نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۷، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۹

Journal Of Energy Conversion
Volume: 7, Issue: 3, 1399

تحلیل اگزرژی و اقتصادی و بهینه‌سازی یک سیستم تولید چندگانه انرژی بر مبنای انرژی خورشیدی، باد و انرژی حرارتی اقیانوسی برای تولید برق پاک

علی دژدار[۱]، احسان‌اله عصاره[۲*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه ازاد اسلامی، دزفول، ایران، Ali.dezhdar@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه ازاد اسلامی، دزفول، ایران، assareh@iaud.ac.ir

دریافت: خرداد ۹۹، بازنگری: آبان ۹۹، پذیرش: آذر ۹۹

چکیده

در پژوهش حاضر به بررسی یک سیستم تولید انرژی با استفاده از سه نوع انرژی تجدپذیر خورشیدی، بادی و انرژی حرارتی اقیانوسی با شرایط اقلیمی و نزدیک به مناطقی با پتانسیل بالا برای سیستم OTEC، دارای شرایط مناسب از نظر سرعت باد و تابش خورشیدی به عنوان منابع تامین انرژی، اقدام کردیم. سیستم پیشنهادی بر اساس کل مصرف روزانه برق مورد نیاز یک مجتمع خدمات رفاهی ساحلی طراحی و بررسی می‌شود. اجزا اصلی سیستم متشکل از یک سیکل ارگانیک رانکین، توربین، ترموالکتریک، پمپ، مبدل حرارتی، توربین بادی و یک کلکتور خورشیدی صفحه تخت است. برای مدلسازی سیستم و به‌دست آوردن نتایج ترمودینامیکی از نرم‌افزار EES به عنوان یک ابزار مهندسی بهره برده شده است. سیستم طراحی شده برای یک منطقه که دارای انرژی حرارتی اقیانوسی، انرژی باد و خورشید مناسبی بوده مورد استفاده قرار گرفته است. از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار و کاربردی در این بررسی‌ها، باید به میزان سرعت باد، مقدار تابش خورشید و مساحت کلکتور اشاره کرد. در نهایت به‌منظور بهینه سازی سیستم طراحی شده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب یا همان الگوریتم NSGA-II، برای یافتن بهترین توابع هدف و رسم نمودار پارتو استفاده شده است. متغییرهای طراحی که برای بهینه‌سازی استفاده شدند، شامل مساحت سیستم خورشیدی (Ap)، دمای خروجی از سیستم خورشیدی (T1)، دمای ورودی به توربین (T3)، پینچ پوینت اواپراتور (PPeva)، پارامتر ترموالکتریک(Z_T_M)، بازده پمپ و بازده توربین بودند. دو تابع هدف این بهینه‌سازی اگزرژی و نرخ هزینه سیستم عنوان شد. در نهایت بهینه‌ترین مقدار بازده اگزرژی ۱۴,۴۷ درصد و نرخ هزینه (\$/h) ۷۴,۹۷ به‌دست آمد. سیستم‌های معرفی شده با توجه به نتایج حاصل شده برای کاربردهای مورد نیاز مناسب می باشند.

* **عهده‌دار مکاتبات:** assareh@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی حرارتی اقیانوسی، اگزرژی، نرخ هزینه.

۱- مقدمه

امروزه بیش از هر زمان دیگری، توسعه مقرون به‌صرفه، قابل اعتماد، پایدار و امن سیستم‌های تولید توان به‌دلیل این که تقاضای انرژی جهانی به‌طور پیوسته با رشد جمعیت و افزایش استانداردهای زندگی افزایش می‌یابد، اهمیت فراوانی پیدا کرده است. وجود منابع تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی، انرژی بادی و انرژی حرارتی اقیانوسی علت توجه و وابستگی محققان و پژوهشگران به توسعه این منابع و استفاده از آن‌ها شده است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر و پاک به جای انرژی حاصل از سوخت های فسیلی در عصر حاضر یک امر حیاتی است و سیستم‌های انرژی کارآمدتر و استفاده موثرتر از منابع تجدیدپذیر، برای پایداری سیستم‌های انرژی در آینده مورد نیازاست. از سوی دیگر با توجه به افزایش روز افزون استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌ها و سیکل‌های ترکیبی، تحقیقات در مورد عوامل و شرایط حاکم بر سیستم‌ها جهت افزایش راندمان و به طبع آن، بهینه‌سازی آن‌ها یک امر ضروری است.

خسروی و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۹، یک چرخه تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی دارای سیستم فتولتائیک را به‌منظور تولید هیدروژن و انرژی الکتریکی به لحاظ اقتصادی و ترمودینامیکی ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای مبرد R717 به عنوان سیال ارگانیک استفاده شده در سیکل رانکین، بیشترین تولید برق خالص با مقدار ۲۰,۳۶۲۲KW/m به‌دست می‌آید. همچنین بازده کل انرژی نیروگاه هیبریدی تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی تقریبا ۳,۳۱۸ درصد است.

ونگ و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۸، به بررسی بهینه‌سازی چندمنظوره و ارزیابی عملکرد یک نیروگاه تولید تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی مبنی بر سیکل رانکین ارگانیک پرداختند. آن‌ها از سیال‌های عامل R717، R152a، R134a، R227ea، R600، و R601 در نیروگاه استفاده کردند. بهترین بازده اگزرژی در میان سیال‌های پیشنهادی دارای R601 با ۲۸,۱۷ درصد است. حسن و همکاران [۳] در سال ۲۰۲۰، بر روی یک سیستم تجدیدپذیر جدید مبتنی بر انرژی حرارتی اقیانوس برای خنک‌سازی، تولید آمونیاک و تولید انرژی برق کار کردند. لیو و همکاران [۴] در سال ۲۰۲۰، یک بررسی مروری بر روی تحقیقات گذشته در مورد سیکل‌های بسته ترمودینامیکی تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس‌ها شامل شرح سیکل‌های ترمودینامیکی که با سیال خالص یا با سیال مخلوط کار می‌کنند و اثرات سیالات مختلف بر روی راندمان سیکل، کار کردند. نتایج نشان داد به‌طور کلی، بهره‌وری ترمودینامیکی را می‌توان با انتخاب سیال کاری مناسب و اقداماتی که می‌تواند میزان استفاده از انرژی گرمایی اقیانوس‌ها را افزایش دهد، بهبود بخشید.

قریشی و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۰، به تجزیه و تحلیل انرژی و اگزرژی یک سیستم جدید مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر خورشیدی برای تولید هیدروژن پرداختند. نتایج نشان داد که سیستم پیشنهادی به‌ترتیب داری ۲۵,۰۷ درصد راندمان انرژی و ۳۱,۰۱ درصد راندمان اگزرژی است. میزان تخریب اگزرژی و تولید آنتروپی در گیرنده خورشیدی به ترتیب بیشترین ۱۱۵,۸۶ مگاوات و ۳۸۸,۸۰ کیلووات بر کیلوگرم است. بیشترین بازده انرژی و اگزرژی در ۱۰۰۰ مگاوات از میزان گرمای ورودی گیرنده خورشیدی به ترتیب ۳۳,۵۳ دردصد و ۴۱,۴۹ درصد به‌دست آمد. علاوه بر این، بیشترین میزان انتقال حرارت در گیرنده

ایشاک و دینسر [۶] در سال ۲۰۲۰، به مقایسه و ارزیابی بین سیستم‌های تجدیدپذیر مبتنی بر انرژی حرارتی اقیانوسی، انرژی خورشیدی و انرژی باد و با یک سیکل ترموشیمیایی مبتنی بر Cu-Cl در سیستم‌ها برای تولید هیدروژن پرداختند. این مطالعه نشان داد که برای تولید هیدروژن توسط سیستم تجدیدپذیر OTEC و پیاده‌سازی آن برای کاربردهای عملی، بهتر جوابگو است. محرمیان [۷] در سال ۲۰۱۹، به تحلیل ترمودینامیکی یک سیکل خورشیدی ترکیبی با انرژی زیست توده برای تولید هیدروژن پرداخت. این سیستم از یک الکترولیزگر برای تولید هیدروژن، واحد انرژی خورشیدی یعنی سیستم حرارتی فتوولتائیک (PV/T)، واحد تبدیل گاز، سیکل رانکین و توربین گازی تشکیل شد. نتایج نشان داد که با افزایش فشار کمپرسور و میزان دبی CO2، میزان تخریب اکسررژی سیستم و نرخ هزینه افزایش می‌یابد و باعث کاهش راندمان اگزرژی می‌دهد.

رزمی و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۹، به بررسی یک سیستم CCHP کارآمد و سازگار با محیط‌زیست براساس براساس متشکل از سیستم ذخیره ساز هوای فشرده[1]، سیکل رانکین ارگانیک و چرخه تبرید تراکمی بخار پرداخت. شرط اساسی سود آوری سیستم هیبرید برخوردار از سیستم CAES، به‌کارگیری استراتژی مناسب برای خرید و فروش انرژی در سیستم CAES است.

علی رحمی و عصاره [۹] در سال ۲۰۲۰، به تحلیل انرژی، اگزرژی و اقتصادی و بهینه‌سازی چند هدفه یک سیستم انرژی چندگانه شامل تولید هیدروژن، آب شیرین، سرمایش، گرمایش و آب گرم و همچنین تولید انرژی برق برای شهرستان دزفول

[1] CAES

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

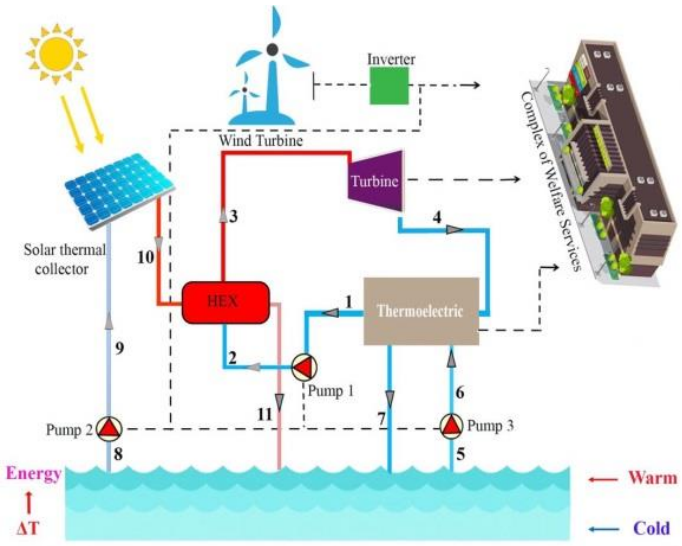
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

پرداختند. دو تابع هدف این پژوهش اگزرژی و هزینه کل معرفی شد که بهینه‌سازی آن با الگوریتم ژنتیک (NSGA-II) انجام شد. وو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۰، یک بهینه‌سازی ترمودینامیکی بر روی سیستم تبدیل انرژی حرارتی اقیانوسی با یک سیکل ارگانیک رانکین فشار دوگانه، برای استفاده بهتر از انرژی گرمایی اقیانوس‌ها انجام دادند. نتایج نشان داد که توان خالص خروجی پس از بهینه‌سازی ترمودینامیکی بهبود یافته است. ژو و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۰، به تحلیل انرژی، و شرایط اقتصادی از یک خنک کننده ترکیبی، نمک‌زدایی و سیستم قدرت پرداختند. در این پژوهش، یک سیستم ترکیبی جدید OTEC با ترکیب خنک کننده، نمک زدایی و نیرو (CCDP) ارائه شد. تولید همزمان ظرفیت خنک سازی، آب شیرین و انرژی توسط زیر سیستم های چرخه تبرید اجکتور (ERC)، به‌دست آمد. نتایج نشان داد که بالاترین نسبت صرفه جویی در انرژی اولیه (PESR) و کارایی اگزرژی سیستم پیشنهادی به ترتیب تا ۳۳,۷۲ درصد و ۲۹,۳۳ درصد است.

در این پژوهش یک سیستم تجدیدپذیر با استفاده از انرژی خورشیدی و انرژی بادی برای منطقه‌ای با شرایط اقلیمی و نزدیک به مناطقی با پتانسیل بالا برای سیستم OTEC مورد بررسی قرار گرفت. سیستم پیشنهادی بر اساس کل مصرف روزانه برق مورد نیاز یک مجتمع خدمات رفاهی ساحلی طراحی و بررسی می‌شود. این سیستم از ترکیب زیر سیستم‌هایی شامل کلکتور خورشیدی صفحه تخت، سیستم تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس، توربین بادی، سیکل رانکین و استفاده از ترموالکتریک تشکیل شد. در این پژوهش از مبرد R227ea به‌عنوان سیال ارگانیک در سیکل رانکین ارگانیک و از سیال آب برای سیستم حرارتی اقیانوسی OTEC استفاده می‌شود. برای مدلسازی سیستم و به‌دست آوردن نتایج ترمودینامیکی از نرم‌افزار EES به عنوان یک ابزار مهندسی بهره برده می‌شود. در نهایت به‌منظور بهینه‌سازی سیستم طراحی شده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب یا همان الگوریتم NSGA-II برای یافتن بهترین توابع هدف و استخراج نمودار پارتو به‌منظور تعیین بهترین مقادیر برای توابع هدف این پژوهش استفاده می‌شود.

۲- سیستم مورد بررسی

سیستم مورد بررسی در این پژوهش، از ترکیب زیر سیستم‌هایی شامل کلکتور خورشیدی صفحه تخت، سیستم تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس، توربین بادی، سیکل رانکین و استفاده از ترموالکتریک تشکیل می‌شود که در شکل ۱ نشان داده شده است. در این پژوهش نرم‌افزار شبیه‌سازی حل کننده‌ی معادلات مهندسی (EES) برای مدل کردن و تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم هیبریدی استفاده می‌شود. سیالات مورد استفاده در این سیستم شامل آب و مبرد R227ea برای سیکل ارگانیک رانکین هستند.



شکل ۱: سیستم مورد بررسی کار حاضر

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

۳- مدلسازی معادلات حاکم در نرم‌افزار EES

در این پژوهش با توجه به ویژگی‌های سیستم ترکیبی کلکتور صفحه تخت برای سیستم انتخاب می‌شود. مقدار گرمای حاصل از سیال کاری را می‌توان به‌صورت رابطه زیر بیان نمود:

$$\dot{Q}_u = \dot{m} C_p \left(T_{10} - T_9\right) \quad (۱)$$

که در آن T_{10} دمای خروجی آب در نقطه ۱۰، T_9 دمای ورودی آب در نقطه ۹، C_p گرمای ویژه در فشار ثابت و $\dot{m}$ نرخ دبی جرمی کولکتور است. حرارت حاصل از کلکتور صفحه‌ای مسطح با در نظر گرفتن افت حرارت حاصل از کلکتور با استفاده از معادله هاتلولیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$\dot{Q}_u = A_P F_R[(\tau\alpha) I - \mathrm{Q}_L) \quad (۲)$$

در اینجا FR عامل دفع حرارت است.

در اینجا F_1 عامل راندمان کلکتور است که در این حالت تقریبا برابر با ۰,۹۱۴ است و U_l ضریب افت کلی کلکتور است که از مرجع [۱۲] به‌دست می‌آید. در معادله ۲ عبارت τα راندمان بصری است و I شدت تابش خورشیدی است. مقدار Q_L در معادله ۲، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_L = U_l \left(T_{in} - T_\circ\right) \quad (۳)$$

$T_\circ$ دمای محیط است.

ترموالکتریک، نوعی موتور گرمایی فاقد قطعات متحرک بوده که در آن الکترون به‌عنوان سیال کاری عمل کرده و حرارت را به برق تبدیل می‌کند. این مولدها نسبت جرم به تولید قدرت کمتری از سایر روش‌های تولید انرژی دارند و چون فاقد قطعات متحرک هستند، قابلیت اطمینان بالا داشته و نیازمند تعمیر و نگهداری کمتری می‌باشند [۱۳]. برای آنالیز ترموالکتریک، محاسبه بازده ترموالکتریک در این سیستم، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\eta_{TEG} = \eta_{carnot} \times ((\sqrt{(1+ZT_M)} - 1) / (\sqrt{(1+ZT_M)} + (T_L / T_H))) \quad (۴)$$

که ZT_M معیار شایستگی است، و مقدار آن برابر با ۰,۸ است.

توانایی یک ماده برای تولید برق ترموالکتریکی با معیار شایستگی که بی‌بعد می‌باشد، ارتباط دارد. A_{wt} مساحت توربین بادی است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{wt} = (D^2) \times (3.14/4) \quad (۵)$$

برقی که از توربین بادی تولید می‌شود، با در نظر گرفتن بیشترین سرعت باد و سرعت باد معمولی محاسبه می‌شود که می‌توان آن را به‌صورت رابطه زیر نوشت [۱۴]: مقدار کار کل سیکل ORC:

$$\dot{W}_{wt} = \frac{1}{2} \eta_{\mathrm{wt}} \rho_{air} A_{wt} \eta_{\mathrm{ecoefficiency}} V_{avg.wind}{}^3 \times 4/1000 \quad (۶)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

مقدار کار خالص کل (مجموع کار خالص سیکل ORC، کار خروجی توربین باد و کار خروجی ترموالکتریک):

$$\dot{W}_{\text{net}} = \dot{W}_{\text{net-Cycle}} + \dot{W}_{Wind\ \text{turbine}} + \dot{W}_{\text{TEG}_{\text{W}}} \quad (۷)$$

اگزرژی تحت عنوان ماکزیمم کار قابل دریافت توسط یک سیستم یا جریان ماده چنانچه به تعادل با یک محیط مرجع می‌رسد، تعریف می‌شود [۱۵]. مقدار تخریب اگزرژی کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{E}_{total} = \dot{E}_{Solarcollector} + \dot{E}_{Turbine} + \dot{E}_{\text{TEG}} + \dot{E}_{\text{Pump1}} + \dot{E}_{\text{Pump2}} + \dot{E}_{\text{Pump3}} + \dot{E}_{Evap} + \dot{E}_{\text{Wind,Turbine}} \quad (۸)$$

مقدار هزینه کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{total} = Z_{Solarcollector} + Z_{Turbine} + Z_{\text{TEG}} + Z_{\text{Pump1}} + Z_{\text{Pump2}} + Z_{\text{Pump3}} + Z_{Evap} + Z_{\text{Wind,Turbine}} \quad (۹)$$

ضریب بازگشت سرمایه را می‌توان به‌صورت زیر تعریف کرد [۱۶]:

$$CFR = \frac{ix(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۱۰)$$

در اینجا i و n میزان سود و دوره عملکرد نیروگاه (سال) را نشان می‌دهند که به ترتیب برابر ۰,۱ و ۲۰ هستند.

از آنجایی که انتظار می‌رود هر دستگاه از یک سیستم ترکیبی در شکل زمانی خاص کار کند، نرخ هزینه‌ی هر دستگاه معیار خوبی از نرخ هزینه‌ای است که با $\dot{Z}$ نشان داده می‌شود. نرخ هزینه هر دستگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$\dot{Z} = \frac{Z_{toal} CRF \varnothing}{T} \quad (۱۱)$$

که $\dot{Z}$ دلالت بر میزان هزینه مولفه‌های چرخه دارد، Z_{toal} هزینه کل است. علاوه بر این، T ساعات عملیات سالانه (تعداد ساعات کاری) است، $\emptyset$ ضریب نگهداری و تعمیر است. بازده کل سیستم (η) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = \dot{W}_{net} \times 100 / Ex_{Sun} \quad (۱۲)$$

در جدول ۱ مقادیر داده‌های ورودی جهت مدلسازی آمده است.

جدول ۱: داده‌های ورودی.

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
دمای محیط	T_0	25	°C
مساحت کلکتور	A_{p}	800 تا 1200	m^2
دمای آب ورودی از اقیانوس	T_8	30	°C
دمای خروجی از کلکتور خورشیدی	T_{10}	95	°C

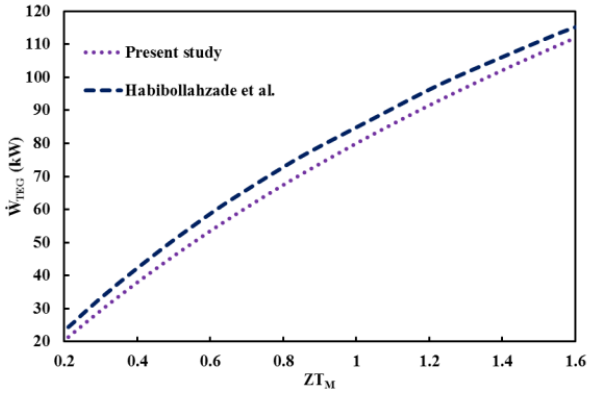
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

فشار محیط	P_0	101.3	[kpa]
فشار ورودی از اقیانوس	P_8	101.3	[kpa]
فشار ورودی به کلکتور خورشیدی	P_9	150	[kpa]
دبی جرمی	$\dot{m}_9$	10	[kg/s]
شدت تابش خورشیدی منطقه	Gb	800	$\frac{W}{m^2}$
دمای خورشید	T_{sun}	5770	[k]
راندمان بصری	τ_l	3.82	-

۴- اعتبارسنجی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج و اعتبار بخشیدن به کار انجام شده، نتایج کار حاضر با نتایج کار آقای حبیب‌الله‌زاده و همکاران [۱۷] مقایسه و اعتبارسنجی خواهد شد. نتیجه اعتبارسنجی کار حاضر در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲: اعتبارسنجی کار حاضر با کار حبیب‌الله‌زاده و همکاران [۱۷].

۵- نتایج و بحث

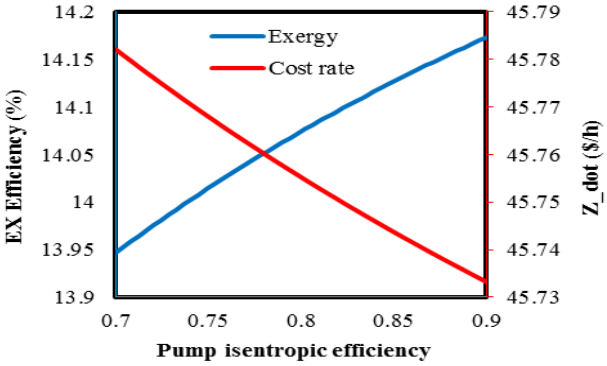
در ابتدا به بررسی تاثیر بازده پمپ بر روی کار خالص سیستم، کار ترموالکتریک، نرخ هزینه و اگزرژی آمده است. یکی از پارامترهای بسیار تاثیر گذار روی بازده و هزینه‌های در این سیستم بازده پمپ می‌باشد. بازده پمپ[2] به‌طور کلی نسبت قدرت عملی به‌دست آمده توسط سیال به توان کل می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش بازده پمپ از ۰,۷ به ۰,۹۵، باعث افزایش حدود ۱,۶۲ درصدی کار سیستم می‌شود. با افزایش بازده پمپ، میزان کار کل آن از ۳۶۰ کیلووات به ۳۶۶ کیلووات افزایش یافته است. در شکل ۳، مشاهده می‌شود که با افزایش بازده پمپ، کار ترموالکتریک ۰,۲۲ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش بازده پمپ، میزان کار ترموالکتریک از ۱۰۷,۹۵ کیلووات به ۱۰۸,۲ کیلووات افزایش یافته است. با توجه به اینکه دمای بازده پمپ جهت مدلسازی ۰,۸۵ در نظر گرفته شده، کار کل دارای مقدار ۳۶۴,۶۴۲ کیلووات و کار ترموالکتریک در بازده پمپ ۰,۸۵، داری مقدار ۱۰۸,۱۴۰۳ کیلووات گزارش شد. بیشترین بهره‌وری پمپ جهت پمپاژ سیال در نقطه مورد نظر، رخ می‌دهد و در هنگام انتخاب پمپ نقطه کاری پمپ باید نزدیک نقطه حداکثر کارایی باشد تا باعث افزایش کارایی پمپ شود. همانطور که در شکل ۴، مشاهده می‌شود افزایش بازده پمپ باعث افزایش ۱,۶۲ درصدی بازده اگزرژی کل سیستم شده است. علت افزایش میزان اگزرژی در این نمودار را می‌توان به این امر مربوط دانست که اگزرژی و کار خروجی سیستم، رابطه مستقیم دارند، یعنی با افزایش کار سیستم میزان اگزرژی سیستم نیز افزایش یافته است. طبق این رابطه با کاهش

[2] Efficiency

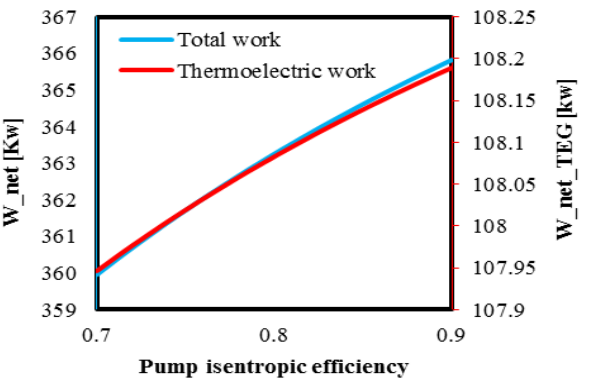
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

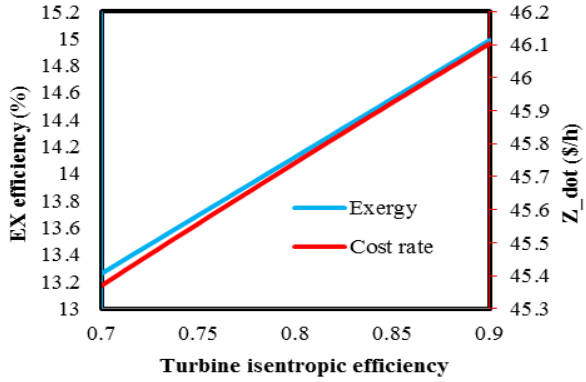
تخریب اگزرژی راندمان نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین در شکل ۴، مشاهده می‌شود که افزایش بازده پمپ باعث کاهش ۰,۱۰ درصد نرخ هزینه شده است، که از نظر اقتصادی به‌صرفه بیان می‌شود.



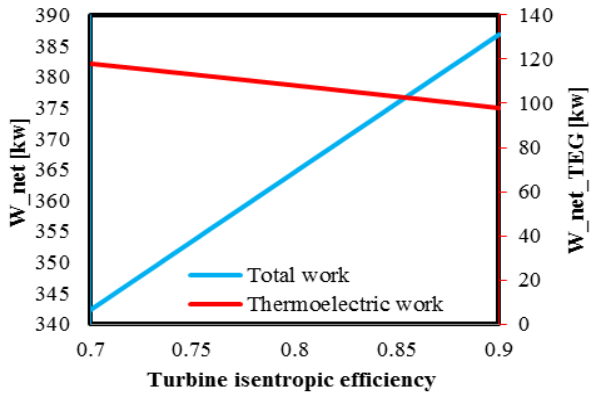
شکل ۴: تاثیر بازده پمپ بر بازده اگزرژی و نرخ هزینه سیستم.



شکل ۳: تاثیر بازده پمپ بر کار کل سیستم و کار ترموالکتریک



شکل ۶: تاثیر بازده توربین بر بازده اگزرژی و نرخ هزینه سیستم.



شکل ۵: تاثیر بازده توربین بر کار کل سیستم و کار ترموالکتریک.

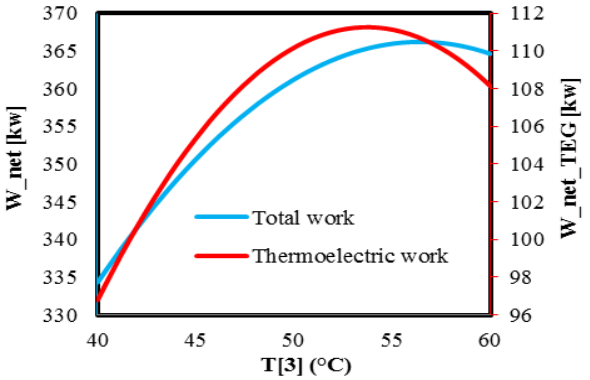
همان‌طور که از شکل ۵، مشاهده می‌شود، با افزایش بازده پمپ از ۰,۷ تا ۰,۹۵، باعث افزایش کار کل سیستم از مقدار ۳۴۲,۳۳۴ کیلوات به ۳۸۶,۸۶۱ کیلووات، که به‌عبارتی باعث افزایش ۱۳ درصدی کار کل می‌شود. علت این افزایش تاثیر مثبت بازده توربین بر روی کار است، چرا که توربین در این سیستم‌ها سهم عمده‌ای در کار تولیدی که همان برق است، دارد. با توجه به شکل ۵، در می‌یابیم که افزایش بازده توربین، بر روی کار ترموالکتریک باعث کاهش ۱۷ درصدی کار ترموالکتریک شده است. علت این امر را می‌توان همسو بودن کار دو زیر سیستم، که همان تولید برق است، بیان کرد. یعنی به‌عبارتی باید گفت که، بازده مولد ترموالکتریک با بازده توربین در نیروگاه‌ها رقابت می‌کند. از دلایل دیگر کاهش کار، می‌توان به مواردی از قبیل عدم تولید در ساعات توقف دستگاه، استهلاک ترموالکتریک به‌دلیل کار در شرایط نامناسب (دمای بالا و تنظیم نبودن فشار، آنتالپی و افزایش بی‌نظمی در زیرسیستم‌ها) اشاره کرد. طبق بررسی اگزرژی، با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود افزایش بازده توربین باعث افزایش ۱۳,۰۱ درصدی بازده اگزرژی کلی سیستم شده است. علت افزایش میزان اگزرژی در این نمودار را می‌توان به این امر مربوط دانست که اگزرژی و کار خروجی سیستم با هم رابطه مستقیم دارند. همچنین در شکل ۶، مشاهده می‌شود افزایش بازده توربین، باعث افزایش ۱,۶۱ درصدی نرخ هزینه سیستم شده است. علت افزایش نرخ هزینه را می‌توان به این امر مربوط دانست که هزینه‌های سیستم نیز با افزایش کار کل سیستم و نیاز به تجهیزات بزرگ‌تر افزایش خواهد یافت. از دلایل افزایش نرخ هزینه در بررسی انجام شده می‌توان به این مورد اشاره کرد که، افزایش هزینه تمام شده تولید، ریشه در تولیدات خورشیدی و بادی دارد و به‌طور ویژه دلیل این قیمت بالا را باید در هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالای تولید برق که نیازمند تجهیزات مختلف

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

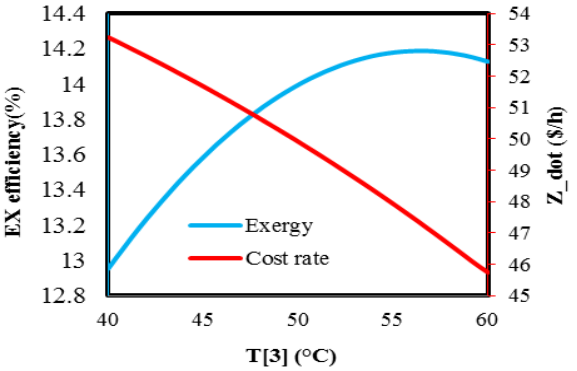
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

برای تولید برق است، جستجو کرد. همچنین از دلیل دیگر این افزایش هزینه می‌تواند مربوط به هزینه‌های انرژی و هزینه‌های ناشی از عدم تولید در ساعات توقف سیستم اشاره کرد.

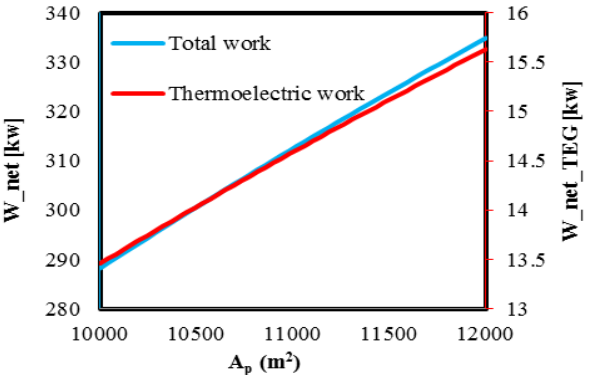
همانطور که شکل ۷، مشاهده می‌شود، افزایش دمای ورودی توربین باعث افزایش ۹،۰۵ درصدی کار کل می‌شود. با افزایش دمای توربین تا ۵۶ درجه سانتی‌گراد، کار کل در حال افزایش است ولی بعد از دمای ۵۶ درجه سانتی‌گراد، مقدار کار کل، تا مقدار قابل توجهی، کاهش می‌یابد که می‌توان گفت این امر به‌علت گرم شدن سیستم و علل خصوص توربین در دمای کاری بالا است، که تاثیر منفی بر روی بازده کار کل سیستم، گذارد. ولی در کل خروجی کار مثبت بوده است. در شکل ۷، مشاهده می‌شود، افزایش دمای ورودی توربین باعث افزایش ۱۱،۷۱ درصدی کار ترموالکتریک می‌شود. با افزایش دمای توربین تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد، کار خروجی ترموالکتریک در حال افزایش است ولی بعد از دمای ۵۴ درجه سانتی‌گراد، مقدار کار کل کاهش می‌یابد که می‌توان گفت این امر به علت گرم شدن مولد ترموالکتریک و تاثیر منفی بر روی بازده کار کل سیستم، اتفاق می‌افتد.



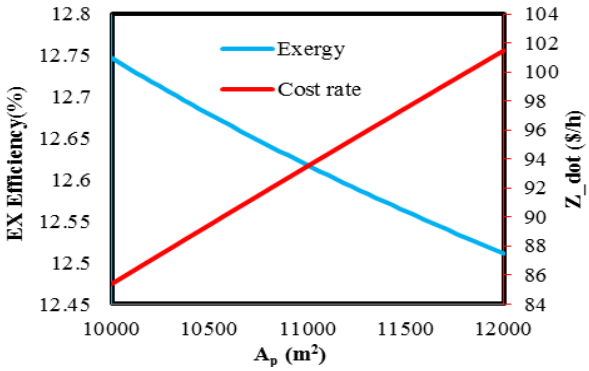
شکل ۷: تاثیر دمای توربین بر کار کل سیستم و کار ترموالکتریک.



شکل ۸: تاثیر دمای توربین بر بازده اگزرژی و نرخ هزینه سیستم.



شکل ۹: تاثیر مساحت کلکتور بر کار کل و کار ترموالکتریک.



شکل ۱۰: تاثیر مساحت کلکتور بر بازده اگزرژی و نرخ هزینه سیستم.

با توجه به شکل ۸، مشاهده می‌شود، افزایش دمای ورودی توربین باعث افزایش ۹،۰۸ درصدی بازده اگزرژی می‌شود. با افزایش دمای توربین تا ۵۶ درجه سانتی‌گراد، مقدار اگزرژی در حال افزایش است، ولی بعد از دمای ۵۶ درجه سانتی‌گراد، مقدار اگزرژی کاهش می‌یابد که می‌توان گفت این امر به‌علت گرم شدن سیستم و تاثیر منفی بر روی بازده و راندمان کلی سیستم، اتفاق می‌افتد. همچنین از دلایل دیگر این کاهش جزیی می‌توان به افزایش تخریب اگزرژی نیز اشاره کرد. این امر به دلیل افزایش بیشتر گرمای ارتقا یافته خروجی، نسبت به توان مورد نیاز در توربین سیکل رانکین می‌باشد. منظور از گرمای ارتقا یافته، مقدار گرمای مطلوب خروجی در جاذب است که دارای دمای بالایی می‌باشد. در شکل ۸، مشاهده می‌شود، با افزایش دمای توربین، مقدار نرخ هزینه ۱۴،۰۸ کاهش یافته است، که این امر از نظر اقتصادی به‌صرفه و قابل توجیه اقتصادی است.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

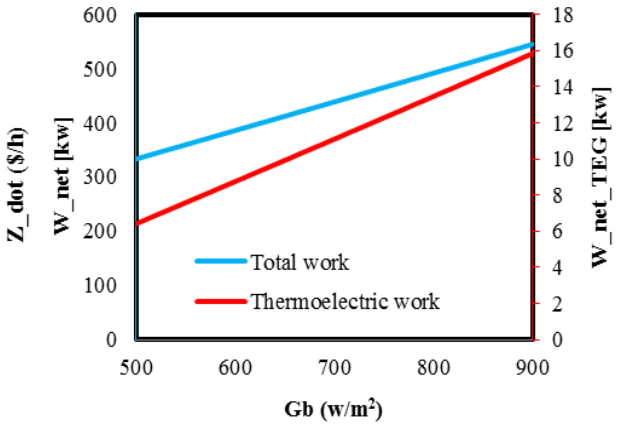
همانطور که در شکل ۹، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مقدار تابش خورشیدی از ۱۰۰۰۰ به ۱۲۰۰۰ وات بر مترمربع، میزان کار کل سیستم ۱۳,۹۴ درصد افزایش یافته است. مساحت کلکتور با جذب تابش خورشید رابطه مستقیم دارد، یعنی هرچه مساحت کلکتور افزایش یابد، مقدار جذب انرژی تابشی خورشید افزایش پیدا می‌کند و مسلما بر روی کار خروجی سیستم تاثیر می‌گذارد. همانطور که در شکل ۹، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مساحت کلکتور حرارتی خورشیدی، میزان کار ترموالکتریک ۱۶,۱۲ درصد افزایش یافته است.

در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مساحت کلکتور حرارتی خورشیدی، کاهش ۱,۸۸ درصدی اگزرژی کل سیستم مشاهده شده است. همانطور که در شکل ۱۰، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مساحت کلکتور حرارتی خورشیدی، نرخ هزینه سیستم ۱۸,۸۳ درصد افزایش یافته است. افزایش هزینه را می‌توان مربوط به نیاز به تعمیر، نگهداری و راه‌اندازی‌های پی در پی اجزای سیستم، دانست.

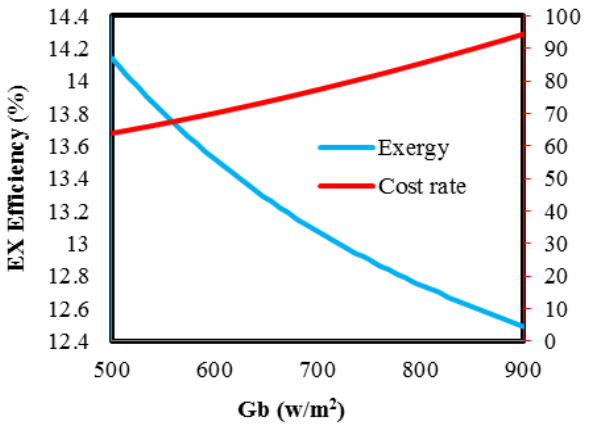
میزان تابش خورشید یکی از عواملی است که در عملکرد سیستم‌های که از کلکتورهای حرارتی خورشیدی بهره می‌برند، تاثیر بسیار قابل توجه‌ای دارد. به‌عبارتی با افزایش تابش خورشیدی، دبی سیال ورودی به سیستم خورشیدی و توربین بادی افزایش یافته و در نتیجه با افزایش دبی، کار خروجی زیرسیستم‌ها نیز افزایش می‌یابد، که باعث افزایش کار خروجی کل خواهد شد و بالعکس.

همانطور که در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مقدار تابش خورشیدی از ۸۰۰۰ به ۱۰۰۰۰ وات بر مترمربع، میزان کار کل سیستم ۶۳,۴۳ درصد افزایش یافته است، که این امر باعث افزایش اگزرژی کل سیستم خواهد شد. همانطور که در شکل ۱۱، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مقدار تابش خورشیدی، میزان کار ترموالکتریک ۱۴۶,۶۸ درصد افزایش یافته است که درصد این افزایش قابل قبول بوده، و این امر باعث افزایش اگزرژی کل سیستم خواهد شد.

در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مقدار تابش خورشیدی، و همچنین با افزایش میزان کار کل سیستم، افزایش ۱۳,۲۱ درصدی اگزرژی کل سیستم نیز مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۱۲، مشاهده می‌شود، با توجه به افزایش مقدار تابش خورشیدی، نرخ هزینه سیستم ۴۷,۶۵ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱۱: تاثیر تابش خورشید بر کار کل سیستم و کار ترموالکتریک.



شکل ۱۲: تاثیر معیار تابش خورشید بر بازده اگزرژی و نرخ هزینه.

در این پژوهش از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه NSGA II برای بهینه‌سازی پارامترها و توابع هدف پژوهش استفاده شده است. برای بهینه‌سازی چند هدفه یک کد برای اتصال نرم افزار EES و Matlab نوشته شده است، که دو نرم‌افزار را به روش Dynamic Data Exchange (DDE) به هم لینک می‌کند. متغییرهای طراحی که برای بهینه‌سازی استفاده می‌شوند عبارتند از:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

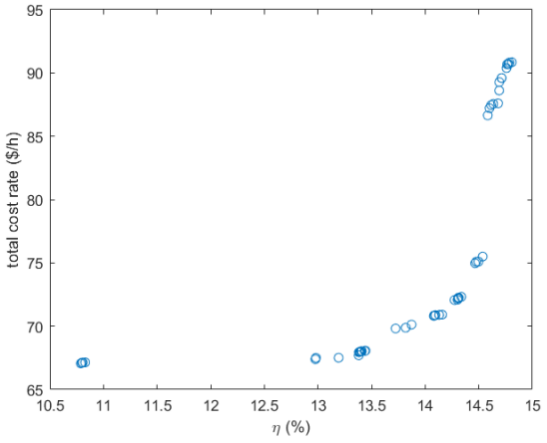
[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

مساحت سیستم خورشیدی (Ap)، دمای خروجی از سیستم خورشیدی (T1)، دمای ورودی به توربین (T3)، پینچ پوینت اواپراتور (PPeva)، پارامتر ترموالکتریک(Z_T_M)، بازده پمپ، بازده توربین. در جدول ۲ میزان محدوده مجاز برای هر متغییر آورده شده است.

جدول ۲: متغییر های طراحی و رنج تغییرات آن‌ها.

پارامتر طراحی	کران پایین	کران بالا	واحد
A_p	8000	12000	m^2
T_1	15	30	° C
T_3	40	60	° C
PP_Eva	2.5	6.5	° C
Z_T_m	0.5	1	(-)
Etta_Pump	0.7	0.9	(-)
Etta_Turbine	0.7	0.9	(-)

در شکل ۱۳ مرز پارتو آورده شده است. همانطور که بیان شد تمام نقاط جواب بهینه هستند. اما برای انتخاب بهترین نقطه از یک روش ساده هندسی استفاده شده است.



شکل ۱۳: مرز پارتو از نقاط بهینه سیستم پیشنهادی.

اطلاعات بیشتر در مورد نقطه بهینه و پارامترهای بهینه‌سازی در جداول ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول ۳: توابع هدف بهینه.

تابع هدف	مقدار	واحد
بازده اگزرژی	۱۴,۴۷	%
هزینه	۷۴,۹۷	$/h

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

جدول ۴: پارامترهای بهینه‌سازی.

پارامترهای بهینه‌سازی	مقدار	واحد
A_p	8878.45	m^2
T_1	16.55	° C
T_3	56.56	° C
PP_Eva	4.11	° C
Z_T_m	0.71	(-)
Etta_Pump	0.80	(-)
Etta_Turbine	0.89	(-)

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تحلیل و بررسی یک سیستم تولید چند گانه انرژی بر مبنای انرژی خورشیدی، باد و انرژی حرارتی اقیانوسی، که از قابل دسترس‌ترین و کارآمدترین انرژی‌های تجدیدپذیر هستند، پرداختیم. سیستم پیشنهادی نهایی جهت بررسی نتایج و بهینه‌سازی، از ترکیب زیر سیستم‌هایی شامل کلکتور خورشیدی صفحه تخت، سیستم تبدیل انرژی حرارتی اقیانوس، توربین بادی، سیکل رانکین و استفاده از ترموالکتریک تشکیل شد. سیستم پیشنهادی بر اساس کل مصرف روزانه برق مورد نیاز یک مجتمع خدمات رفاهی ساحلی طراحی و بررسی شد.

در این پژوهش از مبرد R227ea به‌عنوان سیال ارگانیک در سیکل رانکین ارگانیک و از سیال آب برای سیستم حرارتی اقیانوسی OTEC استفاده شد. برای مدلسازی سیستم و به‌دست آوردن نتایج ترمودینامیکی از نرم‌افزار EES به عنوان یک ابزار مهندسی بهره برده شد. سیستم طراحی شده برای یک منطقه که دارای انرژی حرارتی اقیانوسی، انرژی باد و خورشید مناسبی بوده مورد استفاده قرار گرفت. از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار و کاربردی در این بررسی‌ها، باید به میزان سرعت باد، مقدار تابش خورشید و مساحت کلکتور اشاره کرد.

در نهایت به‌منظور بهینه‌سازی سیستم طراحی شده از الگوریتم چندهدفه ژنتیک با مرتب‌سازی نامغلوب یا همان الگوریتم NSGA-II برای یافتن بهترین توابع هدف و رسم نمودار پارتو استفاده می‌شود. دو تابع هدف این بهینه‌سازی اگزرژی و هزینه سیستم بودند. در این پژوهش به‌دنبال کم کردن نرخ هزینه و افزایش بازده اگزرژی بودیم. در نهایت بهینه‌ترین مقدار بازده اگزرژی ۱۴,۴۷درصد و نرخ هزینه (\$/h) ۷۴,۹۷ به‌دست آمد.

فهرست علائم

دمای محیط (°C)	T_0
فشار محیط (P)	P_0
بازده پمپ	η_{pump}
بازده توربین	η_{turbin}
پینچ پوینت اواپراتور (°C)	pp_{evva}
مساحت کلکتور(m^2)	A_P
شدت تابش خورشیدی (W/m^2)	Gb
نرخ هزینه (\$/hr)	$\dot{Z}$
دمای خورشید	T_{sun}

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

راندمان بصری	τ_l
ضریب افت کلی کلکتور	U_l
عامل دفع حرارت	F_R
عامل راندمان کلکتور	F_1
گرمای ویژه در فشار ثابت	C_p
کیفیت	x
نرخ دبی جرمی، kg/h	m_{Mass}

مخفف

سیکل ارگانیک رانکین	ORC
ترموالکتریک	TEG
مبدل حرارتی	HEX
اواپراتور	Eva
خورشید	Solar
اگزرژی	ex

مراجع

[1] A. Khosravi, S. Syri, M. E. H. Assad, M. Malekan, Thermodynamic and economic analysis of a hybrid ocean thermal energy conversion/photovoltaic system with hydrogenbased energy storage system, Energy; Volume 172 (2019), Pages 304-319.

[2] M. Wang, R. Jing, H. Zhang, C. Meng, N. Li, Y. Zhao, An innovative Organic Rankine Cycle (ORC) based Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) system with performance simulation and multi-objective optimization, Applied Thermal Engineering, Volume 145, 25 December 2018, Pages 743-754.

[3] A. Hasan, I. Dincer, An ocean thermal energy conversion based system for district cooling, ammonia and power production, Elsevier International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 32, 11 June 2020, Pages 15878-15887.

[4] W. Liu, X. Xu, F. Chen, Y. Liu, S. Li, L. Liu, Y. Chen, A review of research on the closed thermodynamic cycles of ocean thermal energy conversion, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 119, March 2020, 109581.

[5] A. M.M.I., Qureshy, I. Dincer, Energy and exergy analyses of an integrated renewable energy system for hydrogen production, Energy, Volume 204, 1 August 2020, 117945.

[6] H. Ishaq, I. Dincer, A comparative evaluation of OTEC, solar and wind energy based systems for clean hydrogen production, Journal of Cleaner Production, Volume 246, 10 February 2020, 118736.

[7] A. Moharramian, Conventional and enhanced thermodynamic and exergoeconomic analyses of a photovoltaic combined cycle with biomass post firing and hydrogen production, Applied Thermal Engineering, Volume 160, September 2019, 113996.

[8] A. Razmi, M. Soltani, Investigation of an efficient and environmentally-friendly CCHP system based on CAES, ORC and compression-absorption refrigeration cycle: Energy and exergy analysis. Energy Conversion and Management 195, Volume 195, 1 September 2019, Pages 1199-1211.

[9] S. M. Alirahmi, E. Assareh, Energy, exergy, and exergoeconomics (3E) analysis and multi-objective optimization of a multi-generation energy system for day and night time power generation - Case study: Dezful city, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 56, 13 November 2020, Pages 31555-31573.

[10] Z. Wu, H. Feng, L. Chen, W. Tang, J. Shi, Y. Ge, Constructal thermodynamic optimization for ocean thermal energy conversion system with dual-pressure organic Rankine cycle, Energy Conversion and Management, Volume 210, 15 April 2020, 112727.

[11] S. Zhoua, X. Liu, Y. Bian, S. Shen, Energy, exergy and exergoeconomic analysis of a combined cooling, desalination and power system, Energy Conversion and Management, Volume 218, 15 August 2020, 113006.

[12] S. Farahat, F. Sarhaddi, H. Ajam, Exergetic optimization of flat plate solar collectors. Renewable Energy, Volume 34, Issue 4, April 2009, Pages 1169-1174.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

[13] M. Zare, H. Ramin, R. Hosseini, Optimization of Segmented Thermoelectric Generator and Calculation of Performance, Amirkabir Journal of Science and Research (Mechanical Engineering) Vol. 45, (2013) pp. 83-91.
[14] F. Yilmaz, Energy, exergy and economic analyses of a novel hybrid ocean thermal energy conversion system for clean power production, Energy Conversion and Management, Volume 196, 15 September 2019, Pages 557-566.
[15] M. M., EL-Wakil, PowerPlant Technology, McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 1 edition. 2002.
[16] Y. Li, X. Huang, Comparative study of onshore and offshore wind characteristics and wind energy potentials: A case study for southeast coastal region of China, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 39, June 2020, 100711.
[17] A. Habibollahzade, E. Gholamian, P. Ahmadi, A. Behzadi, Multi-criteria optimization of an integrated energy system with thermoelectric generator, parabolic trough solar collector and electrolysis for hydrogen production, Int. J. Hydrogen Energy. Volume 43, Issue 31, 2 August 2018, Pages 14140-14157.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]

چکیده انگلیسی:

Exergy and economic analysis and optimization of a multiple energy production system based on solar, wind and ocean thermal energy for clean electricity generation

Ali Dezhdar1, Ehsanolah Assaerh2*

1Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran
2 Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: November 2020, Accepted: December 2020

Abstract

In the present study, investigated an energy production system using three types of renewable energy: solar, wind and ocean thermal energy with climatic conditions and close to areas with high potential for the OTEC system, Has a good position in terms of wind speed and solar radiation, used them as energy sources. The proposed system is designed and evaluated based on the total daily electricity consumption required by a beach welfare complex. The main components of the system consist of an organic Rankine cycle, turbine, thermoelectric, pump, heat exchanger, wind turbine and a flat plate solar collector. EES software has been used as an engineering tool to model the system and obtain thermodynamic results. The system is designed for an area with good ocean thermal energy, wind energy and solar energy. The most important and effective parameters in these studies are wind speed, solar radiation and Solar heat collector area. Finally, in order to optimize the designed system, the multi-objective genetic algorithm with Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II or NSGA-II algorithm is used to find the best target functions and Pareto chart extraction is used to determine the best values for the target functions. Design variables used for optimization include Solar system area (Ap), output temperature from solar system (T1), turbine inlet temperature (T3), evaporator pinch point (PPeva), thermoelectric parameter (Z_T_M), pump efficiency and turbine efficiency. The two objective functions of this optimization are exergy and system cost rate. After optimization, the Pareto diagram was obtained with a set of optimal points. Finally, the optimal value for exergy efficiency was 14.47% and the cost rate 74.97 ($/h). The introduced systems are suitable for the required applications according to the obtained results. The introduced systems are suitable for the required applications according to the obtained results.

Key words: Solar energy, Wind energy, Ocean heat energy, Exergy , Cost rate.
*corresponding author: assareh@iaud.ac.ir

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1399.7.3.4.5]