



آنالیز ترمودینامیکی و اقتصادی چرخه‌های اکسپاندری- نیتروژنی ساده و دو اکسپاندری به منظور استفاده در واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی

معین منقل‌ساز¹، سید مجتبی موسوی ناینیان²، مصطفی مافی³

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین

*تهران، صندوق پستی 146651148@wtiau.ac.ir، Nainiyan.m

چکیده

مهم‌ترین عامل در بهبود فرایندهای مورد استفاده در واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی انتخاب صحیح چرخه سرمازا می‌باشد. فرایند انتخابی باید بیشترین راندمان انرژی و کمترین هزینه اقتصادی ممکن را در برداشته باشد چرا که فقط در این حالت، تولید گاز طبیعی مایع توجیه اقتصادی دارد. فرایندهای زیادی جهت مایع‌سازی گاز طبیعی وجود دارند که در این مقاله از میان آن‌ها فرایند اکسپاندری- نیتروژنی با توجه به مزایای موجود (شناخت کافی از تجهیزات و مشخص بودن پارامترهای طراحی) انتخاب شده است. در این تحقیق نتایج آنالیز انرژی راندمان نشان می‌دهد که راندمان انرژی کل چرخه سرمازا در فرایند دو اکسپاندری- نیتروژنی 3 درصد بیشتر از فرایند اکسپاندری- نیتروژنی ساده است در ادامه پژوهش جهت تحلیل اقتصادی، هزینه سالیانه کل چرخه با نرخ بهره 15 درصد و طول عمر واحد فرایندی 10 محاسبه گردید. نتایج حاصل از آنالیز اقتصادی نیز نشان می‌دهد که هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا در فرایند دو اکسپاندری- نیتروژنی 28 درصد از فرایند اکسپاندری- نیتروژنی ساده کمتر است. بنابراین با توجه به نتایج آنالیزهای موجود فرایند دو اکسپاندری- نیتروژنی جهت استفاده در واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی از نظر اقتصادی و راندمان انرژی نسبت به فرایند اکسپاندری- نیتروژنی ساده دارای عملکرد بهینه‌تر است.

کلید واژگان: فرایند اکسپاندری- نیتروژنی، آنالیز اقتصادی، آنالیز انرژی

An economic and exergetic analysis of two and simple expander- nitrogen processes used in natural gas liquefaction plants

Moein manghalsaz¹, Seyed Mojtaba Mousavi Nainiyan^{2*}, Mostafa Mafi³

1- Department of Mechanical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, k.N. toosl University of TECHNOIOLOGY, Tehran, Iran

3- Department of Mechanical Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

*P.O.B.146651148, Tehran, Iran, Nainiyan.m@wtiau.ac.ir

ABSTRACT

The choice of the correct liquefaction cycle is the most important factor in improving the used processes in natural gas liquefied units. From thermo-economic viewpoints, the selected process should present the highest exergy efficiency and lowest production cost of LNG. There are many processes for liquefying of natural gas. In this paper, the expander-nitrogen processes type is selected because of their advantages such as enough knowledge about equipment and given design parameters. The results of the exergy analysis show that the exergetic efficiency of the cycle is over 3% in the two expander-nitrogen process rather than simple expander. In the next step, to do an economic analysis, the total annual cost of the cycles is calculated with 15% interest rate and 10 life cycle process. The results of the economic analysis also show that the total annual cost of two-expander- nitrogen process is 28% less than a simple expander process. Therefore, two-expander cycle is introduced for liquefying natural gas because of its better economic and exergetic efficiency parameters.

Keywords: Expander-nitrogen process, Economic analysis, Exergy analysis

ساز ترمودینامیکی بر روی چرخه سرمازا در فرایند مایع‌سازی گاز طبیعی زمانی ارزش سرمایه‌گذاری خواهد داشت که این بهینه‌سازی بتواند هزینه‌های اقتصادی مربوط به چرخه سرمازا را کاهش دهد [1]. بنابراین برای داشتن درک درستی از هزینه‌های اقتصادی، راندمان انرژی و کارایی فرایند انتخابی باید چرخه سرمازا را مورد آنالیز اقتصادی و انرژی قرار داد تا بتوان مقادیر عددی آن‌ها را محاسبه نمود. در این تحقیق فرایندهای اکسپاندری- نیتروژنی ساده و دو اکسپاندری جهت استفاده در واحدهای مایع‌سازی گاز طبیعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج آنالیز اقتصادی و هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا برحسب نرخ بهره 15 درصد و طول عمر واحد فرایندی ده ساله

1- مقدمه

مایع‌سازی گاز طبیعی یک تبرید دما پایین است که هدف از انجام این فرایند، تولید گاز طبیعی مایع در مقیاس صنعتی می‌باشد. مایع‌سازی گاز موجب کاهش شدید حجم آن نسبت به حجم اولیه می‌شود بنابراین حمل و نقل گاز طبیعی به مسافت‌های بیش از سه هزار کیلومتر را از نظر فنی و اقتصادی توجیه می‌نماید. برای تولید گاز طبیعی مایع در ابتدا باید فرایندی مناسب جهت سرمایش گاز طبیعی با توجه به حجم مایع‌سازی، شرایط محیطی و عملیاتی و هزینه‌های اقتصادی مربوط به سیکل سرمازا انتخاب نمود. بهینه

Please cite this article using:

M.manghalsaz, S.M.Mousavi Nainiyan, M.Mafi, An economic and exergetic analysis of two and simple expander- nitrogen processes used in natural gas liquefaction plants, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations, Vol. 16, No. 13, pp. 92-95, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

جدول 2 پارامترهای طراحی فرایند دو اکسیاندی [4-2]

Table 2 Designing parameters process two Expander [2-4]

مقدار	مشخصات فرآیند
80 bar	فشار تخلیه
10 bar	فشار مکش
36°C	دمای میرد بعد از خنک کننده اول
27°C	دمای میرد بعد از خنک کننده دوم
20454 kg/h	دبی خوراک
32°C	دمای گاز خوراک ورودی
60bar	فشار گاز خوراک ورودی
7.79 MW	توان مصرفی فرایند
2.3%	نسبت توان واحد مایع‌سازی به نیروگاه

3- آنالیز اگزروژی فرایندهای مورد مطالعه

در ادامه راندمان اگزروژی کل چرخه سرمازا و ضریب عملکرد سیستم تبرید برای هر دو چرخه مورد مطالعه محاسبه شده و نتایج مورد بحث قرار گرفته.

1-3- محاسبه راندمان اگزروژی فرایندهای مورد مطالعه

جهت محاسبه راندمان اگزروژی برای فرایندهای مورد مطالعه باید کار مینیمم (حداقل توان مصرفی جهت مایع‌سازی گاز طبیعی) را بر مقدار کار مصرفی واقعی چرخه سرمازا (مجموع توان ورودی به کمپرسورها) تقسیم نمود [6].

$$\epsilon_{\text{refrigeration system}} = \frac{W_{\min}}{W_{\text{actual}}} \quad (1)$$

برای محاسبه مقدار کار مینیمم چرخه سرمازا می توان از رابطه شماره (2) استفاده نمود [6].

$$W_{\min} = m [(h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) - T_0(S_{\text{in}} - S_{\text{out}})] \quad (2)$$

2-3- محاسبه ضریب عملکرد سیستم تبرید فرایندهای مورد مطالعه

زمانی که مقدار حرارت دفع شده از گاز طبیعی به محیط اطراف هنگام مایع‌سازی مشخص گردد می‌توان ضریب عملکرد سیستم تبرید را برای فرایندهای مورد مطالعه از رابطه شماره (3) بدست آورد [6].

$$\text{COP} = \frac{Q}{W_{\min}} \quad (3)$$

مقدار Q در رابطه شماره (3) از رابطه شماره (4) بدست می‌آید [6].

$$Q = m (h_{\text{in}} - h_{\text{out}}) \quad (4)$$

4- آنالیز اقتصادی فرایندهای مورد مطالعه

در ادامه تحقیق مقدار عددی هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا برای فرایند مورد مطالعه بدست آمده و نتایج حاصل مورد تحلیل و بررسی گرفته است.

1-4- هزینه سرمایه گذاری اولیه کمپرسور

هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کمپرسور از رابطه شماره (5) بدست آمده است [6].

$$C_{\text{compressor}} = 68 (1 + f_i) (\text{Power})^{.42} \quad (5)$$

2-4- هزینه سرمایه گذاری اولیه مبدل حرارتی

از رابطه شماره (6) برای محاسبه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مبدل حرارتی چند جریان (صفحه - پره‌ای) استفاده می‌شود [6].

$$C_{\text{Plate-Fin Heat Exchanger}} = 30000 + 1900(Ar)^{.83} \quad (6)$$

سطح تبادل حرارت مبدل حرارتی برحسب m^2 می‌باشد که مقدار عددی آن برای حداقل اختلاف دمای بهینه 1.5°C در چرخه اکسیاندی- نیتروژنی ساده $10000 m^2$ و چرخه دو اکسیاندی $12000 m^2$ محاسبه شده است [6].

در فرایندهای مورد مطالعه استخراج و مورد بحث قرار گرفته است و تغییرات هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا برحسب توان مصرفی واقعی جهت تحلیل اقتصادی ارائه شده است.

2- معرفی فرایندهای مایع‌سازی مورد مطالعه

فرایندهای زیادی جهت مایع‌سازی گاز طبیعی وجود دارند که در این مقاله از میان آن‌ها فرایند اکسیاندی- نیتروژنی با توجه به مزایای موجود (شناخت کافی از تجهیزات) انتخاب و مورد آنالیز اقتصادی و اگزروژی قرار گرفته است.

1-2- فرایند اکسیاندی- نیتروژنی ساده

این فرایند ساده‌ترین نوع فرایند اکسیاندی و نام دیگر آن چرخه برایتون معکوس می‌باشد. میرد استفاده شده در این چرخه نیتروژن است و سرمایه‌ش موردنیاز جهت مایع‌سازی گاز طبیعی (95% درصد متان) در طی یک فرایند انبساطی در اکسیاندی تامین می‌شود. این فرایند با تولید کار نیز همراه است. سادگی در عملکرد، زمان آغاز به کار کوتاه‌تر، ایمنی بالا و تعداد کم تجهیزات از ویژگی‌های این فرایند می‌باشد. بالا بودن توان مصرفی و در نتیجه کارایی پایین مهم‌ترین نقطه ضعف این فرایند است [3,2].

2-2- معرفی فرایند دو اکسیاندی- نیتروژنی غیروابسته

فرایند سرمازای دو اکسیاندی- نیتروژنی از دو چرخه بسته تبرید جهت پیش سرد کردن و مایع‌سازی گاز طبیعی استفاده می‌کند. سیال میرد استفاده شده در هر دو چرخه نیتروژن می‌باشد. در این فرایند، کاهش دما و در نتیجه تولید سرمایه‌ش به سبب انبساط آنتروپی ثابت میرد در اکسیاندی صورت می‌پذیرد.

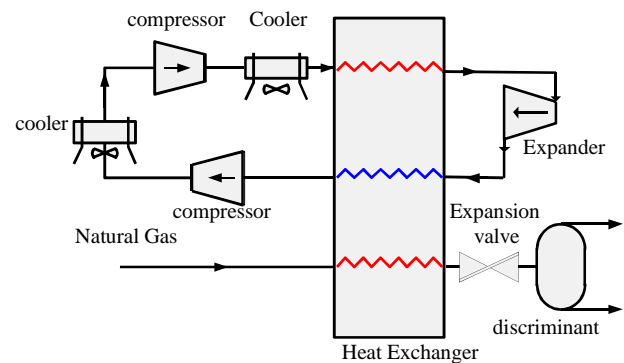


Fig. 1 The Simple Expander-nitrogen process

شکل 1 فرایند اکسیاندی- نیتروژنی ساده [1]

جدول 1 پارامترهای طراحی فرایند اکسیاندی- نیتروژنی ساده [3-1]

Table 1 Designing parameters process TheExpander-nitrogen easy

مقدار	مشخصات فرآیند
- 40 °C	دمای میرد خروجی از مبدل حرارتی
36°C	دمای میرد بعد از خنک کننده اول
27°C	دمای میرد بعد از خنک کننده دوم
20454kg/h	دبی خوراک ورودی
32°C	دمای گاز خوراک ورودی
60bar	فشار گاز خوراک ورودی
100bar	فشار تخلیه
6.3bar	فشار مکش
13.33MW	توان مصرفی فرایند
3.5%	نسبت توان واحد مایع‌سازی به نیروگاه

جدول 4 نتایج آنالیز اقتصادی چرخه اکسپاندری-نیتروژنی ساده [6]
Table 4 results analyze Economic The Expander-nitrogen cycle easy

مقدار	مشخصات
1.5°C	حداقل اختلاف دمای بهینه
10000m ²	سطح تبادل حرارت مبدل
0.1992	فاکتور سرمایه گذاری سالیانه
13330 Kw	توان مصرفی فرایند
7675090(\$)	هزینه سرمایه گذاری اولیه کمپرسور
3972662(\$)	هزینه سرمایه گذاری مبدل حرارتی
2320232(\$)	هزینه سرمایه گذاری اولیه سالیانه
3199200(\$)	هزینه عملیاتی چرخه
5519432(\$)	هزینه کل چرخه

جدول 5 نتایج آنالیز اقتصادی چرخه دو اکسپاندری [6]
Table 5 results analyze Economic The cycle two Expander

مقدار	مشخصات
1.5°C	حداقل اختلاف دمای بهینه
12000 m ²	سطح تبادل حرارت مبدل
0.1992	فاکتور سرمایه گذاری سالیانه
7790 Kw	توان مصرفی فرایند
6124803(\$)	هزینه سرمایه گذاری اولیه کمپرسور
4648213(\$)	هزینه سرمایه گذاری مبدل حرارتی
2145966(\$)	هزینه سرمایه گذاری اولیه سالیانه
1869600(\$)	هزینه عملیاتی چرخه
4015566(\$)	هزینه کل چرخه

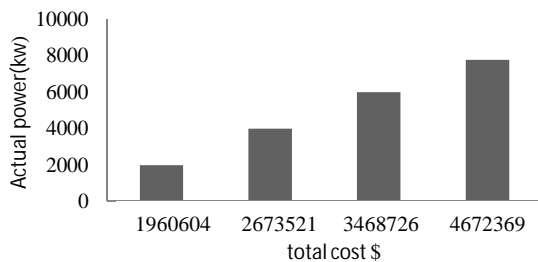


Fig. 2 the chart changes total cost to according power actual

شکل 2 نمودار تغییرات هزینه کل با توجه به توان واقعی

دارد. باید توجه داشت که با کمتر شدن نرخ بهره و یا افزایش طول عمر واحد فرایندی هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا کاهش خواهد یافت.

6- نتیجه گیری و دست آورد علمی صنعتی

نتایج حاصل از پژوهش بر روی فرایندهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین هزینه اقتصادی جهت ساخت و طراحی یک چرخه سرمازا مربوط به هزینه سرمایه گذاری اولیه کمپرسور است بنابراین هر روش علمی قابل اجرا که بتواند عملکرد کمپرسورها را بهینه نماید می‌تواند هزینه اقتصادی کل چرخه سرمازا را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. هزینه سرمایه گذاری سالیانه کل چرخه سرمازا در فرایند دو اکسپاندری 28% از فرایند اکسپاندری- نیتروژنی ساده کمتر است به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت زمان بازگشت سرمایه در فرایند دو اکسپاندری کوتاه‌تر خواهد بود. نتایج آنالیز اگزورژی در این تحقیق نشان می‌دهد که راندمان اگزورژی کل چرخه سرمازا در فرایند دو اکسپاندری 3 درصد بیشتر از فرایند اکسپاندری- نیتروژنی ساده است. اختلاف در هزینه‌های اقتصادی و راندمان اگزورژی در فرایندهای مورد مطالعه

4-3- فاکتور سرمایه گذاری سالیانه برای فرایندهای مورد مطالعه

فاکتور سرمایه گذاری سالیانه از رابطه شماره (7) به دست آمده است [6].

$$\text{Annual cost factor} = \frac{I(1+I)^n}{(1+I)^n - 1} \quad (7)$$

در این تحقیق با توجه به شرایط اقتصادی و فنی در کشور مقدار نرخ بهره 15 درصد و طول عمر واحد فرایندی 10 ساله در نظر گرفته شده است.

4-4- هزینه سالیانه سرمایه گذاری اولیه

جهت محاسبه هزینه سالیانه سرمایه گذاری اولیه باید هزینه سرمایه گذاری اولیه (هزینه سرمایه گذاری اولیه کمپرسور و مبدل حرارتی) را در مقدار فاکتور سرمایه گذاری سالیانه ضرب نمود [6].

$$C_{\text{Operating}} = A_{\text{nfc}} (C_c + C_{\text{HE}}) \quad (8)$$

4-5- محاسبه هزینه سالیانه عملیاتی چرخه‌ها مورد مطالعه

جهت محاسبه هزینه سالیانه عملیاتی چرخه‌های مورد مطالعه از مقادیر ارائه شده در مرجع [6] استفاده و مقدار آن به ازاء 8000 ساعت کاری در سال محاسبه گردیده است.

4-6- محاسبه هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا

هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا از رابطه شماره (9) به دست آمد است [6].

$$C_t = A_{\text{nfc}} (C_c + C_{\text{HE}}) + C_o \quad (9)$$

5- نتایج آنالیز اقتصادی و اگزورژی برای فرایندهای مورد مطالعه

با توجه به نمودار تغییرات هزینه سالیانه کل چرخه بر حسب توان مصرفی واقعی کمپرسورها مطابق با "شکل 2" به ازای هر 2000 کیلو وات توان مصرفی کمپرسورها در فرایند دو اکسپاندری هزینه سالیانه کل چرخه نزدیک به 35% افزایش خواهد داشت. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا وابستگی زیادی به توان مصرفی کمپرسورها دارد بنابراین با بهینه سازی کمپرسورها و افزایش تعداد مراحل پیش سرمایش می‌توان کار مصرفی جهت مایع سازی گاز طبیعی را کاهش داد و چرخه سرمازا را از نظر اقتصادی و راندمان اگزورژی بهبود بخشید. آنالیز اقتصادی در انتخاب یک فرایند سرمازا جهت مایع سازی گاز طبیعی نقش کلیدی و تعیین کننده‌ای دارد.

5-1- نتایج آنالیز اگزورژی چرخه های مورد مطالعه

تحلیل آنالیز اگزورژی در این تحقیق نشان می‌دهد که راندمان اگزورژی کل چرخه سرمازا در فرایند دو اکسپاندری 3 درصد بیشتر از فرایند اکسپاندری- نیتروژنی ساده می‌باشد.

5-2- نتایج آنالیز اقتصادی چرخه‌های مورد مطالعه

هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا در سیستم تبرید دو اکسپاندری 28% از چرخه اکسپاندری- نیتروژنی ساده کمتر است. هزینه سالیانه چرخه سرمازا در فرایندهای مورد مطالعه به توان مصرفی کمپرسورها و نحوه تولید برودت در چرخه سرمازا وابسته زیادی دارد. بنابراین فرایند دو اکسپاندری به دلیل توان مصرفی پایین تر جهت مایع سازی گاز طبیعی به هزینه اقتصادی کمتری نیاز

جدول 3 مقدار عددی آنالیز اگزورژی [1-3]

متغیرها	دو اکسپاندری - نیتروژنی	دو اکسپاندری - نیتروژنی ساده
ضریب عملکرد سیستم تبرید	1.55	1.67
راندمان اگزورژی کل چرخه	28.5%	31.32%

C_c	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه کمپرسور
C_{HE}	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه مبدل حرارتی
C_0	هزینه عملیاتی چرخه سرمازا
A_r	سطح تبادل حرارت مبدل
f_i	فاکتور نصب کمپرسور (مقدار عددی آن 1.09 است)
I	نرخ بهره سالانه
n	طول عمر واحد فرایندی

علائم یونانی ϵ بازدهی اگزرژی**زیر نویس‌ها**

in حالت ورودی

min مینیمم

out حالت خروجی

N نیتروژن

8- مراجع

- [1] P. R. A. Mortazavi, C. Somers, Y. Hwang, R. Radernacher, "Performance enhancement of propane precooled mixed refrigerant LNG plant", Appl. Energy, Vol. 93, pp. 138-147, 2012.
- [2] S. Mokhatab, J. Y. Mak, J.V. Valappil, D. A. Wood, Handbook of Liquefied Natural Gas: Gulf Professional Publishing, 2013.
- [3] G. Venkatarathnam, Cryogenic mixed refrigerant processes: Springer, 2008.
- [4] H. Chang, J. Park, K. Cha, S. L. a. K. Choe, Modified Reverse-Bryton Cycles for Efficient Liquefaction of Natural Gas, Cryocoolers, Vol. 17, No. 1, pp. 435-442, 2012.
- [5] H. M. Chang, M. J. Chung, M. J. Kim, S. B. Park, Thermodynamic design of methane liquefaction system based on reversed-Bryton cycle, Cryogenics, Vol. 49, No. 6, pp. 226-234, 2009.
- [6] M. Amidpour, M. H. Hamed, M. Mafi, B. Ghorbani, R. Shirmohammadi, M. Salimi, Sensitivity analysis, economic optimization, and configuration design of mixed refrigerant cycles by NLP technique, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 24, pp. 144-155, 2015. (in Persian فارسی).

مربوط به نحوه تولید برودت در چرخه سرمازا می‌باشد. فرایند دو اکسپاندری از دو سیکل تبرید بسته جهت مایع‌سازی گاز طبیعی استفاده می‌کند. سیکل اول نقش پیش سرمایش گاز را دارد و باعث کاهش دمای گاز خوراک ورودی می‌شود در این حالت اختلاف دمایی بین سیال مبرد (نیتروژن) و گاز خوراک (معمولاً متان) در مبدل حرارتی کمتر می‌شود این پدیده باعث کاهش شدید کار مینیمم درسیکل سرمازا و جلوگیری از افزایش اتلافات اگزرژی در مبدل حرارتی می‌گردد که نتیجه نهایی آن کاهش هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا به سبب بهینه‌سازی صورت گرفته در سیستم دو اکسپاندری است. نتایج اقتصادی این پژوهش نشان می‌دهد که تمایل جهت سرمایه‌گذاری در چرخه دو اکسپاندری نسبت به چرخه اکسپاندری- نیتروژنی ساده بیشتر است چرا که به سبب هزینه‌های مالی پایین‌تر و راندمان اقتصادی بالا زمان بازگشت سرمایه اولیه در فرایند دو اکسپاندری کوتاه‌تر است و اثر نرخ تورم بر میزان سرمایه‌گذاری اولیه در این چرخه سرمازا کمتر خواهد بود. بدون تردید توجیه اقتصادی طرح‌های صنعتی زود بازده ساده‌تر و تمایل جهت سرمایه‌گذاری در چنین پژوهش‌های بیشتر خواهد بود. هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا به طول عمر واحد فرایندی، نرخ بهره، توان مصرفی کمپرسور و نحوه تولید برودت در چرخه سرمازا وابسته است بنابراین شرایط مالی کشور مانند نرخ بهره نقش اساسی در تعیین هزینه اقتصادی چرخه سرمازا در فرایندهای مورد مطالعه دارد.

7- فهرست علائم

T_0	دمای محیط ($^{\circ}\text{F}$ یا $^{\circ}\text{C}$)
COP	ضریب عملکرد سیستم تبرید
h	انتالپی (kJ / kg)
s	آنترپپی (kJ / kg)
Q	گرمای دفع شده از گاز طبیعی در هنگام مایع‌سازی (kW)
m	نرخ دبی جرمی (kg/h)
C_t	هزینه سالیانه کل چرخه سرمازا
A_{nfc}	فاکتور سرمایه‌گذاری سالیانه