نشریه مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز، شماره پیاپی ۱۱۵، جلد ۵۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۵، صفحه ۳۱-۴۰ – پژوهشی کامل - DOI: 10.22034/jmeut.2026.68636.3599

مطالعه فنی-اقتصادی و مقایسه خنک‌سازی هوای ورودی توربین گاز با چیلرجذبی و احداث نیروگاه خورشیدی برای اقلیم‌های مختلف ایران

محمد نام‌خواه دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، m.namkhah@ut.ac.ir
احسان هوشفر* دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، houshfar@ut.ac.ir
پوریا احمدی استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران، pahmadi@ut.ac.ir

چکیده
با افزایش گرمایش جهانی و آلودگی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی، انرژی‌های تجدیدپذیر ازجمله انرژی خورشیدی در ایران موردتوجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش با نگاهی انتقادی به حرکت شتاب‌زده به‌سوی انرژی خورشیدی، به مقایسه فنی و اقتصادی میان احداث نیروگاه خورشیدی و خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز در چهار اقلیم مختلف می‌پردازد. بدین منظور، چهار شهر اهواز، شیراز، تبریز و رشت با داده‌های اقلیمی مربوطه بررسی شده و انرژی تولیدی سالانه ناشی از خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز محاسبه و با ظرفیت برابر نیروگاه خورشیدی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که خنک‌کاری ورودی توربین گاز در اهواز، شیراز، تبریز و رشت به‌ترتیب ۶۲/۷، ۲۱/۳، ۹/۵ و ۷/۴ گیگاوات‌ساعت انرژی اضافه تولید می‌کند. نتایج اقتصادی نشان داد هزینه اولیه سیستم خنک‌کاری هوای توربین در تمام اقلیم‌ها کمتر از نیروگاه خورشیدی است و هزینه خالص فعلی و هزینه انرژی واحد سیستم خنک‌کاری هوای توربین گاز با چیلر جذبی در شهرهای اهواز، رشت و شیراز کمتر از نیروگاه خورشیدی خواهد بود و به‌عنوان گزینه‌ای اقتصادی‌تر برای تأمین برق در ایران قابل‌توجه است.

واژه‌های کلیدی: خنک‌کاری، هوای ورودی به توربین‌گاز، نیروگاه خورشیدی، انرژی‌های تجدیدپذیر، اقتصاد انرژی خورشیدی، مطالعه اقتصادی.

Techno-economic assessment and comparison of gas turbine inlet air cooling via absorption chiller or solar power plant installation for various Iran's climate regions

M. Namkhah School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
E. Houshfar School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
P. Ahmadi School of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract
With the rise of global warming and pollution caused by fossil fuel consumption, renewable energies, including solar energy, have attracted increasing attention. This study critically examines the rapid movement toward solar energy by conducting a techno-economic comparison between the installation of a solar power plant and gas turbine inlet air cooling across four different climatic. For this purpose, four cities—Ahvaz, Shiraz, Tabriz, and Rasht—along with their relevant climate data, were examined. The annual energy production resulting from cooling the inlet air of the gas turbine was calculated and compared with a solar power plant of equal capacity. The results showed that cooling the inlet air of the gas turbine in Ahvaz, Shiraz, Tabriz, and Rasht produced an additional 7.62, 3.21, 5.9, and 4.7 gigawatt-hours of energy, respectively. Economic results indicated that the initial cost of the gas turbine inlet air cooling system is lower than that of the solar power plant in all climates. Additionally, the net present cost and levelized cost of energy for the gas turbine inlet air cooling system with an absorption chiller in the cities of Ahvaz, Rasht, and Shiraz were lower than those of the solar power plant, making it a more economical option for electricity supply in Iran.

Keywords: Cooling, gas turbine inlet air, solar power plant, renewable energies, solar energy economics, economic study.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، افزایش آلودگی هوا، گرمایش جهانی و دیگر پیامدهای ناشی از مصرف بی‌رویهٔ سوخت‌های فسیلی به‌عنوان چالش‌هایی جهانی مطرح شده‌اند. سال میلادی گذشته، دومین گرم‌ترین سال ثبت‌شده گزارش شد و در برخی روزها آلودگی هوای بی‌سابقه‌ای در برخی شهرهای جهان از جمله تهران گزارش گردید. نقش مصرف بی‌رویهٔ سوخت‌های فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای در این روند قابل‌تأمل است [۱]. برای کشوری دارای منابع غنی مانند ایران، حرکت به سوی انرژی‌های تجدیدپذیر، در سال‌های گذشته توجیه اقتصادی نداشته است. اما اکنون، همگام با جهان، انرژی‌های تجدیدپذیر همچون انرژی خورشیدی، بادی و زمین‌گرمایی[۲]، در ایران نیز به سرعت درحال گسترش می‌باشد. در سال‌های اخیر نیز، علاقه و سرمایه‌گذاری بر انرژی‌های تجدیدپذیر و به‌خصوص انرژی خورشیدی در ایران بسیار بالا رفته است [۳]. چنان‌که به دیدگاه برخی پژوهشگران راهکار اصلی جبران ناترازی برق کشور، انرژی خورشیدی معرفی می‌شود. اما موانع متعددی در مسیر حرکت کامل به سمت انرژی خورشیدی برای تامین تمام ناترازی برق کشور وجود دارد. بسیاری از کارشناسان معتقدند خاموشی اخیر در کشورهای اسپانیا و پرتغال، ناشی از تزریق بیش از اندازه برق خورشیدی به شبکه

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: houshfar@ut.ac.ir
تاریخ دریافت: ۰۴/۰۵/۲۲
تاریخ پذیرش: ۰۴/۱۰/۲۲

بوده است [۴]. این اتفاق نمایانگر آن است که، تامین بخش زیادی از برق کشور از انرژی خورشیدی، نیازمند زیرساخت‌های مناسب و یک شبکه توزیع قدرتمند است تا توان مدیریت نوسانات چند هزار مگاوات برق خورشیدی را دارا باشد. همچنین، موانع و مشکلات زیادی نظیر مشکلات فنی، اقتصادی، ضعف‌های ساختاری و موانع سیاست‌گذاری بر سر راه توسعه گسترده انرژی خورشیدی در ایران وجود دارد. انرژی خورشیدی علاوه بر تمام مزایا و برتری‌های زیست‌محیطی که دارد، در ایران صرفه اقتصادی پایینی داشته و به‌دلیل هزینه اولیه بالا، بخش خصوصی کمتر به استفاده از آن تمایل داشته است. در مجموع، علاوه‌بر این چالش‌ها و مشکلات انرژی خورشیدی، این انرژی بخصوص در سال‌های اخیر توجه بسیاری از محققان، پژوهشگران، صنعتگران و دولتمردان را به سمت خود جلب کرده است.

در ابتدا، مروری بر مطالعاتی که بر بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در ایران پرداخته‌اند خواهد شد. مطالعات متعددی بر سیستم‌های خورشیدی در ایران، با تاکید بر پتانسیل بالای ایران برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، انجام شده است. قائمی‌راد و شاهین [۵] در مطالعه‌ای چشم‌انداز انرژی خورشیدی در ایران را به روش SWOT مورد تحلیل قرار دادند. آنها بزرگ‌ترین مانع توسعه این انرژی در ایران را ارزان بودن قیمت سوخت‌های فسیلی و حامل‌های انرژی، عدم درک ضرورت توسط سیاستمداران و فقدان انگیزه بخش خصوصی دانستند. گرجیان و همکاران [۶] در مطالعه‌ای با تاکید بر اینکه مصرف انرژی در ایران بیش از ۴ برابر استاندارد جهانی است، چالش‌ها و فرصت‌های توسعه تولید برق از طریق پنل‌های فتوولتائی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، بزرگترین مانع گسترش برق خورشیدی در ایران نبود زیرساخت‌ها، عدم حاکمیت درست انرژی و همچنین نبود نقشه راه برای توسعه پایدار انرژی در کشور گزارش شد. در پژوهشی دیگر عدالتی و همکاران [۷]، گسترش نیروگاه‌های فتوولتائی خورشیدی را در ۵ کشور تولیدکننده نفت در حاشیه خلیج فارس، از جمله ایران، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد که در کشورهایی که اقتصاد وابسته به نفت دارند، در صورت کاهش سوبسید نفت و گاز و ضمانت خرید برق خورشیدی توسط دولت، امکان گسترش بیشتر نیروگاه‌های خورشیدی فراهم خواهد بود. مطالعه فنی و اقتصادی نیروگاه خورشیدی کوچک مقیاس ۱، ۵ و ۱۰ کیلوواتی برای ۱۵ شهر در اقلیم‌های متفاوت ایران، توسط گرگانی فیروزجاه [۶] انجام شد. نتایج ارائه‌شده توسط ایشان نشان می‌دهد که شهرهای واقع‌شده در جنوب کشور ایران از پتانسیل بالایی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برخوردار می‌باشند. در سال‌های اخیر با افزایش مشکلات تأمین برق و ناترازی تولید و مصرف در ایران، توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر شده است [۸]. در همین راستا، سرمایه‌گذاری‌های بزرگی در بخش انرژی خورشیدی انجام می‌شود.

نزدیک به ۳۰ نیروگاه گازی و بیش از ۵۰ نیروگاه چرخه ترکیبی در ایران در حال فعالیت هستند و تامین بخش عمده برق کشور از طریق این نیروگاه‌ها می‌باشد. طبق گزارش‌های منتشرشده، حدود ۵۸ هزار مگاوات از برق کشور توسط این نیروگاه‌ها که بر مبنای توربین گاز هستند تولید می‌گردد [۹]. بنابراین، بررسی راهکارهای بهبود عملکرد این نیروگاه‌ها می‌تواند مکمل مناسبی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر باشد. مطالعات بسیاری در سال‌های اخیر تأثیرات خنک‌سازی هوای ورودی به توربین‌گاز را مورد ارزیابی قرار دادند. چن و همکاران [۱۰] در پژوهشی به بررسی ترکیب خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز با بهره‌گیری از پنل‌های خورشیدی پرداختند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که استفاده همزمان از این دو رویکرد می‌تواند به افزایش بازده کلی نیروگاه و کاهش مصرف سوخت فسیلی منجر شود. همچنین، تحلیل اقتصادی پژوهش بیانگر آن بود که این ترکیب در شرایط اقلیمی گرم، از نظر هزینه و عملکرد نسبت به روش‌های سنتی مقرون‌به‌صرفه‌تر است. نوربخش و همکاران [۱۱] یک چرخه تولید چندگانه مبتنی بر انرژی خورشیدی و زیست‌گاز را برای تولید همزمان توان، آب شیرین و گرمایش معرفی کردند. این چرخه شامل آب‌شیرین‌کن تقطیر چنداثره، توربین گاز و چرخه تراکم مجدد کربن‌دی‌اکسید است. نوآوری اصلی پژوهش در ترکیب دو منبع تجدیدپذیر، یعنی خورشید و زیست‌گاز، برای دستیابی به یک سیستم یکپارچه و بهینه بود. نتایج نشان داد که چرخه پیشنهادی قادر است ۲۴۲۰ کیلووات توان الکتریکی، ۱/۶۲۵ کیلوگرم بر ثانیه آب شیرین و ۱۰۶/۱ کیلووات گرمایش تولید کند و با راندمان‌های انرژی و اگزرژی به‌ترتیب ۶۰/۹۲ و ۵۳/۴۲ درصد، از نظر زیست‌محیطی و اقتصادی عملکرد مطلوبی دارد. دبوان و همکاران [۱۲] در پژوهشی یک سیستم نوین خنک‌کاری هوای ورودی برای نیروگاه‌های چرخه ترکیبی در اقلیم‌های گرم معرفی کردند. در این روش، گرمای اتلافی اینترکولر برای راه‌اندازی چیلر جذبی و سرمایش هوای ورودی به کمپرسور استفاده شد. نتایج نشان داد که توان تولیدی تا ۱۹ درصد و بازده کلی حدود ۲/۳درصد افزایش می‌یابد و با دوره بازگشت سرمایه کوتاه ۱/۷۴ ساله، این روش از نظر اقتصادی نیز نسبت به سامانه‌های رایج مقرون‌به‌صرفه‌تر است. مجیدی یزدی و همکاران [۱۳] در پژوهشی به مطالعه سیستم‌های خنک‌کاری مختلف هوای ورود به توربین گاز را برای اقلیم‌های مختلف ایران و برای چهار شهر یزد، اردبیل، ساری و بندرعباس انجام دادند. مشاهده شد که برای مناطق گرم ، سیستم چیلر جذبی و برای مناطق سرد سیستم پمپ گرمایی بهترین عملکرد را دارا می‌باشد. همچنین استفاده از چیلر جذبی برای خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز توانایی تولید توان اضافه تا ۱۸ درصد برای بندرعباس و ۱۴ درصد برای یزد، را خواهد داشت. کاظمیانی نجف‌آبادی و همکاران [۱۴] در پژوهشی دیگر و در یک مطالعه موردی، سیستم خنک‌سازی هوای ورودی به توربین گاز را با چیلر مکانیکی مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده از چیلر مکانیکی دمای هوای ورودی تا ۲۸ درجه سلسیوس و با استفاده از سیستم مه‌پاش دمای ورودی تا ۱۸ درجه سلسیسوس کاهش خواهد داشت. در تحقیقی دیگر، سیستم سرمایش تبخیری مدیا برای خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز در استان فارس، در ایران توسط حسینی و همکاران [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آنها نشان می‌دهد که سیستم مورد بررسی، هوای ورودی به توربین گازی که در یک چرخه ترکیبی کار می‌کند را از ۳۸ تا ۱۹ درجه سلسیوس کاهش و در نتیجه آن، توان تولیدی را تا ۱۱ مگاوات افزایش خواهد داد. دیمی و همکاران [۱۶] در مطالعه‌ای موردی، به پژوهش درمورد بهترین سیستم خنک‌کن هوای ورودی به توربین‌گازهای واقع در پالایشگاه هاشم‌نژاد پرداختند. آنها سیستم‌های مه‌پاش، چیلر جذبی، سرمایش تبخیر مدیا و ایستگاه افت‌فشار را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده

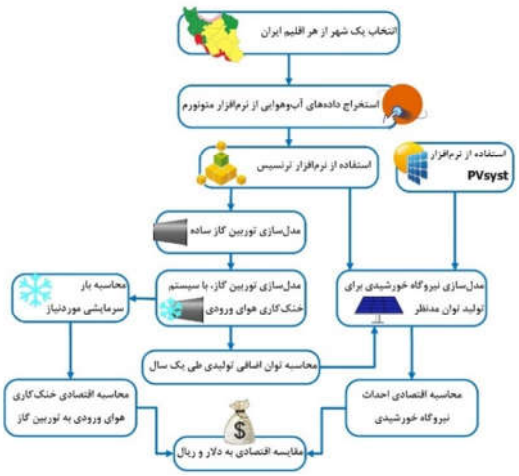
کردند که استفاده از سیستم چیلر جذبی برای خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز، بازده انرژی و اگزرژی توربین را به‌ترتیب ۲/۵ و ۳ درصد افزایش خواهد داد.

سال‌های اخیر، بسیاری از توجهات معطوف استفاده از ظرفیت‌های انرژی خورشیدی می‌باشد و این موضوع در محافل فنی، علمی و سیاسی مورد بحث و مطالعه بوده است [۱۷, ۱۸]. از این رو، بودجه‌های دولتی و خصوصی کلانی در حال حاضر به انرژی و نیروگاه‌های خورشیدی کوچک و بزرگ مقیاس تخصیص داده می‌شود. در این میان، پژوهش حاضر با نگاهی انتقادی نسبت به شتاب‌زدگی و افزایش سریع توجه به انرژی خورشیدی، به یک مطالعه مقایسه‌ای می‌پردازد. همانطور که پیش‌تر بیان شد، در ایران بخش قابل توجهی از برق کشور توسط نیروگاه‌های گازی و چرخه ترکیبی که بر مبنای توربین گاز هستند تامین می‌گردد. بهبود عملکردهای جزئی از توربین‌های گازی می‌توان منجر به این گردد که بخشی از بازدهی توربین بازیابی شود و توان تولیدی افزایش یابد. بهبودهایی نظیر تعمیرات اساسی نیروگاه‌ها و یا همچنین خنک‌کاری هوای ورودی. توربین گاز در دماهای پایین‌تر برای هوای ورودی عملکرد بهتری خواهد داشت. لذا می‌توان با افزودن یک سیستم خنک‌کاری هوای ورودی به توربین، بخشی از انرژی از دست‌رفته را بازیابی و بازده گرمایی توربین گاز را بهبود بخشید. در مطالعه حاضر یک مدل رایج توربین گاز در ایران در نظر گرفته شده است. این مدل برای چهار شهر از چهار اقلیم مختلف، با لحاظ دما و چگالی هوای ناشی از شرایط دمایی و ارتفاع از سطح دریا، به‌صورت گذرا در طی یک سال شبیه‌سازی شده است. سپس برای هر موقعیت، سیستم خنک‌کاری هوای ورودی درنظر گرفته شده تا هوای ورودی به توربین همیشه دمایی کمتر و یا برابر ۲۵ درجه سلسیوس داشته باشد و انرژی بیشتری تولید نماید. سپس، میزان توان تولیدی اضافه ناشی از خنک‌کاری هوای ورودی به توربین به وسیله چیلر جذبی، ثبت و گزارش شده و سپس تجمیع انرژی اضافه که برای هر توربین در هر منطقه، در طی یک سال بدست آمده است محاسبه‌شده است. در مرحله بعد، برای هر منطقه یک سیستم خورشیدی بر اساس میزان تولید سالانه مدل شده است که در این مدل‌سازی، تولید سالانه برای هر نیروگاه خورشیدی، برابر میزان انرژی اضافه بدست آمده ناشی از خنک‌سازی هوای ورودی توربین گاز در همان منطقه در نظر گرفته شده است. در نهایت، با ارزیابی عملکرد اقتصادی، هزینه نصب، نگهداری و هزینه اولیه تجهیزات در هر دو مورد، برای هر منطقه اقلیمی خاص، نتایج گزارش و تحلیل می‌شود که برای دستیابی به یک میزان انرژی تولیدی اضافه در سال، خنک‌سازی هوای ورودی به توربین‌گاز صرفه و توجیه اقتصادی بیشتری به‌همراه خواهد داشت و یا احداث نیروگاه خورشیدی. شکل ۱ چارچوب کلی پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. بطور کلی، نوآوری پژوهش حاضر را می‌توان خلاصه کرد:

- ✓ شبیه‌سازی و مدل‌سازی گذرا توربین‌گاز با و بدون سیستم خنک‌کاری هوای ورودی، برای چهار اقلیم مختلف ایران.
- ✓ بررسی گذرا تاثیر سالانه خنک‌کاری ورودی توربین‌گاز.
- ✓ مدل‌سازی نیروگاه خورشیدی برای چهار اقلیم ایران.
- ✓ مقایسه فنی و اقتصادی خنک‌سازی هوای ورودی به توربین‌گاز و احداث نیروگاه خورشیدی برای چهار اقلیم ایران.

۲- داده‌ها، فرضیات و مدل‌سازی

در این قسمت، داده‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر، مشخصات سیستم‌ها، فرضیات و اطلاعات و روابط موردنیاز، به‌طور مبسوط شرح داده خواهد شد. در مطالعه حاضر، نظر به شبیه‌سازی توربین گاز به‌طور گذرا و دستیابی به عملکرد آن طی دماهای مختلف در طی یک سال، سیستم توربین گاز با بهره‌گیری از نرم‌افزار TRNSYS مدل‌سازی شده‌است. سیستم خورشیدی نیز با استفاده نرم‌افزارهای TRNSYS و PVsyst به‌طور گذرا و تحت تابش‌های مختلف در طی سال برای هر منطقه مدل‌سازی شده‌است.



شکل ۱ – روند طی‌شده برای مدل‌سازی در پژوهش حاضر.

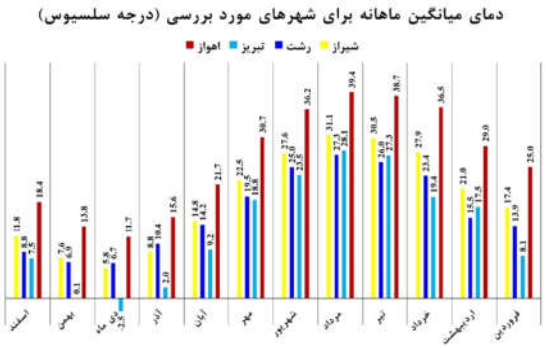
۲-۱- داده‌های آب‌وهوایی

ایران، کشوری وسیع و دارای اقلیم‌های بسیار متفاوتی می‌باشد. اصلی‌ترین این اقلیم‌ها، در دسته‌بندی چهارگانه‌ای به شرح زیر قرار می‌گیرند [۱۹]: اقلیم معتدل و مرطوب، گرم و مرطوب، گرم و خشک، سرد و خشک. برای مطالعه حاضر، چهار شهر، هرکدام به نمایندگی از آب و هوای هر اقلیم درنظر گرفته شده است. برای اقلیم‌های بالا، به ترتیب شهرهای رشت، اهواز، شیراز و تبریز مدنظر قرار گرفته شده‌اند.

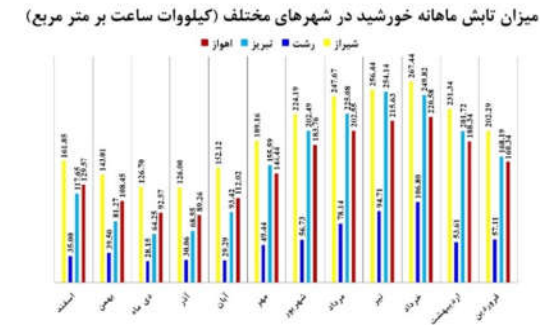
داده‌های آب‌وهوایی این مناطق از نرم‌افزار Meteonorm استخراج و وارد نرم‌افزارهای شبیه‌سازی شده‌اند. دمای هوا به‌طور میانگین برای هر ماه و میزان تابش خورشید به‌طور تجمیعی برای هر ماه برای هر ۴ موقعیت موردمطالعه در شکل ۲ نمایش داده شده‌است. مشاهده می‌گردد که دمای شهر اهواز (اقلیم گرم و مرطوب) به‌طور قابل توجهی از دیگر شهرها بالاتر خواهد بود و همچنین میزان تابش در شیراز (اقلیم گرم و خشک) از دیگر شهرها بیشتر خواهد بود.

۲-۲- داده‌های توربین‌گاز و پنل خورشیدی

توربین گاز انتخاب‌شده در پژوهش حاضر، از نوع توربین v94.2 تولیدی شرکت زیمنس، یا همان توربین گاز تایپ E شرکت مپنا می‌باشد. این نوع توربین گاز رایج‌ترین و پرکاربردترین توربین گاز در ایران می‌باشد [۲۰]. اطلاعات مهم برای مدل‌سازی این توربین، از کاتالوگ شرکت زیمنس استخراج و به‌طور خلاصه در جدول ۱ شرح داده‌شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲ – اطلاعات مهم آب و هوایی برای هر شهر به‌صورت ماهانه، (الف) میانگین دمای ماهانه و (ب) تجمیع تابش ماهانه خورشید.

جدول ۱ – اطلاعات توربین گاز v94.2 شرکت زیمنس [۲۰].

پارامتر	واحد	مقدار
دبی جرمی هوای ورودی	ton/hr	۱۸۶۴
دمای گازهای ورودی به توربین گاز	°C	۱۱۴۹
دمای گازهای خروجی از توربین گاز	°C	۵۴۲
نسبت فشار	-	۱۱/۸
توان تولیدی نامی	kW	۱۶۴۷۰۰
راندمان گرمایی	%	۳۴/۸

پنل خورشیدی انتخاب شده، تولیدی شرکتی JA Solar بوده که در شرایط استاندارد دارای توان نامی ۶۰۰ وات می‌باشند. مشخصات مهم و مورد نیاز این پنل خورشیدی برای مدل‌سازی، از کاتالوگ این شرکت استخراج و در جدول ۲ تشریح شده است [۲۱].

جدول ۲ – مشخصات ورودی پنل خورشیدی برای مدل‌سازی.

پارامتر	واحد	مقدار
نام و مدل پنل	–	JA Solar JAM78S30 600/MR
سال تولید	میلادی	2022
توان نامی ماژول	W	600
مساحت یک ماژول	m^2	2.795
بازده در حالت استاندارد	%	21.5
پارامترهای الکتریکی ماژول در شرایط استاندارد	–	V_{OC}=53.4 V, V_{MP}=45.5 V, I_{SC}=13.98 A, I_{MP}=13.25 A

۲-۳- فرضیات

برای شبیه‌سازی سیستم‌های موردنظر ساده‌سازی‌های زیر، مفروض است:

- ✓ بازده آیزنتروپیک کمپرسور هوا و توربین گاز به‌ترتیب برابر ۸۶ و ۹۰ درصد درنظر گرفته شده است و افت فشار در محفظه احتراق برابر با ۲ درصد، سوخت متان و احتراق کامل فرض‌شده‌اند [۲۲]
- ✓ از سایر تجهیزات اعم از پایه نگه‌دارنده پنل خورشیدی، کابل‌کشی و هزینه اتصال آن صرف‌نظر شده است.
- ✓ برای پوشش هزینه‌های جانبی و سازه‌ای مرتبط با نصب و بهره‌برداری چیلر جذبی (شامل فونداسیون و سازه‌های نگهدارنده، برج خنک‌کننده، لوله‌کشی و اتصالات، مبادله‌کن‌های گرمایی کمکی، سیستم کنترل و ابزار دقیق، تجهیزات پشتیبانی و تأمین برق کنترلی، هزینه‌های نصب و راه‌اندازی و تدارکات) در این مطالعه به‌صورت محافظه‌کارانه ضریب ۵۰ درصد از هزینه اولیه چیلر در نظر گرفته شده است. این گزینش به‌عنوان یک برآورد تجربی و مهندسی صورت پذیرفته است تا عدم‌قطعیت‌های مربوط به اقلام فرعی پروژه که معمولاً در مستندات کاتالوگ‌ها گزارش نمی‌شود، پوشش یابد. البته که اضافه نمودن ۲۰ الی ۵۰ درصد تجهیزات جانبی در صنایع نیروگاهی و شیمیایی رایج می‌باشد [۲۳].
- ✓ برای تجهیزات اضافی مربوط به پنل خورشیدی نظیر هزینه نصب و اتصال، هزینه پایه و تجهیزات نگه‌دارنده، کابل‌کشی و سیم‌کشی نیز، به‌صورت تقریبی برابر ۲۰ درصد هزینه اولیه پنل‌های خورشیدی به هزینه‌های اولیه اضافه خواهد شد [۲۱].
- ✓ در محاسبات اقتصادی، سیستم سرمایشی که برای تامین بار برودتی سیستم‌های خنک‌کاری های ورودی به توربین گاز درنظر گرفته شده، سیستم چیلر جذبی می‌باشد چرا که در مطالعات قبلی این سیستم با توجه به اقلیم های مختلف ایران، قابل اطمینان‌ترین سیستم سرمایش هوای ورودی انتخاب شده‌است. [۱۳].
- ✓ چیلر جذبی از نوع دو اثره، با سیال عامل آب لیتیوم‌بروماید-آب، با ضریب عملکرد ۱/۱ انتخاب شده است. گرمای موردنیاز چیلر از گرمای گازهای خروجی توربین‌گاز تامین می‌شود.

همچنین مبنای انتخاب ظرفیت چیلر، بیشینه بار سرمایشی ساعتی برای هر شهر می‌باشد.

- ✓ یکی از تجهیزات جانبی ضروری در سامانه خنک‌کاری، مبادله‌کن گرمایی میان گازهای خروجی توربین و بخار آب تأمین‌کننده گرمای چیلر جذبی است. از آن‌جا که هزینه این مبادله‌کن گرمایی در مقایسه با هزینه اصلی چیلر بسیار کمتر است، هزینه آن به‌صورت ضمنی در ضریب کلی ۱/۵ مربوط به هزینه تجهیزات جانبی منظور شده و به‌صورت مجزا در محاسبات لحاظ نشده است.
- ✓ قیمت چیلر جذبی، قیمت تقریبی با توجه به قیمت‌های حدودی شرکت‌ها برای هر تن تبرید چیلر جذبی، برابر ۳۵۰ میلیون ریال در نظر گرفته شده‌است (برگرفته از قیمت‌های بازار، مکالمات شخصی، مهر ۱۴۰۴).

۲-۴- معادلات حاکم

در این قسمت روابط ریاضی استفاده‌شده برای مدل‌سازی و تحلیل اقتصادی ارائه شده‌است.

برای محاسبه تغییرات چگالی با دمای هوا، هوا گاز ایده‌آل فرض‌شده و از رابطه زیر تغییرات چگالی محاسبه می‌گردد[۲۴].

$$\rho = P/RT \quad (۱)$$

که در آن، R ثابت جهانی گازها، P فشار با واحد کیلوپاسکال و T دما با واحد کلوین می‌باشد. مطابق داده‌ها، میزان تغییر چگالی با توجه به ارتفاع از سطح دریا، به‌صورت ضریبی از چگالی به چگالی اولیه بیان می‌گردد. به این منظور، جدول ۳ حاوی ارتفاع هر چهار شهر مورد بررسی از سطح دریا و ضریب تصحیح چگالی مرتبط با آن مشاهده می‌گردد. لازم به‌ذکر است که این ضریب تصحیح در چگالی کل محاسبه شده از رابطه (۱) ضرب خواهد شد.

جدول ۳ – ضریب تصحیح چگالی نسبت به ارتفاع برای شهرهای مورد مطالعه در پژوهش حاضر.

شهر	ارتفاع از سطح دریا (متر)	ضریب تصحیح چگالی
اهواز	۱۷	۱/۰۳۶۴
تبریز	۱۳۵۱	۰/۹۱۴۹
رشت	۷	۱/۰۳۷۶
شیراز	۱۵۰۰	۰/۸۹۷۲

میزان بار سرمایشی موردنیاز برای خنک کردن هوای ورودی به چرخه از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲۲]:

$$Q = m_{air} C_p (T_{amb} - T_{set}) \quad (۲)$$

که در این معادله دمای مورد نیاز یا T_{set} دمای ۲۵ درجه سلسیوس می‌باشد و اگر دمای محیط از این مقدار کمتر باشد چیلر خاموش خواهد بود. بررسی و مطالعه اقتصادی سیستم‌ها بر مبنای واحد پول ریال صورت می‌پذیرد. محاسبات اقتصادی در مطالعات بسیاری بر اساس دلار انجام می‌گردد اما از آنجا که در ایران به دلیل نوسانات بازار ارز، ممکن است نتایج حاصل‌شده بر حسب دلار اعتبار کافی برای ایران که واحد پول آن ریال است، نداشته باشد. داده‌های اولیه نرخ تورم و نرخ بهره با توجه به گزارش‌های بانک مرکزی به‌ترتیب برابر ۲۳ و ۳۵ درصد درنظر گرفته شده‌اند. ضریب تعمیرات و نگهداری و دیگر پارامترهای موردنیاز برای محاسبات اقتصادی در جدول ۴ مشاهده می‌گردد. طول عمر مدل‌سازی ۱۰ سال درنظر گرفته شده است.

جدول ۴ – پارامترهای اقتصادی اولیه برای مدل‌سازی.

پارامتر	سیستم خورشیدی	سیستم خنک‌سازی هوای توربین گاز
نرخ بهره سالیانه (٪)	۲۳	۲۳
نرخ تورم سالیانه (٪)	۳۵	۳۵
ضریب اطمینان تجهیزات اضافی اولیه (٪)	۲۰	۵۰
ضریب تعمیرات و نگهداری سالیانه از هزینه اولیه (٪)	۱	۴
طول عمر مطالعه (سال)	۱۰	۱۰

ارزش فعلی کل سرمایه و هزینه واحد انرژی طبق روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردند[۲۴].

$$NPC = \sum_{t=0}^{n} \frac{R_t}{(1+i)^t} + I_0 \quad (۳)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^{n} \frac{A_t}{(1+i)^t} + I_0}{\sum_{t=0}^{n} \frac{W_t}{(1+i)^t}} \quad (۴)$$

که در معادلات بالا، زیرنویس t نشانگر هر سال از طول عمر پروژه و پارامترهای R، A و W نیز به‌ترتیب نشانگر جمع جریان نقدی‌های خروجی در هر سال، هزینه کلی هر سال و میزان توان تولیدی در سال در واحد کیلووات‌ساعت به‌ازای هر سال. همچنین I_0 نیز نشان‌گر هزینه اولیه سرمایه‌گذاری می‌باشد. از آنجا که فروش برق تولیدی در این مطالعه لحاظ نمی‌شود تا محاسبات اقتصادی جنبه عمومی داشته باشد، عملا سیستم یک سیستم مصرف‌کننده خواهد بود. اولیه و مدل انتخابی برای پنل‌های خورشیدی و اینورتر انتخابی، در جدول ۵ مشاهده می‌گردد.

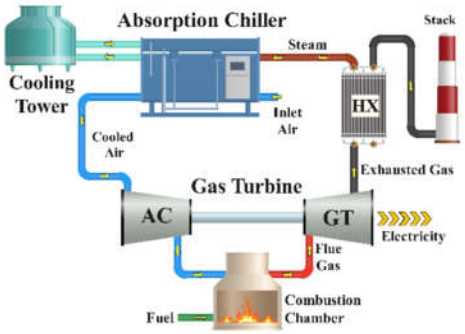
جدول ۵ – هزینه اولیه پنل خورشیدی و اینورتر خورشیدی.

محصول	مدل	هزینه اولیه (ریال)
پنل خورشیدی	JA Solar 600 W	۱۰۰/۰۰۰/۰۰۰
اینورتر	GroWatt 100 kW	۴/۰۰۰/۰۰۰/۰۰۰

۲-۵- مدل‌سازی

در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی توربین گاز نرم‌افزار TRNSYS و برای مدل‌سازی نیروگاه پنل‌های فتوولتائی، نرم‌افزاهای TRNSYS و PVsyst مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سیستم مدل‌سازی شده از توربین گاز، بصورت دیاگرام و نمای کلی در شکل ۳ (الف) مشاهده می‌گردد. در شکل ۳ (ب) نیز سیستم مدل‌سازی‌شده در TRNSYS را نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی توربین گاز در این مطالعه از کتابخانه خورشیدی برقی گرمایی، در نرم‌افزار TRNSYS استفاده شده است. با استفاده از معادله انرژی مطابق رابطه (۲)، بار سرمایشی موردنیاز برای خنک‌کردن هوا محاسبه خواهد شد. همچنین از یک کنترلگر تفاضلی

استفاده‌شده تا دمای ورودی هوا به توربین گاز از ۲۵ درجه سلسیوس فراتر نرود.



(الف)

شکل ۳ – سیستم مدل‌سازی‌شده از توربین‌گاز با سیستم خنک‌کن هوای ورودی

۳- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از شبیه‌سازی پس از اعتبارسنجی، ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته است.

۳-۱- اعتبارسنجی نتایج

در ابتدا، نتایج حاصل‌شده از مدل‌سازی، در شرایط استاندارد، با کاتالوگ و نتایج ارائه‌شده هر کدام مقایسه شده است. نتایج اعتبار سنجی توربین گاز که در جدول ۳ مشاهده می‌گردد نشان می‌دهد که میزان ۲/۰۱ درصد خطا، بیشینه مقدار خطای موجود در شبیه‌سازی توربین گاز است.

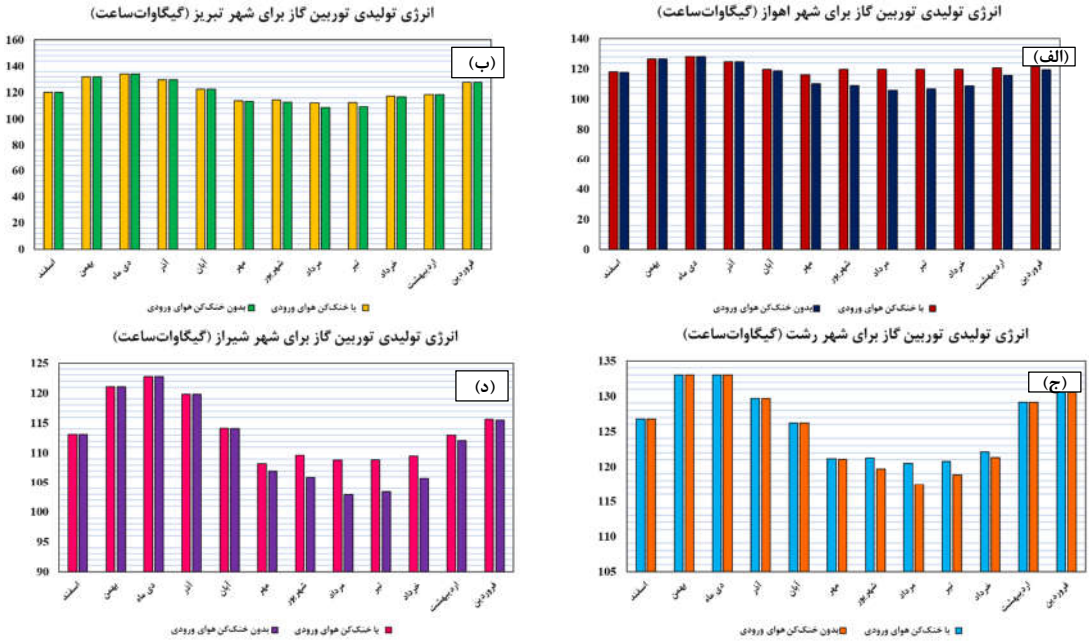
جدول ۶ –اعتبارسنجی مدل‌سازی توربین گاز

پارامتر	پژوهش حاضر	مقادیر کاتالوگ [۲۰]	خطا (٪)
دمای ورودی به توربین گاز (°C)	۱۱۴۹	۱۱۴۹	۰
دمای خروجی از توربین گاز (°C)	۵۴۱	۵۴۱	۰
نسبت فشار کمپرسور	۱۲	۱۲	۰
بازده گرمایی (درصد)	۳۴/۱	۳۴/۷	۱/۷۳
توان تولیدی (kW)	۱۶۲۶۲۲	۱۶۶۰۰۰	۲/۰۵

۳-۲- نتایج خنک‌کاری هوای ورودی به توربین‌گاز

در این قسمت نتایج مربوط به مدل‌سازی توربین گاز برای شهرهای مختلف نمایش داده خواهد شد. در شکل ۴ قسمت‌های (الف) تا (د) مقدار انرژی تولیدی توسط توربین گاز با و بدون خنک‌کن هوای ورودی برای شهرهای اهواز، تبریز، رشت و شیراز مشاهده می‌گردد. در شهرهای اهواز و شیراز با توجه به اقلیم گرم و دمای بالای آنها در طی سال، با خنک‌کاری هوای ورودی، عملکرد توربین گاز بسیار تأثیر چشم‌گیری می‌پذیرد و انرژی بیشتری تولید خواهد کرد. همچنین مشاهده می‌گردد که در اثر خنک‌سازی هوای ورودی در تابستان، که مصرف برق بیشتر خواهد بود در تمام شهرها بخصوص اهواز، برق بیشتری تولید خواهد شد. همچنین از آبان تا اسفندماه، تولیدات اضافی ناشی از خنک‌کاری هوای ورودی تقریبا برابر صفر خواهد بود. به‌طور خلاصه انرژی تولیدی توربین گاز با و بدون سیستم خنک‌کاری هوای ورودی، به‌طور تجمیعی در طی یک سال، و انرژی تولیدی اضافه‌شده برای هر منطقه در جدول ۷ مشاهده می‌گردد.

مشاهده می‌گردد که با خنک‌کاری هوای ورودی به توربین‌گاز برای شهر اهواز، از اتلاف حدود ۶۰ هزار مگاوات‌ساعت انرژی در سال جلوگیری خواهد شد که البته این مقدار، بدون در نظر گرفتن عوامل جانبی مانند عمر بالای توربین و تجهیزات و غیره می‌باشد. از نظر انرژی تولیدی اضافه ناشی از خنک‌کاری هوای ورودی، به‌ترتیب شیراز و با اختلاف قابل توجهی پس از آن، تبریز و رشت، پس از اهواز قرار دارند. در ادامه میزان توان سرمایش موردنیاز و یا همان بار برودتی مورد نیاز برای هر سیستم در هر شهر محاسبه شده است که با استفاده از بیشینه مقدار این بار، میزان توان سرمایش سیستم خنک‌کننده انتخاب می‌گردد. بار سرمایشی موردنیاز برای خنک‌کاری هوای ورودی، با درنظر گرفتن دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای هر چهار شهر مختلف، در طی یک سال در شکل ۵ به نمایش درآمده است. مشاهده می‌شود که اهواز به دلیل اقلیم گرمی که دارا می‌باشد و دمای محیطی بالاتر از باقی شهرهای مورد مطالعه، با خنک‌کاری هوای ورودی به توربین، اگرچه انرژی قابل دستیابی بالایی خواهد داشت اما از سویی دیگر، بار سرمایشی بیشتری نیز، نیاز خواهد داشت.



شکل ۴ – میزان انرژی تولیدی توربین گاز با و بدون خنک‌کاری هوا برای شهرهای (الف) اهواز، (ب) تبریز، (ج) رشت و (د) شیراز.

جدول ۷ – تأثیر استفاده از سیستم خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز و انرژی اضافه تولیدی طی یک سال، برای شهرهای مختلف.

شهر	انرژی تولیدی سالانه توربین‌گاز (GWh)	انرژی تولیدی سالانه توربین گاز با خنک‌کن (GWh)	بار سرمایشی تجمیعی سالانه (GWh)	انرژی تولیدی اضافی سالانه ناشی از خنک‌کاری (GWh)
رشت	۱۵۰۴/۶۲	۱۵۱۲/۰۴	۳/۰۷۵	۷/۴۲۵
تبریز	۱۴۴۲/۹۲	۱۴۵۲/۴۵	۳/۵۳۰	۹/۵۳
شیراز	۱۳۴۱/۳۲	۱۳۶۲/۵۷	۷/۸۶۷	۲۱/۲۵۷
اهواز	۱۳۸۹/۳۶	۱۴۵۲/۰۴	۲۵/۹۳۸	۶۲/۶۸۳

۳-۳- نتایج نیروگاه خورشیدی

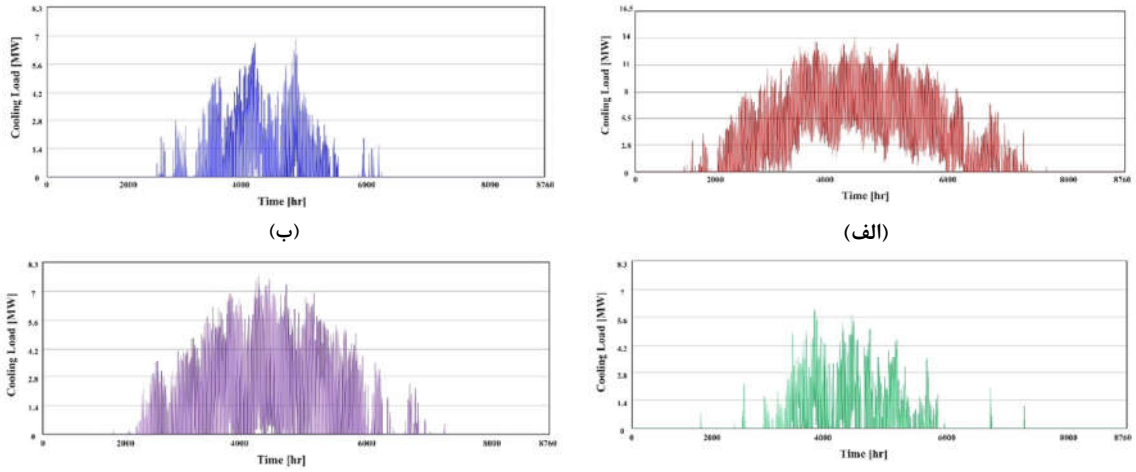
نیروگاه خورشیدی برای هر شهر متناسب با انرژی تولیدی اضافه توسط سیستم توربین گاز با خنک‌کن هوای ورودی طراحی شده است تا مشاهده شود برای دستیابی به این میزان تولید انرژی سالانه، به چه مقدار پنل خورشیدی برای هر شهر نیاز خواهد بود. میزان انرژی اضافی تولیدی توسط توربین گاز طی یک سال، میزان انرژی تولیدی سالانه نیروگاه خورشیدی انتخاب شده است و اطلاعات و تعداد پنل‌ها و دیگر مشخصات سیستم، برای هر شهر در جدول ۸ نمایش داده شده است. از آنجا که اندازه نیروگاه خورشیدی بر اساس میزان انرژی تولیدی سالانه تعیین می‌گردد، تعداد پنل‌ها و اینورترها با روش سعی و خطا تخمین زده شد تا انرژی تولیدی نیروگاه خورشیدی برای هر شهر، تقریبا برابر انرژی سالانه تولیدی توربین‌گاز با خنک‌کن هوای ورودی باشد.

۴-۳- مقایسه فنی و اقتصادی

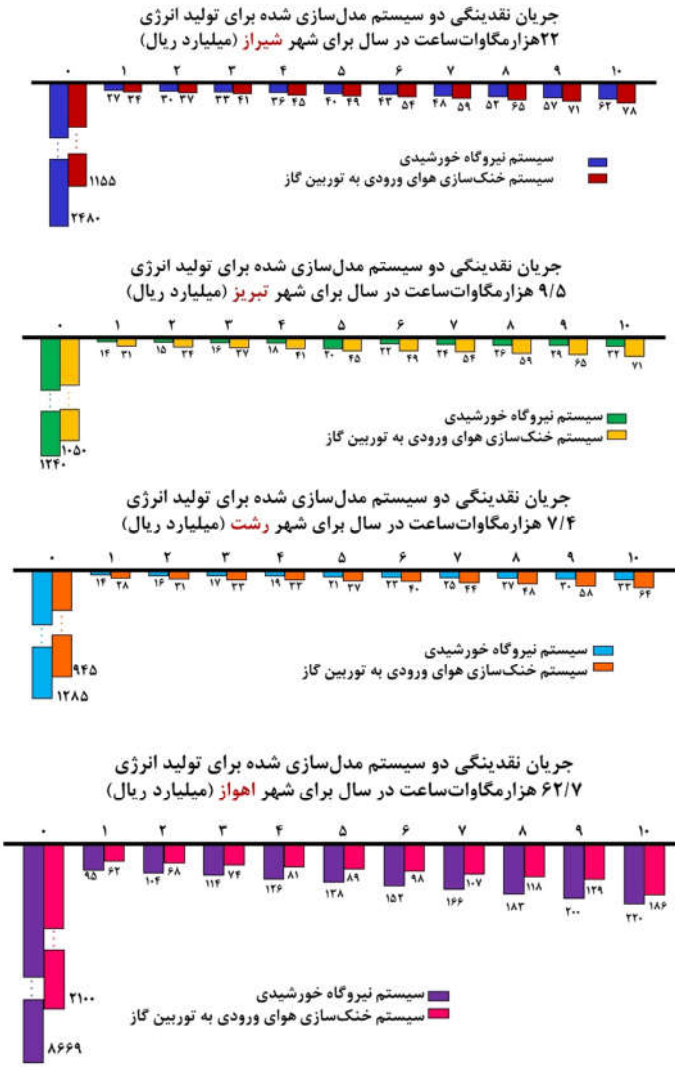
در این بخش به مقایسه پارامترهای اقتصادی سیستم‌های مدل‌سازی شده پرداخته خواهد شد. در شکل ۷ نمودار نقدینگی هزینه‌های هر سیستم برای هر شهر نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که برای دو سیستم مطالعه‌شده در شهرهای اهواز، رشت و شیراز، هزینه اولیه و هزینه خالص فعلی سیستم خنک‌کاری هوای توربین‌گاز نسبت به نیروگاه خورشیدی برای تولید یک میزان انرژی تولیدی سالانه کمتر می‌باشد. نسبت میزان هزینه اولیه نیروگاه خورشیدی نسبت به چیلرجذبی برای خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز برای دستیابی به یک میزان انرژی سالیانه، برای شهرهای اهواز، شیراز، رشت و تبریز به ترتیب برابر ۴/۱۳، ۲/۱۶، ۱/۳۶ و ۱/۲۸ خواهد بود. جدول ۹ نیز میزان هزینه انرژی واحد، هزینه فعلی سیستم، برای هر سیستم و هر شهر به‌طور خلاصه نمایش داده شده است. میزان هزینه تعمیرات و نگهداری برای هر سیستم، به‌صورت نرمال‌سازی ارائه شده‌است.

جدول ۸ – تعداد پنل خورشیدی و اینورتر موردنیاز برای هر شهر.

شهر	انرژی موردنیاز (مگاوات ساعت)	تعداد پنل خورشیدی ۶۰۰ واتی	تعداد اینورتر ۱۰۰ کیلوواتی	ظرفیت نامی نیروگاه (مگاوات)
شیراز	۲۱۲۵۷	۱۶۶۶۸	۱۰۰	۱۰
تبریز	۹۵۳۰	۸۳۳۴	۵۰	۵
رشت	۷۴۲۵	۸۷۱۲	۵۰	۵/۲۳
اهواز	۶۲۶۸۳	۵۸۶۴۴	۳۴۰	۳۵/۱۹



شکل ۵ –بار سرمایشی موردنیاز برای کار کردن توربین‌گاز در شرایط هوایی با دمای کمتر از ۲۵ درجه سلسیوس برای شهرهای (الف) اهواز، (ب) تبریز، (ج) رشت و (د) شیراز.



شکل ۷ – نمودار جریان نقدی سیستم خنک‌کاری هوای توربین گاز و نیروگاه خورشیدی برای (الف) شیراز، (ب) تبریز، (ج) رشت و (د) اهواز.

جدول ۹ – میزان هزینه واحد انرژی و هزینه کل فعلی برای سیستم‌ها و شهرهای مختلف

شهر	سیستم	انرژی تولیدی سالانه (مگاوات‌ساعت)	هزینه واحد انرژی (LCOE) (ریال)	هزینه اولیه تجهیزات (میلیارد ریال)	هزینه کل فعلی (NPC) (میلیارد ریال)	هزینه تعمیرات و نگهداری نرمال‌شده سالیانه (میلیارد ریال)
شیراز	نیروگاه خورشیدی	۲۲۰۶۳	۷۹۱۵	۲۴۸۰	۲۹۰۸/۸	۴۲/۸۸
	خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز	۲۱۲۵۷	۴۵۹۲	۱۱۵۵	۱۶۸۷/۵	۵۳/۲۵
تبریز	نیروگاه خورشیدی	۹۴۱۴	۸۸۲۸	۱۲۴۰	۱۴۵۴/۴	۲۱/۴۴
	خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز	۹۵۳۰	۹۳۱۱	۱۰۵۰	۱۵۳۴/۰۹	۴۸/۴۱
رشت	نیروگاه خورشیدی	۷۴۴۸	۱۱۷۴۰	۱۲۸۵	۱۵۰۷/۲۳	۲۲/۲۲
	خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز	۷۴۲۵	۱۰۷۶۰	۹۴۵	۱۳۸۰/۶۹	۴۳/۵۷
اهواز	نیروگاه خورشیدی	۶۱۰۰۰	۹۳۸۳	۸۶۶۹	۱۰۱۶۷/۷۵	۱۴۹/۸۸
	خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز	۶۲۶۸۳	۲۸۳۱	۲۱۰۰	۳۰۶۸/۱	۹۶/۸۱

برای شهر تبریز یا به‌طور کلی اقلیم سردوخشک، اگرچه سیستم خنک‌کن هوای توربین، هزینه اولیه کمتری نسبت به سیستم خورشیدی داشت، اما هزینه فعلی خالص بیشتری دارد. متعاقبا هزینه انرژی واحد این سیستم نیز نسبت به سیستم خورشیدی بیشتر خواهد بود. مشاهده می‌گردد که میزان هزینه انرژی واحد برحسب ریال بر کیلووات‌ساعت، برای سیستم خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز برای شهر اهواز برابر ۲۸۳۱ ریال خواهد بود که کمترین مقدار در برابر دیگر سیستم‌ها و شهرها می‌باشد. سیستم خورشیدی برای این شهر دارای هزینه واحد انرژی برابر ۹۳۸۳ ریال به ازای هر کیلووات می‌باشد. همچنین بیشترین میزان هزینه واحد انرژی برای نیروگاه خورشیدی رشت می‌باشد که هزینه هر کیلووات‌ساعت انرژی برابر ۱۱۷۴۰ ریال می‌باشد. همچنین مشاهده می‌گردد که برای تمامی شهرها و اقلیم‌های مطالعه‌شده بجز شهر تبریز و اقلیم سردوخشک، هزینه واحد انرژی و هزینه خالص فعلی، برای سیستم خنک‌کاری هوای ورودی توربین گاز از نیروگاه خورشیدی کمتر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به روند اخیر گسترش و توسعه انرژی خورشیدی در کشور، پژوهش حاضر با نگاهی منتقدانه نسبت به این موضوع انجام شده‌است. در پژوهش حاضر، چهار اقلیم متفاوت ایران درنظر گرفته‌شده است و توربین گاز به‌صورت گذرا طی یک سال برای هر اقلیم مدل شده‌است. سپس توربین گاز با سیستم‌خنک‌کاری برای هر شهر از هر اقلیم مدل شده و میزان انرژی اضافی تولید توسط توربین گاز، طی یک سال و ناشی از خنک‌کاری هوای ورودی به توربین گاز محاسبه می‌شود. سپس یک سیستم خورشیدی برای هر اقلیم مدل‌سازی شد تا انرژی سالیانه قابل دسترس با خنک‌کاری هوای توربین گاز، این بار با استفاده از نیروگاه خورشیدی تولید گردد. سپس نتایج این دو سیستم برای هر شهر و هر اقلیم با هم از منظر اقتصادی مقایسه و نتایج زیر حاصل شد:

- ✓ چهار شهر اهواز (گرم‌مرطوب)، شیراز (گرم‌خشک)، رشت (معتدل‌مرطوب) و تبریز (سردخشک) برای مطالعه انتخاب شدند.
- ✓ خنک‌کاری ورودی توربین گاز سالانه ۶۲/۷ (اهواز)، ۲۱/۳ (شیراز)، ۹/۵ (تبریز) و ۷/۴ (رشت) گیگاوات‌ساعت انرژی اضافه تولید می‌کند.
- ✓ برای تولید همین میزان با انرژی خورشیدی، به ترتیب به ۵۸،۶۴۴ (اهواز)، ۱۶،۶۶۸ (شیراز)، ۸،۳۳۴ (تبریز) و ۸،۷۲۱ (رشت) پنل خورشیدی ۶۰۰ واتی نیاز است.
- ✓ هزینه اولیه نیروگاه خورشیدی در تمامی شهرها بالاتر از خنک‌کاری هوای ورودی بوده و این نسبت برای اهواز، شیراز، رشت و تبریز به‌ترتیب برابر ۴/۱۳، ۲/۱۶، ۱/۳۶ و ۱/۲۸ برابر می‌باشد.
- ✓ هزینه تولید هر کیلووات‌ساعت انرژی با خنک‌کاری هوای توربین برای اهواز ۲۸۳۱ ریال است که کمترین میزان هزینه انرژی میان دیگر سیستم‌ها را دارد. هزینه تولید انرژی از طریق سیستم خورشیدی برای اهواز ۹۳۸۳ ریال است.
- ✓ بیشترین هزینه واحد انرژی نیز مربوط به نیروگاه خورشیدی رشت با ۱۱۷۴۰ ریال است که سیستم خنک‌کن هوای ورودی برای این شهر هزینه واحد انرژی برابر ۱۰۷۶۰ ریال دارد.
- ✓ از دیدگاه هزینه خالص فعلی، سیستم خنک‌کاری هوای توربین در تمام شهرها بجز تبریز عملکرد بهتری داشت. در نتیجه با درنظر گرفتن این پارامتر، خنک‌کاری هوای توربین گاز در تمام اقلیم‌ها بجز اقلیم سرد و خشک از نظر اقتصادی عملکرد بهتری دارد. سیستم خنک‌کاری هوای توربین نسبت به سیستم خورشیدی در تبریز نیز در شرایطی که نرخ تورم کمتر باشد و یا ضریب اطمینان کاهش یابد، عملکرد بهتری خواهد داشت.
- ✓ هزینه واحد انرژی ناشی از خنک‌کاری هوای توربین برای تمام شهرها بجز شهر تبریز (اقلیم سرد و خشک) کمتر از هزینه واحد انرژی خورشیدی است.
- ✓ به‌طور کلی، سیستم خنک‌کاری در تمامی اقلیم‌ها هزینه اولیه کمتری نسبت به نیروگاه خورشیدی دارد و در همه اقلیم‌ها بجز سرد و خشک نیز، اقتصادی‌تر از نیروگاه خورشیدی

می‌باشد. این برتری اقتصادی نیز در اقلیم‌های گرم (اهواز و شیراز) برجسته‌تر و بیشتر می‌باشد.

- ✓ خنک‌کاری هوای ورودی به توربین‌گاز در نیروگاه‌های گازی و ترکیبی کشور و بطور کلی بهبود بازده انرژی در آنها، در کنار احداث نیروگاه‌های خورشیدی راه‌حل مناسب برای تولید برق بیشتر و جبران کمبود برق کشور می‌باشد.

۵- مراجع

[1] Agency IE. Global Energy Review 2025 2025 [Available from: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025.]

[۲] عبدالعلی پورعدل م, مهران, خواه ن. تحلیل ترمودینامیکی سیستم های تولید توان از منبع انرژی زمین گرمایی برمبنای چرخه ی تبخیر آنی دو مرحله‌ای. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۳؛۵۴(۱):۱۱۱-۱۲۰.

[۳] افشاری مف. انرژی خورشیدی راه حل بحران انرژی در ایران. دنیای اقتصاد. ۱۴۰۳.

[4] Review CCMT. Did solar power cause spain's blackout? 2025 [Available from: https://www.technologyreview.com.]

[۵] مجتبی قر, آرش ش. تحلیل چشم انداز توسعه تکنولوژی های انرژی خورشیدی در ایران به روش تلفیقی از SWOT و DEMATEL. 2017.

[6] Gorjian S, Zadeh BN, Eltrop L, Shamshiri RR, Amanlou Y. Solar photovoltaic power generation in Iran: Development, policies, and barriers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019;106:110-23.

[7] Edalati S, Ameri M, Iranmanesh M, Sadeghi Z. Solar photovoltaic power plants in five top oil-producing countries in Middle East: A case study in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017;69:1271.۸۰-

[۸] اشرفی م, محمدیون ح, دیبایی مح, محمدیون م. بهبود عملکرد گردآور خورشیدی و افزایش بهره وری انرژی خورشید با بکارگیری مواد تغییر فازی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۱؛۵۱(۱):۲۹-۳۸.

[۹] شرق خ. ۵۸ هزار مگاوات برق به واسطه نیروگاه‌های گازی و سیکل ترکیبی کشور تولید می‌شود ۱۴۰۳ [Available from: https://sharghdaily.com.]

[10] Chen Z, Zhan H, Chen L, Wang W, Kong Y, Yang L, et al. Novel gas turbine combined cycle inlet air cooling systems integrating proton exchange membrane electrolyzer, LiBr absorption chiller, and solar energy. Energy. 2025:136437.

[۱۱] نوربخش سعد اباد آ, شریفی ع, نامی خلیله ده م, یکانی سک, رنجبر سف. ارزیابی ترمودینامیکی یک سیستم تولید چندگانه بر مبنای انرژی خورشیدی و سوخت بیوگاز با استفاده از توربین گاز، چرخه تراکم مجدد کربن دی اکسید و آب شیرین کن چند اثره. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۲۰۲۵:-.

[12] Dabwan YN, Zhang L, Pei G. A novel inlet air cooling system to improve the performance of intercooled gas turbine combined cycle power plants in hot regions. Energy. 2023;283:129075.

[13] Yazdi MRM ,Ommi F, Ehyaei M, Rosen MA. Comparison of gas turbine inlet air cooling systems for several climates in Iran using energy, exergy, economic, and environmental (4E) analyses. Energy conversion and management. 2020;216:112944.

[۱۴] کاظمیانی, بیاض دد, پوش ا, هادی. آنالیز انرژی، اگزرژی، اقتصاد و محیط زیستی دو روش خنک کاری هوای ورودی توربین گاز (نمونه موردی: پالایشگاه خانگیران). مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۲؛۴۸(۳):۲۳۳-۲۴۰.

[15] Hosseini R, Beshkani A, Soltani M. Performance improvement of gas turbines of Fars (Iran) combined cycle power plant by intake air cooling using a media evaporative cooler. Energy Conversion and Management. 2007;48(4):1055-64.

[16] Deymi-Dashtebayaz M, Kazemiani-Najafabad P. Energy, exergy, economic, and environmental analysis for various inlet air cooling methods on Shahid Hashemi-Nezhad gas turbines refinery. Energy & Environment. 2019;30(3):481-98.

[۱۷] رضاپور دولق ب, قندهاریون س. تحلیل ترمودینامیکی و اقتصادی سیستم تولید هیدروژن خورشیدی با نمک مذاب. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۲؛۵۵(۲):۷۷-۸۶.

[۱۸] صابری مهر ع, فرهنگ مهر و. تحلیل ترمودینامیکی سیستم ترکیبی پیل سوختی اکسید جامد-توربین گاز تغذیه شده با متانول و با بهره‌گیری از سیستم خورشیدی. مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز. ۱۴۰۲؛۵۲(۲):۶۹-۷۸.

[19] Mansouri Daneshvar MR, Ebrahimi M, Nejadsoleymani H. An overview of climate change in Iran: facts and statistics. Environmental Systems Research. 2019;8(1):1-10.

[20] Siemens AG. (n.d.). V94.2 gas turbine manual. Siemens AG. Unpublished internal technical manual.

[21] JA Solar company website 2025] Available from: https://www.jasolar.com.

[22] Dincer I, Rosen MA, Ahmadi P. Optimization of energy systems: John Wiley & Sons; 2017.

[23] Towler G, Sinnott R. Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design: Butterworth-Heinemann; 2021.

[24] Bejan A, Tsatsaronis G, Moran MJ. Thermal design and optimization: John Wiley & Sons; 1995.