

آنالیز حساسیت و تحلیل مشخصه‌های ترمودینامیکی چرخه‌ی برایتون معکوس در سرمایه‌های عمیق کابل‌های ابررسانا

احسان مرادی، دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)؛ e.moradi68@gmail.com

منصور خانکی، عضو هیئت‌علمی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)؛ Khanaki@eng.ikiu.ac.ir

سید عباس سادات سکاکی، عضو هیئت‌علمی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)؛ Sadatsakak@eng.ikiu.ac.ir

مصطفی مافی، عضو هیئت‌علمی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)؛ M.mafi@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

جهت استفاده در کابل‌های ابررسانا صورت پذیرفته است. استفاده از مبردهای چند جزئی [1]، استفاده از سیستم سرمزای پشتیبان [2]، بهبود عملکرد مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در چرخه‌ی کرایونیک [3] و مدل‌سازی ریاضیاتی چرخه‌ی سرمزای برایتون جهت استفاده در کابل‌های ابررسانا [4] از جمله مهم‌ترین تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر، در زمینه‌ی تحلیل و بهبود عملکرد چرخه‌ی سرمزای کرایونیک جهت استفاده در کابل‌های ابررسانا می‌باشند.

لذا در پژوهش حاضر، پس از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حالت بهبودیافته‌ی چرخه‌ی برایتون معکوس با دو مرحله تراکم و مجهز به خنک‌کن میانی، با انجام تحلیل اگزرژی، برخی پارامترهای عملکردی چرخه‌ی سرمزا اعم از کار خالص مصرفی، ضریب عملکرد و میزان تلفات اگزرژی در تجهیزات مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در انتها نیز با انجام آنالیز حساسیت، عدمقطعیت در مقدار توان مصرفی چرخه‌ی سرمزا نسبت به مقدار اغتشاش در نظر گرفته‌شده برای پارامترهای مختلف این چرخه تعیین گردید.

در این تحقیق ابتدا به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی چرخه‌ی سرمایه عمیق برایتون معکوس با استفاده از نرم‌افزار هایسیس پرداخته شد. چرخه‌ی مورد بررسی با تراکم دومرحله‌ای و مجهز به خنک‌کن میانی است. در ادامه با انجام تحلیل اگزرژی، برخی پارامترهای عملکردی چرخه‌ی سرمزا اعم از کار خالص مصرفی، ضریب عملکرد و میزان تلفات اگزرژی در تجهیزات مختلف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که کمپرسورها و اکسپاندر، بیشترین تلفات اگزرژی را به خود اختصاص داده‌اند، در نتیجه، هرگونه اصلاح در راندمان این تجهیزات منجر به کاهش تلفات اگزرژی و افزایش راندمان سیستم سرمزا می‌شود. در انتها نیز با انجام آنالیز حساسیت، عدمقطعیت در مقدار توان مصرفی چرخه‌ی سرمزا نسبت به مقدار اغتشاش در نظر گرفته‌شده برای پارامترهای مختلف این چرخه تعیین گردید. با بررسی مقادیر ضرایب بی‌بعد حساسیت پارامترهای مختلف (NSC) چرخه‌های سرمزا به سهولت می‌توان دریافت که توان مصرفی در تمامی این چرخه‌ها، نسبت به متغیرهای راندمان آدیباتیک کمپرسور و فشار حداکثری مبرد در مقابله با متغیرهای دما، دبی و فشار نیتروژن‌عبوری و همچنین دمای مبرد خروجی از خنک‌کن، حساس‌تر است.

کلمات کلیدی: ابررسانا، کرایونیک، برایتون معکوس، اگزرژی، حساسیت.

۱- مقدمه

ابررساناییک پدیده کوانتوم ماکروسکوپیکی است که برخی مواد مشخص و در دماهای بسیار پایین این خاصیت را از خود نشان می‌دهند. در حالت ابررسانایی مقاومت الکتریکی ماده صفر می‌شود و ماده خاصیت دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند. از آنجایی که ابررسانایی زمانی ظهور می‌کند که دمایادماز دمای بحرانی آن کمتر شود، وجود یک سیستم سرمزای کرایونیک یا قابلیت اطمینان بالا، بازدهی مناسب، ظرفیت سرمادهی مطلوب و هزینه‌ی راه‌اندازی پایین، نیاز اساسی اینسامانه‌ها است. چرخه‌های رایج مورد استفاده در تجهیزات ابررسانا شامل چرخه‌های کرایونیک استرلینگ، ژول-تامسون و برایتون می‌باشند. همان‌طور که اشاره گردید، دمای بحرانی از ماده‌ای به ماده‌ی دیگر متفاوت است، لذا ابررساناها به دودسته‌ی دمای بالا (HTS) و دمای پایین (LTS) تقسیم می‌گردند. در کابل‌های HTS، نیتروژن مایع بین لایه‌های کابل جریان دارد تا دمای لایه‌ی ابررسانا را به محدوده‌ی دمایی ۶۸ کلون برساند و به‌علاوه‌ی عنوانیک عایق بین لایه‌ی مرکزی و لایه‌های بیرونی تر کابل عمل نماید. در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در زمینه‌ی بهبود عملکرد چرخه‌های سرمزای کرایونیک

۲- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی یا مدل‌سازی ریاضی در واقع تبدیل کیفیت‌های فیزیکی و رابطه‌ی متقابل این کیفیت‌ها به کمیت‌های عددی و روابط ریاضی است. شبیه‌سازی فرآیندها، اعمال معادلات موازنه‌ی جرم و انرژی به همراه شرایط تعادل فازها در یک سیستم است که معمولاً جهت سهولت کار به حالت پایای سیستم بسنده می‌شود. در این حالت با اعمال شرایط تعادل ترمودینامیکی، مجموعه معادلاتی وجود خواهد آمد که در کنار معادلات متداول موازنه‌ی جرم و انرژی، مجموعه معادلات همزمانی را تشکیل می‌دهند که در واقع به مدل ریاضی فرآیند تعبیر می‌شود. برنامه‌های شبیه‌سازی فرآیند در واقع بسته‌های نرم‌افزاری هستند که تشکیل و حل این معادلات را مقدور می‌سازند. به‌عبارت‌دیگر، شبیه‌سازی عبارت است از به‌کارگیری مدل‌ها و ایجاد ارتباط بین آن‌ها برای توصیف عملی و علمی شرایط و حالات یک سیستم و تعیین خروجی‌های آن با توجه به داده‌های ورودی. آنچه مسلم است این دقت و میزان انحراف از نتایج تجربی است که ضامن اعتبار و اهمیت یک مدل یا یک شبیه‌ساز است. از این‌رو، در سال‌های اخیر شبیه‌سازهای بسیاری در قالب بسته‌های نرم‌افزاری تهیه و به بازار عرضه شده‌اند. به کمک این نرم‌افزارها می‌توان حتی واحدهای پیچیده‌ای را به‌منظور طراحی، توسعه، بهبود عملیات و رفع تنگناها، به‌راحتی و در مدت‌زمان بسیار کوتاهی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی نمود.

۲-۱- معرفی نرم‌افزار

در این پژوهش نرم‌افزار شبیه‌سازی فرآیند هایسیس مورد استفاده قرار گرفته است. در هایسیس عملیات واحد متعدد و گوناگونی مانند انواع مبدل‌های

¹ High Temperature Superconductivity

² Low Temperature Superconductivity

(اگرژی خروجی) به قابلیت انجام کار ورودی (اگرژی ورودی) به سیستم تعریف نمود. البته فرایندهایی که از نظرگاه راندمان اگرژی ایده آل هستند، فرایندهای اقتصادی و منطقی نیستند زیرا هر قدر راندمان اگرژی به ۱۰۰٪ نزدیک تر شود، بازگشت پذیری سیستم بیشتر شده و به تبع آن، نیروی محرکه لازم برای انجام فرایند کاهش می یابد و در نتیجه اندازه تجهیزات فرایندی بزرگ تر می شوند [5].

در تحقیق حاضر، تلفات اگرژی بر پایه موازنه ای اگرژی بین جریان های ورودی و خروجی محاسبه شده اند. با در نظر گرفتن یک حجم کنترل حول هریک از اجزاء سیستم سرمازا، می توان روابط مناسبی را برای محاسبه ی تلفات اگرژی و راندمان اگرژی ارائه کرد.

تلفات اگرژی کل سیستم سرمازا برابر است با مجموع تلفات اگرژی تک- تک اجزاء سیستم شامل کمپرسورها، مبدل های حرارتی و اکسپاندر.

راندمان اگرژی کل سیستم سرمازا را می توان به صورت رابطه ی (۱) تعریف کرد:

$$\mathcal{E}_{Re\ refrigeration\ System} = \frac{\dot{W}_{min}}{\dot{W}_{Actual}} \quad (1)$$

در تعریف فوق، \dot{W}_{min} و \dot{W}_{Actual} به ترتیب، حداقل توان مصرفی و توان مصرفی واقعی سیستم سرمازا هستند. توان مصرفی واقعی سیستم برابر است با:

$$\dot{W}_{Actual} = \dot{W}_C - \dot{W}_{Ex} \quad (2)$$

حداقل توان مصرفی چرخه ی سرمازا را نیز می توان با استفاده از تحلیل اگرژی از طریق رابطه ی (۳) به دست آورد:

$$\dot{W}_{min} = e_{n1} - e_{n2} = 16.994(kW) \quad (3)$$

که این مقدار برابر تغییر اگرژی جریانی نیتروژن مایع در گذر از کلدباکس^۱ است.

۳- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت، ابزاری مناسب جهت شناسایی پارامترهای کلیدی سیستم است که با مطالعه ی نتایج آن می توان پارامترهای حساس و کلیدی سیستم را شناسایی و راهکارهای مناسبی را جهت بهبود مدل سازی و بهینه سازی، ارائه نمود. جهت محاسبه ی عدم قطعیت در پاسخ با توجه به اغتشاشات در نظر گرفته شده برای تمامی متغیرها، نیاز به تعیین ضرایب بی- بعد حساسیت و عدم قطعیت هر متغیر مطابق روابط (۴) و (۵) است [6]:

$$NSC_{Xi} = \left(\frac{\Delta Y_i}{\bar{Y}} \frac{\bar{X}_i}{\Delta X_i} \right)^2 \quad (4)$$

$$NU_{Xi} = \left(\frac{U_{Xi}}{\bar{X}_i} \right)^2 \quad (5)$$

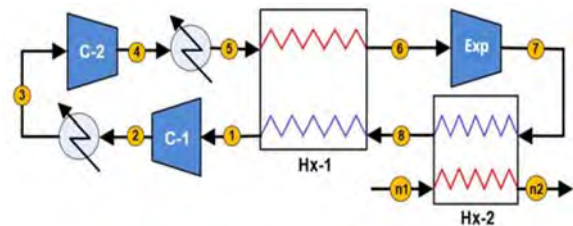
سپس عدم قطعیت از رابطه ی (۶) محاسبه می گردد.

حرارتی، تجهیزات دوار مانند پمپ و کمپرسور، جداکننده ها، برج های تقطیر، راکتورها، عملیات جداسازی جامدات و عملیات منطقی موجود است. به- علاوه عملیات واحدهای خاص را نیز می توان از طریق برنامه نویسی به این نرم افزار اضافه کرد. تعریف دقیق و صحیح روابط ترمودینامیکی حاکم بر بخش های مختلف یک فرآیند، نقش قابل توجهی در صحت و دقت شبیه- سازی صورت گرفته دارد. داده های ترمودینامیکی فرآیند، در نرم افزار هایسیس در قالب یک یا چند بسته ی سیال ذخیره می گردند. هایسیس، دارای تعداد زیاد مدل های خواص فیزیکی است که هر کدام قادر به پیش بینی خواص یک سری از سامانه های مواد در شرایط عملیاتی مختلف می باشند.

۲-۲- توصیف سیستم مورد مطالعه

چرخه ی سرمازا ایرایتون در حالت مبنای یک مرحله تراکم، دارای یک فشار پایین و یک فشار بالا می باشد. عملکرد چرخه هایی با تراکم یک مرحله ای نشان می دهد که این چرخه ها جهت کارکرد در شرایطی که اختلاف دما بین کندانسور و اواپراتور ناچیز باشد، مناسب می باشند.

در نتیجه در فرآیند سرمایه ی کابل های ابرسانا که مقدار بین دمای حداقل و حداکثر چرخه قابل توجه است (حدود ۲۸۰ درجه)، استفاده از چرخه هایی با تراکم تک مرحله ای، ناکاراست. لذا در این پژوهش با افزایش تعداد مراحل تراکم به دو مرحله و به کارگیری خنک کن میانی، چرخه ایرایتون با چیدمان شکل ۱ مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱- نمایش چیدمان اجزاء چرخه ی مورد مطالعه

شرایط عملیاتی چرخه ی سرمازا مورد مطالعه در این تحقیق، مطابق جدول ۱ فرض شده است. لازم به ذکر است که جریان های مختلف مطابق شکل ۱ نام گذاری شده اند.

جدول ۱- شرایط عملیاتی سیستم مورد مطالعه

$P_{n1, n2}$ (kPa)	T_{n2} (K)	T_{n1} (K)	$P_{max, Ref}$ (kPa)	ΔT_{min}	\dot{m}_{N2} (kg/h)	T_{Amb} (K)	P_{Amb} (kPa)
۳۰۰	۶۸	۷۲	۱۱۲۵	۴	۲۵۵۰	۲۹۸٫۱	۱۰۱٫۳

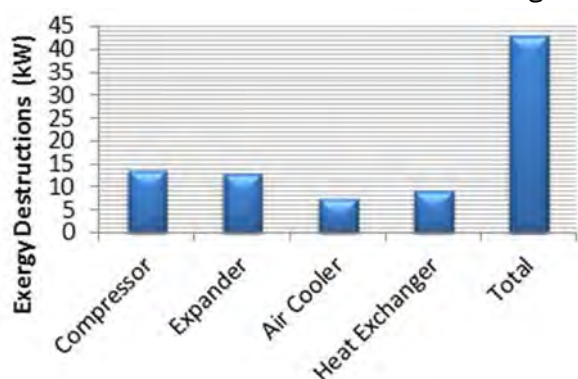
همچنین در شبیه سازی های صورت گرفته، از آفت فشار در کلیه ی تجهیزات صرف نظر و بازدهی آدیاباتیک کمپرسورها برابر ۰٫۷۵ فرض شده است.

۲-۳- تحلیل اگرژی

بر مبنای مفهوم اگرژی می توان یک معیار عملکرد مناسب تری جهت مقایسه سیستم های ترمودینامیکی مختلف پایه ریزی نمود. به طور کلی می- توان بازده اگرژی یا راندمان اگرژی را به صورت قابلیت انجام کار خروجی

^۱Cold Box

شکل ۲ تلفات انرژی تجهیزات موجود در چرخه‌های مذکور را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- تلفات انرژی تجهیزات چرخه‌ی سرمازا

در سیستم سرمازا، توان مصرفی واقعی به شرایط جریان‌های فرآیندی سرد شونده و گرم شونده، شرایط محیط و راندمان کمپرسورها بستگی دارد. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که کمپرسورها، بیشترین تلفات انرژی را به خود اختصاص داده‌اند، در نتیجه، هرگونه اصلاح در راندمان کمپرسورها منجر به کاهش توان مصرفی و افزایش راندمان سیستم سرمازا می‌شود. اختلاف دمای محدود و بار حرارتی، عوامل اصلی تلفات انرژی در مبدل‌های حرارتی هستند. به طوری که هر قدر اختلاف دمای محدود و بار حرارتی در مبدل افزایش می‌یابد، به همان نسبت، تلفات انرژی نیز افزایش می‌یابد.

۲-۴- آنالیز حساسیت

اولین گام در آنالیز حساسیت، مشخص نمودن عدم قطعیت و یا مقدار اغتشاش مورد انتظار در پارامترهای مختلف مدل است. جدول ۴ مقادیر پارامترهای تحمیلی از صورت مسئله به مدل و همچنین اغتشاشات در نظر گرفته شده برای هر متغیر در چرخه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این مقادیر تقریباً برابر با ۱٪ حداکثر مقدار هر متغیر در چرخه سرمازا، فرض شده‌اند.

جدول ۴- مقادیر نامی و اغتشاش پارامترها

متغیر مورد مطالعه	$T_{3,5}$	η_a %	T_{n1}	T_{n2}	\dot{m}_{N2}	P_{N2}	$P_{Max, Ref}$
مقدار نامی (مبنای)	۳۰۰	۷۵	۷۲	۶۸	۲۵۵۰	۳۰۰	۱۱۲۵
اغتشاش ایجاد شده	۱	۰,۷۵	۱	۱	۲۵	۱۰	۱۰

۱: دمای مبرد خروجی از خنک‌کن‌های میانی، ۲: راندمان آدیاباتیکی کمپرسور، ۳: دمای نیتروژن ورودی به کلدباکس، ۴: دمای نیتروژن خروجی از کلدباکس، ۵: دبی نیتروژن عبوری از کلدباکس، ۶: فشار نیتروژن عبوری از کلدباکس

با در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده در جدول ۴ به عنوان مقادیر نامی و استفاده از روش آنالیز حساسیت ارائه شده در قسمت قبل، به سهولت می‌توان ضرایب بی‌بعد حساسیت و عدم قطعیت تمامی پارامترهای مورد نظر را محاسبه نموده و در پایان، عدم قطعیت در توان مصرفی چرخه سرمازا نسبت به اغتشاشات در نظر گرفته شده را به دست آورد. جدول ۵ نتایج آنالیز

$$\left(\frac{U_Y}{\bar{Y}}\right) = \left\{ \sum_{i=1}^N [NSC_{Xi} NU_{Xi}] \right\}^{1/2} \quad (6)$$

که در عبارات فوق X و Y به ترتیب مقادیر نامی ورودی و خروجی، ΔX و ΔY بیانگر اختلاف بین دو اغتشاش ایجاد شده و L مقدار اغتشاش در هر پارامتر می‌باشد.

۴- نتایج و بحث

پس از وارد نمودن اطلاعات مربوط به خطوط جریان و تجهیزات مختلف در محیط نرم افزار هایسیس و انجام مدل سازی از چرخه‌ی مورد نظر، اقدام به بهینه سازی شده است. در این پژوهش، اختلاف دمای محدود در کلیه‌ی مبدل‌های حرارتی به عنوان قیود مسئله و روش Mixed به عنوان روش بهینه سازی انتخاب گردیده‌اند. کار مصرفی خالص چرخه نیز به عنوان تابع هدف تعریف شده است. متغیرهای بهینه سازی شامل فشار حداکثر و حداکثر، فشار میانی، دمای ورودی به کلدباکس و دبی مبرد می‌باشند.

۴-۱- بهینه سازی

با توجه به شرایط عملیاتی ارائه شده در جدول ۱ و سایر پارامترهای معرفی شده، فرآیند بهینه سازی برای چرخه‌ی مذکور صورت پذیرفت. ضریب عملکرد چرخه نیز از رابطه‌ی (۷) قابل محاسبه است.

$$COP = \frac{Q_C}{\dot{W}_{Actual}} \quad (7)$$

جدول ۲، مشخصه‌های ترمودینامیکی چرخه‌ی مورد مطالعه در حالت بهینه را ارائه می‌نماید.

جدول ۲- مشخصه‌ی جریان‌ها در حالت بهینه

جریان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
دما (کلوین)	۲۹۶	۳۷۶	۳۰۰	۳۷۴	۳۰۰	۷۲,۴	۵۶	۶۸
فشار (کیلو پاسکال)	۴۶۳	۷۳۵	۷۳۵	۱۱۲۵	۱۱۲۵	۱۱۲۵	۴۶۳	۴۶۳
دبی جریان مبرد: ۲۹۹ کیلوگرم بر ساعت								

جدول ۳ نیز نتایج تحلیل انرژی و مقادیر ضرایب عملکرد و توان مصرفی چرخه‌ی مورد بررسی را با فرض حجم سرمایه‌ی ۵,۲۰۴ کیلووات در کلدباکس ارائه می‌نماید.

جدول ۳- نتایج تحلیل پارامترهای عملکردی چرخه سرمازا

$\epsilon_{ref-System}$ %	COP	W_{Net} (kW)	I_{Total} (kW)	I_{HX} (kW)	I_{AC} (kW)	I_{Exp} (kW)	I_C^* (kW)
۲۶,۱۲	۰,۰۸۷۲	۵۹,۶۶۰	۴۲,۸۱	۹,۰۴	۷,۳۷	۱۲,۸۵	۱۳,۵۵

* I: تلفات انرژی

حساسیت را برای چرخه‌ی سرمازایمورد مطالعه که با استفاده از روش اغتشاشات بخش قبل به دست آمده‌اند، ارائه می‌نمایند.

جدول ۵- نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مختلف چرخه‌ی مورد مطالعه

ضرایب بی‌بعد	T _{3,5}	η _a %	T _{n1}	T _{n2}	m _{N2}	P _{N2}	P _{Max, Ref}
NSC	۰,۰۱	۱,۲۴۶	۰,۱۷۳۵	۰,۱۵۸۷	۵,۳۲ -۱,۰۴ _x	۶,۳۰ -۱,۰۱۲ _x	۱,۴۲۴۸
NU	۱,۴۰ -۱,۰۳ _x	۱ -۱,۰۴ _x	۲,۰۴ -۱,۰۴ _x	۲,۱۶ -۱,۰۴ _x	۹,۶۱ -۱,۰۵ _x	۱,۱۰ -۱,۰۳ _x	۷,۹ -۱,۰۵ _x
NSC*NU	۱,۴۰ -۱,۰۰ _x	۱,۲۴۶ -۱,۰۴ _x	۳,۵۴۰ -۱,۰۰ _x	۳,۴۳۰ -۱,۰۰ _x	۵,۱۲۰ -۱,۰۸ _x	۷,۰۲ -۱,۰۱۰ _x	۱,۱۲۵ -۱,۰۴ _x

$$\left(\frac{U_Y}{Y}\right) = \left\{ \sum_{i=1}^N [NSC_{X_i} NU_{X_i}] \right\}^{1/2} = 0,179$$

الذکر، راهکارهای مناسبی را جهت بهبود مدل سازی چرخه سرمازا و بهینه سازی پارامترهای آن در اختیار طراح قرار می‌دهد.

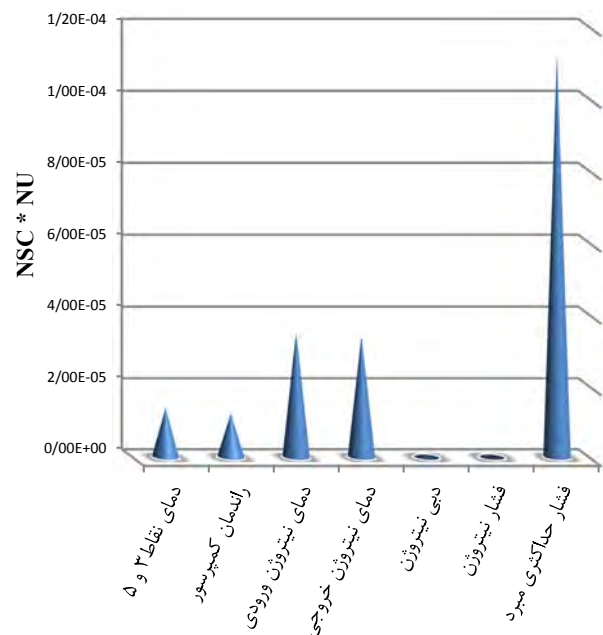
۵- نتیجه گیری

در سیستم سرمازا، توان مصرفی واقعی به شرایط جریان‌های فرآیندی سرد شونده و گرم شونده، شرایط محیط و راندمان کمپرسورها بستگی دارد. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که کمپرسورها، بیشترین تلفات انرژی را به خود اختصاص داده‌اند، در نتیجه، هرگونه اصلاح در راندمان کمپرسورها منجر به کاهش توان مصرفی و افزایش راندمان سیستم سرمازا می‌شود. با بررسی مقادیر ضرایب بی‌بعد حساسیت پارامترهای مختلف (NSC) چرخه‌ی سرمازا به سهولت می‌توان دریافت که توان مصرفی، نسبت به متغیرهای راندمان آدیاباتیک کمپرسور و فشار حداکثری مبرد در مقابله با متغیرهای دما، دبی و فشار نیتروژن ورودی و خروجی همچنین دمای مبرد خروجی از خنک‌کن، حساس‌تر می‌باشد. فشار و دبی نیتروژن عبوری از کلدباکس به دلیل ثابت بودن حجم سرمایه‌ش کاملاً بر توان بی‌تأثیر بوده و نسبت به پارامترهای دیگر حساسیتی نزدیک به صفر دارد. نتیجه فوق‌الذکر، راهکارهای مناسبی را جهت بهبود مدل سازی چرخه سرمازا و بهینه سازی پارامترهای آن در اختیار طراح قرار می‌دهد.

فهرست علائم

P	فشار (kPa)
T	دما (K)
m	دبی (kg/h)
I	تلفات انرژی (kW)
η	راندمان
Amb	محیط
Ref	مبرد
N2	جریان نیتروژن
C	کمپرسور
Ex	اکسپاندر
HX	مبدل‌های حرارتی
AC	خنک‌کن‌های میانی

نتیجاً ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهند که عدم قطعیت در توان مصرفی چرخه‌ی سرمازای شماره ۲ نسبت به مقدار اغتشاش در نظر گرفته شده برای پارامترهای مختلف برابر با ۱,۷۹٪ است. هر قدر عدم قطعیت در پاسخ یک مدل نسبت به اغتشاشات وارده به آن بیشتر باشد به تبع آن، سطح دقت تجهیزات مورد نیاز جهت اندازه‌گیری مقادیر متغیرهای ورودی به مدل، افزایش می‌یابد [7]. علت افزایش دقت مورد نیاز تجهیزات اندازه‌گیری با افزایش عدم قطعیت در پاسخ مدل ارائه شده برای یک سیستم، نیاز این سیستم‌ها به حلقه‌های کنترلی دقیق‌تر و کارآمدتر جهت حفظ پایداری سیستم حول نقطه کارکرد نامیان‌ها می‌باشد. شکل ۳ حساسیت توان خروجی نسبت به پارامترهای مورد بررسی را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- حساسیت توان خروجی نسبت به پارامترهای مورد بررسی

با بررسی مقادیر ضرایب بی‌بعد حساسیت پارامترهای مختلف (NSC) چرخه‌های سرمازا به سهولت می‌توان دریافت که توان مصرفی در تمامی این چرخه‌ها، نسبت به متغیرهای راندمان آدیاباتیک کمپرسور و فشار حداکثری مبرد در مقابله با متغیرهای دما، دبی و فشار نیتروژن ورودی و خروجی همچنین دمای مبرد خروجی از خنک‌کن، حساس‌تر می‌باشد. نتیجه فوق-

optimization of reverse brayton cycles of different configurations for cryogenic application, AIP Conference Proceedings, 2012.

[۵] مافی، مصطفی، توسعه‌ی مدل مناسب خنک کاری در سیستم‌های جداسازی صنایع پتروشیمی و بهینه‌سازی ترمودینامیکی اقتصادی آن با آنالیز ترکیبی پینچ و اکزرژی، رساله دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، ۱۳۸۸.

مراجع

- [6] A. Saltelli, K. Chan and E. M. Scott, *Sensitivity Analysis*, England: John Siley & Sons Ltd., 2000.
- [7] B. A. Qureshi and S. M. Zubair, *A comprehensive design and rating study of evaporative coolers and condensers. Part II: Sensitivity Analysis, International Journal of Refrigeration*, vol. 26, pp. 659-668, 2006.

- [1] J. Lee, G. Hwang, S. Jeong, B. J. Park and Y. H. Han, *Design of high efficiency mixed refrigerant Joule- Thomson refrigerator for cooling HTS cable, Cryogenics*, pp. 408-414, 2011.
- [2] R. C. Lee, A. Dada, E. L. Garcia and S. Ringo, *Performance testing of a cryogenic refrigeration system for HTS cables, Cryogenic Engineering*, Colorado, 2005.
- [3] J. H. Park, Y. H. Kwon and Y. S. Kim, *The design and fabrication of a Reverse Brayton cycle cryocooler system for the high temperature superconductivity cable cooling, Cryogenics*, no. 45, pp. 71-75, 2005.
- [4] J. R. Streit and A. Razani, *Second-law analysis and*