

## 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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.



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

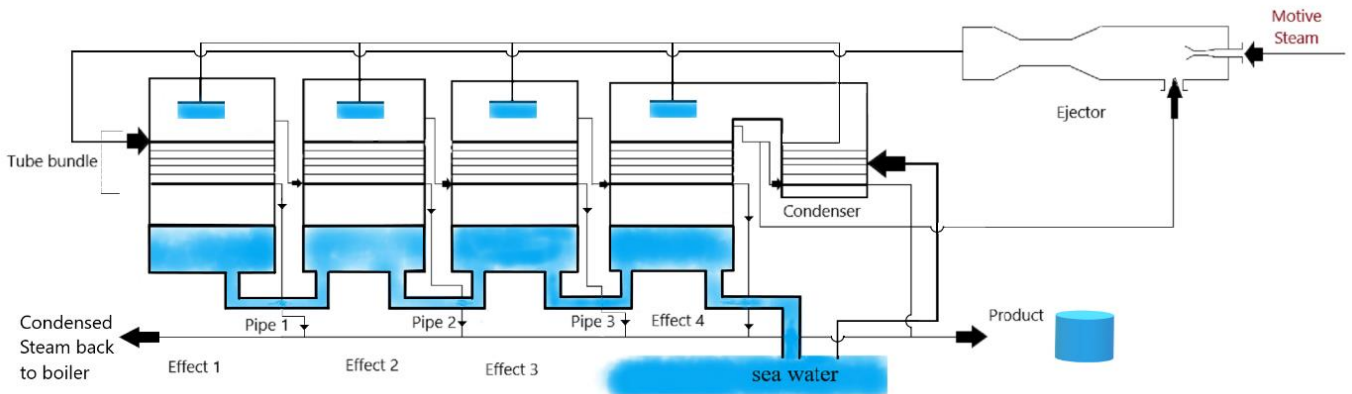
### ۲-۱- آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور

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<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> 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 ( $Er$ )

9- پینچ دمایی کندانسور ( $\Delta T_P$ )

10- پینچ دمایی پیش گرم کن‌ها ( $\Delta T_p^c$ )

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:

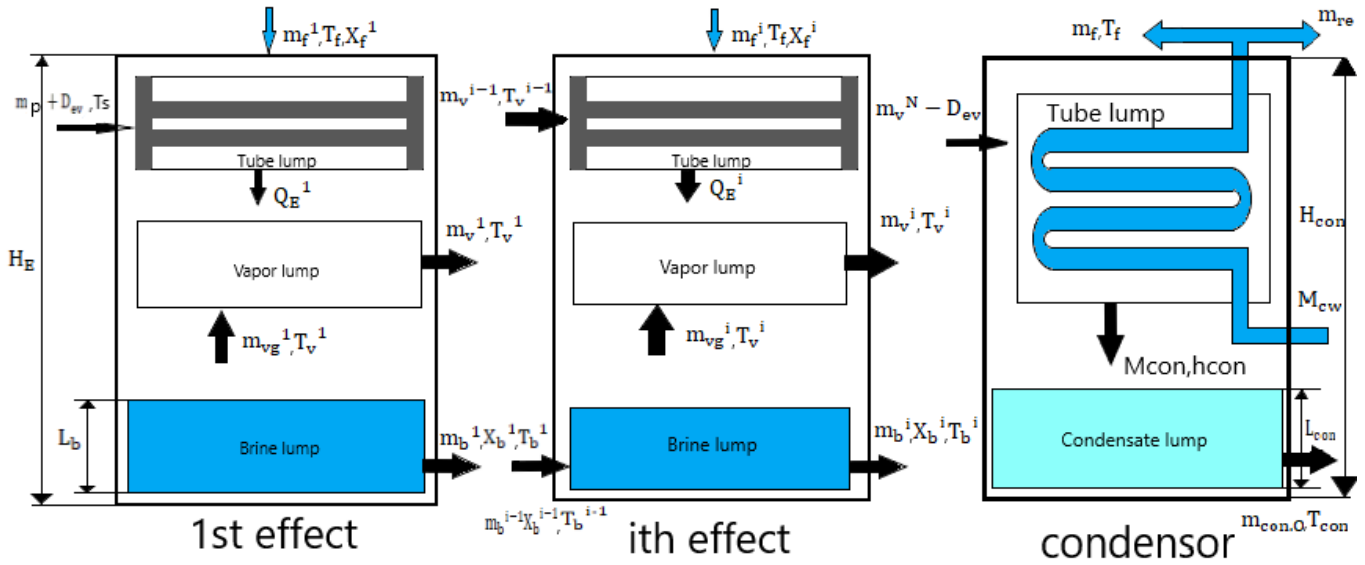
$$m_{cw} (h_{cw} - h_f) + (m_v^N - D_{ev}) (h_v^N - h_d^N) = 0 \quad (8)$$

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 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،  $\rho_v$  چگالی بخار،  $L_v = H_E - L_b$  ارتفاع بخار داخل اثر و  $H_E$  ارتفاع اثر است.  $\rho_b$  و  $h_b$  تابعی از دما و غلظت و  $\rho_v$  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 آب نمک است.

نرخ جریان آب نمک بین اثرها توسط معادله (۲۳) به دست می آید.

۲- بالانس انرژی فاز آب نمک، بخار و لوله

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

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

که در آن  $\Delta P_b$  اختلاف فشار آب نمک بین اثرها که از معادله (۲۴) به

دست می آید،  $C_b$  ضریب تخلیه برای جریان آب نمک 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،  $\rho_b$  چگالی آب نمک و  $g$  شتاب گرانش

مخصوص است.

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

۳- بالانس نمک فاز آب نمک

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

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

که در آن  $C_v$  ضریب تخلیه جریان بخار و  $\Delta P_v$  اختلاف فشار بخار

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

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

مشابه با روند ساده سازی اثر اول برای اثر  $i$  ام نیز همان کارها را

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

معادلات در جدول ۲ گزارش شده اند:

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

برای اثر  $i$  ام معادله های (۲۷) و (۲۸) به ترتیب نشان دهنده بالانس جرم

فاز آب نمک و بخار هست. معادله های (۲۹) تا (۳۱) نیز به ترتیب بالانس

انرژی سه فاز آب نمک، بخار و لوله را نشان می دهد. بالانس نمک فاز

آب نمک نیز از معادله (۳۲) به دست می آید.

۱- بالانس جرم فاز بخار و آب نمک

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

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

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



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 دقایق 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 به‌دست آمده است، در شکل ۳ قابل مشاهده است.

۲-۴-۱- معادله‌های حاکم بر ترموکمپرسور

معادله‌های به‌دست آمده 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،  $\eta_n$  راندمان نازل،  $\gamma$  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:

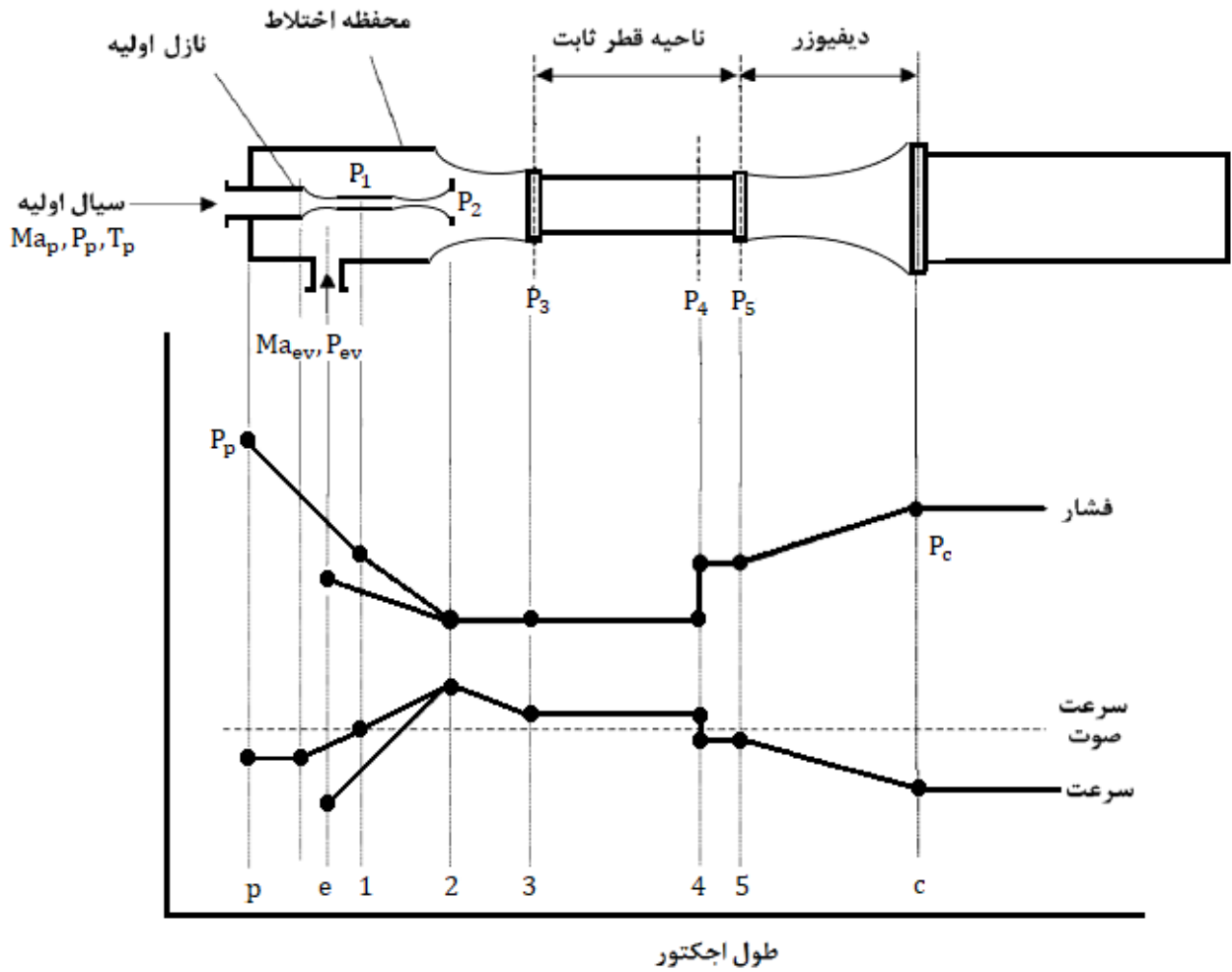
$$Q_{con} = U_{con} A_{con} \frac{(T_v^N - T_f) - (T_{con} - T_{cw})}{\ln\left[\frac{T_v^N - T_f}{T_{con} - T_{cw}}\right]} \quad (45)$$

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 آل دسوکی و همکاران [۹] به‌دست آمده 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 ایزونتروپیک) 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).  $\omega$  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<sup>۲</sup> 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.

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

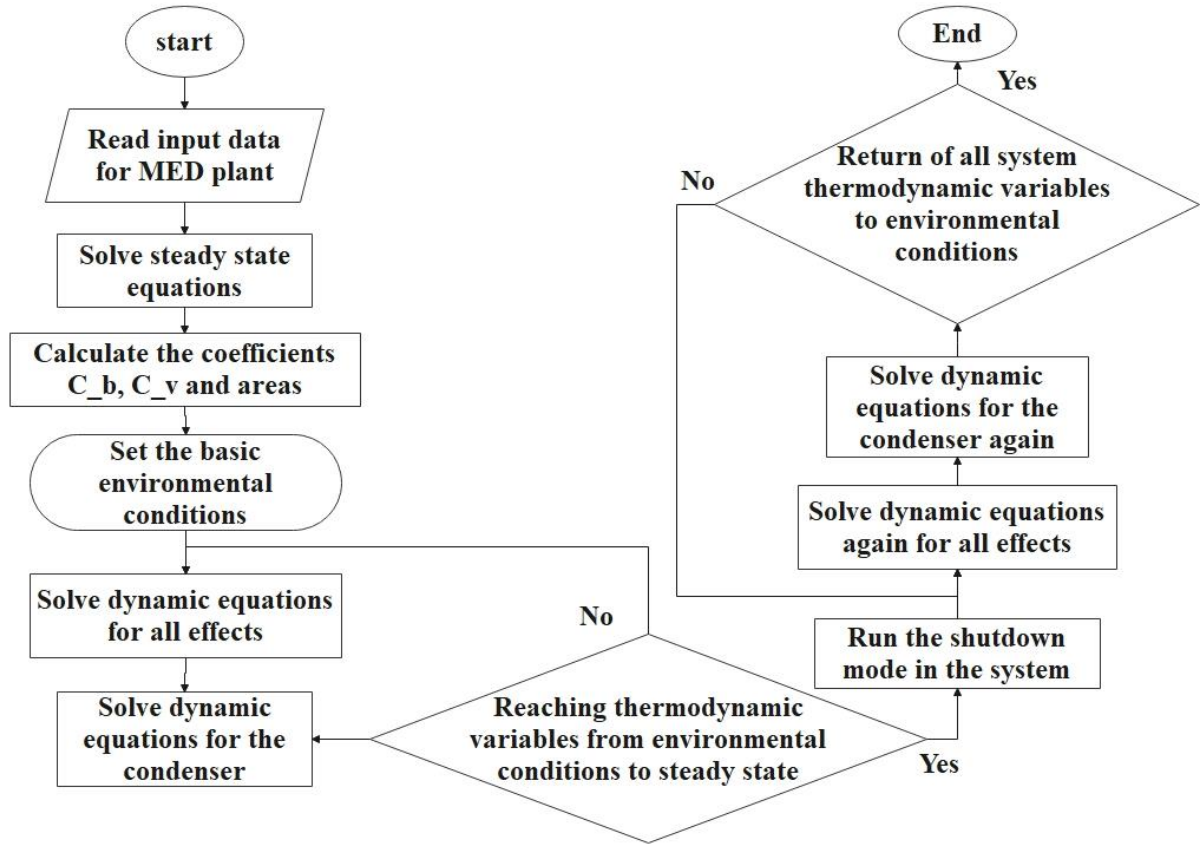
که در آن  $Ma_5$  عدد ماخ جریان ترکیب شده بعد از شوک موج و  $Ma_p$  عدد ماخ جریان در نقطه ایجاد شوک است. افزایش فشار بعد از شوک موج اتفاق می‌افتد و رابطه آن از معادله (۵۱) به دست می‌آید.

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

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<sup>۱</sup> 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  $\eta_{di}$  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<sup>۲</sup> 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 ترمو کمپرسور 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<sup>۱</sup> 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 دست‌آمده
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 دست‌آمده از مدل‌سازی حالت پویا و داده‌های ارائه‌شده در دستگاه [۱۱] در شکل ۵ (سمت راست)

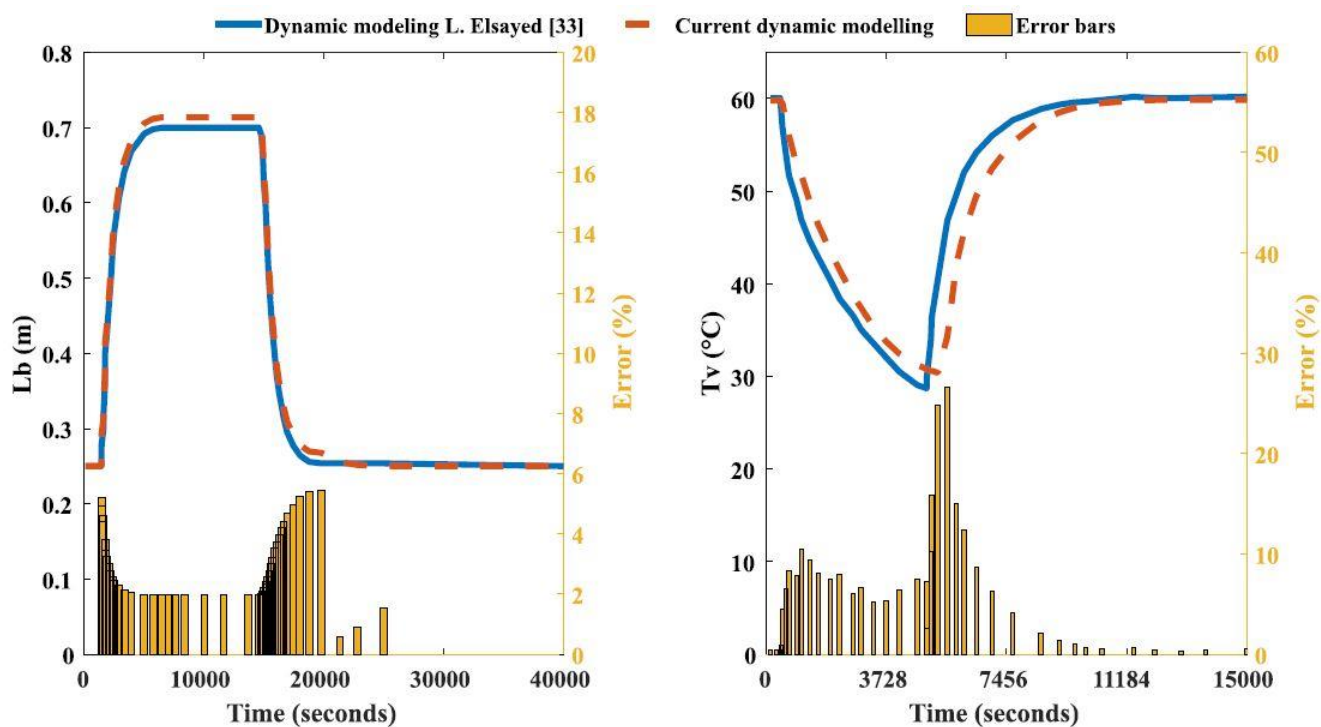
#### ۴-۱- اعتبار سنجی مدل‌ها

جهت اعتبار سنجی<sup>۱</sup> مدل‌سازی انجام‌شده برای حالت پایا و ناپایا آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور، از داده‌های تجربی نیروگاه آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور طرابلس<sup>۲</sup> [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 محاسبه‌شده 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.

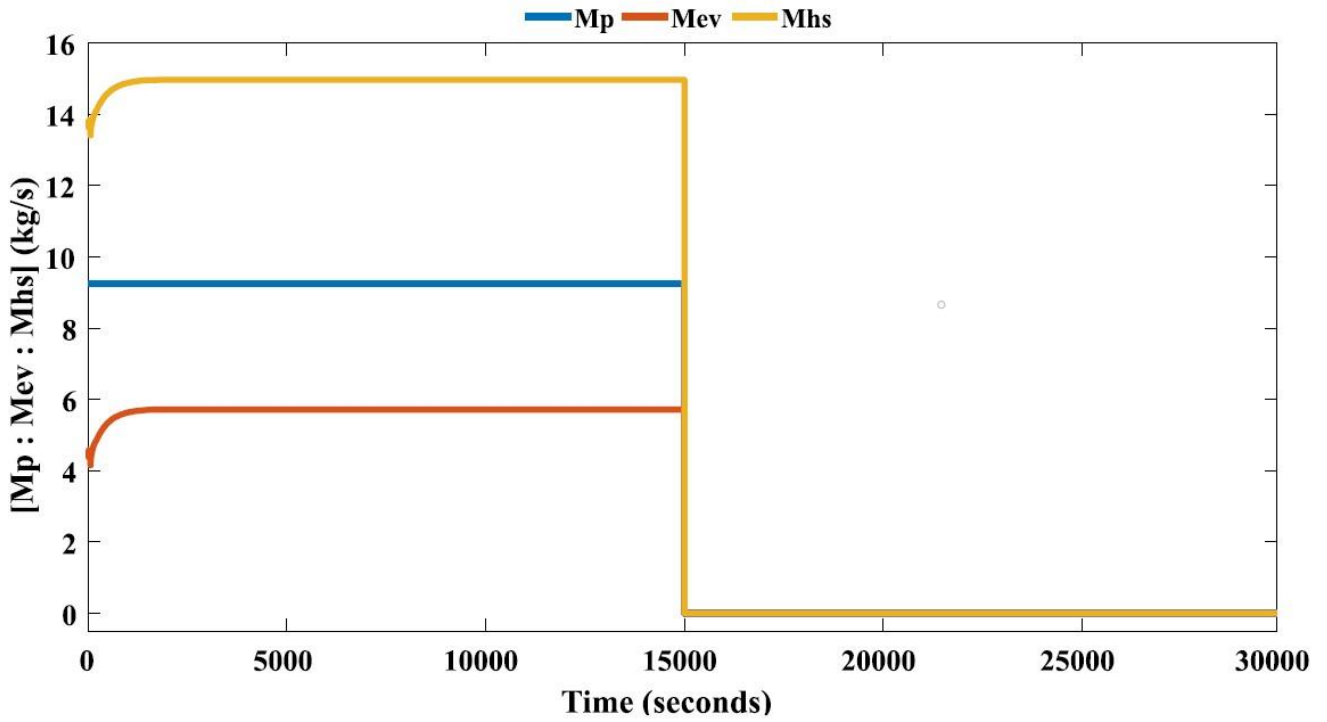
با روشن شدن سیستم، بخار گرمایش وارد لوله‌های اثر اول شده و به تدریج با گرم شدن لوله‌ها، آب تغذیه شروع به تبخیر می‌کند و دمای بخار افزایش می‌یابد، سپس بخار تولیدشده وارد اثر بعد شده و این روند تا اثر آخر ادامه می‌یابد. در این هنگام تمام دبی بخار و دبی آب‌نمک از مقدار صفر به حالت پایای خود می‌رسند و ارتفاع 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.

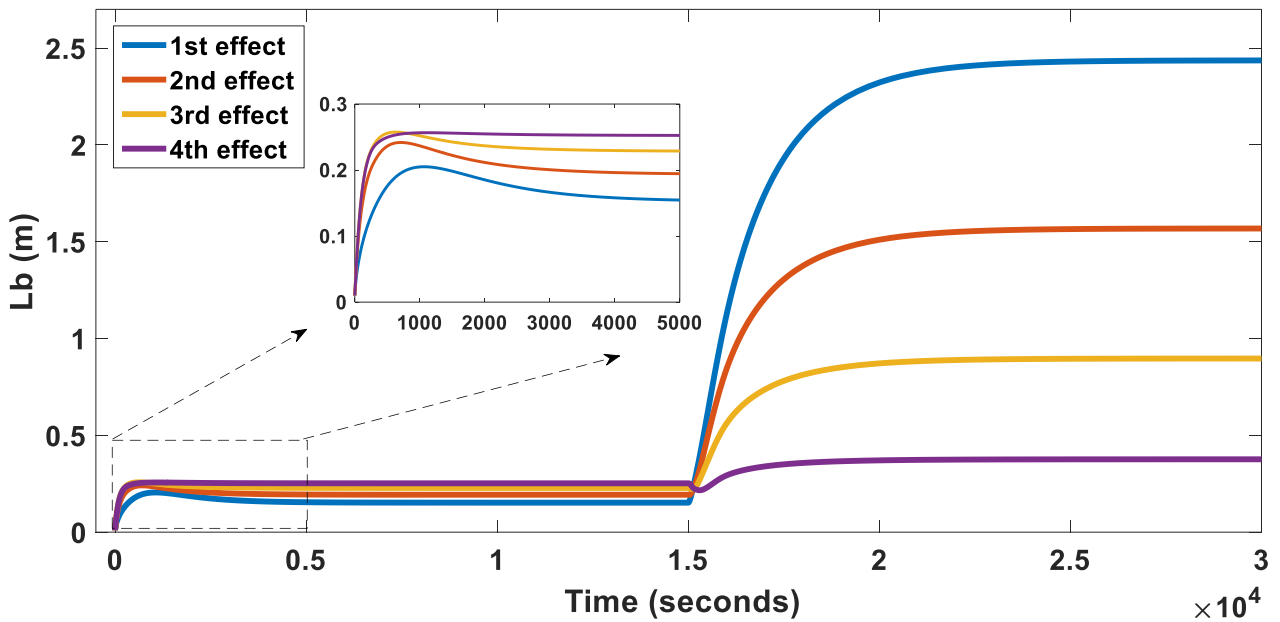
به طبع آن به ترتیب جریان بخار مکش شده و جریان بخار گرمایش اثر اول نیز در زمان ۱۵۰۰۰ ثانیه به مقدار صفر می‌رسد. بعد از قراردادن شرایط اولیه در حالت شرایط محیطی نتایج تغییرات ارتفاع آب‌نمک، دمای بخار، شوری آب‌نمک، دبی بخار خروجی، دبی آب‌نمک خروجی، دمای آب تغذیه ورودی در طول زمان پس از شبیه‌سازی اواپراتورها (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





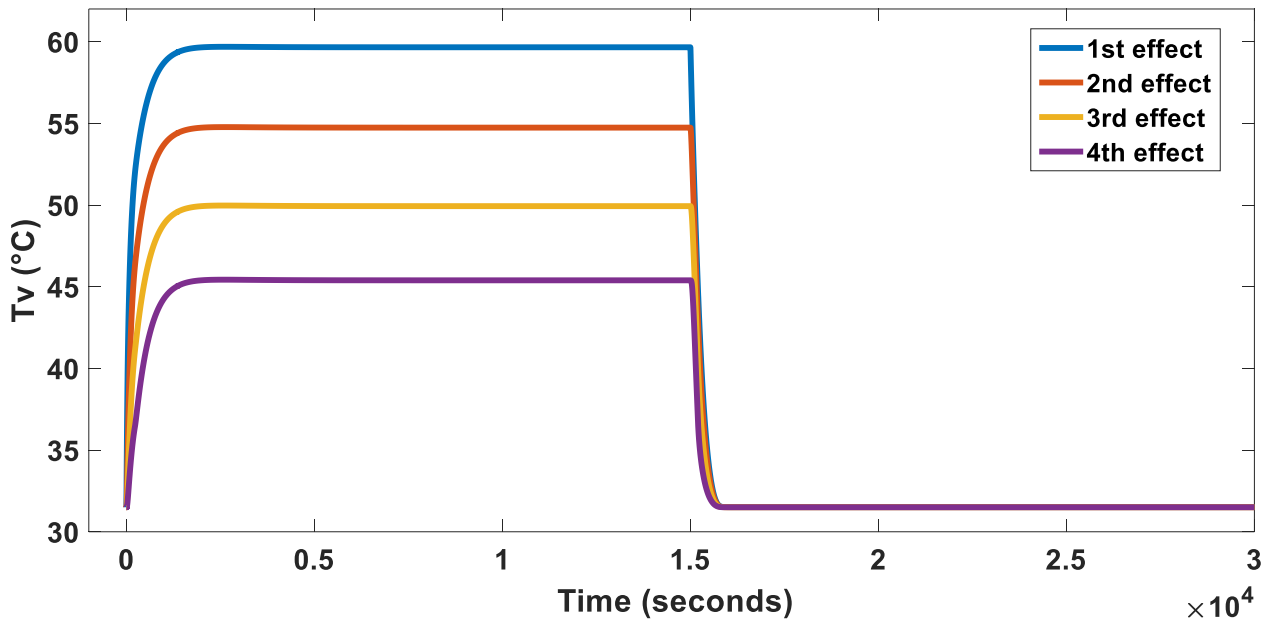
شکل ۶. تغییرات پارامترهای عملیاتی ترموکمپرسور بخار

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



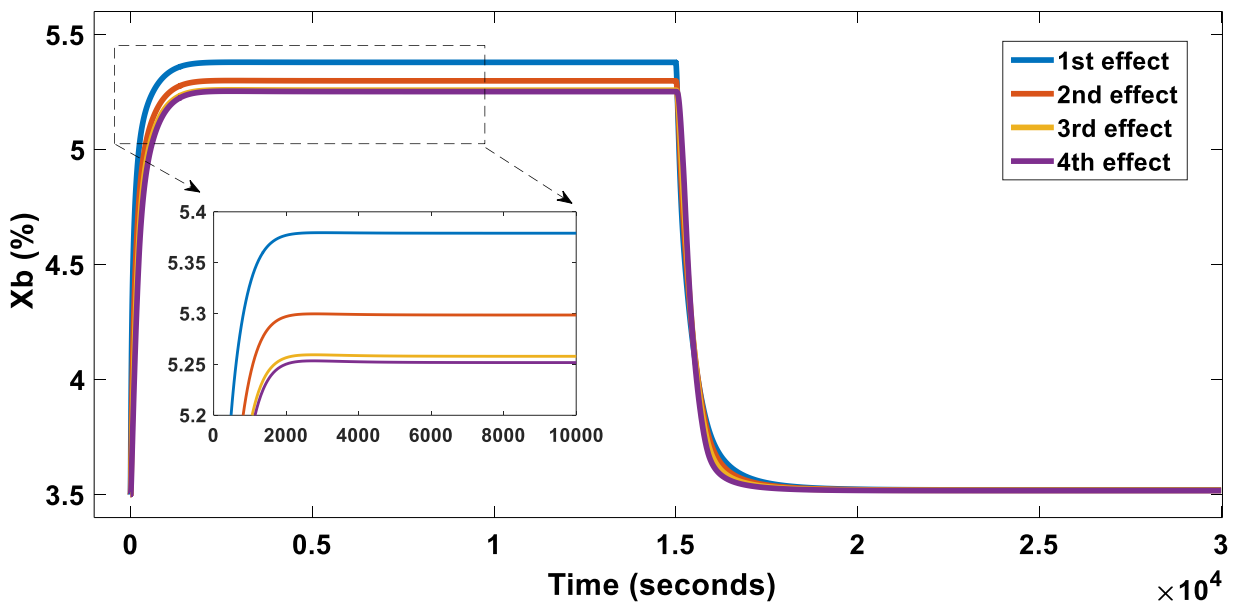
شکل ۷. تغییرات ارتفاع آب نمک در تمامی اثرها در حالت خاموش و روشن

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



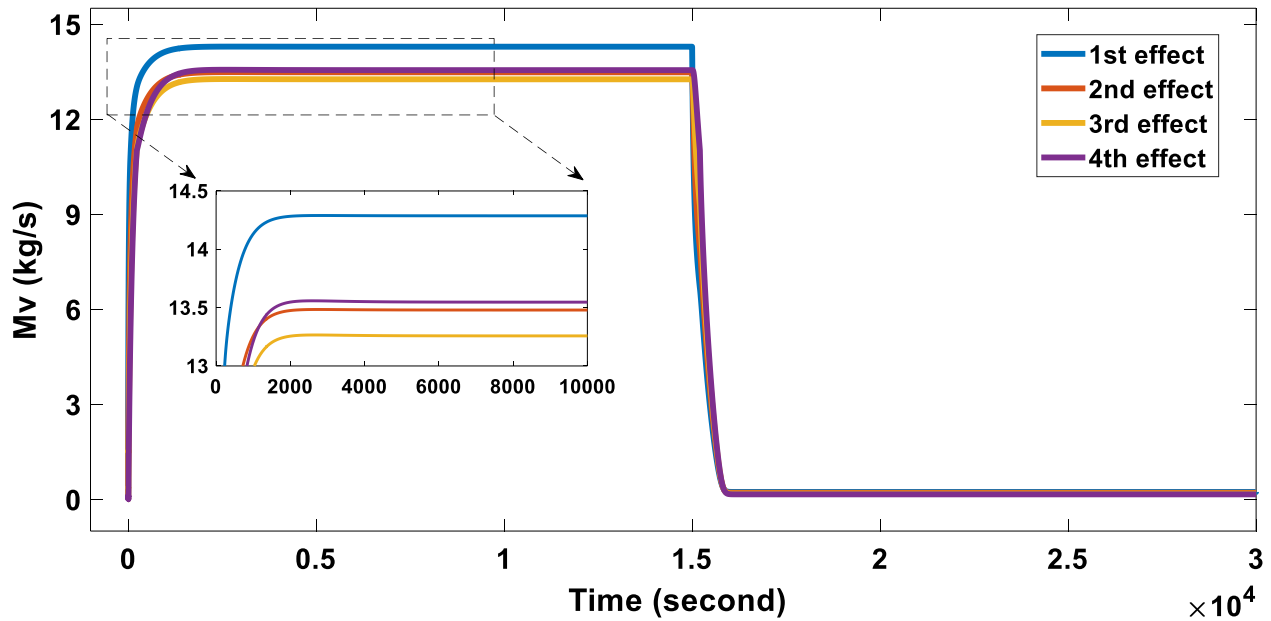
شکل ۸. تغییرات دمای بخار در تمامی اثرها در حالت روشن و خاموش

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.

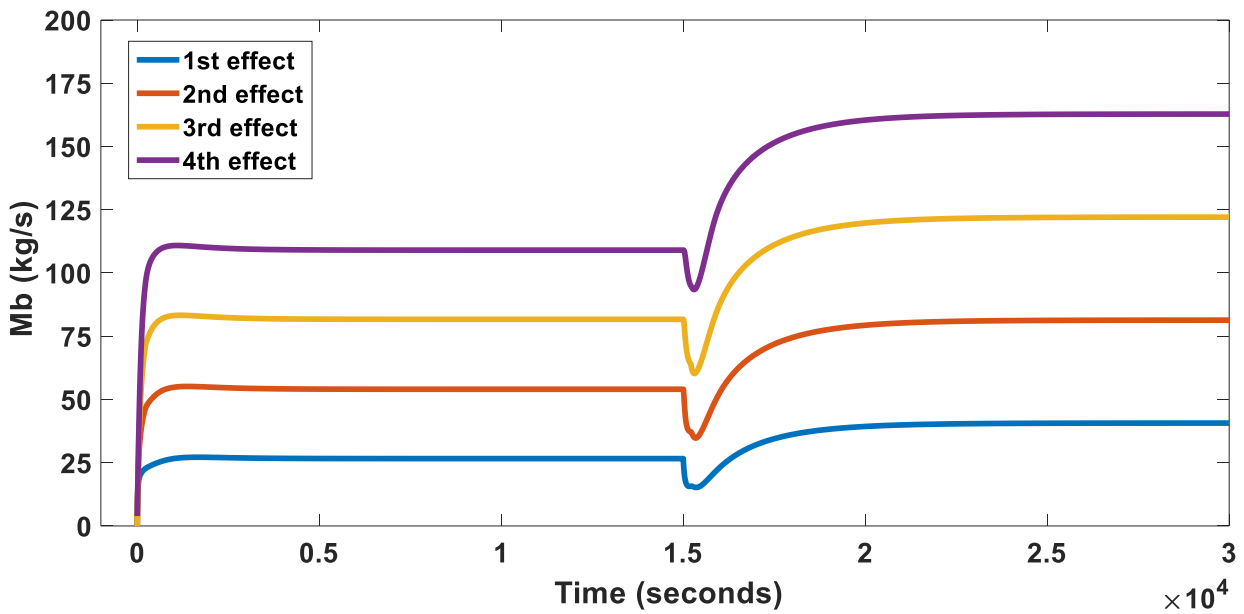
دمای بخار در لحظه خاموشی سیستم به سمت دمای محیط می‌رود چون دیگر بخار به لوله‌های اثر اول وارد نمی‌شود، در نتیجه تولید بخار در اثر اول و به طبع آن در بقیه اثرها نیز کاهش می‌یابد و با کاهش تولید بخار، دمای اثرها نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های ۸ و ۱۰ بیانگر این موضوع هستند. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌کنید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

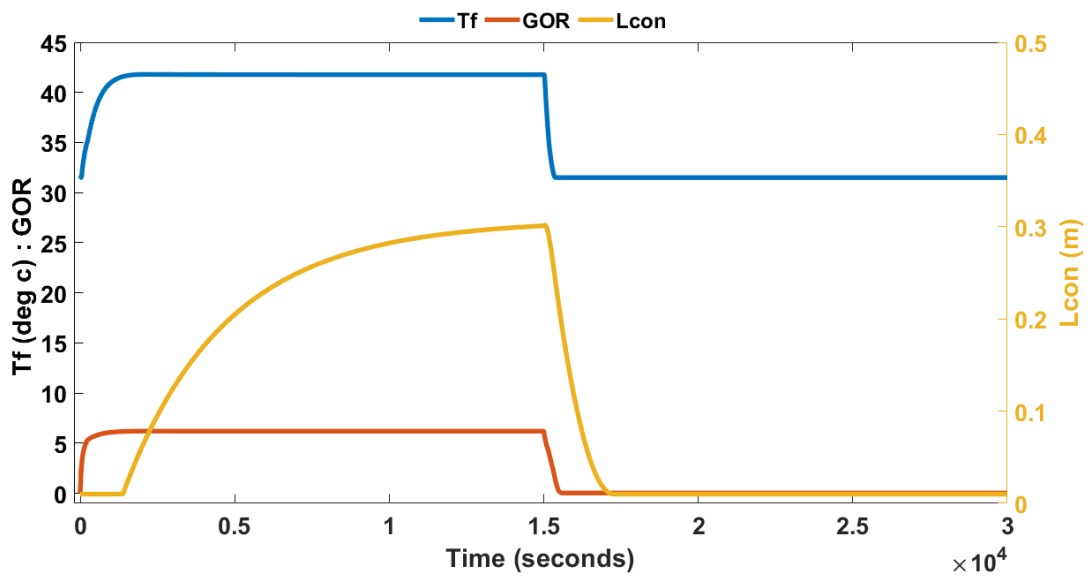
در شکل ۷ و ۱۱ دیده می‌شود که در هنگام خاموش کردن دبی آب‌نمک و ارتفاع سطح آب‌نمک در هر اثر افزایش می‌یابد و در صورت دیر بسته شدن آب ورودی به هر اثر می‌تواند دستگاه را با مشکل سرریز شدن آب یا همان طغیان<sup>۱</sup> روبرو کند. دبی آب‌نمک اثر اول بعد از خاموشی ۲۰ درصد افزایش می‌یابد و این افزایش دبی در اثر 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
<b>علائم یونانی</b>	
$\rho$ چگالی، $\frac{kg}{m^3}$	$T$ لوله
$\Delta$ اختلاف	$Tube$ لوله
$\nabla$ حجم، $m^3$	$v$ بخار
$\gamma$ نسبت تراکم‌پذیری	$vg$ بخار تولیدشده
$\omega$ نسبت مکش	<b>بالانویس</b>
$\eta$ 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)



