



Mathematical modeling of a thermally driven multistage desalination system (MED) for industrial applications

Sayyed Aboozar Fanaee ^{*1} , Meysam Mahmoudi ²

1. Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, birjand, Iran

2. PhD Student, Department of Mechanical Engineering, University of Birjand, birjand, Iran

Abstract

Multi-Effect Distillation (MED) systems are advanced technologies for seawater desalination, valued for their high energy efficiency and heat recovery capabilities in industrial and potable water applications. This study developed a mathematical model based on mass, energy, and thermodynamic balances to analyze system performance. By solving the governing equations, the impact of key parameters—number of distillation stages, inlet steam temperature, and brine concentration—on the Gain Output Ratio (GOR) was quantitatively evaluated. Results show a linear positive correlation between the number of stages and GOR improvement, with a maximum GOR of 12.049 achieved in a 12-stage configuration at an 80°C feed temperature. Each additional stage increases GOR by approximately 15%. However, the motive-to-sucked steam ratio grows exponentially with more stages, significantly increasing motive steam consumption. These findings provide an analytical framework for optimizing industrial MED systems, enhancing energy efficiency and economic savings.

Keywords

Multi-stage desalination plant
performance coefficient
brackish water
mathematical modeling
industrial applications

Received: 03.05.2025

Revised: 02.09.2025

Accepted: 07.09.2025

*Corresponding Author

Sayyed Aboozar Fanaee

Email

sab.famech@birjand.ac.ir

1- Introduction

Amid global water scarcity and increasing demand for sustainable freshwater, efficient desalination technologies like Multi-Effect Distillation (MED) are critical. As a leading thermal desalination method, MED uses thermal energy to evaporate seawater across multiple stages, condensing the vapors to produce fresh water. Thermocompressors, preferred for their lower construction, maintenance, and energy costs compared to mechanical compressors, recover thermal energy to enhance efficiency [1]. In an MED system, motive steam from the boiler and condenser steam are processed by the thermocompressor to heat the first stage's

tubes, where sprayed seawater undergoes flash evaporation. Condensed liquid partially returns to the boiler, with the remainder as the first stage's product. Brine and vapor move to subsequent stages, with only the first stage requiring external energy. Progressively reduced pressure optimizes energy use across stages, and final stage vapor condenses in the condenser, where preheated seawater splits into feed and discharge, improving efficiency [1]. Research highlights include Desouky et al.'s thermodynamic models for performance prediction [2], Al-Juwayhel et al.'s findings on energy savings versus higher costs with more stages

How to Cite this Article:

[1] S. A. Fanaee and M. Mahmoudi, "Mathematical modeling of a thermally driven multistage desalination system (MED) for industrial applications," Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 83–97, 2025. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.520824.1127> (in Persian)



[3], and Darwish et al.'s economic optimizations using ASPEN Plus [4]. Khalifa et al. enhanced stability with MATLAB models [5], while Sayed et al. and Sharonov et al. improved MED-TVC efficiency [6,7]. Wang et al. and Zhang et al. reduced costs in petrochemical and food industries using waste steam [8,9]. Abdi Khanghah et al. optimized MED-TVC for the Persian Gulf [10], and Ghorbani et al. boosted output with higher steam temperatures [12]. Zhang et al. advanced AI-optimized RO-MED hybrids [13], and others like Sayyadi, Zaman, and Al-Saeed enhanced efficiency and sustainability [14–17]. Mathematical modeling optimizes MED systems by evaluating stage count, steam temperature, and salinity impacts on efficiency [10,11]. This study introduces a precise mathematical model for industrial MED applications, integrating advanced algebraic calculations for improved performance prediction. Validated through MATLAB simulations and reference data, it ensures reliability for industrial use, advancing sustainable desalination.

2- Research Methods

Figure 1 presents the proposed multi-effect, multi-stage MED desalination system, with specifications and flows detailed in Table 1, including input and output flows for a single stage. Key parameters are the number of effects (N), seawater salinity (X_f), seawater temperature (T_{cw}), feedwater temperature (T_f), feedwater flow rate (M_f), motive steam pressure (P_m), and motive steam flow rate (M_m).

A mathematical model based on mass, energy, and thermodynamic principles describes the MED system's behavior [10]. The performance ratio (PR), defined as the ratio of fresh water produced to steam input in the first stage [13], is a key efficiency metric. The model includes mass and energy balances, heat transfer equations, and water properties, solved for each stage, the system, and the condenser to assess parameter impacts. Energy consumption and efficiency equations are derived, considering thermomechanical and chemical energy components of the water-salt fluid. The model is presented in two forms: one using waste energy and

another with an integrated boiler. Assumptions include uniform feedwater flow, negligible heat losses, salt-free vapor, no friction-induced temperature drops, negligible boiling point elevation, steady-state operation, equal effect surface areas, and a uniform temperature difference (ΔT) between stages, calculated as (inlet steam temperature minus feedwater temperature)/(N-1). Brine from prior stages reheats subsequent stages, with the first stage's balances treated separately. Input parameters are N, X_f , T_{cw} , T_f , M_f , P_m , and M_m , with brine salinity at 42,000 ppm, meeting discharge limits.

Table 1: Specifications of the MED system for the present problem)

Given value	Parameter
4-12	N
100 °C	T_s
1Kg/s	M_d
42000 ppm	X_f
2 °C	T_{loss}
25 °C	T_{cw}

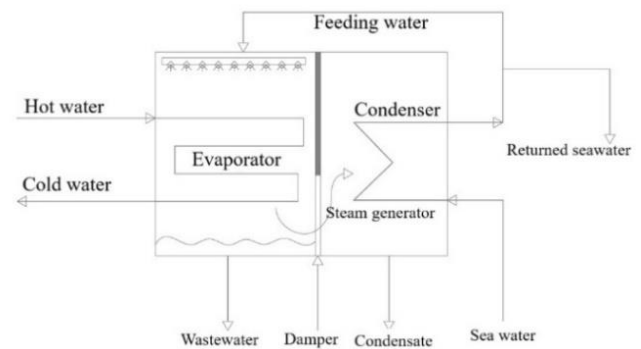


Figure 1: Schematic of the present problem for one work (stage)

In the MED system, the inter-stage temperature difference is assumed constant. The temperature of each stage decreases relative to the previous stage by an amount ΔT . The outlet steam temperature of each stage is calculated taking into account the Boiling Point Elevation (BPE). The inlet water flow is divided equally among the stages, and the brine is transferred between stages. The energy balance equations for each stage determine the amount of steam produced and, ultimately, the quantity of desalinated water produced.

3- Results and Conclusion

To validate the developed program, its results were compared with the modeling in reference [2]. Table 2 shows close agreement between the algebraic calculations of this study and reference data for stage temperatures. The design implemented here increases the temperature of water exiting the first condenser due to optimized flow rates and temperatures of water and waste steam. The governing MED equations, validated against reference [2], were solved using MATLAB to model the system. The performance ratio (PR), a key efficiency metric, was analyzed for various process parameters, particularly the number of stages. However, more stages increase maintenance costs and exponentially raise the motive-to-sucked steam ratio, complicating thermocompressor design (optimal ratio: 1–1.5 [19–20]).

Table 3 shows PR variations with inlet steam temperature across different stage counts. Higher inlet steam temperatures (e.g., 80°C for 12 stages, PR = 12.049) boost PR by increasing inter-stage temperature differences, with each additional stage improving PR by approximately 15%, consistent with reference [2]. Table 4 indicates that higher concentration factors (brine-to-seawater salinity ratio) increase PR by enhancing vapor production per stage at constant feed flow [11]. Figure 2 highlights the exponential rise in the motive-to-sucked steam ratio with more stages.

MED systems achieve high efficiency (PR 10–12) and low energy consumption, making them vital for industries like power, petrochemical, and shipbuilding. Utilizing low-grade steam or industrial waste heat reduces costs and enables desalination of high-salinity seawater, outperforming other thermal methods. Maintaining feedwater at 70–80°C and integrating thermocompressors and pretreatment prevents scaling and ensures long-term stability, making MED ideal for arid regions. These features align with sustainable development by reducing fossil fuel use. Key Findings: PR increases linearly with the number of stages, Each additional stage boosts

PR by approximately 15%, The highest PR (12.049) is achieved with 12 stages at 80°C, Higher concentration factors enhance PR, More stages exponentially increase the motive-to-sucked steam ratio, challenging thermocompressor design.

MED systems, optimized through thermodynamic models and simulations, improve efficiency and reduce costs, with ongoing development of smarter models critical for meeting industrial water demands.

Table 2: Comparison of data extracted from algebraic calculations of the present problem with reference data [2]

.No	1	2	3	4	5	6
T (C)						
This Study	91.237 0	82.013 3	72.304 0	62.082 9	51.324 5	39.998 9
References	91.237 2	82.013 2	72.303 7	62.083 1	51.324 7	40

Table 3: Values of feed temperature changes on efficiency ratio

PR	Ts			
	80	90	100	110
N=4	3.912	3.940	3.968	3.995
N=6	5.892	5.931	5.969	6.006
N=8	7.875	7.925	7.973	8.019
N=12	11.850	11.918	11.985	12.049

Table 4: Effect of concentration parameter Xb/Xf on efficiency ratio for a case of fixed impact number N=6

Xb/Xf	PR
1.2	4.6
1.4	4.9
1.5	5.1
1.8	5.2
2	5.3
3	5.4

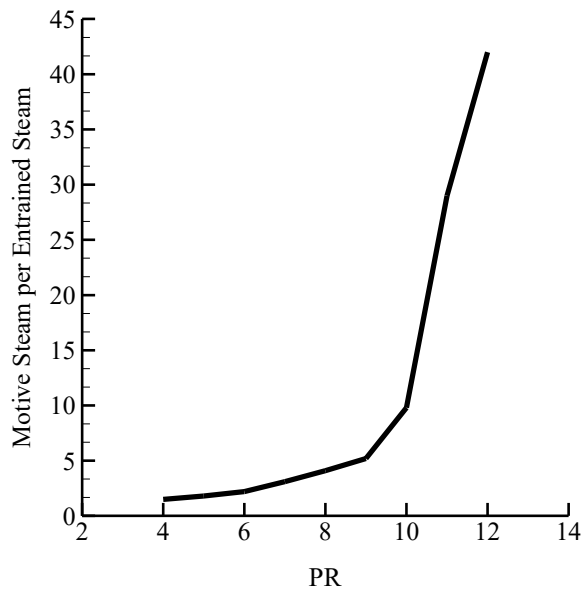


Figure 2: Effect of number of stages on the ratio of motive steam to suction steam

5- References

- [1] M. Al-Shammiri and M. Šafář, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*, Vol. 126, pp. 45–59, 1999. doi: [10.1016/S0011-9164\(99\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00154-X)
- [2] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, "Fundamentals of Salt Water Desalination," *Elsevier*, 2002.
- [3] F. Al-Juwayhel, H. El-Dessouky, and H. Ettouney, "Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps," *Desalination*, Vol. 114, No. 3, pp. 253–275, 1997. doi: [10.1016/S0011-9164\(98\)00017-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00017-4)
- [4] M. A. Darwish, N. M. Al-Najem, and N. Lior, "Thermal analysis of ME-TVC+MEE desalination systems," *Desalination*, Vol. 204, No. 1–3, pp. 354–373, 2006.
- [5] A. E. Khalifa, H. Alawadhi, and M. Ahmad, "Dynamic modeling of multi-effect desalination plants," *Desalination*, Vol. 250, No. 3, pp. 928–935, 2010.
- [6] M. A. Sayed, H. T. El-Dessouky, and H. M. Ettouney, "Thermodynamic analysis of a hybrid MED-TVC desalination system," *Desalination*, Vol. 365, pp. 55–71, 2015.
- [7] A. Sharonov et al., "Optimization of MED-TVC desalination systems using thermodynamic models," *Desalination*, Vol. 435, pp. 45–58, 2018.
- [8] Y. Wang et al., "Modeling and optimization of MED systems for petrochemical industries," *Desalination*, Vol. 456, pp. 78–90, 2019.
- [9] L. Zhang et al., "Dynamic modeling of MED systems for food industry applications," *Desalination*, Vol. 500, pp. 114–125, 2021.
- [10] M. Abdi-Khanghah, B. Bazooyar, M. Gonbadi, and K. C.-W. Wu, "Design and optimization of MED-TVC desalination plant using mathematical modeling coupled with response surface methodology," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 153, p. 105187, 2023. doi: [10.1016/j.jtice.2023.105187](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105187) (in Persian)
- [11] M. Arjmandi and M. Pakizeh, "Design and mathematical modeling of a multi-stage desalination system applicable to steam power plants and similar industries," *Farayand-e No Journal*, Vol. 41, No. 8, pp. 36–49, 2013. (in Persian)
- [12] S. Ghorbani, M. Deymi-Dashtebayaz, and E. Tayyeban, "Parametric investigation and performance optimization of a MED-TVC desalination system based on 1-D ejector modeling," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 288, p. 117131, 2023. doi: [10.1016/j.enconman.2023.117131](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117131) (in Persian)
- [13] Y. Zhang, X. Liu, W. Chen et al., "Advancing Water Security: China's Latest Seawater Desalination Technologies in 2025," *Desalination*, Vol. 560, pp. 115–130, Jan. 2025.
- [14] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Thermoeconomic optimization of multi-effect distillation desalination systems," *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 1122–1133, 2010. doi: [10.1016/j.apenergy.2009.05.023](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.023) (in Persian)
- [15] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Various approaches in optimization of multi-effects distillation desalination systems using a hybrid meta-heuristic optimization tool," *Desalination*, pp. 138–148, 2010. (in Persian)
- [16] M. Zamen, M. Kahani, J. Yazdanpanahi, R. Abedini, and M. H. Ahmadi, "Modeling of a

direct-contact humidification-dehumidification desalination unit in a 256 MW steam power plant using effluent streams: Case study," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 45, p. 102966, 2023. doi: [10.1016/j.csite.2023.102966](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102966) (in Persian)

[17] K. Elsaid, E. T. Sayed, and A. G. Olabi, "Sustainable multi-effect distillation powered by green hydrogen: A techno-economic feasibility study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 189, p. 114789, 2025.

[18] O. A. Hamed, "Thermal Assessment of a Multiple Effect Boiling (MEB) Desalination

System," *Desalination*, Vol. 86, pp. 325–339, 1992. doi: [10.1016/0011-9164\(92\)80042-8](https://doi.org/10.1016/0011-9164(92)80042-8)

[19] N. H. Aly, A. Karameldin, and M. M. Shamloul, "Modelling and simulation of steam jet ejectors," *Desalination*, Vol. 123, pp. 1–8, 1999. doi: [10.1016/S0011-9164\(99\)00053-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00053-3)

[20] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 41, pp. 551–561, 2002. doi: [10.1016/S0255-2701\(01\)00176-3](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(01)00176-3)



مدل سازی یک آب شیرین کن حرارتی نوع چندمرحله‌ای (MED) برای مصارف صنعتی

سید ابودر فنایی^{۱*}، میثم محمودی^۲

۱- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

سیستم‌های آب شیرین کن چندمرحله‌ای (MED) به دلیل بازدهی انرژی بالا و قابلیت بازیافت حرارت، فناوری پیشرویی در نمک‌زدایی آب دریا برای مصارف صنعتی و شرب هستند. در این پژوهش، به منظور تحلیل عملکرد این سیستم‌ها، یک مدل ریاضی مبتنی بر موازنه‌های جرم، انرژی و رابطه‌های ترمودینامیکی اجزای سیستم توسعه داده شد. با حل معادلات حاکم سیستم، تأثیر پارامترهای کلیدی از جمله تعداد مراحل تقطیر، دمای بخار ورودی و غلظت آب شور بر شاخص بهره‌وری سیستم (GOR) مورد ارزیابی کمی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که افزایش تعداد مراحل تقطیر، رابطه خطی مثبتی با بهبود شاخص (GOR) دارد؛ به طوری که در پیکربندی ۱۲ مرحله‌ای با دمای تغذیه ۸۰ درجه سانتی‌گراد، بیشینه بازدهی معادل ۱۲/۰۴۹ حاصل شد. همچنین، افزودن هر مرحله به فرایند، موجب افزایش حدود ۱۵ درصدی در شاخص بهره‌وری گردید. از سوی دیگر، تحلیل رفتار نسبت بخار محرک به بخار مکش‌شونده نشان می‌دهد که این پارامتر به صورت نمایی به تعداد مراحل وابسته است؛ به گونه‌ای که با افزایش تعداد مراحل تقطیر، مصرف بخار محرک به طور تصاعدی افزایش می‌یابد. یافته‌های این پژوهش، چارچوبی تحلیلی برای طراحی بهینه آب شیرین کن‌های صنعتی ارائه می‌کند که می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و افزایش صرفه‌جویی اقتصادی منجر شود.

کلمات کلیدی

آب شیرین کن چندمرحله‌ای
ضریب عملکرد
آب شور
مدل سازی ریاضی
مصارف صنعتی

دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۱۳

بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱

پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

*نویسنده مسئول

سید ابودر فنایی

ایمیل

sab.famech@birjand.ac.ir

۱- مقدمه

نقش کلیدی در بازیابی و استفاده مجدد از انرژی حرارتی بخار دارند و به کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی سیستم کمک می‌کنند. مزیت عمده ترموکمپرسور به کمپرسور مکانیکی، هزینه‌های پایین ساخت، نگهداری، تعمیرات و انرژی کم مصرفی آن است [۱]. در یک تبخیرکننده از نوع MED، بخار خروجی از بویلر (بخار محرک) و بخشی از بخار ورودی به کندانسور، توسط ترموکمپرسور مکش می‌شوند. ترموکمپرسور، بخار را از فشار کندانسور به فشار بخار ورودی به مرحله اول می‌رساند. این عمل به کمک بخار با فشار بالاتر تأمین می‌گردد. مخلوط این دو بخار بعنوان منبع حرارتی وارد لوله‌های اولین مرحله می‌شود که بالاترین دما را در بین مراحل دارد. خوراک ورودی نیز توسط نازل بر روی این دسته لوله‌ها پاشیده می‌شود که به

با توجه به بحران جهانی کم‌آبی و نیاز فزاینده به منابع آب شیرین پایدار، توسعه سیستم‌های کارآمد جهت شیرین‌سازی آب دریا، به‌ویژه روش‌های حرارتی مانند تقطیر چندمرحله‌ای (MED)، از اهمیت راهبردی برخوردار است. فرآیند تبخیر چندمرحله‌ای (MED) یکی از نخستین و پرکاربردترین فناوری‌های نمک‌زدایی آب دریا است که با بهره‌گیری از انرژی گرمایی، امکان تولید حجم قابل توجهی آب خالص را فراهم می‌کند. در این روش، آب دریا طی چند مرحله متوالی تبخیر شده و بخارات حاصل در هر مرحله متراکم می‌شوند. چگالش این بخارات منجر به تولید آب شیرین می‌شود. برای تسهیل فرآیند تبخیر و افزایش بازدهی، از کمپرسورهایی استفاده می‌شود که می‌توانند به دو صورت حرارتی (ترموکمپرسور) یا مکانیکی عمل کنند. این کمپرسورها

How to Cite this Article:

[1] S. A. Fanaee and M. Mahmoudi, "Mathematical modeling of a thermally driven multistage desalination system (MED) for industrial applications," *Journal of Science and Technology in Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 83-97, 2025. <https://doi.org/10.22034/stme.2025.520824.1127> (in Persian).



سیستم تحلیل کردند [۲]. الجویکل و همکاران استفاده از روش‌های عددی، مدل‌های دینامیکی برای سیستم‌های MED را توسعه دادند. آن‌ها نشان دادند که افزایش تعداد اثرها باعث کاهش مصرف انرژی ویژه می‌شود، اما هزینه‌های سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد [۳]. درویش و همکاران از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی مانند ASPEN Plus و EES برای مدل‌سازی سیستم‌های MED استفاده کردند. آنها تأثیر پارامترهای عملیاتی مانند دما و فشار بخار ورودی را بر عملکرد سیستم بررسی کردند و بهینه‌سازی اقتصادی سیستم را انجام دادند [۴]. خلیفه و همکاران با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، مدل‌های دینامیکی برای سیستم‌های MED توسعه دادند. آن‌ها تأثیر تغییرات بار حرارتی و دبی آب دریا بر عملکرد سیستم را بررسی کردند و راهکارهایی برای بهبود پایداری سیستم ارائه دادند [۵]. سید و همکاران سیستم‌های هیبریدی (MED-TVC) (Thermal Vapor Compression) را مدل‌سازی کردند. آن‌ها نشان دادند که ترکیب MED با سیستم‌های فشرده‌سازی بخار (TVC) باعث کاهش مصرف انرژی و افزایش بازدهی سیستم می‌شود [۶]. شارونوف و همکاران با استفاده از مدل‌های ترمودینامیکی، بهینه‌سازی سیستم‌های MED-TVC را انجام دادند. آنها تأثیر پارامترهای طراحی مانند نسبت بازیابی انرژی و تعداد اثرها را بر عملکرد سیستم بررسی نمودند [۷]. وانگ و همکاران مدل‌های ریاضی برای سیستم‌های MED در صنایع پتروشیمی توسعه دادند. آنها نشان دادند که استفاده از بخار ضایعاتی (Waste Steam) در این صنایع می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد [۸]. ژانگ و همکاران با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی دینامیکی، عملکرد سیستم‌های MED در صنایع غذایی را بررسی کردند. آنها تأثیر تغییرات کیفیت آب ورودی و دما بر بازدهی سیستم را تحلیل نمودند [۹]. عبدی خانقاه و همکاران با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، طراحی و بهینه‌سازی آب‌شیرین‌کن MED-TVC برای نصب در خلیج فارس را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد افزایش فشار بخار محرک باعث کاهش GOR می‌شود، با این وجود، افزایش دمای خوراک آب و نرخ جریان بخار محرک باعث افزایش GOR سیستم می‌شود [۱۰]. قربانی و همکاران تحلیل پارامتریک و بهینه‌سازی چند هدفه یک سیستم نمک زدایی با سه مرحله همراه با اجکتور بخار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش دمای بخار ورودی باعث افزایش تولید آب شیرین و بازده انرژی سیستم می‌شود [۱۲]. ژانگ و همکاران پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های نمک‌زدایی آب دریا در چین پرداختند که شامل توسعه سیستم‌های مدولار

خاطر دمای داغ دسته لوله‌ها تبخیر ناگهانی صورت می‌گیرد و بخار داخل دسته لوله‌ها، کندانس می‌شود. قسمتی از این مایع کندانس شده، به بویلر بازگردانده می‌شود و بقیه آن به عنوان محصول مرحله اول در نظر گرفته می‌شود [۱]. در فرآیند جداسازی مایع شور (پساب)، جریان مایع می‌تواند به مرحله‌ی بعدی انتقال یابد تا از دمای بالای آن بهره‌برداری شود. بخاری که در اثر تبخیر سریع خوراک تولید می‌شود، پس از عبور از مه‌زدایی، وارد مرحله‌ی دوم می‌شود. به عبارت دیگر، تنها در مرحله‌ی اول، انرژی خارجی وارد سیستم شده است تا آب دریا تبخیر گردد. این امر نشان می‌دهد که با یک بار وارد کردن حرارت تولید شده از بخار بویلر، می‌توان فرآیند تبخیر را در چند مرحله انجام داد. برای این کار نیاز است که در هر مرحله فشار کاهش یابد، به‌طوری که فشار مرحله‌ی بعدی کمتر از فشار مرحله‌ی قبلی باشد. این روش امکان‌پذیر است و مزیت آن صرفه‌جویی در مصرف انرژی است، زیرا با تکرار فرآیند در چندین مرحله، از حرارت موجود به شکل بهینه‌تری بهره‌برداری می‌شود. در هر یک از مراحل دوم تا انتها، بخاری که از مرحله‌ی قبلی تولید شده است، وارد لوله‌های مرحله‌ی بعدی می‌شود. در این بخش، بخار ضمن فرآیند کندانس، باعث تبخیر ناگهانی خوراک ورودی به همان مرحله می‌شود. مایع کندانس شده که در هر مرحله به دست می‌آید، به عنوان محصول نهایی آن مرحله محسوب می‌شود. بخار حاصل از آخرین مرحله نیز به سمت کندانسور هدایت می‌شود. بخشی از این بخار توسط ترموکمپرسور مکش می‌شود و قسمت دیگری وارد بخش ته‌نشین‌کننده (کندانسور) می‌گردد. در این فرآیند، آب دریا برای عملیات پیش‌گرمایش وارد لوله‌های کندانسور شده و باعث می‌شود بخاری که روی سطح لوله‌ها قرار دارد، کندانس شده و تبدیل به مایع شود. پس از گرم شدن، آب دریا در خروجی کندانسور به دو مسیر تقسیم می‌شود: بخشی به عنوان خوراک مرحله بعدی به مسیر انتقال داده می‌شود و بخش دیگر به دریا بازگردانده می‌شود تا ضمن کنترل مصرف انرژی، امکان استفاده مجدد از آن در فرآیند فراهم گردد. این تقسیم‌بندی هوشمندانه به بهینه‌سازی عملکرد سیستم و صرفه‌جویی در منابع کمک می‌کند [۱].

در ادامه به‌مرور برخی از پژوهش‌های انجام‌گرفته در زمینه مدل‌سازی آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی MED می‌پردازیم:

دسوک و همکاران بررسی ترمودینامیکی و انتقال حرارت در سیستم‌های تقطیر چنداثره را به‌طور جامع بررسی کردند. آن‌ها مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های MED ارائه دادند و تأثیر پارامترهایی مانند دما، فشار و تعداد اثرها را بر بازدهی

مقایسه با داده‌های مرجع معتبر، و شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب، صحت نتایج آن را برای کاربردهای صنعتی تضمین می‌کند.

۲- معرفی مسئله

در شکل ۱ طرح سیستم آب‌شیرین‌کن نوع حرارتی تقطیری برای یک اثر (مرحله) با جریان‌های ورودی و خروجی آن نشان داده شده است. مطابق شکل اجزای اصلی این نوع آب‌شیرین‌کن تبخیرکننده و کندانسور می‌باشند. تبخیرکننده با استفاده از یک منبع حرارتی خارجی (مانند بخار یا مایع داغ)، انرژی را به آب دریا منتقل می‌کند. در این فرآیند، آب دریا بر روی دسته لوله‌های داغ پاشیده شده و لایه نازکی تشکیل می‌دهد. این کار باعث گرم شدن و تبخیر بخشی از آب دریا می‌شود. بخار تولید شده به سمت کندانسور هدایت می‌شود تا با انتقال گرمای نهان خود به آب سرد دیگری که در لوله‌های کندانسور جریان دارد، به مایع تبدیل شود در نهایت، دو محصول شامل میعانات (آب شیرین) و پساب غلیظ‌شده (آب شور باقیمانده) حاصل می‌گردد. مطابق شکل ۱ المان مهم به نام دمپر از ورود قطرات آب شور به همراه بخار به کندانسور جلوگیری می‌کند، این کار مانع تماس نمک‌ها با لوله‌های کندانسور شده و از مشکلاتی مانند خوردگی و رسوب‌گذاری که بازده انتقال حرارت را کاهش می‌دهند، پیشگیری می‌کند. در این سیستم، آب شور باقیمانده (پساب) معمولاً به دریا بازگردانده می‌شود. بخار آب تولید شده در هر مرحله، با دمایی پایین‌تر از مرحله قبل، به عنوان منبع حرارتی برای مرحله بعدی استفاده می‌شود. بخاری که در داخل لوله‌های مراحل دوم به بعد میعان می‌کند، محصول نهایی یعنی آب شیرین را تشکیل می‌دهد. در نهایت، بخار آخرین مرحله در کندانسور پایانی توسط آب دریا سرد شده و به مایع تبدیل می‌شود که این عمل، آب ورودی را نیز کمی پیش‌گرم می‌کند. بهینه‌سازی انرژی در این سیستم از طریق حرکت همزمان میعانات (آب شیرین) و پساب (آب شور غلیظ‌شده) به سمت مراحل بعدی انجام می‌پذیرد. از آنجایی که دمای این جریان‌ها از دمای اشباع مرحله بعدی بالاتر است، با ورود به مرحله بعد، بخشی از آن‌ها به طور خودبه‌خود تبخیر شده و بخار بیشتری تولید می‌کند. همچنین مشخصات مفروض سیستم مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است که در آن تعداد اثرها (N)، شوری آب دریا (X_f)، دمای آب دریا (T_{cw})، دمای آب تغذیه (T_f)، دبی آب تغذیه (M_f)، فشار جریان بخار محرک (P_m)، دبی جریان بخار محرک (M_m) می‌باشند.

MED و استفاده از حرارت زائد نیروگاه‌های صنعتی است. همچنین، کاربرد هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی عملکرد هیبریدی RO-MED در مقیاس بزرگ را مورد توجه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد این فناوری‌ها نقش مهمی در تأمین پایدار آب صنعتی و شهری ایفا می‌کنند [۱۳].

صیادی و صفری نیز مدلی از آب‌شیرین‌کن (MED-TVC) را توسعه داده و با استفاده از تحلیل ترمودینامیک آن را بهینه کردند. مدل توسعه یافته مربوط به یکی از آب‌شیرین‌کن‌های جزیره کیش بوده است که جهت انجام مطالعه آن‌ها انتخاب شده بود [۱۴ و ۱۵]. ضامن و همکاران به مدل‌سازی ترمودینامیکی و تحلیل انرژی سیستم (MED) متصل به نیروگاه بخار پرداخته است. با بازیافت حرارت از جریان‌های پساب (کندانسور)، دمای بهینه بخار محرک را تعیین نمودند که منجر به افزایش بازده نرخ تولید (GOR) تا مقدار قابل توجهی و کاهش ۱۸ درصدی هزینه آب تولیدی گردید [۱۶]. السعید و الابی استفاده از هیدروژن سبز به عنوان منبع انرژی برای سیستم‌های (MED) را بررسی کرده نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که این روش می‌تواند انتشار کربن را تا ۹۰ درصد کاهش دهد، اما هزینه تولید آب در حال حاضر ۱/۲ دلار بر مترمکعب است که نسبت به سیستم‌های متعارف بالاتر است. با این حال، با کاهش قیمت هیدروژن سبز در آینده، این فناوری می‌تواند به گزینه‌ای پایدار تبدیل شود [۱۷]. مدل سازی نقش مهمی در طراحی، بهینه‌سازی و کنترل سیستم‌های آب‌شیرین‌کن حرارتی نوع MED ایفا می‌کند [۱۰]. مدل‌سازی ریاضی آب‌شیرین‌کن حرارتی MED کمک می‌کند تا تأثیر عوامل مهمی مانند تعداد مراحل، دمای بخار ورودی و فاکتور غلظت بر راندمان و نسبت بهره‌وری سیستم به‌طور دقیق ارزیابی شود و در نتیجه طراحی سیستم‌های کارآمدتر با مصرف انرژی کمتر امکان‌پذیر گردد [۱۱]. با توجه به اهمیت موضوع و بهره‌برداری از این نوع آب‌شیرین‌کن‌های حرارتی برای مصارف صنعتی مختلف، در کار حاضر به مدل‌سازی ریاضی یک سیستم آب‌شیرین‌کن تقطیر چند اثره و بهینه آن جهت بهره‌برداری در صنایع گوناگون معرفی می‌گردد. پژوهش حاضر با ارائه مدل ریاضی جامعی برای شبیه‌سازی این سیستم‌ها، گامی مهم در بهبود دقت و قابلیت‌اعتماد فناوری برداشته است. نوآوری محوری این کار در ترکیب دقیق معادلات حاکم با محاسبات جبری پیشرفته منجر به پیش‌بینی عملکردی به‌مراتب دقیق‌تر نسبت به مدل‌های پیشین شده است. اعتبارسنجی قوی مدل از طریق محاسبات جبری،

$$D_1 = \frac{(M_m + M_{ev}) \cdot \lambda_s - F_1 \cdot C_p \cdot (T_1 - T_f)}{\lambda_1} \quad (9)$$

که در آن به ترتیب M دبی جریان بخار محرک، M_{iv} دبی جریان بخار اشباع مکش شده از آخرین تأثیر به اجکتور، λ_s گرمای نهان تبخیر در دمای و (λ) گرمای نهان تبخیر در دمای T_1 است. اولین عبارت در صورت کسر، گرمای موردنیاز از جانب اجکتور برای تبخیر کسری از آب تزریق ده به اولین تأثیر است در تأثیر دوم نیز با نوشتن معادله بقا انرژی می‌توان جرم بخار تولیدشده را محاسبه نمود:

$$D_2 = \frac{D_1 \cdot \lambda_1 - F_2 \cdot C_p \cdot (T_2 - T_f) + B_1 \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)}{\lambda_2} \quad (10)$$

برای تأثیر بعدی تا آخرین آن به صورت زیر است:

$$D_i = \frac{(D_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} + d_{i-1} \cdot \lambda_{i-1} + d'_{i-1} \cdot \lambda'_{i-1}) + F \cdot C_p \cdot (T_i - T_f) + i \cdot p \cdot (i - f)}{\lambda_i} \quad (11)$$

$$+ \frac{B_{i-1} \cdot C_p \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\lambda_i}$$

$$i = 2, \dots, N$$

در روابط بالا مقادیر D_1 و D_1' به ترتیب، دبی بخار آب اشباع در اثر تبخیر ناگهانی در جریان آب دورریز و آب تقطیرشده در هر مرحله می‌باشد (از تأثیر دوم بعد) که روابط آن به صورت رابطه ۱۲ و ۱۳ است [۲۰]:

$$d_i = \frac{B_{i-1} \cdot C_p \cdot (T_{i-1} - T'_i)}{\lambda'_i} \quad (12)$$

$$i = 2, \dots, N$$

$$d'_i = D_i \cdot C_p \cdot \left(\frac{T_{Ci-1} - T_i}{\lambda'_i} \right) \quad (13)$$

$$i = 2, \dots, N$$

در رابطه (۱۳) دمای آب دور ریز در تأثیر N ام است که وقتی از تأثیر وارد تأثیر N ام می‌شود λ'_i گرمای نهان تبخیر در دمای T'_i است که کافی است در رابطه (۹) قرار گیرد [۲۳].

$$T'_i = T_i + NEA_i \quad (14)$$

حد مجاز غیرتعادلی یک پارامتر برای اندازه‌گیری بازه فرایند تبخیر ناگهانی است NEA داریم [۲۴]:

$$T_i = T_{i+1} + \Delta T \quad (2)$$

دمای بخار تولیدشده در تأثیر N ام، T_{vi} است که این مقدار به اندازه افزایش نقطه جوش (BPE)، از دمای اشباع برای آب شور کمتر است. در این مدل، BPE تابعی از دما و شوری آب تغذیه در هر تأثیر است که رابطه‌های آن به صورت زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$BPE = A \cdot X + B X^2 + C \cdot X^3$$

$$A = 80325 \cdot 10^{-2} + 1.883$$

$$* 10^{-4} \cdot T + 4.02 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (3)$$

$$B = -7.625 \cdot 10^{-4} + 9.02$$

$$* 10^{-5} \cdot T - 5.2 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$$

$$T_{vi} = T_i - BPE \quad (4)$$

با در نظر گرفتن قطره‌گیر در هر تأثیر، آب تغذیه بعد از تبخیر از آن عبور می‌کند که موجب افت فشار و به تبع آن، دچار افت دما می‌شود. آب بعد از این مرحله وارد تأثیر بعد می‌شود [۲۳].

$$T_{evi} = T_{vi} - \Delta T_p \quad (5)$$

دبی آب تغذیه از دریا (M_f) به طور مساوی با F_i دبی بین تمامی تأثیرها تقسیم می‌شود.

$$F_i = \frac{M_f}{N} \quad (6)$$

آب دورریز بعد از خروج از تأثیر N ام، وارد تأثیر $i+1$ می‌شود تا اینکه به تأثیر N ام رسیده و از آن خارج می‌شود. مقدار دبی آب دورریز از اولین تأثیر تا آخرین تأثیر آن، در روابط زیر آمده است:

$$B_1 = F_1 - D_1$$

$$B_{i+1} = \sum_{i=1}^{i+1} F_i - D_i \quad (7)$$

$$(i = 1, \dots, N - 1)$$

برای نوشتن معادلات بقای انرژی به محاسبه گرمای نهان نیاز است. گرمای نهان با استفاده از روابط تجربی تابع دما محاسبه می‌شود [۲۱]:

$$\lambda = 2501.9 - 2.407 \cdot T + 0.00119 \cdot T^2$$

$$- 1.5863 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (8)$$

با نوشتن معادلات بقای انرژی در اولین تأثیر و مرتب کردن آن، می‌توان بخار تولیدشده به واسطه جوشش را به دست آورد:

۵- روش حل، بحث و نتایج

جهت حصول اطمینان کافی از صحت برنامه نوشته شده، مقایسه‌ای با مدل‌سازی انجام شده توسط مرجع [۲] انجام شد. جدول ۲ مقایسه داده‌های استخراجی از محاسبات جبری مساله حاضر با داده‌های مرجع را نشان می‌دهد. همچنین دمای آب خروجی از کندانسور اول و با طرحی که در کار حاضر روی فرآیند اعمال شد دمای نهایی این آب قبل از ورود به مراحل با توجه به دبی و دماهای دو جریان آب و بخارهای پرت افزایش می‌یابد پس از استخراج معادلات حاکم بر MED، به منظور اعتبارسنجی محاسبات تغییرات دما و بررسی صحت کد معادلات ذکر شده در مرجع معتبر [۲] در محاسبات MED مورد قبول است، استفاده می‌گردد. از سویی قابل توجه است که بخار ورودی در این مسئله به صورت فشرده شده با دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و دبی خروجی آب شیرین‌کن نیز برابر با ۱ kg/s می‌باشد.

جدول ۲: مقایسه داده‌های استخراجی از محاسبات جبری مساله حاضر با داده‌های مرجع [۲]

No.	1	2	3	4	5	6
T (°C) مطالعه حاضر	91.2370	82.0133	72.3040	62.0829	51.3245	39.9989
T (°C) مرجع [۲]	91.2372	82.0132	72.3037	62.0831	51.3247	40

بهره‌وری بیشتری می‌شود، اما از سوی دیگر هزینه تعمیر و نگهداری مجموعه یک چالش جدی است. علت آن است که با توجه به معادله (۱)، در اثر افزایش تعداد مراحل، اختلاف دمای بین مراحل کاهش و دمای مراحل افزایش می‌یابد. نتیجه این تغییرات، کاهش مقدار بخار مصرفی و در نهایت افزایش نسبت بهره‌وری است. مقدار دمای بخار ورودی به اولین مرحله باید بتواند آب دریای پاشیده شده بر روی دسته لوله‌ها را تبخیر کند. از طرفی برای تأمین این بخار از بویلرهای موجود در محل (صنایع مورد نظر) استفاده می‌شود.

$$NEA_i = \frac{0.33 \cdot (T_{i-1} - T_i)}{T_{vi}} \quad (15)$$

در رابطه (۱۵) دمای آب تقطیر وارد محفظه تبخیر ناگهانی آن می‌شود و به صورت رابطه ۱۶ قابل محاسبه است:

$$T'_i = T_{vi} + NEA_i \quad (16)$$

مقدار شوری آب خروجی از هر تأثیر اول و تأثیرهای دوم، تا آخرین آن، به صورت زیر است:

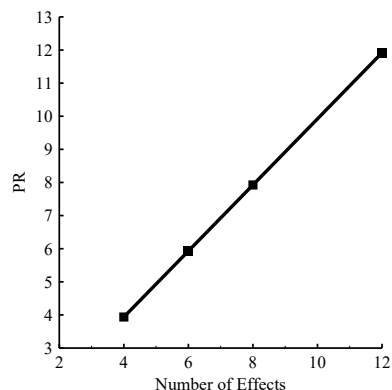
$$X_{b1} = \frac{F_1}{B_1} \cdot X_f \quad (17)$$

در نهایت مقدار آب شیرین تولیدشده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

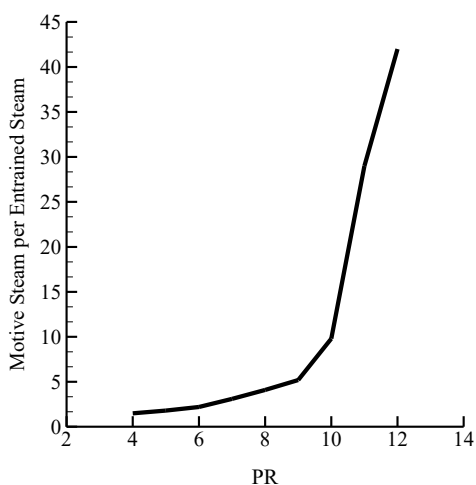
$$M_d = \sum_{i=1}^n D_i + \sum_{i=2}^n d_i \quad (18)$$

لذا در مساله حاضر به کمک نرم افزار متلب به عنوان محیطی برای حل مدل ریاضی ویژگی‌های توصیفی آب‌شیرین‌کن MED مدل سازی و طراحی می‌گردد. به منظور تحلیل عملکرد یک آب‌شیرین‌کن MED، اثر متغیرهای فرایندی مختلف بر روی نسبت بهره‌وری مورد بررسی قرار گرفت. یکی از پارامترهای مؤثر بر نسبت بهره‌وری سیستم، تعداد مراحل آب‌شیرین‌کن است. حداقل تعداد مراحل آب‌شیرین‌کن با توجه به ظرفیت، ملاحظات اقتصادی، ساخت و طراحی سیستم تعیین می‌گردد. شکل ۲ نحوه تغییرات نسبت بهره‌وری را با تعداد مراحل را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود نسبت بهره‌وری با افزایش تعداد مراحل سیستم آب‌شیرین‌کن در هر دمای تغذیه دلخواهی ثابت به صورت خطی افزایش می‌یابد. علت آن این است که در اثر افزایش تعداد مراحل، اختلاف دمای بین مراحل کاهش و دمای مراحل افزایش می‌یابد. نتیجه این تغییرات، کاهش مقدار بخار مصرفی و در نهایت افزایش نسبت بهره‌وری است [۲۳]. از بررسی تأثیر تعداد اثر در یک مجموعه MED می‌توان مشاهده نمود که هر چه تعداد اثر بیشتر شود مقدار نسبت بهره‌وری نیز افزایش می‌یابد. هر چند که افزایش تعداد محفظه‌های یک مجموعه MED موجب

افزایش تعداد مراحل بصورت نمایی رشد می‌کند از طرفی یکی از پارامترهای مهم طراحی ترموکمپرسور، نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده است که مقدار بهینه آن حدود ۱/۵-۱ می‌باشد [۱۹ و ۲۰]. جدول ۴ نشان دهنده مقادیر تغییرات PR بر حسب فاکتور غلظت (نسبت غلظت پساب به غلظت آب دریا) است. فاکتور غلظت، نسبت مستقیمی با مقدار خوراک ورودی و مقدار محصول دارد [۱۱]. اگر مقدار خوراک، ثابت در نظر گرفته شود، طبق معادله با افزایش فاکتور غلظت (یا کاهش غلظت آب دریا)، مقدار بخار تولیدی هر مرحله افزایش می‌یابد. با توجه به تعریف نسبت بهره وری، این افزایش سبب بالا رفتن مقدار PR می‌شود.



شکل ۲: اثر تعداد مراحل بر روی نسبت بهره‌وری برای سیستم آب‌شیرین‌کن حاضر در یک دمای تغذیه ثابت



شکل ۳: اثر تعداد مراحل بر نسبت بخار محرک به بخار مکش‌شونده

جدول ۴: اثر پارامتر غلظت Xb/Xf بر روی نسبت بهره‌وری برای یک حالت از تعداد تأثیر ثابت $N=6$

Xb/Xf	PR
1.2	4.6
1.4	4.9
1.5	5.1
1.8	5.2
2	5.3
3	5.4

بنابراین، با بررسی نتایج ارائه شده نشان داده شد که سیستم‌های آب‌شیرین‌کن تقطیر چنداثره با قابلیت تولید آب شیرین با بازدهی بالا (نسبت عملکرد ۱۰-۱۲) و مصرف انرژی بهینه، نقش حیاتی در صنایعی مانند نیروگاهی، پتروشیمی و کشتی‌سازی می‌توانند ایفا کنند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از بخار کم‌دماتر یا گرمای اتلافی صنعتی، هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و امکان شیرین‌سازی آب دریا با شوری بسیار بالا را فراهم می‌سازند، درحالی‌که سایر روش‌های حرارتی در چنین شرایطی کارایی کمتری دارند. کنترل دمای آب تغذیه در

برای بررسی اثر تغییرات دمای بخار ورودی به اولین مرحله، در تعداد مراحل مختلف، نسبت بهره وری برحسب این پارامتر در مقادیر آن در جدول ۳ ارائه گردید است. با افزایش دمای بخار ورودی به اولین مرحله، اختلاف دمای بین مراحل افزایش می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دمای تغذیه در تعداد تأثیر بیشتر منجر به افزایش نسبت بهره‌وری شده است. با افزایش دمای هر محفظه نسبت به اثر قبلی می‌گردد بطوری که اختلاف دمای بین دو محفظه را جبران می‌کند و از طرفی افزایش دمای محفظه سبب تقویت نسبت بهره‌وری مجموعه MED می‌شود. بهترین نسبت عملکرد در مجموعه محفظه‌ای با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۱۲/۰۴۹ می‌باشد. بر اساس تحلیل تغییرات PR در جدول ۳ و با در نظر گرفتن دمای تغذیه ۸۰ درجه سانتی‌گراد، هر مرحله از فرآیند، باعث افزایش بهره‌وری به میزان تقریبی ۱۵ درصد می‌شود. این برآورد بر پایه روند تغییرات خطی و میانگین‌گیری است که در شکل ۲ نشان داده شده است. این نتیجه کاملاً با اصل کاهش انرژی ویژه، که در مطالعات پایه مرجع معتبر [۲] هم مورد تأیید قرار گرفته است، هماهنگ است.

جدول ۳: مقادیر تغییرات دمای تغذیه بر روی نسبت بهره‌وری در تعداد مراحل مختلف

PR	Ts			
	80	90	100	110
N=4	3.912	3.940	3.968	3.995
N=6	5.892	5.931	5.969	6.006
N=8	7.875	7.925	7.973	8.019
N=12	11.850	11.918	11.985	12.049

شکل ۳ اثر تعداد مراحل بر نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده را نشان می‌دهد. نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده بسیار متأثر از تعداد مراحل می‌باشد بدین معنا که مقدار این پارامتر با

Vol. 126, No. 1-3, pp. 45-59, 1999. doi: [10.1016/S0011-9164\(99\)00154-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00154-X)

[2] H. El-Dessouky and H. Ettouney, "Fundamentals of Salt Water Desalination," Elsevier, 2002.

[3] F. Al-Juwayhel, H. El-Dessouky, and H. Ettouney, "Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps," *Desalination*, Vol. 114, No. 3, pp. 253-275, 1997.

[4] F. N. Alasfour, M. A. Darwish, and A. O. Bin Amer, "Thermal analysis of ME-TVC + MEE desalination systems," *Desalination*, Vol. 174, No. 1, pp. 39-61, 2005. doi: [10.1016/j.desal.2004.08.039](https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.039)

[5] A. E. Khalifa, H. Alawadhi, and M. Ahmad, "Dynamic modeling of multi-effect desalination plants," *Desalination*, Vol. 250, No. 3, pp. 928-935, 2010.

[6] M. A. Sayed, H. T. El-Dessouky, and H. M. Ettouney, "Thermodynamic analysis of a hybrid MED-TVC desalination system," *Desalination*, Vol. 365, pp. 55-71, 2015.

[7] A. Sharonov et al., "Optimization of MED-TVC desalination systems using thermodynamic models," *Desalination*, Vol. 435, pp. 45-58, 2018.

[8] Y. Wang et al., "Modeling and optimization of MED systems for petrochemical industries," *Desalination*, Vol. 456, pp. 78-90, 2019.

[9] L. Zhang et al., "Dynamic modeling of MED systems for food industry applications," *Desalination*, Vol. 500, pp. 114-125, 2021.

[10] M. Abdi-Khanghah, B. Bazooyar, M. Gonbadi, and K. C.-W. Wu, "Design and optimization of MED-TVC desalination plant using mathematical modeling coupled with response surface methodology," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, Vol. 153, p. 105187, 2023.

[11] M. Arjmandi and M. Pakizeh, "Design and mathematical modeling of a multi-effect desalination system with applicability in steam power plants and similar industries (MED)," *Farayand-e No (Process No)*, Vol. 8, No. 41, pp. 36-49, 2013 (in Persian).

محدوده ۷۰-۸۰ درجه سانتیگراد و ادغام فناوری‌هایی مانند ترموکمپرسور و پیش‌تصفیه آب، نه تنها از رسوب‌گذاری جلوگیری می‌کند، بلکه پایداری فرایند را در طولانی‌مدت تضمین می‌نماید. این ویژگی‌ها MED را به گزینه‌ای کلیدی در مناطق خشک با محدودیت منابع آب و انرژی تبدیل کرده و همسو با اهداف توسعه پایدار، به کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و مدیریت منابع کمک بسیار زیادی می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری کلی

اثر متغیرهای فرایندی مختلف مانند تعداد مراحل، دمای بخار ورودی به مرحله اول و فاکتور غلظت بر روی پارامتر مهم مانند نسبت بهره‌وری آب شیرین کن MED، مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی نشان داد که تغییرات نسبت بهره‌وری ارتباط مستقیمی با تغییر تعداد مراحل دارد. با افزودن یک مرحله به تعداد مراحل نسبت بهره‌وری حدود ۱۵٪ افزایش می‌یابد. اما افزایش تعداد مراحل، سبب رشد نمایی نسبت بخار محرک به بخار مکش شونده، می‌شود و طراحی و ساخت ترموکمپرسور را با مشکل مواجه می‌کند همچنین با افزایش فاکتور غلظت، مقدار این نسبت زیاد می‌شود. این نکته نشان می‌دهد که سیستم MED با تعداد مراحل ثابت، در مناطقی با شوری کمتر آب دریا دارای نسبت بهره‌وری بالاتری است. مهم‌ترین نتایج حاصل عبارت‌اند از:

۱. نسبت بهره‌وری با افزایش تعداد مراحل سیستم رابطه مستقیم و خطی دارد.
۲. افزایش یک مرحله به سیستم، موجب افزایش ۱۵٪ در نسبت بهره‌وری می‌شود.
۳. بهترین عملکرد در پیکربندی ۱۲ مرحله‌ای با دمای تغذیه ۸۰ درجه سانتی‌گراد حاصل شد.
۴. آب شیرین کن تقطیر چنداثره ابزاری مهم برای بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های صنعتی است. تحقیقات نشان می‌دهد که ترکیب مدل‌های ترمودینامیکی و شبیه‌سازی‌ها می‌تواند بهره‌وری این سیستم‌ها را افزایش دهد. با رشد نیاز به آب شیرین، توسعه مدل‌های دقیق‌تر و هوشمندتر در این حوزه از اهمیت بالایی برخوردار است.

۷- منابع

[1] M. Al-Shammiri and M. Šafář, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*,

- [18] H. O. A. Hamed, "Thermal assessment of a Multiple Effect Boiling (MEB) desalination system," *Desalination*, Vol. 86, pp. 325-339, 1992.
- [19] N. H. Ali Karameldin and M. M. Shamloul, "Modeling and simulation of steam jet ejectors," *Desalination*, Vol. 123, pp. 1-8, 1999.
- [20] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors," *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 41, pp. 551-561, 2002.
- [21] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, "Development of a steady-state mathematical model for MED-TVC desalination plants," *Desalination*, Vol. 351, pp. 9-18, 2014. doi: [10.1016/j.desal.2014.07.018](https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.07.018)
- [22] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Exergy and thermo-economic analysis for MED-TVC desalination systems," *Desalination*, Vol. 447, pp. 29-42, 2018. doi: [10.1016/j.desal.2018.06.008](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.06.008)
- [23] N. Eshoul, A. Almutairi, R. Lamidi, H. Alhajeri, and A. Alenezi, "Energetic, exergetic, and economic analysis of MED-TVC water desalination plant with and without preheating," *Water*, Vol. 10, No. 3, p. 305, 2018. doi: [10.3390/w10030305](https://doi.org/10.3390/w10030305)
- [24] H. B. Harandi, A. Asadi, M. Rahnama, Z.-G. Shen, and P.-C. Sui, "Modeling and multi-objective optimization of integrated MED-TVC desalination system and gas power plant for waste heat harvesting," *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 149, p. 107294, 2021.
- [12] S. Ghorbani, M. Deymi-Dashtebayaz, and E. Tayyeban, "Parametric investigation and performance optimization of a MED-TVC desalination system based on 1-D ejector modeling," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 288, p. 117131, 2023.
- [13] Y. Zhang, X. Liu, W. Chen et al., "Advancing Water Security: China's Latest Seawater Desalination Technologies in 2025," *Desalination*, Vol. 560, pp. 115-130, Jan. 2025.
- [14] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Thermoeconomic optimization of multi-effect distillation desalination systems," *Applied Energy*, Vol. 87, No. 4, pp. 1122-1133, 2010. doi: [10.1016/j.apenergy.2009.05.023](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.05.023)
- [15] H. Sayyaadi and A. Saffari, "Various approaches in optimization of multi-effects distillation desalination systems using a hybrid meta-heuristic optimization tool," *Desalination*, Vol. 254, pp. 138-148, 2010. doi: [10.1016/j.desal.2009.11.045](https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.045) (in Persian)
- [16] M. Zamen, M. Kahani, J. Yazdanpanahi, R. Abedini, and M. H. Ahmadi, "Modeling of a direct-contact humidification-dehumidification desalination unit in a 256 MW steam power plant using effluent streams: Case study," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 45, p. 102966, 2023.
- [17] K. Elsaid, E. T. Sayed, and A. G. Olabi, "Sustainable multi-effect distillation powered by green hydrogen: A techno-economic feasibility study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 189, p. 114789, 2025.