

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5) (2021) 791-794 DOI: 10.22060/mej.2020.18120.6746

Performance investigation of freezing desalination coupled with carbon dioxide refrigeration system

M. Salajeghe, M. Ameri *

Department of Mechanical Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

ABSTRACT: The world is currently facing the prospect of a severe global shortage of fresh water. Desalination of seawater can provide an almost inexhaustible source of freshwater if it can be made affordable. Freezing is a well-known technique for water desalination. The carbon dioxide refrigeration system is used for cooling required in the freezing desalination system and the evaporator and condenser of the refrigeration system are respectively crystallized and melted in the freezing desalination system. In this paper, the basic principles of freeze concentration processes are presented and a model of a freezing desalination coupled with CO2 refrigeration has been developed based on the theories of heat and mass transfer. To examine the performance of the system, a parametric study is performed to investigate the effect of different parameters such as freezing desalination feed temperature, feed concentration, distillate temperature, distillate concentration and freezing desalination recovery ratio on coefficient performance and energy consumption have been explored. It can be concluded that increasing the feed concentration and feed temperature is accompanied with the reduction of coefficient performance and a raise in specific energy consumption. Increasing the ice fraction also increases the specific energy consumptionsystem. Freezing desalination system in the present study is comparable in energy consumption to reverse osmosis desalination system.

Review History:

Received: Mar. 19, 2020 Revised: Sep. 05, 2020 Accepted: Oct. 25, 2020 Available Online: Nov. 10, 2020

Keywords:

Indirect freeze desalination Ice crystallization Recovery rate Ice fraction Specific energy consumption.

1-Introduction

Despite important progress in the management of water resources, drinking water scarcity increases and represents a major technical and economic issue in many countries. To overcome this problem, the main solutions are the wastewater reuse and seawater desalination. Two major types of technologies are used for desalination and can be classified as either thermal or membrane processes.

Although Freezing Desalination (FD) is not widely used commercially, this process has some advantages. The most important one is the very low energy requirement compared to that of distillation processes. Reduction in energy costs results as the latent heat of ice fusion is only one-seventh the latent heat of water vaporization [1].

The main flow of any separation by crystallization method involves sequentially: the crystallization, the separation, the washing and finally the melting [2].

In 2011, Rendell et al. [3] investigated a hybrid desalination system. This paper describes a case study in which FD was used to treat the liquid waste obtained from a Reverse Osmosis (RO) plant. In addition to the recovery of 99 % of the water available in wastewater, calcium sulfate and sodium sulfate were recycled. lu et al. [4] proposed a FD-MD hybrid system developed for Zero Liquid Discharge Desalination (ZLDD). In this research, by mathematical modeling, the effects of inlet water temperature, salt concentration in inlet water and recovery ratio of FD system on energy consumption were investigated. In addition, the potential of using new energy for energy supply of this hybrid system is evaluated.

Refrigerant in a freezing desalination system has requirements such as that the material must be non-toxic, chemically inert, impermeable to water, and resistant to the formation of hydrates. In recent years, the growth of environmental concerns about global warming and ozone layer degradation has attracted great attention. Carbon dioxide as a natural refrigerant with obvious advantages such as nontoxic, nonflammable, destruction of zero ozone layer, suitable heat transfer properties, easy access and low price are used in various engineering fields [5].

According to the studies, no significant research has been done on the combination of freezing water desalination system with cooling system. With this approach, in this study, an FD system has been investigated that provides the required cooling from a refrigeration system. In the refrigeration system, condenser is heated by sea water or ambient air, but in the case study, the condenser of the refrigeration system returns its output heat to the desalination melter to melt the ice. The combined system is modeled completely with thermodynamic relations. The effect of governing parameters on the issue such as salt water temperature, salt concentration, and ice fraction were investigated.

*Corresponding author's email: ameri_mm@uk.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article \odot is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Table 1. Input parameters of the simulation

parameters	value
Sea water temperature (°C)	25
Sea water salinity (ppm)	35000
Capacity (m^{3}/d)	2000
Output water salinity of FD (ppm)	220
Output water temperature of FD (°C)	20
Ice fraction (%)	35

2- Methodology

Fig. 1 shows a schematic of the proposed system and the p-h diagram of the CO_2 . In which the crystallizer and melter unit of the freeze desalination system are replaced by evaporator and condenser respectively,

In order to analyze the energy of the hybrid system of freeze desalination and CO_2 refrigeration system, each of the components of the system is considered as a control volume.

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_a = 0 \tag{1}$$

$$\sum \dot{m}_i x_i - \sum \dot{m}_o x_o = 0 \tag{2}$$

$$\sum \dot{m}_{in}h_{in} - \sum \dot{m}_{out}h_{out} - \dot{W}_i - \dot{Q}_i = 0$$
(3)

In this research, The Coefficient of Performance (COP) and Specific Energy Consumption (SEC) are equal to:

$$COP = \frac{Q_{evaporator}}{W_{compressor}}$$
(4)

$$SEC = \frac{W}{m_{\text{product water}}}$$
(5)

3- Results and Discussion

Since parameters such as inlet saline water temperature, inlet saline water concentration, freshwater production concentration and ice ratio have the greatest impact on the performance of the combined system, so in a parametric study, the rate The effect of each of these factors on system performance has been studied. Examination of the degree of freedom for the proposed hybrid system shows that in order to solve the equations of mass and energy conservation, the parameters of Table 1 must be considered constant.

Fig. 2a shows the effect of supply water temperature on the SEC of the system at different salt concentrations. The more the supply temperature increases the more the SEC increases. This is due to the effect of sensible heat quantity increasing. Fig. 2b illustrates the effect of TDS of sea water on the SEC. This figure shows that the energy consumption increased with the salt quantity.

The effect of ice ratio on the SEC at different salt concentrations is illustrated in Fig. 3a. As shown in the figure, up to a certain salinity percentage, with increasing F_s , the SEC gradually decreases, but this decrease has an optimal value. The lower the TDS of feed water, the lower the ice fraction. As the F_s increase, the salt concentration in the remaining brine solution increases, followed by a decrease in the freezing point temperature of the brine. Fig. 3b shows the linear relationship between the ice fraction and the brine production together with the non-linear relationship between ice fraction and SEC.

4- Conclusions

Seawater desalination as a source of drinking water is likely to increase in the future as available pure water resources are depleted. Although the freeze desalination method is not widely used commercially, this system has several advantages. In this research, CO2 refrigeration system has been used to produce the cooling required for



Fig. 1. a) Schematic of the combined FD system and a CO2 refrigeration system, b) p-h diagram of CO2 refrigeration system



Fig. 2. Variation of SEC with a)supply salty water temperature at different salt concentrations, b) TDS of salty water at different supply salty water temperatures.



Fig. 3. a) Variation of SEC with the ratio of ice fraction at different salt concentrations, b) Relationship between SEC, ice fraction and brine production rate

freezing desalination. Thermodynamic analysis can lead to a better understanding of the system's overall performance and effective parameters on system energy consumption. As expected, desalination energy consumption increased with increasing the salt water temperature, in addition, increasing the salt concentration in the input saline water, decreased the COP and increased the SEC and increased the concentration of salt in the wastewater. The results also show an increase in the ice fraction as an effective parameter increases SEC. Energy analysis of the system shows that the combined system of freeze desalination and refrigeration as a low energy consumption system can be used.

References

[1] J.A. Heist, Freeze-Crystallization, Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. McGraw-Hill Book Company, New York. 1989. 6. 133-6. 143, 4 fig., (1989).

- [2] J. Rosen, Freeze concentration beats the heat, Mechanical Engineering, 112(12) (1990) 46.
- [3] D. Randall, J. Nathoo, A. Lewis, A case study for treating a reverse osmosis brine using Eutectic Freeze Crystallization—Approaching a zero waste process, Desalination, 266(1-3) (2011) 256-262.
- [4] K.J. Lu, Z.L. Cheng, J. Chang, L. Luo, T.-S. Chung, Design of zero liquid discharge desalination (ZLDD) systems consisting of freeze desalination, membrane distillation, and crystallization powered by green energies, Desalination, 458 (2019) 66-75.
- [5] G. Lorentzen, Revival of carbon dioxide as a refrigerant, International journal of refrigeration, 17(5) (1994) 292-301.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Salajeghe, M. Ameri. Performance investigation of freezing desalination coupled with carbon dioxide refrigeration system *,Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5) (2021) 791-794*





نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۵، سال ۱۴۰۰، صفحات ۳۳۵۱ تا ۳۳۶۶ DOI: 10.22060/mej.2020.18120.6746

بررسی عملکرد سیستم ترکیبی آبشیرینکن انجمادی و سیستم تبرید دیاکسیدکربن

مریم سلاجقه ^۱، مهران عامری ^۳ ۱- بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان و پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران ۲- بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

> خلاصه: یکی از رادهای تامین آب در صورت عدم وجود منابع کافی آب، شیرینسازی آبهای شور و لبشور است. فرایند انجماد هم یکی از روشهایی است که برای تولید آبشیرین استفاده می شود. هدف از این مطالعه بررسی نمکزدایی انجمادی به همراه سیستم تبرید است. جهت سرمایش مورد نیاز در سیستم نمکزدایی انجمادی پژوهش حاضر از سیستم تبرید دی اکسید کربن استفاده شده است و تبخیر کننده و چگالنده سیستم تبرید به ترتیب به عنوان بلورساز و ذوب کننده سیستم آبشیرین کن انجمادی قرار گرفتهاند. در این پژوهش، علاوه بر بررسی ترمودینامیکی سیستم، اثر پارامترهای مهم از جمله غلظت نمک در آب شور ورودی، دمای آب شور ورودی، دما و خلوص آب شیرین تولیدی و نسبت یخ تشکیل شده بر ضریب عملکرد سیستم تبرید و مصرف انرژی سیستم آب شیرین کن انجمادی نیز بررسی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که با افزایش غلظت نمک در آب شور تغذیه و دمای آب شور تغذیه، مصرف انرژی سیستم افزایش می باید، مهمچنین افزایش نسبت یخ تشکیل شده باعث افزایش انرژی مصرفی می شود. با توجه به پایین بودن دمای چگالنده و عملکرد سیستم تبرید در شرایط فروبحرانی، سیستم تر ژوهش حاضر از لحاظ مصرف انرژی مقرون به صرفه است.

تاریخچه داوری: دریافت: ۲۹ /۱۲/ ۱۳۹۸ بازنگری: ۱۵ /۰۶/ ۱۳۹۹ پذیرش: ۴ /۸۸/ ۱۳۹۹ ارائه آنلاین: ۲۰ /۸۰/ ۱۳۹۹

کلمات کلیدی: آبشیرین کن انجماد غیرمستقیم بلورساز نرخ بازیابی نسبت یخ تشکیل شده مصرف انرژی ویژه

۱– مقدمه

امروزه تعداد زیادی از کشورها دارای مشکل کمآبی هستند و اکثر آنها مجبور به استفاده از روشهای شیرینسازی آب برای تهیه آب آشامیدنی هستند. تکنولوژیهای نمکزدایی برای تولید آب آشامیدنی به دو دسته بزرگ تقسیم بندی می شوند: فرایند جداسازی با غشاء همانند فرایندهای اسمز معکوس و الکترودیالیز که به ترتیب از نیروی مکانیکی (فشاری) و الکتریکی استفاده می کنند و فرایندهای جداسازی با حرارت همانند تقطیر و انجماد که در آنها تغییر فاز رخ می دهد.

اگر چه فرایندهای اسمز معکوس و تقطیر چنداثره به صورت تجاری برای نمکزدایی استفاده میشوند، اما فرایندهای دیگری از جمله انجماد وجود دارد که برای مناطق و زمانهای خاص مناسب است. فرایند انجماد-ذوبسازی شامل فرایند حذف نمک و خالص سازی آب از محلول آب شور با استفاده از انجماد و تبلور آب است و در حالت ایدهآل یخ تولیدشده بایستی عاری از نمک باشد. در *نویسنده عهدهدار مکاتبات: ameri_mm@uk.ac.ir

فیزیکی بلورهای یخ از محلول و در نهایت ذوب یخ و تبدیل آن به مایع به دست می آید [۱].

اگر چه فرایند انجماد-ذوبسازی به صورت گستردهای استفاده نمی شود، اما این فرایند در جای خود دارای مزایا و معایب خاص خود است. شاید بزرگترین مزیت آن، مقدار انرژی مورد نیاز در مقایسه با روشهایی مثل تقطیر است، چرا که گرمای نهان ذوب یخ یک هفتم¹ گرمای نهان تبخیر است [۱]. از آنجا که انجماد در دمای پایین انجام می شود (۲]. همچنین به دلیل پایینبودن دمای عملیات، کمتر دیده می شود [۲]. همچنین به دلیل پایینبودن دمای عملیات، جهت ساخت تجهیزات می توان از پلاستیک و دیگر مواد ارزان قیمت استفاده نمود [۳]. از معایب انجماد هم می توان مواردی همچون بالابودن هزینه ی سرمایه گذاری اولیه، ماندن طعم و بوی اولیه ی آب را نام برد [۴]. یکی دیگر از مهمترین عوامل محدودکننده نمکزدایی انجمادی، عدم وجود دادههای تجربی مناسب است.

فرايند انجماد-ذوبسازی شامل سه دسته اصلی انجماد با تماس

کی ای مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) By NC



شکل۱. شماتیک سیستم نمکزدایی انجمادی Fig. 1. Schematic of freezing desalination system

مستقیم^۱، انجماد با تماس غیر مستقیم^۲ و انجماد خلا^۳ است. در روش انجماد با تماس مستقیم برای پایین آوردن دما و تشکیل بلور از مواد سردکننده مثل بوتان، فرئون و کلروفلوئورو کربن ها^۴ استفاده می شود. در این روش ماده منجمدکننده به صورت مایع و تحت فشار از طریق یک نازل به درون آب شور پخش می شود. مبرد در فشار پایین تبخیر می شود و انرژی مورد نیاز برای تبخیر را از آب شور می گیرد، بنابراین دمای آب شور پایین آمده و منجر به تشکیل بلورهای یخ می شود. در روش انجماد با تماس غیر مستقیم انرژی حرارتی برای انجماد از میان دیواره های مبدل حرارتی عبور می کند و با انتقال حرارت از دیواره ها به آب شور، تشکیل بلور انجام می شود [۵]. در انجماد خلاء آب خود به عنوان ماده سردکننده عمل می کند. در این روش از ایجاد شرایط خلاء جهت تبخیر شدید و ناگهانی آب و در نتیجه سردشدن توده آب و انجماد آن استفاده می شود. بخارهای حاصل به عنوان یک ماده سردکننده برای کاهش دمای محلول و بهترشدن عمل تشکیل بلور استفاده می شود.

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است تمامی این روشها دارای مراحل تشکیل بلور، جداسازی کریستالها، شستشوی سطحی، ذوب و تولید آبشیرین هستند [۶]. جداسازی بلورهای یخ را میتوان با روشهای فشاری، زهکشی ثقلی، سانتریفیوژ، فیلتر و ستون شستوشو انجام داد. ستون شستوشو خود میتواند به دو صورت ثقلی یا فشاری باشد [۷]. شواهد تجربی نشان داده است که آب ناشی از یخی که یک مرحله منجمد شده است ۳ تا ۶ برابر کمتر از آب ورودی نمک دارد [۸]. امروزه از فرایند انجماد برای پیش تصفیه آبهای شور و لب شور که وارد سیستمهای حساس تر

مثل الكترودياليز و اسمز معكوس مي شود نيز استفاده مي شود [٩]. اتیا [۱۰] در سال ۲۰۱۰ یک سیستم جدید برای استفاده بهینه از یک یمپ حرارتی را پیشنهاد داد که فرایند شستشوی یخ و ذوب یخ در همان محل انجماد انجام شود، بنابراین نیازی به سیستمهای مکانیکی جهت انتقال یخ نیست و تحلیل حرارتی و تحلیل اقتصادی سیستم نیز ارائه شد. حمید و همکاران [۱۱] در یک تحقیق تجربی به بررسی تاثیر دمای مبرد بر کیفیت آب خالص در یک سیستم نمکزدایی انجماد غیرمستقیم پرداختند. نتایج نشان داد که دمای مبرد ۱۲-درجه سانتی گراد، منجر به کاهش ۴۷ درصدی در میزان شوری آب تولیدی می شود و در نهایت انجماد مجدد آب تولیدی، به منظور رسیدن به کیفیت استاندارد برای آب خروجی پیشنهاد داده شد. در سال ۲۰۱۱ رندل و همکاران [۱۲] یک سیستم آبشیرین کن ترکیبی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش از سیستم نمکزدایی انجمادی برای تصفیه مجدد پساب خروجی از یک آبشیرینکن اسمز معکوس استفاده شد. در این سیستم علاوه بر بازیابی ۹۹% آب موجود در یساب، نمکهای سولفات کلسیم و سولفات سدیم هم بازیابی شد. لو و همکاران [۱۳] یک سیستم هیبریدی نمکزدایی انجمادی-غشایی را پیشنهاد دادند که برای نمکزدایی با پساب صفر تهیه شده است. در این پژوهش به کمک مدلسازی ریاضی، تاثیرات دمای آب ورودی، غلظت نمک در آب ورودی و نسبت بازیابی سیستم نمکزدایی انجمادی بر مصرف انرژی سیستم مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، پتانسیل استفاده از انرژیهای نو برای تأمین انرژی این سیستم ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفت.

هتیرا و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۸ به بررسی فرایند تصفیه فاضلاب به وسیله انجماد و ذوب پرداختند و غلظت ناخالصی در یخ را پس از هر چرخه انجماد تجزیه و تحلیل کردند و نشان دادند که غلظت ناخالصی در یخ عمدتا به غلظت ناخالصی در محلول اولیه و

^{1)} Direct Freeze

^{2 &}lt;sup>Y</sup> Indirect Freeze

^{3 &}lt;sup>°</sup>Vacuum Freeze

^{4 &}lt;sup>*</sup>Chlorofluorocarbons

سرعت رشد یخ بستگی دارد. علاوه بر این تاثیر افزودن یک مرحله اضافی ذوب و انجماد را نیز بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که باید تعادلی بین مدت زمان کل فرآیند، بازده و مصرف انرژی آن برقرار شود و با مطالعه نتایج، این تحقیق را ایده خوبی برای تصفیه فاضلاب بیان کردند.

جایاکودی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۹ از دینامیک سیالات محاسباتی برای شبیهسازی سیستم نمکزدایی انجمادی استفاده کردند. در سیستم مذکور از انرژی برودتی تبخیر نیتروژن مایع استفاده شده است و مقایسه نتایج شبیهسازی با نتایج تجربی توافق خوبی را نشان داده است. در این پژوهش سه مرحله انجماد به منظور کاهش شوری یخ ۱/۵درصد به ۲/۰درصد در نظر گرفتند که به عنوان استاندارد نوشیدن توسط سازمان بهداشت جهانی اعلام شده است. نتایج نشان داده است شوری اولیه آبنمک تأثیر قابلتوجهی بر حجم استانداره از انرژی سرمایش مایعات برودتی مانند گاز طبیعی مایع را استفاده از انرژی سرمایش مایعات برودتی مانند گاز طبیعی مایع را برای کاربردهای نمکزدایی یخ نشان داده است زیرا امروزه بیشترین انرژی سرمایش در طی احیای مجدد گاز طبیعی مایع، مورد بهره برداری قرار نمی گیرد.

مبرد در سیستم نمکزدایی انجمادی دارای الزاماتی است از جمله اینکه این ماده باید غیرسمی باشد، از نظر شیمیایی غیرفعال، غیرقابل نفوذ در آب و در مقابل تشکیل هیدراتها مقاوم باشد. در سالهای اخیر با رشد نگرانیهای زیست محیطی از گرمشدن جهانی و تخریب لایه ازن، بکارگیری مبردهای زیست محیطی توجه روزافزونی را به خود جلب کردهاند. دیاکسیدکربن به عنوان یک مبرد طبیعی با مزیتهای بارزی از قبیل غیرسمی بودن، غیرقابل اشتعال بودن، تخریب لایه اوزون صفر، خواص انتقال حرارت مناسب، دسترسی آسان و قیمت پایین در فرایندهای مهندسی گوناگونی کاربرد دارد [۱۶].

خصوصیات حرارتی فیزیکی دیاکسیدکربن نسبت به مبردهای موجود بهتر است. از مشکلات دیاکسیدکربن، دمای بحرانی پایین(۳۱ درجه سانتی گراد) است که باعث میشود سیکل تبرید در اقلیمهای گرمتر به صورت فرابحرانی عمل کند که منجر به کاهش عملکرد سیستم میشود. با این حال، اتلاف بالای حرارت در خنککننده گاز میتواند برای کاربردهای گرمایش استفاده شود [۱۷]. یکی از راههای استفاده از سیکل تبرید دیاکسیدکربن در زیر نقطه بحرانی، استفاده

از پیکربندیهای مختلف آبشاری است به صورتی که سیکل تبرید دیاکسیدکربن در سیکل دمای پایین و از سایر مبردها در سیکل با دمای بالا استفاده میشود [۱۸].

با توجه به مطالعات صورت گرفته، تحقیق قابل توجهی در زمینه ترکیب سیستم آبشیرینکن انجمادی با سیستم ایجاد سرمایش صورت نگرفته است. با رویکرد به این مساله در این پژوهش یک سیستم نمکزدایی انجمادی مورد بررسی قرار گرفته است که سرمایش مورد نیاز خود را از یک سیستم تبرید تامین میکند. در سیستمهای تبرید متداول چگالنده با آب دریا و یا هوای محیط تبادل حرارت دارد اما در سیستم مورد بررسی، چگالنده سیستم تبرید حرارت خروجی خود را جهت ذوب یخ به ذوب کنندهی آبشیرین کن پس میدهد. با توجه به اینکه دیاکسیدکربن به عنوان یک مبرد غیرسمی است میتواند با سیستم آبشیرین کن ترکیب شود و از آنجا که دمای چگالنده در سیکل تبرید موردنظر در زیر نقطه بحرانی دىاكسيدكربن است، سيكل تبريد مىتواند به صورت فروبحراني عمل کند. به علت فروبحرانی بودن سیکل تبرید و اختلاف دمای پایین بین چگالنده و تبخیر کننده ضریب عملکرد سیستم تبرید پژوهش حاضر افزایش مییابد. سیستم ترکیبی موردنظر به صورت کامل با روابط ترمودینامیکی مدلسازی شده است. در ادامه تاثیر پارامترهای حاکم بر مساله مانند دمای آب شور، غلظت آب شور، دمای انجماد و نسبت یخ تشکیلشده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- عملکرد سیستم و معادلات حاکم

در این مطالعه، سیستم آبشیرین کن انجمادی که انرژی سرمایشی خود را توسط سیستم تبرید دیاکسید کربن تامین می کند، شرح داده شده و با درنظر گرفتن شرایط حالت دائم بررسی می شود. شکل ۲ شماتیکی از سیستم پیشنهادشده را نشان می دهد که در آن واحد بلورساز و ذوب کننده سیستم آب شیرین کن انجمادی به ترتیب جایگزین تبخیر کننده و چگالنده در سیستم تبرید دیاکسید کربن شده است تا سرمایش تولیدی در تبخیر کننده (فرایند ۱-۴) و حرارت اتلافی در چگالنده (فرایند ۳-۲) در سیستم نمک زدایی انجمادی^۱ مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است، با توجه به غیر سمی بودن

¹ Freeze desalination



شکل۲. شماتیکی از چیدمان سیستم ترکیبی آبشیرینکن انجمادی و سیستم تبرید دیاکسیدکربن

ezing desalination system and a CO2 refrigeration system ايجاد نمىشود.

> در مدل ارائهشده، آب ورودی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد توسط یمپ به پیش خنک کننده ی سیستم فرستاده می شود و با تبادل گرما با پساب خروجی و آبشیرین تولیدی، پیشسرد میشود و از آنجا به واحد بلورساز سيستم نمكزدايي انجمادي تغذيه مي شود كه پس از تبادل حرارت با مبرد در تبخیر کننده سیستم تبرید، بلورهای یخ تقریباً خالص در آن تولید شده و به سمت ستون شستشو هدایت می شوند. در ستون شستشو بلورهای یخ از آبنمک غلیظ جدا شده و یس از شستشو به واحد ذوب فرستاده می شود. واحد ذوب جایی است که یخ شستشو شده با انتقال حرارت با مبرد بخار درچگالنده سیستم تبريد ذوب شده و آبشيرين توليد مىشود.

۲- ۱- مدلسازی سیستم ترکیبی

به منظور تحلیل انرژی سیستم ترکیبی آبشیرین کن انجمادی و سیستم تبرید دی اکسید کربن، هر یک از اجزاء سیستم به عنوان یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است. قوانین بقای جرم، بقای هر جزء از محلول و بقای انرژی برای جریان پایدار به ترتیب برابر است با:

$$\sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_o = 0 \tag{1}$$

$$\sum \dot{m}_i x_i - \sum \dot{m}_o x_o = 0 \tag{7}$$

$$\sum \dot{m}_{in}h_{in} - \sum \dot{m}_{out}h_{out} - \dot{W}_i - \dot{Q}_i = 0 \tag{7}$$

۲- ۲- مدل سازی سیستم آبشیرین کن انجمادی معادله بقا جرم در بلورساز طبق رابطه (۴) بیان می شود، که D_F، می شود، که

$$D_F = D_{CRY} + D_{F,C} \tag{(f)}$$

در سیستم آبشیرین کن انجمادی، آب شور از دو جزء آب خالص و نمک تشکیل شده است و بقای نمک در بلورساز به صورت رابطه (۵) بیان می شود که $X_{\rm FC}$ ، $X_{\rm CRY}$ به ترتیب غلظت نمک در آب تغذیه، یخ تشکیل شده و آبنمک باقیمانده است.

$$X_F D_F = X_{CRY} D_{CRY} + X_{F,C} D_{F,C}$$
(Δ)

بقا انرژی در بلورساز طبق رابطه (۶) بیان می شود که Q_c ظرفیت تبرید بلورساز است و برابر با مقدار گرمایی است که در مرحله انجماد از آب شور حذف می شود و شامل گرمای محسوس و گرمای نهان برای انجماد است.

$$Q_{c} = D_{F}C_{p,F}(T_{C} - T_{F,P}) + D_{CRY}\Delta H_{F}$$

$$\tag{6}$$

$$Q_C = Q_{SENS} + Q_{LAT} \tag{Y}$$

مقدار یخ تشکیل شده نسبت به مقدار آب تغذیه توسط پارامتر F در رابطه (۸) تعریف می شود. بسیاری از مطالعات نشان می دهد که نسبت یخ تشکیل شده بالاتر، منجر به کیفیت یخ پایین تر می شود، در حالی که نسبت یخ پایین تر می تواند خلوص بیشتری در یخ ایجاد کند [۱۹].

$$D_{CRY} = F_s D_F \tag{(A)}$$

$$D_P = D_{CRY} + D_{IMP} \tag{11}$$

$$X_P D_P = X_{CRY} D_{CRY} + X_{IMB} D_{IMP} \tag{117}$$

$$D_{Wash} = .05D_P \tag{14}$$

قبل از تخلیه یخهای ذوب شده از سیستم، مقدار کمی آب شیرین تولیدی به عنوان آب شستشو به واحد جداسازی منتقل می شود. مقدار مطلوب آب شستشو از ۰/۵ از کل آب تولیدی بیشتر نمی شود. سپس آب تولیدی باقیمانده از واحد ذوب از مبدل حرارتی عبور می کند [۲].

بقای انرژی در ذوب کننده و مبدل حرارتی پیش گرم کن طبق رابطههای (۱۵) و (۱۶) بدست می آید.

$$Q_{melt} = D_{CRY} \Delta H_F + D_{IMB} C_{IMB} (T_{melt} - T_C)$$
(1)

$$D_{F}C_{P,F}(T_{F,P} - T_{F}) + D_{B}C_{P,B}(T_{P} - T_{C}) + D_{P}C_{p,B}(T_{P} - T_{melt}) = 0$$
(19)

که
$$D_{p} O_{p} O_{F} O_{p}$$
 و $D_{M} O_{M} O_$

$$K = \frac{X_P}{X_B} \tag{14}$$

۲ – ۳ – مدلسازی سیستم تبرید دی کسیدکربن

شکل۴ نمودار فشار-آنتالپی سیستم تبرید دیاکسیدکربن را نشان میدهد. سیکل مذکور از چهار قسمت اصلی تبخیرکننده، متراکمکننده، چگالنده و شیر انبساط تشکیل شده است، مبرد در حالیکه بخار اشباع است وارد متراکمکننده میگردد (نقطه۱). پس از عبور مبرد از متراکمکننده، در نقطه ۲ وارد چگالنده میشود، جاییکه انرژی حرارتی مبرد برای ذوب یخ در آبشیرینکن انجمادی بکار گرفته میشود. سرانجام مبرد پس از عبور از شیر انبساط به حالت



شکل ۳. نمودار ترکیب آبنمک بر حسب درصد وزنی [۲۱] Fig. 3. Salt-solution phase diagram [21]

اصل نمکزدایی با روش انجماد را میتوان با نمودار فاز محلول وتایی که نشاندهنده خطوط تعادل بین حالتهای جامد و مایع مواد است، توصیف کرد. نمودار تغییر فاز آب شور در شکل ۳ نشان داده شده است. محور عمودی، دمای انجماد آب را در مقادیر مختلف غلظت نمک تعریف میکند، در حالی که محور افقی نشاندهنده غلظت نمک در آب است [۲۰]. آب دریا معمولا حاوی غلظت نمک ۳۵ گرم بر لیتر است که منجر به دمای انجماد تقریباً ۱/۱ – درجه سانتی گراد میشود. هرچه بلورهای یخ بیشتر در محلول تشکیل شود، غلظت نمک در انجماد محلول باقیمانده نیز بیشتر است. این رفتار باعث میشود تا دمای دمای معین، کاهش دما تا رسیدن به خط یخ ادامه مییابد و در آن لحظه بلورهای یخ شروع به شکل گیری میکند. هر چه غلظت نمک در آب شور بیشتر باشد کاهش دمای انجماد بیشتر است.

کاهش دمای انجماد آب (ΔT_F) به دلیل نمک و ناخالصیهای درون آب شور است و با رابطه (۹) بیان میشود که _LC میزان کلرینهبودن آب شور و S غلظت نمک در آب شور است [۲۲].

$$\Delta T_F = -9.66E^{-2}C_L - 5.2E^{-6}C_L \tag{9}$$

$$S = 1.8147C_L \tag{(1)}$$

(۱۱) بقای جرم نمک در ستون شستشو و جداکننده طبق رابطه (۱۱) بعای جرم نمک در ستون شستشو و جداکننده طبق رابطه (۱۱) بدست می آید که X_{Wash} نمک در آب شستشو، آب شیرین تولیدی و پساب خروجی است. $X_{CRY}D_{CRY} + X_{F,C}D_{F,C} + X_{Wash}D_{Wash} = X_{P}D_{P} + X_{B}D_{B}$

¹ effective partition constant

$$Q_{con,c} = \dot{m}_{co_2} \left(h_2 - h_3 \right) \tag{(TT)}$$

سیال خروجی از چگالنده از شیر انبساط عبور کرده تا فشارش با فشار تبخیرکننده برابر شود. فرایند انجامشده در شیر انبساط آنتالپی ثابت است. کل کار مورد نیاز سیستم به صورت حاصل جمع کار متراکم کنندهها و یک مقدار کار اضافی بیان میشود که کار اضافی برای اطمینان از تولید سرمایش کافی در سیستم انجمادی، درنظر گرفته شده است [۲۲].

$$W_{total} = W_{comp} + W_{ADD} \tag{(14)}$$

$$W_{ADD} = 0.15W_{comp} \tag{(Y\Delta)}$$

ضریبعملکرد^۱ سیکل تبرید تراکمی عبارت است از نسبت گرمای گرفتهشده از محیط سردشونده به انرژی اولیه ورودی به سیکل که همان توان دادهشده به متراکمکننده است.

$$COP = \frac{Q_{evaporator}}{W_{compressor}}$$
(79)

در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد سیستم آبشیرین کن انجمادی از پارامتر مصرف انرژی ویژه^۲ استفاده شده است. SEC را میتوان نسبت انرژی مصرفشده به آبشیرین تولیدشده تعریف نمود.

$$SEC = \frac{W}{m_{product,water}}$$
(YY)

۲- ۴- فرضیات

فرضیات درنظر گرفته شده برای سیستم ترکیبی آب شیرین کن انجمادی و سیستم تبرید دی اکسید کربن به شرح ذیل می باشد.

- شبیهسازی کلیه اجزای سیکل در حالت پایدار میباشد.
- فرایند تراکم در متراکم کننده آدیاباتیک و غیر ایزنتروپیک فرض شده است.
- از افت فشار و افت حرارت در لولههای متصل کننده اجزاء به هم صرف نظر شده است.
 - اثرات انرژی جنبشی و پتانسیل ناچیز فرض شده است.
- دمای مبرد خروجی از چگالنده سیستم تبرید دی اکسید کربن،
 ۳ درجه سانتی گراد بیشتر از دمای ذوب یخ در نظر گرفته شده



شکل ۴. نمودار فشار –انتالپی سیستم تبرید دیاکسیدکربن Fig. 4. Pressure-enthalpy diagram of carbon dioxide refrigeration system اشباع تغییر حالت داده است.

$$Q_{eva,c} = \dot{m}_{co_2} \left(h_1 - h_4 \right) \tag{1A}$$

مبرد بعد از تبخیرکننده وارد متراکمکننده میشود، توان ایدهآل ورودی به متراکمکننده با رابطه (۱۹) تعریف میشود:

$$W_{com, ID} = \dot{m}_{co_2} \left(h_{ID, 2} - h_1 \right)$$
(19)

که _{۱٫٫۲} آنتالپی نقطه ۲ (خروجی متراکم کننده)، در حالتی است که متراکم کننده ایدهآل بوده و فرایند ۱ تا ۲ آدیاباتیک و برگشت پذیر باشد. اما در واقع طی فرایند ۱ تا ۲ انتروپی افزایش می یابد. نوع متراکم کننده بکاررفته در سیستم تبرید، رفت و برگشتی است و بازده همانتروپی متراکم کننده در این سیستم طبق رابطه (۲۰) تعریف می شود [۲۳] که PR نسبت فشار در متراکم کننده را نشان می دهد و طبق رابطه (۲۱) بیان می شود.

$$\eta_{com} = 0.85 - 0.467 PR$$
 (Y ·)

$$PR = \frac{p_2}{p_1} \tag{(1)}$$

که $P_2 e_1 e_1 P_2$ فشار نقاط ۲ و ۱ هستند. به این ترتیب توان واقعی مورد نیاز متراکم کننده از رابطه (۲۲) محاسبه می شود.

$$W_{com} = \frac{W_{com,ID}}{\eta_{com}} \tag{(TT)}$$

گرمای دفعشده در چگالنده طبق رابطه (۲۳) محاسبه می شود.

¹ Coefficient of performance

² Specific Energy Constant

مقدار	پارامتر
۲۵	دمای آب شور ورودی (^{C°})
۳۵۰۰۰	غلظت آب شور ورودی (ppm)
7	تولید آب شرب روزانه (m ³)
۲۲.	غلظت نمک در آب خروجی از سیستم نمکزدایی انجمادی (ppm)
۲۰	دمای آب خروجی از سیستم نمکزدایی انجمادی (^{C°})
۳۵	نسبت یخ تشکیلشده (٪) [۱۷]
•	غلظت نمک دریخ تولیدشده در بلورساز (ppm)

جدول ۱. کمیتهای ورودی برای شبیهسازی

Table1. Input quantities for simulation

است.

دمای مبرد خروجی از تبخیر کننده سیستم تبرید دی اکسید کربن،
 ۳ درجه سانتی گراد کمتر از دمای انجماد آب شور تغذیه در نظر
 گرفته شده است.

۲- ۵- اعتبارسنجی

سیستم تحت مطالعه در نرم افزار EES مدلسازی شده است. کمیتهای ورودی جهت آغاز شبیهسازی در جدول ۱ لیست شده است. برای پیشبینی تاثیر کمیتهای ذکرشده در طی شبیهسازی، فقط یکی از کمیتهای مورد نظر واقع در جدول ۱ تغییر میکند در حالیکه دیگر کمیتهای مربوطه ثابت نگه داشته می شوند.

جهت حصول اطمینان کافی از صحت برنامه نوشته شده، مقایسهای با نتایج تحقیق بایادا و همکاران [۱۹] انجام شده است. در مطالعه حاضر، از سیستم تبرید دیاکسیدکربن استفاده شده است و تبخیرکننده و چگالنده جایگزین بلورساز و ذوبکننده شدهاند. در پژوهش بایادا و همکاران [۱۹] از سیستم نمکزدایی انجمادی استفاده شده است که فرض شده است که سیستم تبرید در شرایط سیکل کارنو کار میکند و مبرد مشخصی را در نظر نگرفته است. جهت مقایسه، سیستم تبرید پژوهش حاضر را در شرایط سیکل کارنو و از ۱۵%

کار اضافی برای سیستم صرفنظر شده است. شکل ۵ تأثیر خلوص آبشیرین تولید شده را بر انرژی مصرفی برای تولید آبشیرین نشان میدهد. اختلاف جزئی که در این مقایسه دیده میشود ناشی از تفاوت تعدادی از فرضیات پژوهش حاضر و پژوهش بایادا و همکاران [۱۹] از جمله دما، غلظت نمک و درصد یخ تشکیل شده است.

۲- ۶- نتایج و بحث بر روی نتایج

از آنجاییکه پارامترهایی از قبیل دمای آب شور ورودی، غلظت آب شور ورودی، غلظت آبشیرین تولیدی و نسبت یخ تشکیل شده، بیشترین تاثیر را بر عملکرد سیستم ترکیبی دارند، بنابراین در یک مطالعه پارامتری، میزان تاثیر هر کدام از این عوامل بر عملکرد سیستم، مورد مطالعه قرار گرفته است. خواص ترمودینامیکی سیالهای عامل در دو سیستم تبرید و آبشیرین کن انجمادی بایستی مشخص شود تا تحلیل انرژی سیستم ترکیبی انجام شود و میزان مصرف انرژی ویژه و ضریب عملکرد سیستم ترکیبی مورد بررسی و محاسبه قرار گیرند. بررسی درجه آزادی برای سیستم ترکیبی مورد نظر نشان می دهد که برای حل معادلات بقای جرم و انرژی، پارامترهای جدول ۱ باید ثابت در نظر گرفته شوند.

نتایج حاصل از حل معادلات بقای جرم و انرژی قسمتهای مختلف



شکل ۵ . مقایسه مصرف انرژی با درصد شوری آبشیرین تولیدی در پژوهش بایادا و همکاران [۱۹] و پژوهش حاضر

Fig. 5. Comparison of energy consumption depending on water salinity of fresh water produced in Bayada et al. [19] and the present study

ەسازى	شبيه	۲. نتايج	جدول
Table2.	Sim	ulation	results

ثابت تفکیک موثر	مصرف انرژی ویژه (kWh/m ³)	ضريب عملكرد	انرژی مورد نیاز برای ذوب (kJ/s)	انرژی مورد نیاز برای انجماد (kJ/s)	شوری پساب (ppm)	دبی آب شور ورو ^د ی (m ³ /day)
•/••۴	٧/۶	١۶/٨	7677	9784	57746	5891

تبرید کاهش مییابد.

اثر دمای آب شور تغذیه بر مصرف انرژی ویژه سیستم در غلظتهای متفاوت در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد با افزایش دمای آب شور ورودی، مصرف انرژی ویژه سیستم افزایش مییابد که ناشی از اختلاف دمای انجماد با دمای تغذیه است. در نتیجه افزایش حرارت محسوس در بلورساز باعث میشود انرژی مورد نیاز در تبخیرکننده افزایش یابد که در نهایت منجر به افزایش کار مصرفی متراکمکننده میشود.

شکل ۸ تاثیر غلظت نمک در آب تغذیه را بر روی متغیر مصرف انرژی ویژه سیستم در دماهای متفاوت نشان میدهد. با افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی، نقطه انجماد آب شور کاهش مییابد که باعث کاهش دمای تبخیرکننده می شود. در نهایت انرژی مورد نیاز

سیستم نمکزدایی انجمادی در جدول ۲ ارائه میشود. این جدول دبی جریان، غلظت نمک، دما و میزان گرمایی را که برای انجماد و ذوب یخ باید حذف یا فراهم شود نشان میدهد.

در شکل ۶ تأثیر غلظت نمک آب شور بر ضریب عملکرد و دمای انجماد ارائه شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش غلظت نمک در آب شور تغذیه، ضریب عملکرد و دمای انجماد آب شور کاهش می یابد. با افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی و با توجه به رابطه (۱۱)، نقطه انجماد آب شور کاهش می یابد و در نتیجه با افزایش شوری از ۳۵ گرم بر لیتر به ۷۰ گرم بر لیتر روند کاهشی در دمای تبخیر کننده از ۲/۵– درجه سانتی گراد به ۷– درجه سانتی گراد رخ می دهد و به دلیل کاهش دمای بلورساز (تبخیر کننده سیستم تبرید)، مقدار انرژی موردنیاز متراکم کننده افزایش و ضریب عملکرد سیستم



Fig. 6. Variation of COP and freezing temperature with salt concentration in supply salty water



شکل ۷. تغییرات مصرف انرژی ویژه با دمای آب شور تغذیه

Fig. 7. Variation of SEC with supply salty water temperature



شکل ۸. تغییرات مصرف انرژی ویژه با غلظت آب شور تغذیه

Fig. 8. Variation of SEC with supply salty water concentration

تولیدی و ثابت تفکیک موثر نشان میدهد. نتایج نشان میدهد با افزایش غلظت نمک آب تغذیه، غلظت نمک در پساب هم افزایش مییابد و به دلیل ثابت فرض کردن خلوص آب شیرین تولیدشده، با افزایش غلظت نمک پساب، ثابت تفکیک موثر کاهش مییابد. غیر خطی بودن این کاهش با توجه به افزایش مخرج کسر و ثابت بودن صورت کسر در محاسبه مقدار ثابت تفکیک موثر در رابطه (۲۱) قابل مشاهده است.

شکل ۱۲ اثر نسبت یخ تشکیل شده را بر روی مصرف انرژی ویژه سیستم نمکزدایی نشان میدهد. همانگونه که در شکل دیده می شود، تا درصد شوری مشخصی، با افزایش نسبت یخ تشکیل شده، مصرف انرژی ویژه تدریجی کاهش مییابد ولی این کاهش، یک مقدار بهینه دارد. بدین معنی که در یک نسبت یخ مشخص، مقدار مصرف انرژی ویژه به کمترین مقدار خود دست پیدا می کند. هرچه غلظت نمک آب تغذیه کمتر باشد نسبت یخ تشکیل شده کاهش مییابد. با افزایش نسبت یخ تشکیل شده، غلظت نمک در محلول آبنمک باقیمانده افزایش و به دنبال آن دمای نقطه انجماد آبنمک کاهش مییابد، سرمایش تولیدی علاوه بر تولید بیشتر یخ، جهت کاهش دمای انجماد آب شور نیز استفاده می شود که باعث افزایش غیر خطی مصرف انرژی ویژه می شود.

شکل ۱۳ تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت تولید پساب به آب

متراکم کننده افزایش مییابد که افزایش مصرف انرژی ویژه سیستم را به همراه دارد. همانگونه که از نمودار مشخص است در آبنمک با شوری ۳۵ گرم بر لیتر، مصرف انرژی ویژه بسته به دمای ورودی، در محدوده ۱۲ –۷ کیلو وات ساعت بر متر مکعب قرار میگیرد و در شوریهای بالاتر، دمای آب تغذیه نقش پررنگتری دارد.

شکل ۹ تأثیر دمای آب شیرین تولیدشده را بر مصرف انرژی سیستم نمکزدایی انجمادی و نسبت یخ تشکیلشده بهینه نشان میدهد. نمودار نشان میدهد با کاهش دمای آب شیرین تولیدی، مصرف انرژی ویژه افزایش مییابد که به دلیل کاهش تبادل حرارت در مبدل حرارتی پیشسردکن میباشد. افزایش دمای آب تولیدی، افزایش دمای آب تغذیه خروجی از مبدل حرارتی را به همراه دارد و آب تغذیه ورودی با دمای بالاتری به بلورساز وارد میشود. با یک مقدار سرمایش ثابت، انرژی بیشتری صرف انتقال حرارت محسوس آب شور میشود و انرژی کمتری صرف تولید یخ میشود در نتیجه نسبت یخ

تأثیر خلوص آبشیرین تولیدشده بر مصرف انرژی سیستم و نسبت یخ تشکیلشده، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نمودار نشان میدهد تاثیر خلوص آب تولیدی بر مصرف انرژی ویژه و نسبت یخ تشکیلشده ناچیز است.

شکل ۱۱ تاثیر غلظت آب شور تغذیه را بر غلظت نمک در پساب



شکل ۹. تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت یخ تشکیل شده با دمای آب شیرین تولیدی Fig. 9. Variation of SEC and Fs with freshwater temperature produced



شکل ۱۰. تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت یخ تشکیل شده با خلوص آب شیرین تولیدی Fig. 10. Variation of SEC with freshwater purity produced



شکل ۱۱. تغییرات شوری پساب و نسبت تفکیک با غلظت آب شور ورودی Fig.11. Variation of SEC of the system with the ice fraction at different salt concentrations



شکل ۱۲. تغییرات مصرف انرژی ویژه سیستم با نسبت یخ تشکیل شده در غلظتهای نمک متفاوت Fig.12. Variation of SEC of the system with the ice fraction at different salt concentrations



شکل ۱۳. تغییرات مصرف انرژی ویژه و نسبت پساب به آب تغذیه با نسبت یخ تشکیل شده Fig. 13. Variation of SEC and brine to feed water ratio to ice fraction

مقدار انرژی مورد نیاز (kWh/m ³)	نوع انرژی مورد نیاز	نوع آبشيرينکن	
۲/۳-۱۷	الكتريكي	اسمز معکوس [۲۴]	
۶/۶-۷۷	گرمایش	چند اثرہ [۲۴]	
٧/۶	الكتريكي	نمكزدايي انجمادي تحقيق حاضر	

جدول ۳. مقایسه میزان مصرف انرژی با سیتمهای نمکزدایی متداول Table3. Comparison of energy consumption with conventional desalination systems

جدول ۳ مقایسه میزان مصرف انرژی سیستم تحقیق حاضر را با سیستمهای نمکزدایی متداول نشان میدهد. مقادیر مصرف انرژی، تغییرات نسبتاً گستردهای را نشان میدهد. این تغییر از عوامل مختلفی ناشی می شود که شامل تفاوت در اندازه سیستمها، پیشرفتهای تکنولوژیکی و کیفیت آب تغذیه است. مصرف انرژی سیستم نمکزدایی پژوهش حاضر حدود ۲ کیلو وات ساعت به ازای هر مترمکعب است. دلیل پایین بودن مصرف انرژی ویژه در سیستمهای نمکزدایی انجمادی، نسبت به سیستمهای حرارتی،

تغذیه را با تغییرات نسبت یخ تشکیل شده نشان میدهد. نمودار فیرخطی دیده می شود. نشان میدهد پساب تولیدی با افزایش نسبت یخ تشکیل شده کاهش می یابد و از آنجا که فرایند انجماد یک فرایند تدریجی است، با افزایش درصد یخ تشکیل شده، غلظت نمک در آب شور باقیمانده افزایش می یابد. افزایش غلظت نمک کاهش نقطه انجماد آب را به همراه دارد. در نتیجه با افزایش نسبت یخ تشکیل شده، انرژی بیشتری مورد نیاز هست که همزمان علاوه بر تولید بیشتر یخ، صرف کاهش دمای انجماد نیز شود. بنابراین ارتباط بین نسبت یخ تشکیل شده و انرژی مورد نیاز برای واحد متر مکعب آبشیرین تولیدی یک ارتباط

پایین بودن انتالپی نهان انجماد نسبت به انتالپی نهان ذوب است. علاوه بر این در سیستم تحقیق حاضر اختلاف دمای بین تبخیر کننده (بلورساز) و چگالنده (ذوب کننده) در سیستم دیاکسید کربن کم است که کار مورد نیاز متراکم کننده را کاهش می دهد و افزایش ضریب عملکرد را به همراه دارد. در نتیجه انرژی مورد نیاز برای سرمایش در سیستم آب شیرین کن انجمادی در تحقیق حاضر قابل مقایسه با سیستم نمک زدایی اسمز معکوس است. عمده انرژی مصرفی سیستم اسمز معکوس از مرجع [۲۴] استخراج شده است مربوط به پمپ است و در سیستم ترکیبی پژوهش حاضر، تنها مصرف کننده انرژی، متراکم کننده سیکل تبرید است و سرمایش بلورساز و گرمای مورد نیاز در ذوب کننده توسط سیستم تبرید تامین می گردد.

۳- جمعبندی

نمکزدایی آب دریا به عنوان منبع آب آشامیدنی احتمالا در آینده افزایش خواهد یافت، زیرا منابع آب خالص موجود در حال کاهش است. اگرچه روش نمکزدایی یخ به طور گستردهای بصورت تجاری مورد استفاده قرار نمی گیرد، اما این سیستم دارای چندین مزیت است. در این پژوهش از سیستم تبرید دی کسید کربن جهت تولید سرمایش مورد نیاز برای آبشیرین کن انجمادی استفاده شده است. تبخیرکننده و چگالنده سیستم تبرید به ترتیب به عنوان بلورساز و ذوب کننده سیستم آبشیرین کن انجمادی قرار گرفتهاند. نزدیک بودن دمای چگالنده و تبخیرکننده در سیستم تبرید مورد مطالعه یکی از نقاط قوت این سیستم در کاهش مصرف انرژی است. تحلیل ترمودینامیکی تعدادی از پارامترهای موثر کمک کرد تا درک بهتری از تاثیر این پارامترها بر روی مصرف انرژی سیستم بدست آید. همانطور که انتظار میرفت، مصرف انرژی فرایند نمکزدایی با افزایش دمای آب شور تغذیه افزایش یافته است، علاوه بر این افزایش غلظت نمک در آب شور ورودی باعث کاهش ضریب عملکرد و افزایش مصرف انرژی ویژه شده است و افزایش غلظت نمک در پساب را به دنبال دارد. همچنین نتایج نشان میدهد افزایش نسبت یخ تشکیل شده به عنوان یک پارامتر تاثیر گذار افزایش مصرف انرژی ویژه را به همراه دارد. تحلیل انرژی سیستم نشان میدهد که سیستم ترکیبی تبرید دیاکسیدکربن و آبشیرینکن انجمادی به عنوان یک سیستم با مصرف انرژی پایین میتواند مورد استفاده قرار گیرد.

۴- فهرست علائم و نشانه ها

دبی آب شور ورودی	D_F
دبی مخلوط آب و یخ خروجی از بلورساز	D_{IS}
دبی یخ خروجی از بلورساز	D_{Cr}
دبی آب شور منجمدنشده(m³/d)	$D_{F,c}$
دبی پساب شور خروجی از FD	D_B
دبی آب شیرین تولیدی	D_P
دبی آب موردنیاز برای شستشوی یخ	D_{wash}
دبی آب همراه با یخ	D_{IMP}
دمای آب شور ورودی(°C)	T_F
دمای آب شور خروجی از پیش گرمکن(°C)	$T_{F,P}$

- (°C) دمای بلورساز T_{C}
- (°C) FD دمای آبشیرین و پساب خروجی از T_P
 - (°C) دمای ذوب یخ T_{melt}
 - (°C) دمای تبخیرکننده T_{EVAP}
- (°C) دمای چگالنده سیستم تبرید T_{COND}
- کاهش دمای انجماد آب شور بر حسب غلظت نمک ΔT_F
 - FD غلظت نمک در آب ورودی به x_F
 - x_{F,c} غلظت نمک در آب شور منجمدنشده
 - ${
 m FD}$ غلظت نمک در آب خروجی از x_P
 - x_{Cry} غلظت نمک در یخ خروجی از بلورساز
 - FD غلظت نمک در پسآب خروجی از XB
 - x_{IMB} غلظت نمک در آب همراه با یخ
 - ی شوری آبنمک (g/l)
 - نسبت یخ تشکیلشده F_s
 - ثابت تفکیک موثر k
 - Q_{C} انرژی مورد نیاز برای انجماد آب شور
 - Q_{EVAP} گرمای جذبشده توسط تبخیرکننده
 - گرمای مورد نیاز برای ذوب یخ Q_{melt}
 - انرژی مورد نیاز متراکم کننده W_{comp}
 - انرژی اضافی مورد نیاز W_{ADD}
 - SEC مقدار انرژی ویژه (kWh/m³)
 - COP ضریب عملکرد سیستم تبرید
 - ۲

Design of zero liquid discharge desalination (ZLDD) systems consisting of freeze desalination, membrane distillation, and crystallization powered by green energies, Desalination, 458 (2019) 66-75.

- [14] T. Htira, C. Cogné, E. Gagniere, D. Mangin, Experimental study of industrial wastewater treatment by freezing, Journal of Water Process Engineering, 23 (2018) 292-298.
- [15] H. Jayakody, R. Al-Dadah, S. Mahmoud, Cryogenic Energy for Indirect Freeze Desalination—Numerical and Experimental Investigation, Processes, 8(1) (2020) 19.
- [16] G. Lorentzen, Revival of carbon dioxide as a refrigerant, International journal of refrigeration, 17(5) (1994) 292-301.
- [17] A. Padalkar, A. Kadam, Carbon Dioxide as Natural Refrigerant, International Journal of Applied Engineering Research, 1(2) (2010) 261-272.
- [18] E. Bellos, C. Tzivanidis, A theoretical comparative study of CO2 cascade refrigeration systems, Applied Sciences, 9(4) (2019) 790.
- [19] I. Baayyad, N. Semlali Aouragh Hassani, T. Bounahmidi, Evaluation of the energy consumption of industrial hybrid seawater desalination process combining freezing system and reverse osmosis, Desalination and Water Treatment, 56(10) (2015) 2593-2601.
- [20] K. El Kadi, I. Janajreh, Desalination by freeze crystallization: an overview, Int. J. Therm. Environ. Eng, 15(2) (2017) 103-110.
- [21] B. Kalista, H. Shin, J. Cho, A. Jang, Current development and future prospect review of freeze desalination, Desalination, 447 (2018) 167-181.
- [22] A. Madani, S. Aly, A combined RO/freezing system to reduce inland rejected brine, Desalination, 75 (1989) 241-258.
- [23] K. Srinivasan, P. Sheahen, C. Sarathy, Optimum thermodynamic conditions for upper pressure limits of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle, international journal of refrigeration, 33(7) (2010) 1395-1401.
- [24] J.E. Miller, Review of water resources and desalination technologies, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 49 (2003) 2003-0800.

- J.A. Heist, Freeze-Crystallization, Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. McGraw-Hill Book Company, New York. 1989. 6. 133-6. 143, 4 fig., (1989).
- [2] W.E. Johnson, State-of-the-art of freezing processes, their potential and future, Desalination, 19(1-3) (1976) 349-358.
- [3] J. Muller, Freeze concentration of food liquids: theory, practice, and economics, Food Technol., 21 (1967) 49-61.
- [4] C. WHO—Geneva, Desalination for Safe Water Supply: Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination. Available online, World Health Organization (WHO), Geneva, Switzerland, (2007).
- [5] A.w.w.a.W.d. committee, Water Desalting Planning Guide for Water Utilities, NJ, 2004.
- [6] J. Rosen, Freeze concentration beats the heat, Mechanical Engineering, 112(12) (1990) 46.
- [7] M. Shafiur Rahman, M. Ahmed, X.D. Chen, Freezingmelting process and desalination: review of present status and future prospects, International journal of nuclear desalination, 2(3) (2007) 253-264.
- [8] A. House, Desalination for water supply FR/RO, Foundation for Water Research, (2006) 1-22.
- [9] M.S. Rahman, M. Ahmed, X.D. Chen, Freezing-melting process and desalination: I. Review of the state-of-theart, Separation & Purification Reviews, 35(02) (2006) 59-96.
- [10] A.A. Attia, New proposed system for freeze water desalination using auto reversed R-22 vapor compression heat pump, Desalination, 254(1-3) (2010) 179-184.
- [11] F. Hanim, A. Hamid, A.R. Norfatiha, N. Ngadi, Z.Y. Zakaria, J. Mazura, Effect of coolant temperature on desalination process via progressive freeze concentration, in: Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2015, pp. 443-446.
- [12] D. Randall, J. Nathoo, A. Lewis, A case study for treating a reverse osmosis brine using Eutectic Freeze Crystallization—Approaching a zero waste process, Desalination, 266(1-3) (2011) 256-262.
- [13] K.J. Lu, Z.L. Cheng, J. Chang, L. Luo, T.-S. Chung,

براى ارجاع به اين مقاله از عبارت زير استفاده كنيد: M. Salajeghe, M. Ameri . Performance investigation of freezing desalination coupled with carbon dioxide refrigeration system ,Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 5)(2021) 3351-3366. DOI: 10.22060/mej.2020.18120.6746



بی موجعه محمد ا