



Investigation of Unsteady Thermal Performance of Multi-Effect Desalination with Thermal Vapor Compression

S. Khajeh Namaghi, M. Nazari*, M. Nazari, O. Pilevar

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

ABSTRACT: Due to the high use of thermal desalination plants, there is a great tendency to simulate their behavior. Most of the research is focused on modeling steady behavior, but to design control systems and evaluate their performance, we also need to study unsteady behavior. Also, few researchers have studied the system shutdown. In this paper, steady and unsteady modeling of an industrial multi-effect desalination plant with four effects, one condenser, and a Thermo compressor has been studied. The variable-step, variable-order method has been used to solve differential equations. Each evaporator is divided into three phases of vapor, tubes, and brine then the equations of mass and energy conservation are used. Results have been validated with real plant data. The variables of temperature, vapor flow rate, brine flow rate and brine level were studied in unsteady modeling in starting, shutting down, and steady-state conditions. It was found that the largest change in the brine flow rate after shutting down is in the last effect, which increases by 42%. Also, the biggest change in the level of the brine is in the first effect, which after 800 seconds will reach 11 times the steady state that will cause the flooding phenomenon.

Review History:

Received: Dec. 24, 2021

Revised: Jun. 16, 2022

Accepted: Jun. 17, 2022

Available Online: Jun. 29, 2022

Keywords:

Desalination plants

Unsteady behavior

Shut down

Variable-step and variable-order

Flooding phenomenon

1- Introduction

Modeling and simulation of the desalination process simplify the design and operation of the Multi-Effect Desalination with Thermal Vapor Compression (MED-TVC) device and gives us a better view of the optimal operation and process control. Dynamic modeling will be very useful for solving problems related to unsteady behavior such as start-up and shutdown and the effects of disturbances. There are many studies on modeling in the steady state, but in the transient state, the studies obtained have been very limited due to the complexity of the equations obtained. Cipollina et al. [1] presented a dynamic model for the transient operation of a multi-effect desalination plant with a Thermo compressor in 2017. Elsayed et al. In 2018 [2, 3] investigated the dynamic performance of the multi-effect desalination process in different forms of feed water into the system and the effect of the perturbation on the MED-TVC. In 2019, Guimard et al. [4] considered new considerations along with a control strategy for modeling a multi-effect desalination plant with an ejector under dynamic conditions. In 2019, Dong et al. [5] connected an integrated pressurized water reactor with a multi-effect desalination process with thermal vapor compression. They developed a dynamic model for the design and optimization of control devices for nuclear desalination plants. In 2020, Hakim et al. [6] proposed a new

algorithm to solve the problem of steady-state analysis of a multi-effect evaporator with forward feed, which consists of three effects. In 2021, Hua et al. [7] studied the dynamic response of state variables in the multi-effect desalination process. These variables include evaporation temperature, salinity, evaporation mass flow rate, and brine level.

According to the research on multi-effect desalination plants with ejectors, it is clear that most studies in this field have focused on modeling the steady-state behavior of this system and very little research has been done on the transient state model. However, in order to design control devices and especially principled planning with the least amount of losses and stress to the desalination system and its ancillary devices including ejector, pumps, and heating supply system during start-up and shutdown, we need to model the transient behavior of desalination plant. In this study, the unsteady behavior of four-effect thermal desalination with an ejector is modeled. This modeling has been implemented by obtaining governing differential equations of evaporators, condensers, and ejectors, in order to obtain the relationship between the outputs and inputs of the system by using the thermophysical properties of water. One of the main differences between current modeling and others, especially the Elsayed model [3], is in the dynamic model of the condenser, which is able to report the water level of the condenser. Also, the modeling

*Corresponding author's email: mnazari@shahroodut.ac.ir



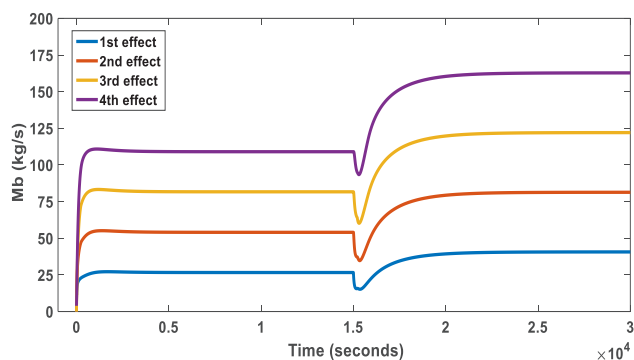


Fig. 1. Output Brine mass flow rate changes from all effects

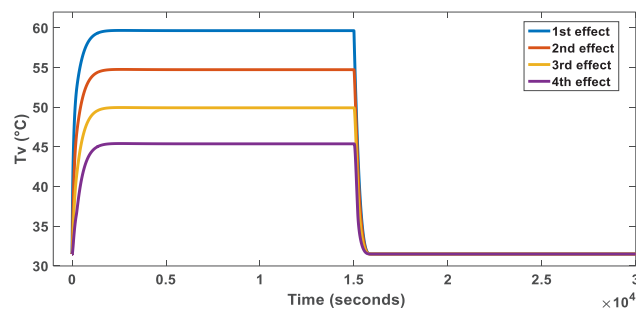


Fig. 2. Vapor temperature changes in all effects in mode of on and off

of the ejector is based on gas dynamics equations in two algorithms of design and evaluation, which most articles use only one empirical equation. This type of ejector modeling makes it possible to use the design algorithm to obtain the geometrical characteristics of the ejector and then by using evaluate algorithm the reaction of the same ejector to start-up and shutdown of the system can be studied. While the existing experimental equations for the ejector examine the reaction of a general ejector under the new conditions. Also, most of the experimental equations of the ejector, by changing the input and output conditions, offer a new ejector suitable for the new conditions, which is not suitable for unsteady modeling at all. In the end, with the results of the unsteady behavior of the four-effect thermal desalination plant with an ejector, it is possible to observe the course of changes in the thermophysical properties of the device from the start-up to stability and then shutting down the system.

2- Methodology

In this research, the first-order nonlinear ordinary differential equations for the condenser and each evaporator are solved simultaneously through MATLAB Simulink using the variable-order, variable-step method. First, the steady state response is obtained through the steady model and the results are placed in the required coefficients of the unsteady model. In the unsteady model, all variables are calculated at each time step for each effect, and the suction ratio of the thermal compressor at each time step is adjusted using the pressure values at the last effect and the motive vapor pressure through the ejector evaluation algorithm. To validate the steady and unsteady model of the MED-TVC, the experimental data of Tripoli MED-TVC plant located in Libya [8] have been used which indicates a very good agreement between the present modeling and experimental data.

3- Results and Discussion

The desalination plant is simulated in both start-up and shutdown modes, first, the system is turned on so that the thermodynamic parameters reach their steady values from

the ambient condition, then the ejector motive steam closes after 15000 seconds, so the thermodynamic parameters return to their ambient condition. At the start-up, the heating steam enters the first effect tubes, and gradually as the tubes heat up, the feed water begins to evaporate and the steam temperature rises (Fig. 1), then the generated steam enters the next effect and this process continues until the final effect. At this time, all steam flow and brine flow reach their steady state from zero and the level of brine will increase from zero to its steady state (Figs. 2, 3).

Then the shutdown occurs and the effects temperature returns to ambient temperature (Fig. 1). As shown in Figs. 2 and 3, during the shutdown, the flow rate and the level of the brine increase in each effect, and the device can face flooding. The reason for this phenomenon is the reaction of the transient state of the system to the decrease of the saturation pressure in the effects and the lack of sufficient pressure for the brine to pass through the orifices. Therefore, the system provides the necessary pressure for the passage of brine flow through the orifices by increasing the brine level in the first effects compared to the last effects.

As shown in Fig. 4 in the condenser section, the level of the condensed water, feed water temperature, and GOR start to increase with the start-up of the system, and after applying the shutdown, the temperature decreases to ambient temperature and GOR becomes zero. But the level of the condensed water reaches zero with a delay of 2000 seconds. The reason for this delay is that after applying the shutdown in the system, there is still a small amount of steam left in the effects and the condenser, and enough time is needed for the condenser to drain completely.

4- Conclusions

From MED-TVC simulation during start-up to complete shutdown, the following results are obtained:

In the event of a sudden shutdown in the motive steam, the control system has a limited time (400 seconds) depending on the height of the effect to shut down the entire system without damage to the device, otherwise, flooding occurs.

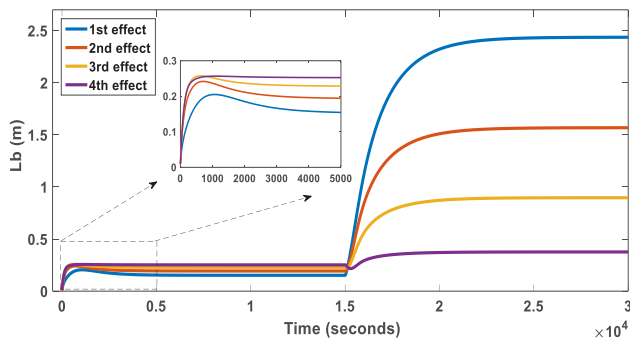


Fig. 3. Brine level changes in all effects in mode of on and off

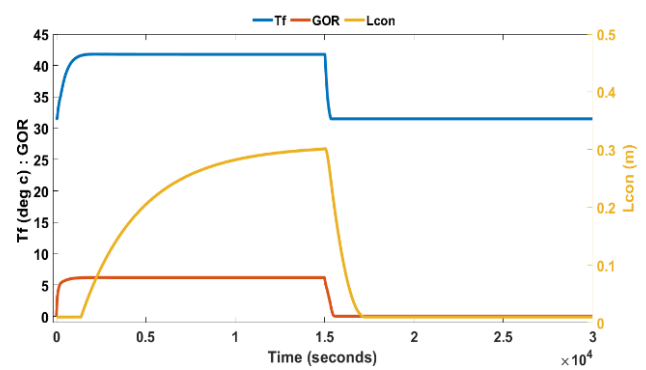


Fig. 4. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm

The time required for the device to reach a steady state after start-up is longer than the time required for the device to reach ambient mode after shutdown.

Only in the unsteady model is possible to compute the exact level of the brine, and this can help to select the appropriate orifice and tube diameter for the design of the desalination plant, as well as the type of operation of the control valve (according to the control system and Bernoulli equations used for the flow).

References

- [1] A. Cipollina, M. Agnello, A. Piacentino, A. Tamburini, B. Ortega, P. Palenzuela, D. Alarcon, G. Micale, A dynamic model for MED-TVC transient operation, *Desalination*, 413 (2017) 234-257.
- [2] M.L. Elsayed, O. Mesalhy, R.H. Mohammed, L.C. Chow, Transient performance of MED processes with different feed configurations, *Desalination*, 438 (2018) 37-53.
- [3] M.L. Elsayed, O. Mesalhy, R.H. Mohammed, L.C. Chow, Effect of disturbances on MED-TVC plant characteristics: Dynamic modeling and simulation, *Desalination*, 443 (2018) 99-109.
- [4] L. Guimard, A. Cipollina, B. Ortega-Delgado, G. Micale, F. Couenne, P. Bandelier, C. Jallut, New considerations for modelling a MED-TVC plant under dynamic conditions, *Desalination*, 452 (2019) 94-113.
- [5] Z. Dong, M. Liu, X. Huang, Y. Zhang, Z. Zhang, Y. Dong, Dynamical modeling and simulation analysis of a nuclear desalination plant based on the MED-TVC process, *Desalination*, 456 (2019) 121-135.
- [6] A.E. Hakim, A. Abouelsoud, R. Abobeah, E.E. Ebrahiem, Enhancement of Feed Forward Multi Effect Evaporator Performance for Water Desalination Using PI Control, *Journal of Advanced Engineering Trends*, (2020).
- [7] J. Hua, L. Wua, Y. Wangb, W. Zhanga, Y. Hua, Dynamic modeling and simulation of the multi-effect distillation desalination process, *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 217 (2021) 31-41.
- [8] M.M. Ashour, Steady state analysis of the Tripoli West LT-HT-MED plant, *Desalination*, 152(1-3) (2003) 191-194.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. Khajeh Namaghi, M. Nazari, M. Nazari, O. Pilevar, Investigation of Unsteady Thermal Performance of Multi-Effect Desalination with Thermal Vapor Compression, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(7) (2022) 333-336.

DOI: 10.22060/mej.2022.20921.7337





بررسی عملکرد حرارتی ناپایا آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور

سبحان خواجه نامقی، محسن نظری*، مصطفی نظری، امید پیلهور

وابستگی سازمانی.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۰۳
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۲۶
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۷
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸

کلمات کلیدی:

آب شیرین کن
رفتار ناپایا
خاموش شدن
گام و مرتبه متغیر
پدیده طغیان

خلاصه: با توجه به کاربرد زیاد آب شیرین کن‌های حرارتی تمایل زیادی به شبیه‌سازی رفتار این دستگاه‌ها وجود دارد که بیشتر پژوهش‌ها روی مدل‌سازی رفتار پایا متمرکز بوده اما برای طراحی دستگاه‌های کنترلی و بررسی عملکرد آن‌ها نیاز به مدل‌سازی رفتار ناپایا داریم. همچنین مطالعات بسیار کمی به نحوه خاموش شدن آب شیرین کن پرداخته‌اند. در این پژوهش مدل‌سازی عددی پایا و ناپایا، آب شیرین کن چند اثره همراه در مقیاس صنعتی با چهار اثر، یک کندانسور و یک ترموکمپرسور مورد بررسی قرار گرفته شده است. از روش گام و مرتبه متغیر برای حل معادلات دیفرانسیلی استفاده شده است. هر اواپراتور به سه فاز بخار، لوله‌ها و آب‌نمک تقسیم شده است و سپس معادلات بقای جرم و انرژی در شرایط ناپایا نوشته شده است. مدل پایا و ناپایا با داده‌های تجربی اعتبار سنجی شده است. مؤلفه‌های دما، دبی بخار، دبی آب‌نمک و ارتفاع آب‌نمک در مدل‌سازی عددی حالت ناپایا در هنگام راه‌اندازی، پایا شدن و خاموش شدن دستگاه مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین تغییر دبی آب‌نمک بعد از خاموشی در اثر آخر است که به میزان ۴۲٪ افزایش می‌یابد همچنین بیشترین تغییر در ارتفاع آب‌نمک در اثر اول است که بعد از ۸۰۰ ثانیه به ۱۱ برابر حالت پایا خواهد رسید که موجب پدیده طغیان خواهد شد.

۱- مقدمه

مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند آب شیرین کن اجازه می‌دهد که طراحی و بهره‌برداری ساده‌تر شده و دید بهتری برای بهره‌برداری بهینه و کنترل فرایند داشته باشیم. مدل‌سازی دینامیکی برای حل مشکلات مربوط به رفتار ناپایا از جمله راه‌اندازی و خاموش کردن و اثرات اغتشاشات بسیار مفید خواهد بود. مقالات زیادی در زمینه مدل‌سازی در حالت پایا وجود دارد اما در حالت گذرا به خاطر پیچیدگی معادلات به دست آمده مطالعات بسیار محدود بوده است. از جمله مهم‌ترین کارهای صورت گرفته در زمینه ناپایا می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ماریوس جورج و بونانوس در سال ۲۰۱۶ [۱] یک مدل گذرا برای حالت‌های تغذیه موازی و تغذیه روبه‌جلو برای آب شیرین کن چند اثره که به یک نیروگاه خورشیدی متصل است ارائه کردند. سیپولینا و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲] یک مدل دینامیکی برای عملکرد گذرا آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور ارائه کردند. محمد السید و همکاران در

سال ۲۰۱۸ [۳ و ۴] به بررسی عملکرد گذرا فرایند آب شیرین کن چند اثره در شکل‌های مختلف آب‌شور ورودی به سیستم و اثر اغتشاش را بر روی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور پرداخته‌اند. گیمارد و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۵] ملاحظات جدیدی را همراه با یک استراتژی کنترل برای مدل‌سازی نیروگاه آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور تحت شرایط دینامیکی در نظر گرفتند. ژدانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۶] راکتور آب تحت فشار یکپارچه^۱ را با فرایند نمک‌زدایی چند اثره همراه با فشرده‌سازی بخار حرارتی متصل کردند. آن‌ها یک مدل دینامیکی برای طراحی و بهینه‌سازی دستگاه‌های کنترل نیروگاه‌های شیرین‌سازی هسته‌ای^۲ ایجاد نمودند. عبدالحکیم و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۷] یک الگوریتم جدید برای حل مشکل تجزیه و تحلیل حالت پایا اواپراتور چند اثره با تغذیه روبه‌جلو که شامل سه اثر است، ارائه نمودند. جیانکینگ هو و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۸] واکنش دینامیکی متغیرهای حالت در فرایند نمک‌زدایی چند اثره، مورد بررسی قرار دادند. از جمله این متغیرها می‌توان دمای تبخیر،

1 Integral Pressurized Water Reactor (IPWR)

2 Nuclear Desalination Plants (NDP)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mnazari@shahroodut.ac.ir



شوری، سرعت جریان جرم تبخیر و سطح آب‌نمک را بیان کرد.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته بر روی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور مشخص است که بیشتر مطالعات در این زمینه روی مدل‌سازی رفتار حالت‌پایای این سیستم متمرکز بوده و تحقیقات بسیار کمی بر روی مدل حالت گذرا صورت گرفته است. این در حالی است که برای طراحی دستگاه‌های کنترلی و مخصوصاً برنامه‌ریزی اصولی با کمترین میزان تلفات و فشار به سیستم آب‌شیرین‌کن و دستگاه‌های جانبی آن اعم از ترموکمپرسور، پمپ‌ها و سیستم تأمین گرمایش در زمان راه‌اندازی و خاموش کردن، نیاز به مدل‌سازی رفتار گذرای دستگاه آب‌شیرین‌کن داریم. در این پژوهش رفتار ناپایا آب‌شیرین‌کن حرارتی چهار اثره همراه با ترموکمپرسور مدل شده است. این مدل‌سازی با به دست آوردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر اواپراتورها، کندانسور و ترموکمپرسور صورت گرفته است، تا با استفاده از خصوصیات ترموفیزیکی آب رابطه‌ی بین خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم به دست آید. از تفاوت‌های عمده این مدل‌سازی با دیگر مدل‌سازی‌های مقالات به‌خصوص مقاله السید و همکاران [۴] در مدل دینامیکی کندانسور است که قادر به گزارش ارتفاع آب کندانسور شده است. همچنین مدل‌سازی بر اساس معادلات دینامیک گاز ترموکمپرسور در دو الگوریتم طراحی و ارزیابی است که در اکثر مقالات تنها از یک معادله تجربی استفاده شده است. این نوع مدل‌سازی ترموکمپرسور باعث می‌شود که با استفاده از الگوریتم طراحی، مشخصه‌های هندسی ترموکمپرسور به دست آید و سپس با الگوریتم ارزیابی واکنش همان ترموکمپرسور نسبت به روشن و خاموش شدن بررسی شود. درحالی‌که معادلات تجربی موجود برای ترموکمپرسور واکنش یک ترموکمپرسور کلی را در شرایط جدید بررسی می‌کند. همچنین اکثر معادلات تجربی ترموکمپرسور در هنگام تغییر شرایط ورودی و خروجی به آن، یک ترموکمپرسور جدید مناسب با شرایط موجود را ارائه می‌دهند که به‌هیچ‌وجه مناسب تحقیق ناپایا نیست. درنهایت با نتایج رفتار ناپایا آب‌شیرین‌کن حرارتی چهار اثره همراه با ترموکمپرسور می‌توان سیر تغییرات خصوصیات ترموفیزیکی دستگاه را از زمان راه‌اندازی تا لحظه پایا شدن و سپس خاموش کردن آن را مشاهده نمود.

۲- شرح مدل‌سازی

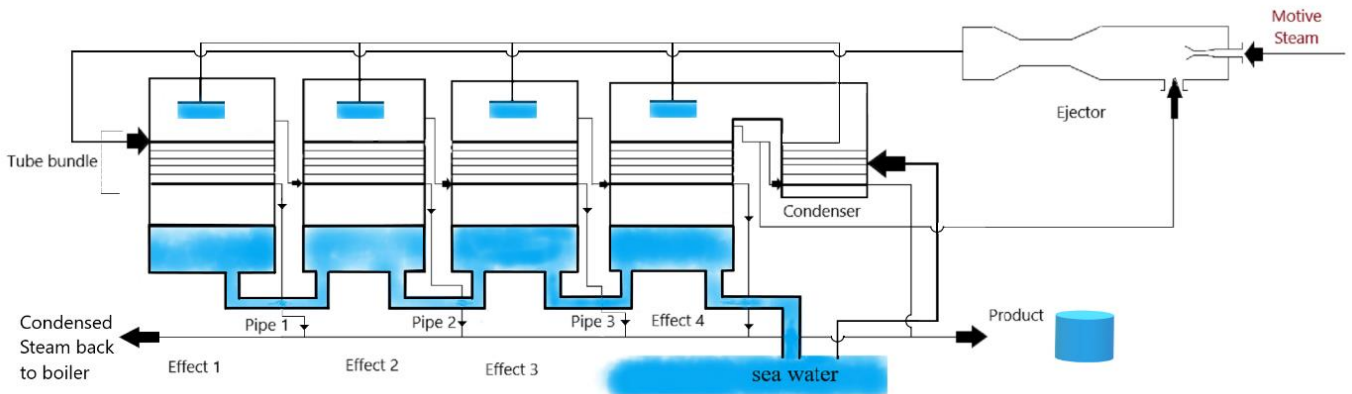
۲-۱- آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور

ساختار سیستم آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور با استفاده از ردیف‌های معمولی اثرها انجام می‌شود. که هر کدام در یک محفظه دایره‌ای

یا مستطیلی شکل در امتداد با یک کندانسور قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، ترموکمپرسور با آخرین اثر یکپارچه شده و سیستم چند اثره همراه با ترموکمپرسور را تشکیل می‌دهد. آب دریا از پیش گرم شده از کندانسور به دنباله‌ای از مخازن فشار کمتر که اثرات (اثرها) نامیده می‌شود، توزیع می‌شود. بخش عمده‌ای از آب دریا که وارد کندانسور می‌شود به سمت دریا هدایت می‌شود. آب خروجی از کندانسور به داخل هر اثر تبخیر پاشیده می‌شود و به‌صورت یک فیلم مایع نازک در امتداد دیواره بیرونی لوله‌های نصب شده به‌صورت افقی جریان می‌یابد. بخار فشرده داغ (بخار محرک) از ترموکمپرسور به داخل لوله‌های اولین اثر جریان می‌یابد. بخار تولیدشده در آخرین اثر آب‌شیرین‌کن چند اثره به دو جریان با فشار همان اثر تقسیم می‌شود. اولین جریان توسط ترموکمپرسور مکیده می‌شود و بخار باقی‌مانده برای گرم کردن آب‌خنک کننده دریا در کندانسور استفاده می‌شود. جریان بخار محرک با فشار محرک نسبتاً زیاد وارد ترموکمپرسور می‌شود. بخار محرک معمولاً از دیگ بخار یا توربین بخار یک نیروگاه تأمین می‌شود. بخار مکیده شده، توسط ترموکمپرسور فشرده می‌شود و با بخار محرک ترکیب شده و با فشار تخلیه به اولین اثر هدایت می‌شود. کسری از نرخ جریان بخار مکیده شده از آخرین اثر به نرخ جریان بخار محرک نسبت مکش نامیده می‌شود. جریان بخار از واحد ترموکمپرسور، از طریق چگالیده شدن داخل لوله‌های اولین اثر، دمای آب دریا را به دمای جوش خود که دمای بالای آب‌نمک^۱ نامیده می‌شود، افزایش دهد. بخشی از آب دریا خوراکی در اثر اول تبخیر می‌شود و بخار به اثر دوم که در فشار و دمای پایین‌تری نسبت به اثر اول است، جریان می‌یابد. این بخار در اثر دوم به‌عنوان منبع گرما برای تبخیر بخشی از آب دریا ورودی به اثر دوم استفاده می‌شود. این روند تکرار می‌شود و تا آخرین اثر ادامه می‌یابد. آب‌نمک تبخیر نشده از اثر اول وارد اثر دوم می‌شود تا با پاشش انفجاری^۲ در فشار کمتر از انرژی خود استفاده کند. روند جریان آب‌نمک نیز تا آخرین اثر ادامه می‌یابد. این روش جریان آب تغذیه و آب‌نمک در شکل ۱ نشان داده شده است و به‌عنوان پیکربندی موازی/مقاطع شناخته می‌شود. بخار داخل اثر دوم تا آخرین اثر، هم با تبخیر و هم با پاشش انفجاری ایجاد می‌شود. آب شیرین از هر اثر و کندانسور توسط پمپ‌ها کشیده می‌شوند و به‌صورت افقی به هم می‌پیوندند. آب‌نمک غلیظ شده که به‌صورت آبشار از آخرین اثر خارج می‌شود، توسط پمپ به آب دریا منتقل می‌شود.

1 Top Brine Temperature (TBT)

2 Flashing



شکل ۱. شماتیک یک آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور

Fig. 1. Schematic of a multi-effect desalination plant with a TVC

$$T_v(i) = T_b(i) - BPE(T_v(i), X_b(i)) \quad (1)$$

که در آن T_v دمای بخار، T_b دمای آب نمک و BPE ارتفاع نقطه جوشش است.

۶- برای آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور، ترموکمپرسور پاسخ دینامیکی سریع تری در مقایسه با دیگر اجزا دارد و در شرایط شبه پایا مدل سازی شده است.

۷- دمای بخار گرمایش در یک مقایسه با مقادیر استفاده شده در مقیاس صنعتی ثابت ذکر شده است.

۸- بخار و تقطیر تولید شده خالی از نمک می باشد.

۲-۲-۲- ورودی های ثابت آب شیرین کن

ورودی های ثابت آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور به صورت

زیر است:

1- دمای آب دریا ورودی به کندانسور (T_{cw})

2- دمای بخار گرمایش اثر اول (T_{hs})

3- دمای اثر اول (T_e^1)

4- دمای اثر آخر (T_e^N)

5- تعداد اثرها (N)

۲-۲-۲- مدل سازی حالت پایا

برای مدل سازی ترمودینامیکی آب شیرین کن چند اثره در حالت پایا، آب شیرین کن به سه بخش اواپراتورها (اثرها)، پیش گرم کن ها و کندانسور تقسیم می شود. برای مدل سازی در حالت پایا یک سری فرضیاتی در نظر گرفته شده است، که در ادامه به شرح آن ها پرداخته می شود. همچنین پارامترهای عملیاتی ثابت سیستم بیان شده اند و در ادامه به بررسی معادلات حالت پایا در سه بخش پرداخته شده است.

۲-۲-۱- فرضیات

فرضیات مدل سازی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور:

۱- از جرم و انرژی آب نمک جمع شده در اطراف لوله های اواپراتور در مقایسه با جرم و انرژی استخر آب نمک در یک اثر صرف نظر شده است.
۲- اثر گازهای غیر چگالش شده بر عملکرد اواپراتور ناچیز در نظر گرفته شده است.

۳- جریان آب نمک به صورت پاشش انفجاری آدیباتیکی از اثر قبلی به اثر بعدی وارد می شود.

۴- خصوصیات ترموفیزیکی برای آب نمک و بخار وابسته به دما و غلظت در نظر گرفته شده است. روابط مناسبی برای محاسبه ضریب انتقال حرارت کلی برای اواپراتور و کندانسور در نظر گرفته شده است.

۵- ارتفاع نقطه جوشش، اختلاف دمای بین بخار تولید شده و استخر آب نمک داخل اثر است (معادله (۱)).

جدول ۱. معادلات بقا حالت پایا برای آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور

Table 1. Steady state conservation equations for multi-effect desalination with TVC

معادله	اثر i ام	اثر اول
بقای جرم	$m_f^i + m_b^{i-1} - m_b^i - m_v^i = 0$	$m_f^1 - m_b^1 - m_v^1 = 0$
بقای نمک	$m_f^i X_f^i + m_b^{i-1} X_b^{i-1} - m_b^i X_b^i = 0$	$m_f^1 X_f^1 - m_b^1 X_b^1 = 0$
بقای انرژی	$m_v^{i-1} (h_v^{i-1} - h_d^i) + m_f^i h_f^i + m_b^{i-1} h_b^{i-1} - m_b^i h_b^i - m_v^i h_v^i = 0$	$m_{hs} (h_{hs} - h_d^1) + m_f^1 h_f^1 - m_b^1 h_b^1 - m_v^1 h_v^1 = 0$

۲-۲-۴- پیش گرم کن

در پیش گرم کن‌ها همان‌طور که در معادله‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌کنید، سیال سرد (آب دریا) از کندانسور می‌آید و سیال گرم توسط بخار تولیدشده در هر اثر از طریق لوله‌های اثر بعدی وارد پیش گرم کن می‌شود.

$$m_c = m_f \quad (۳)$$

$$m_H = D_{tot} \quad (۴)$$

که در آن m_c دبی سیال سرد، m_f دبی تغذیه و m_H دبی سیال گرم
معادله بقا انرژی برای پیش گرم کن از معادله (۵) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$m_c (T_{C2} - T_{C1}) = m_H (T_{H1} - T_{H2}) \quad (۵)$$

6- میزان آب شیرین تولیدی کل (D_{tot})

7- میزان نمک آب تغذیه ورودی اثرها (X_f)

8- میزان نمک آب نمک خروجی از اثر (X_b) یا نرخ تبخیر
اوپراتور (E_r)

9- پینچ دمایی کندانسور (ΔT_P)

10- پینچ دمایی پیش گرم کن‌ها (ΔT_p^c)

بر اساس میزان آب شیرین تولیدی موردنظر، مقدار دبی تغذیه موردنیاز تمامی اثرها (M_f) از معادله (۲) به دست می‌آید. بدین صورت که نرخ تبخیر را به دست آورده و بر اساس آن می‌دانیم که چه مقدار دبی برای اثرها موردنیاز است.

$$E_r = \frac{X_b - X_f}{X_b} \rightarrow M_f = \frac{D_{tot}}{E_r} \quad (۲)$$

۲-۲-۳- اوپراتورها (اثرها)

معادلات بقای جرم، بقای نمک و بقای انرژی برای هر اثر در جدول ۱ نوشته شده است.

۲-۳- مدل سازی حالت ناپایا

قبل از حل مدل ناپایا، معادلات بقای حالت پایا جرم، انرژی و نمک حل می‌شوند تا مقادیر حالت پایا همه پارامترهای موجود در نیروگاه به دست آید. برای مدل ناپایا ایجادشده، هر اوپراتور به سه بخش تقسیم شده است:

۱- آب نمک ۲- بخار ۳- لوله‌ها

برای هر بخش بالانس جرم، نمک و انرژی نوشته شده است. شکل ۲ نمودارهای شماتیک برای اوپراتورها اثر اول و i ام و کندانسور نشان می‌دهد.

۲-۳-۱- مدل اوپراتور

بر اساس فرضیات، معادلات بالانس جرم، انرژی و نمک در حالت ناپایا برای اوپراتور (اثر اول و i ام مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. برای اثر اول معادله‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب نشان‌دهنده بالانس جرم فاز آب نمک و بخار هست.

۱- بالانس جرم فاز بخار و آب نمک

$$\frac{dM_b^1}{dt} = m_f^1 - m_{vg}^1 - m_b^1 \quad (10)$$

$$\frac{dM_b^1}{dt} = m_f^1 - m_{vg}^1 - m_b^1 \quad (11)$$

که در آن M_b جرم آب نمک، m_f دبی تغذیه، m_{vg} دبی بخار تولیدشده، m_b دبی آب نمک، m_v دبی بخار و M_v جرم بخار اثر اول است.

در ادامه معادله‌های (۱۲) تا (۱۴) به ترتیب نشان‌دهنده بالانس انرژی فاز آب نمک، بخار و لوله است.

۲- بالانس انرژی فاز آب نمک، بخار و لوله

$$\frac{dM_b^1 h_b^1}{dt} = m_f^1 h_f^1 - m_{vg}^1 h_v^1 - m_b^1 h_b^1 + Q_E^1 \quad (12)$$

که در آن T_{C_1} دما سیال سرد خروجی، T_{C_2} دما سیال سرد ورودی، T_{H_1} دما سیال گرم ورودی و T_{H_2} دما سیال گرم خروجی است. پینچ پیش گرم‌کن‌ها از معادله (۶) تعریف می‌شود و همین‌طور می‌توان مقدار دمای سیال گرم خروجی از پینچ گرم‌کن را از رابطه‌ی پینچ به دست آورد.

$$\Delta T_p = T_{H_2} - T_{C_1} \rightarrow T_{H_2} = \Delta T_p + T_{C_1} \quad (6)$$

با به دست آوردن مقدار دمای سیال گرم خروجی از معادله (۶) و جایگذاری آن در معادله (۵) می‌توان سیال سرد خروجی را از معادله (۷) به دست آورد:

$$T_{C_2} = \frac{m_H}{m_C} (T_{H_1} - T_{H_2}) + T_{C_1} \quad (7)$$

۲-۲-۵- کندانسور

معادله بقا انرژی برای کندانسور از معادله (۸) به دست می‌آید:

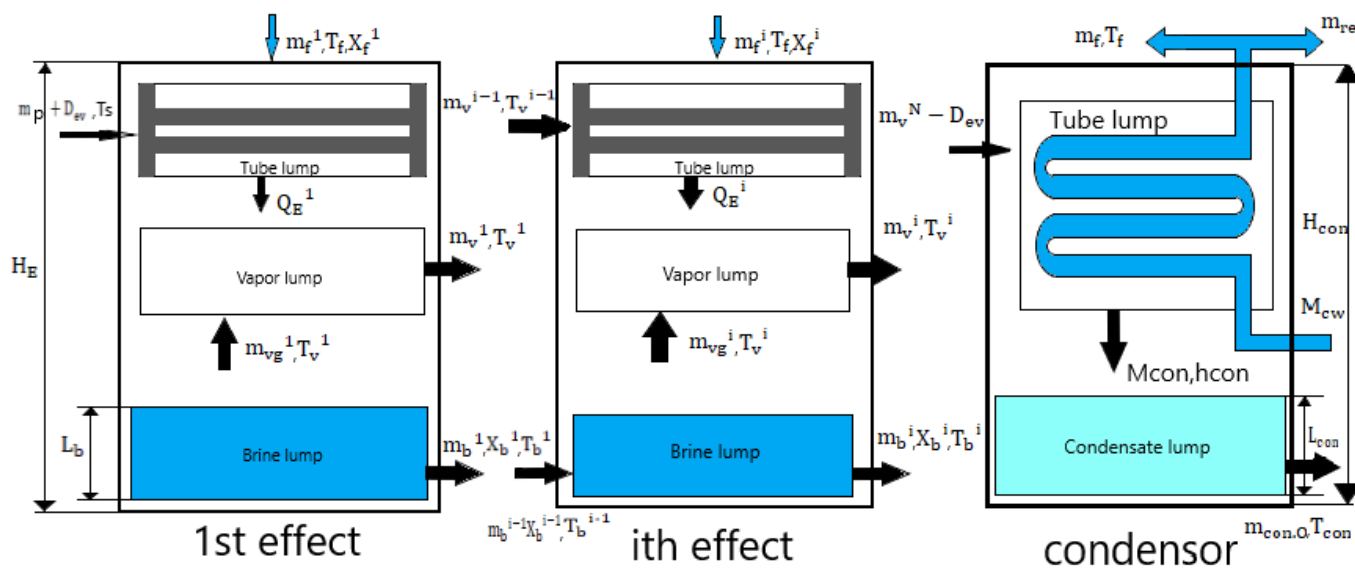
$$m_{cw} (h_{cw} - h_f) + (m_v^N - D_{ev}) (h_v^N - h_d^N) = 0 \quad (8)$$

که در آن m_{cw} دبی آب‌خنک کننده، h_{cw} آنتالپی آب‌خنک کننده، h_f آنتالپی تغذیه، m_v^N دبی بخار اثر آخر، D_{ev} دبی بخار مکش شده از ترموکمپرسور، h_v^N آنتالپی بخار اثر آخر و h_d^N آنتالپی تقطیر خروجی اثر آخر

که از معادله (۸) مقدار m_{cw} به دست می‌آید و با جایگذاری در معادله (۹) مقدار دبی آب بازگشت داده شده به دست می‌آید:

$$m_{re} = m_{cw} - m_f \quad (9)$$

که در آن m_{re} دبی آب بازگشتی است.



شکل ۲. حجم کنترل با ترم‌های مختلف برای اثر اول، اثر i ام و کندانسور

Fig. 2. Volume control with different terms for the first effect, i effect and condenser

که در آن X_b درصد نمک آب‌نمک و X_f درصد نمک تغذیه است. متغیرهای حالت ظاهر شده در اولین ترم معادله‌های دیفرانسیلی بالا مطابق با معادله‌های جبری ساده (۱۶) تا (۱۹) که در زیر گزارش شده‌اند، تعریف می‌شوند:

$$M_b = \rho_b L_b A_{ce} \quad (16)$$

$$M_v h_v = \rho_v L_v A_{ce} h_v \quad (17)$$

$$M_v = \rho_v L_v A_{ce} \quad (18)$$

$$M_v h_v = \rho_v L_v A_{ce} h_v \quad (19)$$

$$\frac{dM_v^1 h_v^1}{dt} = m_{vg}^1 h_v^1 - m_v^1 h_v^1 \quad (13)$$

$$M_T \frac{dh_T^1}{dt} = m_{hs} [h_{hs} - h_d^1] - Q_E^1 \cdot Q_E^1 = U_e^1 A_e^1 (T_{hs} - T_b^1) \quad (14)$$

که در آن h_b آنتالپی آب‌نمک، h_f آنتالپی تغذیه، h_v آنتالپی بخار، Q_E نرخ انتقال حرارت اواپراتور، M_T جرم لوله، h_T آنتالپی لوله، m_{hs} دبی بخار گرمایش، h_{hs} آنتالپی بخار گرمایش، h_d آنتالپی تقطیر خروجی، U_e ضریب انتقال حرارت کلی اواپراتور، A_e مساحت اواپراتور و T_b دما آب‌نمک است.

برای بالانس نمک در فاز آب‌نمک نیز معادله (۱۵) ارائه شده است.

۳- بالانس نمک فاز آب‌نمک

$$\frac{dM_b^1 X_b^1}{dt} = m_f^1 X_f^1 - m_b^1 X_b^1 \quad (15)$$

جدول ۲. ضرایب معادلات اثرها

Table 2. Coefficients of effect equations

a_1	a_2	a_3	a_4
$A_{ce}^i (\rho_b^i - \rho_v^i)$	$A_{ce}^i L_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \left(1 + \frac{dBPE^i}{dT_v^i} \right) + (H_E - L_b^i) A_{ce}^i \frac{d\rho_v^i}{dT_v^i}$	$A_{ce}^i L_b^i \left(\frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} + \frac{d\rho_b^i}{dX_b^i} \right)$	$M_f^i + M_b^{i-1} - M_b^i - M_v^i$
a_5	a_6	a_7	a_8
$A_{ce}^i (\rho_b^i h_b^i - \rho_v^i h_v^i)$	$A_{ce}^i L_b^i \left(\rho_b^i \frac{dh_b^i}{dT_b^i} + h_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \right) + \left(1 + \frac{dBPE^i}{dT_v^i} \right) + (H_E - L_b^i) A_{ce}^i$	$A_{ce}^i L_b^i h_b^i \left(\frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} + \frac{d\rho_b^i}{dX_b^i} \right) + A_{ce}^i L_b^i \rho_b^i \frac{dh_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i}$	$M_f^i h_f^i + M_b^{i-1} h_b^{i-1} - M_b^i h_b^i - M_v^i h_v^i + Q_E^i$
a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}
$A_{ce}^i \rho_b^i X_b^i$	$A_{ce}^i L_b^i X_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \left(1 + \frac{dBPE^i}{dT_v^i} \right)$	$A_{ce}^i L_b^i \left(X_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} + \rho_b^i + X_b^i \frac{d\rho_b^i}{dX_b^i} \right)$	$M_f^i X_f^i + M_b^{i-1} X_b^{i-1} - M_b^i X_b^i$

$$a_1 \frac{dL_b^1}{dt} + a_2 \frac{dT_v^1}{dt} + a_3 \frac{dX_b^1}{dt} = a_4 \quad (20)$$

که در آن چگالی آب‌نمک، L_b ارتفاع آب‌نمک داخل اثر، A_{ce} سطح مقطع اثر، ρ_v چگالی بخار، $L_v = H_E - L_b$ ارتفاع بخار داخل اثر و H_E ارتفاع اثر است. ρ_b و h_b تابعی از دما و غلظت و ρ_v و h_v تابعی از دما می‌باشند.

$$a_5 \frac{dL_b^1}{dt} + a_6 \frac{dT_v^1}{dt} + a_7 \frac{dX_b^1}{dt} = a_8 \quad (21)$$

بعد از چند دست‌کاری، معادله‌های (۲۰)، (۲۱) و (۲۲) را می‌توان از ترکیب سه فاز بالانس‌های جرم، انرژی و نمک برای اثر اول به دست آورد.

ضرایب این معادلات در جدول ۲ گزارش شده‌اند:

$$a_9 \frac{dL_b^1}{dt} + a_{10} \frac{dT_v^1}{dt} + a_{11} \frac{dX_b^1}{dt} = a_{12} \quad (22)$$

$$\frac{dM_v^i}{dt} = m_{vg}^i - m_v^i \quad (28)$$

که در آن L_b ارتفاع آب‌نمک است.

نرخ جریان آب‌نمک بین اثرها توسط معادله (۲۳) به دست می‌آید.

۲- بالانس انرژی فاز آب‌نمک، بخار ولوله

$$m_b^i = C_b^i \sqrt{\Delta P_b^i} \quad (23)$$

$$\frac{dM_b^i h_b^i}{dt} = m_f^i h_f^i + m_b^{i-1} h_b^{i-1} - m_{vg}^i h_v^i - m_b^i h_b^i + Q_E^i \quad (29)$$

که در آن ΔP_b اختلاف فشار آب‌نمک بین اثرها که از معادله (۲۴) به

دست می‌آید، C_b ضریب تخلیه برای جریان آب‌نمک است.

$$\frac{dM_v^i h_v^i}{dt} = m_{vg}^i h_v^i - m_v^i h_v^i \quad (30)$$

$$\Delta P_b^i = P^i - P^{i+1} + \rho_b g (L_b^i - L_b^{i+1}) \quad (24)$$

$$M_T \frac{dh_T^i}{dt} = m_v^{i-1} [h_v^{i-1} - h_d^i] - Q_E^i, Q_E^i = U_e^i A_e^i (T_v^{i-1} - T_b^i) \quad (31)$$

که در آن P فشار اثر، ρ_b چگالی آب‌نمک و g شتاب گرانش

مخصوص است.

نرخ جریان بخار از یک اثر به دیگری از معادله (۲۵) به دست می‌آید.

۳- بالانس نمک فاز آب‌نمک

$$\frac{dM_b^i X_b^i}{dt} = m_f^i X_f^i + m_b^{i-1} X_b^{i-1} - m_b^i X_b^i \quad (32)$$

$$m_v^i = C_v^i \sqrt{\Delta P_v^i} \quad (25)$$

که در آن C_v ضریب تخلیه جریان بخار و ΔP_v اختلاف فشار بخار

بین اثرها که از معادله (۲۶) به دست آمده است.

مشابه با روند ساده‌سازی اثر اول برای اثر i ام نیز همان کارها را

انجام شده است و معادله‌های (۳۳) تا (۳۵) به دست آمده است. ضرایب این

معادلات در جدول ۲ گزارش شده‌اند:

$$\Delta P_v^i = P^i - P^{i+1} \quad (26)$$

$$a_1 \frac{dL_b^i}{dt} + a_2 \frac{dT_v^i}{dt} + a_3 \frac{dX_b^i}{dt} = a_4 \quad (33)$$

برای اثر i ام معادله‌های (۲۷) و (۲۸) به ترتیب نشان دهنده بالانس جرم

فاز آب‌نمک و بخار هست. معادله‌های (۲۹) تا (۳۱) نیز به ترتیب بالانس

انرژی سه فاز آب‌نمک، بخار و لوله را نشان می‌دهد. بالانس نمک فاز

آب‌نمک نیز از معادله (۳۲) به دست می‌آید.

۱- بالانس جرم فاز بخار و آب‌نمک

$$a_5 \frac{dL_b^i}{dt} + a_6 \frac{dT_v^i}{dt} + a_7 \frac{dX_b^i}{dt} = a_8 \quad (34)$$

$$a_9 \frac{dL_b^i}{dt} + a_{10} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{11} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{12} \quad (35)$$

$$\frac{dM_b^i}{dt} = m_f^i + m_b^{i-1} - m_{vg}^i - m_b^i \quad (27)$$

۲-۳-۲- مدل کندانسور

تعریف می‌شوند:

$$M_{con} = \rho_{L,con} A_{cc} L_{con} \quad (39)$$

$$M_{con} h_{con} = \rho_{L,con} A_{cc} L_{con} h_{con} \quad (40)$$

که در آن $\rho_{L,con}$ چگالی مایع کندانس شده است. با ترکیب رابطه‌های جرم و انرژی برای دو فاز مایع کندانس شده و لوله، معادله‌های (۴۱) و (۴۲) به ترتیب داده می‌شود.

$$b_1 \frac{dL_{con}}{dt} + b_2 \frac{dT_{con}}{dt} = b_3 \quad (41)$$

$$b_4 \frac{dL_{con}}{dt} + b_5 \frac{dT_{con}}{dt} = b_6 \quad (42)$$

که در آن T_{con} دما کندانسور است. که ضرایب معادلات در جدول ۳ گزارش شده‌اند. برای به دست آوردن ماهیت دمای آب دریا تغذیه از معادله (۴۳) به دست می‌آید، فرض می‌شود که آنتالپی لوله‌های کندانسور با میانگین آنتالپی آب دریا و تغذیه ورودی اثرها برابر است.

$$b_4 \frac{dL_{con}}{dt} + b_5 \frac{dT_{con}}{dt} = b_6 \quad (43)$$

با استفاده از بالانس انرژی برای فاز لوله‌های کندانسور، با استفاده از معادله (۴۴) نرخ تغییر دمای آب تغذیه می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{dT_{feed}}{dt} = \frac{2(Q_{con} + m_{cw} h_{cw} - m_{cw} h_f)}{\rho_{Tube,c} \nabla_{Tube,con} \frac{dh_f}{dT}} \quad (44)$$

که در آن T_{feed} دما تغذیه است.

برای پیش‌بینی تغییر دینامیکی دمای کندانسور، سطح مایع کندانسور و دمای تغذیه گرم شده، یک مدل دقیق برای کندانسور ساخته شده است. از کندانسور برای کندانس کل بخار تولیدشده در آخرین اثر که بعد از مکش واحد ترموکمپرسور باقی‌مانده است که دمای آب دریا خنک ورودی را به دمای تغذیه موردنیاز برساند، استفاده می‌شود. کندانسور به دو فاز تقسیم شده است. مایع کندانس شده و لوله همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است. کندانسور دارای سطح مقطع کندانسور A_{cc} و ارتفاع کل کندانسور H_{con} است، درحالی‌که ارتفاع استخر مایع کندانس شده L_{con} و ارتفاع بخار $H_{con} - L_{con}$ است. معادله (۳۶) بیانگر بالانس جرم فاز مایع کندانس شده و معادله‌های (۳۷) و (۳۸) بالانس انرژی فاز مایع کندانس شده و لوله را نشان می‌دهد.

۱- بالانس جرم فاز مایع کندانس شده

$$\frac{dM_{con}}{dt} = m_{con} - m_{con,o} \quad (36)$$

که در آن M_{con} جرم مایع کندانس شده، m_{con} دبی مایع کندانس شده و $m_{con,o}$ دبی مایع کندانس شده خروجی است. ۲- بالانس انرژی فاز مایع کندانس شده و لوله

$$\frac{dM_{con} h_{con}}{dt} = m_{con} h_{con} - m_{con,o} h_{con} \quad (37)$$

$$M_{T,con} \frac{dh_{T,con}}{dt} = m_{cw} h_{cw} - m_{cw} h_f + Q_{con}, M_{T,con} = \rho_{Tube,c} \nabla_{Tube,con} \quad (38)$$

که در آن h_{con} آنتالپی مایع کندانس شده، $M_{T,con}$ جرم لوله‌های کندانسور، $h_{T,con}$ آنتالپی لوله‌های کندانسور، Q_{con} نرخ انتقال حرارت کندانسور، $\rho_{Tube,c}$ چگالی لوله‌های کندانسور و $\nabla_{Tube,con}$ حجم لوله‌های کندانسور است.

متغیرهای حالت ظاهرشده در اولین ترم رابطه‌های دیفرانسیلی بالا مطابق با معادله‌های جبری ساده (۳۹) و (۴۰) که در زیر گزارش شده‌اند،

جدول ۳. ضرایب معادلات کندانسور

Table 3. Coefficients of condenser equations

b_1	b_2	b_3
$A_{cc}\rho_{L,con}$	$A_{cc}L_{con}\frac{d\rho_{L,con}}{dT_{con}}$	$M_{con}-M_{con,o}$
b_4	b_5	b_6
$A_{cc}(\rho_{L,con}h_{con})$	$\left[A_{cc}L_{con}h_{con}\frac{d\rho_{L,con}}{dT} + A_{cc}L_{con}\rho_{L,con}\frac{dh_{con}}{dT} \right]$	$M_{con}h_{con}-M_{con,o}h_{con,o}$

بسیار سریع رفتار واحد ترموکمپرسور با زمان‌های مشخصه‌ی چند میلی‌ثانیه در مقایسه با زمان‌های مشخص دقیق یا ساعت‌های آب‌شیرین‌کن چند اثره می‌شود، در نظر گرفته شده است.

مدل اجرا شده برای ترموکمپرسور بخار بر اساس مکانیک سیال جریان‌های تراکم‌پذیر، مومنتوم و بالانس‌های انرژی در جهت محوری ترموکمپرسور بیان شده است. طرح ساده‌شده‌ی ترموکمپرسور بخار که از واحدهای آب‌شیرین‌کن همراه با ترموکمپرسور به‌دست‌آمده است، در شکل ۳ قابل مشاهده است.

۲-۴-۱- معادله‌های حاکم بر ترموکمپرسور

معادله‌های به‌دست‌آمده برای ترموکمپرسور بخار در ادامه بر اساس شکل ۳ تعریف شده‌اند، عدد ماخ جریان اولیه در موقعیت شماره ۲ از معادله (۴۶) به دست می‌آید.

$$Ma_{p_2} = \sqrt{\frac{2\eta_n}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (46)$$

که در آن Ma_{p_2} عدد ماخ جریان بخار محرک در خروجی نازل، η_n راندمان نازل، γ نسبت تراکم‌پذیری، P_p فشار بخار محرک و P_2 فشار بخار خروجی از نازل است.

که Q_{con} از معادله (۴۵) به دست می‌آید:

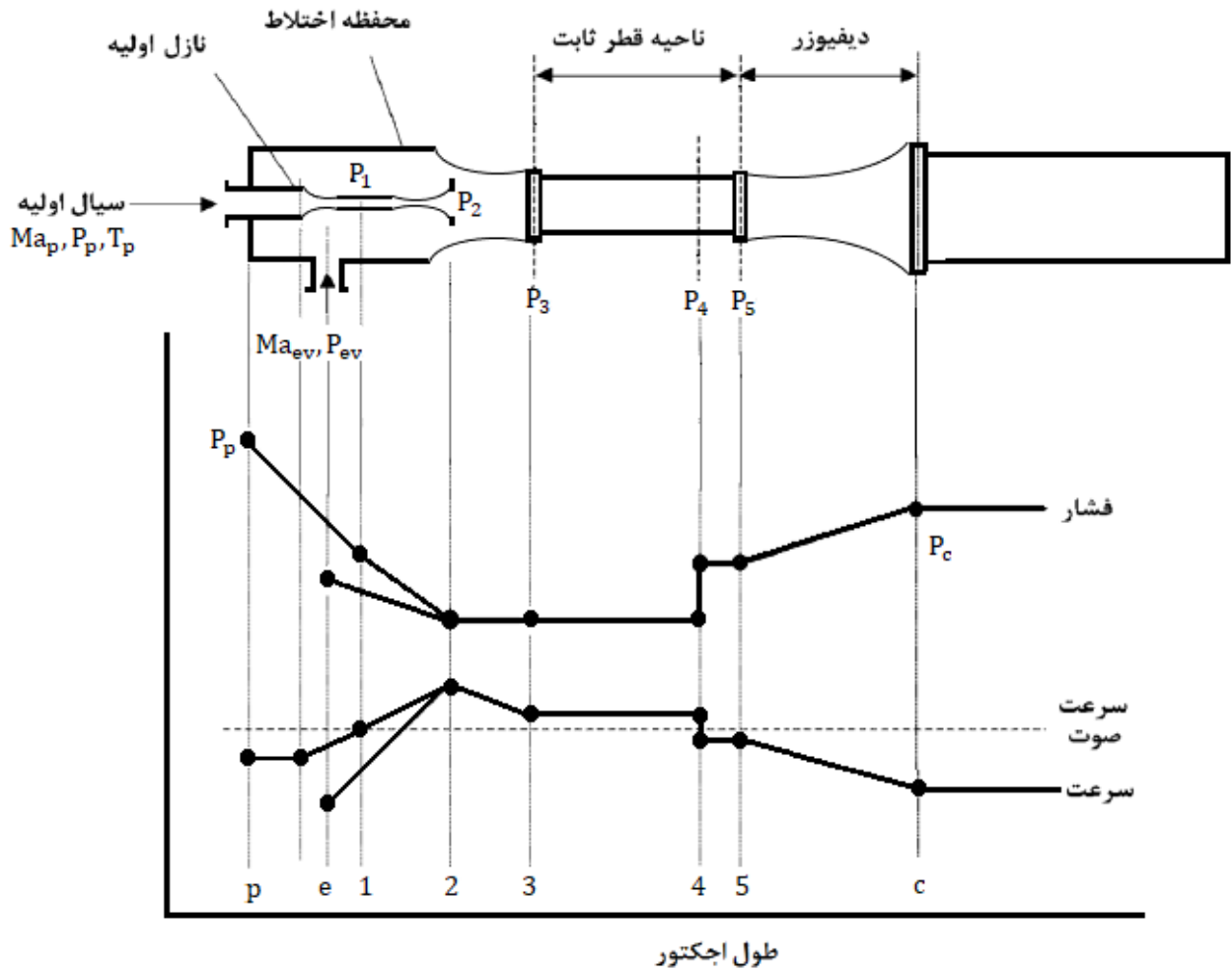
$$Q_{con} = U_{con} A_{con} \frac{(T_v^N - T_f) - (T_{con} - T_{cw})}{\ln\left[\frac{T_v^N - T_f}{T_{con} - T_{cw}}\right]} \quad (45)$$

که در آن U_{con} ضریب انتقال حرارت کلی کندانسور و A_{con} مساحت لوله‌های کندانسور است.

۲-۴-۲- مدل‌سازی ترموکمپرسور

ترموکمپرسور نقش اساسی را در عملکرد یک آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور بازی می‌کند. واحد ترموکمپرسور برای فشرده‌سازی مجدد و بازیابی یک‌بخشی از بخار جذب‌شده از آخرین اثر استفاده می‌شود، که به‌منظور استفاده از بخار گرمایش در اولین اثر است. به‌منظور اجرای یک ابزار شبیه‌سازی پیش‌بینی‌کننده برای ترموکمپرسور حرارتی، یک مدل نظری معروف توسط ال دسوکی و همکاران [۹] به‌دست‌آمده است.

مدل بر اساس معادلات دینامیکی سیال حرارتی برای جریان تراکم‌پذیر است، که پروفیل فشار و اعداد ماخ جریان داخل ترموکمپرسور بخار را محاسبه می‌کند، برخی پارامترهای هندسی و فیزیکی را همراه با متغیرهای عملکرد نیز محاسبه می‌کند. یک مدل ثابت مناسب برای اجرا در مدل دینامیکی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور که منجر به توصیف دینامیک



شکل ۳. طرح ساده‌شده‌ی ترموکمپرسور بخار [۹]

Fig. 3. Simplified design of TVC

عدد ماخ جریان سیال ثانویه واردشده در خروجی نازل (بعد انبساط آیزونتروپیک) از معادله (۴۷) به دست می‌آید.

$$Ma_{4}^{*} = \frac{Ma_{p_2}^{*} + \left[\omega Ma_{ev_2}^{*} \left(\frac{T_{ev}}{T_p} \right)^{0.5} \right]}{\sqrt{(1+\omega) \left(1 + \frac{\omega T_{ev}}{T_p} \right)}} \quad (48)$$

$$Ma_{ev_2} = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_{ev}}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (47)$$

که در آن $Ma_{p_2}^{*}$ و $Ma_{ev_2}^{*}$ اعداد ماخ بحرانی هستند. (سرعت سیال محلی در شرایط بحرانی بر سرعت صدا تقسیم می‌شود). ω راندمان ترموکمپرسور، T_{ev} دما بخار مکیده شده و T_p دما بخار محرک است.

عدد ماخ بحرانی برحسب عدد ماخ نیز از معادله (۴۹) به دست می‌آید.

که در آن Ma_{ev_2} عدد ماخ جریان سیال مکیده شده در خروجی نازل و P_{ev} فشار بخار مکیده شده است.

عدد ماخ جریان در پایان فرآیند ترکیب (معادله بالانس مومنتوم برای بخارهای واردشده و محرک بعد ترکیب) از معادله (۴۸) به دست می‌آید.

معادله‌های طراحی می‌توانند برای ارتباط خصوصیات هندسی ترموکمپرسور بخار با متغیرهای عملیاتی تعریف شده بالا استفاده شوند، مطابق با سه معادله (۵۳) تا (۵۵) که در ادامه تعریف شده‌اند.

$$A_1 = \frac{m_p}{P_p} \sqrt{\frac{R.T_p}{\gamma.\eta_n} \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\gamma-1}} \quad (53)$$

که در آن A_1 مساحت گلوگاه نازل، m_p دبی جریان بخار محرک و R ثابت جهانی گاز است.

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{1}{Ma_{p2}^2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} Ma_{p2}^2 \right) \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (54)$$

که در آن A_p مساحت خروجی نازل است.

$$\frac{A_1}{A_3} = \frac{P_c}{P_p} \cdot \frac{1}{\sqrt{(1+\omega) \left(1 + \left(\omega \left(\frac{T_{ev}}{T_p} \right) \right) \right)}} \cdot \frac{\left(\frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_2}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}}{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)}} \quad (55)$$

که در آن A_p مساحت گلوگاه ترموکمپرسور است. رابطه‌های بالا اول به منظور تعیین مقادیر پارامترهای هندسی A_1 و A_p و به دست آمده است. سپس معادلات مشابهی برای پیش‌بینی عملکرد ترموکمپرسور تحت شرایط عملیاتی به دست آمده است.

۳- حل عددی

در این پژوهش با استفاده از روش گام متغیر-مرتبه متغیر^۲ دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی مرتبه اول برای کندانسور و هر اوابراتور به طور هم‌زمان از طریق سیمولینک متلب حل می‌شوند. نتایج حل

$$Ma^* = \sqrt{\frac{Ma^2 \cdot (\gamma+1)}{\left[Ma^2 \cdot (\gamma-1) \right] + 2}} \quad (49)$$

که در آن Ma^* عدد ماخ بحرانی و Ma عدد ماخ است. عدد ماخ جریان ترکیب شده بعد از شوک موج نیز از معادله (۵۰) به دست می‌آید.

$$Ma_5^2 = \frac{Ma_4^2 + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} Ma_4^2 - 1} \quad (50)$$

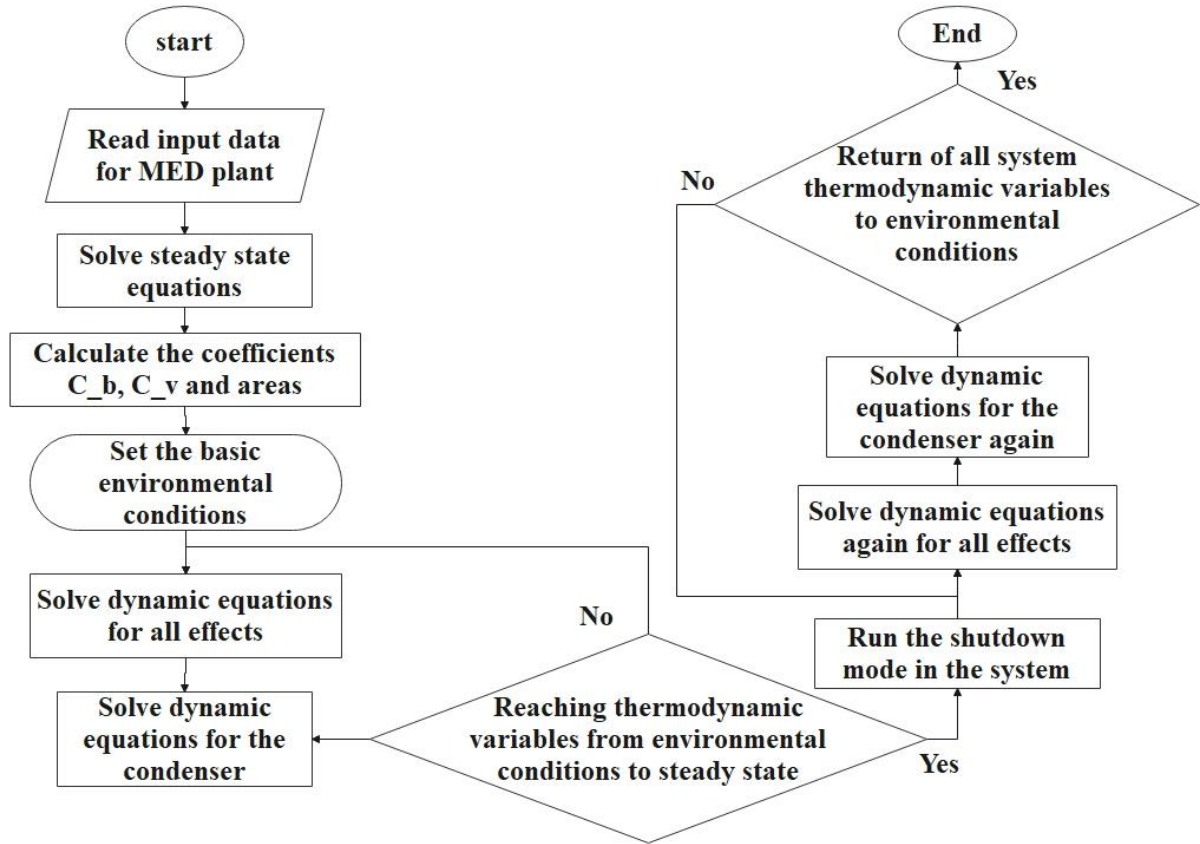
که در آن Ma_5 عدد ماخ جریان ترکیب شده بعد از شوک موج و Ma_p عدد ماخ جریان در نقطه ایجاد شوک است. افزایش فشار بعد از شوک موج اتفاق می‌افتد و رابطه آن از معادله (۵۱) به دست می‌آید.

$$P_5 = P_4 \frac{1 + \gamma Ma_4^2}{1 + \gamma Ma_5^2} \quad (51)$$

که در آن P_5 فشار جریان بعد از شوک موج، P_p فشار جریان در نقطه ایجاد شوک موج، که به دلیل فرض ثابت بودن فشار در طول ثابت بودن مقطع لوله ترموکمپرسور با فشار P_p برابر در نظر گرفته شده است. رشد فشار در طول پخش کننده^۱ ترموکمپرسور نیز از معادله (۵۲) به دست می‌آید.

$$P_c = P_5 \left[\frac{\eta_{di} \cdot (\gamma-1) \cdot Ma_5^2}{2} + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (52)$$

که در آن P_c فشار خروجی از ترموکمپرسور و η_{di} راندمان دیفیوزر است.



شکل ۴. فلوجارت حل مدل ناپایا دستگاه آب شیرین کن چند اثره

Fig. 4. Flowchart for solving the unsteady model of a multi-effect desalination plant

اشباع در هر اثر بررسی شده است. نسبت مکش کمپرسور حرارتی در هر گام زمانی با استفاده از رابطه‌های داده‌شده در بخش قبل و مقادیر فشار در آخرین اثر و فشار بخار محرک تغییر می‌کند. گام‌های زمانی به صورت خودکار توسط حل گر معادله دیفرانسیلی معمولی^۲ انتخاب می‌شود. قبل از روشن شدن سیستم همه پارامترها در شرایط محیط قرار دارند به گونه‌ای که با شروع حل ناپایا هر پارامتری در یک مدت زمانی مشخص به مقدار حالت پایا خود می‌رسد. بعد از رسیدن به حالت پایا، دبی بخار محرک ترموکمپرسور خاموش می‌شود و مجدداً تمامی متغیرهای ترمودینامیکی سیستم به شرایط محیطی خود بازمی‌گردند. فلوجارت مدل در شکل ۴ ارائه شده است.

با روش دورمند-پرینس^۱ نیز مقایسه شده است که بر هم منطبق بوده اما روش گام متغیر-مرتبه متغیر بسیار سریع‌تر از روش دورمند-پرینس برای این مسئله به پاسخ نهایی دست یافت. در ابتدا پاسخ حالت پایای سیستم از طریق کد پایا به دست می‌آید و نتایج آن در ضرایب مورد نیاز کد ناپایا قرار می‌گیرد. در حالت پایا دما، دبی تغذیه ورودی، دبی آب نمک خروجی، دبی بخار خروجی و شوری آب در هر اثر محاسبه شده است و نتایج حل پایا به عنوان یک مرجع برای محاسبات پاسخ دینامیکی استفاده می‌شود. در مدل ناپایا دما، ارتفاع مایع و شوری در هر گام زمانی برای هر اثر محاسبه می‌شود. همچنین دما و ارتفاع آب چگالیده کندانسور و دمای آب ورودی به اواپراتورها نیز حاصل می‌شود. میزان نمک و جریان بخار بر اساس سطح مایع و فشار

2 ODE Solver (in MATLAB)

1 Dormand-prince

جدول ۴. اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور در مقابل نتایج داده‌های واقعی نیروگاه طرابلس [۱۰]

Table 4. Validation of multi-effect desalination modeling results with TVC against real data results of Tripoli power plant

نتایج مدل‌سازی	داده‌های مدل مقاله السید [۴]	داده‌های واقعی	درصد خطا با مدل السید [۴]	درصد خطا با مقدار واقعی	
۶/۱۲۵	۶/۳۴۲	۶/۵۰۸	۳/۴۲	۵/۸۹	نسبت خروجی به دست آمده
۱۰۸	۱۰۸/۹	۱۰۹/۲۱	۰/۸۳	۱/۱۱	نرخ جریان آب‌نمک خروجی (kg/s)
۱۶۳/۶	۱۶۵/۲۸	۱۶۷	۱/۰۲	۲/۰۴	نرخ جریان تغذیه (kg/s)
۵۵/۵۸	۵۶/۳۸	۵۷/۸۶	۱/۴۲	۳/۹۴	نرخ تولید آب شیرین (kg/s)
۵/۳۰۱	۵/۳	۵/۳	۰/۰۲	۰/۰۲	درصد نمک خروجی
۱۴/۸۷۴	۱۴/۷۲	۱۴/۴۴	۱/۰۵	۳/۰۱	نرخ جریان بخار گرمایش (kg/s)
۵/۸	۵/۸۳	۵/۵۵	۰/۵۱	۴/۵	نرخ جریان بخار مکش شده (kg/s)
۹/۰۷۴	۸/۸۹	۸/۸۹	۲/۰۷	۲/۰۷	نرخ جریان بخار محرک به ترموکمپرسور (kg/s)

۴-۲- اعتبار سنجی مدل ناپایا

داده‌های پاسخ دینامیکی تجربی منتشرشده کمی برای آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره و پاشش انفجاری چندمرحله‌ای وجود دارد. بنابراین دمای بخار اثر اول مدل ناپایا موجود، با یک دستگاه آب‌شیرین‌کن سه اثره آزمایشگاهی با تولید کل آب شیرین ۳ مترمکعب در روز مقایسه شده است. این آب‌شیرین‌کن در مدل‌سازی ناپایا پژوهش السید و همکاران [۴] برای آب‌شیرین‌کن طرابلس [۱۰] واقع در لیبی نیز برای تأیید اعتبار مورد استفاده قرار گرفته است که داده‌های موجود در این مقاله در تحقیق حاضر استفاده شده است [۱۱]. شایان ذکر است که منبع حرارتی مورد استفاده در این آب‌شیرین‌کن سه اثره جریان آب گرم است و همچنین از نوع اواپراتورهای پوسته و لوله هست که موجب پاسخ زمانی متفاوت نسبت به آب‌شیرین‌کن‌های با ترموکمپرسور و میدل فالینگ فیلم خواهد شد و صرفاً برای تأیید اعتبار کد ناپایا در پژوهش حاضر و همچنین تحقیق السید و همکاران [۴] مورد استفاده قرار گرفته است. برای بررسی اعتبار مدل پویا در شرایط مشابه تجربی، حرارت داده‌شده به اولین اثر به‌عنوان یک پارامتر کنترلی در مدل عددی تنظیم شده است. مقدار آن در زمان خاموش شدن آب گرم صفر است و در پایان دوره خاموشی به مقدار حالت پایدار خود بازمی‌گردد. مقایسه بین دمای بخار در اثر اول به دست آمده از مدل‌سازی حالت پویا و داده‌های ارائه‌شده در دستگاه [۱۱] در شکل ۵ (سمت راست)

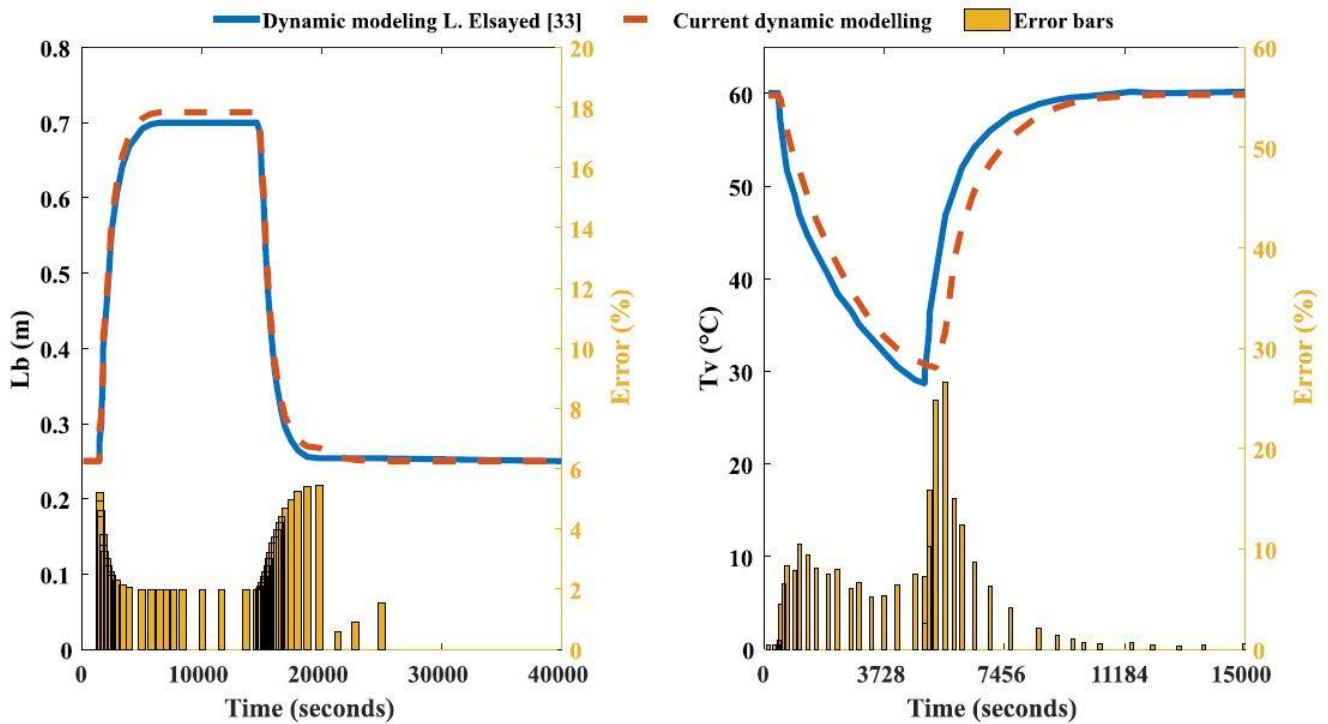
۴-۱- اعتبار سنجی مدل‌ها

جهت اعتبار سنجی^۱ مدل‌سازی انجام شده برای حالت پایا و ناپایا آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور، از داده‌های تجربی نیروگاه آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور طرابلس^۲ [۱۰] واقع در کشور لیبی استفاده شده است. در ادامه نتایج حاصل از حل عددی با نتایج تجربی نیروگاه طرابلس و حل عددی السید و همکاران [۱۰] اعتبار سنجی شده است.

۴-۱- اعتبار سنجی مدل پایا

نتایج حاصل از حل پایا در برابر داده‌های واقعی کارخانه تجاری آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور در طرابلس [۱۰] بررسی می‌شود. در جدول ۴ پارامترهای عملکردی محاسبه شده در مدل حاضر با داده‌های مدل مقاله السید و همکاران [۴] و مقدار واقعی دستگاه مقایسه شده است. با اینکه در مدل‌سازی حالت پایا از فرضیاتی برای ساده‌سازی معادلات استفاده شده است، نتایج مدل‌سازی در حالت پایا ارتباط بسیار نزدیکی با داده‌های واقعی نیروگاه طرابلس [۱۰] و مدل السید [۱۰] دارد که دارای میانگین خطای کمتر از ۳ درصد با مقادیر واقعی و میانگین خطای کمتر از ۱/۳ درصد با مقادیر مدل السید [۱۰] است.

- 1 validation
- 2 Tripoli



شکل ۵. اعتبارسنجی مدل ناپایا حاضر و مدل مقاله السید [۱۱]

Fig. 5. Validation of the present unsteady model and L. Elsayed article model [11]

علت این تأخیر تفاوت در جزئیات الگوریتم مدل‌سازی و در دسترس نبودن داده‌های اساسی تجربی موردنیاز برای مدل‌سازی ناپایا است.

۵- نتایج و بحث

به منظور مطالعه پاسخ دینامیکی آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره همراه با ترموکمپرسور، مدل توسعه‌یافته برای یک کارخانه در مقیاس صنعتی واقع در طرابلس، لیبی [۱۰] استفاده شده است. تمام داده‌های موجود برای این کارخانه در نظر گرفته شده است. در کار حاضر از دو سناریو برای تست گرفتن استفاده شده است. در حالت اول سیستم در حالت خاموش است، یعنی تمامی متغیرهای کمی سیستم اعم از دبی محرک ترموکمپرسور، دبی بخار اثرها، دبی آب‌نمک و آب تغذیه در اثرها و ارتفاع سطح آب‌نمک در هر اثر در میزان صفر قرار دارد. همچنین دمای داخل اثرها و لوله‌های مبدل نیز در شرایط دمای محیط است. با راه‌اندازی سیستم، تمامی متغیرها شروع به افزایش می‌کنند تا به مقدار پایایی خود برسند. در تست دوم، دستگاهی که در حالت روشن است و تمامی متغیرهای آن پایا شده‌اند با اعمال خاموشی

نشان داده شده است. همچنین از ارتفاع آب‌نمک اولین اثر مدل ناپایا تحقیق السید و همکاران [۴] نیز برای تأیید اعتبار مدل ناپایا حاضر استفاده شده است که نتایج آن در شکل ۵ (سمت چپ) قابل مشاهده است. خطا نسبی بین داده‌های تجربی و مدل‌سازی حاضر در شکل ۵ (سمت راست) در اثر اول، حداکثر ۲۶/۶۴ درصد و میانگین خطای نسبی آن ۶/۲۹ درصد است. همچنین خطا نسبی بین داده‌های مدل السید [۴] و مدل‌سازی حاضر در شکل ۵ (سمت چپ) در اثر اول، حداکثر ۵/۴۴ درصد و میانگین خطای نسبی آن ۲/۶۴ درصد است. که این نشان‌دهنده یک توافق خیلی خوب بین مدل‌سازی حاضر، داده‌های تجربی و مدل‌سازی است. با دقت در شکل ۵ مشاهده می‌شود که علت خطای به وجود آمده تأخیر زمانی است و داده‌های مدل‌سازی حاضر دقیقاً همان منحنی موردنظر را با تفاوت بسیار کمی (زیر ۵ درصد) در بیشینه یا کمینه نمودار به وجود می‌آورد. این موضوع به آن معنی است که مدل‌سازی پژوهش حاضر تطابق خوبی بر داده‌های تجربی و مدل‌سازی مقاله السید و همکاران [۴] دارد و تنها تفاوت آن تأخیر در زمان رسیدن به مقادیر موردنظر است (حداکثر ۵۰۰ ثانیه در شدیدترین تغییرات).

جدول ۵. شرایط اولیه مدل‌سازی

Table 5. Initial conditions of modeling

مقدار	شرایط اولیه	مقدار	شرایط اولیه	مقدار	شرایط اولیه
۳۱/۵	دمای آب تغذیه (°C)	۰/۰۰۱	ارتفاع مایع کندانسور (m)	۳۱/۵	دمای کندانسور (°C)
۳۱/۵	دمای بخار اثر اول (°C)	۰/۰۰۱	ارتفاع آب‌نمک اثر اول (m)	۳/۵٪	شوری آب‌نمک اثر اول
۳۱/۵	دمای بخار اثر دوم (°C)	۰/۰۰۱	ارتفاع آب‌نمک اثر دوم (m)	۳/۵٪	شوری آب‌نمک اثر دوم
۳۱/۵	دمای بخار اثر سوم (°C)	۰/۰۰۱	ارتفاع آب‌نمک اثر سوم (m)	۳/۵٪	شوری آب‌نمک اثر سوم
۳۱/۵	دمای بخار اثر چهارم (°C)	۰/۰۰۱	ارتفاع آب‌نمک اثر چهارم (m)	۳/۵٪	شوری آب‌نمک اثر چهارم

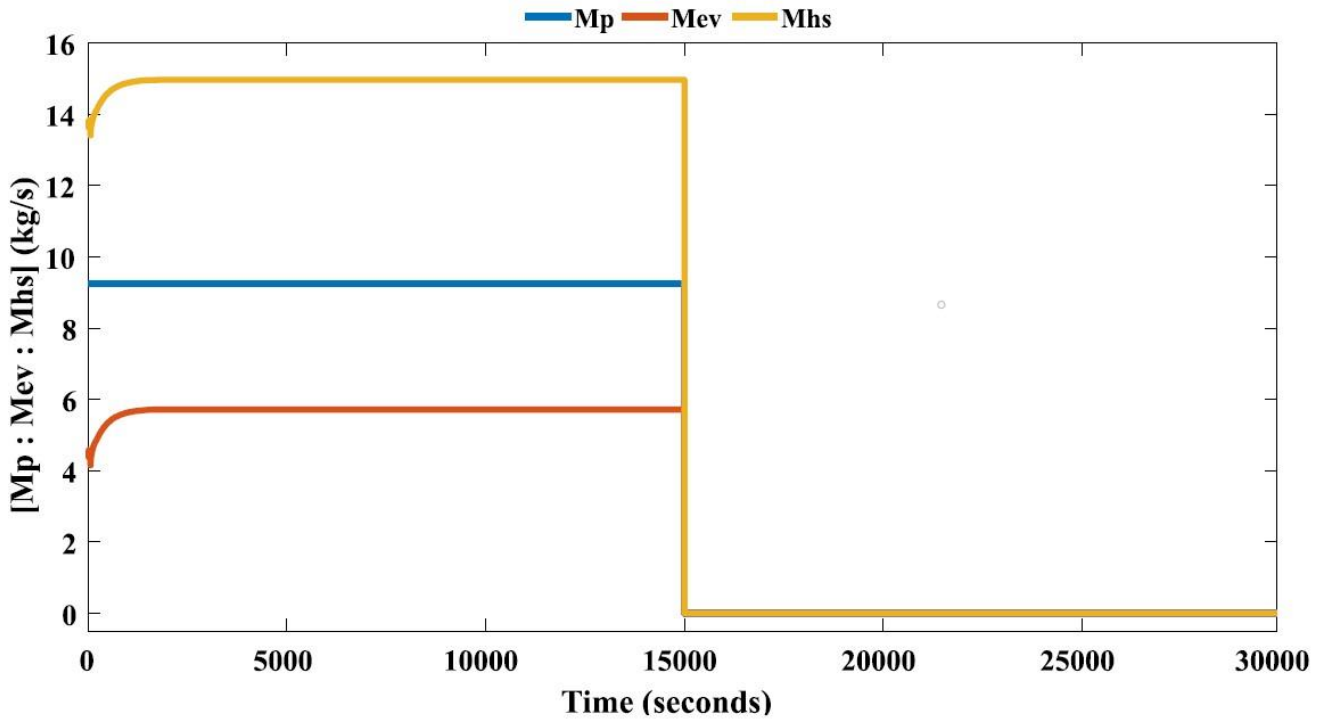
سیستم روشن می‌شود تا پارامترهای ترمودینامیکی از حالت شرایط محیطی به مقدار پایای خود برسند، سپس سیستم خاموش می‌شود تا پارامترهای ترمودینامیکی به حالت شرایط محیطی خود بازگردند.

با روشن شدن سیستم، بخار گرمایش وارد لوله‌های اثر اول شده و به تدریج با گرم شدن لوله‌ها، آب تغذیه شروع به تبخیر می‌کند و دمای بخار افزایش می‌یابد، سپس بخار تولیدشده وارد اثر بعد شده و این روند تا اثر آخر ادامه می‌یابد. در این هنگام تمام دبی بخار و دبی آب‌نمک از مقدار صفر به حالت پایای خود می‌رسند و ارتفاع آب‌نمک نیز از صفر به میزان پایای خود افزایش می‌یابد. با توجه به شکل‌های ۸ تا ۱۰ بیشترین دمای بخار، بیشترین دبی بخار و بیشترین نسبت تغلیظ مربوط به اثر اول است و به ترتیب تا اثر آخر، این مقادیر به میزان کمتری پایا می‌شوند. اما با توجه به این که آب‌نمک هر اثر وارد اثر بعد می‌شود، بیشترین دبی آب‌نمک و ارتفاع آب‌نمک مربوط به اثر آخر است و به ترتیب تا اثر اول به مقادیر کمتری پایا می‌شود (شکل‌های ۷ و ۱۱). دمای بخار اثر اول تا آخر در حالت پایا به ترتیب به ۵۹/۹، ۵۴، ۴۹ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و همچنین دمای آب تغذیه به ۴۱/۵ درجه سانتی‌گراد می‌رسد (شکل ۸). دبی بخار تولیدشده در اثر اول در حالت پایا به ۱۴/۲ کیلوگرم بر ثانیه می‌رسد که بیشترین مقدار است و پس‌از آن دبی بخار اثر چهارم ۱۳/۵ و اثر دوم ۱۳/۴ و اثر سوم ۱۳/۲ کیلوگرم بر ثانیه است. که بعد از خاموشی دبی بخار تولیدشده در هر اثر به صفر خواهد رسید (شکل ۱۰).

(به صفر رساندن دبی محرک ترموکمپرسور) در سیستم متغیرهایی نظیر دبی بخار تولیدشده و دمای هر اثر شروع به کاهش کرده تا به حالت اولیه و شرایط محیطی خود برگردند. اما از آنجا که دبی تغذیه در هنگام خاموشی قطع نمی‌شود (زیرا جزو متغیرهای مورد بررسی این مقاله نیست) ارتفاع سطح آب‌نمک و دبی آن در هر اثر افزایش خواهد یافت. در هر آزمایش رابطه متغیرهایی نظیر دبی بخار تولیدشده، دبی آب‌نمک و ارتفاع سطح آب‌نمک در هر اثر با زمان مشخص خواهد شد.

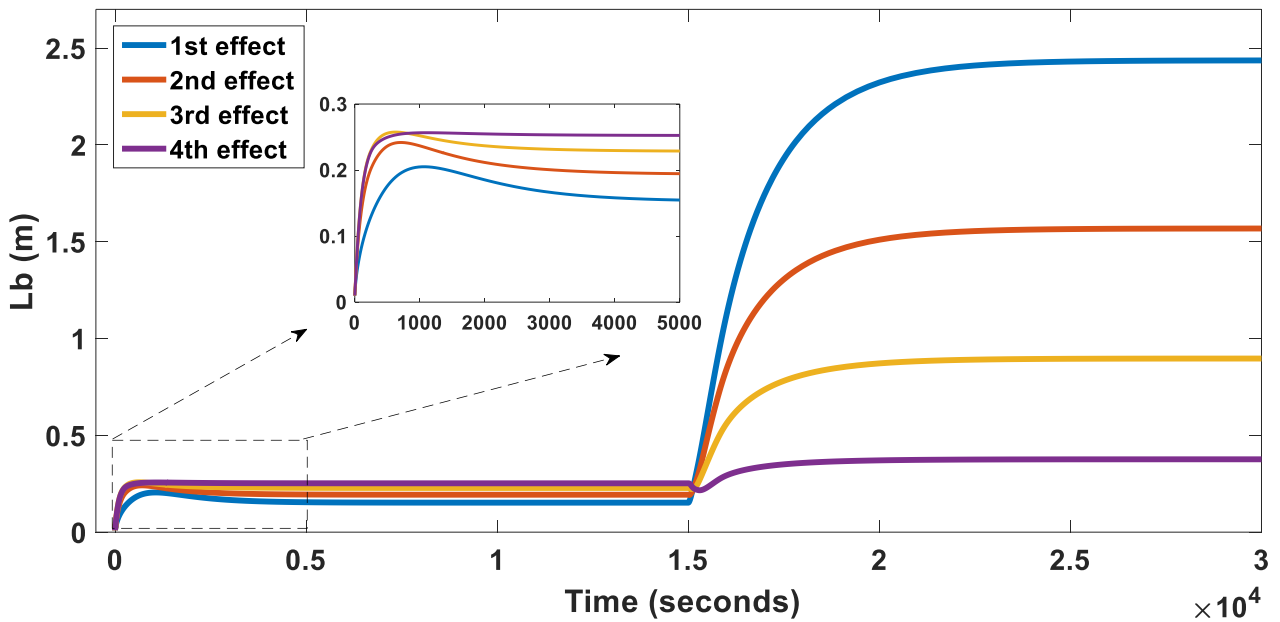
هنگامی که تمامی شرایط اولیه کارخانه مطابق جدول ۵ در شرایط محیطی تعریف شده‌اند، پاسخ دینامیکی کارخانه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با اعمال خاموشی در سیستم جریان بخار محرک ورودی به ترموکمپرسور قطع می‌شود، در نتیجه هیچ‌گونه بخاری به سیستم وارد نمی‌شود. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌کنید با اعمال خاموشی در زمان ۱۵۰۰۰ ثانیه مقدار جریان بخار محرک صفر می‌شود.

به طبع آن به ترتیب جریان بخار مکش شده و جریان بخار گرمایش اثر اول نیز در زمان ۱۵۰۰۰ ثانیه به مقدار صفر می‌رسد. بعد از قراردادن شرایط اولیه در حالت شرایط محیطی نتایج تغییرات ارتفاع آب‌نمک، دمای بخار، شوری آب‌نمک، دبی بخار خروجی، دبی آب‌نمک خروجی، دمای آب تغذیه ورودی در طول زمان پس از شبیه‌سازی اواپراتورها (اثرها) و کندانسور توسط سیمولینک نرم‌افزار متلب قابل مشاهده است. برای شبیه‌سازی، آب‌شیرین‌کن در دو حالت خاموش و روشن مورد بررسی قرار گرفته است به گونه‌ای که اول



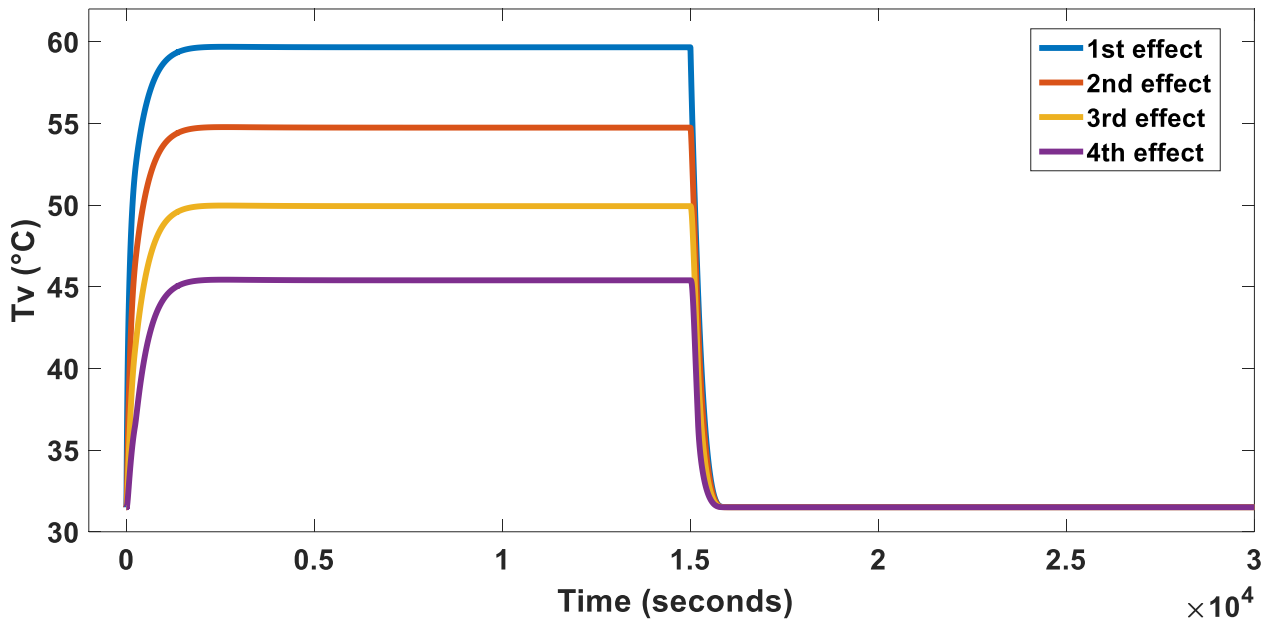
شکل ۶. تغییرات پارامترهای عملیاتی ترموکمپرسور بخار

Fig. 6. Changes in the operating parameters of the TVC



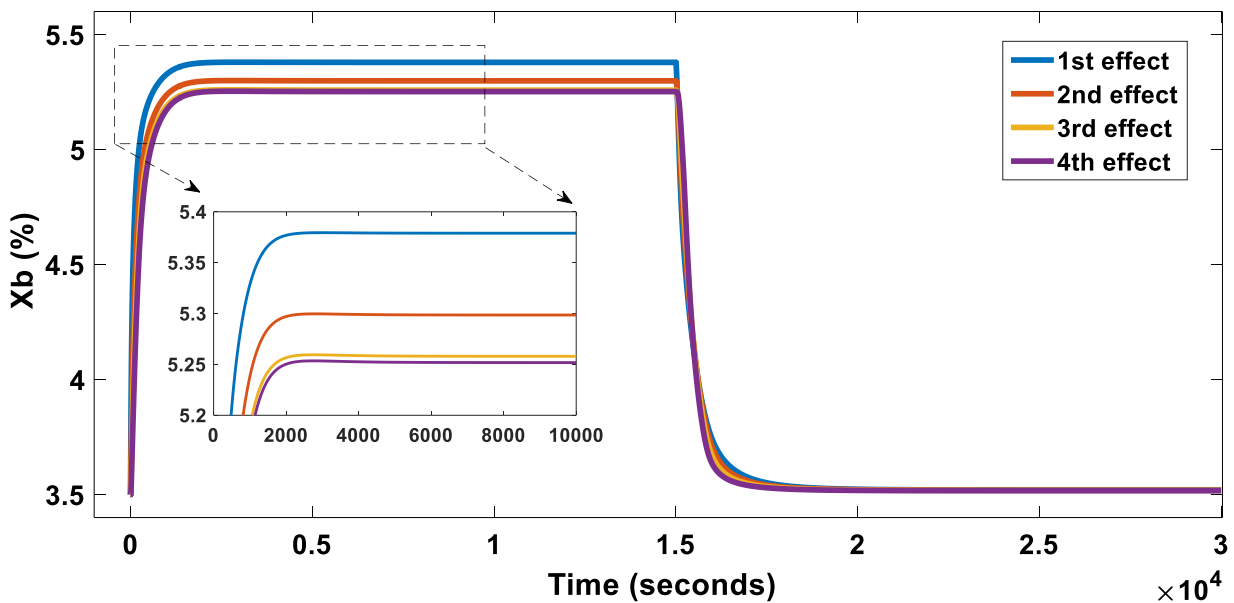
شکل ۷. تغییرات ارتفاع آب نمک در تمامی اثرها در حالت خاموش و روشن

Fig. 7. Brine level changes in all effects in mode of on and off



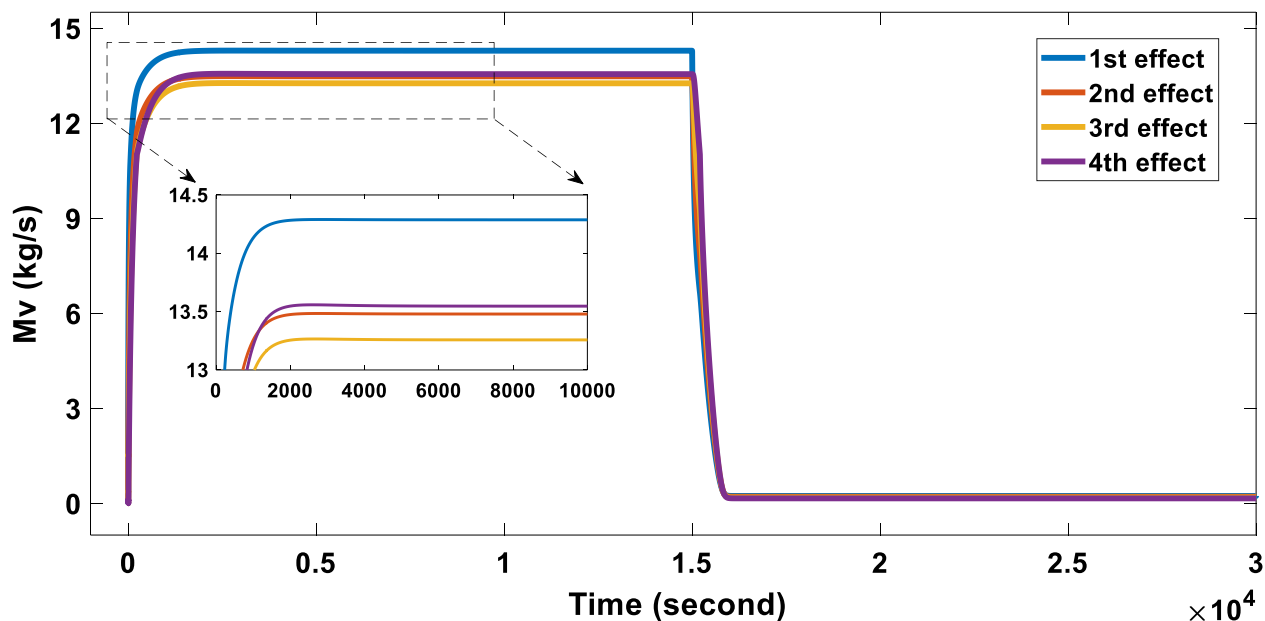
شکل ۸. تغییرات دمای بخار در تمامی اثرها در حالت روشن و خاموش

Fig. 8. Vapor temperature changes in all effects in mode of on and off



شکل ۹. تغییرات غلظت نمک آب دریا در تمامی اثرها

Fig. 9. Changes in seawater salt concentration in all effects



شکل ۱۰. تغییرات دبی بخار خروجی از تمامی اثرها

Fig. 10. Output vapor mass flow rate changes from all effects

میزان است و تا اثر آخر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. اما بعد از قطع شدن بخار گرمایش ورودی به دستگاه، بیشترین میزان ارتفاع آب‌نمک مربوط به اثر اول است و تا اثر آخر به کمترین میزان خود می‌رسد. علت این پدیده واکنش حالت گذرای سیستم به کم شدن فشار اشباع در اثرها و نبود فشار کافی برای عبور آب‌نمک از اریفیس‌ها است. لذا سیستم با افزایش سطح ارتفاع آب‌نمک در اثرهای اول نسبت به اثرهای آخر، این کمبود فشار را برای عبور دبی آب‌نمک لازم از اریفیس‌ها فراهم می‌کند.

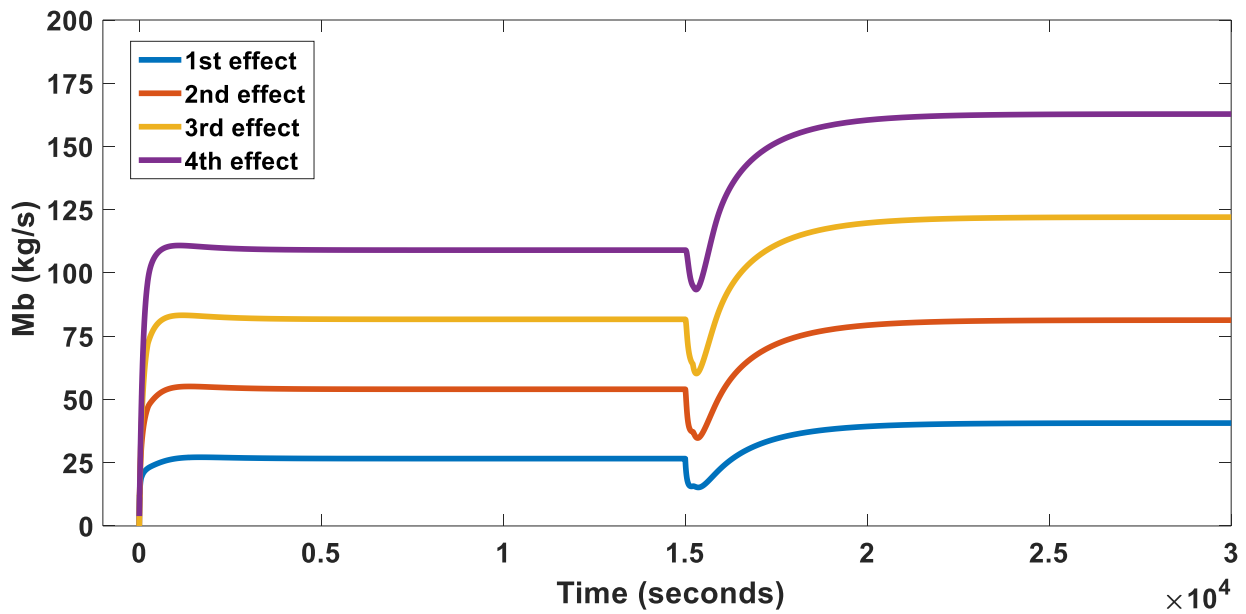
دمای بخار در لحظه خاموشی سیستم به سمت دمای محیط می‌رود چون دیگر بخار به لوله‌های اثر اول وارد نمی‌شود، در نتیجه تولید بخار در اثر اول و به طبع آن در بقیه اثرها نیز کاهش می‌یابد و با کاهش تولید بخار، دمای اثرها نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های ۸ و ۱۰ بیانگر این موضوع هستند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید در شرایط خاموشی، به دلیل کاهش تولید بخار دیگر آب دریا بخار نمی‌شود و موجب کاهش غلظت آب‌نمک نیز می‌شود.

در شکل‌های ۸ تا ۱۰ مشهود است که در هنگام خاموشی دستگاه سریع‌تر به حالت محیط برمی‌گردد و غلظت نمک و دمای بخار به حالت اولیه خود می‌رسند. دلیل این امر این است که تمام اثرهای دستگاه به صورت هم‌زمان در حال تغذیه از آب ورودی هستند و خنک شدن آب تغذیه تمام

بیشترین نسبت تغلیظ مربوط به اثر اول و برابر ۵/۳۸ درصد است و به ترتیب تا اثر آخر به ۵/۲۴ کاهش می‌یابد (شکل ۹). بعد از خاموشی نسبت تغلیظ به میزان اولیه خود یعنی ۳/۵ درصد برای هر اثر بر خواهد گشت. دلیل افزایش دبی بخار اثر چهارم نسبت به اثرهای دوم و سوم این است که دمای آب ورودی به اثر چهارم به دمای اشباع آن اثر نزدیک‌تر است و موجب صرف انرژی کمتر برای رساندن دمای آب به دمای اشباع می‌شود. این در حالی است که در اثرهای بعد از اثر اول به علت کاهش راندمان تبخیر، باید تولید بخار کمتر شود.

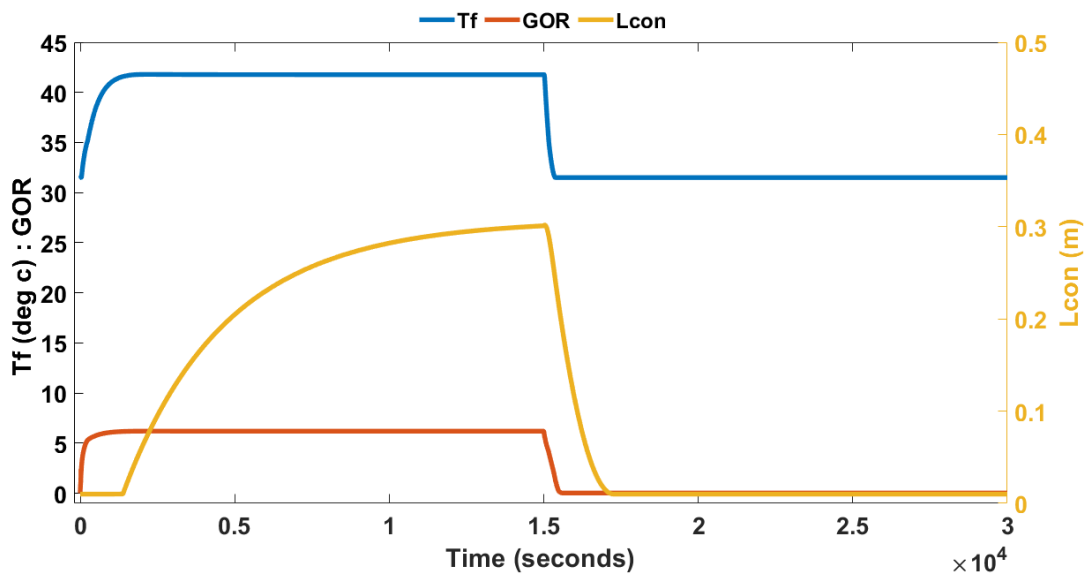
در شکل ۷ و ۱۱ دیده می‌شود که در هنگام خاموش کردن دبی آب‌نمک و ارتفاع سطح آب‌نمک در هر اثر افزایش می‌یابد و در صورت دیر بسته شدن آب ورودی به هر اثر می‌تواند دستگاه را با مشکل سرریز شدن آب یا همان طغیان^۱ روبرو کند. دبی آب‌نمک اثر اول بعد از خاموشی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد و این افزایش دبی در اثر آخر ۴۲ درصد است. ارتفاع آب‌نمک در اثر اول برابر و به همین ترتیب تا اثر آخر به ۱/۲ برابر حالت‌پایا می‌رسد. علاوه بر این افزایش دبی آب‌نمک عبوری از هر اثر به علت تبخیر نشدن آب تغذیه، موجب کاهش غلظت آب‌نمک هر اثر تا رسیدن به غلظت آب دریایی ورودی می‌شود. همچنین در حالت‌پایا، ارتفاع آب‌نمک در اثر اول کمترین

1 Flooding



شکل ۱۱. تغییرات دبی آب نمک خروجی از تمامی اثرها

Fig. 11. Output Brine mass flow rate changes from all effects



شکل ۱۲. تغییرات دمای تغذیه ورودی به اثرها، ارتفاع مایع کندانسور و نسبت GOR

Fig. 12. Changes in inlet feed temperature to effects, condenser fluid level and GOR ratio

ادامه می‌یابد تا بخار گرمایش دمای تمام اثرها را افزایش دهد و به حالت پایا برساند، لذا گرم شدن سیستم اثری آهسته‌تر از خنک شدن آن دارد. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که در هنگام روشن شدن سیستم، دمای

اثرها را باهم سرد می‌کند. اما در هنگام روشن شدن، بخار گرمایش باید به صورت مرحله‌ای دمای بخار اثرها را به تدریج افزایش دهد تا در نهایت این اثر به کندانسور رسیده و دمای آب تغذیه افزایش یابد و این چرخه

آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور طرابلس، قابلیت پیش‌بینی مدل نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی مدل از زمان راه‌اندازی سیستم در شرایط محیط تا لحظه رسیدن به مقدار پایدار با پاسخ مدل حالت پایا تطابق دارد و دارای خطای بسیار پایینی است. و همچنین در ادامه با خاموش کردن سیستم متغیرهای ترمودینامیکی مسئله به مقدار محیطی قبلی خود، همان‌طور که در قسمت نتایج مشاهده کردید، باز خواهند گشت. همچنین مدل به شما اجازه می‌دهد که بر روی متغیرهای کنترلی مانند فشار بخار محرک، دبی آب دریا ورودی به کندانسور تغییراتی اعمال کنید و اثر آن تغییرات را مشاهده کنید.

در نتایج مشاهده می‌شود که زمانی در حدود ۱۸۰۰ ثانیه لازم است تا سیستم پس از راه‌اندازی از حالت محیط به حالت پایای خود برسد، همچنین در مدت‌زمان ۸۰۰ ثانیه بعد از خاموشی، سیستم دوباره به حالت محیط برمی‌گردد. در طول زمان راه‌اندازی تا خاموشی کامل نتایج زیر حاصل گردیده است:

- در صورت بروز یک خاموشی ناگهانی در سیستم تأمین بخار ورودی به دستگاه، سیستم کنترلی مدت‌زمان محدودی (۴۰۰ ثانیه) با توجه به ارتفاع افکت در اختیار دارد تا کل سیستم را بدون فشار به دستگاه خاموش کند، در غیر این صورت شاهد پدیده طغیان خواهیم بود که باعث فشار و درنهایت خرابی دستگاه خواهد شد.
 - مدت‌زمان لازم برای پایا شدن دستگاه بیشتر از مدت‌زمان لازم برای رسیدن دستگاه به حالت محیطی است.
 - اطلاع از سطح ارتفاع دقیق آب‌نمک تنها در مدل ناپایا ممکن می‌شود و این می‌تواند به انتخاب اریفیس و قطر لوله مناسب برای طراحی دستگاه آب‌شیرین کن و همچنین نوع عملکرد شیر کنترلی‌ها (با توجه به معادلات کنترلی و برنولی استفاده‌شده برای دبی) کمک بسزایی کند.
- این اطلاعات می‌تواند برای سیستم کنترلی بسیار سودمند باشد. این تجزیه و تحلیل مقدماتی نشان‌دهنده ظرفیت‌های مدل ارائه‌شده به‌عنوان ابزاری برای تحلیل نظری عملیات گذرا و برای طراحی دستگاه‌های کنترل است. همچنین این تحقیق می‌تواند برای تمام آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره مشابه سودمند باشد، زیرا نشان می‌دهد که نه تنها برای طراحی دقیق سیستم نیاز به مدل‌سازی ناپایا است، بلکه در صورت اعمال نوسانات و خاموشی ناگهانی ممکن است چه مشکلاتی برای سیستم به وجود آید که برای رفع آن نیاز است که دستگاه مذکور در مدل ناپایا بررسی شود تا سیستم کنترلی بتواند پاسخ مناسبی نسبت به آن داشته باشد.

آب تغذیه ورودی به اثرها از شرایط محیطی به مقدار پایا خود می‌رسد و بعد از اعمال خاموشی در سیستم، دمای آب تغذیه ورودی به اثرها تا حدی که به مقدار دما محیطی خود برسد، کاهش پیدا می‌کند. بخارهای تولیدشده در هر اثر به این دلیل که خالی از نمک می‌باشند، با استفاده از فرآیند چگالش به آب شیرین قابل استفاده تبدیل می‌شوند. که مجموع این آب‌های شیرین به‌دست‌آمده از هر اثر، مقدار آب شیرین کل سیستم است. نسبت خروجی به‌دست‌آمده سیستم نیز در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود.

در بخش کندانسور، همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود ارتفاع مایع کندانس شده با راه‌اندازی سیستم شروع به افزایش می‌کند و بعد از اعمال خاموشی مقدار آن با تأخیر ۲۰۰۰ ثانیه‌ای کاهش می‌یابد و به مقدار صفر می‌رسد. علت این تأخیر این است که بعد از اعمال خاموشی در سیستم هنوز مقدار کمی بخار در اثرات و کندانسور باقی‌مانده است و زمانی کافی برای تخلیه کامل کندانسور لازم است.

۶- نتیجه‌گیری

یک مدل جدید و جامع برای شبیه‌سازی پویا عملکرد یک آب‌شیرین کن چهار اثره همراه با ترموکمپرسور با داده‌های عملیاتی واقعی از نیروگاهی واقع در طرابلس (لیبی) اجرا و اعتبار سنجی شد.

فرمول‌بندی مدل شامل توصیف پدیده‌هایی پیچیده مانند اتصال دینامیکی بین اثرها، چگالش جزئی بخار درون لوله‌ها، تغییر ارتفاع آب‌نمک، تغییر دمای بخار تولیدشده، تغییر غلظت نمک آب‌نمک، تغییر دمای تغذیه آب دریا ورودی به اثرها است. بنابراین این مدل توانسته با کمک گرفتن از تحقیقات قبلی انجام‌شده در این زمینه به بررسی راه‌اندازی و خاموش کردن یک آب‌شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور از لحظه راه‌اندازی تا لحظه رسیدن به یک حالت پایدار و در ادامه خاموش کردن سیستم را به ما نشان دهد. علاوه بر این، به‌جای استفاده از رابطه‌های تجربی که به‌طور معمول در آثار دیگر مقالات اتخاذ شده است، مدل دقیق‌تری از عملکرد ترموکمپرسور بخار بر اساس معادلات اصول اولیه ارزیابی اجرا شده است.

فرمول‌بندی مدل به‌طور کامل در مقاله ارائه‌شده است، بنابراین امکان درک فیزیکی کامل از تمام معادلات را فراهم می‌کند. علاوه بر این، ساختار سلسله‌مراتب مدل، پیاده‌سازی آن را برای واحدهای نمک‌زدایی چند اثره با تعداد اثرهای مختلف یا شکل‌های مختلف نیروگاه نمک‌زدایی چند اثره آسان می‌کند.

سرانجام پس از اعتبار سنجی با داده‌های تجربی از نیروگاه صنعتی واقعی

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی	زیرنویس
A مساحت، m^2	b آب‌نمک
BPE افزایش نقطه جوش، $^{\circ}C$	C سرد
C_v ضریب تخلیه برای جریان بخار	c خروجی
C_b ضریب تخلیه برای جریان آب‌نمک	cc مقطع کندانسور
D_{ev} نرخ جریان جرم بخار مکش شده، $\frac{kg}{s}$	con کندانسور (مایع کندانس شده)
D_{tot} میزان آب شیرین تولیدی کل، $\frac{kg}{s}$	con,o مایع کندانس شده خروجی
Er نسبت تبخیر اواپراتور	cw آب‌خنک کننده
g گرانش مخصوص، $\frac{m}{s^2}$	d تقطیر
H ارتفاع، m	di دیفیوزر
h آنتالپی، $\frac{kJ}{kg}$	E اواپراتور (اثر)
L ارتفاع، m	ev بخار مکش شده
M جرم، kg	e اواپراتور (اثر)
Ma عدد ماخ	f آب تغذیه
m نرخ جریان جرم، $\frac{kg}{s}$	$feed$ آب تغذیه
P فشار، kPa	H گرم
Q نرخ انتقال حرارت، kW	hs بخار گرمایش
R ثابت جهانی گاز، $\frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}C}$	i شمارنده اثرها
T دما، $^{\circ}C$	L,con مایع کندانس شده
U ضریب انتقال حرارت کلی، $\frac{kW}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$	n نازل
X میزان نمک آب، %	p جریان اولیه
	re آب بازگشتی
علائم یونانی	
ρ چگالی، $\frac{kg}{m^3}$	T لوله
Δ اختلاف	$Tube$ لوله
∇ حجم، m^3	v بخار
γ نسبت تراکم‌پذیری	vg بخار تولیدشده
ω نسبت مکش	بالانویس
η راندمان	*
	بحرانی

- Dong, Dynamical modeling and simulation analysis of a nuclear desalination plant based on the MED-TVC process, *Desalination*, 456 (2019) 121-135.
- [7] A.E. Hakim, A. Abouelsoud, R. Abobeah, E.E. Ebrahiem, Enhancement of Feed Forward Multi Effect Evaporator Performance for Water Desalination Using PI Control, *Journal of Advanced Engineering Trends*, (2020).
- [8] J. Hua, L. Wua, Y. Wangb, W. Zhanga, Y. Hua, Dynamic modeling and simulation of the multi-effect distillation desalination process, *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 217 (2021) 31-41.
- [9] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, G. Al-Nuwaibit, Evaluation of steam jet ejectors, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 41(6) (2002) 551-561.
- [10] M.M. Ashour, Steady state analysis of the Tripoli West LT-HT-MED plant, *Desalination*, 152(1-3) (2003) 191-194.
- [11] H.-J. Joo, H.-Y. Kwak, Performance evaluation of multi-effect distiller for optimized solar thermal desalination, *Applied thermal engineering*, 61(2) (2013) 491-499.
- [1] M.C. Georgiou, A.M. Bonanos, A transient model for forward and parallel feed MED, *Desalination and Water Treatment*, 57(48-49) (2016) 23119-23131.
- [2] A. Cipollina, M. Agnello, A. Piacentino, A. Tamburini, B. Ortega, P. Palenzuela, D. Alarcon, G. Micale, A dynamic model for MED-TVC transient operation, *Desalination*, 413 (2017) 234-257.
- [3] M.L. Elsayed, O. Mesalhy, R.H. Mohammed, L.C. Chow, Effect of disturbances on MED-TVC plant characteristics: Dynamic modeling and simulation, *Desalination*, 443 (2018) 99-109.
- [4] M.L. Elsayed, O. Mesalhy, R.H. Mohammed, L.C. Chow, Transient performance of MED processes with different feed configurations, *Desalination*, 438 (2018) 37-53.
- [5] L. Guimard, A. Cipollina, B. Ortega-Delgado, G. Micale, F. Couenne, P. Bandelier, C. Jallut, New considerations for modelling a MED-TVC plant under dynamic conditions, *Desalination*, 452 (2019) 94-113.
- [6] Z. Dong, M. Liu, X. Huang, Y. Zhang, Z. Zhang, Y.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Khajeh Namaghi, M. Nazari, M. Nazari, O. Pilevar, *Investigation of Unsteady Thermal Performance of Multi-Effect Desalination with Thermal Vapor Compression*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(7) (2022) 1623-1646.

DOI: [10.22060/mej.2022.20921.7337](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20921.7337)



