش برق مازاد به شبکه (ریال بر کیلووات ساعت) و ستون عمودی میـزان اعتبار کاهش گازهای گلخانه ای (ریال بر تن $CO2$) و خانه های داخلی زمان بازگشت سرمایه(سال) را نشان می دهد.

جدول ۵) سناریوی اول

قیمت فروش برق به شبکه (ریال بر کیلووات ساعت)	۲۱۵۰	۰	۱۰۰	۴۲۰	۷۸۰	۱۵۵۰
میزان اعتبار کاهش گازهای گلخانه‌ای (ریال بر تن CO_2)						
۰	۳/۸	۴/۹	۶	۷/۱	۸/۴	۹
۶۰۰۰۰۰	۳/۱	۳/۷	۴/۳	۴/۸	۵/۴	۵/۶
۹۰۰۰۰۰	۲/۸	۳/۳	۳/۸	۴/۱	۴/۵	۴/۷
۲۷۰۰۰۰۰	۱/۸	۲	۲/۱	۲/۳	۲/۴	۲/۴



نمودار۷) زمان بازگشت سرمایه(محور عمودی)، به صورت تابعی از هر دوی تغییرات اعتبار گازهای گلخانه ای و قیمت فروش برق به شبکه (محور افقی).

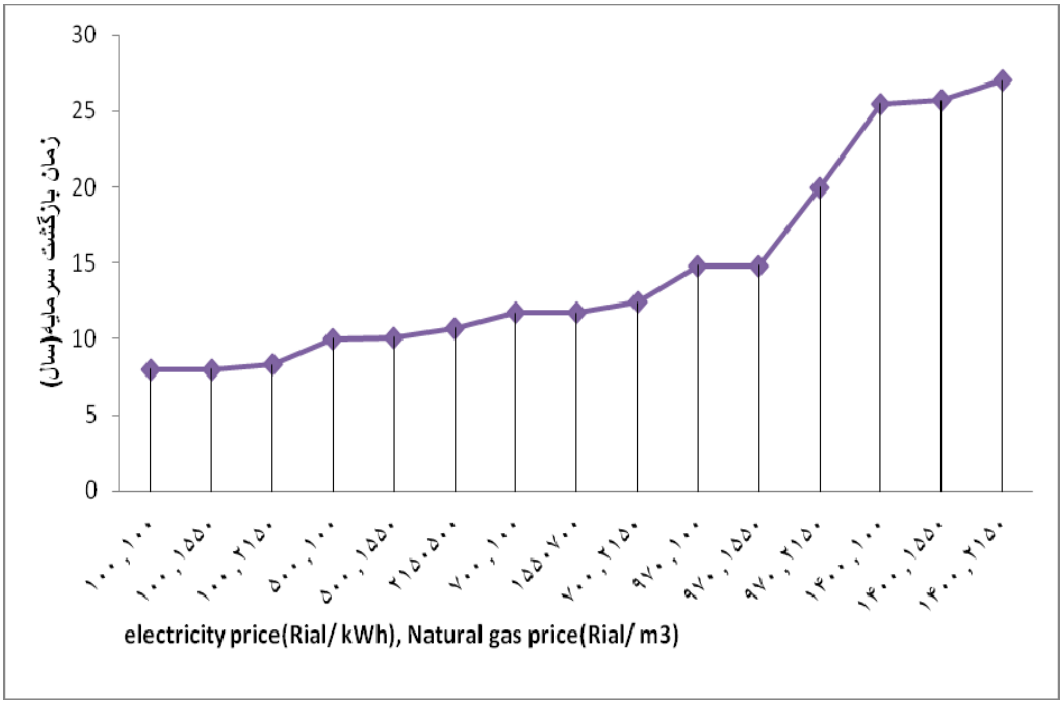
در سناریوی دوم فرض شد که قیمت خرید گاز طبیعی و برق از شبکه متغیر باشد و هزینه فروش آن براساس تعرفه تعیین شده مطابق پله مصرفی باشد. بر این اساس، ۱۵ حالت در نرم افزار به شرح زیر اجرا شد.

قیمت خرید گاز : ۱۰۰ریال بر متر مکعب، قیمت آن بر اساس پله مصرفی ساختمان بررسی شده (۵۰۰ ریال) ، قیمت آزاد فعلی (۷۰۰ ریال) ، پیشنهاد ۳۸ درصدی کمیسیون تلفیق مجلس (۹۷۰ ریال) و پیشنهاد ۴۵۰ درصدی دولت در قالب بودجه (۱۴۰۰ ریال) [۱۱]. همچنین قیمت خرید برق : از ۱۰۰ریال بر کیلووات ساعت تا بیشینه ۲۱۵۰ ریال بر کیلووات ساعت یعنی پله آخر مصرف. نتایج در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول(۶) سناریوی دوم .ستون افقی قیمت خرید گاز طبیعی (ریال بر متر مکعب) و ستون عمودی قیمت خرید برق از شبکه (ریال بر کیلووات ساعت) و خانه های داخلی زمان بازگشت سرمایه(سال) را نشان می دهد

جدول ٦) سناریوی دوم

قیمت خرید گاز طبیعی(ریال بر متر مکعب) / قیمت خرید برق از شبکه (ریال بر کیلووات ساعت)	۱۰۰	۵۰۰	۷۰۰	۹۷۰	۱٤۰۰
۱۰۰	۸	۱۰	۱۱,۷	۱۴,۸	۲۵,۵
۱۵۵۰	۸	۱۰,۱	۱۱,۷	۱۴,۸	۲۵,۷
۲۱۵۰	۸,۳	۱۰,۷	۱۲,۴	۲۰	۲۷



نمودار۸) زمان بازگشت سرمایه(محور عمودی)، به صورت تابعی از هر دوی قیمت خرید گاز طبیعی (ریال بر متر مکعب) و قیمت خرید برق از شبکه (ریال بر کیلووات ساعت) (محور افقی).

نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده، سیستم‌های تولید همزمان توان و گرما، چنانچه بتوانند برق مازاد خود را با قیمتی بیشتر از قیمت برق شبکه سراسری بفروشند، کاملا مقرون بصرفه می شوند و زمان بازگشت سرمایه آنها به زیر ۵ سال می‌رسد. همچنین با توجه به اتلافات شبکه انتقال و توزیع برق سراسری، سیستم‌های تولید همزمان در محل با کاهش این اتلافات و نیز با افزایش بازده کلی و کاهش مصرف سوخت نقش مؤثری در کاهش گازهای گلخانه ای دارند که در صورت منظور شدن اعتبار به ازای این کاهش، پروژه هایی از این دست کاملا مقرون بصرفه می شوند و به زمانهای بازگشت سرمایه کمتر از ۲ سال دست خواهند یافت که نقش سیاستهای حمایتی دولت را در اقتصادی شدن این دست پروژه ها نشان می دهد.

منابع

[۱] تلکس اینترنتی مهر،(۱۳۹۲)، جزئیات افزایش قیمت بنزین، گاز و گازوئیل/ جدول افزایش قیمت‌ها در سال ۹۲.

[۲] جوکار، علی، امید، شاه حسینی، (۲۰۱۱)، پتانسیل سنجی تولید همزمان برق و حرارت در بخش خانگی در ایران، بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق.

[۳] ربیع پور، مصطفی و همکاران، (۱۳۸۹)، مدیریت هزینه و مصرف انرژی با استفاده از یک سیستم تولید همزمان برق با محرکه موتور احتراق داخلی (CHP) و حرارت، نخستین همایش منطقه‌ای مهندسی مکانیک ،دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شرق.

[۴] محمدیان روشن، یاسر، تحلیل سرمایه گذاری مولد گازسوز با توجه به شرایط خرید تضمینی انرژی در بازار برق(۲۰۰۸)، بیست و سومین کنفرانس بین المللی برق.

[5] GODEFROY J., ET AL, (2007) , "DESIGN, TESTING AND MATHEMATICAL MODELLING OF A SMALL-SCALE CHP AND COOLING SYSTEM (SMALL CHP-EJECTOR TRIGENERATION)", *APPLIED THERMAL ENGINEERING* 27, 68–77.

[6] Goldstein, Larryو(2003), *Gas-Fired Distributed Energy ResourceTechnology Characterizations*.

[7] KIM J., *ET AL*, (2010), "OPTIMUM GENERATION CAPACITIES OF MICRO COMBINED HEAT AND POWER SYSTEMS IN APARTMENT COMPLEXES WITH VARYING NUMBERS OF APARTMENT UNITS", *ENERGY* 35, 5121_5131).

[8] KOLANOWSKI B.F. (2008), *SMALL-SCALE COGENERATION HANDBOOK*, CRC PRESS.

[9] M.MECKLER, L.B.HYMAN, (2010), *SUSTAINABLE ON-SITE CHP SYSTEMS*, MCGRAW HILL,

[10]) RETScreen® Software Online User Manual, (2010), Combined Heat & Power Project Model, www.retscreen.net,.

[11] http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html(،2010)