



## Exergoeconomic Analysis of a Heating and Power Generation Solar System for Using at the Engineering Faculty of Urmia University

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Abdollahi Haghighi M.<sup>1</sup> MSc,  
Pesteei S.M.\*<sup>1</sup> PhD,  
Chitsaz Khoyi A.<sup>1</sup> PhD

#### How to cite this article

Abdollahi Haghighi M, Pesteei S.M, Chitsaz Khoyi A. Exergoeconomic Analysis of a Heating and Power Generation Solar System for Using at the Engineering Faculty of Urmia University. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(2):415-427.

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran

#### \*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Urmia University, Urmia, Iran. Postal code: 5756151818

Phone: -

Fax: +98 (44) 32773591  
sm.pesteei@gmail.com

#### Article History

Received: August 11, 2018

Accepted: October 23, 2018

ePublished: February 01, 2019

### ABSTRACT

In this paper, a study from the perspective of exergy and cost in the framework of exergoeconomic analysis of a heating and power generation system with parabolic trough solar collectors was carried out as a case study to be used at the engineering faculty of Urmia University. The system consists of a solar subsystem with an Organic Rankine Cycle (ORC). This study is based on three different solar radiation modes during a day, including solar mode, solar and storage mode, and storage mode. In the first mode, the solar flux is at a low level and there is no energy storage. In the second mode, there is energy storage in addition to running the ORC by collectors. In the third mode, only storage tank is used. Paying attention to the actual energy demand of the location and the analysis according to the variable solar radiation are the important points of this study. Due to the weather conditions prevailing on the building, its heating load is 1253.2 kW. Also, the electric power required is about 1500 kW. Exergoeconomic analysis is based on three important design parameters, including the number of the day through the year, ORC pump input temperature, and ORC turbine inlet pressure examined. The results indicate that in a cold day, the cost per unit of exergy in the three mentioned modes are about 19 \$/GJ, 16 \$/GJ, and 20 \$/GJ, respectively. Also, the highest exergy destruction rate occurs in parabolic trough solar collectors and ORC evaporators.

**Keywords** Exergoeconomic analysis; Parabolic trough solar collectors; Engineering faculty of Urmia University; Heating generation; Power generation

### CITATION LINKS

[1] Energy and exergy analysis of flat plate solar collector for three working fluids, under the same conditions [2] Solar energy engineering: Processes and systems [3] Solar engineering of thermal processes [4] Solar thermal collectors and applications [5] Advances in parabolic trough solar power technology [6] The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants [7] Mapping of solar energy potential and solar system capacity in Iran [8] Clearness index for different cities of Iran [9] Optical and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids [10] Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating and power system driven by solar energy [11] Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production [12] Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system [13] Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part I-Formulations [14] Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part II-Applications. [15] Parabolic trough solar collectors integrated with a Kalina cycle for high temperature applications: Energy, exergy and economic analyses [16] Thermoeconomic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle [17] Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm [18] Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water [19] Calculation of building's installation [20] Exergy and exergoeconomic analysis of sustainable direct steam generation solar power plants [21] Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system [22] Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy

## تحلیل انرژی اقتصادی یک سیستم تولید توان و گرمایش خورشیدی برای استفاده در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه

مقصود عبداللهی حقی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

سیدمهدی پسته‌ای\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

عطا چیت‌سازخویی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

در این مقاله، مطالعه انرژی و هزینه در چهارچوب تحلیل انرژی اقتصادی استفاده از یک سیستم تولید توان و گرمایش با محرکه اولیه کلکتورهای خورشیدی سهموی برای استفاده در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه به‌عنوان یک مطالعه موردی بررسی شده است. این سیستم ترکیبی از زیرسیستم خورشیدی و سیکل ارگانیک رانکین است. این مطالعه براساس سه حالت تابش خورشیدی کم‌تابش، پرتابش و بدون تابش در طول یک شبانه‌روز شکل گرفته است. در حالت اول شار دریافتی خورشیدی در سطح پایین بوده و ذخیره‌سازی انرژی وجود ندارد. در حالت دوم علاوه بر راه‌اندازی سیکل ارگانیک رانکین توسط کلکتورها، ذخیره‌سازی انرژی نیز صورت می‌گیرد. در حالت سوم فقط از قسمت ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. نکته مهم این مطالعه توجه به نیاز واقعی انرژی یک مکان و تحلیل مطابق با شار تابش متغیر خورشیدی است. با توجه به شرایط اقلیمی حاکم بر ساختمان مورد نظر، مقدار بار گرمایی آن 1253.2kW محاسبه شده است. همچنین مقدار توان الکتریکی مورد نیاز آن 1500kW است. تحلیل انرژی اقتصادی براساس سه پارامتر مهم طراحی که عبارتند از طول روزهای یک سال میلادی، دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین و فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین انجام شده است. مطابق با نتایج، در یک روز سرد مقدار هزینه بر واحد انرژی در سه حالت تابش خورشیدی ذکر شده به‌ترتیب در حدود 19\$/GJ، 16\$/GJ و 20\$/GJ به دست آمده است. همچنین بیشترین نرخ نابودی انرژی در کلکتورهای خورشیدی سهموی و اواپراتورهای سیکل ارگانیک رانکین اتفاق می‌افتد.

کلیدواژه‌ها: تحلیل انرژی اقتصادی، کلکتورهای خورشیدی سهموی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه، تولید گرمایش، تولید توان

تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۱

\* نویسنده مسئول: sm.pesteei@gmail.com

### ۱- مقدمه

انرژی خورشیدی از مهم‌ترین منابع تامین انرژی در پاک‌ترین و ایمن‌ترین حالت ممکن است که می‌تواند انرژی جهان را به‌صورت دائمی پوشش دهد [1]. بهره‌برداری از انرژی خورشیدی با استفاده از کلکتورهای خورشیدی محقق می‌شود. این تجهیزات از نوع مبدل‌های گرمایی به شمار می‌روند. یکی از مهم‌ترین نوع آنها که برای کاربردهای نیروگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، کلکتورهای خورشیدی سهموی است. این نوع کلکتورها به‌شکل دیافراگمی با ردیابی تک‌محوری و نسبت تمرکز بین ۸۵-۱۰ ساخته شده است و توانایی گرم‌کردن سیال عامل را در محدوده دمایی ۴۰۰-۶۰۰°C دارند [2-4].

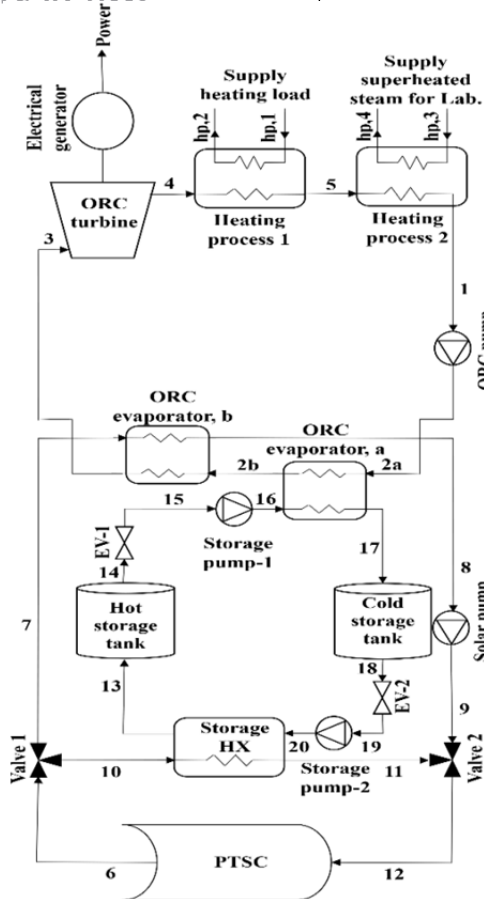
بزرگ‌ترین کاربرد استفاده از کلکتورهای خورشیدی سهموی در نیروگاه‌های جنوبی کالیفرنیا بوده که دارای مجموع ظرفیت نصب ۳۵۴MW است. همچنین پروژه به‌کارگیری این تجهیزات برای اهداف تجربی با ظرفیت تولید ۱/۲MW در آمریکا واقع در جنوب اسپانیا اجرا شده است [5].

در مقاله حاضر، مطالعه موردی استفاده از کلکتورهای خورشیدی

سهموی در شرایط اقلیمی شمال غربی ایران مطرح است. در همین راستا به معرفی برخی از پژوهش‌ها در زمینه تعیین الگوهای تابش خورشیدی در ایران و مطالعات استفاده از سیستم‌های تولید انرژی براساس این نوع تجهیزات اشاره می‌شود. در مطالعات انرژی خورشیدی، قبل از طراحی سیستم باید پتانسیل تابش خورشیدی در مکان مورد مطالعه ارزیابی شود. برای تعیین الگوهای تابش خورشیدی در شهرهای مختلف ایران، کارهای پژوهشی مختلفی صورت گرفته است. پتانسیل استفاده از تابش خورشید در مناطق مختلف ایران توسط بصارتی و همکاران [6] بررسی شده است. حق‌پرست کاشانی و همکاران [7] نقشه‌های تابش خورشیدی در طول ماه‌ها و فصل‌های مختلف یک سال در ایران را برای استفاده از سیستم‌های فتوولتاییک و گرمایی خورشیدی ارائه داده‌اند. همچنین مطالعه برآورد ضریب صافی هوا در طول ماه‌های سال برای شهرهای مختلف ایران توسط بهادری نژاد و حسینی [8] انجام شده است.

در زمینه تحلیل‌های ترمودینامیک و انرژی اقتصادی سیستم کلکتورهای خورشیدی سهموی، مطالعات محدودی انجام شده است که به‌صورت اجمالی به برخی از آنها اشاره می‌شود. عملکرد کلکتور خورشیدی سهموی براساس تحلیل‌های نوری و گرمایی برای چهار شهر تهران، تبریز، شیراز و یزد در ایران که دارای شرایط آب و هوایی مختلف است و در اقلیم‌های متفاوت قرار دارند توسط معرفتی و همکاران [9] مورد بررسی قرار گرفته است. طبق نتایج آنها شیراز دارای بیشترین بازده استفاده از این تجهیزات به شمار می‌رود. عیسوی و همکاران [10] بررسی ترمودینامیک یک سیستم ترکیبی تولید سه‌گانه سرمایه‌ش، گرمایش و تولید توان را ارائه داده‌اند که با بهره‌گیری از کلکتورهای خورشیدی سهموی به‌عنوان محرکه اولیه کار می‌کند. پژوهش آنها فاقد تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی بود. السلیمان و همکاران [11] به بررسی انرژی سیستم تولید سه‌گانه براساس این نوع از کلکتورها پرداخته‌اند. سیستم مطالعه آنها شامل زیرسیستم خورشیدی با تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی، سیکل ارگانیک رانکین و سیکل تبرید جذبی تک‌اثره بود. مطالعه آنها براساس شار تابشی ثابت و در سه حالت کم‌تابش خورشیدی، پرتابش خورشیدی و استفاده از تانک‌های ذخیره‌سازی انرژی قرار داشت. آنها طی یک مطالعه دیگر [12]، بررسی انرژی سیستم مورد مطالعه خود را ارائه دادند. همچنین بررسی انرژی اقتصادی سیستم اشاره‌شده توسط این محققان مطالعه شده است [13، 14]. آنها به این نتیجه رسیدند که استفاده از سیستم مذکور در حالت استفاده از تانک‌های ذخیره‌سازی انرژی گران‌تر از دو حالت دیگر است.

مطالعه انرژی، انرژی و انرژی اقتصادی یک سیستم متشکل از سیکل کالینا که مناسب برای کوپل با منابع حرارت بالا مانند کلکتورهای خورشیدی سهموی بوده، توسط زارعی و معلمیان [15] انجام شده است. نتایج تجزیه و تحلیل اقتصادی آنها نشان می‌دهد که اگر مقدار هزینه تقسیم برق پایین‌تر باشد، افزایش تعداد کلکتورها در هر ردیف بیشتر از افزایش ردیف‌های موازی کلکتورها سودمند است. تجزیه، تحلیل و مقایسه انرژی اقتصادی سیکل ارگانیک رانکین و سیکل گازی رانکین به‌همراه دو نوع کلکتور که شامل کلکتورهای خورشیدی سهموی و کلکتورهای فرنسل بود، توسط درابی و باندیوپادی [16] صورت گرفته است. آنها این کار را با استفاده از ۱۲ نوع سیال ارگانیک انجام دادند و نتیجه گرفتند که سیال عامل R134A دارای کمترین هزینه است. باقرنژاد و یعقوبی [17] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی انرژی



شکل ۱) طرح شماتیک سیستم پیشنهادی

جدول ۱) داده‌های ورودی سیستم [2, 12]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
<b>سیکل ارگانیک رانکین</b>					
بازده	آیزنتروپیک توربین	۸۰٪	عرض کلکتور	۵/۷۶m	ضریب جذب دریافت‌کننده
۰/۹۴	بازده پمپ	۸۰٪	طول کلکتور	۱۲/۲۷m	اصلاح‌کننده زاویه برش
۱	اثر بخشی اولپراتور	۸۵٪	قطر داخلی دریافت‌کننده	۰/۰۶۶m	ضریب هدرفت دریافت‌کننده
۰/۹۲	فشار ورودی توربین	۲۰۰۰kPa	قطر خارجی دریافت‌کننده	۰/۰۷m	ضریب هدرفت پوشش شیشه‌ای
۰/۸۷	دمای ورودی پمپ	۳۶۵K	قطر داخلی پوشش شیشه‌ای	۰/۱۰۹m	کارایی مبدل گرمایی
۷۰٪	بازده الکتریکی ژنراتور	۹۵٪	قطر خارجی پوشش شیشه‌ای	۰/۱۵۵m	ثابت استفان بولتزمن
-۱۰kW/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ۵/۷۶×۸	بازده الکتریکی موتور	۹۵٪	ضریب تعقیب	۰/۹۳	نرخ جریان جرمی داخل دریافت‌کننده
۰/۳۵kg/s	دمای ورودی مبدل گرمایی اول	۳۱۳K	ضریب بازتابی بازتاب‌کننده کلکتور	۰/۹۳۱	-
-	دمای ورودی مبدل گرمایی دوم	۳۵۳K	ضریب عبور شیشه	۰/۹۴	-

اقتصادی یک سیستم ترکیبی خورشیدی با استفاده از کلکتورهای سهموی را مورد بررسی قرار داده‌اند که دارای ظرفیت ۴۰۰MW بود. آنها نتیجه گرفتند که فاکتور انرژی اقتصادی به میزان ۲۷/۳۴٪ افزایش داشته است. همچنین افزایش ۱۳/۳٪ سرمایه اولیه موجب کاهش ۷/۱٪ هزینه برق تولیدی در توربین بخار و ۱/۱۷٪ توسط توربین گازی شده است. در نهایت هزینه نابودی انرژی با کاهش ۱۴/۸۲٪ همراه بود. تحلیل‌های انرژی و اقتصادی مرتبط با یک سیستم هیبریدی خورشیدی و زمین‌گرمایی که به منظور سرمایه‌گذاری، گرمایش، تولید آب گرم و تولید انرژی الکتریکی طراحی شده بود، توسط کالیس و همکاران [18] بررسی شده و نتایج آنها نشان داد که هزینه‌ها در ماه‌های گرم کمتر است.

در مطالعه حاضر، بررسی انرژی و هزینه در قالب تحلیل انرژی اقتصادی یک سیستم تولید توان و گرمایش خورشیدی برای استفاده در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه ارائه می‌شود. این سیستم شامل محرکه اولیه کلکتورهای خورشیدی سهموی در کوپل با یک سیکل ارگانیک رانکین با دو مرحله تولید گرمایش با هدف تامین گرمایش ساختمان و تولید بخار فوق گرم مورد نیاز آزمایشگاه‌ها است. همچنین در ساختار زیرسیستم خورشیدی، قسمت تانک‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز وجود دارد تا در هر ساعت یک شبانه‌روز بتوان به تامین نیاز انرژی ساختمان پرداخت.

لازم به ذکر بوده که مطالعات محدودی در زمینه تحلیل‌های ترمودینامیک و انرژی اقتصادی سیستم استفاده‌شده در این مقاله انجام شده است. از طرفی نیز این تحلیل‌ها به صورت موردی ارائه نشده‌اند. همچنین بررسی‌های آنها با در نظر گرفتن یک شار ثابت خورشیدی انجام شده است. در حالی که در این پژوهش، ابتدا یک مکان مشخص به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده و تمام نیاز انرژی آن برآورد شده است. سپس شار تابش متغیر خورشیدی در طول یک سال برای اقلیم مورد نظر به دست آمده و تحلیل‌ها مطابق با آن صورت گرفته است.

ساختمان مورد نظر در داخل سایت نازلوی دانشگاه ارومیه در منطقه نازلو و در ۱۱ کیلومتری شهر ارومیه واقع شده است. نیاز انرژی ساختمان با استفاده از نرم‌افزار کریر به دست آمده و تحلیل انرژی اقتصادی این سیستم با استفاده از نرم‌افزار EES انجام شده است.

## ۲- توضیح عملکرد سیستم

سیستم مورد مطالعه با هدف تولید توان الکتریکی و گرمایش مورد استفاده در ساختمان دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه طراحی شده است. سیستم کلی شامل زیرسیستم خورشیدی و سیکل ارگانیک رانکین است. طرح شماتیک و داده‌های ورودی مربوط به آن به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ نمایان است. زیرسیستم خورشیدی به کاررفته شامل کلکتورهای خورشیدی سهموی به عنوان محرکه اولیه و تانک‌های ذخیره‌ساز انرژی است. این زیرسیستم وظیفه راه‌اندازی سیکل ارگانیک رانکین در تمام طول شبانه‌روز را دارد. ساعات استفاده از انرژی خورشیدی در طول شبانه‌روز به سه حالت تقسیم می‌شود. حالت اول شامل زمانی است که شار تابش خورشیدی قدرت کمتری دارد. در حالت دوم شار تابش خورشیدی قدرتمند می‌شود و علاوه بر راه‌اندازی سیکل ارگانیک رانکین، ذخیره‌سازی انرژی نیز انجام می‌پذیرد. در حالت سوم از تانک‌های ذخیره‌ساز انرژی در طول شب استفاده می‌شود.

بار گرمایی هر ساختمان به دو قسمت بار گرمایی ناشی از تلفات گرمایی و بار گرمایی تامین آب گرم مصرفی آن ساختمان تقسیم می‌شود. برای تعیین مقدار بار گرمایی ناشی از تلفات گرمایی، مدل‌سازی حاکم بر ساختمان مورد نظر در نرم‌افزار کریر انجام شده است. این نرم‌افزار براساس سری‌های زمانی تشعشعی به حل مساله می‌پردازد. این روش با تابش‌های خورشیدی و روابط ریاضی مرتبط با آن سروکار دارد. بار گرمایی آب گرم مصرفی از رابطه ۱ به دست می‌آید [19].

$$Q = 8.33 [j (\Sigma y_i N_{p,i})] \Delta T_{h,c} \quad (1)$$

که در آن  $\Delta T_{h,c}$  اختلاف دمای بین آب گرم مصرفی و آب شهری،  $j$  ضریب تقاضا،  $y$  حداکثر مقدار آب گرم مصرفی هر مکان و  $N_p$  تعداد نفرات است.

### ۳-۲- تعیین توان مورد نیاز

با توجه به متغیربودن دستگاه‌های مورد استفاده در یک ساختمان و عدم اطلاع دقیق از نوع تجهیزاتی که در آن استفاده خواهد شد، لذا با استفاده از روابط ریاضی، رسیدن به مطلوب ذکر شده امکان‌پذیر نخواهد بود. راهکاری که در این مقاله برای به‌دست‌آوردن مقدار توان الکتریکی مورد نیاز دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه مورد استفاده قرار گرفته، براساس یک آمارگیری از تمام تجهیزات الکتریکی مستقر در ساختمان مذکور است. بدین صورت که مقدار توان مورد نیاز برای راه‌اندازی تکتک این دستگاه‌ها به دست آمده و برای تخمین مقدار توان مورد نیاز با یکدیگر جمع شده‌اند.

### ۳-۲- کلکتورهای خورشیدی سهموی

مقدار تابش‌های جذب‌شده توسط کلکتور خورشیدی سهموی از رابطه ۲ به دست می‌آید [2, 3].

$$S = G_b \eta_r \quad (2)$$

که در آن  $G_b$  نرخ تابش پرتویی بوده و نحوه دستیابی به آن در دو پژوهش [2, 3] به‌طور کامل شرح داده شده است.  $\eta_r$  بازده نوری دریافت‌کننده است و از معادله ۳ استخراج می‌شود [2, 3].

$$\eta_r = \rho_c \gamma \tau \alpha k_\gamma \quad (3)$$

که در آن  $\rho_c$  ضریب بازتاب،  $\gamma$  ضریب تعقیب،  $\tau$  ضریب عبور پوشش شیشه‌ای،  $\alpha$  ضریب جذب دریافت‌کننده و  $k_\gamma$  اصلاح‌کننده زاویه برش است.

مقدار توان مفید به‌دست‌آمده از هر کلکتور خورشیدی سهموی از معادله ۴ قابل محاسبه است [2, 3].

$$\dot{Q}_u = A_{ap} F_R \left[ S - \frac{A_r}{A_{ap}} U_L (T_{r,i} - T_0) \right] \quad (4)$$

که در آن  $A_{ap}$  و  $A_r$  به‌ترتیب مساحت قسمت دیافراگمی سطح کلکتور و مساحت سطح دریافت‌کننده،  $U_L$  ضریب کلی تلفات حرارتی،  $T_{r,i}$  دمای ورودی دریافت‌کننده،  $T_0$  دمای محیط و  $F_R$  ضریب تلفات حرارتی است.

مساحت قسمت دیافراگمی سطح کلکتور و مساحت سطح دریافت‌کننده به‌ترتیب از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شود [2, 3].

$$A_{ap} = (W - D_{c,o})L \quad (5)$$

$$A_r = \pi D_{r,o} L \quad (6)$$

که در آن  $W$  عرض کلکتور،  $L$  طول کلکتور،  $D_{r,o}$  و  $D_{c,o}$  نیز به‌ترتیب قطر خارجی دریافت‌کننده و پوشش شیشه‌ای هستند.

ضریب تلفات حرارتی نیز از طریق رابطه ۷ به دست می‌آید [2, 3].

سیال عامل زیرسیستم خورشیدی روغن ترمینول-۶۶ است. این روغن وارد کلکتورهای خورشیدی سهموی می‌شود و با جذب انرژی خورشیدی و افزایش دما به بخار تبدیل می‌شود. در حالت کم‌تابش، سیال عامل به‌طور مستقیم به سمت اواپراتور- $b$  می‌رود و با عبور از آن، سیکل ارگانیک رانکین را به راه می‌اندازد. سپس به‌وسیله پمپ خورشیدی به سمت کلکتورها هدایت می‌شود. در حالت پُرتابش، سیال عامل خروجی از کلکتورها به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول، مسیر اشاره‌شده قبل را طی می‌کند. قسمت دوم به‌منظور ذخیره‌سازی انرژی، وارد مبدل گرمایی ذخیره‌سازی می‌شود و سیال عاملی را که از سمت تانک ذخیره‌ساز سرد، با عبور از شیر انبساط و پمپ به‌وسیله پمپ ذخیره‌سازی وارد همان مبدل می‌شود، گرم می‌کند. سیال گرم نیز وارد تانک ذخیره‌ساز گرم می‌شود. در ادامه سیال خروجی سرد از مبدل با سیال خروجی از اواپراتور- $b$  ترکیب و وارد کلکتورها می‌شود. در حالت استفاده از تانک‌های ذخیره‌ساز انرژی، سیال گرم از تانک ذخیره‌ساز گرم، خارج و با عبور از شیر انبساط و پمپ توسط پمپ ذخیره‌سازی وارد اواپراتور- $a$  می‌شود و به این ترتیب سیکل ارگانیک رانکین راه‌اندازی می‌شود. این سیال پس از خروج از اواپراتور- $a$  وارد تانک ذخیره‌ساز سرد می‌شود.

زیرسیستم سیکل ارگانیک رانکین از توربین، ژنراتور، پمپ، دو عدد اواپراتور و دو عدد مبدل گرمایی برای انجام فرآیندهای گرمایش تشکیل شده است و وظیفه تولید توان الکتریکی و تامین گرمایش را به عهده دارد. در این سیکل از سیال عامل ارگانیک ان-اکتان استفاده می‌شود. این سیال عامل به‌صورت مایع متراکم وارد پمپ ارگانیک رانکین می‌شود. سپس پمپ آن را به سمت اواپراتور هدایت می‌کند. این سیال در هنگام عبور از اواپراتور و تبادل گرمایی با روغن ترمینول-۶۶ به‌صورت بخار، خارج و وارد توربین می‌شود. با عبور از داخل توربین، کار مکانیکی تولید و این کار مکانیکی توسط ژنراتور الکتریکی به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. سیال در خروجی توربین نیز دارای دما و انرژی بالایی است. لذا ابتدا وارد مرحله اول گرمایش با هدف تامین گرمایش مورد نیاز دانشکده می‌شود. خروجی این مرحله همچنان دارای انرژی است و از این انرژی در مرحله دوم گرمایش برای تولید بخار فوق‌گرم استفاده می‌شود. بخار فوق‌گرم تولیدشده در آزمایشگاه‌های مختلف دانشکده می‌تواند برای کارهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. خروجی مرحله دوم گرمایش وارد پمپ ارگانیک رانکین می‌شود و دوباره سیکل ادامه می‌یابد.

### ۳- مدل‌سازی

در این بخش ابتدا مدل‌سازی تعیین نیاز انرژی ساختمان دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه مورد بحث قرار خواهد گرفت. سپس با توجه به شرایط آب و هوایی حاکم بر منطقه‌ای که این ساختمان در آن مستقر است، روابط حاکم بر کلکتورهای خورشیدی سهموی به‌همراه ارایه مدل‌سازی انرژی اقتصادی سیستم پیشنهادی ارایه خواهد شد.

### ۳-۱- تعیین نیاز انرژی

ساختمان دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه در ۵ طبقه و در ۲۰ سالن مجزا بنا شده و تعیین نیاز انرژی متناسب با آن در مساحت بیش از  $9800 \text{ m}^2$  صورت گرفته است. با توجه به این موضوع که مطالعه حاضر براساس یک مطالعه موردی است، لذا مشخص‌کردن نیاز انرژی آن یک امر ضروری به‌شمار می‌رود.

### ۳-۱-۱- تعیین بار گرمایی



$$(۱۷)$$

$$\dot{W}_{net} = \eta_g \dot{W}_T - \frac{\dot{W}_{op}}{\eta_m} - \frac{\dot{W}_{sol,p}}{\eta_m} - \frac{\dot{W}_{st,p1}}{\eta_m} - \frac{\dot{W}_{st,p2}}{\eta_m}$$

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{sol} = \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_{12} h_{12} \quad (۱۸)$$

که زیرنویس‌های net به خالص، g به ژنراتور، m به موتور الکتریکی، op به پمپ ارگانیک، sol,p به پمپ خورشیدی و st,p به پمپ ذخیره اشاره دارند. نرخ انرژی کلکتورها نیز از طریق معادله ۱۹ به دست می‌آید [12].

$$(۱۹)$$

$$\dot{E}X_{PTSC} = A_{ap,tot} G_b \left[ 1 + \left( \left( \frac{1}{3} \right) \left( \frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right) - \left( \left( \frac{4}{3} \right) \left( \frac{T_0}{T_s} \right) \right) \right]$$

که  $T_s$  دمای خورشید و زیرنویس PTSC نشانگر کلکتور سهموی است.

### ۳-۳- تحلیل انرژی اقتصادی سیستم

تحلیل انرژی اقتصادی در واقع نوعی تحلیل هزینه بر مبنای انرژی است [20]. بنا بر تعریف مطرح شده، ابتدا مدل‌سازی تحلیل انرژی و سپس مدل‌سازی روابط مربوط به هزینه‌های سیستم انجام می‌شود.

#### ۳-۳-۱- تحلیل انرژی

انرژی هر نقطه به چهار قسمت فیزیکی، شیمیایی، پتانسیل و جنبشی تقسیم می‌شود. به دلیل تحلیل ترمودینامیک در این مقاله، دو صورت آخر ذکر شده نادیده گرفته می‌شود. از طرفی نیز چون در سیستم مورد بررسی، واکنش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی وجود ندارد، انرژی شیمیایی نیز مطالعه نمی‌شود. در حالت کلی برای هر یک از نقاط سیستم، نرخ انرژی فیزیکی از رابطه ۲۰ به دست می‌آید [20]:

$$\dot{E}X_{ph} = \sum \dot{m}_i [(h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0)] \quad (۲۰)$$

که در آن  $\dot{m}_i$  نرخ جریان جرمی،  $h$  و  $s$  به ترتیب نشانگر آنتالپی و آنتروپی ویژه است.

همچنین رابطه موازنه نرخ انرژی برای یک حجم کنترل و در حالت پایا از معادله ۲۱ محاسبه می‌شود [20].

$$\dot{E}X_D = \sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W}_{cv} - P_0 \frac{dV_{cv}}{dt} \right) \quad (۲۱)$$

$$+ \sum \dot{m}_i ex_i - \sum \dot{m}_e ex_e$$

که در آن  $\dot{E}X_D$  انرژی نابودی،  $\dot{Q}_j$  نرخ انتقال حرارت،  $\dot{W}_{cv}$  نرخ توان حجم کنترل،  $ex$  انرژی ویژه و زیرنویس‌های  $i$  و  $e$  به ترتیب بر ورودی، خروجی و دستگاه اشاره دارند. این رابطه برای دستگاه‌های مختلف موجود در سیستم مورد مطالعه در جدول ۲ آمده است.

بازده انرژی به عنوان نسبت بازده واقعی گرمایی به حداکثر بازده گرمایی برگشت‌پذیر تعریف می‌شود که هر دو تحت شرایط یکسان باشند. به طور کلی بازده انرژی را می‌توان به صورت رابطه ۲۲ نشان داد [20].

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}X_{D,k}}{\dot{E}X_{D,tot}} \quad (۲۲)$$

نسبت انرژی نیز به صورت نسبت انرژی نابودی هر دستگاه به انرژی نابودی کل سیستم تعریف می‌شود [20].

$$y = \frac{\dot{E}X_{D,k}}{\dot{E}X_{D,tot}} \quad (۲۳)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}_r C_{pr}}{A_r U_L} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{A_r U_L F_1}{\dot{m}_r C_{pr}} \right) \right] \quad (۷)$$

که در آن  $\dot{m}_r$  نرخ دبی جرمی ورودی به داخل دریافت‌کننده،  $C_{pr}$  گرمای ویژه در داخل دریافت‌کننده و  $F_1$  فاکتور بازدهی کلکتور است.

فاکتور بازدهی کلکتور از معادله ۸ به دست می‌آید [2, 3].

$$F_1 = \frac{U_0}{U_L} \quad (۸)$$

که در آن  $U_0$  ضریب کلی انتقال حرارت کلکتور است. ضریب کلی تلفات حرارت بین محیط و دریافت‌کننده کلکتور به سه نوع ضریب انتقال حرارت بستگی دارد که در ادامه محاسبه می‌شوند [2, 3]:

$$U_L = \left[ \frac{A_r}{(h_{c,ca} + h_{r,ca}) A_c} + \frac{1}{h_{r,cr}} \right] \quad (۹)$$

$A_c$  مساحت سطح پوشش است و از رابطه ۱۰ به دست می‌آید [2, 3].

$$A_c = \pi D_{c,o} L \quad (۱۰)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بین محیط و پوشش شیشه‌ای از معادله ۱۱ محاسبه می‌شود [11, 12].

$$h_{c,ca} = \frac{Nus K_{air}}{D_{c,o}} \quad (۱۱)$$

که در آن  $K_{air}$  ضریب انتقال حرارت رسانایی هوا و  $Nus$  عدد ناسلت است.

ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین محیط و پوشش شیشه‌ای از معادله ۱۲ قابل دستیابی است [11, 12]:

$$h_{r,ca} = [\varepsilon_{cv} \sigma (T_c + T_0)(T_c^2 + T_0^2)] \quad (۱۲)$$

که در آن  $\varepsilon_{cv}$  ضریب عبور پوشش شیشه‌ای،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن و  $T_c$  دمای پوشش شیشه‌ای است.

ضریب انتقال حرارت تشعشعی بین دریافت‌کننده و پوشش شیشه‌ای از معادله ۱۳ محاسبه می‌شود [11, 12].

$$(۱۳)$$

$$h_{r,cr} = \sigma (T_c + T_{r,av})(T_c^2 + T_{r,av}^2) \left[ \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_c} \left( \frac{1}{\varepsilon_{cv}} - 1 \right) \right]^{-1}$$

که در آن  $\varepsilon_r$  ضریب عبور و  $T_{r,av}$  دمای متوسط دریافت‌کننده است.

ضریب کلی انتقال حرارت برای کلکتور خورشیدی سهموی به شکل رابطه ۱۴ است [11, 12].

$$U_0 = \left[ \frac{1}{U_L} + \frac{D_{r,o}}{h_{c,r,in} D_{r,i}} + \left( \frac{D_{r,o}}{2 K_r} \ln \frac{D_{r,o}}{D_{r,i}} \right) \right]^{-1} \quad (۱۴)$$

که  $D_{r,i}$  قطر داخلی دریافت‌کننده و  $h_{c,r,in}$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی درون دریافت‌کننده بوده و از معادله ۱۵ قابل دستیابی است [11, 12]:

$$h_{c,r,in} = \frac{Nus_r K_r}{D_{r,i}} \quad (۱۵)$$

دمای متوسط پوشش شیشه‌ای از معادله ۱۶ محاسبه می‌شود [2, 3].

$$T_c = \frac{h_{r,cr} T_{r,av} + A_c A_r^{-1} T_0 (h_{c,ca} + h_{r,ca})}{h_{r,cr} + A_c A_r^{-1} (h_{c,ca} + h_{r,ca})} \quad (۱۶)$$

مقادیر نرخ توان خالص خروجی سیستم و نرخ حرارت جذب شده توسط کلکتورها به ترتیب از روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه می‌شود [11, 12].

که در آن  $C$  نشانگر هزینه هر واحد انرژی است.

محاسبه نرخ هزینه هر دستگاه از رابطه ۲۶ انجام می‌شود [21].

$$\dot{Z}_k = \frac{Z_k CRF \varphi_k}{N_k} \quad (26)$$

که  $Z_k$  تابع هزینه هر دستگاه،  $CRF$  عامل بازیابی سرمایه،  $\varphi_k$  عامل نگهداری و  $N_k$  تعداد ثانیه‌های کارکرد دستگاه در طول سال است. عامل بازیابی سرمایه را می‌توان از معادله ۲۷ به دست آورد [21].

$$CRF = \frac{i_r (1 + i_r)^m}{(1 + i_r)^m - 1} \quad (27)$$

که  $i_r$  نشانگر نرخ بهره و  $m$  نشانگر زمان بهره‌بری بر حسب سال است.

در حالت کلی برای یک دستگاه، رابطه نرخ موازنه انرژی اقتصادی در فرم معادله ۲۴ ارایه می‌شود [21]:

$$\Sigma \dot{C}_{i,k} + \dot{C}_{q,k} + \dot{Z}_k = \Sigma \dot{C}_{e,k} + \dot{C}_{w,k} \quad (24)$$

که در آن  $\dot{C}$  نشان‌دهنده نرخ هزینه،  $\dot{Z}_k$  نشان‌دهنده نرخ هزینه دستگاه و زیرنویس‌های  $q$  به گرما و  $w$  به کار اشاره دارند. این معادله برای تمام دستگاه‌های حاضر در سیستم در جدول ۲ ارایه شده است.

محاسبه نرخ هزینه از معادله ۲۵ صورت می‌گیرد [21].

$$\dot{C} = c \dot{E}X \quad (25)$$

جدول ۲) روابط موازنه انرژی و موازنه انرژی اقتصادی دستگاه‌های مختلف در سیستم [20, 21]

دستگاه	موازنه انرژی	موازنه انرژی اقتصادی	توابع کمکی	نرخ هزینه دستگاه
توربین	$\dot{E}X_{D,T} = \dot{E}X_3 - \dot{E}X_4 - \dot{W}_T$	$\dot{C}_3 + \dot{Z}_T = \dot{C}_4 + \dot{C}_{W_T}$	$c_3 = c_4$	$Z_T = 4750 (W_T)^{0.75}$
پمپ	$\dot{E}X_{D,op} = \dot{E}X_1 - \dot{E}X_2 + \dot{W}_{op}$	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_{op} + \dot{C}_{W_{op}} = \dot{C}_2$	$c_{W_{op}} = c_{W_T}$	$Z_{op} = 2100 \left[ \frac{W_{op}}{10} \right]^{0.26} \left[ \frac{1 - \eta_{op}}{\eta_{op}} \right]^{0.5}$
اواپراتور - a	$\dot{E}X_{D,eva-a} = (\dot{E}X_{2a} - \dot{E}X_{2b} + \dot{E}X_{16} - \dot{E}X_{17}) \times \frac{\Delta t_{dhst}}{24}$	$\dot{C}_{2a} + \dot{C}_{16} + \dot{Z}_{eva-a} = \dot{C}_{2b} + \dot{C}_{17}$	$c_{16} = c_{17}$	$Z_{eva-a} = 309.14 (A_{eva-a})^{0.85}$
اواپراتور - b	$\dot{E}X_{D,eva-b} = (\dot{E}X_{2b} - \dot{E}X_3 + \dot{E}X_7 - \dot{E}X_8) \times \frac{24 - \Delta t_{dhst}}{24}$	$\dot{C}_{2b} + \dot{C}_7 + \dot{Z}_{eva-b} = \dot{C}_3 + \dot{C}_8$	$c_7 = c_8$	$Z_{eva-b} = 309.14 (A_{eva-b})^{0.85}$
مبدل گرمایی اول	$\dot{E}X_{D,HP1} = \dot{E}X_{hp,1} - \dot{E}X_{hp,2} + \dot{E}X_4 - \dot{E}X_5$	$\dot{C}_4 + \dot{C}_{hp,1} + \dot{Z}_{HP1} = \dot{C}_{hp,2} + \dot{C}_5$	$c_4 = c_5, c_{hp,1} = 0$	$Z_{HP1} = 12000 \left( \frac{A_{HP1}}{100} \right)^{0.6}$
مبدل گرمایی دوم	$\dot{E}X_{D,HP2} = \dot{E}X_{hp,3} - \dot{E}X_{hp,4} + \dot{E}X_5 - \dot{E}X_1$	$\dot{C}_5 + \dot{C}_{hp,3} + \dot{Z}_{HP2} = \dot{C}_{hp,4} + \dot{C}_1$	$c_5 = c_6, c_{hp,3} = 0$	$Z_{HP2} = 12000 \left( \frac{A_{HP2}}{100} \right)^{0.6}$
کلکتورها	$\dot{E}X_{D,PTSC} = (\dot{E}X_{12} - \dot{E}X_6 + \dot{E}X_{PTSC}) \times \frac{\Delta t_{dhst}}{24}$	$\dot{C}_{12} + \dot{Z}_{PTSC} = \dot{C}_6$	$\frac{\dot{C}_9 + \dot{C}_{11}}{\dot{E}X_9 + \dot{E}X_{11}} = \frac{\dot{C}_{12}}{\dot{E}X_{12}}$	$Z_{PTSC} = 230 A_{ap,tot}$
تانک ذخیره گرم	$\dot{E}X_{D,hst} = \left( \dot{E}X_{13} \left( \frac{\Delta t_{chst}}{24} \right) - \dot{E}X_{14} \left( \frac{\Delta t_{dhst}}{24} \right) \right)$	$\dot{C}_{13} + \dot{Z}_{hst} = \dot{C}_{14}$	-	$Z_{hst} = 494.9 + 808 V_{hst}$
تانک ذخیره سرد	$\dot{E}X_{D,hst} = \left( \dot{E}X_{17} \left( \frac{\Delta t_{dhst}}{24} \right) - \dot{E}X_{18} \left( \frac{\Delta t_{chst}}{24} \right) \right)$	$\dot{C}_{17} + \dot{Z}_{cst} = \dot{C}_{18}$	-	$Z_{cst} = 494.9 + 808 V_{cst}$
مبدل گرمایی ذخیره‌سازی	$\dot{E}X_{D,st,HX} = (\dot{E}X_{10} - \dot{E}X_{11} + \dot{E}X_{20} - \dot{E}X_{13}) \times \frac{\Delta t_{dhst}}{24}$	$\dot{C}_{10} + \dot{C}_{20} + \dot{Z}_{st,HX} = \dot{C}_{11} + \dot{C}_{13}$	$c_{10} = c_{11}$	$Z_{st,HX} = 12000 \left( \frac{A_{st,HX}}{100} \right)^{0.6}$
پمپ خورشیدی	$\dot{E}X_{D,sol,p} = \dot{E}X_8 - \dot{E}X_9 + \dot{W}_{sol,p}$	$\dot{C}_8 + \dot{Z}_{sol,p} + \dot{C}_{W_{sol,p}} = \dot{C}_9$	$c_{W_{sol,p}} = c_{W_T}$	$Z_{sol,p} = 2100 \left[ \frac{W_{sol,p}}{10} \right]^{0.26} \left[ \frac{1 - \eta_{sol,p}}{\eta_{sol,p}} \right]^{0.5}$
پمپ ذخیره اول	$\dot{E}X_{D,st,p1} = \dot{E}X_{15} - \dot{E}X_{16} + \dot{W}_{st,p1}$	$\dot{C}_{15} + \dot{Z}_{st,p1} + \dot{C}_{W_{st,p1}} = \dot{C}_{16}$	$c_{W_{st,p1}} = c_{W_T}$	$Z_{st,p1} = 2100 \left[ \frac{W_{st,p1}}{10} \right]^{0.26} \left[ \frac{1 - \eta_{st,p1}}{\eta_{st,p1}} \right]^{0.5}$
پمپ ذخیره دوم	$\dot{E}X_{D,st,p2} = \dot{E}X_{19} - \dot{E}X_{20} + \dot{W}_{st,p2}$	$\dot{C}_{19} + \dot{Z}_{st,p2} + \dot{C}_{W_{st,p2}} = \dot{C}_{20}$	$c_{W_{st,p2}} = c_{W_T}$	$Z_{st,p2} = 2100 \left[ \frac{W_{st,p2}}{10} \right]^{0.26} \left[ \frac{1 - \eta_{st,p2}}{\eta_{st,p2}} \right]^{0.5}$
شیر انبساط اول	$\dot{E}X_{D,EV1} = \dot{E}X_{14} - \dot{E}X_{15}$	$\dot{C}_{14} + \dot{Z}_{EV1} = \dot{C}_{15}$	-	$Z_{EV1} = 0$
شیر انبساط دوم	$\dot{E}X_{D,EV2} = \dot{E}X_{18} - \dot{E}X_{19}$	$\dot{C}_{18} + \dot{Z}_{EV2} = \dot{C}_{19}$	-	$Z_{EV2} = 0$

همچنین نسبت اختلاف بین هزینه هر واحد انرژی خروجی و ورودی بر نرخ هر واحد انرژی ورودی، اختلاف هزینه نسبی نامیده می‌شود. این دو کمیت به ترتیب به شکل روابط ۳۱ و ۳۲ ارایه می‌شوند [21].

$$f_k = \frac{\dot{Z}_k}{(\dot{Z}_k + \dot{E}X_{D,k})} \quad (31)$$

$$r_k = \frac{C_{F,k} - C_{F,k}}{C_{F,k}} \quad (32)$$

نرخ هزینه گرمایش مراحل اول و دوم به ترتیب از روابط ۳۳ و ۳۴ به دست می‌آیند [22].

$$\dot{C}_{H1} = c_{hp,2} \dot{E}X_{hp,2} \quad (33)$$

$$\dot{C}_{H2} = c_{hp,4} \dot{E}X_{hp,4} \quad (34)$$

که  $hp_2$  و  $hp_4$  به ترتیب خروجی مراحل اول و دوم گرمایش هستند. هزینه بر واحد انرژی توان خالص خروجی، گرمایش و تولید همزمان گرمایش به ترتیب از معادلات ۳۵، ۳۶ و ۳۷ به دست می‌آیند [22].

در ادامه چند کمیت مهم دیگر برای درک بهتر مفهوم انرژی اقتصادی معرفی می‌شوند. یکی از آنها نرخ هزینه تولیدی هر دستگاه است که با  $\dot{C}_{P,k}$  مشخص شده و برابر با حاصلضرب هزینه هر واحد انرژی تولیدی دستگاه در انرژی تولیدی آن است. کمیت بعدی نرخ هزینه ورودی هر دستگاه بوده که با  $\dot{C}_{F,k}$  مشخص شده و برابر با حاصلضرب هزینه هر واحد انرژی ورودی در انرژی ورودی آن است. همچنین نرخ هزینه ناپودی انرژی در هر واحد انرژی ناپودی هر دستگاه در انرژی ناپودی آن است و با  $\dot{C}_{D,k}$  نشان داده می‌شود [21].

$$\dot{C}_{P,k} = c_{P,k} \dot{E}X_{P,k} \quad (28)$$

$$\dot{C}_{F,k} = c_{F,k} \dot{E}X_{F,k} \quad (29)$$

$$\dot{C}_{D,k} = c_{D,k} \dot{E}X_{D,k} \quad (30)$$

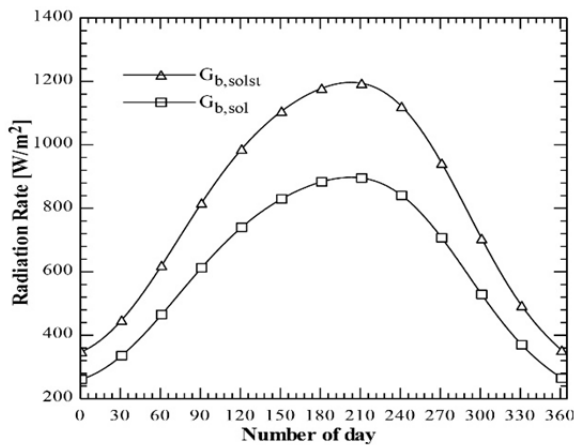
نسبت نرخ هزینه هر دستگاه به مجموع نرخ هزینه ناپودی انرژی و نرخ هزینه آن به عنوان فاکتور انرژی اقتصادی تعریف می‌شود.

دانشگاه ارومیه در جدول ۵ ذکر شده است. مشاهده می‌شود که مقدار تلفات گرمایی در این ساختمان برابر با ۱۰۲۴/۷kW بوده و مقدار بار گرمایی آب گرم مصرفی برابر با ۲۲۸/۵kW شده است. بنابراین مجموع بار گرمایی این ساختمان برابر با ۱۲۵۳/۲kW می‌شود. با اضافه کردن ۲۰٪ این مقدار به عنوان ضریب اطمینان، مقدار نرخ گرمایی مرحله اول گرمایش ۱۵۰۳/۸kW می‌شود. با محاسبه مجموع نرخ توان تمام تجهیزات الکتریکی ساختمان دانشکده، بیشترین مقدار نرخ توان مورد نیاز حدود ۱۵۰۰kW بوده که به عنوان نرخ توان الکتریکی ساختمان در تحلیل‌ها استفاده شده است.

جدول ۵) نتایج محاسبات بارهای گرمایی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه ارومیه

ناحیه	مقدار بار گرمایی (kW)	مساحت (m <sup>2</sup> )
طبقه همکف	۵۷۸/۷	۵۹۱۰/۹
طبقه اول	۲۴۹/۶	۲۱۰۵/۲
طبقه دوم	۸۴/۲	۸۵۰/۹
طبقه سوم	۵۵/۹	۴۸۸/۷
طبقه چهارم	۵۶/۳	۴۴۸/۳
آب گرم مصرفی	۲۲۸/۵	-
مجموع	۱۲۵۳/۲	۹۸۰۴

نرخ تابش پرتویی در منطقه نازلو در نمودار ۱ نمایان است. این نمودار براساس بیشترین نرخ تابش روزانه برای حالت پرتابش و نرخ حالت کم تابش خورشیدی که به طور متوسط ۷۵٪ حالت پرتابش در نظر گرفته شده، ترسیم شده است. به دلیل قائم بودن تابش‌ها در میانه سال میلادی، بیشترین نرخ تابش سالانه در اواسط سال اتفاق می‌افتد. در اوایل و اواخر سال نیز کمترین تابش دریافتی وجود دارد که باعث حالت صعودی و سپس نزولی نمودار می‌شود. تغییرات نرخ تابش پرتویی برای حالت پرتابش بین ۳۵۰-۱۱۹۰ W/m<sup>2</sup> و برای حالت کم تابش بین ۲۶۰-۸۸۰ W/m<sup>2</sup> است.



نمودار ۱) نرخ تابش پرتویی خورشیدی در منطقه نازلو

#### ۵-۲- نتایج تحلیل اگزرژی اقتصادی

نتایج نقطه به نقطه خواص ترمودینامیک (دما، فشار و دبی جرمی) و اگزرژی اقتصادی (هزینه بر واحد اگزرژی و نرخ هزینه) سیستم در سه حالت تابشی در جدول ۶ آمده است. در ادامه پارامترهای هزینه بر واحد اگزرژی برای تولید همزمان گرمایش (C<sub>cog,H</sub>)، تولید گرمایش (C<sub>H</sub>)، تولید توان خالص خروجی (C<sub>net</sub>) و نرخ هزینه تولید گرمایش مرحله اول (C<sub>H1</sub>)، مرحله دوم (C<sub>H2</sub>) و توان خالص خروجی (C<sub>WT</sub>)، براساس سه پارامتر مهم طراحی که عبارت از روزهای یک سال میلادی، دمای ورودی پمپ و فشار ورودی

$$C_{W_{net}} = C_{W_T} \quad (35)$$

$$C_H = \frac{\dot{C}_{hp,2} + \dot{C}_{hp,4}}{\dot{E}X_{hp,2} + \dot{E}X_{hp,4}} \quad (36)$$

$$C_{cog,H} = \frac{\dot{C}_{W_{net}} + \dot{C}_{hp,2} + \dot{C}_{hp,4}}{\dot{W}_{net} + \dot{E}X_{hp,2} + \dot{E}X_{hp,4}} \quad (37)$$

که زیرنویس‌های T توربین، H گرمایش و COG تولید همزمان هستند.

#### ۴- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی مقاله حاضر با استفاده از مطالعات سلیمان و همکاران [11-14] انجام گرفته است. با توجه به این نکته که سه حالت تابش خورشیدی بررسی شده، لذا برای اعتبارسنجی ذکر یک حالت کافی است. به همین دلیل در حالت پرتابش خورشیدی که اکثر نقاط سیستم حضور دارند، خواص ترمودینامیک نقطه به نقطه دما و فشار در سیستم این مقاله با سیستم مورد مطالعه سلیمان و همکاران [11] اعتبارسنجی شده و نتایج به دست آمده در جدول ۳ گزارش شده است. با توجه به این که مطالعه سلیمان و همکاران براساس شار تابش ثابت خورشیدی و پژوهش حاضر براساس شار متغیر تابش خورشیدی است، برای اعتبارسنجی نتایج تحلیل اگزرژی اقتصادی بر پایه هزینه بر واحد اگزرژی توان خالص خروجی در سه حالت تابش خورشیدی از نتایج روز ۹۰ام استفاده شده و در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۳) اعتبارسنجی نتایج خواص ترمودینامیک محاسبه شده با مطالعه سلیمان و همکاران [11] در حالت پرتابش خورشیدی

سیال	نقطه	دما (K)	فشار (kPa)	دما (K)	فشار (kPa)
مطالعه حاضر / سلیمان و همکاران					
ان-اکتان	۱	۳۶۵	۳۵/۸	۳۶۵	۳۵/۷۷
ان-اکتان	۲	۳۶۵/۹	۲۰۰	۳۶۵/۹	۲۰۰
ان-اکتان	۳	۵۴۹	۲۰۰	۵۴۹	۲۰۰
ان-اکتان	۴	۴۸۰/۵	۳۵/۸	۴۴۷/۵	۳۵/۷۷
ان-اکتان	۵	۴۳۸/۵	۳۵/۸ <sup>a</sup>	وجود ندارد	
ترمینول-۶۶	۶	۶۰۰	۵۴/۰۵ <sup>a</sup>	۶۰۰	۵۴/۱ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۷	۶۰۰	۵۴/۰۵ <sup>a</sup>	۶۰۰	۵۴/۱ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۸	۴۰۱	۰/۱۶۷ <sup>a</sup>	۴۰۵	۰/۲۰۰ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۹	۴۰۱	۰/۱۶۷ <sup>a</sup>	۴۰۵	۰/۲۰۰ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۱۰	۶۰۰	۵۴/۰۵ <sup>a</sup>	۶۰۰	۵۴/۱ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۱۱	۴۳۲/۳	۰/۵۶۴ <sup>a</sup>	۴۴۴/۴	۰/۸۶۸ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۱۲	۴۱۸/۵	۰/۳۳۷ <sup>a</sup>	۴۳۳/۱	۰/۵۸ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۱۳	۵۵۸/۱	۲۲/۰۹ <sup>a</sup>	۵۶۷	۲۷ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۱۸	۳۹۰/۴	۰/۱۰۵ <sup>a</sup>	۴۰۴/۳۷	۰/۱۹۵ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۱۹	۳۹۰/۴	۰/۱۰۵ <sup>a</sup>	۴۰۴/۳۷	۰/۱۹۵ <sup>a</sup>
ترمینول-۶۶	۲۰	۳۹۰/۴	۰/۱۰۵ <sup>a</sup>	۴۰۴/۳۷	۰/۱۹۵ <sup>a</sup>

<sup>a</sup> نرم افزار EES فقط فشار بخار ترمینول-۶۶ را محاسبه می‌کند

جدول ۴) اعتبارسنجی نتایج هزینه بر واحد اگزرژی تولید توان خالص با مطالعه سلیمان و همکاران [13] در روز ۹۰ام یک سال

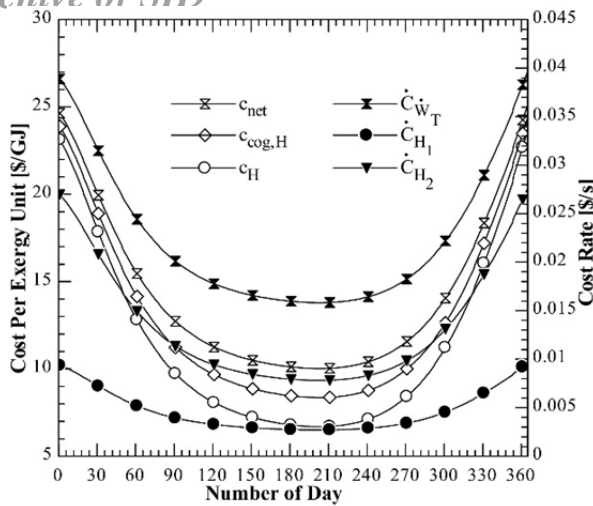
مطالعه	هزینه بر واحد اگزرژی بر حسب \$/s در حالت کم تابش پرتابش استفاده از ذخیره‌ساز انرژی		
مطالعه حاضر	۱۴/۶	۱۲/۸	۱۶/۴
سلیمان و همکاران	۱۵	۱۱/۲	۱۶/۲

#### ۵- نتایج و بحث

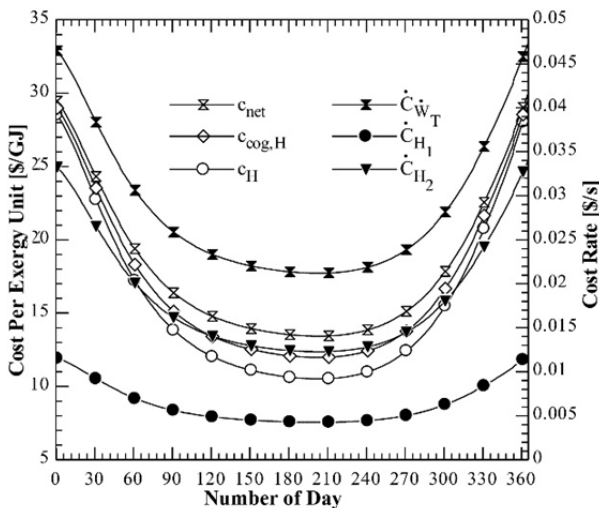
##### ۱-۵ نتایج نیاز انرژی

نتایج تعیین بار گرمایی ساختمان دانشکده فنی و مهندسی

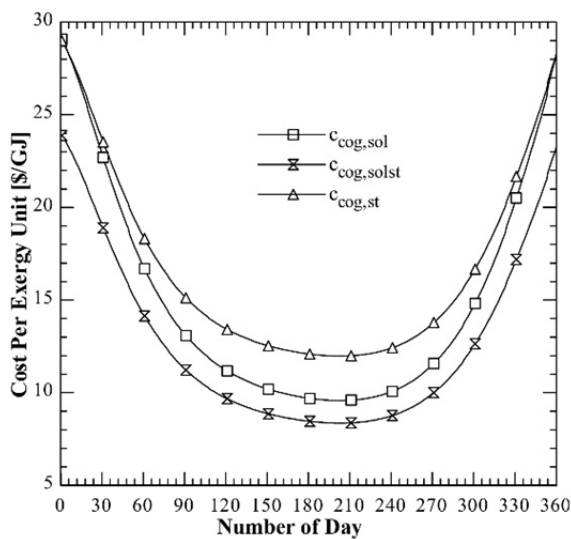
توربین در سیکل ارگانیک رانکین هستند، در نمودارهای ۱۱-۲ ارزیابی می‌شوند.



نمودار ۳) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت پرتابش براساس روزهای سال



نمودار ۴) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت استفاده از ذخیره‌ساز انرژی براساس روزهای سال

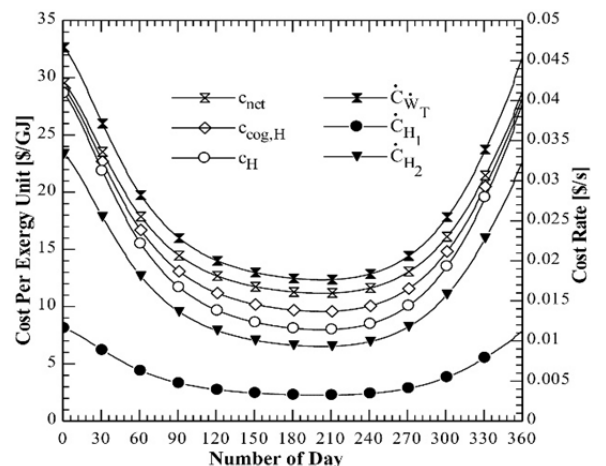


نمودار ۵) مقایسه بین هزینه بر واحد انرژی برای سه حالت تابش خورشیدی براساس روزهای سال

جدول ۶) خواص ترمودینامیک و انرژی اقتصادی سیستم

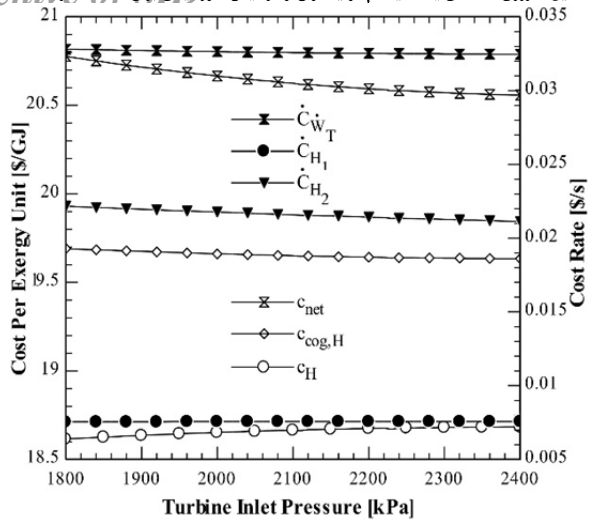
نقطه	سیال	T (K)	P (kPa)	$\dot{m}$ (kg/s)	c (\$/GJ)	$\dot{C}$ (\$/s)
حالت کم‌تابش (از کلکتورها استفاده شده است و حالت ذخیره‌سازی انرژی وجود ندارد)						
۱	ان-اکتان	۳۶۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۴/۲۸	۰/۰۰۳۳۸۴
۲	ان-اکتان	۳۶۵/۹	۲۰۰۰	۱۵/۲۱	۱۶/۱۱	۰/۰۰۴۵۹۹
۳	ان-اکتان	۵۴۹	۲۰۰۰	۱۵/۲۱	۱۴/۲۸	۰/۰۵۸۶۷
۴	ان-اکتان	۴۸۰/۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۴/۲۸	۰/۰۳۲۵۸
۵	ان-اکتان	۴۳۸/۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۴/۲۸	۰/۰۲۵۰۴
۶	ترمینول-۶۶	۶۰۰	۵۴/۰۵	۱۲/۵	۷/۷۷۵	۰/۱۵۲۸
۷	ترمینول-۶۶	۶۰۰	۵۴/۰۵	۱۲/۵	۷/۷۷۵	۰/۰۶۸۴۹
۸	ترمینول-۶۶	۴۰۱	۰/۱۶۷	۱۲/۵	۷/۷۷۵	۰/۰۴۷۲۲
۹	ترمینول-۶۶	۴۰۱	۰/۱۶۷	۱۲/۵	۷/۸۲۶	۰/۰۴۸۱
۱۲	ترمینول-۶۶	۴۰۱	۰/۱۶۷	۱۲/۵	۷/۸۲۶	۰/۰۴۸۱
حالت پرتابش (از کلکتورها استفاده شده است و حالت ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد)						
۱	ان-اکتان	۳۶۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۱/۷۱	۰/۰۰۲۷۷۵
۲	ان-اکتان	۳۶۵/۹	۲۰۰۰	۱۵/۲۱	۱۳/۳۷	۰/۰۰۳۸۱۷
۳	ان-اکتان	۵۴۹	۲۰۰۰	۱۵/۲۱	۱۱/۷۱	۰/۰۴۸۱۱
۴	ان-اکتان	۴۸۰/۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۱/۷۱	۰/۰۲۶۷۱
۵	ان-اکتان	۴۳۸/۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۱/۷۱	۰/۰۲۰۵۳
۶	ترمینول-۶۶	۶۰۰	۵۴/۰۵ <sup>a</sup>	۲۷/۸۸	۶/۳۶۱	۰/۱۲۵
۷	ترمینول-۶۶	۶۰۰	۵۴/۰۵ <sup>a</sup>	۱۲/۵	۶/۳۶۱	۰/۰۵۶۰۴
۸	ترمینول-۶۶	۴۰۱	۰/۱۶۷ <sup>a</sup>	۱۲/۵	۶/۳۶۱	۰/۰۱۲۰۴
۹	ترمینول-۶۶	۴۰۱	۰/۱۶۷ <sup>a</sup>	۱۲/۵	۶/۴۱۲	۰/۰۱۲۱۴
۱۰	ترمینول-۶۶	۶۰۰	۵۴/۰۵ <sup>a</sup>	۱۵/۳۸	۶/۳۶۱	۰/۰۶۸۹۸
۱۱	ترمینول-۶۶	۴۳۲/۳	۰/۵۶۴ <sup>a</sup>	۱۵/۳۸	۶/۳۶۱	۰/۰۲۱۱۹
۱۲	ترمینول-۶۶	۴۱۸/۱	۰/۳۳۷ <sup>a</sup>	۲۷/۸۸	۶/۳۹۵	۰/۰۳۳۳۲
۱۳	ترمینول-۶۶	۵۵۸/۱	۲۲/۰۹	۱۶/۶۷	۸/۴۷۹	۰/۰۷۹۱۶
۱۸	ترمینول-۶۶	۳۹۰/۴	۰/۱۰۵ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۱۴/۲۴	۰/۰۳۱۱۱
۱۹	ترمینول-۶۶	۳۹۰/۴	۰/۱۰۵ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۱۴/۲۴	۰/۰۳۱۱۱
۲۰	ترمینول-۶۶	۳۹۰/۴	۰/۱۰۵ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۱۴/۳	۰/۰۳۱۲۵
حالت استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی (از تانک‌های ذخیره استفاده می‌شود)						
۱	ان-اکتان	۳۶۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۵/۲۹	۰/۰۰۳۶۲۲
۲	ان-اکتان	۳۶۵/۹	۲۰۰۰	۱۵/۲۱	۱۷/۱۸	۰/۰۰۴۹۰۵
۳	ان-اکتان	۵۴۹	۲۰۰۰	۱۵/۲۱	۱۵/۲۹	۰/۰۶۲۸۱
۴	ان-اکتان	۴۸۰/۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۵/۲۹	۰/۰۳۴۸۸
۵	ان-اکتان	۴۳۸/۵	۳۵/۸	۱۵/۲۱	۱۵/۲۹	۰/۰۲۶۸
۱۴	ترمینول-۶۶	۵۵۱/۳	۱۸/۸ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۹/۲۸۹	۰/۰۸۳۳۸
۱۵	ترمینول-۶۶	۵۵۱/۳	۱۸/۸ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۹/۲۸۹	۰/۰۸۳۳۸
۱۶	ترمینول-۶۶	۵۵۱/۳	۱۸/۸ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۹/۳	۰/۰۸۳۴۸
۱۷	ترمینول-۶۶	۳۹۳/۷	۰/۱۲۸ <sup>a</sup>	۱۶/۶۷	۹/۳	۰/۰۲۷۵۸

<sup>a</sup> نرم‌افزار EES فقط فشار بخار ترمینول-۶۶ را محاسبه می‌کند

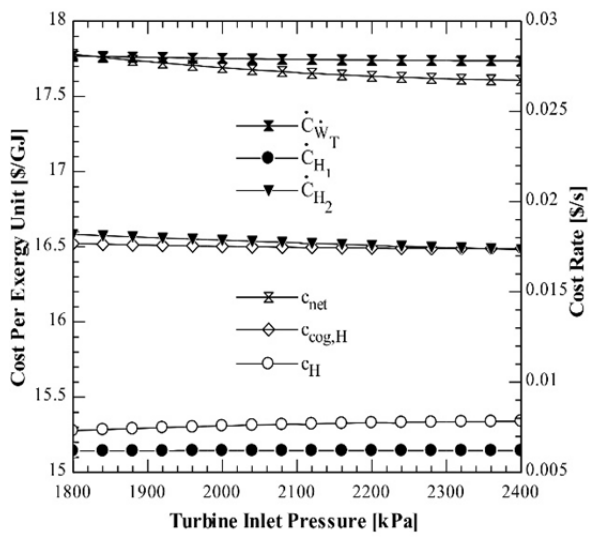


نمودار ۷) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت کم‌تابش براساس روزهای سال

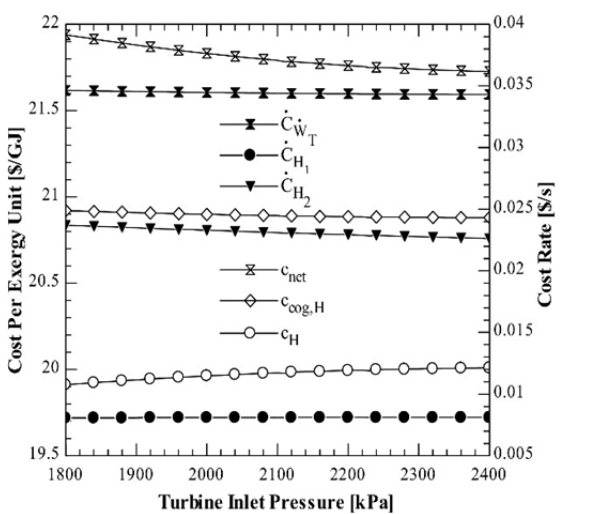




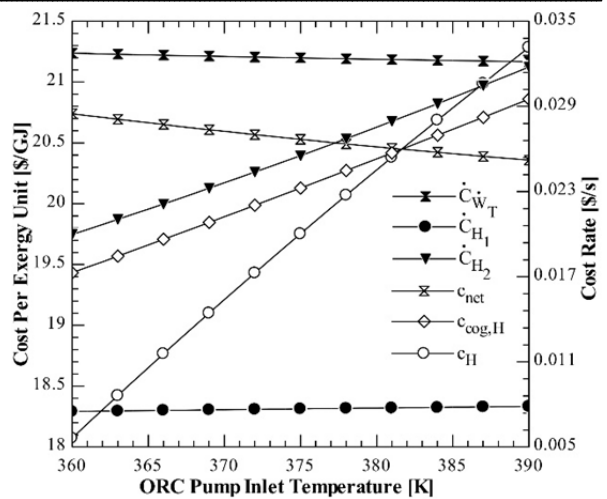
نمودار ۹) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت کم‌تابش براساس فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین



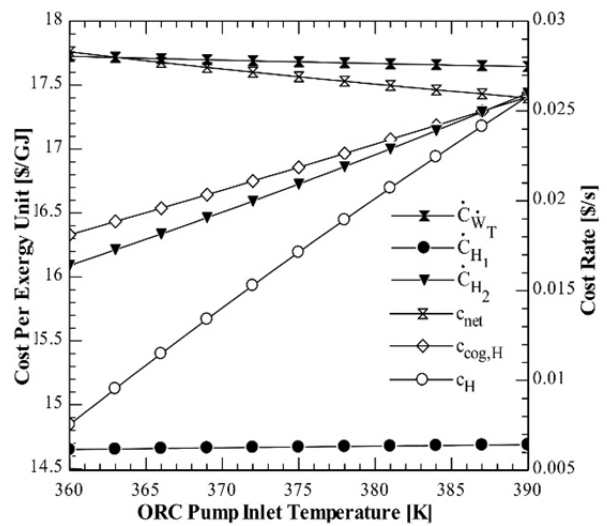
نمودار ۱۰) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت پرتابش براساس فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین



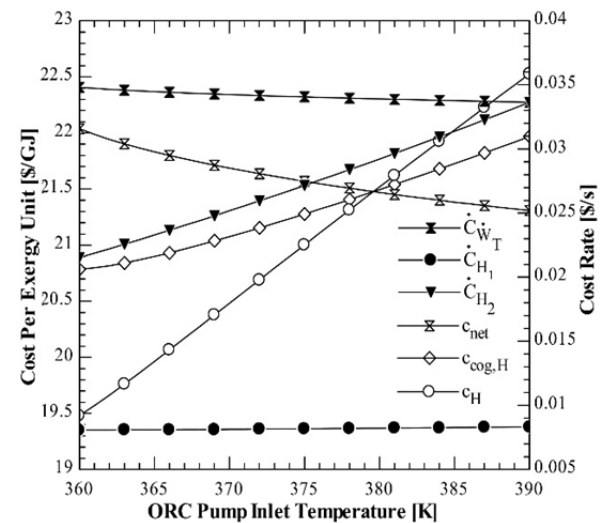
نمودار ۱۱) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت استفاده از ذخیره‌ساز انرژی براساس فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین



نمودار ۶) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت کم‌تابش براساس دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین



نمودار ۷) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت پرتابش براساس دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین



نمودار ۸) هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه در حالت استفاده از ذخیره‌ساز انرژی براساس دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین

**۵-۲-۱- نتایج تحلیل انرژی اقتصادی براساس روزهای یک سال**

در این تحلیل، دمای ورودی پمپ و فشار ورودی توربین در سیکل ارگانیک رانکین به ترتیب  $360\text{K}$  و  $200\text{kPa}$  در نظر گرفته شده است. نمودار ۲، نتایج هزینه حالت کم‌تابش خورشیدی براساس روزهای یک سال را نشان می‌دهد. به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار هزینه بر واحد انرژی تولید توان خالص خروجی در طول یک سال  $29/54\text{\$/GJ}$  و  $11/17\text{\$/GJ}$ ، برای تولید گرمایش  $28/63$  و  $7/98\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش  $29/09$  و  $9/57\text{\$/GJ}$  است. همچنین بیشترین و کمترین مقدار نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی  $0/0466$  و  $0/0176\text{\$/S}$ ، برای تولید گرمایش مرحله اول  $0/016$  و  $0/032\text{\$/S}$  و برای تولید گرمایش مرحله دوم  $0/0334$  و  $0/0093\text{\$/S}$  است. با توجه به نمودار معلوم می‌شود که در طول یک سال میلادی، هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه‌ها ابتدا حالت نزولی و سپس حالت صعودی دارند. زیرا با نزدیک شدن به میانه سال و افزایش نرخ تابش، با تعداد کلکتورهای کمتری نیاز انرژی ساختمان، برآورد و باعث کاهش هزینه‌ها می‌شود. با عبور از میانه سال و کاهش تابش‌ها نیاز به کلکتورها افزایش می‌یابد که باعث افزایش هزینه‌ها خواهد شد.

نمودار ۳ نشانگر نتایج هزینه حالت پرتابش خورشیدی بر حسب روزهای یک سال میلادی است. در این حالت، بیشترین و کمترین مقدار هزینه بر واحد انرژی تولید توان خالص خروجی  $24/64$  و  $10/02\text{\$/GJ}$ ، برای تولید گرمایش  $23/12$  و  $6/69\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش  $23/88$  و  $8/36\text{\$/GJ}$  تعیین شده است. همچنین بیشترین و کمترین مقدار نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی  $0/0389$  و  $0/0158\text{\$/S}$ ، برای تولید گرمایش مرحله اول  $0/0094$  و  $0/027\text{\$/S}$  و برای تولید گرمایش مرحله دوم  $0/0269$  و  $0/0078\text{\$/S}$  به دست آمده و توضیح نمودار ۲ در مورد رفتار این نمودار نیز صادق است.

نمودار ۴، گویای نتایج هزینه حالت استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی بر حسب روزهای یک سال میلادی است. در این حالت بیشترین و کمترین مقدار هزینه بر واحد انرژی تولید توان خالص خروجی  $29/87$  و  $13/43\text{\$/GJ}$ ، برای تولید گرمایش  $28/91$  و  $10/52\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش  $29/38$  و  $11/98\text{\$/GJ}$  محاسبه شده است. همچنین بیشترین و کمترین مقدار نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی  $0/0471$  و  $0/0212\text{\$/S}$ ، برای تولید گرمایش مرحله اول  $0/0118$  و  $0/0043\text{\$/S}$  و برای تولید گرمایش مرحله دوم  $0/0353$  و  $0/0233\text{\$/S}$  محاسبه شده است. این نمودار نیز از توضیحات نمودار ۲ پیروی می‌کند.

مقایسه هزینه بر واحد انرژی براساس روزهای سال در نمودار ۵ مشاهده می‌شود. مطابق با این نمودار، هزینه بر واحد انرژی در حالت پرتابش کمترین و حالت استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی بیشترین هزینه بر واحد انرژی را دارند. زیرا در حالت پرتابش، تابش زیادی توسط کلکتورها جذب می‌شود که باعث کاهش هزینه‌ها خواهد شد. از طرفی چون فرآیند ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از دستگاه‌های مختلف صورت می‌گیرد، بنابراین حالت استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی با هزینه‌های بالایی مواجه می‌شود.

**۵-۲-۲- نتایج تحلیل انرژی اقتصادی براساس دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین**

در این تحلیل دامنه تغییرات دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین بین  $360\text{K}$ – $390\text{K}$  است. نتایج در روز ۱۴۵ یک سال میلادی و در فشار  $200\text{kPa}$  برای ورودی توربین ارگانیک رانکین گزارش

می‌شوند.

نمودار ۶ معرف نتایج هزینه در حالت کم‌تابش خورشیدی بر حسب دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین است. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که در بازه دمایی ورودی پمپ ارگانیک رانکین، هزینه بر واحد انرژی برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $20/5\text{\$/GJ}$ ، برای گرمایش در حدود  $19/5\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش در حدود  $20/1\text{\$/GJ}$  است. از یک طرف نیز نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $0/0324\text{\$/S}$ ، برای گرمایش مرحله اول در حدود  $0/0076\text{\$/S}$  و برای گرمایش مرحله دوم در حدود  $0/025\text{\$/S}$  به دست آمده است. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که با افزایش دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه توان خالص خروجی کاهش و هزینه بر واحد انرژی گرمایش و تولید همزمان گرمایش و نرخ هزینه گرمایش مراحل اول و دوم افزایش می‌یابد. افزایش دمای ذکر شده باعث کاهش میزان انرژی ناپودی پمپ ارگانیک رانکین می‌شود که سبب کاهش هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه توان ورودی آن می‌شود. در تحلیل انرژی اقتصادی، این دو پارامتر به ترتیب برابر با هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه توان خالص خروجی هستند که در نهایت منجر به کاهش آنها می‌شود.

نتایج هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه‌های مورد بررسی در حالت پرتابش خورشیدی بر حسب دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین در نمودار ۷ به تصویر کشیده شده است. در دامنه تغییرات دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین، هزینه بر واحد انرژی برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $17/5\text{\$/GJ}$ ، برای گرمایش در حدود  $19\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش در حدود  $19/8\text{\$/GJ}$  در نوسان است. همچنین نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $0/0278\text{\$/S}$ ، برای گرمایش مرحله اول در حدود  $0/0062\text{\$/S}$  و برای گرمایش مرحله دوم در حدود  $0/021\text{\$/S}$  برآورد شده و دلایل رفتار این نمودار نیز مانند توضیحات نمودار ۶ است.

در نمودار ۸، بر حسب دمای ورودی پمپ ارگانیک رانکین در بازه تغییرات دمایی مد نظر، نتایج هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه‌های ذکر شده در حالت استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی رسم شده است. هزینه بر واحد انرژی برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $21/5\text{\$/GJ}$ ، برای گرمایش در حدود  $21/8\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش در حدود  $22/1\text{\$/GJ}$  ارزیابی شده است. همچنین نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $0/0343\text{\$/S}$ ، برای گرمایش مرحله اول در حدود  $0/0082\text{\$/S}$  و برای گرمایش مرحله دوم در حدود  $0/027\text{\$/S}$  محاسبه شده و این نمودار نیز از توضیحات نمودار ۶ برخوردار است.

**۵-۲-۳- نتایج تحلیل انرژی اقتصادی براساس فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین**

در این بررسی بازه تغییرات فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین بین  $1800\text{KPa}$ – $2400\text{KPa}$  انتخاب شده است. نتایج در روز ۱۴۵ یک سال میلادی و در دمای  $365\text{K}$  برای ورودی پمپ ارگانیک رانکین ارائه می‌شوند.

نتایج هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه‌های مختلف مطالعه شده بر حسب فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین در حالت کم‌تابش خورشیدی در نمودار ۹ به تصویر کشیده شده است. با در نظر گرفتن بازه تغییرات فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین، هزینه بر واحد انرژی برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $20/7\text{\$/GJ}$ ، برای گرمایش در حدود  $18/6\text{\$/GJ}$  و برای تولید همزمان گرمایش در حدود  $19/6\text{\$/GJ}$  به دست آمده است. از طرفی نیز نرخ هزینه برای

ارگانیک رانکین در نمودار ۱۱ ترسیم شده است. با توجه به آن، هزینه بر واحد انرژی برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $21/7 \$/GJ$ ، برای گرمایش در حدود  $20 \$/GJ$  و برای تولید همزمان گرمایش در حدود  $20/8 \$/GJ$  قابل بیان است. همچنین نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $0/344 \$/S$ ، گرمایش مرحله اول در حدود  $0/0081 \$/S$  و گرمایش مرحله دوم در حدود  $0/225 \$/S$  محاسبه شده و این نمودار نیز از توضیحات نمودار ۹ پیروی می‌کند.

**۵-۲-۴- نتایج تحلیل انرژی اقتصادی دستگاه‌های مختلف سیستم**

در جدول ۷ تحلیل انرژی از دیدگاه نرخ انرژی نابودی، بازده انرژی و نسبت انرژی هر دستگاه به‌همراه تحلیل هزینه‌ها از دیدگاه هزینه بر واحد انرژی در ورود و خروج دستگاه‌ها، نرخ هزینه انرژی نابودی، نرخ هزینه، فاکتور انرژی اقتصادی و اختلاف هزینه نسبی دستگاه‌های مختلف گزارش شده است. این گزارش‌ها در سه حالت تابش خورشیدی ارائه شده‌اند. بیشترین مقدار نرخ انرژی نابودی، در کلکتورها و بعد از آن در اواپراتورهای سیکل ارگانیک رانکین اتفاق می‌افتد. همچنین بیشترین نرخ هزینه را نیز کلکتورها دارند. بنابراین انتخاب صحیح از نظر تعداد و کیفیت ساخت کلکتورها تاثیر زیادی بر هزینه‌های استقرار و بهره‌برداری این سیستم دارد.

تولید توان خالص خروجی در حدود  $0/0326 \$/S$ ، برای گرمایش مرحله اول در حدود  $0/0075 \$/S$  و برای گرمایش مرحله دوم در حدود  $0/0215 \$/S$  نتیجه گرفته شده است. از نمودار ترسیم شده می‌توان دریافت که با افزایش این فشار، هزینه بر واحد انرژی‌های بررسی شده به‌همراه نرخ هزینه تولید توان خالص خروجی کاهش و نرخ هزینه گرمایش مراحل اول و دوم افزایش می‌یابند. از آنجایی که افزایش فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین موجب کاهش انرژی نابودی آن می‌شود، در نتیجه کاهش هزینه‌های مربوط به توان خالص خروجی اتفاق خواهد افتاد.

نمودار ۱۰، نتایج حاصل از تحلیل‌های هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه‌های مطالعه شده را بر حسب فشار ورودی توربین ارگانیک رانکین در حالت پرتابش خورشیدی نشان می‌دهد. براساس این پارامتر، هزینه بر واحد انرژی برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $17/7 \$/GJ$ ، برای گرمایش در حدود  $15/3 \$/GJ$  و برای تولید همزمان گرمایش در حدود  $16/5 \$/GJ$  نوسان می‌کند. همچنین نرخ هزینه برای تولید توان خالص خروجی در حدود  $0/028 \$/S$ ، برای گرمایش مرحله اول در حدود  $0/0062 \$/S$  و برای گرمایش مرحله دوم در حدود  $0/0177 \$/S$  ارزیابی شده است. توضیحات نمودار ۹ در مورد رفتار این نمودار نیز قابل بیان است.

نتایج هزینه بر واحد انرژی و نرخ هزینه‌های مورد بررسی در حالت استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی بر حسب فشار ورودی توربین

**جدول ۷) نتایج تحلیل انرژی و انرژی اقتصادی دستگاه‌های مختلف سیستم در روز ۱۴۵ام یک سال**

دستگاه	$EX_D$ (kW)	$\eta_{ex}$ (%)	$\gamma$ (%)	$C_F$ ( $\$/GJ$ )	$C_p$ ( $\$/GJ$ )	$C_D$ ( $\$/S$ )	$Z_k$ ( $\$/S$ )	$r_k$ (%)	$f_k$ (%)
<b>حالت کم‌تابش (از کلکتورها استفاده شده است و حالت ذخیره‌سازی انرژی وجود ندارد.)</b>									
پمپ	9/46	83/7	0/13	15/54	16/11	0/001471	0/0001539	3/7	9/5
توربین	247/7	86/44	3/28	14/28	16/89	0/003539	0/006537	18/3	64/9
اواپراتور - b	2063	55/26	27/31	8/04	12/23	0/01658	0/002967	52/2	1/8
مبدل گرمایی اول	371/4	29/63	4/92	14/28	16/95	0/005306	0/0001838	18/7	0/35
مبدل گرمایی دوم	114/4	92/45	1/51	14/28	15/34	0/001634	0/001024	7/4	5/9
تانک ذخیره سرد	260/2	73/68	3/44	11/08	16/67	0/002884	0/0034	5/4	54/1
تانک ذخیره گرم	120/1	96/114	1/59	10/18	11/07	0/001223	0/003899	8/7	76/1
کلکتورهای سهموی	4367	34/55	57/82	7/83	7/78	0/03418	0/05368	0/7-	61/1
<b>حالت پرتابش (از کلکتورها استفاده شده است و حالت ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد.)</b>									
پمپ	9/46	83/7	0/0779	12/89	13/37	0/00122	0/0001539	3/7	11/2
توربین	247/7	86/44	2/04	11/71	14/16	0/002902	0/006537	20/9	69/3
اواپراتور - b	2063	55/26	6/581	6/581	10/02	0/01358	0/002967	52/3	2/1
مبدل گرمایی اول	371/4	29/63	3/059	11/71	13/9	0/004351	0/0001838	18/7	0/4
مبدل گرمایی دوم	114/4	92/45	0/9421	11/71	12/59	0/00134	0/001024	7/5	7/1
مبدل گرمایی ذخیره‌ساز	361/2	95/19	2/974	7/693	7/922	0/002778	0/001178	3	4/1
تانک ذخیره سرد	260/2	96/114	2/143	9/3	14/24	0/00242	0/0034	53/1	58/4
تانک ذخیره گرم	120/1	73/68	0/9893	8/479	9/289	0/001019	0/003899	9/6	79/3
کلکتورهای سهموی	8595	35/9	70/79	6/395	6/361	0/05497	0/09169	0/5-	62/5
<b>حالت پرتابش (از کلکتورها استفاده شده است و حالت ذخیره‌سازی انرژی وجود دارد.)</b>									
پمپ	9/46	83/7	0/51	16/58	17/18	0/001569	0/0001539	3/6	8/9
توربین	247/7	86/44	13/37	15/29	17/97	0/003788	0/006537	17/5	63/3
اواپراتور - a	229/4	63/59	39/37	9/54	12/78	0/006961	0/002009	33/9	22/4
مبدل گرمایی اول	371/4	29/63	20/05	15/29	18/15	0/00568	0/0001838	18/7	0/3
مبدل گرمایی دوم	114/4	92/45	6/18	15/29	16/42	0/001749	0/001024	7/4	5/5
تانک ذخیره سرد	260/2	73/68	14/04	9/3	14/24	0/00242	0/0034	53/1	58/4
تانک ذخیره گرم	120/1	96/114	6/48	8/48	9/29	0/001019	0/003899	9/6	79/3

- سیستم مورد نظر، تامین  $1253/2 kW$  بار گرمایی و  $150 kW$  توان الکتریکی مورد نیاز ساختمان را انجام می‌دهد.
- افزایش شار تابش خورشیدی جذب شده توسط کلکتورها باعث

**۶- نتیجه‌گیری**

در این قسمت با توجه به محاسبات، نتیجه‌گیری‌های مختلف تحلیل مساله در قالب موارد زیر مطرح می‌شود:

ضریب جذب دریافت‌کننده	$\alpha$
ضریب عبور	$\varepsilon$
بازده (%)	$\eta$
فاکتور رهگیری	$\gamma$
ثابت استفان بولتزمن ( $\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-4}$ )	$\sigma$
ضریب بازتابش	$\rho$
ضریب عبور	$\tau$
<b>زیرنویس‌ها</b>	
حالت محیط	0
شیمیایی	ch
زمان شارژ تانک ذخیره گرم	chst
تولید همزمان	cog
تانک ذخیره سرد	cst
زمان دشارژ تانک ذخیره گرم	dhst
شیر انبساط	EV
اوپراتور	eva
اگرزری	ex
ژنراتور	g
تولیدی	gen
مرحله گرمایش	hp
گرمایش	H
آب گرم مصرفی	h,c
تانک ذخیره گرم	hst
مبدل گرمایی	HX
موتور	m
پمپ ارگانیک رانکین	op
توربین ارگانیک رانکین	oT
فیزیکی	ph
حالت کم‌تابش خورشیدی	sol
حالت پرتابش خورشیدی	solst
حالت استفاده از تانک‌های ذخیره	st
پمپ خورشیدی	sol,p
پمپ ذخیره	st,p
کل	tot
مفید	u

کاهش هزینه‌ها می‌شود، به طوری که اختلاف بیشترین و کمترین مقدار هزینه بر واحد اگرزری در طول سال بیش از دوبرابر است.  
۳- هزینه بر واحد اگرزری و نرخ هزینه‌ها در حالت پرتابش خورشیدی کمترین مقادیر را دارند. پرهزینه‌ترین حالت نیز استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی است.

۴- افزایش دمای ورودی پمپ و فشار ورودی توربین در سیکل ارگانیک رانکین باعث کاهش هزینه بر واحد اگرزری و نرخ هزینه تولید توان خالص خروجی می‌شود. با افزایش دمای پمپ از ۳۶۰ تا ۳۹۰K، این هزینه بر واحد اگرزری در حدود ۱\$/GJ و با افزایش فشار توربین از ۱۸۰۰ تا ۲۴۰۰kPa، این هزینه بر واحد اگرزری در حدود ۰/۵\$/GJ کاهش می‌یابد.

۵- هزینه بر واحد اگرزری تولید همزمان گرمایش برای حالت‌های پرتابش، کم‌تابش و استفاده از قسمت ذخیره‌ساز انرژی به ترتیب برابر با ۱۹، ۱۶ و ۲۰\$/GJ محاسبه شده است. این مقادیر برای روز ۱۴۵ سال به‌عنوان یک روز سرد ارائه شده است.

۶- بیشترین مقدار اگرزری نابودی سیستم، در کلکتورهای سهموی و بعد از آن در اوپراتورهای سیکل ارگانیک رانکین روی می‌دهد.

#### تشکر و قدردانی: موردی گزارش نشد.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تاکنون در مجله دیگری (به طور کامل یا بخشی از آن) به چاپ نرسیده است. همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. ضمناً محتویات علمی مقاله حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج برعهده تمام نویسندگان می‌باشد.

**تعارض منافع:** این مقاله در تعارض با منافع هیچ شخصیت حقیقی و حقوقی و هیچ سازمانی نیست.

**سهم نویسندگان:** مقصود عبداللهی حقی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۶۰٪)؛ سیدمهدی پسته‌ای (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)؛ عطا چیت‌سازخویی (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۲۰٪)

**منابع مالی:** منابع مالی خاصی برای انجام این تحقیق استفاده نشده است.

#### منابع

- Haghighi MA, Pesteei SM. Energy and exergy analysis of flat plate solar collector for three working fluids, under the same conditions. *Progress in Solar Energy and Engineering Systems*. 2017;1(1):1-9.
- Kalogirou SA. *Solar energy engineering: Processes and systems*. 2<sup>nd</sup> Edition. California: Academic Press; 2013. pp. 52-212.
- Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. 4<sup>th</sup> Edition. Hoboken: John Wiley & Sons; 2013. pp. 20-370.
- Kalogirou SA. *Solar thermal collectors and applications*. *Progress in Energy And Combustion Science*. 2004;30(3):231-395.
- Price H, Lufert E, Kearney D, Zarza E, Cohen G, Gee R, et al. Advances in parabolic trough solar power technology. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2002;124(2):109-125.
- Besarati SM, Padilla RV, Goswami DY, Stefanakos E. The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants. *Renewable Energy*. 2013;53:193-199.
- Haghighparast Kashani A, Saleh Izadkhash P, Asnaghi A. Mapping of solar energy potential and solar system capacity in Iran. *International Journal of Sustainable Energy*. 2014;33(4):883-903.
- BahadoriNejad M, Mir Hosseini SA. Clearness index for different cities of Iran. *Proceedings of the 3th Conference on Conservation in Building, The organ of Optimization of fuel consumption in Iran, Tehran, Iran*. Tehran: Civilica; 2003. [Persian]
- Marefati M, Mehrpooya M, Behshad Shafii M. *Optical*

#### ۷- پی‌نوشت

شرح	علامه اختصاری
مساحت ( $\text{m}^2$ )	A
هزینه بر واحد اگرزری ( $\text{\$ GJ}^{-1}$ )	c
نرخ هزینه ( $\text{\$ s}^{-1}$ )	$\dot{C}$
عامل بازبازی سرمایه	CRF
نرخ اگرزری نابودی (kW)	$EX_D$
ضریب تلفات حرارتی کلکتور	$F_R$
فاکتور اگرزری اقتصادی (%)	$f_k$
نرخ تابش پرتویی ( $\text{W m}^{-2}$ )	$G_b$
نرخ بهره (%)	$i_r$
نرخ جریان جرمی ( $\text{kg s}^{-1}$ )	$\dot{m}$
عدد ناسلت	Nus
سیکل ارگانیک رانکین	ORC
فشار (kPa)	P
کلکتورهای خورشیدی سهموی	PTSC
نرخ حرارت (kW)	$\dot{Q}$
اختلاف هزینه نسبی (%)	$r_k$
دما (K)	T
ضریب کلی انتقال حرارت ( $\text{kW m}^{-2} \text{K}^{-1}$ )	U
توان (kW)	$\dot{W}$
نسبت اگرزری (%)	y
نرخ هزینه دستگاه‌ها ( $\text{\$ s}^{-1}$ )	Z



temperature applications: Energy, exergy and economic analyses. *Energy Conversion and Management*. 2017;151:681-692.

16- Desai NB, Bandyopadhyay S. Thermo-economic analysis and selection of working fluid for solar organic Rankine cycle. *Applied Thermal Engineering*. 2016;95:471-481.

17- Baghernejad A, Yaghoubi M. Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*. 2011;52(5):2193-2203.

18- Calise F, d'Accadia MD, Macaluso A, Piacentino A, Vanoli L. Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water. *Energy Conversion and Management*. 2016;115:200-220.

19- Tabatabaee M. Calculation of building's installation. Tehran: Roozbehan; 2003. pp. 51-109. [Persian]

20- Elsafi AM. Exergy and exergoeconomic analysis of sustainable direct steam generation solar power plants. *Energy conversion and Management*. 2015;103:338-347.

21- Cavalcanti EJC. Exergoeconomic and exergoenvironmental analyses of an integrated solar combined cycle system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;67:507-519.

22- Akrami E, Chitsaz A, Nami H, Mahmoudi SMS. Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy. *Energy*. 2017;124:625-639.

and thermal analysis of a parabolic trough solar collector for production of thermal energy in different climates in Iran with comparison between the conventional nanofluids. *Journal of Cleaner Production*. 2018;175:294-313.

10- Eisavi B, Khalilarya Sh, Chitsaz A, Rosen MA. Thermodynamic analysis of a novel combined cooling, heating and power system driven by solar energy. *Applied Thermal Engineering*. 2018;129:1219-1229.

11- Al-Sulaiman FA, Hamdullahpur F, Dincer I. Performance assessment of a novel system using parabolic trough solar collectors for combined cooling, heating, and power production. *Renewable Energy*. 2012;48:161-172.

12- Al-Sulaiman FA, Hamdullahpur F, Dincer I, Hamdullahpur F. Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system. *Solar Energy*. 2011;85(9):2228-2243.

13- Al-Sulaiman FA, Dincer I, Hamdullahpur F. Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part I- Formulations. *Energy Conversion and Management*. 2013;69:199-208.

14- Al-Sulaiman FA, Dincer I, Hamdullahpur F. Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part II- Applications. *Energy conversion and management*. 2013;69:209-216.

15- Zare V, Moalemian A. Parabolic trough solar collectors integrated with a Kalina cycle for high