Journal Of Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 2, 2021

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

تحلیل و بررسی یک سیستم تولید چند گانه انرژی بر مبنای انرژی زمین گرمایی برای تولید برق پاک و هیدروژن

احسان فرهادی[۱]، احسان‌اله عصاره [۲و*]

۱- کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران Ehsanf1987@yahoo.com
*۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران assareh@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۰

چکیده

در این پژوهش به تحلیل انرژی، اگزرژی یک سیستم تولید چندگانه انرژی بر مبنای انرژی زمین گرمایی پرداختیم. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین و الکترولایزر PEM و استفاده از ترموالکتریک است. سیال ارگانیک مورد استفاده در سیکل ارگانیک رانکین شامل مبرد R123 است. محصولات این سیستم تولید چندگانه انرژی شامل برق و هیدروژن است. جهت مدلسازی سیستم مورد بررسی و همچنین به‌دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی (EES) استفاده شد. با استفاده از دمای محیط شهر بندرعباس برای گرم‌ترین روز نتایج محاسبه و بررسی شدند. طبق بررسی‌های به عمل آمده از پارامترهای تاثیرگذار بر روی خروجی‌های سیستم می‌توان از بازده توربین، دمای ورودی به اواپراتور، معیار شایستگی ترموالکتریک، بازده پمپ و دبی جرمی ورودی به اواپراتور نام برد. همچنین نتایج نشان داد که سیستم زمین گرمایی کار حاضر در یک سال نسبت به دمای محیط شهر بندرعباس می‌تواند به میزان ۳۵۲۸۱۶٫۲ کیلووات در سال توان تولید کند و در نتیجه این سیستم می‌تواند نیاز انرژی برق حدودا ۱۲ خانواده ایرانی را در طول سال تامین نماید.

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

کلمات کلیدی: انرژی زمین گرمایی، هیدروژن، ترموالکتریک، اگزرژی.

۱- مقدمه

تولید همزمان یکی از بهترین روش‌های حفظ و ذخیره انرژی بوده که امکان استفاده مؤثر از منابع انرژی و کمک به حفظ محیط زیست را فراهم می‌آورد. تولید همزمان امکان تولید برق و سایر انواع مفید انرژی (گرما، سرما، آب داغ، آب شیرین، هیدروژن و ...) را از یک منبع واحد فراهم می‌آورد [۱]. پیشرفت‌های روزافزون در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر باعث ایجاد قالب‌های جدیدی برای استفاده عمومی از این منابع گشته است.

لو و همکاران [۲] در سال ۲۰۲۱، بر روی طراحی، بهینه‌سازی و ارزیابی حرارتی- اقتصادی یک سیکل ارگانیک رانکین با سیال مخلوط زئوتروپیک کار کردند. سیکل ارگانیک رانکین می‌توان برای بازیابی حرارت اتلافی دما پایین را به انرژی تبدیل کند. یک واحد کندانسور برای جداسازی سیالات در سیکل ارگانیک رانکین زئوتروپیک طراحی شد. از الگوریتم ژنتیک برای انجام بهینه‌سازی ترمودینامیکی استفاده شد. همچنین یک مطالعه موردی برای تأیید برتری اقتصادی-حرارتی سیستم پیشنهادی سیکل ارگانیک رانکین قابل تنظیم با انرژی زمین گرمایی انجام شد. نتایج نشان داد که سیکل ارگانیک رانکین

نحوه استناد به این مقاله: احسان فرهادی، احسان‌اله عصاره. تحلیل و بررسی یک سیستم تولید چند گانه انرژی بر مبنای انرژی زمین گرمایی برای تولید برق پاک و هیدروژن. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۰; ۸ (۲) :۱۵-۳۳

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

دارای راندمان ۰٫۵۲ درصد بالاتر از متوسط تولید سالانه خالص سیکل‌های معمولی، ۲٫۲۰ درصد بالاتر از متوسط بازده حرارتی سالانه و ۲۱٫۴۳ درصد کمتر از هزینه تولید متوسط برق سیکل‌های ارگانیک رانکین معمولی است.

رنجبر و همکاران [۳] در سال ۱۳۹۷، بر روی تحلیل ترمودینامیکی و بهبود عملکرد چرخه‌ی تولید توان زمین گرمایی ترکیبی رانکین آلی و فلش با استفاده از سیال کاری زئوتروپیک به عنوان سیال کاری در چرخه‌ی رانکین آلی کار کردند. ترکیباتی از سه هیدروکربن هگزان، سیکلوهگزان و ایزوهگزان با دو مبرد R236ea و R245fa به عنوان سیال کاری چرخه رانکین آلی بررسی شد. تغییرات بازده قانون اول و دوم ترمودینامیک، توان خالص خروجی و تخریب اگزرژی به عنوان تابعی از تغییر نسبت جرمی مبرد از ۰ تا ۱گزارش شد. نتایج نشان داد بازده‌های قانون اول و دوم ترمودینامیک در یک نسبت جرمی خاص بیشینه می‌شوند. همچنین، توان خالص تولیدی چرخه رانکین آلی با تغییر نسبت جرمی یک مقدار بهینه نشان داد.

نعمتی و همکاران [۴] در سال ۱۳۹۷، بر روی تحلیل انرژی و اگزرژی عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دو مرحله‌ای با اهداف گرمایش و سرمایش از دیدگاه قوانین اول و دوم ترمودینامیک کار کردند. طبق نتایج به‌دست آمده از تحلیل قانون اول ترمودینامیک در هر دو حالت گرمایش و سرمایش مقدار ضریب عملکرد سیستم با تغییرات جریان الکتریسیته بهینه می‌گردد که با افزایش اختلاف دمای بین سطوح سرد و گرم مقدار بیشینه ضریب عملکرد کاهش یافته و در مقادیر بالاتری از جریان الکتریسیته رخ می‌دهد. نتایج نشان داد، محدوده مقادیر به‌دست آمده برای بازده اگزرژی ترموالکتریک دو مرحله‌ای کولر بسیار پایین‌تر از ترموالکتریک دو مرحله‌ای هیتر است.

شن و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۱، بر روی بهینه‌سازی و ساخت یک مولد ترموالکتریک مسطح برای یک ژنراتور ترموالکتریک خورشیدی برای عملکرد بالا کار کردند. یک ژنراتور ترموالکتریک مسطح می‌تواند به عنوان جمع کننده انرژی برای شبکه‌های حسگر بی‌سیم استفاده شود. در این پژوهش، ساخت یک مولد ترموالکتریک با فیلم ضخیم بر پایه Bi-Te بررسی شد. قبل از ساخت، ابعاد بهینه‌سازی برای ترموالکتریک مسطح از طریق شبیه‌سازی به روش اجزای محدود محاسبه شد. ترموالکتریک مسطح در یک مولد ترموالکتریک خورشیدی که گرمای حاصل از تابش خورشید را از طریق جاذب خورشیدی متمرکز می‌کند، برای ایجاد اختلاف دمابین دو محل اتصال ترموالکتریک و الکترود استفاده شد.

جوهارا و همکاران [۶] در سال ۲۰۲۱، بر روی فن‌آوری‌ها و کاربردهای تولید کننده ترموالکتریک (TEG) کار کردند. در این پژوهش تجزیه و تحلیل عمیق ترموالکتریک، با مروری جامع بر اصول کار آن‌ها مانند اثر Seebeck، اثر Peltier، اثر Thomson، مواد استفاده شده، شکل شایستگی، تکنیک‌های بهبود از جمله آرایش و ترکیبات مواد ترموالکتریکی و انواع بستر کار شد. علاوه بر این، نمونه‌های شبیه‌سازی عملکرد با استفاده از نرم‌افزاهای دینامیک سیالات محاسباتی از قبیل کامسول و انسیس بررسی شد.

احمدی‌بویاغچی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۸، به بررسی یک سیستم تولید چندگانه انرژی و استفاده از الکترولایزر PEM جهت تولید هیدروژن بر مبنای زیست توده کار کردند. محصولات این سیستم تولید توان، سرمایش، بار حرارتی، هیدروژن و اکسیژن بود. برای بهینه‌سازی سیستم و توابع هدف از الگوریتم بهینه سازی چند هدفه ژنتیک استفاده شد. همچنین از دو روش تصمیم‌گیری چند معیاره لینمپ و تاپسیس برای انتخاب بهترین و بهینه‌ترین مقدار توابع هدف سیستم استفاده شد.

حیدرنژاد و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰، بر روی یک رویکرد جامع برای بهینه‌سازی نیروگاه زمین گرمایی با استفاده از زیست توده و تولید آب شیرین کار کردند. در این سیستم از احتراق پسماندهای جامد شهری به منظور افزایش عملکرد سیستم بهره برده شد و از گازهای خروجی احتراق زباله جامد شهری به عنوان منبع اصلی انرژی برای زیر سیستم آب شیرین کن چند منظوره استفاده شد. نتایج نشان داد بازده انرژی و اگزرژی سیستم به ترتیب می‌تواند به مقدار ۱۳٫۹ درصد و ۱۹٫۴ درصد برسد، در حالی که نرخ هزینه کل سیستم ۲۸۵٫۳ دلار بر ساعت تخمین زده شد.

ذبیح الله و همکاران [۹] در سال ۱۳۹۹، بر روی انرژی زمین‌گرمایی و ترکیب آن با انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر در سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، سرما و گرما کار کردند. این سیستم‌ها به‌طور کلی از سه چرخه اصلی شامل چرخه زمین‌گرمایی، چرخه مولد برق و چرخه تبرید جذبی تشکیل شدند، که با توجه به سیستم‌های مختلف و خروجی‌های آن‌ها

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

امکان اضافه شدن چرخه‌های دیگری هم به سه چرخه یاد شده وجود دارد. در این سیستم علاوه بر ایجاد تغییراتی در چرخه آلی رانکین، از الکترولایزر و چرخه اسمز معکوس، به ترتیب برای تولید هیدروژن و آب شیرین استفاده شد. نتایج تحقیقات انجام شده نشان داد که راندمان سیستم‌های ذکرشده به عوامل مختلفی از جمله درجه حرارت اولیه مایعات زمین‌گرمایی، دبی جریان، شدت خورشیدی، فشار ورودی توربین بخار، درجه حرارت نقطه بخار ژنراتور بخار و ... بستگی دارد.

هو و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۲۱، بر روی بهینه‌سازی اقتصادی حرارتی سیستم انرژی ترکیبی زمین گرمایی - خورشیدی کار کردند. برای اولین بار در این مطالعه یک روش جدید برای تحقق پیش‌بینی سریع و دقیق عملکرد سیستم پیشنهاد شد که امکان طراحی طول عمر سیستم انرژی ترکیبی زمین گرمایی-خورشیدی را با توجه به واقعی بودن آن فراهم ساخت. در این پژوهش ثابت شد که رویکرد جدید به ترتیب در بهبود تولید برق در زمان عمر مفید سیستم در تولید برق[1] (Etot) و ارزش فعلی خالص (NPV)[2] تا ۱۷ و ۱۴ درصد کارآمدتر است. علاوه بر این، در مقایسه با نیروگاه‌های زمین گرمایی مستقل، این سیستم ترکیبی بهره‌وری توربین-پمپ را بهتر نشان داد و مزایای بالقوه اقتصادی بهتری دارد، زیرا قیمت کلکتورهای خورشیدی زیر ۷۵ دلار در هر متر مربع کاهش یافت.

عصاره و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۲۱، بر روی یک سیستم تجدیدپذیر بر مبنای استفاده از انرژی خورشیدی و زمین گرمایی تقویت شده با ژنراتورهای ترموالکتریک برای تولید برق، سرمایش و تولید آب شیرین کار کردند. این سیستم متشکل از زیرسیستم‌هایی شامل یک چاه زمین گرمایی، یک چیلر جذبی، کلکتور خورشیدی سهموی، سیکل رانکین بخار و واحد نمک-زدایی اسمز معکوس بود. در این سیستم به‌جای کندانسور، از ژنراتورهای ترموالکتریک برای افزایش برق تولید شده توسط سیکل بخار استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از ترموالکتریک به جای کندانسور، منجر به کاهش نرخ کل هزینه و افزایش کارایی اگزرژی سیستم شد. دو تابع هدف این پژوهش نرخ هزینه و بازده اگزرژی عنوان شد. برای تعیین مقادیر بهینه توابع هدف، از الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه ژنتیک استفاده شد. نتایج نشان داد نرخ هزینه نهایی بعد از بهینه‌سازی ۱۰,۴۱ دلار بر گیگاژول و بازده اگزرژی ۲۰,۵۲ درصد است.

در این پژوهش یک سیستم تجدیدپذیر تولید چندگانه انرژی بر مبنای انرژی زمین گرمایی برای تولید برق پاک و هیدروژن مورد بررسی قرار گرفت. این سیستم از لحاظ بازده اگزرژی و همچنین هزینه به‌دست آمده، یک سیستم بسیار مناسب می‌باشد که جهت استفاده و احداث نیروگاه‌های زمین گرمایی در مناطق پر پتانسیل انرژی زمین گرمایی و خوشیدی پیشنهاد می‌شود. از مزایای این سیستم‌ها می‌توان بهره‌برداری بالای انرژی، کاهش تلفات انرژی و اگزرژی، بازده بالا اگزرژی و کاهش اثرات گلخانه‌ای اشاره کرد. از نواوری های این پژوهش استفاده از ترموالکتریک به جای کندانسور در سیکل ارگانیک رانکین است که توان مورد نیاز الکترولایزر PEM را جهت تولید هیدروژن فراهم می‌سازد. در این پژوهش از مبرد R123 به‌عنوان سیال ارگانیک در سیکل رانکین ارگانیک OTEC استفاده می‌شود. برای مدلسازی سیستم و به‌دست آوردن نتایج ترمودینامیکی از نرم‌افزار EES به عنوان یک ابزار مهندسی بهره برده می‌شود.

۲- سیستم مورد بررسی

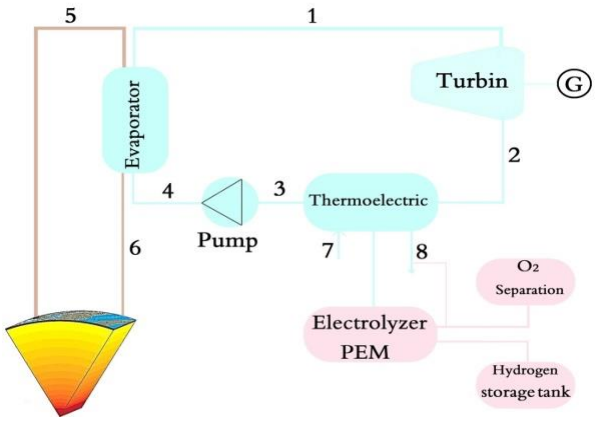
سیستم‌های مورد بررسی در این پژوهش متشکل از سیستم زمین گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین که از مبرد R123 به عنوان سیال ارگانیک استفاده می‌کند و الکترولایزر PEM جهت تولید هیدروژن، و همچنین استفاده از ترموالکتریک به‌جای کندانسور در سیکل رانکین است. در این سیستم با استفاده از یک منبع حرارت با دمای پایین، توربین سیکل ارگانیک رانکین جهت تولید توان، را به گردش در می‌آورد. منبع حرارت در این سیستم انرژی زمین گرمایی است که از مخزن زمین گرما استخراج شده است و سپس وارد اواپراتور سیکل رانکین می‌شود و از این طریق حرارت را به سیکل می‌دهد و توسط توربین سیکل رانکین، انرژی تبدیل به توان شده که بوسیله ژنراتور توان تولیدی توسط توربین، به انرژی الکتریسیته تبدیل خواهد شد

[1] improving the lifetime electricity generation
[2] net present value

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

و سپس در مرحله آخر دوباره به زمین تزریق می‌شود. دمای سیالی که این مخزن به سیکل ارگانیک رانکین تزریق می‌شود، ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است و دبی آن ۱۶ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

سیال ارگانیک استفاده شده در سیستم حاضر R123 با نقطه جوش ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد است، که با وارد شدن در اواپراتور با جذب کمترین حرارت از سیال اطراف لوله‌ها به نقطه جوش خود رسیده و تبخیر می‌شود و به این ترتیب از حالت مایع به حالت گاز تغییر فاز می‌دهد.



شکل ۱: سیستم مورد بررسی کار حاضر.

۳- مدلسازی معادلات حاکم در نرم‌افزار EES

در این سیستم اواپراتور و ترموالکتریک مورد استفاده در سیکل ارگانیک رانکین، دارای دو خروجی و دو ورودی، می‌باشد و با توجه به اینکه مجهولات مسئله با افزایش ورودی و خروجی اجزاء سیستم زیاد شده‌اند، از تحلیل پینچ پوینت برای اواپراتور استفاده می‌شود.

رابطه بالانس انرژی برای اواپراتور و کندانسور در ادامه آورده شده است:

اواپراتور:

$$\dot{m}_5 \times (h_{6g} - h_6) = \dot{m}_4 \times (h_{4f} - h_4) \quad (۱)$$

$$\dot{m}_5 \times (h_5 - h_6) = \dot{m}_4 \times (h_1 - h_4) \quad (۲)$$

ترموالکتریک:

$$\dot{m}_2 \times (h_2 - h_3) = \dot{m}_7 \times (h_8 - h_7) + \dot{W}_{TEG} \quad (۳)$$

$$\dot{W}_{TEG_W} = \dot{W}_{TEG} / 10 \quad (۴)$$

توان مورد نیاز الکترولایزر برای انجام واکنش الکتروشیمیایی توسط توان تولیدی ترموالکتریک، تامین می‌شود. در الکترولایزر بعد از جداسازی آب، هیدروژن و مخلوط آب-اکسیژن تولید می‌شود. هیدروژن تولید شده از قسمت کاتد الکترولایزر خارج شده و گرمای خود را به محیط می‌دهد. سپس مخلوط آب و اکسیژن بعد از خروج از آند توسط یک جداساز، جدا شده و آب باقی‌مانده برای ادامه روند وارد سیکل تولید هیدروژن می‌شود.

میزان برق مورد نیاز سیستم جهت انجام واکنس عبارت است از:

$$E_{elec} = Q_{elec} = JV \quad (۵)$$

در این رابطه V بیان کننده ولتاژ است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

$$V = V_0 + V_{ohm} + V_{act.c} + V_{act.a} \quad (۶)$$

در این رابطه، V_0 پتانسیل برگشت‌پذیری، $V_{act,a}$ و $V_{act,c}$ ولتاژ فعال‌سازی آند و کاتد هستند.

روابطه مربوط به محاسبه پتانسیل برگشت‌پذیری در ادامه آورده شده‌اند [۷]، [۱۲].

$$V_0 = 1.229 - 8.5\times10^{-4}\left(T_{PEM} - 298\right) \quad (۷)$$

$$V_{act.i} = \frac{RT}{F}\ln\left[\frac{J}{2J_{0.i}} + \sqrt{\left(\frac{J}{2J_{0.i}}\right)^2 + 1}\right]. \quad (۸)$$

$$J_{0.i} = J_i^{ref}\, exp\left(-\frac{E_{act.i}}{RT}\right).\ i = a.c$$

V_{ohm} ولتاژ اهمیک است و از رابطه زیر حاصل می‌شود [۱۳]، [۱۴].

$$V_{ohm} = JR_{PEM} \quad (۹)$$

$$R_{PEM} = \int_0^L \frac{dx}{\sigma\left[\lambda(x)\right]} \quad (۱۰)$$

در ادامه به آنالیز الکترولایزر PEM، و روابط مدلسازی شده در نرم‌افزار EES جهت استخراج نتایج، پرداخته می‌شود [۷]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴].

میزان کار الکترولایزر PEM طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{PEM} = \dot{W}_{TEG_W} \quad (۱۱)$$

این رابطه نشان می‌دهد که کار الکترولایزر برابر با کار ترموالکتریک است، چرا که کار خروجی ترموالکتریک جهت تولید هیدروژن به الکترولایزر داده می‌شود. محاسبه مقدار هیدروژن تولیدی سیستم:

$$\dot{N}_{H2_{Out}} = 3600 \times \dot{M}_{H2_{Out}} \quad (۱۲)$$

که در این رابطه داریم:

$$a_{H2} = 3.382e-06 \quad (۱۳)$$

$$b_{H2} = 0.9727 \quad (۱۴)$$

$$c_{H2} = 5.928e-06 \quad (۱۵)$$

جهت بالانس انرژی سیستم زمین گرمایی در پژوهش حاضر، از روابط جدول ۱ استفاده می‌شود.

جدول ۱: بالانس انرژی سیستم.

اجزاء سیستم	رابطه
توربین سیکل ارگانیک رانکین	$\dot{W}_{turbine} = \dot{m}_1 \times (h_1 - h_2)$
پمپ شماره	$\dot{W}_{pump} = \dot{m}_3 \times (h_4 - h_3)$
اواپراتور	$Q_{Evva} = \dot{m}_4 \times (h_1 - h_4)$
کندانسور	$Q_{cond} = \dot{m}_6 \times (h_6 - h_4)$

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

در نهایت باید گفت که مقدار کار خالص کل سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{W}_{net} = \dot{W}_{turbine} - \dot{W}_{pump} + \dot{W}_{TEG_W} \quad (۱۶)$$

در این قسمت، اگزرژی هر جریان محاسبه می‌شود و رابطه تخریب اگزرژی هر جز در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: تخریب اگزرژی اجزا سیستم.

اجزاء سیستم	رابطه تخریب اگزرژی
اواپراتور	$\dot{E}_{Eva} = Ex_4 + Ex_5 - Ex_1 - Ex_6$
توربین	$\dot{E}_{Turbine,\ ORC} = Ex_1 - Ex_2 - W_{turbine}$
ترموالکتریک	$\dot{E}_{TEG} = Ex_2 + Ex_7 - Ex_8 - Ex_3 + \dot{W}_{TEG_W}$
پمپ	$\dot{E}_{pump} = Ex_3 + \dot{W}_{pump} - Ex_4$

میزان بازده اگزرژی سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{ex} = \dot{W}_{net} / Ex_5 \quad (۱۷)$$

میزان بازده انرژی سیستم از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_{th} = \dot{W}_{net} / Q_{Evap} \quad (۱۸)$$

در جدول ۳ داده‌های ورودی مسئله جهت مدلسازی و شبیه‌سازی سیستم آورده شده است.

جدول ۳: داده‌های ورودی.

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
دمای محیط	T_0	25	°C
فشار محیط	P_0	101.3	kpa
دمای ورودی به توربین	T_1	120	°C
دمای ورودی به پمپ	T_3	40	°C
دمای ترموالکتریک	T_8	35	°C
دبی جرمی ورودی به اواپراتور	$\dot{m}_5$	16	kg/s
بازده توربین	η_{turbin}	0.85	(-)
بازده پمپ	η_{pump}	0.80	
پینچ پوینت اواپراتور	pp_{Eva}	5	°C
دمای ورودی به اواپراتور	T_5	180	°C
فشار ورودی به اواپراتور	P_5	1000	Kpa
معیار ترموالکتریک	ZTM	1	(-)

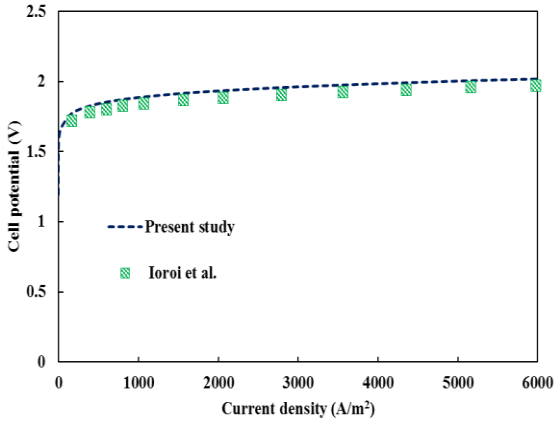
۴- اعتبارسنجی

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

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

با توجه به اینکه سیستم معرفی شده یک سیستم جدید و تازه طراحی شده است،در نتیجه برای اعتبارسنجی این پژوهش به بررسی زیر سیستم الکترولایزر PEM، با با پژوهش لوروی و همکاران پرداخته شده است. همانگونه از نتایج مشخص است، کار از اعتبار خوبی برخوردار است.



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

۵- نتایج و بحث

در این قسمت به مطالعه پارامتریک بر روی خروجی‌های سیستم شامل کار خالص کل، کار ترموالکتریک، هیدروژن تولیدی و بازده اگزرژی در گرم‌ترین روز شهر بندرعباس که سی و یکم آگوست است و در طول ۲۴ ساعت روز بررسی و نتایج تغییرات افزایش میزان پارامترهای طراحی بر روی خروجی‌ها بررسی می‌شود.

همان‌طور که در نمودار ۳ الف، مشاهده می‌شود، در می‌یابیم که افزایش بازده پمپ از ۰,۷ به ۰,۹، باعث افزایش کار کل سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی بازده پمپ در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم-تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار تولیدی سیستم کمتر می‌شود و بیشترین توان تولیدی سیستم در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

در نمودار ۳ ب، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش بازده پمپ از ۰,۷ به ۰,۹، تاثیری بر روی کار ترموالکتریک نداشته است و مقدار کار ثابت مانده است. همچنین نتایج بررسی بازده پمپ در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می-دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار ترموالکتریک کمتر شده و بیشترین توان تولیدی ترموالکتریک در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

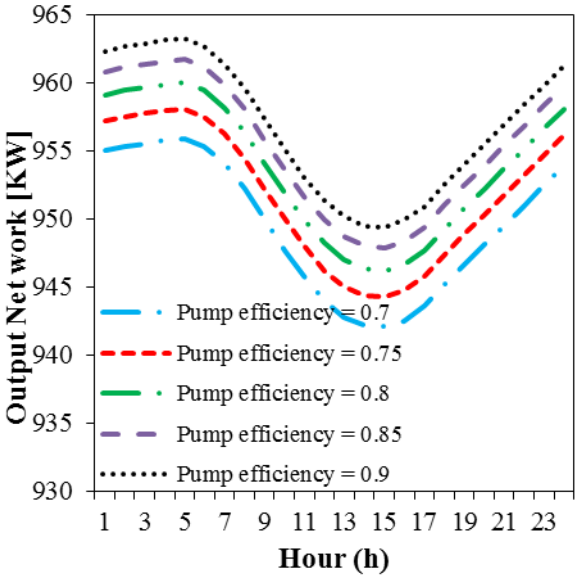
در نمودار ۳ ج، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش بازده پمپ از ۰,۷ به ۰,۹، تاثیری بر روی هیدروژن تولیدی نداشته است و مقدار تولید هیدروژن ثابت مانده است. همچنین نتایج بررسی بازده پمپ در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، هیدروژن تولیدی کمتر شده و بیشترین تولید هیدروژن در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

بیشترین بهره‌وری پمپ جهت پمپاژ سیال در نقطه پمپاژ، اتفاق می‌افتد و در هنگام انتخاب پمپ نقطه کاری پمپ باید نزدیک نقطه حداکثر کارایی باشد تا باعث افزایش کارایی پمپ شود.

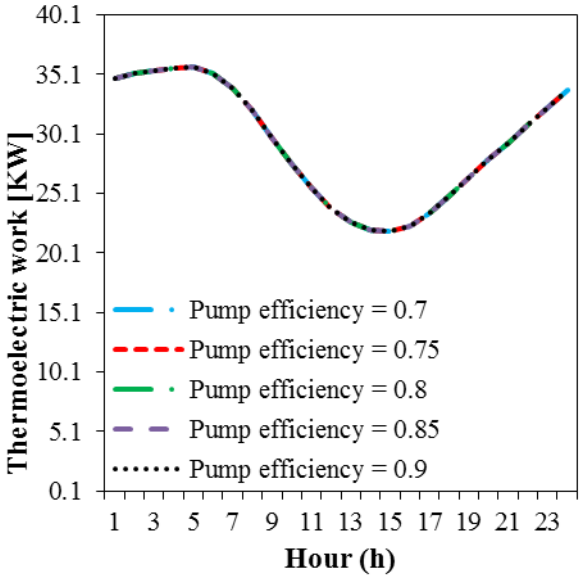
همانطور که در نمودار ۳ د، مشاهده می‌شود افزایش بازده پمپ از میزان ۰,۷ تا ۰,۹ باعث افزایش بازده اگزرژی سیستم شده است، که افزایش بازده اگزرژی را می‌توان مربوط به این دانست که بازده اگزرژی و کار کل سیستم با هم رابطه مستقیم دارد. همچنین نتایج بررسی بازده پمپ در طول یک روز نسبت به دمای محیط بر روی بازده اگزرژی سیستم نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، بازده اگزرژی سیستم بیشتر می‌شود و میزان بازده اگزرژی به ۰,۶۰۲۳ درصد می‌رسد و کمترین میزان بازده اگزرژی سیستم در ساعت ۵ صبح به‌دست آمده است.

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

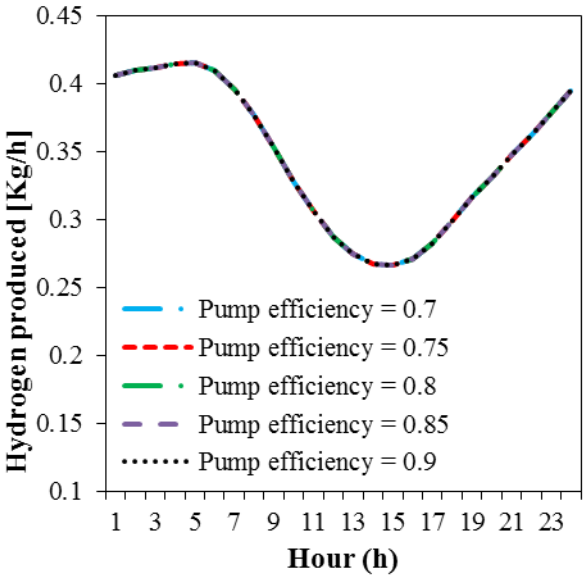
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]



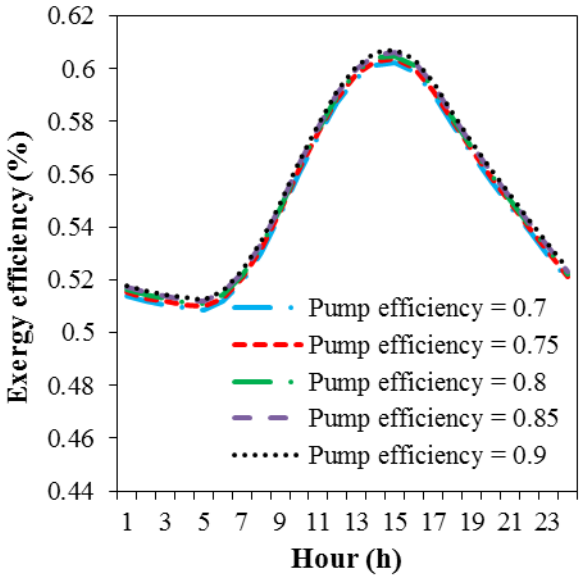
الف. تاثیر بازده پمپ بر روی کار خالص کل



ب. تاثیر بازده پمپ بر روی کار ترموالکتریک



ج. تاثیر بازده پمپ بر روی هیدروژن تولیدی



د. تاثیر بازده پمپ بر روی بازده اگزرژی سیستم

شکل ۳- تاثیر بازده پمپ بر روی خروجی‌های سیستم در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس.

همان‌طور که در نمودار ۴ الف، مشاهده می‌شود، در می‌یابیم که افزایش بازده توربین از ۰,۷ به ۰,۹، باعث افزایش کار کل سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی بازده توربین در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار تولیدی سیستم کمتر می‌شود و بیشترین توان تولیدی سیستم در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

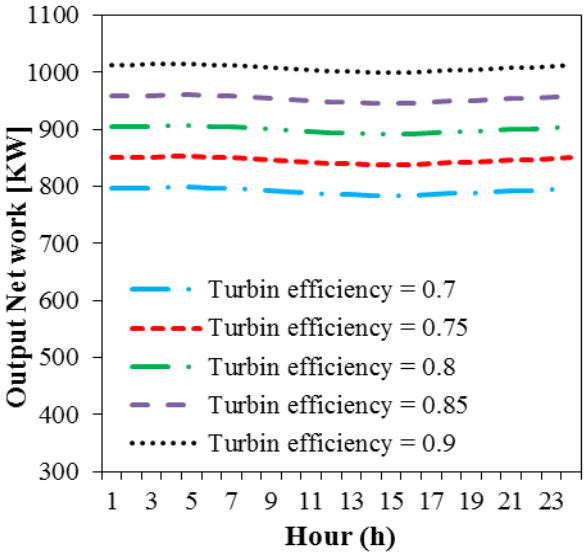
علت افزایش کار کل سیستم نسبت به افزایش بازده توربین را می‌توان مربوط به تاثیر مثبت بازده توربین بر روی کار دانست، چرا که توربین در این سیستم‌ها سهم عمده‌ای در تولید کار که به‌وسیله ژنراتور تبدیل به برق می‌شود، را دارد.

در نمودار ۴ ب، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش بازده توربین از ۰,۷ به ۰,۹، باعث کاهش میزان کار ترموالکتریک شده است. همچنین نتایج بررسی بازده توربین در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه

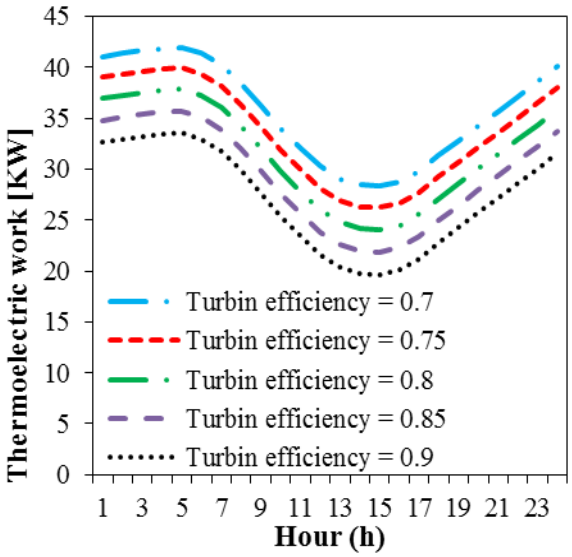
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

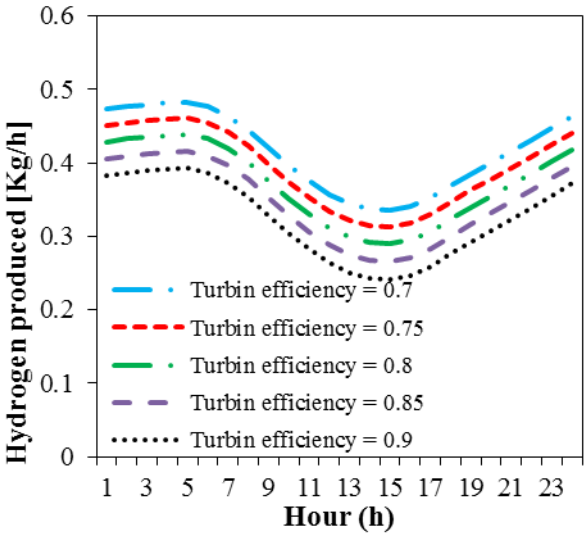
هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار ترموالکتریک کمتر شده و بیشترین توان تولیدی ترموالکتریک در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.



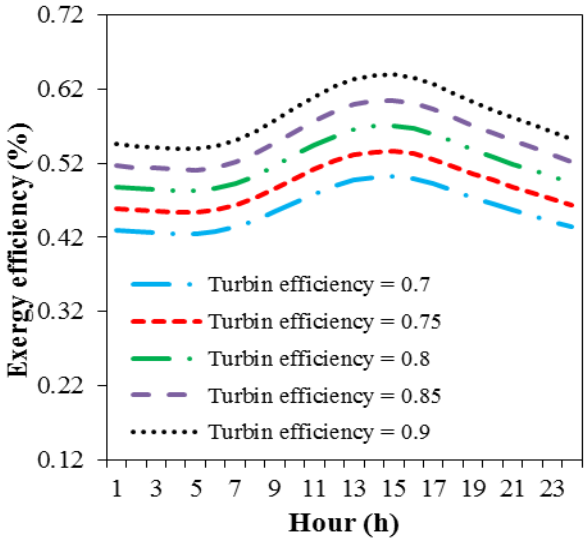
الف. تاثیر بازده توربین بر روی کار خالص کل



ب. تاثیر بازده توربین بر روی کار ترموالکتریک



ج. تاثیر بازده توربین بر روی هیدروژن تولیدی



د. تاثیر بازده توربین بر روی بازده اگزرژی سیستم

شکل ۴- تاثیر بازده توربین بر روی خروجی‌های سیستم در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس.

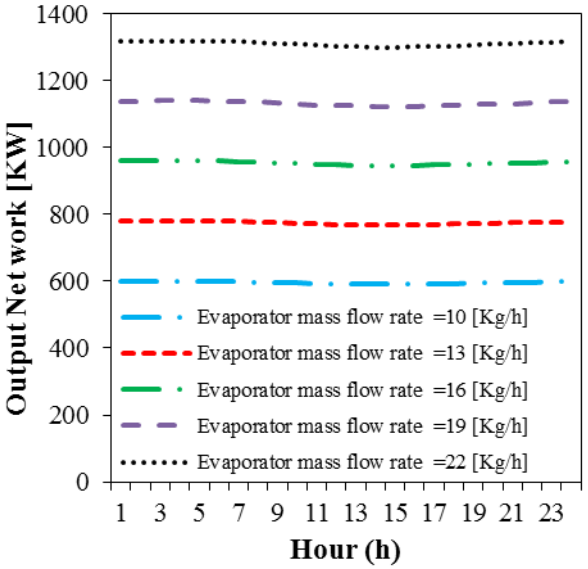
در نمودار ۴ ج، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش بازده توربین از ۰,۷ به ۰,۹، باعث کاهش هیدروژن تولیدی سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی بازده توربین در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، هیدروژن تولیدی کمتر شده و بیشترین تولید هیدروژن در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

علت کاهش تولید هیدروزن را می‌توان مربوط به این دانست که الکترولایزر در این سیستم با برق تولیدی از ترموالکتریک کار می‌کند، پس با کاهش توان تولیدی ترموالکتریک نسبت به افزایش بازده توربین، توان تولید الکترولایزر نیز کمتر شده و در نتیجه هیدروژن تولیدی سیستم کاهش پیدا می‌کند.

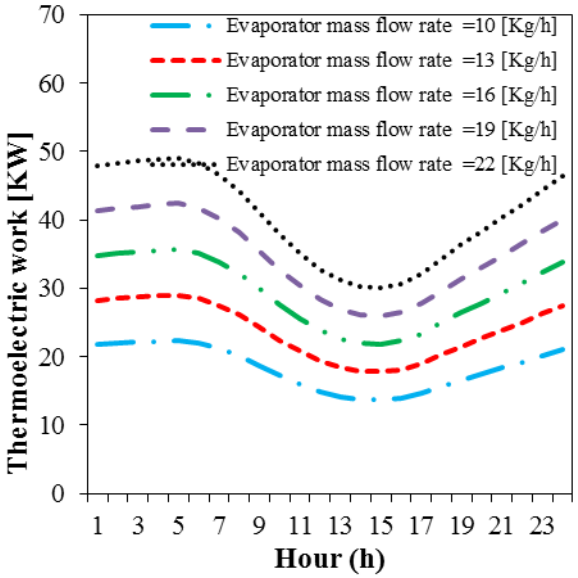
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

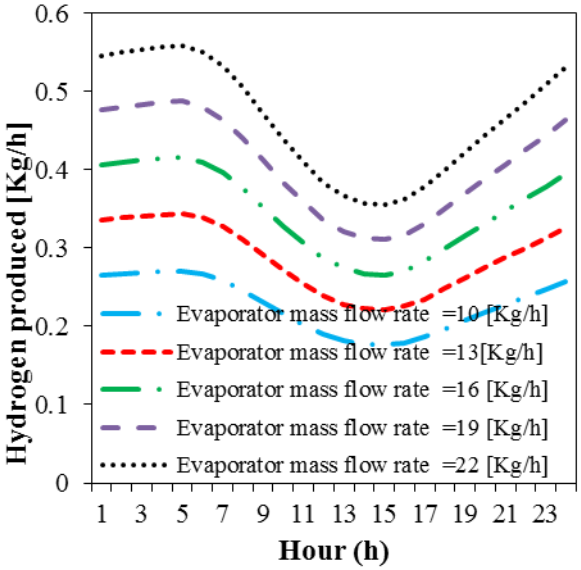
همانطور که در نمودار ۴ د، مشاهده می‌شود افزایش بازده توربین از میزان ۰,۷ تا ۰,۹ باعث افزایش بازده اگـزرژی سیسـتم شده است، که افزایش بازده اگزرژی را می‌توان مربوط به این دانست که بازده اگزرژی و کار کل سیستم با هـم رابطـه مسـتقیم دارد. همچنین نتایج بررسی بازده توربین در طول یک روز نسبت به دمای محیط بر روی بازده اگزرژی سیستم نشان مـی‌دهـد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، بازده اگزرژی سیستم بیشتر می‌شود و کمتـرین میزان بازده اگزرژی سیستم در ساعت ۵ صبح به‌دست آمده است. در نتیجه طبق بررسی انجام شده از پارامترهای تاثیرگذار بـر روی خروجی‌های سیستم زمین گرمایی کار حاضر، باید به بازده توربین اشاره کرد.



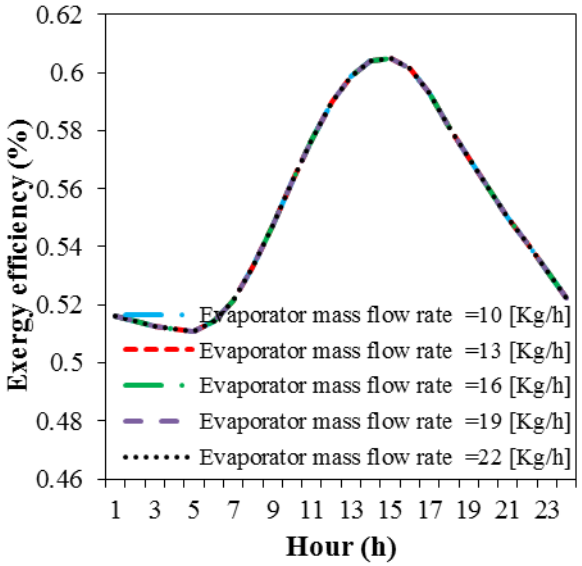
الف. تاثیر نرخ دبی جرمی ورودی به اواپراتور بر روی کار خالص کل



ب. تاثیر دبی جرمی ورودی به اواپراتور بر روی کار ترموالکتریک



ج. تاثیر دبی جرمی ورودی به اواپراتور بر روی هیدروژن تولیدی.



د. تاثیر دبی جرمی ورودی به اواپراتور بر روی بازده اگزرژی سیستم

شکل ۵- تاثیر دبی جرمی ورودی به اواپراتور بر روی خروجی‌های سیستم در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس.

همان‌طور که در نمودار ۵ الف، مشاهده می‌شود، در می‌یابیم که افزایش دبی جرمی ورودی به اواپراتور از مقـدار ۱۰ بـه ۲۲

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

کیلوگرم بر ساعت، باعث افزایش کار کل سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی دبی جرمی ورودی به اواپراتور در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار تولیدی سیستم کمتر می‌شود و بیشترین توان تولیدی سیستم در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

در نمودار ۵ ب، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش دبی جرمی ورودی به اواپراتور از ۱۰ به ۲۲ کیلوگرم بر ساعت، باعث افزایش کار ترموالکتریک شده است. همچنین نتایج بررسی دبی جرمی ورودی به اواپراتور در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار ترموالکتریک کمتر شده و بیشترین توان تولیدی ترموالکتریک در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

در نمودار ۵ ج، نمایش داده شده است، که افزایش دبی جرمی ورودی به اواپراتور از ۱۰ به ۲۲ کیلوگرم بر ساعت، باعث افزایش هیدروژن تولیدی سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی دبی جرمی ورودی به اواپراتور در طول گرم‌ترین روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر شده، هیدروژن تولیدی کمتر شده و بیشترین تولید هیدروژن در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

باید گفت که الکترولایزر بر اساس عبور جریان الکتریکی مستقیم از آب خالص و تجزیه آن به اجزای تشکیل دهنده یعنی هیدروژن و اکسیژن، و همچنین استفاده از روش الکترولیز آب اقدام به تولید هیدوژن در سیستم‌های تجدیدپذیر می‌کند.

همانطور که در نمودار ۵ د، مشاهده می‌شود افزایش دبی جرمی ورودی به اواپراتور از مقدار ۱۰ به ۲۲ کیلوگرم بر ساعت، تاثیری بر روی بازده اگزرژی سیستم نداشته است. از علت عدم تغییر مقدار بازده اگزرژی می‌توان به این اشاره کرد که با توجه به اینکه رابطه بازده اگزرژی با تغییرات کار خروجی سیستم، انتقال حرارت حاصل از اواپراتور تغییر کرده است و باعث می‌شود میزان بازده اگزرژی سیستم برای تغییرات پارامتر دبی جرمی اواپراتور ثابت بماند.

همچنین نتایج بررسی دبی جرمی ورودی به اواپراتور در طول یک روز نسبت به دمای محیط بر روی بازده اگزرژی سیستم نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، بازده اگزرژی سیستم بیشتر می‌شود و کمترین میزان بازده اگزرژی سیستم در ساعت ۵ صبح محاسبه شده است.

دمای ورودی به توربین سیکل رانکین نقش مهمی در طول عمر و تولید توان توربین دارد. با توجه به بالارفتن دمای سیال ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین، آنتالپی سیال نیز در این نقطه کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش کار خروجی توربین می‌شود. با توجه به رابطه اگزرژی کل و وجود عبارت کار کل خروجی در صورت آن، با کاهش کار کل، این عبارت کاهش یافته است.

همان‌طور که در نمودار ۶ الف، مشاهده می‌شود، در می‌یابیم که افزایش دمای ورودی به توربین از مقدار ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش کار کل سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به توربین در طول یک روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار تولیدی سیستم کمتر می‌شود و بیشترین توان تولیدی سیستم در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

از دلایل کاهش کار کل سیستم را، می‌توان مربوط به عدم تولید در ساعات توقف دستگاه، استهلاک زیرسیستم‌ها به‌دلیل کار در شرایط نامناسب (دمای بالا و تنظیم نبودن فشار، آنتالپی و افزایش بی‌نظمی در زیرسیستم‌ها) دانست.

در نمودار ۶ ب، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش دمای ورودی به توربین از مقدار ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش کار ترموالکتریک شده است. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به توربین در طول گرم‌ترین روز شهر بندرعباس نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار ترموالکتریک کمتر شده و بیشترین توان تولیدی ترموالکتریک در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

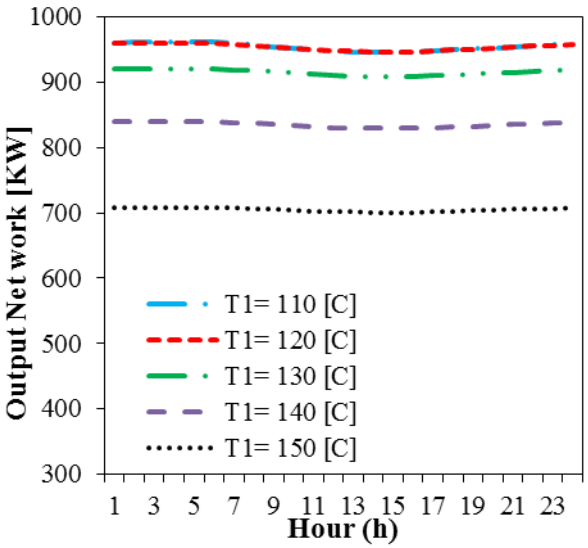
در نمودار ۶ ج، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش دمای ورودی به توربین از مقدار ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش هیدروژن تولیدی سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به توربین در طول گرم‌ترین روز نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر شده، هیدروژن

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

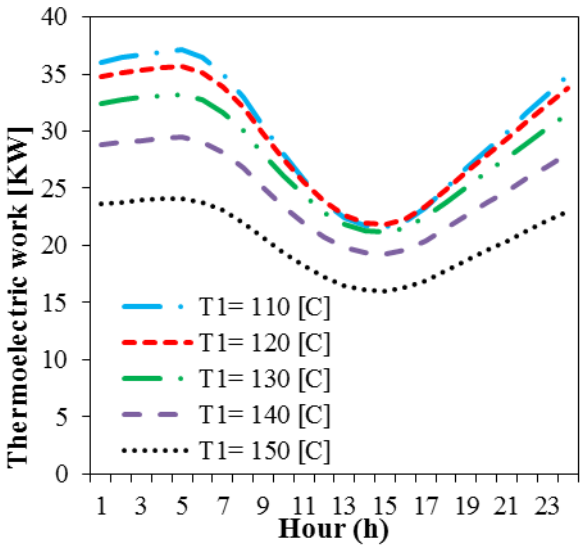
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

تولیدی کمتر شده و بیشترین تولید هیدروژن در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

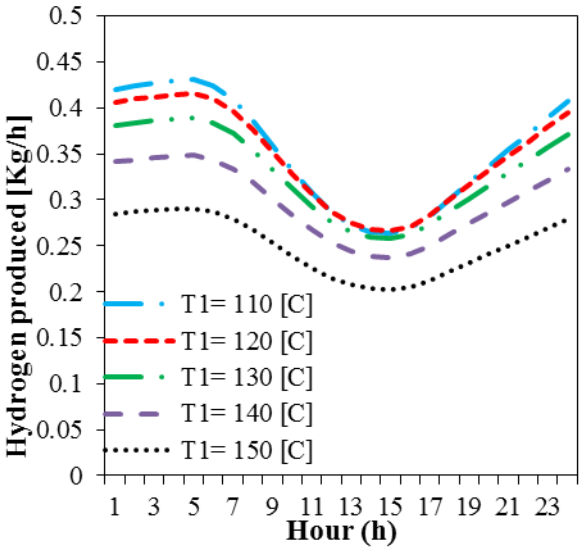
اگزرژی به معنای بیشترین کار خالص قابل استخراج از سیستم است یعنی به‌عبارتی اگزرژی همان کار مفید تولید شده در این سیستم توسط توربین است.



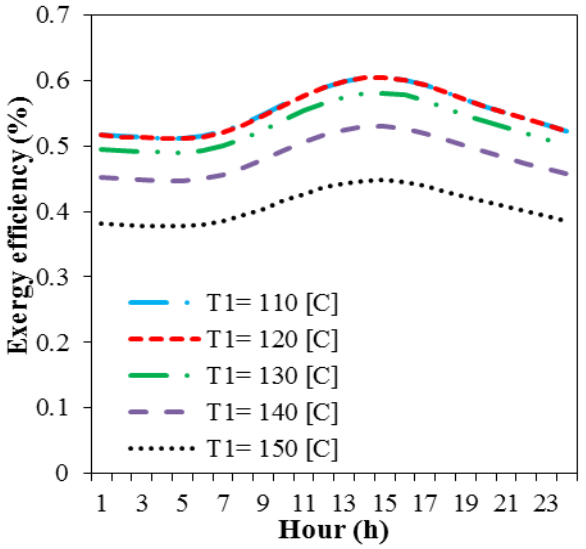
الف. تاثیر دمای ورودی به توربین بر روی کار خالص کل



ب. تاثیر دمای ورودی به توربین بر روی کار ترموالکتریک



ج. تاثیر دمای ورودی به توربین بر روی هیدروژن تولیدی



د. تاثیر دمای ورودی به توربین بر روی بازده اگزرژی سیستم

شکل ۶- تاثیر دمای ورودی به توربین بر روی خروجی‌های سیستم در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس.

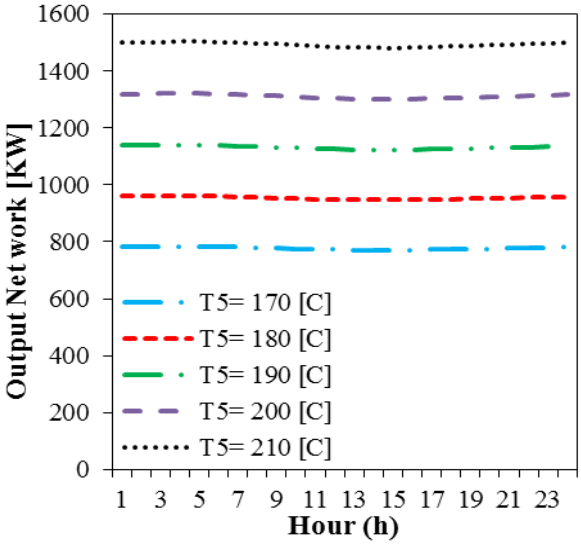
همانطور که در نمودار ۶ د، مشاهده می‌شود افزایش دمای ورودی به توربین از مقدار ۱۱۰ به ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش بازده اگزرژی سیستم شده است، که کاهش بازده اگزرژی را می‌توان مربوط به این دانست که بازده اگزرژی و کار کل سیستم با هم رابطه مستقیم دارد. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به توربین در طول یک روز نسبت به دمای محیط بر روی بازده اگزرژی سیستم نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، بازده اگزرژی سیستم بیشتر می‌شود و کمترین میزان بازده اگزرژی سیستم در ساعت ۵ صبح محاسبه شده است.

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

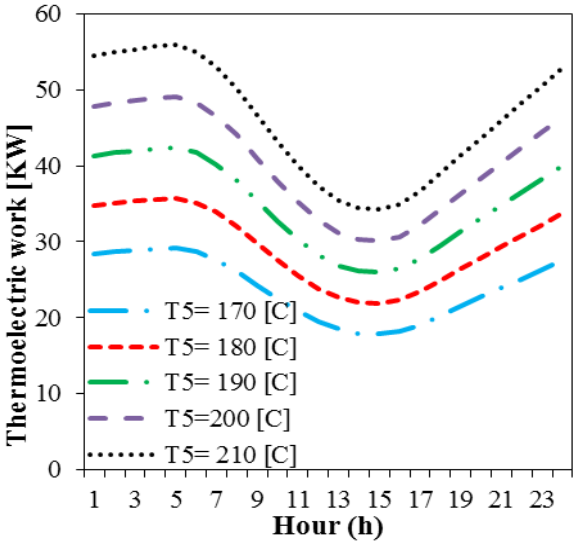
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

همان‌طور که در نمودار ۷ الف، مشاهده می‌شود، در می‌یابیم که افزایش دمای ورودی بـه اواپراتـور از میـزان ۱۷۰ بـه ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد، باعث افزایش کار خالص کل سیستم شده است. علت این است که با افزایش دمای اواپراتـور، آنتـالپی ورودی به توربین سیکل ارگانیک رانکین افزایش یافته است و در نتیجه کار کل با افزایش آنتالپی، افـزایش مـی‌یابـد. همچنـین نتـایج بررسی دمای ورودی به اواپراتور در طول یک روز نسبت به دمای محیط شهر بندرعباس نشان داد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار تولیدی سیستم کمتر می‌شود و بیشترین توان تولیدی سیستم در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

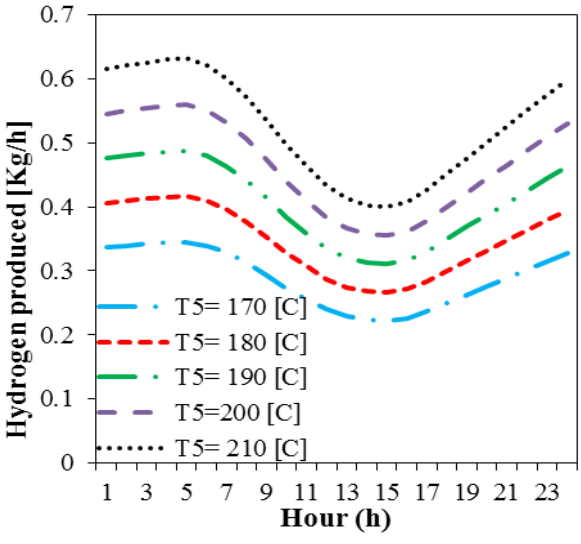
در نمودار ۷ ب، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش دمـای ورودی بـه اواپراتـور از میـزان ۱۷۰ بـه ۲۱۰ درجـه سانتی‌گراد، باعث افزایش کار ترموالکتریک شده است. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به اواپراتور در طـول گـرم‌تـرین روز شهر بندرعباس نسبت به دمای محیط نشان می‌دهد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر مـی-شویم، کار ترموالکتریک کمتر شده و بیشترین توان تولیدی ترموالکتریک در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، بـه‌دسـت آمده است.



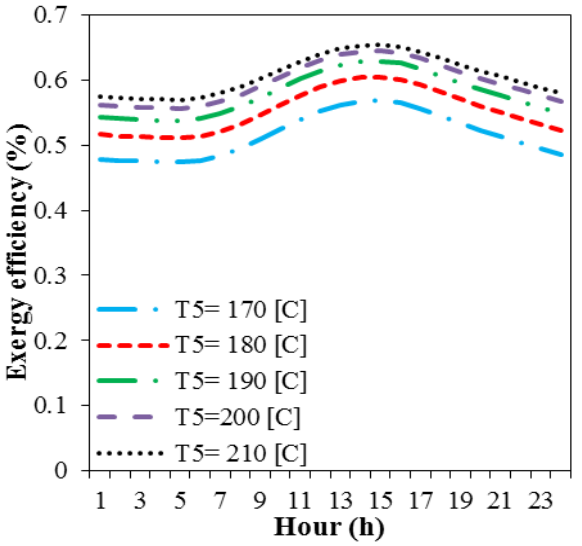
الف. تاثیر دمای ورودی به اواپراتور بر روی کار خالص کل



ب. تاثیر دمای ورودی به اواپراتور بر روی کار ترموالکتریک



ج. تاثیر دمای ورودی به اواپراتور بر روی هیدروژن تولیدی

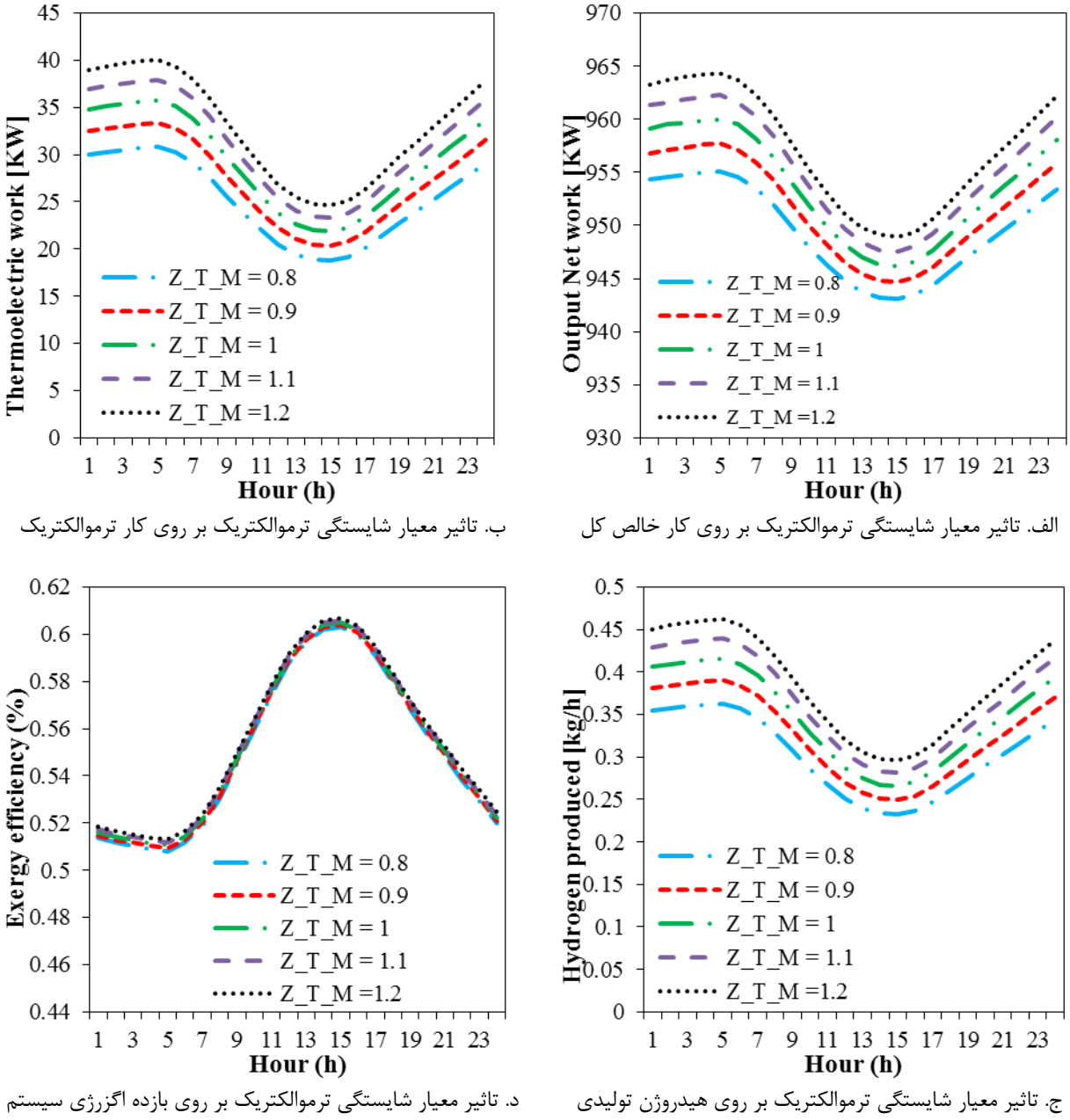


د. تاثیر دمای ورودی به اواپراتور بر روی بازده اگزرژی سیستم

شکل ۷- تاثیر دمای ورودی به اواپراتور بر روی خروجی‌های سیستم در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

در نمودار ۷ ج، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افـزایش دمـای ورودی بـه اواپراتـور از میـزان ۱۷۰ بـه ۲۱۰ درجـه سانتی‌گراد، باعث افزایش هیدروژن تولیدی سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به اواپراتور در طـول گـرم-ترین روز نسبت به دمای محیط نشان داد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر شده، هیـدروژن تولیدی کمتر شده و بیشترین تولید هیدروژن در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.



الف. تاثیر معیار شایستگی ترموالکتریک بر روی کار خالص کل

ب. تاثیر معیار شایستگی ترموالکتریک بر روی کار ترموالکتریک

ج. تاثیر معیار شایستگی ترموالکتریک بر روی هیدروژن تولیدی

د. تاثیر معیار شایستگی ترموالکتریک بر روی بازده اگزرژی سیستم

شکل ۸- تاثیر معیار شایستگی ترموالکتریک بر روی خروجی‌های سیستم در گرم‌ترین روز سال شهر بندرعباس.

همانطور که در نمودار ۷ د، مشاهده می‌شود افزایش دمای ورودی به اواپراتور از میـزان ۱۷۰ بـه ۲۱۰ درجـه سـانتی‌گـراد، باعث افزایش بازده اگزرژی سیستم شده است، که افزایش بازده اگزرژی را می‌توان مربوط به این دانست که بازده اگزرژی و کار کل سیستم، با هم رابطه مستقیم دارد. همچنین نتایج بررسی دمای ورودی به اواپراتور در طول یک روز نسبت به دمای محیط

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

بر روی بازده اگزرژی سیستم نشان داده است که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، بازده اگزرژی سیستم بیشتر می‌شود و کمترین میزان بازده اگزرژی سیستم در ساعت ۵ صبح محاسبه شده است.

در ادامه به بررسی تاثیر معیار شایستگی ترموالکتریک بر روی کار خالص سیستم، کار ترموالکتریک، هیدروژن تولیدی و بازده اگزرژی بررسی شده است. مواد ترموالکتریکی بر اساس معیار شایستگی، طبقه‌بندی می‌شوند و توانایی ماده برای تولید برق ترموالکتریکی با معیار شایستگی که یک عدد بدون بی‌بعد است، ارتباط دارد.

همان‌طور که در نمودار ۸ الف، مشاهده می‌شود، در می‌یابیم که افزایش معیار شایستگی ترموالکتریک از میزان ۰٫۸ به ۱٫۲، باعث افزایش کار خالص سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی معیار شایستگی ترموالکتریک در طول یک روز نسبت به دمای محیط شهر بندرعباس نشان داد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار تولیدی سیستم کمتر می‌شود و بیشترین توان تولیدی سیستم در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

در نمودار ۸ ب، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش معیار شایستگی ترموالکتریک از میزان ۰٫۸ به ۱٫۲، باعث افزایش کار ترموالکتریک شده است. همچنین نتایج بررسی معیار شایستگی ترموالکتریک در طول گرم‌ترین روز شهر بندرعباس نسبت به دمای محیط نشان داده که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، کار ترموالکتریک کمتر شده و بیشترین توان تولیدی ترموالکتریک در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

در نمودار ۸ ج، نمایش داده شده است، در می‌یابیم که افزایش معیار شایستگی ترموالکتریک از میزان ۰٫۸ به ۱٫۲، باعث افزایش هیدروژن تولیدی سیستم شده است. همچنین نتایج بررسی معیار شایستگی ترموالکتریک در طول گرم‌ترین روز نسبت به دمای محیط شهر بندرعباس نشان داد که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر شده، هیدروژن تولیدی کمتر شده و بیشترین تولید هیدروژن در ساعت ۵ صبح که هوا خنک‌تر می‌باشد، به‌دست آمده است.

همانطور که در نمودار ۸ د، مشاهده می‌شود افزایش معیار شایستگی ترموالکتریک از میزان ۰٫۸ به ۱٫۲، باعث افزایش بازده اگزرژی سیستم شده است، که افزایش بازده اگزرژی را می‌توان مربوط به این دانست که بازده اگزرژی و کار کل سیستم، با هم رابطه مستقیم دارد. همچنین نتایج بررسی معیار شایستگی ترموالکتریک در طول گرم‌ترین روز نسبت به دمای محیط بر روی بازده اگزرژی سیستم نشان داده است که هرچه هوا گرم‌تر می‌شود و به ساعت ۱۵ (۳ بعداز ظهر) نزدیک‌تر می‌شویم، بازده اگزرژی سیستم بیشتر می‌شود و کمترین میزان بازده اگزرژی سیستم در ساعت ۵ صبح محاسبه شده است.

نتایج این بررسی‌ها نشان داد که، پارامترهای معیار شایستگی ترموالکتریک، دبی جرمی ورودی به اواپراتور، دمای ورودی به اواپراتور، بازده پمپ و بازده توربین تاثیرات مثبتی بر روی افزایش خروجی‌های سیستم داشته است.

۵-۱- مطالعه موردی- شهر بندرعباس

بندرعباس مرکز استان هرمزگان است. شهر بندرعباس که در جنوب استان هرمزگان واقع شده از شمال به ارتفاعات و کوه‌ها و از جنوب به دریا منتهی شده است. تقریبا سه فصل از چهار فصل سال در بندر عباس تابستان است و آب‌وهوای مطلوب و بهاری دارد. در شکل ۹ موقعیت بندرعباس بر روی نقشه ایران آورده شده است.

به‌دلیل موقعیت مناسب بندرعباس از لحاظ پتانسیل مناسب زمین گرمایی و با توجه به وجود شرایط مناسب و مدنظر این پژوهش، شهر بندرعباس جهت مطالعه انتخاب شد.

در ادامه برای شهر بندرعباس تغییرات دمای هوای در طول سال به‌صورت ساعتی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. اطلاعات شهر بندرعباس از نرم‌افزار متانورم استفاده شده است (softwareMeteoNorm).

دمای محیط را می‌توان به‌عنوان عاملی مهم و تاثیرگذار بر توان و انرژی خروجی سیستم‌های تجدیدپذیر دانست.

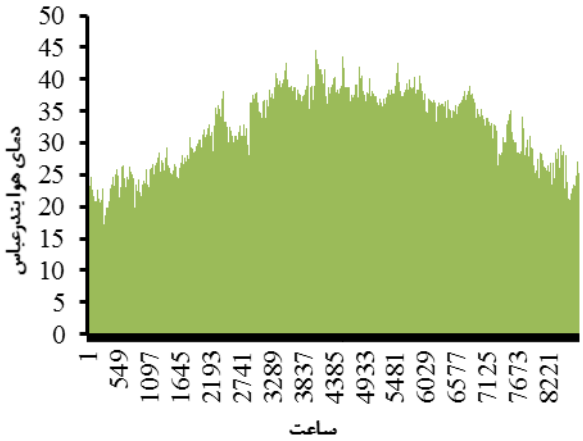
میزان کار کل خروجی سیستم در یک سال، کار کل ترموالکتریک در یک سال و هیدروژن تولیدی در یک سال برای شهر بندرعباس نسبت به تغییرات دمای محیط در جدول ۴ آمده است.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]



شکل ۹- موقعیت بندرعباس بر روی نقشه ایران.



شکل ۱۰- تغییرات دمای هوای بندرعباس در طول سال به‌صورت ساعتی (softwareMeteoNorm).

جدول ۴: خروجی‌های سیستم در یک سال نسبت به تغییرات دمای محیط شهر بندرعباس.

	کار کل خروجی	کار ترموالکتریک	هیدروژن تولیدی
جمع کل	۳۵۲۸۱۶,۲ کیلووات	۱۵۲۰۴,۷۶ کیلووات	۱۷۴,۹۱۲۶ کیلوگرم بر ساعت

۵-۲- تحلیل خروجی سیستم حاضر نسبت به نیاز مردم

منجذب و حاجی ابولی در سال ۱۳۹۴ [۵] بیان کرد که، مصرف برق خانگی براساس آمارهای آژانس بین‌المللی انرژی، در سال ۲۰۱۰، هر خانواده ایرانی دارای مصرف سرانه حدود ۲۴۳۱ کیلووات ساعت در ماه می‌باشد، که مجموع مصرف برق هر خانواده در طول سال برابر با ۲۹۱۷۲ کیلووات است.

با توجه به خروجی سیستم زمین گرمایی کار حاضر که میزان تولید کار خروجی در یک سال برای شهر بندرعباس به میزان ۳۵۲۸۱۶,۲ کیلووات به‌دست آمد، سیستم حاضر می‌تواند نیاز انرژی برق حدودا ۱۲ خانواده ایرانی را در طول سال تامین نماید.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به تحلیل انرژی، اگزرژی یک سیستم تولید چندگانه انرژی بر مبنای انرژی زمین گرمایی پرداختیم. سیستم مورد بررسی متشکل از زیرسیستم‌های زمین گرمایی، سیکل ارگانیک رانکین و الکترولایزر PEM و استفاده از ترموالکتریک است. سیال ارگانیک مورد استفاده در سیکل ارگانیک رانکین شامل مبرد R123 است. محصولات این سیستم تولید چندگانه

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

انرژی شامل برق و هیدروژن است. جهت مدلسازی سیستم مورد بررسی و همچنین به‌دست آوردن نتایج حاصل از تحلیل سیستم از نرم‌افزار ترمودینامیکی حل معادلات مهندسی (EES) استفاده شد. با استفاده از دمای محیط شهر بندرعباس برای گرم‌ترین روز نتایج محاسبه و بررسی شدند. طبق بررسی‌های به عمل آمده از پارامترهای تاثیرگذار بر روی خروجی‌های سیستم می‌توان از بازده توربین، دمای ورودی به اواپراتور، معیار شایستگی ترموالکتریک، بازده پمپ و دبی جرمی ورودی به اواپراتور نام برد. همچنین نتایج نشان داد که سیستم زمین گرمایی کار حاضر در یک سال نسبت به دمای محیط شهر بندرعباس می‌تواند به میزان ۳۵۲۸۱۶,۲ کیلووات در سال توان تولید کند و در نتیجه این سیستم می‌تواند نیاز انرژی برق حدودا ۱۲ خانواده ایرانی را در طول سال تامین نماید.

فهرست علائم

دمای محیط (°C)	T_0	معیار ترموالکتریک	ZTM
فشار محیط (P)	P_0	کار، KW	W
بازده پمپ	η_{pump}	**مخفف**	
بازده توربین	η_{turbin}	سیکل ارگانیک رانکین	ORC
پینچ پوینت اواپراتور (°C)	pp_{evva}	ترموالکتریک	TEG
نرخ هزینه ($/h)	$\dot{Z}$	اواپراتور	Eva
نرخ دبی جرمی، kg/h	$\dot{m}$	اگزرژی	ex
اگزرژی	%	اتلاف اگزرژی	ED

مراجع

[1] L. Jiang, L. W. Wang, C. Z. Liu, R. Z., Wang, Experimental study on a resorption system for power and refrigeration cogeneration. Energy, Vol. 97, No. 0, pp. 182-190, (2016).

[2] H. Jouhara, A. Żabnieńska-Góra, N. Khordehgah, Q. Doraghi, Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications, International Journal of Thermofluids, Volume 9, (2021) 100063.

[۳] رنجبر، سیدفرامرز، نعمتی، آرش، کلاهی، محمدرضا، (۱۳۹۷)، تحلیل ترمودینامیکی و بهبود عملکرد چرخه‌ی تولید توان زمین-گرمایی ترکیبی رانکین آلی و فلش با استفاده از سیال کاری زئوتروپیک در چرخه‌ی رانکین آلی، مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی۸۳، جلد۴۸، شماره۲، صفحه۱۳۱-۱۳۸.

[۴] نعمتی، آرش، نامی، حسین، یاری، مرتضی، رنجبر، فرامرز، (۱۳۹۷)، تحلیل انرژی و اگزرژی عملکرد یک سیستم ترموالکتریک دو مرحله‌ای با اهداف گرمایش و سرمایش، نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۰، شماره ۲، صفحات ۳۷۷ تا ۳۸۴.

[5] H.Shen, H. Lee, S. Han, Optimization and fabrication of a planar thermoelectric generator for a high-performance solar thermoelectric generator, Current Applied Physics, Volume 22, Pages 6-13, (2021).

[6] P. Lu, X. Luo, J. Wang, J. Chen, Y. Liang, Z. Yang, C. Wang, C. Chen, Thermo-economic design, optimization, and evaluation of a novel zeotropic ORC with mixture composition adjustment during operation, Energy Conversion and Management, Volume 230, (2021) 113771.

[7] F. Ahmadi Boyaghchi, M. Chavoshi, V. Sabeti, Multi-generation system incorporated with PEM electrolyzer and dual ORC based on biomass gasification waste heat recovery: Exergetic, economic and environmental impact optimizations, Energy 145, (2018) 38e51.

[8] P. Heidarnejad, H. Genceli, M. Asker, S. Khanmohammadi, A comprehensive approach for optimizing a biomass assisted geothermal power plant with freshwater production: Techno-economic and environmental evaluation, Energy Conversion and Management 226, (2020) 113514.

[۹] ذبیح الله، شکیلا، رفیعی، دنیز، ترابی، فرشاد، (۱۳۹۹)، انرژی زمین‌گرمایی و ترکیب آن با انرژی‌های تجدیدپذیر دیگر در سیستم‌های تولید هم‌زمان برق، سرما و گرما، مجله علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران، دوره ۲۹، شماره ۵، شماره پیاپی ۱۳۴، صفحه ۷۹-۸۹.

[10] S. Hu, Z. Yang, J. Li, , Y. Duan, Thermo-economic optimization of the hybrid geothermal-solar power system: A data-driven method based on lifetime off-design operation, Energy Conversion and Management 229, (2021) 113738.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

[11] E. Assareh, S. M. Alirahmi, P. Ahmadi, A Sustainable model for the integration of solar and geothermal energy boosted with thermoelectric generators (TEGs) for electricity, cooling and desalination purpose, Geothermics 92, (2021) 102042.

[12] 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, Volume 45, Issue 56, (2020), Pages 31555-31573.

[13] H. Kianfard, S. Khalilarya, S. Jafarmadar, Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC, Energy Convers. Manag., vol. 177, (2018), pp. 339–349.

[14] X. Zhang, , et al., 2019, Conventional and energy level based exergoeconomic analysis of biomass and natural gas fired polygeneration system integrated with ground source heat pump and PEM electrolyzer, Volume 195, (2019), Pages 313-327.

[۱۵] منجذب، محمد رضا، حاجی ابولی، سروش، (۱۳۹۴)، برآورد مصرف بهینه برق خانگی ایران به روش مقایسه‌ای، فصلنامه تحقیقات مدلسازی اقتصادی، شماره ۲۱.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]

چکیده انگلیسی:

Analysis of a multiple energy production system based on geothermal energy to generate clean electricity and hydrogen

Ehsan Farhadi, Ehsanolah Assaerh*

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

Received: February 2021, Accepted: June 2021

Abstract

In this study, we analyzed the energy, exergy of a multiple energy production system based on geothermal energy. The system under study consists of geothermal subsystems, Rankin organic cycle and PEM electrolyzer and thermoelectric application. The organic fluid used in the Rankin organic cycle contains refrigerant R123. The products of this system produce multiple energy, including electricity and hydrogen. Thermodynamic software for solving engineering equations (EES) was used to model the studied system and also to obtain the results of system analysis. The results were calculated and evaluated using the ambient temperature of Bandar Abbas for the hottest day. According to the studies of the parameters affecting the system outputs, we can name the turbine efficiency, inlet temperature to the evaporator, thermoelectric suitability criterion, pump efficiency and mass flow inlet to the evaporator. The results also showed that the current work geothermal system in a year compared to the ambient temperature of Bandar Abbas can produce 352816.2 kWh of power per year and as a result this system can meet the electricity needs of about 12 Iranian families during the year.

Key words: Geothermal energy, hydrogen, thermoelectric, exergy.

*corresponding author: **assareh@iaud.ac.ir**

Cite this article as: Ehsan Farhadi, Ehsanolah Assaerh, Analysis of a multiple energy production system based on geothermal energy to generate clean electricity and hydrogen. Journal of Energy Conversion, 2021, 8(2), 15-33.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.2.3.9]