

به نام خالق هستی



دانشکده مهندسی مکانیک

اعتبارسنجی داده‌های حاصل از تحلیل انرژی، انرژی و انرژی - اقتصادی

یک سیکل ترکیبی کلکتور خورشیدی، برایتون، رانکین

و تبرید تراکمی همراه با ترموالکتریک.

پروژه درس بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی

هادی نعمتی مقدم

میلاذ اسفندیار

استاد مربوطه:

دکتر آیت قره‌قانی

تیر ماه ۱۴۰۱

چکیده

در این مطالعه، یک کلکتور خورشیدی سهموی ترکیبی از سیستم تولید توان و برودت همراه با مولد ترموالکتریک (CPR-PTSC With TEG) پیشنهاد شده است. سیستم پیشنهادی از طریق آنالیزهای انرژی، انرژی و انرژی-اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته و تاثیر مولدهای ترموالکتریک بر توان تولیدی بررسی شده است. در ادامه نیز داده‌های حاصل به کمک کد متلب فایل پیوست با داده‌ها و نمودارهای موجود در مقاله اعتبارسنجی شده است. باتوجه به نتایج مشخص شده است که الصاق واحدهای ترموالکتریک به سیستم، عملکرد انرژی سیستم را با نرخ تخریب انرژی ۸۰۳.۴ کیلووات بهبود می‌بخشد. در حالی که همین کمیت در سیستم بدون واحدهای ترموالکتریک ۸۲۱.۳۸ محاسبه شده است. نتیجه تجزیه و تحلیل پارامتریک نشان داد که پارامترهای مختلف سیستم اثرات یکسانی بر عملکرد سیستم کلکتور خورشیدی همراه یا بدون مولد ترموالکتریک دارد. علاوه بر این، با تجزیه و تحلیل انرژی-اقتصادی هزینه تولیدی برای TEG I و II به ترتیب ۰.۶۳۱۱ و ۲.۲۰۲ دلار آمریکا در ساعت تعیین شده است. لازم به ذکر است که حداکثر خطا در اعتبارسنجی داده‌های حاصل ۴.۵۱ درصد گزارش شده است.

کلمات کلیدی: کلکتور خورشیدی، ترموالکتریک، انرژی-اقتصادی، چرخه رانکین، چرخه برایتون، چرخه تبرید تراکمی.

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۷
فصل ۲: تحلیل قانون اول ترمودینامیک	۹
فصل ۳: تحلیل قانون دوم ترمودینامیک	۱۲
فصل ۴: تحلیل اگزرژی-اقتصادی	۱۳
فصل ۵: اعتبارسنجی	۱۵

فهرست جداول

- جدول (۱-۱): متغیرهای ثابت طراحی برای سیستم CPR-PTSC ۸
- جدول (۲-۴): تابع هزینه تجهیزات به کار رفته در سیکل ۱۳
- جدول (۵-۵): مقایسه عدد حاصل اگزرژی استیت به کمک متلب با داده‌های مقاله ۱۷

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): شماتیک کلی اجزای سیکل پیشنهادی ۸
- شکل (۵-۱): نمودار میله‌ای نرخ تخریب اگزورژی بر اساس اجزای سیکل بر اساس داده‌های مقاله ۱۵
- شکل (۵-۲): نمودار میله‌ای نرخ تخریب اگزورژی بر اساس کد متلب ۱۵
- شکل (۵-۳): نمودار دایره‌ای نرخ تخریب اگزورژی بر اساس اجزای سیکل بر اساس داده‌های مقاله ۱۶
- شکل (۵-۴): نمودار دایره‌ای نرخ تخریب اگزورژی بر اساس کد متلب ۱۶

فهرست علائم

Nomenclature			
A	area (m^2)	HEX	heat exchanger
\dot{C}	cost rate (\$/h)	HTF	heat transfer fluid
c	unit cost of exergy (\$/kwh)	PTSC	parabolic trough solar collector
C_p	specific heat (kJ/kgK)	RC	Rankine cycle
D	diameter (m)	TEG	thermoelectric generator
e	specific exergy (kJ/kg)	TIP	turbine inlet pressure
\dot{E}	energy (kW)	VCRC	vapor compression refrigeration cycle
\dot{E}_x	exergy (kW)		
F_R	heat removal factor (–)	<i>Greek letters</i>	
F	collector efficiency factor (–)	η	efficiency (–)
h	specific enthalpy (kJ/kg)	σ	Stefan–Boltzmann constant (W/m^2K^4)
h_c	convection heat transfer coefficient (kW/m^2K)	ε	emittance (–)
h_f	heat transfer coefficient of fluid (kW/m^2K)		
h_r	radiation heat transfer coefficient (kW/m^2K)	<i>Subscripts /superscripts</i>	
k	thermal conductivity (kW/mK)	a	Air
L	length (m)	ap	collector aperture
\dot{m}	mass flow rate (kg/s)	CI	capital investment
Nu	Nusselt number (–)	comp	Compressor
\dot{Q}	heat transfer (kW)	cond	Condenser
r_p	pressure ratio	dest	Destruction
Re	Reynolds number, (–)	evap	Evaporator
s	specific entropy (kJ/kgK)	ex	exergy
\dot{S}	entropy (kW/K)	g	glass cover
S	solar radiation (kW/m^2)	gen	generation
T	temperature ($^{\circ}C$ or K)	i	inner
U_L	overall heat loss coefficient (kW/m^2K)	in	inlet
U_0	overall heat transfer coefficient (kW/m^2K)	o	outer
W	work (kW)	OM	operation and maintenance
\dot{Z}	cost rate of component (\$/h)	out	outlet
		r	receiver tube
<i>Abbreviations</i>		Ref	refrigeration
BC	Brayton cycle	tur	turbine
CDP	compressor discharge pressure	u	useful
CPR	combined power and refrigeration	0	reference conditions
CV	control volume		

فصل ۱: مقدمه

باتوجه به اهمیت بالای انرژی در زندگی روزمره انسان، توجه ویژه به سیستم‌های انرژی با راندمان بالا و طراحی نیروگاه‌های تبدیل انرژی با اثرات زیست محیطی کمتر بسیار مهم است. از سوی دیگر، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر یک رویکرد پاک جهت پاسخگویی به نیازهای روز افزون انرژی جامعه بشری است. با این حال یکی از معایب قابل توجه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر، راندمان حرارتی پایین است. اما ترکیب سیستم‌های مختلف تبدیل انرژی می‌تواند به بهبود راندمان کمک کند. در میان منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی جایگزین امیدوارکننده‌ای برای چالش‌های فعلی بازار انرژی به نظر می‌رسد. تولید توان از انرژی حرارتی خورشیدی به دلیل پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های خورشید مورد توجه بیشتر دانشمندان قرار گرفته است. در میان کلکتورهای خورشیدی مختلف، کلکتور خورشیدی سهموی از نقطه نظر فنی به دلیل محدوده دمای کارکردشان کاربردی‌تر و بالغ‌تر است. میدان کلکتور خورشیدی سهموی شامل تعداد زیادی ردیف موازی با کلکتور خورشیدی سهموی تک محوری است. به طوری که هر کلکتور خورشیدی از یک بازتابنده سهموی خطی تشکیل شده است که تابش خورشید را به یک گیرنده خطی متمرکز می‌کند. به سبب این تمرکز مقدار قابل توجهی انرژی سیال زیاد شده و انرژی حاصل در یک مبدل حرارتی به سیال خروجی از کمپرسور سیکل برایتون انتقال داده می‌شود. سیال با انتالپی زیاد در توربین سیکل برایتون کار انجام داده و توان تولید می‌کند. سیال خروجی از توربین سیکل برایتون همچنان دارای انتالپی قابل توجهی است و همچنان می‌توان از آن جهت گرم کردن سیال خروجی از پمپ در یک سیکل رانکین استفاده کرد. سیال سیکل رانکین با انتالپی بالا در یک توربین تا فشار مشخصی منبسط شده و سپس وارد کندانسور می‌شود. توربین سیکل رانکین مولد کمپرسور سیکل تبرید تراکمی بوده و از آن جهت تولید برودت استفاده می‌شود. لازم به ذکر است از گرمای ناشی از خنک‌کاری کندانسور و خنک‌کن گاز جهت تولید الکتریسیته در مولد ترموالکتریک استفاده می‌شود، سیال استفاده شده در کلکتور خورشیدی "ترمینول ۶۶" و سیال سیکل‌های برایتون، رانکین و تبرید تراکمی "کربن دی اکسید" در نظر گرفته شده است. در جدول ۱-۱ می‌توان پارامترهای به کار رفته در سیکل پیشنهادی را که بیانگر وضعیت عملکردی آن هستند، مشاهده کرد.

Parabolic collectors

Receiver pipe inner diameter	0.08 m
Receiver pipe outer diameter	0.09 m
Glass cover mean diameter	0.15 m
Collector length	350 m
Emissivity of receiver	0.92
Emissivity glass cover	0.87
Solar irradiation	850 W/m ²

Brayton cycle

Turbine isentropic efficiency	0.93
Compressor isentropic efficiency	0.90
CO ₂ temperature at the inlet of the compressor	32 °C
CO ₂ pressure at the inlet of the compressor	8 MPa
CO ₂ pressure at the outlet of the compressor	20 MPa
CO ₂ mass flow rate	2.1 kg/s

Rankine Cycle

Turbine isentropic efficiency	0.93
Pump isentropic efficiency	0.90
CO ₂ pressure at the inlet of the pump	6.13 MPa
CO ₂ pressure at the outlet of the pump	9 MPa
CO ₂ mass flow rate	1.7 kg/s

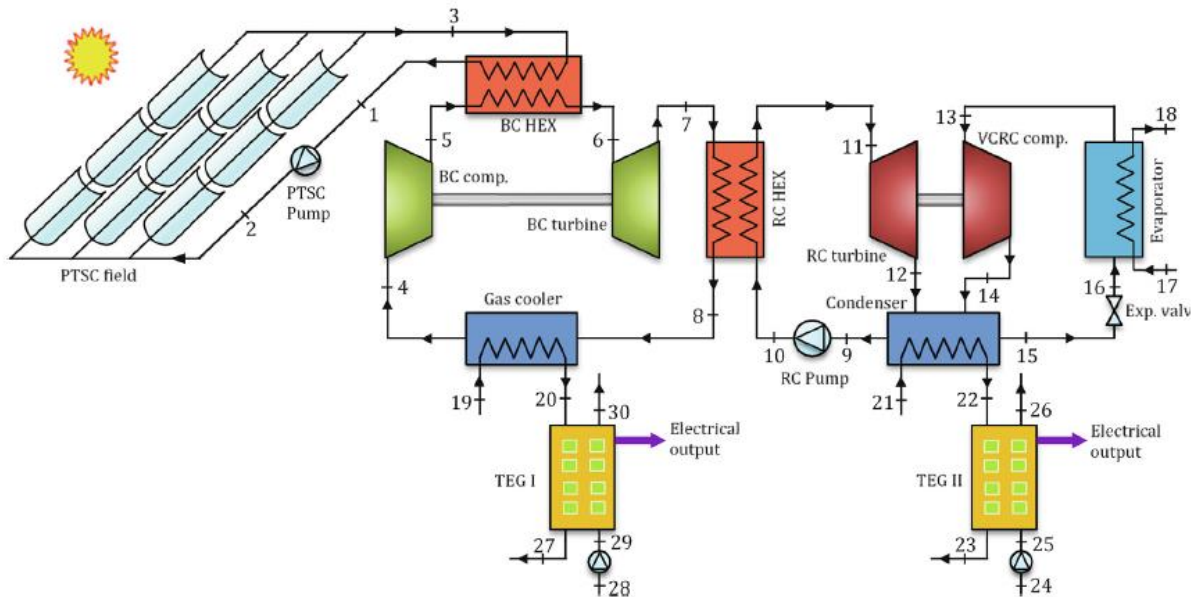
Refrigeration Cycle

Compressor isentropic efficiency	0.95
CO ₂ pressure at the inlet of the compressor	3.5 MPa
CO ₂ pressure at the outlet of the compressor	6.13 MPa
CO ₂ mass flow rate	1 kg/s

Thermoelectric generator

Seebeck coefficient (Z)	350× 10 ⁻⁶ V/K
-------------------------	---------------------------

جدول (۱-۱): متغیرهای ثابت طراحی برای سیستم CPR-PTSC



شکل (۱-۱): شماتیک کلی اجزای سیکل پیشنهادی

فصل ۲: تحلیل قانون اول ترمودینامیک

• مدل سازی کلکتور خورشیدی

در مدل سازی حرارتی PTSC، اتلاف حرارت جابه جایی بین سطح بیرونی لوله و محیط اطراف را می توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$h_{c,g-a} = \frac{Nu_a k_a}{D_g} \quad (۱)$$

که Nu ، عدد ناسلت بوده و به کمک عدد رینولدز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Nu_a = \begin{cases} 0.4 + 0.54 Re^{0.52} & \text{for } 10^{-1} < Re < 10^3 \\ 0.3 Re^{0.6} & \text{for } 10^3 < Re < 5 * 10^4 \end{cases} \quad \begin{matrix} (۲a) \\ (۲b) \end{matrix}$$

K هدایت حرارتی و D قطر است. همچنین اندیس های a و g نیز به ترتیب مخفف هوا و پوشش شیشه ای هستند. بخش دیگری از انتقال حرارت بین پوشش و محیط، انتقال حرارت تشعشعی است که از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$h_{r,g-a} = \varepsilon_g \sigma (T_g + T_a)(T_g^\gamma + T_a^\gamma) \quad (۳)$$

انتقال حرارت تشعشع بین پوشش شیشه ای و گیرنده نیز به صورت زیر بیان می شود:

$$h_{r,r-g} = \frac{(\sigma(T_g + T_r)(T_g^\gamma + T_r^\gamma))}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{A_r}{A_g} \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \quad (۴)$$

در بین پارامترهای فوق تنها مقدار دمای پوشش شیشه ای نامشخص است که با در نظر گرفتن مقدار نزدیک به دمای محیط. این پارامتر را می توان از معادله تعادل انرژی بین گیرنده و محیط محاسبه کرد:

$$T_g = \frac{A_r h_{r,r-g} T_r + A_g (h_{r,g-a} + h_{c,g-a}) T_a}{A_r h_{r,r-g} + A_g (h_{r,g-a} + h_{c,g-a})}$$

لازم به ذکر است که انتقال حرارت ناشی از همرفت بین گیرنده و پوشش شیشه ای به دلیل خالی شدن فضای داخل لوله نادیده گرفته می شود. ضریب تلفات حرارتی کل کلکتور و به دنبال آن انرژی مفید جذب شده به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$U_L = \frac{1}{\left[\frac{A_r}{(h_{c,g-a} + h_{r,g-a})A_g} + \frac{1}{h_{r,r-g}} \right]} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_u = F_R [SA_{ap} - A_r U_L (T_{in} - T_a)] \quad (8)$$

که در اینجا F_R ، S ، A_{ap} و T_{in} به ترتیب نشان‌دهنده ضریب حذف گرما، تابش خورشیدی، ناحیه دستگاه بدون سایه کلکتور و دمای ورودی ترمینول ۶۶ است. ضریب حذف حرارت از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp\left(\frac{-A_r U_L F'}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (9)$$

که F' نشان‌دهنده ضریب بازده کلکتور بوده و به کمک دو رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F' = U_0 / U_L \quad (10)$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_f D_i} + \left(\frac{D_o \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2k} \right)} \quad (11)$$

که در این معادله h_f ضریب همرفت حرارتی ترمینول ۶۶ بوده و به کمک عدد ناسلت به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$h_f = \frac{Nu_f k_f}{D_i} \quad (12a)$$

$$Nu_f = \begin{cases} 0.023 Re^{0.8} (Pr)^{0.4} & \text{for } Re > 2300 \\ 4.364 & \text{for } Re < 2300 \end{cases} \quad (12b)$$

• مدلسازی سیکل برایتون

جهت تحلیل قانون اول سیکل برایتون، به ترتیب می‌توان برای مبدل حرارتی، توربین، خنک‌کننده گاز و کمپرسور روابط زیر را با توجه به قانون اول ترمودینامیک نوشت:

$$B.C\ HEX \rightarrow \dot{m}_{solar}(h_7 - h_1) = \dot{m}_{bryton}(h_6 - h_5) \quad (13)$$

$$B.C\ Turbine \rightarrow W_{turbine} = \dot{m}_{bryton}(h_6 - h_7) \quad (14)$$

$$Gas\ Cooler \rightarrow \dot{Q}_{out} = \dot{m}_{bryton}(h_8 - h_6) \quad (15)$$

$$B.C\ Comp. \rightarrow W_{Comp.} = \dot{m}_{bryton}(h_5 - h_6) \quad (16)$$

• مدلسازی سیکل رانکین

جهت تحلیل قانون اول سیکل رانکین، به ترتیب می‌توان برای مبدل حرارتی، توربین، کندانسور و پمپ روابط زیر را با توجه به قانون اول ترمودینامیک نوشت:

$$R.C\ HEX \rightarrow \dot{m}_{bryton}(h_7 - h_8) = \dot{m}_{rankine}(h_{11} - h_{10}) \quad (17)$$

$$R.C\ Turbine \rightarrow W_{turbine} = \dot{m}_{Rankine}(h_{11} - h_{12}) \quad (18)$$

$$Condenser \rightarrow \dot{Q}_{out} = \dot{m}_{Rankine}(h_{12} - h_9) \quad (19)$$

$$B.C\ Pump \rightarrow W_{Pump.} = \dot{m}_{rankine}(h_{10} - h_9) = v_9 * (P_{10} - P_9) \quad (20)$$

• مدلسازی سیکل رانکین

جهت تحلیل قانون اول سیکل رانکین، به ترتیب می‌توان برای مبدل حرارتی، توربین، کندانسور و پمپ روابط زیر را با توجه به قانون اول ترمودینامیک نوشت:

$$VC\ Comp. \rightarrow \dot{m}_{rankine}(h_{11} - h_{12}) = \dot{m}_{vc}(h_{14} - h_{13}) \quad (21)$$

$$VC\ Evap. \rightarrow \dot{Q}_{in} = \dot{m}_{vc}(h_{13} - h_{16}) \quad (22)$$

$$Condenser \rightarrow \dot{Q}_{out} = \dot{m}_{vc}(h_{15} - h_{14}) \quad (23)$$

$$Valve \rightarrow h_{15} = h_{16} \quad (24)$$

• مدلسازی ترموالکتریک

جهت تحلیل قانون اول مولدهای ترموالکتریک از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$\eta_{TEG} = \frac{\eta_{carnot}(\sqrt{1 + ZT_m} - 1)}{\sqrt{1 + ZT_m} + \frac{T_L}{T_H}} \quad (25)$$

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (26)$$

$$Q_{ELEGANT} = \dot{m}(\Delta h) \rightarrow \eta_{TEG} = \frac{W_{TEG}}{Q_{ELEGANT}} \quad (27)$$

فصل ۳: تحلیل قانون دوم ترمودینامیک

جهت تحلیل قانون دوم سیستم، کافی است معادله بالانس انرژی را به صورت زیر بنویسیم:

$$\sum Ex_{in} = \sum Ex_{out} + \sum Ex_{dest} \quad (28)$$

$$Ex_Q + \sum m_{in}e_{in} = \sum m_{out}e_{out} + Ex_W + T.S_{gen} \quad (29)$$

مقادیر Ex_Q و Ex_W بیانگر مقدار انرژی منتقل شده به کمک انتقال کار و حرارت و e نیز انرژی مخصوص سیال هستند که از روابط زیر قابل محاسبه می باشند:

$$Ex_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (30)$$

$$Ex_W = W \quad (31)$$

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (32)$$

میزان انرژی دریافتی و تخریب کلکتور خورشیدی نیز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\dot{Ex}_{solar} = SA \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right)^4 - \frac{4}{3} \left(\frac{T_0}{T_{sun}} \right) \right) \quad (33)$$

$$\dot{Ex}_u = \frac{\dot{Q}_u}{T_{out} - T_{in}} \left((T_{out} - T_{in}) - T_0 \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \right) \quad (34)$$

فصل ۴: تحلیل اگزرژی-اقتصادی

تجزیه و تحلیل اگزرژی-اقتصادی شاخه‌ای از مهندسی است که تحلیل قانون دوم ترمودینامیک را با اصول اقتصادی ترکیب می‌کند. این نوع تحلیل به طراح کمک می‌کند تا سیستم‌های تبدیل انرژی حرارتی را از نظر عملکرد انرژی و اقتصادی بهبود ببخشد. به طور کلی این تحلیل شامل سه مرحله است:

- تحلیل اگزرژی
- هزینه‌یابی اگزرژی
- ارزیابی اگزرژی-اقتصادی

تحلیل اگزرژی در قسمت قبلی بررسی شد، حال کافی است به کمک معادلات زیر هزینه‌یابی اگزرژی و سپس ارزیابی اگزرژی-اقتصادی صورت بگیرد، ابتدا بایست نرخ هزینه اجرای هر کدام از فعالیت‌های مربوط به سیکل محاسبه شود، بدین منظور از جدول ۲-۵ استفاده می‌شود:

Component	Cost function (\$)
PTSC	$Z_{PTSC} = 355A_{PTSC}$
PTSC pump	$Z_{PTSC,pump} = 3540\dot{W}_{PTSC,pump}$
BC compressor	$Z_{BC,HEX} = 10167.5\dot{W}_{BC,comp}^{0.46}$
BC HEX	$\log(Z_{BC,HEX}) = 4.6656 - 0.1557\log(A_{BC,HEX}) + 0.1547(\log(A_{BC,HEX}))^2$
BC turbine	$\log(Z_{BC,tur}) = 2.6259 - 1.4398\log(\dot{W}_{BC,tur}) - 0.1776(\log(\dot{W}_{BC,tur}))^2$
Gas cooler	$\log(Z_{BC,GC}) = 4.6656 - 0.1557\log(A_{BC,GC}) + 0.1547(\log(A_{BC,GC}))^2$
RC HEX	$\log(Z_{RC,HEX}) = 4.6656 - 0.1557\log(A_{RC,HEX}) + 0.1547(\log(A_{RC,HEX}))^2$
RC turbine	$\log(Z_{RC,tur}) = 2.6259 - 1.4398\log(\dot{W}_{RC,tur}) - 0.1776(\log(\dot{W}_{RC,tur}))^2$
RC condenser	$Z_{RC,cond} = 1773(\dot{m}_{RC} + \dot{m}_{Ref})$
RC pump	$Z_{RC,pump} = 3540\dot{W}_{RC,pump}$
VCRC compressor	$Z_{Ref,comp} = 10167.5\dot{W}_{Ref,comp}^{0.46}$
Evaporator	$\log(Z_{evap}) = 4.6656 - 0.1557\log(A_{evap}) + 0.1547(\log(A_{evap}))^2$
TEG I	$Z_{TEGI} = 2000\dot{W}_{TEGI}$
TEG II	$Z_{TEGH} = 2000\dot{W}_{TEGH}$

جدول ۲-۴: تابع هزینه تجهیزات به کار رفته در سیکل

پس از محاسبه نرخ هزینه، جهت دستیابی به هزینه یکسان سازی شده اجزا با استفاده از ضریب بازیافت سرمایه (CRF)، می توان از معادله زیر استفاده کرد.

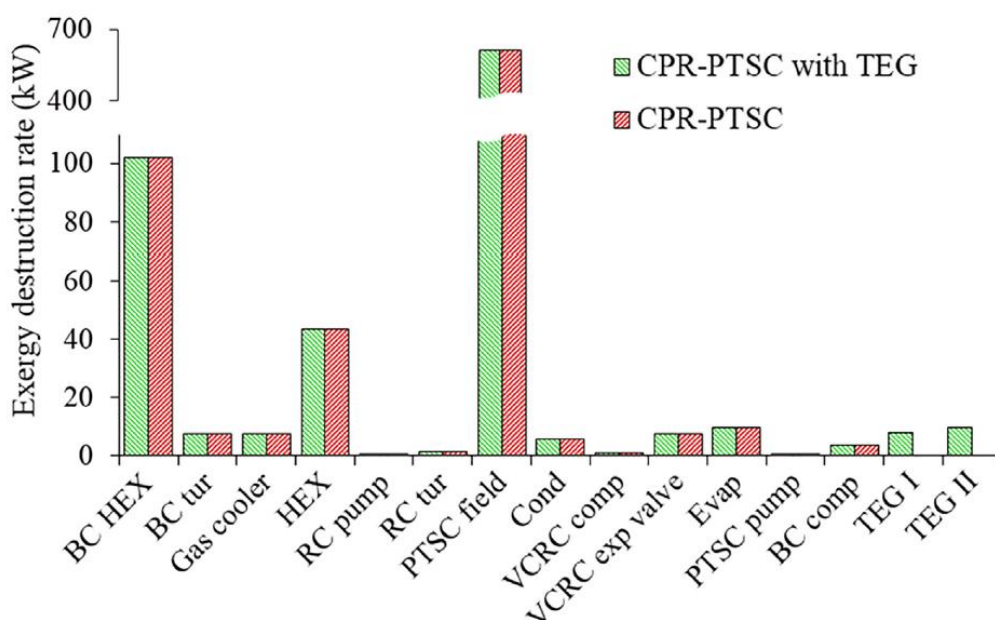
$$Z_k = \frac{Z_k \cdot CRF \cdot \phi}{N \cdot 3600} \quad (35)$$

که phi ضریب تعمیر و نگهداری بوده و مقدار آن برابر ۱.۰۶ است، همچنین N نشان دهنده ساعات کار (۸۰۰۰ ساعت) در یک سال است، ضریب بازیابی سرمایه نیز توسط رابطه زیر با در نظر گرفتن نرخ بهره ۱۲ درصدی و چرخه عمر ۲۰ سال محاسبه می شود:

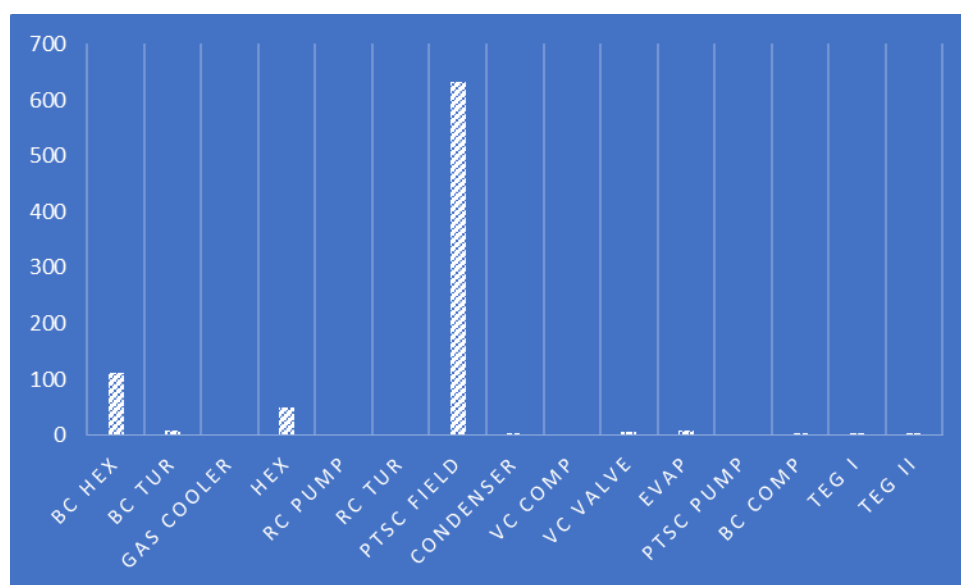
$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (36)$$

فصل ۵: اعتبارسنجی

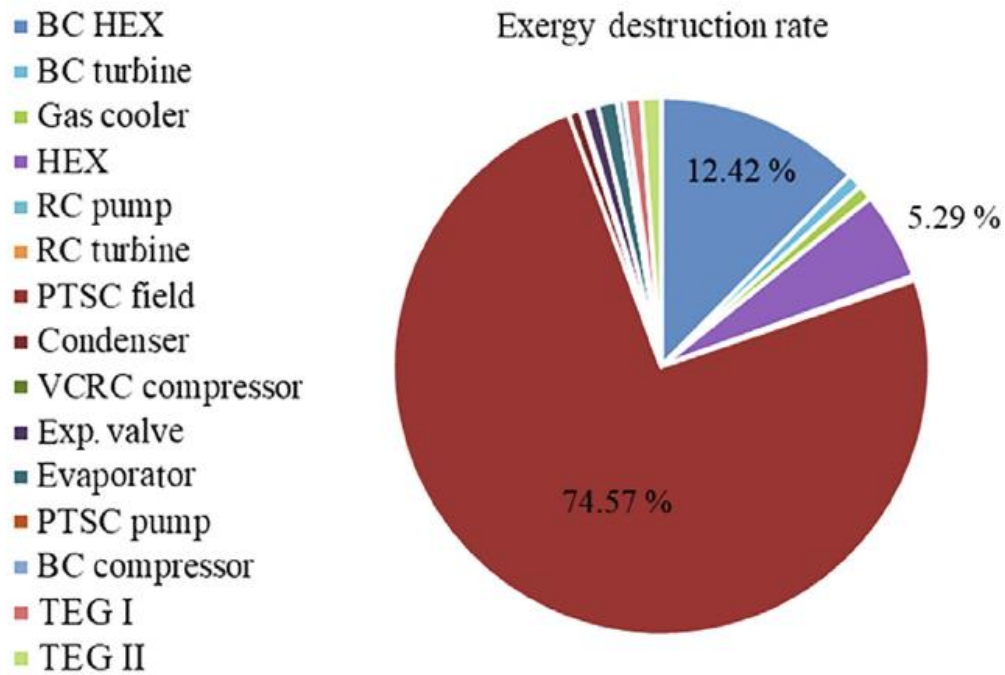
در این قسمت از مقاله به اعتبارسنجی داده‌های حاصل از کد متلب در مقایسه با داده‌های موجود در مقاله پرداخته می‌شود، بدین منظور از نمودار دایره‌ای و ستونی نرخ تخریب انرژی و همچنین مقایسه انرژی هر state استفاده شده است.



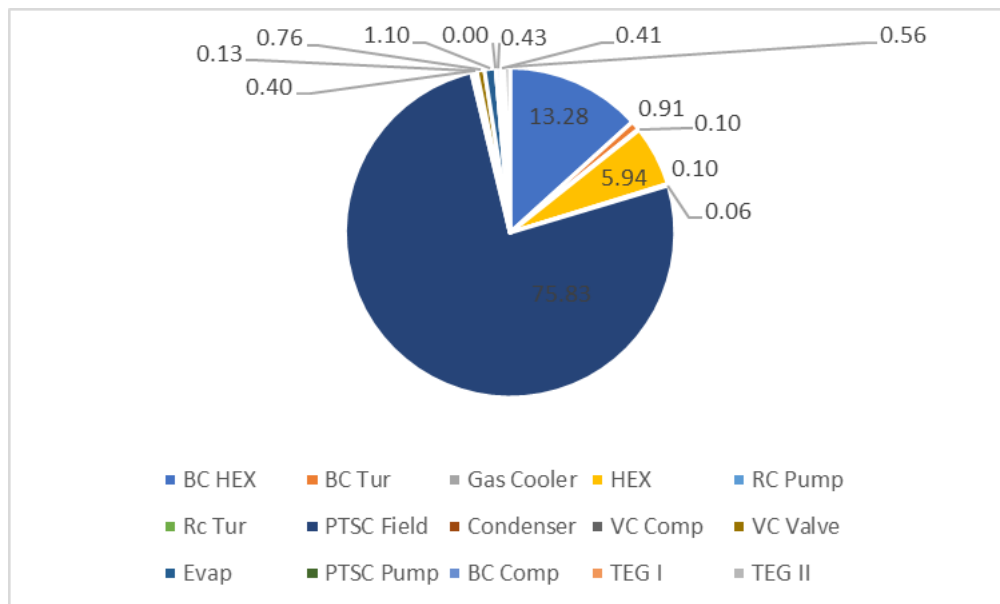
شکل ۵-۱: نمودار میله‌ای نرخ تخریب انرژی بر اساس اجزای سیکل بر اساس داده‌های مقاله



شکل ۵-۲: نمودار میله‌ای نرخ تخریب انرژی بر اساس کد متلب



شکل ۳-۵: نمودار دایره‌ای نرخ تخریب انرژی بر اساس اجزای سیکل بر اساس داده‌های مقاله



شکل ۴-۵: نمودار دایره‌ای نرخ تخریب انرژی بر اساس کد متلب

State Number	Ex (Article Value)	Ex (MATLAB Value)	Error * ۱۰۰٪
۱	۶۹.۸	۶۸.۵۵	-۱.۷۹
۲	۷۱.۵۱	۶۸.۵۹	-۴.۰۸
۳	۳۷۹.۸	۳۸۲.۹۸	۰.۸۴
۴	۴۳۷	۴۵۱.۹۷	۳.۴۳
۵	۴۷۲.۹	۴۸۷.۸۷	۳.۱۷
۶	۶۸۰.۹	۶۹۱.۶۵	۱.۵۸
۷	۵۲۶.۲	۵۳۴.۸۸	۱.۶۵
۸	۴۵۴.۱	۴۷۰.۶۷	۳.۶۵
۹	۳۴۹.۲	۳۶۰.۹۳	۳.۳۶
۱۰	۳۵۵.۱	۳۶۷.۴۱	۳.۴۷
۱۱	۳۸۳.۷	۳۸۲.۱۹	-۰.۳۹
۱۲	۳۵۹	۳۵۹.۳۶	۰.۱۰
۱۳	۱۸۶.۶	۱۹۱.۰۴	۲.۳۸
۱۴	۲۱۰.۳	۲۱۲.۳۲	۰.۹۶
۱۵	۲۰۵.۴	۲۱۲.۳۱	۳.۳۶
۱۶	۱۹۷.۸	۲۰۵.۹۹	۴.۱۴
۲۰	۹.۶۹	۱۰.۱۱	۴.۳۳
۲۲	۸.۹۹	۹.۴۲	۴.۷۸

جدول ۵-۵: مقایسه عدد حاصل اگزورژی استیت به کمک متلب با داده‌های مقاله