

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

مدل سازی ترمودینامیکی ناپایا و تحلیل عددی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور

نگارنده: سبحان خواجه نامقی

اساتید راهنما

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

استاد مشاور

دکتر مصطفی نظری

بهمن ۱۴۰۰

شماره: ۳۲۹/۲۴۰۰/۳
تاریخ: ۱۴۰۰/۱۲/۰۹

باسمه تعالی



فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد

مدیریت تحصیلات تکمیلی

مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد

ویرایش:

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سیحان خواجه نامقی با شماره دانشجویی ۹۷۰۰۳۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مدل‌سازی ترمودینامیکی ناپایا و تحلیل عددی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور که در تاریخ ۱۴۰۰/۱۱/۰۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰ ☒ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹ ☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۷-۱۷/۹۹ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵-۱۴/۹۹ ☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐ نوع تحقیق: نظری ☒ عملی ☐			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمد محسن شاه مردان	استاد	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	دکتر مصطفی نظری	استادیار	
۴- استاد داور اول	دکتر پوریا اکبر زاده	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر علی عباس نژاد	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مسلم صبوری	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی



تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۱۴۰۰-۱۲-۲

تقدیم به:

آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود.

شکر و قدردانی

بر خود لازم میدانم که از توجه و راهنمایی‌های اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان، دکتر محسن نظری و دکتر مصطفی نظری که افتخار شاگردی‌شان را در طول این دوره تحصیلی داشتم، تشویق‌های مادر و پدر عزیزم و همچنین همه دوستانی که من را در این راه همراهی کردند، سپاس‌گذاری نمایم.

همچنین از یاری استاد عزیزم آقای امید پیله‌ور که به هر نحوی در طول دوران تحصیل و تهیه این مجموعه مرا یاری دادند صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

تعمدنامه

اینجانب سبجان خواجه نامقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تبدیل انرژی دانشکده‌ی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدل‌سازی ترمودینامیکی ناپایا و تحلیل عددی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور تحت راهنمایی دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محسن نظری و مشاوره دکتر مصطفی نظری متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است و مقالات مستخرج بانام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه‌های رایانه‌ای ، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نیست.

با توجه به کاربرد زیاد آب شیرین کن های حرارتی تمایل زیادی به شبیه سازی رفتار این دستگاه ها وجود دارد که بیشتر پژوهش ها روی مدل سازی رفتار پایا متمرکز بوده اما برای طراحی دستگاه های کنترلی و بررسی عملکرد آن ها نیاز به مدل سازی رفتار ناپایا نیز داریم. همچنین مطالعات بسیار کمی به نحوه خاموش شدن آب شیرین کن و اثرات آن پرداخته اند. در این پژوهش مدل سازی عددی پایا و ناپایا، آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور (MED-TVC) در مقیاس صنعتی با چهار افکت، یک کندانسور و یک ترموکمپرسور مورد بررسی قرار گرفته شده است. از روش گام و مرتبه متغیر (VSVO) برای حل معادلات دیفرانسیلی استفاده شده است. هر اواپراتور به سه فاز بخار، لوله ها و آب نمک تقسیم شده است و برای هر کدام از این فازها معادلات بقای جرم و انرژی در شرایط ناپایا نوشته شده است. مدل پایا و ناپایا با داده های تجربی اعتبار سنجی شده است. مؤلفه های دما، دبی بخار، دبی آب نمک و ارتفاع آب نمک در مدل سازی عددی حالت ناپایا در هنگام راه اندازی، پایا شدن و خاموش شدن دستگاه مورد مطالعه قرار گرفتند. در ادامه نیز همچنین اثر کنترل کننده فازی نیز در دستگاه نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که بیشترین تغییر دبی آب نمک بعد از خاموشی در افکت آخر است که به میزان ۴۲٪ افزایش می یابد همچنین بیشترین تغییر در ارتفاع آب نمک در افکت اول است که بعد از ۸۰۰ ثانیه به ۱۱ برابر حالت پایا خواهد رسید که موجب پدیده طغیان و آسیب های احتمالی خواهد شد. همچنین با افزایش یا کاهش در فشار بخار محرک و دما آب دریا، کنترل کننده فازی ارتفاع آب نمک افکت ها را به حالت اسمی قبلشان برمی گرداند. این سری نتایج تنها با مدل کردن ناپایای سیستم همراه با روشن و خاموش کردن آن و ایجاد یک کنترل کننده به دست می آید.

کلمات کلیدی: آب شیرین کن های حرارتی، مدل سازی رفتار ناپایا، آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور (MED-TVC)، روش گام و مرتبه متغیر (VSVO)، معادلات بقای جرم و انرژی، کنترل کننده فازی

پیش‌گفتار

این پایان‌نامه با هدف دستیابی به یک قالب و چهارچوبی استاندارد برای شبیه‌سازی آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره همراه با ترموکمپرسور تهیه شده است. بدین منظور اول‌ازهمه تاریخچه‌ای از کارهای انجام‌شده در این زمینه ارائه گردیده است و در ادامه به مدل‌سازی این نوع آب‌شیرین‌کن‌ها پرداخته شده است. به‌گونه‌ای که خواننده با ارجاع به این بخش به راحتی می‌تواند یک آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور را مدل‌سازی کند. در ادامه نیز نتایج حاصل از این مدل‌سازی برای شما نمایش داده شده است. در این پایان‌نامه سعی بر این بوده است که یک الگوی کامل برای تجزیه و تحلیل این نوع دستگاه‌ها در حالت ناپایا ارائه شود.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

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

فهرست مطالب

أ	فهرست مطالب
ج	فهرست جداول
د	فهرست اشکال
و	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه.....
۲	۲-۱ ضرورت شیرین سازی آب.....
۴	۳-۱ فرآیندهای شیرین سازی آب.....
۶	۱-۳-۱ شیرین کردن آب دریا به روش تقطیر.....
۱۴	۲-۳-۱ اسمز معکوس.....
۱۴	۳-۳-۱ الکترودیالیز.....
۱۵	۴-۱ تاریخچه مطالعات بررسی عددی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور.....
۲۸	۵-۱ معرفی طرح پژوهش.....
۲۹	فصل ۲: مدل سازی فرآیند آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور
۳۰	۱-۲ مقدمه.....
۳۲	۱-۱-۲ فرضیات.....
۳۲	۲-۱-۲ ورودی های ثابت آب شیرین کن.....
۳۳	۳-۱-۲ معادلات حالت پایا.....
۳۵	۲-۲ مدل سازی حالت ناپایا.....
۳۷	۱-۲-۲ مدل اواپراتور.....
۴۶	۲-۲-۲ مدل کندانسور.....
۴۹	۳-۲-۲ معادلات انتقال حرارت در سرتاسر دسته لوله ها.....
۵۰	۳-۲ مدل سازی ترموکمپرسور.....
۵۲	۱-۳-۲ معادلات حاکم بر ترموکمپرسور.....
۵۵	فصل ۳: طراحی کنترل کننده فازی برای آب شیرین کن چند اثره
۵۶	۱-۳ مقدمه.....
۵۶	۲-۳ منطق فازی.....

۵۸	۳-۲-۱ مدل فازی
۶۱	۳-۲-۲ توربین بخار
۶۵	۳-۲-۳ روش‌ها
۷۰	۳-۳ به‌کارگیری منطق فازی در آب‌شیرین‌کن MED-TVC
۷۳	فصل ۴: نتایج
۷۴	۴-۱ مقدمه
۷۴	۴-۲ حل عددی
۷۶	۴-۳ اعتبار سنجی مدل پایا
۷۶	۴-۴ اعتبار سنجی مدل ناپایا
۷۷	۴-۵ نتایج و بحث
۸۶	۴-۶ اثر کنترل‌کننده فازی
۸۷	۴-۶-۱ اثر اغتشاش در دما آب دریا
۹۰	۴-۶-۲ اثر اغتشاش در فشار بخار محرک
۹۳	۴-۶-۳ اثر اغتشاش در فشار بخار محرک و دما آب دریا به‌طور هم‌زمان
۹۷	فصل ۵: نتیجه‌گیری
۹۸	۵-۱ نتیجه‌گیری
۱۰۲	۵-۲ پیشنهادها
۱۰۳	مراجع

فهرست جداول

جدول ۱-۴ اعتبار سنجی نتایج مدل سازی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور در مقابل نتایج داده های واقعی نیروگاه طرابلس [۲۵].....	۷۶
جدول ۲-۴ شرایط اولیه مدل سازی.....	۷۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ درصد نوع مصرف آب در جهان، کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه (b) منابع آب شیرین موجود و مورد نیاز در سال ۲۰۳۰ [۱]..... ۳
- شکل ۱-۲ میزان استفاده از آب شیرین کن های حرارتی و اسمز معکوس به نسبت مابقی روش ها در جهان و کشورهای حوزه خلیج فارس [۲]..... ۳
- شکل ۱-۳ پیکربندی های مختلف MED برای انواع حالت های آب تغذیه [۴]..... ۱۲
- شکل ۱-۴ طرح دیگرام از یک سیستم آب شیرین کن چند اثره همراه با ۴ افکت و یک واحد ترموکمپرسور..... ۳۱
- شکل ۲-۲ حجم کنترل با ترم های مختلف برای افکت اول، افکت ۱ام و کندانسور..... ۳۶
- شکل ۲-۳ طرح ساده شده ی ترموکمپرسور بخار [۴۳]..... ۵۲
- شکل ۱-۳ الف) در یک سیستم فازی معمولی، ورودی از یک منبع خارجی خوانده می شود و قبل از پردازش توسط منطق فازی، فازی سازی می شود. خروجی منطق فرآیند قبل از ارسال به سیستم فیزیکی خارجی تحت کنترل، فازی زدایی می شود. ب) یک سیستم کنترل معمولی [پایین سمت چپ] ساختار کلی بسیار مشابهی دارد، اما بدون عناصر فازی [۴۴]..... ۶۰
- شکل ۲-۳ هر دو ورودی (دما و فشار) و خروجی (عمل دریچه گاز) به عنوان مناطق فازی در یک سیستم منطق فازی تعریف می شوند. برای متغیر عملکرد دریچه گاز، مناطق عبارت اند از: منفی بزرگ (NL)، منفی متوسط (NM)، منفی کوچک (VS)، صفر (ZR)، مثبت کوچک (PS)، مثبت متوسط (PM) و مثبت بزرگ (PL) [۴۴]..... ۶۲
- شکل ۳-۳ مکان های متصل شده توسط یک AND با در نظر گرفتن درجه عضویت کوچک تر از این دو به عنوان مقدار ترکیب [بالا] ترکیب می شوند. برای ترکیب قوانین، آن ها را با هم یا با در نظر گرفتن بزرگ تر از دو مقدار به عنوان مقدار ترکیب در هر نقطه در محور افقی [پایین] [۴۴]..... ۶۳
- شکل ۳-۴ اکثر پروژه های موفق توسعه منطق فازی از یک چرخه توسعه تکراری مانند این پیروی می کنند. چهار مرحله اصلی در فرآیند طراحی را ارسال کرد [۴۴]..... ۶۶
- شکل ۳-۵ رابطه بین متغیرها، برچسب ها و مجموعه های فازی ساده اما مهم است. بدیهی است که نام برچسب ها باید منحصر به فرد باشد و از نظر معنایی با مفاهیمی که هر کدام نشان دهنده آن هستند مرتبط باشد [۴۴]..... ۶۷
- شکل ۳-۶ تعریف دما آب دریا به عنوان منطقه فازی در سیستم فازی..... ۷۱
- شکل ۳-۷ تعریف فشار بخار محرک به عنوان منطقه فازی در سیستم فازی..... ۷۱
- شکل ۴-۱ فلوچارت حل مدل ناپایا دستگاه آب شیرین کن چند اثره..... ۷۵
- شکل ۴-۲ اعتبارسنجی مدل ناپایا حاضر و مدل مقاله السید [۴۵]..... ۷۷
- شکل ۴-۳ تغییرات جریان بخار محرک به ترموکمپرسور..... ۷۹
- شکل ۴-۴ تغییرات جریان بخار مکش شده به ترموکمپرسور..... ۷۹

- شکل ۴-۵ تغییرات جریان بخار گرمایش افکت اول ۸۰
- شکل ۴-۶ تغییرات ارتفاع آب‌نمک در تمامی افکت‌ها در حالت خاموش و روشن ۸۲
- شکل ۴-۷ تغییرات دمای بخار در تمامی افکت‌ها در حالت روشن و خاموش ۸۲
- شکل ۴-۸ تغییرات غلظت نمک آب دریا در تمامی افکت‌ها ۸۳
- شکل ۴-۹ تغییرات دبی بخار خروجی از تمامی افکت‌ها ۸۳
- شکل ۴-۱۰ تغییرات دبی آب‌نمک خروجی از تمامی افکت‌ها ۸۴
- شکل ۴-۱۱ تغییرات دمای تغذیه ورودی به افکت‌ها ۸۴
- شکل ۴-۱۲ نسبت خروجی به دست‌آمده سیستم ۸۵
- شکل ۴-۱۳ تغییرات ارتفاع مایع کندانس شده ۸۶
- شکل ۴-۱۴ تغییرات دما آب دریا ۸۸
- شکل ۴-۱۵ اثر کنترل‌کننده فازی در تغییرات دما آب دریا ۸۹
- شکل ۴-۱۶ تغییرات فشار بخار محرک ۹۱
- شکل ۴-۱۷ اثر کنترل‌کننده فازی در تغییرات فشار بخار محرک ۹۲
- شکل ۴-۱۸ تغییرات فشار بخار محرک و دما آب دریا به‌طور هم‌زمان ۹۴
- شکل ۴-۱۹ اثر کنترل‌کننده فازی در تغییرات فشار بخار محرک و دما آب دریا به‌طور هم‌زمان ۹۶

فهرست علائم

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

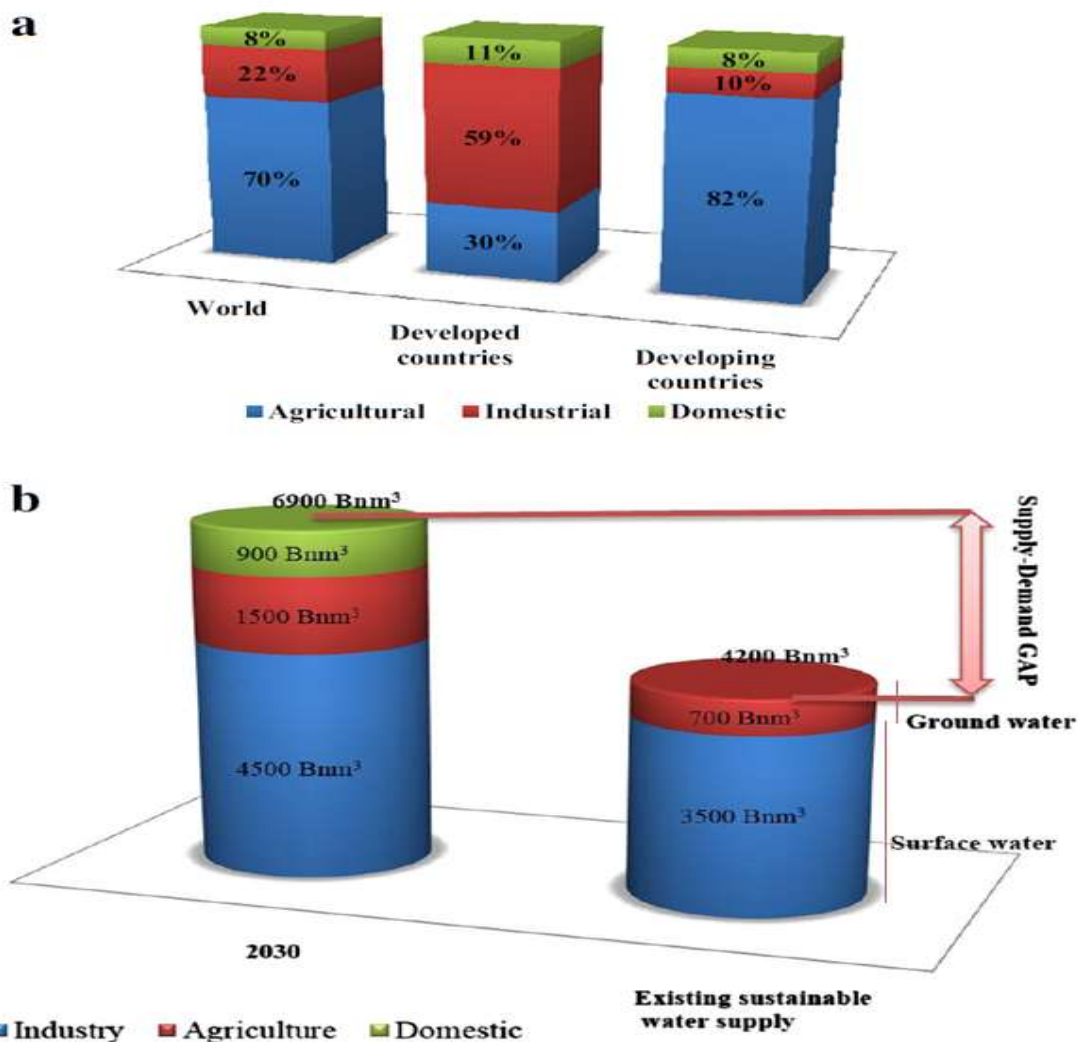
فصل ۱: مقدمه

۱-۱ مقدمه

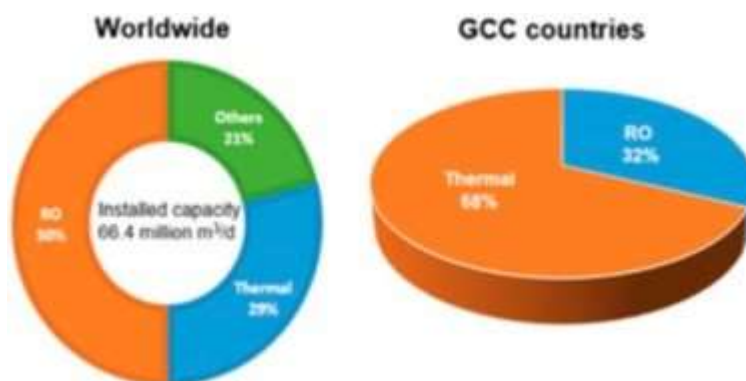
در این فصل مسئله موردنظر تشریح شده و هدف پروژه در آن تبیین می‌گردد. به این منظور در ابتدا ضرورت شیرین سازی آب بیان شده و انواع فرایندهای شیرین سازی به صورت اجمالی توضیح داده می‌شود تا با روش نمک‌زدایی چند اثره مقایسه شود، سپس دستگاه نمک‌زدایی به روش چند اثره به همراه ترموکمپرسور معرفی و نحوه‌ی عملکرد آن بیان می‌گردد. در ادامه تاریخچه نمک‌زدایی به روش چند اثره به همراه ترموکمپرسور، مطالعات عددی، مدل‌سازی‌های تئوری و تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملکرد ناپایا این دستگاه نیز موردبررسی قرار گرفته است. در انتها نیز هدف و تلاش‌های صورت گرفته در این پژوهش شرح داده شده است.

۱-۲ ضرورت شیرین سازی آب

استفاده از آب پاک به سه دلیل عمده استفاده مسکونی، صنعتی و کشاورزی صورت می‌پذیرد. استفاده مسکونی شامل استفاده خانگی، شهری و آبی در سرویس‌های عمومی و مؤسسات تجاری، استفاده صنعتی شامل استفاده کارخانه‌های مختلف و به‌ویژه برای خنک کردن نیروگاه‌ها و کارخانه‌ها و استفاده کشاورزی نیز شامل آبیاری و دام‌پروری است. استفاده از منابع آب پاک، کشور به کشور متفاوت، به‌طور مثال در کشورهای کم‌درآمد، حدود ۸۰ درصد آب پاک در کشاورزی، ۱۰ درصد در صنعت و ۸ درصد جهت مصارف خانگی اما در کشورهای پردرآمد حدود ۵۹ درصد آب پاک در صنعت، ۳۰ درصد در کشاورزی و ۱۱ درصد جهت مصارف خانگی است. همان‌طور که در شکل ۱-۱ مشخص شده است، منابع آب موجود در سال ۲۰۳۰ کفاف نیاز آب شیرین موردنیاز جهانی را نخواهد داد [۱]. اکثر کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران با مشکلات ناشی از کمبود آب مطلوب مواجه هستند. در نتیجه این کشورها درصدد تأمین منابع آب به میزان بالا هستند.



شکل ۱-۱ درصد نوع مصرف آب در جهان، کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه (b) منابع آب شیرین موجود و مورد نیاز در سال ۲۰۳۰ [۱]



شکل ۲-۱ میزان استفاده از آب شیرین کن های حرارتی و اسمز معکوس به نسبت مابقی روش ها در جهان و کشورهای حوزه خلیج فارس [۲]

شیرین سازی آب دریا تبدیل به عنوان یک منبع عظیم برای تولید آب شیرین جهت مصارف کشاورزی، صنعتی و خانگی در بسیاری از مناطق جهان از جمله کشورهای حاشیه خلیج فارس در نظر گرفته شده است. شکل ۱-۲ میزان استفاده از دستگاه های آب شیرین کن حرارتی (پاشش انفجاری چندمرحله ای^۱، نمک زدایی چند اثره و ...) و برقی (اسمز معکوس^۲، ...) را در جهان و کشورهای حوزه خلیج فارس^۳ نشان می دهد [۲].

انجمن بین المللی آب شیرین کن ها در ویرایش سال ۲۰۰۱ کتاب "فهرست واحدهای آب شیرین کن دنیا" نشان داد که از مجموع ظرفیت ۳۰ میلیون مترمکعب در روز واحدهای نصب شده، ۱۸ میلیون مترمکعب در روز از آب دریا استفاده می کنند. با توجه به موارد ذکر شده اهمیت تولید آب شیرین غیرقابل انکار است. طی سال های اخیر، هزینه تولید آب شیرین به وسیله دستگاه های نمک زدایی تا حد قابل توجهی کاهش یافته، اما هزینه تولید آب شیرین به کمک آنچه ما روش های سنتی می نامیم، افزایش پیدا کرده است. این افزایش قیمت به دلیل بهره برداری بیش از حد از منابع زیرزمینی آب، نفوذ نمک و افزایش آلودگی آب به وجود آمده است. منابع آب شیرین حاصل از رودخانه ها و منابع آب زیرزمینی محدود است و با سرعت فزاینده ای در حال تهی شدن است و زنگ خطر را در بسیاری از مناطق جهان به صدا درآورده است. از این رو از فرآیندهای شیرین سازی آب دریا جهت تأمین آب شیرین مورد نیاز استفاده می شود.

۱-۳ فرآیندهای شیرین سازی آب

فرآیندهای شیرین سازی فرآیندهایی به منظور خالص سازی آب دریا برای مصارف آشامیدنی است، یک سیستم آب شیرین کن به طور کلی آب شور را به دو جریان تقسیم می کند، یکی جریان آب شیرین همراه با درصد به سیار کمی از نمک، املاح و دیگری جریانی که حاوی نمک و املاح باقیمانده است. جداسازی نمک از مخلوط آب نمک، یک فرآیند ترمودینامیکی است که نیاز به انرژی دارد. در روند معمول نمک زدایی با مصرف انرژی، آب

¹ Multi Stage Flash (MSF)

² Reverse Osmosis (RO)

³ Gulf Cooperation Council countries (GCC)

خالص از آب شور جدا می‌شود؛ یعنی آب شور وارد سیستم تصفیه شده و با صرف انرژی طی روند نمک زدایی، آب خالص جدا شده و پساب شور از سمت دیگر خارج می‌گردد.

فناوری‌های تصفیه آب از لحاظ تغییر فاز به دودسته تقسیم می‌شوند [۳]:

۱- فرآیندهایی که در آن‌ها تغییر فاز صورت می‌گیرد:

- نمک زدایی چند اثره

- پاشش انفجاری چند مرحله‌ای

- رطوبت گیری - رطوبت زدایی^۱

۲- فرآیندهایی که در آن‌ها شیرین سازی آب بدون تغییر فاز انجام می‌پذیرد:

- اسمز معکوس

- الکترو دیالیز^۲

کارایی هر کدام از این فرآیندها بستگی به غلظت نمک در آب تغذیه و همچنین ارزش هزینه آب دارد. هریک از فناوری‌های آب شیرین کن برای انجام فرآیند جداسازی به انرژی احتیاج دارند که این انرژی می‌تواند از طریق انرژی گرمایی، مکانیکی یا الکتریکی تأمین شود.

پنج فناوری عمده به منظور زدودن نمک و دیگر مواد جامد غیر قابل حل از آب وجود دارد که عبارت‌اند از:

۱- تقطیر ۲- اسمز معکوس ۳- الکترو دیالیز ۴- تبادل یونی ۵- نمک زدایی انجمادی

تقطیر و انجماد شامل خارج ساختن آب خالص، به صورت بخار آب و یا یخ، از آب شور است. در فناوری‌های الکترو دیالیز و اسمز معکوس یک غشا بسیار ظریف باعث جداسازی نمک‌ها و املاح سبک تر و مطلوب تر در طی عبور آب از یک محفظه شیمیایی است. بعضی از فناوری‌های آب شیرین کن علاوه بر جداسازی و خارج سازی

¹ Humidification-Dehumidification (HDH)

² Electro Dialysis (ED)

نمک‌ها و دیگر مواد جامد غیرقابل حل در آب، مواد معلق، مواد آلی، بعضی از باکتری‌ها و ویروس‌ها را نیز از آب خارج می‌سازد. این فناوری‌ها به‌منظور استفاده در مقیاس‌های بالا پیشرفت کرده و تکامل یافته‌اند و حجم بسیار بالایی از آب را تصفیه می‌نمایند. ولی بعضی از آن‌ها در حجم‌های بسیار پایین و در حد مصارف خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

اکثر راه‌های معمول نمک‌زدایی آب، شامل فرآیندهای جوشش و تبخیر است. در یک دستگاه تقطیر، آب می‌تواند به جوش آید و بخار تولید نماید که از چگالش این بخار آب خالص تولید می‌گردد. بعضی از دستگاه‌های تقطیر را می‌توان به هم متصل نمود و دستگاهی با کارایی بالا ایجاد کرد. فرآیند تبخیر مولکول‌های آب می‌تواند به‌وسیله گرم کردن آب‌شور تا دمای جوش آن و یا کم کردن فشار بخار بالای آب‌شور سرعت بیشتری یابد. به‌منظور بالا بردن کارایی فرآیند تقطیر، گرمای ایجاد شده از مرحله چگالش را برای پیش‌گرم کردن آب تغذیه مورد استفاده قرار می‌دهند و یا برای دوباره گرم کردن آب‌شور تبخیر نشده استفاده می‌کنند.

۱-۳-۱ شیرین کردن آب دریا به روش تقطیر

اکثر راه‌های معمول نمک‌زدایی آب شامل فرآیندهای جوشش و تبخیر است، در یک دستگاه تقطیر آب به جوش می‌آید و بخار تشکیل می‌شود که از چگالش این بخار آب خالص تولید می‌شود. بعضی از دستگاه‌های تقطیر را می‌توان به هم متصل نمود و دستگاهی با کارایی بالا ایجاد کرد. فرآیند تبخیر مولکول‌های آب می‌تواند به‌وسیله گرم کردن آب‌شور تا دمای جوش آن و یا کم کردن فشار بخار بالای آب‌شور سرعت بیشتری یابد. به‌منظور بالا بردن کارایی فرآیند تقطیر، گرمای ایجاد شده از مرحله چگالش را برای پیش‌گرم کردن آب تغذیه مورد استفاده قرار می‌دهند و یا برای دوباره گرم کردن آب‌شور تبخیر نشده استفاده می‌کنند.

تقطیر آب هنوز بهترین و مرسوم‌ترین روش شیرین سازی آب دریا است. در این فرآیند از تبخیر آب‌شور و چگالش آب، به آب خالص می‌رسیم، با این فناوری غشا به خاطر اطمینان بیشتر و مصرف انرژی کمتر به‌طور

گسترده‌ای طی ۱۰ سال اخیر گسترش یافته است. فرآیندهای خالص‌سازی آب به روش تقطیر نسبت به فرآیندهای غشایی دارای کیفیت بالاتری هستند. فرآیندهای تقطیر هنوز سهم بزرگی در صنعت شیرین کردن آب دریا دارند. روشی به صرفه است که بخار با انرژی حرارتی پایین به عنوان منبع اصلی انرژی در دسترس باشد، بنابراین روش‌های حرارتی در کشورهایی که اتصال به ایستگاه‌های قدرت ممکن نیست، کمتر استفاده می‌شود. از طرف دیگر بزرگ‌ترین دستگاه‌های آب شیرین در کشورهای شبه جزیره عرب و یا جاهایی که تولید هم‌زمان توان و آب دارند، بر پایه تقطیر است. دلایلی که هنوز روش تقطیر بهترین انتخاب برای شیرین سازی آب دریا به خصوص در ایستگاه‌های قدرت است به شرح زیر است:

۱. فرآیندهای تقطیر آب با کیفیت بالا تولید می‌کنند با باقیمانده نمک ۲ ppm و به شوری آب دریا بستگی ندارند در صورتی که فرآیندهای غشایی کاملاً به ذرات جامد حل شده و ترکیب آب دریا بستگی دارند و آب با کیفیت پایین تر تولید می‌کنند.

۲. انرژی مصرفی در واحدهای تقطیر آب دریا، حرارت ورودی به وسیله بخار و سطح حرارتی پایین است که معمولاً به ارزانی در ایستگاه‌های توان حرارت و در خروجی توربین‌های بخار قابل دسترس است.

۳. شیرین سازی به روش تقطیر نسبت به نوع غشایی کمتر به کیفیت آب دریا حساسیت دارند در حالی که پیش تصفیه آب دریا در مورد نوع غشایی حتماً باید صورت گیرد.

۴. هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری با وجود یک نیروگاه حرارتی، به طور عمومی برای تقطیر پایین تر از واحدهای غشایی است.

سه شاخه اصلی تقطیر آب دریا به شرح زیر است:

۱- تقطیر به کمک چند مرحله انبساط ناگهانی

۲- تقطیر چند مرحله‌ای به کمک کاهش فشار در هر مرحله

۳- تقطیر (سطحی) به وسیله رطوبت زایی و رطوبت زدایی

۱-۳-۱-۱ فرآیند پاشش انفجاری چندمرحله‌ای

در فرآیند پاشش انفجاری چندمرحله‌ای در داخل محفظه‌هایی به نام گرم‌کن، محلول آب‌شور دریا گرم می‌شود. این کار عمدتاً از طریق چگالیده شدن بخار روی تعدادی از لوله‌های فرآیند پاشش انفجاری چندمرحله‌ای موازی که از داخل محفظه عبور کرده و درعین حال آب دریا را گرم می‌کنند، انجام می‌شود؛ که می‌توان برای گرم کردن آب ورودی از سیستم آب گرم‌کن‌های خورشیدی استفاده شود. آب گرم شده دریا سپس به داخل محفظه‌ی دیگری که (مرحله اواپراتور) تبخیرکننده نامیده می‌شود، جریان یافته و در آنجا غشاء در حدی تنظیم می‌گردد که آب بلافاصله به جوش می‌آید، تغذیه ناگهانی آب گرم به داخل اتاقک باعث به جوش آمدن سریع آن می‌گردد. درواقع آب به‌صورت پاشش انفجاری به بخار تبدیل می‌گردد. این تبدیل به فشار کنترل‌شده در این مرحله بستگی دارد، زیرا فرآیند جوشش تا زمانی ادامه می‌یابد که آب سرد شود. مفهوم تقطیر آب به کمک ظرفی که تحت فشار کاهش داده‌شده، کار می‌کند یک ابداع جدید نیست، بلکه بیش از یک قرن است که کاربرد دارد. در دهه ۱۹۵۰، دستگاهی که از یک سری طبقات^۱ با شیب فزاینده فشارهای اتمسفری پایین‌تر تشکیل می‌شد، ابداع گردید. در این دستگاه، آب تغذیه می‌توانست از یک مرحله به مرحله دیگر راه‌یافته به‌طور مکرر و بدون افزودن حرارت به حالت جوش برسد.

معمولاً یک مجموعه آب‌شیرین‌کن پاشش انفجاری چندمرحله‌ای می‌تواند ۴ تا ۴۰ مرحله داشته باشد. بخار تولیدشده از طریق فرآیند پاشش انفجاری پس از چگالیدن روی لوله‌های مبدل حرارتی که در طول هر مرحله تعبیه شده‌اند، به آب شیرین تبدیل می‌گردد. لوله‌ها به‌وسیله آب تغذیه ورودی که به گرم‌کن آب‌شور می‌رود خنک می‌شود. با این کار آب تغذیه به‌نوبه خود گرم می‌شود، به‌نحوی که مقدار انرژی حرارتی موردنیاز در گرم‌کن آب‌شور جهت افزایش دمای آب دریا کاهش می‌یابد. از دهه ۱۹۵۰ دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن‌های پاشش انفجاری چندمرحله‌ای به‌طور تجاری ساخته شدند. این دستگاه‌ها عموماً به‌صورت واحدهایی با حدود ۵۰۰۰۰ تا

¹ Stage

۶۰۰۰ مترمکعب در روز ساخته می‌شود معمولاً با حداکثر دمای تغذیه ۹۰ تا ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد (پس از گرم کردن آب‌شور) عمل می‌کند. یکی از عواملی که بر روی راندمان حرارتی واحد تأثیر دارد و اختلاف بین دما از گرم‌کن آب‌شور تا چگالنده در انتهای سرد دستگاه است.

در دستگاه‌های پاشش انفجاری چندمرحله‌ای، ۵۰ تا ۷۵ درصد آب‌شور غلیظ شده از آخرین مرحله به آب تغذیه ورودی مخلوط می‌شود و به‌واسطه این فرآیند بازیافت حرارتی افزایش و مقدار مواد لازم برای تصفیه مقدماتی کاهش می‌یابد. متأسفانه این عمل به سبب افزایش غلظت نمک در چرخه آب‌شور، میزان خوردگی و تشکیل رسوب را افزایش می‌دهد و به همین دلیل کنترل رسوب باید با دقت بیشتری صورت گیرد.

افزایش تعداد مراحل فرآیند پاشش انفجاری چندمرحله‌ای بازده کلی در بخش بازیافت حرارت را افزایش می‌دهد و البته در آن صورت هزینه سرمایه‌گذاری نیز افزایش خواهد یافت. در این روش از گرمای محسوس برای گرمای نهان تبخیر در هر بخش استفاده می‌شود. فرآیند پاشش انفجاری چندمرحله‌ای این روزها مهم‌ترین نقش را در تقطیر آب دریا دارد، ولی اخیراً فرآیند نمک‌زدایی چند اثره با اواپراتور اسپری فیلم نازک به‌جای نوع لوله‌های غوطه‌ور به همراه کمپرسور حرارتی یا مکانیکی بخار پیشرفت چشمگیری یافته است و باعث کاهش تشکیل رسوب و بهبود عملکرد ترمودینامیکی شده است.

۱-۳-۲ فرآیند نمک‌زدایی چند اثره

فرآیند نمک‌زدایی چند اثره مدت زیادی است که در تقطیر صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از کاربردهای معمول این فرآیند، تبخیر شیره از نیشکر در تولید نمک با استفاده از پدیده تبخیر می‌باشند. فرآیند تقطیر چندمرحله‌ای اولین فرآیندی است که برای تولید مقادیر قابل توجهی آب شیرین از آب دریا و در مقیاس تجاری به‌کاررفته شده است. در ۲۵ سال گذشته این فرآیند از لحاظ فنی پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. درحالی‌که حاضر ۵٪ ظرفیت تولید آب شیرین در جهان به این به این روش اختصاص دارد. فرآیند این دستگاه

آب شیرین کن بر پایه سیستم نمک زدایی تقطیری به روش چندمرحله‌ای به همراه چرخش بخار است. هر واحد آب شیرین کن از چندین افکت (مرحله) و یک کندانسور تشکیل شده است. افکت‌ها مبدل‌های پوسته-لوله‌ای با آرایش افقی یا عمودی است و یا ممکن است از مبدل صفحه‌ای استفاده شود.

اساس کار واحدهای نمک زدایی چند اثره بدین صورت است که ابتدا بخار خروجی از نیروگاه‌های بخار و یا بخاری که به واسطه سوزاندن زغال سنگ و یا سوخت‌های فسیلی دیگر حاصل شده است وارد اولین مرحله می‌شود. برای بخار کردن آب دریا در اولین افکت می‌توان از آب گرم‌کن‌های خورشیدی استفاده کرد. این بخار از دما و فشار پایینی برخوردار است و از آن به عنوان بخار اولیه نام برده می‌شود. هنگامی که آب تغذیه به اولین مرحله وارد می‌شود، بر روی لوله‌های اواپراتور که در آن‌ها بخار اولیه جریان دارد پاشیده شده و بدین ترتیب بخشی از آب تغذیه تبخیر وارد مرحله دوم می‌گردد. از این بخار به عنوان بخار ثانویه نام برده می‌شود. بخار اولیه درون لوله‌های اواپراتور نیز بر اثر از دست دادن حرارت خود چگالش یافته و به درون بویلر برگشت داده می‌شود. همچنین آب شور موجود در مرحله اول به وسیله یک پمپ به مرحله دوم وارد شده و بخار ثانویه نیز که از تبخیر آب تغذیه حاصل شده بود در مرحله دوم با انتقال گرمای نهان خود به آب شور چگالش یافته و بخشی از آب شور را تبخیر می‌کند و تمام فرآیند فوق به تعداد مراحل که وجود دارد تکرار می‌گردد و بدین ترتیب بخار چگالش یافته از مرحله دوم به بعد به عنوان آب شیرین جمع‌آوری شده و تصفیه نهایی (برای رساندن PH آب به سطح قابل قبول) بر روی آن صورت می‌گیرد.

حداقل تعداد مراحل طراحی شده برای انجام یک فرآیند نمک زدایی چند اثره به دمای آب تغذیه وابسته است. بدین ترتیب که هرچه دمای آب تغذیه بیشتر و اختلاف آن با دمای جوش آب کمتر باشد تعداد مراحل انجام فرآیند هم می‌تواند کمتر شود افزایش تعداد مراحل سبب می‌شود که نسبت آب شیرین تولیدی به بخار مصرفی آن بازده حرارتی طرح نیز افزایش یابد. البته در صورتی که افزایش تعداد مراحل، هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نیز باید افزایش پیدا کند.

شکل ۱-۳ انواع نمک‌زدایی چند اثره برحسب نوع تغذیه آب ورودی را نشان می‌دهد [۴]. در سیستم تغذیه آب از افکت آخر^۱، آب تغذیه از افکت آخر وارد شده و سپس آب‌نمک باقی‌مانده به افکت ماقبل آخر وارد می‌شود. این فرایند تکرار می‌شود تا غلیظ‌ترین آب‌نمک به افکت آخر برسد. این سیستم نیاز به توان پمپاژ بالایی دارد چراکه آب‌نمک به مرحله با فشار بالاتر پمپ می‌شود. در سیستم تغذیه آب از افکت اول^۲، آب از افکت اول وارد شده و آب‌نمک این افکت تغذیه افکت بعد خواهد بود. این سیستم می‌تواند در آب‌نمک دمابالا کار کند چراکه گرم‌ترین آب‌نمک در افکت اول، کمترین غلظت نمک را دارد. در سیستم تغذیه موازی^۳، هر مرحله به‌صورت جداگانه و موازی تغذیه‌شده و خروجی آب‌نمک هرکدام به بیرون منتقل می‌شود. این سیستم کنترل ساده‌تری بر روی میزان تغلیظ آب دارد. سیستم تغذیه موازی متوالی^۴، مانند سیستم تغذیه موازی کار می‌کند اما برای بازیافت حرارتی، آب‌نمک از هر مرحله به مرحله بعد وارد می‌شود و نهایتاً کل آب‌نمک از مرحله آخر خارج می‌شود. سیستم تغذیه موازی متوالی با کمپرسور بخار حرارتی^۵ مانند سیستم موازی متوالی است، با این تفاوت که قسمتی از بخار تولیدشده در مرحله آخر به‌وسیله بخار فشار بالایی که برای گرمایش افکت اول است، توسط اجکتور مکیده می‌شود و با این کار بازیافت حرارتی افزایش یافته و به بخار گرمایش کمتری نیاز است. این شیوه متداول‌ترین روش در شیرین‌سازی آب شور است.

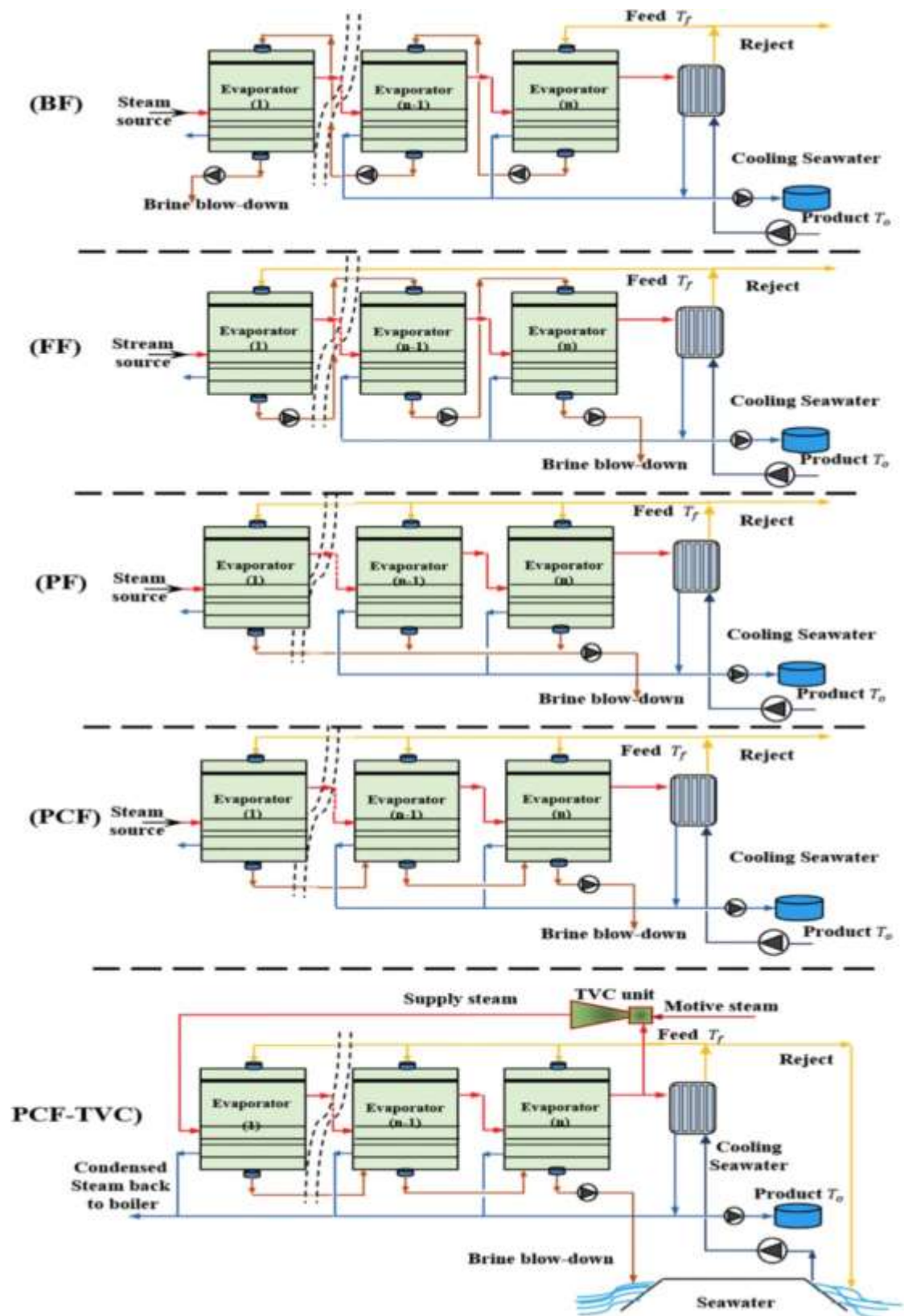
¹ Backward Feed (BF)

² Forward Feed (FF)

³ Parallel Feed (PF)

⁴ Parallel Cross Feed (PC)

⁵ Parallel Cross Feed-Thermal Vapor Compressor (PCF-TVC)



شکل ۱-۳ پیکربندی‌های مختلف MED برای انواع حالت‌های آب تغذیه [۴]

۱-۳-۱ فرایند رطوبت گیر و رطوبت زدا

یک سیستم آب شیرین کن رطوبت گیر و رطوبت زدا از سه زیرمجموعه زیر تشکیل شده است:

۱. گرم کن (خورشیدی، الکتریکی و ...) جهت گرمایش آب و یا هوا

۲. محفظه رطوبت زا و یا تبخیرکننده

۳. محفظه رطوبت گیر و یا چگالنده

با توجه به چینش این اجزا و گرمایش هر یک از جریان‌ها، آب شیرین کن‌ها به دسته‌بندی‌های مختلفی تقسیم می‌شوند.

آب شیرین کن رطوبت گیر و رطوبت زدا به انواع مختلفی دسته‌بندی می‌شود که از نقطه نظر باز و یا بسته بودن سیستم به چهار دسته عمده تقسیم می‌شوند آب بسته - هوا باز، آب باز - هوا بسته، آب باز - هوا باز و نهایتاً آب بسته - هوا بسته. همچنین این دستگاه‌ها از نقطه نظر گرمایش به دودسته گرمایش آب یا گرمایش هوا تقسیم می‌شوند.

اساس کار در این دستگاه به صورت تبخیر سطحی است به همین دلیل مصرف انرژی پایینی دارد. بدین صورت که آب پیش گرم شده بر روی سطوحی که جریان هوا از زیر آن می‌وزد پاشیده شده و تبخیر صورت می‌گیرد و هوای مرطوب شده وارد محفظه رطوبت زدایی شده و بر روی لوله‌های آب سرد تقطیر اتفاق می‌افتد و آب سرد درون لوله پیش گرم می‌شود. حال بسته به نوع سیستم ممکن است آب و یا هوا را با کمک گرم کن حرارت دهند تا انرژی مورد نیاز سیستم تأمین شود.

۱-۳-۲ اسمز معکوس

فرآیند غشایی به شیوه‌های فیزیکی برای جداسازی حلال از نمک‌های محلول در آن با استفاده از غشاهای نیمه‌تراوا اطلاق می‌شود. این فرآیندها در سال‌های اخیر پیشرفت‌های زیادی داشته است. سابقه استفاده از غشا برای صاف کردن به اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد. در دهه سوم قرن بیستم غشاها برای جداسازی، خالص‌سازی و یا غلیظ سازی محلول‌ها به‌ویژه سیال‌های حاوی میکرواورگانیزم‌ها مورد استفاده قرار گرفت. سیر تکاملی این پدیده با انجام پژوهش‌ها بر روی ساخت انواع غشاها و شناخت فرآیند در طی زمان به‌گونه‌ای ادامه یافت که در حال حاضر این فرآیند یکی از شیوه‌های اصلی شیرین سازی آب محسوب می‌شود. فرآیندهای غشایی بر اساس اندازه کوچک‌ترین ذره که تحت تأثیر نیروی فشاری از غشا عبور می‌کند به نام‌های زیر نامیده می‌شوند:

الف) میکرو فیلتراسیون^۱

ب) اولترا فیلتراسیون^۲

پ) نانو فیلتراسیون^۳

ت) اسمز معکوس

۱-۳-۳ الکترودیالیز

فرآیند الکترودیالیز به‌صورت تجاری از اوایل دهه ۶۰ یعنی حدود ۱۰ سال قبل از فرآیند اسمز معکوس به بازار عرضه شد. طراحی و ساخت سیستم الکترودیالیز راه مؤثری برای کاهش هزینه در فرآیند نمک‌زدایی آب‌های کم‌نمک ابداع کرد و در این زمینه موفقیت فراوانی به دست آورد. فرآیند الکترودیالیز به اصول کلی زیر بستگی دارد:

¹ Micro Filtration

² Ultra Filtration

³ Nano Filtration

۱- اکثر نمک‌های محلول در آب، به شکل یون بوده و به‌صورت مثبت (کاتیون) یا منفی (آنیون) باردار می‌گردند.

۲- آنیون‌ها به‌وسیله بار الکتریکی مخالف الکتروود، جذب آنان می‌شود.

۳- غشاءها را می‌توان طوری ساخت که به‌صورت انتخاب‌شده عبور آنیون‌ها یا کاتیون‌ها را امکان‌پذیر کنند.

اجزاء محلول شده یونی در یک محلول نمکی مثل سدیم +، کلر -، کلسیم ++ و کربنات -- در آب توزیع و بخش می‌گردند و به‌طور مؤثر بارهای منفرد خود را خنثی می‌کنند. وقتی الکتروودها به یک منبع جریان مستقیم مثل باطری متصل می‌گردند، در داخل یک ظرف حاوی محلول آب‌نمک قرارگرفته، جریان الکتریکی از میان محلول (الکترولیت) عبور می‌کند. در این حالت یون‌ها سعی می‌کنند به سمت الکتروود با بار مخالف حرکت کنند.

۱-۴ تاریخچه مطالعات بررسی عددی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با

ترمومکمپرسور

مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرایند آب‌شیرین‌کن 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 ازجمله راه‌اندازی و خاموش کردن و اثرات اغتشاشات بسیار مفید خواهد بود. مقالات زیادی در زمینه مدل‌سازی در حالت‌پایا وجود دارد اما در حالت گذرا به خاطر پیچیدگی معادلات به‌دست‌آمده مطالعات بسیار محدود بوده است. مهم‌ترین مطالعات صورت گرفته در زمینه حالت پایا و ناپایا آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترمومکمپرسور را می‌توان در زیر مشاهده کرد.

۱-۴-۱ حالت پایا

ال دسوکي و اتوني در سال ۲۰۰۲ [۵] از اولین کسانی بودند که مجموعه کاملی از مدل‌ها را برای فرآیند تقطیر چند اثره ارائه دادند. آن‌ها یک مدل ریاضی حالت پایا ساده را برای طراحی و تجزیه و تحلیل نیروگاه تقطیر چند اثره در حالت تغذیه روبه‌جلو، به‌استثنای فلش باکس‌ها^۱ و پیش گرم‌کن‌ها ارائه دادند. که با تکرار دستی به‌سادگی قابل حل است. یک مدل دیگر حالت پایا با جزئیات بیشتر توسط همان نویسندگان برای نیروگاه تقطیر چند اثره با شکل‌های مختلف تغذیه ورودی ارائه شده است: تغذیه روبه‌جلو، تغذیه موازی^۲ و تغذیه موازی/ضربدری^۳ در این مدل‌ها ناحیه انتقال حرارت اواپراتورها و پیش گرم‌کن‌ها ثابت فرض شده است، تلفات ترمودینامیکی متغیر و خصوصیات ترموفیزیکی آب دریا را با دما و شوری در نظر گرفتند و حضور گاز غیرقابل چگالش^۴ فقط برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در معادله گنجانده شد، درحالی‌که حضور گاز غیرقابل چگالش در بالانس جرم و معادلات انتقال در نظر گرفته نشده است.

آلی و ال فیقی در سال ۲۰۰۳ [۶] یک مدل ریاضی حالت پایا را برای تجزیه و تحلیل دستگاه‌های نمک‌زدایی چندمرحله‌ای^۵ و چند اثره ایجاد نمودند. این مدل هندسه مراحل، مکانیسم انتقال حرارت و تغییر خصوصیات فیزیکی آب دریا با دما و شوری را در برمی‌گیرد. علاوه بر این مدل نقش رسوب‌گذاری و تأثیر آن بر نسبت عملکرد یک دستگاه را در نظر می‌گیرد. نتایج به‌دست‌آمده از این مدل با داده‌های نیروگاه سید کریر^۶ در غرب اسکندریه^۷ مقایسه شده است و توافق خوبی بین نتایج محاسبه‌شده و داده‌های نیروگاه وجود دارد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که نسبت عملکرد کاملاً به تعداد اثرات وابسته است، و کمی به دمای بالای نمک بستگی دارد.

¹ Flash Box

² Parallel Feed (PF)

³ Parallel/Cross Feed (PCF)

⁴ Non-Condense Gas (NCG)

⁵ Multi Stage Flash (MSF)

⁶ Sidi Krir

⁷ Alexandria

درویش و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۷] یک مدل حالت پایا برای تقطیر چند اثره با ساختار تغذیه روبه‌جلو^۱ ارائه نمودند. آن‌ها با ساده‌سازی‌های قوی مانند برابر قراردادن دبی بخار تولیدشده در هر افکت و اختلاف دمای ثابت بین افکت‌ها یک مدل ریاضی برای آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره دمپایین^۲ ارائه نمودند. هدف از این کار این بود که انرژی گرمایی ورودی به آب‌شیرین‌کن چند اثره دمپایین کم است و می‌تواند انرژی مکانیکی معادل آن و در نتیجه انرژی سوخت مصرفی را به مقادیر کم نزدیک به مقدار سیستم آب‌شیرین‌کن اسمز معکوس^۳ برساند.

میستری و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۸] یک مدل حالت پایا برای یک واحد تقطیر چند اثره با ساختار تغذیه روبه‌جلو ارائه دادند. که نتایج آن با کارهای قبلی توسط تجزیه و تحلیل پارامتری نسبت عملکرد^۴ و مساحت مخصوص^۵ به عنوان تابعی از تعداد افکت‌ها، دمای بخار گرمایش و نسبت بازیابی مقایسه شده بودند. و نتیجه حاصل شده بدین صورت بود که به یک مدل دقیق نیاز است تا به درستی حساسیت پارامترهای مربوط به تجزیه و تحلیل سیستم تولید هم‌زمان را به تصویر بکشد. مدل MED باید به تغییرات در شرایط طراحی (تعداد اثرات، تفاوت دمای انتهایی و غیره)، شرایط ورودی (دمای خوراک، شوری، سرعت جریان، دمای بخار و غیره) و شرایط عملیاتی (نسبت بازیابی، آخرین اثر) پاسخ دهد.

دروتا و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ [۹] به تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی یک سیستم تبخیر چند اثره^۶ با استفاده از یک مدل حالت پایا بر اساس بالانس‌های جرم و انرژی و تلفات ترمودینامیکی ناچیز، پرداختند. ساختار مدل به گونه‌ای است که باید به‌طور هم‌زمان برای تعیین بهترین الگوهای جریان، اندازه هر افکت تبخیر و شرایط عملیاتی کل فرآیند بهینه شود. نتایج شبیه‌سازی این مدل توافق خوبی را با داده‌های طراحی واقعی و

¹ Forward Feed Multi Effect Distillation (FF-MED)

² Low Temperature Multi Effect

³ Reverse osmosis (RO)

⁴ Performance Ratio (PR)

⁵ Specific Area (SA)

⁶ Multi-Effect Evaporation

نتایج دیگر نویسندگان نشان داده است. علاوه بر این، نتایج بهینه‌سازی نشان داد که تغییر الگوهای جریان عملکرد فرآیند را بهبود می‌بخشد.

پالزنوئلا و همکاران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ [۱۰، ۱۱] یک مدل حالت پایا را بر اساس یک نیروگاه خورشیدی تقطیر چند اثره با ساختار تغذیه روبه‌جلو که با آرایش عمودی قرار گرفته شده است با استفاده از تعدادی فرضیات ساده ایجاد نمودند. این مدل با در نظر گرفتن همان طراحی و ویژگی‌های عملیاتی نیروگاه خورشیدی آلمریا^۱ واقع در جنوب شرقی اسپانیا توسعه یافته است. این نیروگاه یک توزیع تقطیر ویژه‌ای را برای بهینه‌سازی بازیابی انرژی در نظر گرفته است. مدل آن‌ها که با داده‌های تجربی مقایسه شد، با خطای کمتر از ۹ درصد تأیید اعتبار گردید. همچنین آن‌ها با انجام یک آزمایش جامع در دستگاه آزمایشی، روابط تجربی را برای ضرایب کلی انتقال حرارت در اولین افکت و پیش گرم‌کن‌ها را به دست آوردند.

با توجه به ترکیب تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور، چندین نویسنده مدل‌هایی را برای آب‌شیرین‌کن‌های تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور ارائه داده‌اند، با تفاوت‌های اصلی در مدل‌سازی ترموکمپرسور که در ادامه به ارائه‌ی تعدادی از آن‌ها می‌پردازیم:

ال دسوکی و همکاران در سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ [۱۲، ۱۳] عملکرد آب‌شیرین‌کن تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور را در حالت تغذیه موازی و تغذیه متقاطع موازی با استفاده از یک مدل نیمه تجربی با ترموکمپرسور مورد مطالعه قراردادند. که از داده‌های عملیاتی اجکتورهای بخار صنعتی جمع‌آوری شده توسط پاور [۱۴] به دست آمده است و به این نتیجه رسیدند که واحد نمک‌زدایی فشرده‌سازی بخار تک اثره در مقادیر متوسط دمای جوش، یعنی ۷۰ تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد و نسبت تراکم پایین، یعنی مقادیر نزدیک به ۲ کار کند. این برای داشتن نسبت‌های عملکرد نزدیک یا بالاتر از ۱،۵ ضروری است.

¹ Plataforma Solar de Almeria (PSA)

کمالی و محبی نیا در سال ۲۰۰۸ [۱۵] ترموکمپرسور را با استفاده از روش اجکتور مختلط فشارثابت و تئوری جریان تراکم پذیر [۱۶] مدل سازی کردند و به این نتیجه رسیدند که افزایش سطح انتقال حرارت کندانسور در آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور باعث کاهش دمای نزدیک دما و فشار داخل کندانسور می شود، مقدار GOR با توجه به کاهش دمای آب نمک بالا افزایش می یابد. و همچنین باعث می شود سیستم با طول عمر بالاتری همراه باشد.

عامری و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۷] رابطه های جدید را نیز با تطبیق نمودار ارائه شده توسط پاور [۱۴] پیاده سازی کردند. که می تواند دامنه اعتبار رابطه نیمه تجربی ارائه شده توسط ال دسوکی و همکاران [۱۳] را گسترش دهد. بنابراین اجازه می دهد تا برای فشار های بخار محرک بالا نیز استفاده شود.

تراستمن در سال ۲۰۰۹ [۱۸] به جای استفاده از سایر رویکردهای نظری، مدلی را با شروع از مشخصات طراحی اجکتور های بخار تولیدکنندگان مختلف ، توسعه داد. مدل با داده های واقعی از چندین دستگاه آب شیرین کن با دقت خوب نشان داده شده در محدوده مورد بررسی مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. و به این نتیجه رسید که مدل کمپرسور بخار حرارتی فعلی فقط برای محاسبات طراحی مناسب است. یک مدل پیشرفته باید ایجاد شود تا امکان محاسبه مناسب موارد خارج از طراحی را نیز فراهم کند.

بن عامر در سال ۲۰۰۹ [۱۹] یک مدل ریاضی حالت پایا برای آب شیرین کن تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور ایجاد کرد و مدل را با داده های سه کارخانه تجاری ، از جمله مدل موجود در تراپانی (سیسیل ، ایتالیا) تأیید کرد. آن ها همچنین به عنوان تابعی از تعداد اثرات ، بهینه سازی نسبت تولید^۱ را انجام دادند و فهمید که همراه بودن ترموکمپرسور می تواند به پیشرفت های بیشتر در تولید خروجی تقطیر کمک کند.

¹ Gain Output Ratio (GOR)

شکيب و همکاران در سال ۲۰۱۲ [۲۰] از منحنی‌های آزمایشی به‌دست‌آمده توسط پاور [۱۴] برای توصیف وابستگی نسبت مکش کمپرسورهای حرارتی به نسبت‌های تراکم و انبساط استفاده کردند و متوجه شدند که ترموکمپرسور بیشترین میزان تخریب انرژی را دارا است.

درویش و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۱] برای پیش‌بینی عملکرد کمپرسورهای حرارتی، منحنی‌های تجربی به‌دست‌آمده توسط پاور [۱۴] را تقریب زدند. آن‌ها منحنی‌ها را به نمودارهای مقیاس بندی دوباره ترسیم کرده و به معادلات تبدیل می‌کنند، که این امر اجرای منحنی‌ها را به هر مدل تسهیل می‌کند.

کاسمیرو و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۲۲] یک مدل ریاضی حالت پایا برای یک واحد تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور ایجاد کردند که با استفاده از داده‌های واقعی کارخانه تراپانی^۱ در سیسیل^۲ (ایتالیا) تأیید شد، و نشان‌دهنده تناسب مناسب بین پیش‌بینی‌ها و داده‌های عملیاتی واقعی بود.

اورتگا-دلگادو و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۲۳] با استفاده از معادلات بقای جرم و انرژی بر روی اجزای مختلف آب‌شیرین‌کن، یک مدل ریاضی حالت پایا برای آب‌شیرین‌کن‌های موازی / متقاطع تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور ارائه دادند. آن‌ها رابطه گسترده منتشرشده توسط حسن و درویش [۲۱] را برای ترموکمپرسور پیاده‌سازی کردند و مدل را با استفاده از پیکربندی تغذیه موازی نیروگاه تقطیر چند اثره همراه با ترموکمپرسور تراپانی کالیبره کردند. آن‌ها همچنین شامل محاسبه دقیق تلفات ترمودینامیکی در مدل و تجزیه و تحلیل موقعیت بهینه کمپرسور حرارتی برای به حداقل رساندن مساحت انتقال حرارت خاص و به حداکثر رساندن نسبت تولید است.

جواد پور و همکاران در سال ۱۳۹۶ [۲۴] یک مدل ریاضی بر اساس موازنه‌های جرم و انرژی اجزا سیستم توسعه دادند. براین اساس اثرات پارامترهای مهم سیستم همچون، تعداد مراحل، نسبت اختلاط اجکتور و فاکتور غلظت بر روی نسبت عملکرد سیستم موردبررسی قرار گرفته است. بر اساس این بررسی‌ها مشخص شد که برای

¹ Trapani plant

² Sicily

آب شیرین کن چندمرحله‌ای نیروگاه تریپولی [۲۵] با ظرفیت ۵۰۳۳ مترمکعب در روز، اگر تعداد افکت‌ها و غلظت آب ورودی به سیستم آب شیرین کن را افزایش دهیم در صورتیکه اجکتور دارای حداقل نسبت اختلاط باشد، بیشترین آب شیرین در روز حاصل می‌شود.

۱-۴-۲ حالت ناپایا

تونلی و همکاران در سال ۱۹۹۰ [۲۶] یک برنامه‌ی کامپیوتری را برای پیش‌بینی نحوه‌ی عملکرد اواپراتورها تقطیر چند اثره طراحی کردند. این برنامه بر مبنای حل معادلات غیرخطی نوشته شده است. آن‌ها متوجه شدند که به‌طور خاص، مدل حاضر شامل معادلات اضافی برای شبیه‌سازی دینامیک بخش پیش‌گرمایش است و به دلیل انعطاف‌پذیری آن، منطقی است که فرض کنیم تغییرات جزئی، مدل ارائه شده را با طیف گسترده‌ای از تأسیسات اواپراتور منطبق می‌کند. نتایج تجربی و شبیه‌سازی شده در محدوده شرایط عملیاتی آزمایش شده، مناسب بودن مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.

النشار و قمه‌یه در سال ۱۹۹۰ [۲۷] یک مدل شبیه‌سازی برای پیش‌بینی رفتار گذرا آب شیرین کن چند اثره از نوع پشته^۱ ایجاد کردند و برای اعتبار سنجی آن نتایج به دست آمده از این مدل را با داده‌های واقعی از یک آب شیرین کن خورشیدی با اواپراتور چند اثره از نوع پشته واقع در ابوظبی مقایسه نمودند. معادلات بالانس گرما در حالت گذرا برای هر جز این آب شیرین کن نوشته شده بود. این معادلات به‌طور هم‌زمان حل شدند تا دماهای اثر وابسته به زمان و همچنین پارامترهای اصلی کارخانه مانند نسبت عملکرد و تولید مقطر را تولید کنند. سپس نتایج برنامه شبیه‌سازی با داده‌های عملیاتی نیروگاه گرفته شده در هنگام راه‌اندازی یک کارخانه خاص مقایسه شد و توافق منطقی به دست آمد.

آلی و مروان در سال ۱۹۹۷ [۲۸] پاسخ دینامیکی اواپراتورها چند اثره را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها با مدل‌سازی دینامیکی اواپراتورها (افکت‌ها) توانستند یک فرآیند تقطیر چند اثره را در زمان راه‌اندازی و خاموش

¹ Stack-Type

شدن مورد بررسی قرار دهند. هر افکت در این مدل سازی توسط تعدادی متغیر که مربوط به معادلات جرم و انرژی برای جریان تغذیه ورودی، آب شیرین تولید شده و آب نمک است، شرح داده شده است. این معادلات به طور همزمان برای پیش بینی پارامترهای وابسته به زمان سیستم در شرایط گذرا مختلف حل شدند. آن ها توانستند اثر تغییرات در جریان تغذیه ورودی، دمای تغذیه ورودی و جریان بخار محرک روی عملکرد دستگاه مانند دمای بخار تولید شده در افکت، شوری آب نمک، نرخ جریان آب شیرین تولید شده و ارتفاع آب نمک داخل افکت را مورد بررسی قرار دهند و برای آزمودن، مدل سازی دینامیکی خود را با یک مدل دیگر مورد اعتبار سنجی قرار دادند.

دردور و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۲۹] برای شبیه سازی رفتار دینامیکی نیروگاه های تقطیر چند اثره همراه با راکتورهای هسته ای یا نیروگاه های سوخت فسیلی یک بسته رایانه ای ارائه دادند. این مدل بر اساس معادلات بالانس جرم و انرژی بود و می توانست نیروگاه را در دو شکل تغذیه روبه جلو و تغذیه موازی شبیه سازی کند. همانند بیشتر مدل های قبلی، از روابط برای تخمین ضرایب انتقال حرارت و خصوصیات فیزیکی آب دریا و آب خالص استفاده شده است. فرضیه های ساده سازی اعتبار مدل را محدود می کند. علاوه بر این فرمول بندی به طور کامل توصیف نشده است و همچنین نتایج شبیه سازی ارائه شده در مقاله به طور قابل توجهی نشان دهنده پتانسیل های پیش بینی ابزار نیستند.

ژیپهوا و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۳۰] مطالعه ای در مورد روند راه اندازی اواپراتور لوله عمودی^۱ تقطیر چند اثره همراه با یک راکتور گرمایش هسته ای ارائه دادند. اصل ساده بقای جرم و انرژی برای اواپراتورها و پیش گرم کن ها در هر افکت بر اساس یک مدل فرمول بندی ثابت اعمال شد. عملیات وابسته به زمان تنها با افزودن چند معادله جبری با تخمین ثابت های زمانی به نام زمان عملیاتی و ارتباط آن ها با نوعی تغییر دینامیکی در شرایط عملیاتی پیش بینی شده است. با این حال، فرمول بندی مدل مشخص نیست و منشأ چنین زمان عملیاتی

¹ Vertical Tube Evaporator (VTE)

نیست، بنابراین به‌سختی می‌توان نتایج را برای عملیات واقعی گذرا مرتبط دانست، اما بیشتر شبیه به توصیف دنباله‌ای از شرایط ثابت یک سیستم است، بنابراین نشان‌دهنده یک سهم واقعی از مدل‌های دینامیکی مقالات برای فرآیند تقطیر چند اثره نیست.

روکا و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۳۱] یک مدل دینامیکی از واحد عملیاتی آزمایشی به کمک خورشید در نیروگاه خورشیدی آلمریا باهدف اجرای یک فرآیند کنترل برای بهینه‌سازی تولید آب شیرین نیروگاه ایجاد کردند. این مدل در زبان شیء‌گرا مدلیکا^۱ اجرا شد، از معادلات ساده بالانس جرم و انرژی شروع می‌شد و چندین فرضیه ساده مانند: ناچیز در نظر گرفتن حضور گاز غیرقابل چگالش، خصوصیات فیزیکی ثابت، افت دما ثابت بین افکت‌ها و ارتفاع آب‌نمک در نظر گرفته نشده است. هرچند ساده، این مدل می‌توانست نشانه‌های مفیدی در مورد چگونگی بهبود عملکرد نیروگاه هنگام کار در شرایط گذرا به دلیل یک منبع حرارت متغیر از میدان خورشیدی ارائه دهد.

وکیل شهزاد و همکاران در سال ۲۰۱۴ و ان‌جی و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳۲، ۱] یک مدل کاملاً گذرا برای یک سیستم هیبریدی نمک‌زدایی چند اثره و نمک‌زدایی جذب سطحی^۲ به‌منظور مقایسه رفتار این شکل جدید هیبریدی با دستگاه‌های مرسوم نمک‌زدایی چند اثره ارائه نمودند. مدل بر اساس معادلات بالانس جرم، انرژی و نمک همراه با مدل جذب برای زوج سیلیکا ژل-آب است. فرضیاتی که برای مدل در نظر گرفته شده‌اند به‌صورت زیر است:

۱- سطح انتقال حرارت ثابت اواپراتورها

۲- چگالش کامل بخار آب داخل افکت‌ها و کندانسور

۳- تلفات ناچیز گرما به محیط‌زیست

^۱ Modelica

^۲ Adsorption Desalination

۴- حضور ناچیز گاز غیرقابل چگالش

همچنین، متفاوت از سایر مدل‌های نمک‌زدایی چند اثره ارائه‌شده است، این مدل با استفاده رابطه‌های مبتنی بر اعداد بدون بعد است و ضرایب کلی انتقال حرارت را از ضرایب انتقال حرارت منفرد تعیین می‌کند.

مزینی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۳۳] یک مدل ریاضی دینامیکی برای آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور ایجاد کردند، مدل ایجادشده بر اساس جفت سازی معادلات دینامیکی بالانس جرم، نمک و انرژی سیستم است، مدل‌سازی برای سه بخش اواپراتورها (افکت‌ها)، کندانسور و اجکتور انجام‌شده است هر افکت نیز به سه فاز بخار، لوله‌ها و آب‌نمک تقسیم‌شده که بیانگر رفتار دینامیکی افکت است و مدل ارائه‌شده نیز با داده‌های واقعی از یک نیروگاه عملیاتی واقع در جزیره کیش اعتبار سنجی شده است. و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از مدل‌سازی، رفتار سیستم تحت شرایط مختلف مانند تغییر نقطه عملیاتی و اعمال اختلال بررسی می‌شود.

دلاکاله و همکاران در سال ۲۰۱۵ [۳۴] یک مدل دینامیکی برای یک نیروگاه آزمایشی آب‌شیرین‌کن چند اثره در نیروگاه خورشیدی آلمریا با استفاده از یک کلکتور خورشیدی ترکیبی^۱ که میدان خورشیدی به‌عنوان منبع حرارتی در نظر گرفته‌شده است، ارائه نمودند. این مدل در محیط شیء‌گرا مدلیکا ساخته شد و از مدلی که روکا و همکارانش [۳۱] آن را توسعه دادند، شروع شد و توسعه بیشتر آن توسط یک ساختار مرتب و فرمول‌بندی معادلات ایجاد شد. در این حالت سه سطح در نظر گرفته شد:

۱- فرآیندهای اساسی انتقال جرم و انرژی

۲- مونتاژ سیستم

۳- ایجاد یک مدل کامل

¹ CPC

مهم‌ترین محدودیات فرض شده شامل عدم حضور گاز غیر چگالش شده، چگالش کامل بخار درون لوله‌های اواپراتور و ناچیز در نظر گرفتن انتقال حرارت بین بخار و دیواره‌های سلول‌ها است. این مدل در برابر داده‌های گذرا واقعی از یک نیروگاه آب‌شیرین‌کن چند اثره واقع‌شده در آلمریا اسپانیا تأیید شد، که نشان می‌دهد توافق خوبی بین پیش‌بینی‌های مدل و داده‌های تجربی وجود دارد.

عظیمی بویل و جعفریان دهکردی در سال ۲۰۱۶ [۳۵] به بررسی شبیه‌سازی دینامیکی فرایند آب‌شیرین‌کن چند اثره پرداخته‌اند، آن‌ها با بکارگیری معادلات دیفرانسیلی جزئی برای دسته لوله‌ها^۱ رفتار دینامیکی آب‌شور را در اطراف لوله‌ها موردبررسی قرار دادند و بدین نتیجه رسیدند که با یک تغییر در دبی بخار اصلی ورودی به مدت ۲۰۰ ثانیه، ۵۵۰ ثانیه زمان لازم است که این فرآیند به حالت پایا طبیعی خود بازگردد.

جورج در سال ۲۰۱۶ [۳۶] یک مدل گذرا برای حالت‌های تغذیه موازی و تغذیه روبه‌جلو برای آب‌شیرین‌کن چند اثره که به یک نیروگاه خورشیدی متصل است ارائه کرد و نتایج را با پیش‌بینی‌های یک مدل پویا که برای این منظور توسعه‌یافته است اعتبار سنجی می‌کند. هدف او استفاده از این مدل برای پیش‌بینی عملکرد واحد MED هنگامی که با یک منبع انرژی تجدید پذیر متناوب مانند انرژی خورشیدی همراه است و کمک به تصمیم‌گیری در مورد عملکرد و کنترل نیروگاه در شرایط ناپایدار است.

سیپولینا و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۳۷] یک مدل دینامیکی برای عملکرد گذرا آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور ارائه کردند، آن‌ها برای شبیه‌سازی مدل دینامیکی خود از نرم‌افزار جی پرومز^۲ استفاده نموده‌اند و با استفاده از داده‌های واقعی یک نیروگاه آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور واقع در تراپانی، سیسیل (ایتالیا) مدل دینامیکی خود را اعتبار سنجی کرده‌اند همچنین آن‌ها نیز با تغییر در دبی آب دریا ورودی، دمای آب دریا ورودی و دبی بخار محرک سیستم اثر این تغییرات را با استفاده از شبیه‌سازی مدل دینامیکی مشاهده نمودند.

¹ Tube Bundles

² gproms

السید و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۴] به بررسی عملکرد گذرا فرآیند آب شیرین کن چند اثره در شکل های مختلف آب شور ورودی به سیستم پرداخته اند، آن ها توانستند آب شیرین کن چند اثره را در چهار حالت تغذیه موازی، تغذیه روبه جلو، تغذیه رو به عقب و تغذیه موازی و متقاطع مدل سازی کنند و نتایج مدل سازی حالت تغذیه موازی و متقاطع را با نیروگاه آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور تریپولی اعتبار سنجی کنند.

السید و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۳۸] اثر اغتشاش را بر روی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور مورد بررسی قرار داده اند آن ها پس از مدل سازی دینامیکی و شبیه سازی آب شیرین کن در حالت تغذیه موازی/متقاطع با استفاده از همان معادلات دیفرانسیلی به شبیه سازی آب شیرین کن نیز پرداخته اند با این تفاوت که معادلات ترموکمپرسور نیز به معادلات قبلی اضافه شده است، آن ها با تغییر در دبی آب دریا ورودی ، دمای آب دریا ورودی و دبی بخار محرک سیستم توانستند اثر اغتشاش های ایجاد شده را مشاهده کنند.

گیمارد و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۳۹] ملاحظات جدیدی را برای مدل سازی نیروگاه آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور تحت شرایط دینامیکی در نظر گرفتن، آن ها با ادامه ی کار قبلی خود که بررسی عملکرد گذرا آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور بود، ملاحظات جدیدی را نیز در نظر گرفتن که بتواند حالت عملیاتی واقعی تری از یک آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور را به نمایش بگذارد، همچنین یک استراتژی کنترل جدید برای بهره برداری بهتر از آب شیرین کن چند اثره در نظر گرفتن بدین شکل که اگر اغتشاشی در بخار محرک ورودی به سیستم ایجاد شود، می توان با یک تغییر هم زمان در دبی آب دریا ورودی به کندانسور ، می توان کل سیستم را تثبیت کرد.

ژدانگ و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۴۰] راکتور آب تحت فشار یکپارچه^۱ با فرآیند نمک زدایی چند اثره همراه با فشرده سازی بخار حرارتی متصل کردند. آن ها یک مدل دینامیکی برای طراحی و بهینه سازی دستگاه های کنترل نیروگاه های شیرین سازی هسته ای^۲ ایجاد نمودند. مدل بر اساس توازن جرم، حرکت انرژی و نمک

^۱ integral pressurized water reactor (iPWR)

^۲ nuclear desalination plants (NDP)

نوشته شده است. یک مدل یکپارچه نیز برای نیروگاه شیرین سازی هسته‌ای که متشکل از یک راکتور آب تحت فشار یکپارچه به نام II۲۰۰NHR و فرآیند نمک‌زدایی چند اثره همراه با فشرده‌سازی بخار حرارتی برای طراحی کنترل نیروگاه ارائه نمودند و مدل را به عنوان یک برنامه در سیمولینک متلب شبیه‌سازی کرده‌اند. برای تایید مدل‌سازی کار خود نیز برخی از متغیرهای فرآیند کلیدی با داده‌های طراحی مقایسه شده است و پاسخ‌های حلقه باز در زیر پله هر دو نرخ جریان آب دریا ورودی و مساحت مقطع گلوگاه ترموکمپرسور ارائه شده است. که نه تنها دقت این مدل را نشان می‌دهد، بلکه اتصال بین سیستم تأمین بخار هسته‌ای^۱ و ماژول‌های فرآیند نمک‌زدایی چند اثره همراه با فشرده‌سازی بخار حرارتی را نیز نشان می‌دهد.

عبدالحمید و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۴۱] یک الگوریتم جدید برای حل مشکل تجزیه و تحلیل حالت پایا اواپراتور چند اثره با تغذیه روبه‌جلو که شامل سه افکت است، ارائه نمودند. همچنین یک مدل دینامیکی نیز برای این سیستم ارائه نمودند که با استفاده از یک کنترل‌کننده متناسب-انتگرال که برای بهبود عملکرد سیستم در برابر تغییرات دمای آب سرد طراحی شده است، کنترل می‌شود. بخش شبیه‌سازی شامل نتایج تجزیه و تحلیل استاتیک و کنترل‌کننده بازخورد است که عملکرد سیستم را بازیابی می‌کند.

هو و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۴۲] واکنش دینامیکی متغیرهای حالت در فرآیند نمک‌زدایی چند اثره، مورد بررسی قرار دادند. از جمله این متغیرها می‌توان دمای تبخیر، شوری، سرعت جریان جرم تبخیر و سطح آب‌نمک را بیان کرد. آن‌ها یک مدل دینامیکی دقیق درست کردند و تأثیر متغیرهای حالت تحت شرایطی خاص مورد بررسی قرار دادند، همچنین با استفاده از دیدگاه کنترلی فرآیند، شاخص‌های حداکثر انحراف، زمان پاسخ و زمان انتقال برای تجزیه و تحلیل فرآیند انتقال متغیرهای حالت، قابل توجه است. جهت اعتبار سنجی از داده‌های یک آب‌شیرین‌کن نه اثره واقع شده در چین استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی فرآیند گذار و داده‌های تقریبی شاخص‌های حداکثر انحراف، زمان پاسخ و زمان انتقال را برای متغیرهای حالت آب‌شیرین‌کن نشان می‌دهد. که

¹ nuclear steam supply system (NSSS)

در این نتایج مشخص شد که با افزایش دمای تغذیه، ظرفیت تبخیر، دمای تبخیر و شوری جریان نمک افزایش می‌یابد، درحالی که سطح مایع کاهش می‌یابد.

۱-۵ معرفی طرح پژوهش

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 اجکتور، پمپ‌ها و سیستم تأمین گرمایش در زمان راه‌اندازی و خاموش کردن، نیاز به مدل‌سازی رفتار گذرای دستگاه آب‌شیرین‌کن داریم. در این پژوهش سعی خواهد شد که رفتار ناپایا آب‌شیرین‌کن حرارتی چند اثره همراه با ترموکمپرسور مدل شود. این مدل‌سازی با به دست آوردن معادلات دیفرانسیل حاکم بر اواپراتورها، کندانسور و اجکتور صورت خواهد گرفت، تا با استفاده از خصوصیات ترموفیزیکی آب رابطه‌ی بین خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم به دست آید. سپس با نتایج رفتار ناپایا آب‌شیرین‌کن حرارتی چند 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. پس از مدل‌سازی، یک کنترل‌کننده برای سیستم طراحی شده است. با استفاده از این کنترل‌کننده اگر در سیستم اغتشاشی ایجاد شود، سیستم به‌طور هوشمند متوجه شده و مقدار آب دریا ورودی به سیستم را دستخوش تغییراتی می‌کند تا متغیرهای ترمودینامیکی سیستم دوباره به حالت پایدار قبلی خود بازگردند.

فصل ۲: مدل سازی فرآیند آب شیرین کن چندانثره همراه با ترموکمپرسور

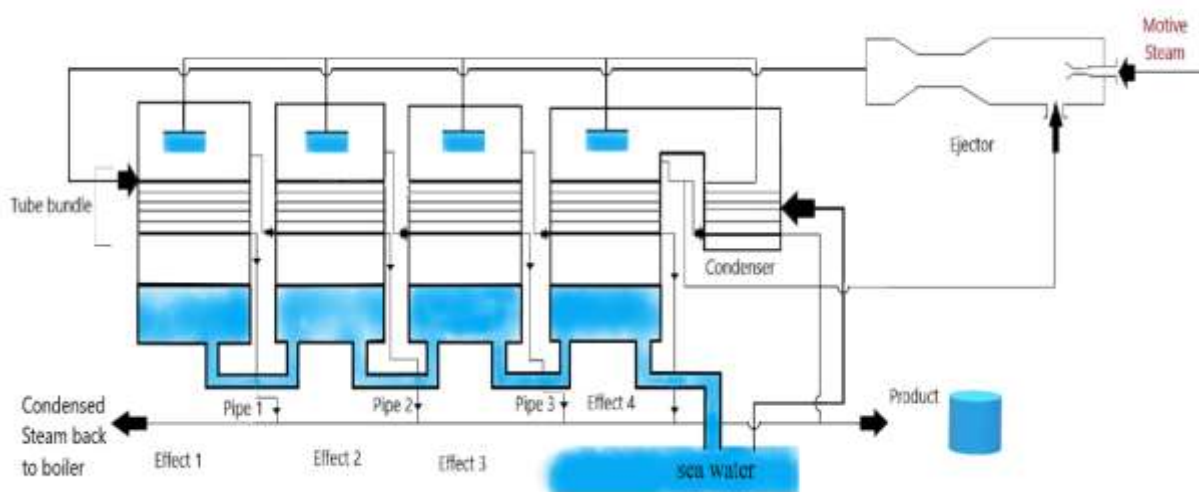
۱-۲ مقدمه

در این فصل حالت پایا و ناپایا دستگاه نمک‌زدایی چندمرحله‌ای با n مرحله همراه با ترموکمپرسور و کندانسور مدل می‌شود. هر مرحله با i نشان داده می‌شود که از ۱ تا n تغییر می‌کند. این مدل بر اساس بالانس جرم و انرژی، معادلات ترمودینامیکی و افت فشارها نوشته شده است.

ساختار سیستم آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور با استفاده از ردیف‌های معمولی افکت‌ها انجام می‌شود. که هرکدام در یک محفظه دایره‌ای یا مستطیلی شکل در امتداد با یک کندانسور قرار می‌گیرند. همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، ترموکمپرسور با آخرین افکت 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 (افکت‌ها) 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 به صورت یک فیلم مایع نازک در امتداد دیواره بیرونی لوله‌های نصب شده به صورت افقی جریان می‌یابد. بخار فشرده داغ (بخار محرک) از ترموکمپرسور به داخل لوله‌های اولین افکت جریان می‌یابد. بخار تولید شده در آخرین اثر آب‌شیرین‌کن چند اثره به دو جریان با فشار همان اثر تقسیم می‌شود. اولین جریان توسط ترموکمپرسور مکیده می‌شود و بخار باقی مانده 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 افکت 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

¹ Top Brine Temperature (TBT)

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 افکت 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^۱ 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 ۱-۲ 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.



شکل ۱-۲ طرح دیاگرام از یک سیستم آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ۴ افکت و یک واحد ترموکمپرسور

برای مدل‌سازی ترمودینامیکی آب‌شیرین‌کن چند اثره در حالت پایا، آب‌شیرین‌کن به سه بخش اواپراتور ها (افکت‌ها)، پیش گرمکن ها و کندانسور تقسیم می‌شود. برای مدل‌سازی در حالت پایا یک سری فرضیاتی در نظر

¹ Flashing

گرفته شده است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود. همچنین پارامترهای عملیاتی ثابت سیستم بیان شده‌اند و در ادامه به بررسی معادلات حالت پایا در سه بخش پرداخته شده است.

۲-۱-۱ فرضیات

- ۱- فضای افکت یک حجم کنترل در نظر گرفته شده است.
- ۲- بخار و تقطیر تولید شده خالی از نمک است.
- ۳- ارتفاع نقطه جوشش، اختلاف دمای بین بخار تولید شده و استخر آب نمک داخل افکت است.

$$T_v(i) = T_b(i) - BPE(T_v(i), X_b(i)) \quad (1-2)$$

- ۴- از جرم و انرژی آب نمک جمع شده در اطراف لوله‌های اواپراتور در مقایسه با جرم و انرژی استخر آب نمک در یک افکت صرف نظر شده است.
- ۵- اثر گازهای غیر چگالش شده بر عملکرد اواپراتور ناچیز در نظر گرفته شده است.
- ۶- جریان آب نمک به صورت فلش آدیاباتیکی از افکت قبلی به افکت بعدی وارد می‌شود.

۲-۱-۲ ورودی‌های ثابت آب شیرین کن

ورودی‌های ثابت آب شیرین کن MED-TVC به صورت زیر است:

۱- دمای آب دریا ورودی به کندانسور (T_{sw})

۲- دمای بخار گرمایش افکت اول (T_{hs})

۳- دمای افکت اول (T_e^1)

۴- دمای افکت آخر (T_e^N)

۵- تعداد افکت‌ها (N)

۶- میزان آب شیرین تولیدی کل (D_{tot})

۷- میزان نمک آب تغذیه ورودی افکت‌ها (X_f)

۸- میزان نمک آب نمک خروجی از افکت (X_b) یا نرخ تبخیر اواپراتور (E_r)

۹- پینچ دمایی کندانسور (ΔT_{pc})

۱۰- پینچ دمایی پیش گرمکن‌ها (ΔT_p)

۳-۱-۲ معادلات حالت پایا

بر اساس میزان آب شیرین تولیدی موردنظر، مقدار دبی تغذیه موردنیاز تمامی افکت‌ها به دست می‌آید. بدین‌صورت که نرخ تبخیر را به دست آورده و بر اساس آن می‌دانیم که چه مقدار دبی برای افکت‌ها موردنیاز است.

$$E_r = \frac{X_b - X_f}{X_b} \rightarrow M_f = \frac{D_{tot}}{E_r} \quad (۱-۲)$$

۳-۱-۲-۱ اواپراتور‌ها (افکت‌ها)

معادلات بقای جرم، بقای نمک و بقای انرژی برای هر افکت نوشته شده است.

افکت اول:

۱- معادله بقای جرم

$$M_f' - M_b' - M_v' = 0 \quad (۳-۲)$$

۲- معادله بقای نمک

$$M_f^i X_f - M_b^i X_b^i = 0 \quad (4-2)$$

۳- معادله بقای انرژی

$$M_{hs} (h_{hs} - h_d^i) + M_f^i h_f^i - M_b^i h_b^i - M_v^i h_v^i = 0 \quad (5-2)$$

افکت I ام:

۱- معادله بقای جرم

$$M_f^i + M_b^{i-1} - M_b^i - M_v^i = 0 \quad (6-2)$$

۲- معادله بقای نمک

$$M_f^i X_f + M_b^{i-1} X_b^{i-1} - M_b^i X_b^i = 0 \quad (7-2)$$

۳- معادله بقای انرژی

$$M_v^{i-1} (h_v^{i-1} - h_d^i) + M_f^i h_f^i + M_b^{i-1} h_b^{i-1} - M_b^i h_b^i - M_v^i h_v^i = 0 \quad (8-2)$$

۲-۱-۳ پیش گرمکن

در پیش گرمکن ها سیال سرد (آب دریا) از کندانسور می آید و سیال گرم توسط بخار تولیدشده در هر افکت از طریق لوله های افکت بعدی وارد پیش گرمکن می شود.

$$M_C = M_f \quad (9-2)$$

$$M_H = D_{tot} \quad (10-2)$$

معادله بقا انرژی برای پیش گرمکن به صورت زیر است:

$$Q_C = Q_H \quad (11-2)$$

$$M_C(T_{C_{\gamma}} - T_{C_{\delta}}) = M_H(T_{H_{\delta}} - T_{H_{\gamma}}) \quad (12-2)$$

پینچ پیش گرمکن ها به صورت زیر تعریف می شود و همین طور می توان مقدار دمای سیال گرم خروجی از پیش گرمکن را از رابطه ی پینچ به دست آورد.

$$\Delta T_P = T_{H_\gamma} - T_C, \quad \rightarrow \quad T_{H_\gamma} = \Delta T_P + T_C, \quad (13-2)$$

با به دست آوردن مقدار دمای سیال گرم خروجی از معادله (۲-۱۳) و جایگذاری آن در معادله (۲-۱۲) می‌توان سیال سرد خروجی را از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$T_{C_r} = \frac{M_H}{M_C} (T_{H_1} - T_{H_r}) + T_{C_1} \quad (14)$$

۲-۱-۳-۳ کندانسور

معادله بقا انرژی برای کندانسور به صورت زیر است:

$$M_{cw}(h_{cw} - h_f) + (M_v^N - M_{ev})(h_v^N - h_d^N) = . \quad (15-2)$$

که از معادله‌ی بالا مقدار M_{CW} به دست می‌آید و با جایگذاری در معادله زیر مقدار دبی ریجکت شده به دست می‌آید:

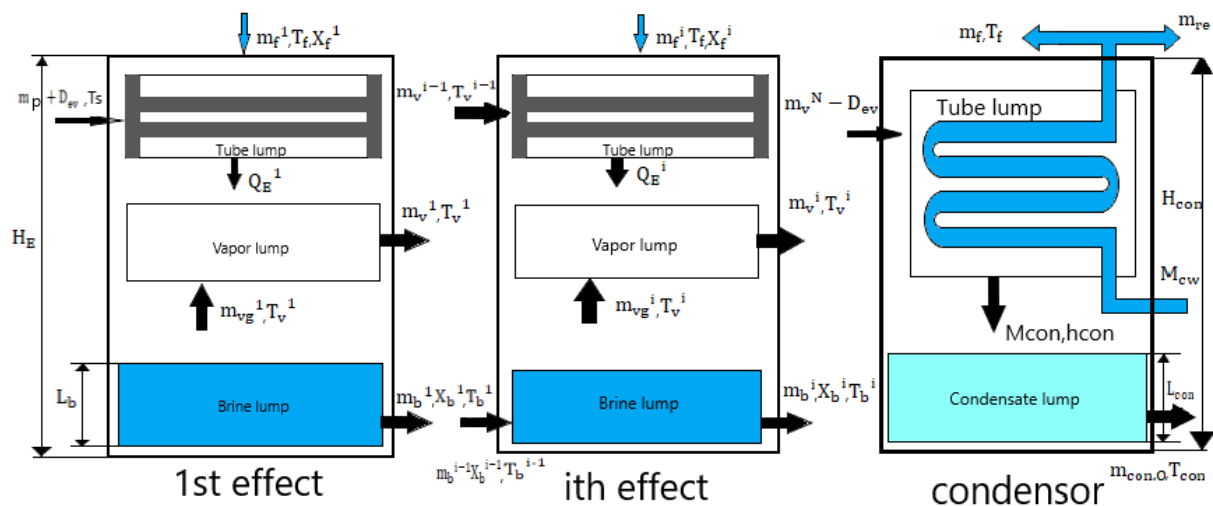
$$M_{re} = M_{cw} - M_f \quad (16-2)$$

۲-۲ مدل سازی حالت نایایا

برای مدل‌سازی ترمودینامیکی آب‌شیرین‌کن چند اثره در حالت ناپایا، حل مدل حالت پایا به‌عنوان شرایط اولیه برای مدل دینامیکی در نظر گرفته‌شده است. برای مدل‌سازی در حالت ناپایا یک سری فرضیاتی در نظر گرفته‌شده است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته می‌شود. برای مدل دینامیکی ایجادشده، هر اواپراتور به سه بخش تقسیم شده است:

۱- آب نمک ۲- بخار ۳- لوله^۱

برای هر بخش بالانس جرم، نمک و انرژی نوشته شده است. شکل ۲-۲ دیاگرام‌های شماتیک برای اواپراتور های افکت اول و i ام نشان می دهد.



شکل ۲-۲ حجم کنترل با ترم‌های مختلف برای افکت اول، افکت i ام و کندانسور

فرضیات مدل سازی دینامیکی یک نیروگاه 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 افکت 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 فلش آدیاباتیکی از افکت قبلی به افکت 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 افکت است (رابطه ی (۲-۱)).

¹ tube

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 باشند.

۲-۲-۱ مدل اواپراتور

بر اساس فرضیات، معادلات بالانس جرم، انرژی و نمک در حالت گذرا برای اواپراتور افکت اول و i ام در نظر گرفته شده است.

افکت اول:

- بالانس جرم فاز بخار و آب نمک

$$\frac{dM_b}{dt} = m_f - m_{vg} - m_b \quad (۱۷-۲)$$

$$\frac{dM_v}{dt} = m_{vg} - m_v \quad (۱۸-۲)$$

با جمع رابطه های (۱۷-۲) و (۱۸-۲) رابطه زیر ظاهر می شود:

$$\frac{dM_b}{dt} + \frac{dM_v}{dt} = m_f - m_v - m_b \quad (۱۹-۲)$$

- بالانس انرژی فاز آب نمک، بخار ولوله

$$\frac{dM_b h_b}{dt} = m_f h_f - m_{vg} h_v - m_b h_b + Q_E \quad (۲۰-۲)$$

$$\frac{dM_v h_v}{dt} = m_{vg} h_v - m_v h_v \quad (۲۱-۲)$$

$$M_T \frac{dh_T}{dt} = m_s [h_s - h_d] - Q_E \quad Q_E = U_e A_e (T_s - T_b) \quad (۲۲-۲)$$

با جمع معادلات بخش آب نمک و بخار معادله زیر ظاهر می شود:

$$\frac{dM_b \cdot h_b}{dt} + \frac{dM_v \cdot h_v}{dt} = m_f \cdot h_f - m_v \cdot h_v - m_b \cdot h_b + Q_E \quad (23-2)$$

- بالانس نمک فاز آب نمک

$$\frac{dM_b \cdot X_b}{dt} = m_f \cdot X_f - m_b \cdot X_b \quad (24-2)$$

معادله دبی آب نمک و بخار تولید شده داخل افکت به صورت زیر است:

$$M_b = \rho_b L_b A \quad (25-2)$$

$$M_v = \rho_v L_v A \quad (26-2)$$

$$L_v = H_E - L_b \quad (27-2)$$

ρ_b چگالی آب نمک، L_b ارتفاع آب نمک داخل افکت، A سطح مقطع افکت، ρ_v چگالی بخار، L_v ارتفاع بخار داخل افکت

نکته: ρ_b و h_b تابعی از دما و غلظت و ρ_v و h_v تابعی از دما می باشند.

$$\rho_b = \rho_b(X_b, T_b) \quad (28-2)$$

$$h_b = h_b(X_b, T_b) \quad (29-2)$$

$$\rho_v = \rho_v(T_v) \quad (30-2)$$

$$h_v = h_v(T_v) \quad (31-2)$$

تبدیل روابط گذرا جریان آب نمک و بخار به متغیرهای حالت که حالت سیستم را بیان می کنند :

۱- فاز آب نمک

$$\frac{dM_b}{dt} = \frac{d(\rho_b L_b A)}{dt} = L_b A \frac{d\rho_b}{dt} + \rho_b A \frac{dL_b}{dt} \quad (32-2)$$

$$\frac{dM_b h_b}{dt} = \frac{d(\rho_b L_b A h_b)}{dt} = L_b A h_b \frac{d\rho_b}{dt} + \rho_b A h_b \frac{dL_b}{dt} + \rho_b A L_b \frac{dh_b}{dt} \quad (33-2)$$

$$\frac{dM_b X_b}{dt} = \frac{d(\rho_b L_b A X_b)}{dt} = L_b A X_b \frac{d\rho_b}{dt} + \rho_b A X_b \frac{dL_b}{dt} + \rho_b A L_b \frac{dX_b}{dt} \quad (34-2)$$

$$\frac{d\rho_b}{dt} = \frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \frac{dT_b}{dt} + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \quad (35-2)$$

$$\frac{dh_b}{dt} = \frac{\partial h_b}{\partial T_b} \frac{dT_b}{dt} + \frac{\partial h_b}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \quad (36-2)$$

$$\frac{dT_b}{dt} = \frac{dT_v}{dt} + \frac{dBPE}{dt} \quad (37-2)$$

$$\frac{dBPE}{dt} = \frac{\partial BPE}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} + \frac{\partial BPE}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \quad (38-2)$$

با جایگذاری معادله (۳۸-۲) در معادله (۳۷-۲) دما آب‌نمک برحسب تغییرات دما بخار و غلظت آب‌نمک نسبت به زمان به دست می‌آید و با جایگذاری معادله (۳۷-۲) در معادله (۳۵-۲) و (۳۶-۲) به ترتیب چگالی و آنتالپی آب‌نمک نیز برحسب تغییرات دما بخار و غلظت آب‌نمک نسبت به زمان به دست می‌آید و با جایگذاری معادله (۳۵-۲) و (۳۶-۲) در معادله‌های (۳۲-۲) و (۳۳-۲) و (۳۴-۲) به ترتیب بالانس جرم، انرژی و نمک، آب‌نمک برحسب تغییرات دما بخار، ارتفاع آب‌نمک و غلظت آب‌نمک برحسب زمان به دست می‌آید. در ادامه اثر تغییرات ذکرشده قابل مشاهده است:

$$\frac{dM_b}{dt} = L_b A \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(\frac{dT_v}{dt} + \left(\frac{\partial BPE}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} + \frac{\partial BPE}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) \right) + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) + \rho_b A \frac{dL_b}{dt} \quad (39-2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dM_b}{dt} = (\rho_b A) \frac{dL_b}{dt} + (L_b A \frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(1 + \frac{\partial BPE}{\partial T_v} \right) \frac{dT_v}{dt} + (L_b A \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \frac{\partial BPE}{\partial X_b} \right. \\ \left. + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \right) \frac{dX_b}{dt} \end{aligned} \quad (40-2)$$

$$\frac{dM_b h_b}{dt} = L_b A h_b \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(\frac{dT_v}{dt} + \left(\frac{\partial BPE}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} + \frac{\partial BPE}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) \right) + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) \quad (۴۱-۲)$$

$$+ \rho_b A h_b \frac{dL_b}{dt} + \rho_b A L_b \left(\frac{\partial h_b}{\partial T_b} \left(\frac{dT_v}{dt} + \left(\frac{\partial BPE}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} + \frac{\partial BPE}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) \right) + \frac{\partial h_b}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right)$$

$$\frac{dM_b h_b}{dt} = (\rho_b A h_b) \frac{dL_b}{dt} \quad (۴۲-۲)$$

$$+ \left(L_b A h_b \frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(۱ + \frac{\partial BPE}{\partial T_v} \right) + \rho_b A L_b \frac{\partial h_b}{\partial T_b} \left(۱ + \frac{\partial BPE}{\partial T_v} \right) \right) \frac{dT_v}{dt} + \left(L_b A h_b \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \frac{\partial BPE}{\partial X_b} + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \right) + \rho_b A L_b \left(\frac{\partial h_b}{\partial T_b} \frac{\partial BPE}{\partial X_b} + \frac{\partial h_b}{\partial X_b} \right) \right) \frac{dX_b}{dt}$$

$$\frac{dM_b X_b}{dt} = L_b A X_b \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(\frac{dT_v}{dt} + \left(\frac{\partial BPE}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} + \frac{\partial BPE}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) \right) + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \frac{dX_b}{dt} \right) \quad (۴۳-۲)$$

$$+ \rho_b A X_b \frac{dL_b}{dt} + \rho_b A L_b \frac{dX_b}{dt}$$

$$\frac{dM_b X_b}{dt} = (\rho_b A X_b) \frac{dL_b}{dt} + \left(L_b A X_b \frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(۱ + \frac{\partial BPE}{\partial T_v} \right) \right) \frac{dT_v}{dt} \quad (۴۴-۲)$$

$$+ \left(L_b A X_b \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \frac{\partial BPE}{\partial X_b} + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \right) + \rho_b A L_b \right) \frac{dX_b}{dt}$$

۲- فاز بخار:

$$\frac{dM_v}{dt} = \frac{d(\rho_v L_v A)}{dt} = L_v A \frac{d\rho_v}{dt} + \rho_v A \frac{dL_v}{dt} \quad (۴۵-۲)$$

$$\frac{dM_v h_v}{dt} = \frac{d(\rho_v L_v A h_v)}{dt} = L_v A h_v \frac{d\rho_v}{dt} + \rho_v A h_v \frac{dL_v}{dt} + \rho_v A L_v \frac{dh_v}{dt} \quad (۴۶-۲)$$

با جایگذاری معادله (۲۷-۲) در معادله‌های (۴۵-۲) و (۴۶-۲) معادله‌های (۴۷-۲) و (۴۸-۲) به دست می‌آید:

$$\frac{dM_v}{dt} = (H_E - L_b) A \frac{d\rho_v}{dt} - \rho_v A \frac{dL_b}{dt} \quad (۴۷-۲)$$

$$\frac{dM_v h_v}{dt} = (H_E - L_b) A h_v \frac{d\rho_v}{dt} - \rho_v A h_v \frac{dL_b}{dt} + \rho_v A (H_E - L_b) \frac{dh_v}{dt} \quad (48-2)$$

$$\frac{d\rho_v}{dt} = \frac{\partial \rho_v}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} \quad (49-2)$$

$$\frac{dh_v}{dt} = \frac{\partial h_v}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} \quad (50-2)$$

با جایگذاری معادله‌های (49-2) و (50-2) به ترتیب در معادله‌های (47-2) و (48-2) معادله‌های (51-2) و

(52-2) به دست می‌آید:

$$\frac{dM_v}{dt} = (-\rho_v A) \frac{dL_b}{dt} + ((H_E - L_b) A) \frac{\partial \rho_v}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} \quad (51-2)$$

$$\frac{dM_v h_v}{dt} = (H_E - L_b) A h_v \frac{\partial \rho_v}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} - \rho_v A h_v \frac{dL_b}{dt} + \rho_v A (H_E - L_b) \frac{\partial h_v}{\partial T_v} \frac{dT_v}{dt} \quad (52-2)$$

معادله (53-2) ساده‌شده معادله (52-2) است:

$$\frac{dM_v h_v}{dt} = (-\rho_v A h_v) \frac{dL_b}{dt} + \left((H_E - L_b) A \left(h_v \frac{\partial \rho_v}{\partial T_v} + \rho_v \frac{\partial h_v}{\partial T_v} \right) \right) \frac{dT_v}{dt} \quad (53-2)$$

با جایگذاری معادله (40-2) و (51-2) در معادله (19-2) داریم:

$$\begin{aligned} ((\rho_b' - \rho_v') A') \frac{dL_b'}{dt} + (L_b' A') \frac{\partial \rho_b'}{\partial T_b'} \left(1 + \frac{\partial BPE'}{\partial T_v'} \right) + (H_E - L_b') A' \frac{\partial \rho_v'}{\partial T_v'} \frac{dT_v'}{dt} \\ + \left(L_b' A' \left(\frac{\partial \rho_b'}{\partial T_b'} \frac{\partial BPE'}{\partial X_b'} + \frac{\partial \rho_b'}{\partial X_b'} \right) \right) \frac{dX_b'}{dt} = m_f' - m_v' - m_b' \end{aligned} \quad (54-2)$$

ضرایب ارتفاع آب‌نمک، دما بخار و غلظت آب‌نمک افکت اول در معادله (54-2) در معادله‌های زیر نشان داده شده

است:

$$a_1 = A' (\rho_b' - \rho_v') \quad (55-2)$$

$$a_{\gamma} = \left[A' L_b' \frac{d\rho_b'}{dT_b'} \left(1 + \frac{dBPE'}{dT_v'} \right) + (H_E - L_b') A' \frac{d\rho_v'}{dT_v'} \right] \quad (56-2)$$

$$a_{\gamma} = \left[A' L_b' \left(\frac{d\rho_b'}{dT_b'} \frac{dBPE'}{dX_b'} + \frac{d\rho_b'}{dX_b'} \right) \right] \quad (57-2)$$

$$a_{\gamma} = m_f' - m_v' - m_b' \quad (58-2)$$

$$a_{\gamma} \frac{dL_b'}{dt} + a_{\gamma} \frac{dT_v'}{dt} + a_{\gamma} \frac{dX_b'}{dt} = a_{\gamma} \quad (59-2)$$

با جایگذاری معادله (۴۲-۲) و (۵۳-۲) در معادله (۲۳-۲) داریم:

$$\left(\rho_b' A' h_b' - \rho_v' A' h_v' \right) \frac{dL_b'}{dt} \quad (60-2)$$

$$+ \left(L_b' A' h_b' \frac{\partial \rho_b'}{\partial T_b'} \left(1 + \frac{\partial BPE'}{\partial T_v'} \right) + \rho_b' A' L_b' \frac{\partial h_b'}{\partial T_b'} \left(1 + \frac{\partial BPE'}{\partial T_v'} \right) \right)$$

$$+ (H_E - L_b') A' \left(h_v' \frac{\partial \rho_v'}{\partial T_v'} + \rho_v' \frac{\partial h_v'}{\partial T_v'} \right) \frac{dT_v'}{dt}$$

$$+ \left(L_b' A' h_b' \left(\frac{\partial \rho_b'}{\partial T_b'} \frac{\partial BPE'}{\partial X_b'} + \frac{\partial \rho_b'}{\partial X_b'} \right) \right)$$

$$+ \rho_b' A' L_b' \left(\frac{\partial h_b'}{\partial T_b'} \frac{\partial BPE'}{\partial X_b'} + \frac{\partial h_b'}{\partial X_b'} \right) \frac{dX_b'}{dt}$$

$$= m_f' h_f' - m_v' h_v' - m_b' h_b' + Q_E'$$

ضرایب ارتفاع آب‌نمک، دما بخار و غلظت آب‌نمک افکت اول در معادله (۶۰-۲) در معادله‌های زیر نشان داده شده

است:

$$a_{\Delta} = A' (\rho_b' h_b' - \rho_v' h_v') \quad (61-2)$$

$$a_{\gamma} = [A' L_b' \left(\rho_b' \frac{dh_b'}{dT_b'} + h_b' \frac{d\rho_b'}{dT_b'} \right) \left(1 + \frac{dBPE'}{dT_v'} \right) + (H_E - L_b') A'] \quad (62-2)$$

$$a_v = \left[A' L_b' h_b' \left(\frac{d\rho_b'}{dT_b'} \frac{dBPE'}{dX_b'} + \frac{d\rho_b'}{dX_b'} \right) + A' L_b' \rho_b' \frac{dh_b'}{dT_b'} \frac{dBPE'}{dX_b'} \right] \quad (۶۳-۲)$$

$$a_\lambda = M_f' h_f' - M_b' h_b' - M_v' h_v' + Q_E' \quad (۶۴-۲)$$

$$a_\delta \frac{dL_b'}{dt} + a_\tau \frac{dT_v'}{dt} + a_v \frac{dX_b'}{dt} = a_\lambda \quad (۶۵-۲)$$

با جایگذاری معادله (۴۴-۲) نیز در معادله (۲۴-۲) داریم:

$$\begin{aligned} (\rho_b A X_b) \frac{dL_b}{dt} + \left(L_b A X_b \frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \left(1 + \frac{\partial BPE}{\partial T_v} \right) \right) \frac{dT_v}{dt} \\ + \left(L_b A X_b \left(\frac{\partial \rho_b}{\partial T_b} \frac{\partial BPE}{\partial X_b} + \frac{\partial \rho_b}{\partial X_b} \right) + \rho_b A L_b \right) \frac{dX_b}{dt} \\ = m_f' X_f' - m_b' X_b' \end{aligned} \quad (۶۶-۲)$$

ضرایب ارتفاع آب‌نمک، دما بخار و غلظت آب‌نمک افکت اول در معادله (۶۶-۲) در معادله‌های زیر نشان داده شده است:

$$a_q = A' \rho_b' X_b' \quad (۶۷-۲)$$

$$a_{\lambda_1} = \left[A' L_b' X_b' \frac{d\rho_b'}{dT_b'} \left(1 + \frac{dBPE'}{dT_v'} \right) \right] \quad (۶۸-۲)$$

$$a_{\lambda_2} = \left[A' L_b' \left(X_b' \frac{d\rho_b'}{dT_b'} \frac{dBPE'}{dX_b'} + \rho_b' + X_b' \frac{d\rho_b'}{dX_b'} \right) \right] \quad (۶۹-۲)$$

$$a_{\lambda_3} = M_f' X_f' - M_b' X_b' \quad (۷۰-۲)$$

$$a_q \frac{dL_b'}{dt} + a_{\lambda_1} \frac{dT_v'}{dt} + a_{\lambda_2} \frac{dX_b'}{dt} = a_{\lambda_3} \quad (۷۱-۲)$$

به ترتیب با استفاده از معادله‌های (۵۹-۲) و (۶۵-۲) و (۷۱-۲) ماتریس معادله‌های افکت اول تشکیل می‌شود:

$$a_{\lambda_1} \frac{dL_b'}{dt} + a_{\lambda_2} \frac{dT_v'}{dt} + a_{\lambda_3} \frac{dX_b'}{dt} = a_{\lambda_3} \quad (۷۲-۲)$$

$$a_{\delta} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\tau} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\gamma} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\lambda} \quad (73-2)$$

$$a_{\gamma} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\gamma} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\gamma} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\gamma} \quad (74-2)$$

افکت i ام:

- بالانس جرم فاز بخار و آب نمک

$$\frac{dM_b^i}{dt} = m_f^i + m_b^{i-1} - m_{vg}^i - m_b^i \quad (75-2)$$

$$\frac{dM_v^i}{dt} = m_{vg}^i - m_v^i \quad (76-2)$$

- بالانس انرژی فاز آب نمک، بخار و لوله

$$\frac{dM_b^i h_b^i}{dt} = m_f^i h_f^i + m_b^{i-1} h_b^{i-1} - m_{vg}^i h_v^i - m_b^i h_b^i + Q_E^i \quad (77-2)$$

$$\frac{dM_v^i h_v^i}{dt} = m_{vg}^i h_v^i - m_v^i h_v^i \quad (78-2)$$

$$M_T \frac{dh_T^i}{dt} = m_v^{i-1} [h_v^{i-1} - h_d^i] - Q_E^i \quad Q_E^i = U_e^i A_e^i (T_v^{i-1} - T_b^i) \quad (79-2)$$

- بالانس نمک فاز آب نمک

$$\frac{dM_b^i X_b^i}{dt} = m_f^i X_f^i + m_b^{i-1} X_b^{i-1} - m_b^i X_b^i \quad (80-2)$$

مشابه با روند ساده سازی افکت اول برای افکت i ام نیز همان کار ها را انجام می دهیم و معادلات به صورت زیر

خلاصه می شود:

$$a_{\gamma} = A^i (\rho_b^i - \rho_v^i) \quad (81-2)$$

$$a_{\tau} = \left[A^i L_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \left(\gamma + \frac{dBPE^i}{dT_v^i} \right) + (H_E - L_b^i) A^i \frac{d\rho_v^i}{dT_v^i} \right] \quad (82-2)$$

$$a_{\gamma} = \left[A^i L_b^i \left(\frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} + \frac{d\rho_b^i}{dX_b^i} \right) \right] \quad (83-2)$$

$$a_{\text{f}} = M_f^i + M_b^{i-1} - M_b^i - M_v^i \quad (84-2)$$

$$a_{\text{v}} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\text{r}} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\text{r}} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\text{f}} \quad (85-2)$$

$$a_{\Delta} = A^i(\rho_b^i h_b^i - \rho_v^i h_v^i) \quad (86-2)$$

$$a_{\text{r}} = [A^i L_b^i \left(\rho_b^i \frac{dh_b^i}{dT_b^i} + h_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \right) \left(1 + \frac{dBPE^i}{dT_v^i} \right) + (H_E - L_b^i) A^i] \quad (87-2)$$

$$a_{\text{v}} = \left[A^i L_b^i h_b^i \left(\frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} + \frac{d\rho_b^i}{dX_b^i} \right) + A^i L_b^i \rho_b^i \frac{dh_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} \right] \quad (88-2)$$

$$a_{\Delta} = M_f^i h_f^i + M_b^{i-1} h_b^{i-1} - M_b^i h_b^i - M_v^i h_v^i + Q_E^i \quad (89-2)$$

$$a_{\Delta} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\text{r}} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\text{v}} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\Delta} \quad (90-2)$$

$$a_{\text{q}} = A^i \rho_b^i X_b^i \quad (91-2)$$

$$a_{\text{v}} = \left[A^i L_b^i X_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \left(1 + \frac{dBPE^i}{dT_v^i} \right) \right] \quad (92-2)$$

$$a_{\text{v}} = \left[A^i L_b^i \left(X_b^i \frac{d\rho_b^i}{dT_b^i} \frac{dBPE^i}{dX_b^i} + \rho_b^i + X_b^i \frac{d\rho_b^i}{dX_b^i} \right) \right] \quad (93-2)$$

$$a_{\text{vr}} = M_f^i X_f^i + M_b^{i-1} X_b^{i-1} - M_b^i X_b^i \quad (94-2)$$

$$a_{\text{q}} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\text{v}} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\text{v}} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\text{vr}} \quad (95-2)$$

در نهایت ماتریس زیر تشکیل می شود:

$$a_{\text{v}} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\text{r}} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\text{r}} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\text{f}} \quad (96-2)$$

$$a_{\Delta} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\text{r}} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\text{v}} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\Delta} \quad (97-2)$$

$$a_{\text{q}} \frac{dL_b^i}{dt} + a_{\text{v}} \frac{dT_v^i}{dt} + a_{\text{v}} \frac{dX_b^i}{dt} = a_{\text{vr}} \quad (98-2)$$

ماتریس ضرایب مجهولات (A)، ماتریس معلومات (B)، ماتریس مجهولات (X)

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} a_{10} \\ a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} \frac{dL_b^i}{dt} \\ \frac{dT_v^i}{dt} \\ \frac{dX_b^i}{dt} \end{bmatrix} \quad X = A^{-1}B \quad (99-2)$$

۲-۲-۲ مدل کندانسور

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 افکت که بعد از مکش واحد ترموکمپرسور باقی مانده 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 ۲-۲ نشان داده شده است. همان‌طور که 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. رابطه ۲-۱۰۰ بیانگر بالانس جرم فاز مایع کندانس شده و رابطه‌های ۲-۱۰۱ و ۲-۱۰۲ بالانس انرژی فاز مایع کندانس شده و لوله را نشان می‌دهد.

۱- بالانس جرم فاز مایع کندانس شده

$$\frac{dM_{con}}{dt} = m_{con} - m_{con,0} \quad (100-2)$$

که در آن M_{con} جرم مایع کندانس شده، m_{con} دبی مایع کندانس شده و $m_{con,0}$ دبی مایع کندانس شده خروجی است.

۲- بالانس انرژی فاز مایع کندانس شده و لوله

$$\frac{dM_{con}h_{con}}{dt} = m_{con}h_{con} - m_{con,0}h_{con,0} \quad (101-2)$$

$$M_{T,con} \frac{dh_{T,con}}{dt} = m_{cw} h_{cw} - m_{cw} h_f + Q_{con} \quad (۱۰۲-۲)$$

$$M_{T,con} = \rho_{Tube,c} \forall_{Tube,con} \quad (۱۰۳-۲)$$

$$Q_{con} = U_{con} A_{con} \frac{(T_v(N) - T_f) - (T_{con} - T_{cw})}{\ln \left[\frac{T_v(N) - T_f}{T_{con} - T_{cw}} \right]} \quad (۱۰۴-۲)$$

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 $\forall_{Tube,con}$ حجم لوله‌های کندانسور است.

با جمع معادلات بالانس انرژی دو فاز بخار و مایع کندانس شده معادله زیر ظاهر می‌شود:

$$\frac{dM_{con} h_{con}}{dt} + \frac{dM_v h_v}{dt} = (m_v(N) - D_{ev}) h_v(N) - m_{con,o} h_{con,o} - Q_{con} \quad (۱۰۵-۲)$$

معادله دبی بخار تولیدشده و مایع کندانس شده در کندانسور:

$$M_v = \rho_{v,con} A_{cc} L_v \quad (۱۰۶-۲)$$

$$L_v = H_c - L_{con} \quad (۱۰۷-۲)$$

$$M_{con} = \rho_{L,con} A_{cc} L_{con} \quad (۱۰۸-۲)$$

ρ_{con} چگالی مایع کندانس شده، L_{con} ارتفاع مایع کندانس شده، A_{cc} سطح مقطع کندانسور

نکته: ρ_{con} و h_{con} و ρ_v و h_v تابعی از دما می‌باشند.

$$\rho_{L,con} = \rho_{L,con}(T_{con}) \quad (۱۰۹-۲)$$

$$h_{con} = h_{con}(X_{con}, T_{con}) \quad (۱۱۰-۲)$$

تبدیل دبی‌های گذرا مایع کندانس شده متغیرهای حالت:

$$\frac{dM_{con}}{dt} = \frac{d(\rho_{L,con} L_{con} A_{cc})}{dt} = L_{con} A_{cc} \frac{d\rho_{L,con}}{dt} + \rho_{L,con} A_{cc} \frac{dL_{con}}{dt} \quad (۱۱۱-۲)$$

$$\frac{dM_{con}h_{con}}{dt} = \frac{d(\rho_{L,con}L_{con}A_{cc}h_{con})}{dt} \quad (112-2)$$

$$= L_{con}A_{cc}h_{con} \frac{d\rho_{L,con}}{dt} + \rho_{L,con}A_{cc}h_{con} \frac{dL_{con}}{dt} + L_{con}A_{cc}\rho_{L,con} \frac{dh_{con}}{dt}$$

$$\frac{d\rho_{L,con}}{dt} = \frac{d\rho_{L,con}}{dT_{con}} \frac{dT_{con}}{dt} \quad (113-2)$$

$$\frac{dh_{con}}{dt} = \frac{dh_{con}}{dT_{con}} \frac{dT_{con}}{dt} \quad (114-2)$$

با جایگذاری معادله (۱۱۳-۲) در معادله (۱۱۱-۲) داریم:

$$\frac{dM_{con}}{dt} = (L_{con}A_{cc} \frac{d\rho_{L,con}}{dT_{con}}) \frac{dT_{con}}{dt} + (\rho_{L,con}A_{cc}) \frac{dL_{con}}{dt} \quad (115-2)$$

با جایگذاری معادله‌های (۱۱۳-۲) و (۱۱۴-۲) در معادله (۱۱۲-۲) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{dM_{con}h_{con}}{dt} &= \left(L_{con}A_{cc}h_{con} \frac{d\rho_{L,con}}{dT_{con}} + L_{con}A_{cc}\rho_{L,con} \frac{dh_{con}}{dT_{con}} \right) \frac{dT_{con}}{dt} \\ &+ (\rho_{L,con}A_{cc}h_{con}) \frac{dL_{con}}{dt} \end{aligned} \quad (2-2)$$

۳- فاز لوله‌ها

فرض می‌شود که آنتالپی لوله‌های کندانسور برابر است با میانگین آنتالپی آب دریا و تغذیه ورودی افکت‌ها است.

$$\frac{dh_{T,con}}{dt} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{dh_f + dh_{cw}}{dt} \right) \quad (117-2)$$

$$\frac{dT_{feed}}{dt} = \frac{\gamma(Q_{con} + M_{cw}h_{cw} - M_{cw}h_f)}{\rho_{tubes,c} \forall_{tubes,c} \frac{dh_f}{dT}} \quad (118-2)$$

$$(\rho_{L,con}A_{cc}) \frac{dL_{con}}{dt} + \left(L_{con}A_{cc} \frac{d\rho_{L,con}}{dT_{con}} \right) \frac{dT_{con}}{dt} = m_{con} - m_{con,0} \quad (119-2)$$

$$b_{\gamma} = A_{cc}\rho_{L,con} \quad (120-2)$$

$$b_{\gamma} = A_{cc}L_{con} \frac{d\rho_{L,con}}{dT_{con}} \quad (121-2)$$

$$b_{\gamma} = M_{con} - M_{con,o} \quad (122-2)$$

$$b_{\gamma} \frac{dL_{con}}{dt} + b_{\gamma} \frac{dT_{con}}{dt} = b_{\gamma} \quad (123-2)$$

$$b_{\epsilon} = A_{cc} \rho_{L,con} h_{con} \quad (124-2)$$

$$b_{\delta} = \left[A_{cc} L_{con} h_{con} \frac{d\rho_{L,con}}{dT} + A_{cc} L_{con} \rho_{L,con} \frac{dh_{con}}{dT} \right] \quad (125-2)$$

$$b_{\epsilon} = M_{con} h_{con} - M_{con,o} h_{con,o} \quad (126-2)$$

$$b_{\epsilon} \frac{dL_{con}}{dt} + b_{\delta} \frac{dT_{con}}{dt} = b_{\epsilon} \quad (127-2)$$

ماتریس معادلات کندانسور به صورت زیر تشکیل می شود:

$$b_{\gamma} \frac{dL_{con}}{dt} + b_{\gamma} \frac{dT_{con}}{dt} = b_{\gamma} \quad (128-2)$$

$$b_{\epsilon} \frac{dL_{con}}{dt} + b_{\delta} \frac{dT_{con}}{dt} = b_{\epsilon} \quad (129-2)$$

۲-۳ معادلات انتقال حرارت در سرتاسر دسته لوله ها^۱

به دلیل پیش بینی چگالش جزئی بخار درون لوله ها معادلات زیر اجرا شده اند:

$$\epsilon = \frac{M_{hs} \cdot (h_s - h_d)}{Q} \quad (130-2)$$

که ϵ نسبت بین گرمای پنهان^۲ از بخار چگالش شده و نرخ انتقال حرارت ممکن^۳ از طریق لوله ها است. M_{hs}

نشان دهنده نرخ جریان بخار گرمایش و $(h_s - h_d)$ نشان دهنده گرمای نهان چگالش است.

هنگامی که ϵ بزرگ تر از یک باشد یک کمبود در نرخ انتقال حرارت منجر به یک چگالش جزئی از بخار می شود.

¹ Tube bundle

² Latent heat

³ Sensible heat

هنگامی که ε کوچک تر از یک باشد نرخ انتقال حرارت زیاده از مقدار خواسته شده برای کل چگالش بخار است و نرخ انتقال حرارت مؤثر فقط بر اساس گرمای چگالش محاسبه می شود. چنین شرایطی در حلقه منطقی زیر منعکس می شود.

If $\varepsilon < 1$ THEN

$$Q_E = M_{hs} \cdot (h_s - h_d)$$

$$M_d = M_{hs}$$

ELSE

$$Q_E = Q$$

$$M_d = \frac{Q_E}{(h_s - h_d)}$$

END

که M_d نرخ جریان جرم بخار چگالش شده خروجی از لوله های اواپراتور است. در این مورد دوم، یک چگالش جزئی اتفاق می افتد و بخار غیر چگالش شده با بخار تولید شده در افکت ترکیب می شود و غیرمستقیم برای چگالش به درون لوله های افکت بعدی فرستاده می شود. هنگامی که چگالش جزئی اتفاق می افتد، یکی از عواقب طبیعی کاهش در بهره وری دستگاه است.

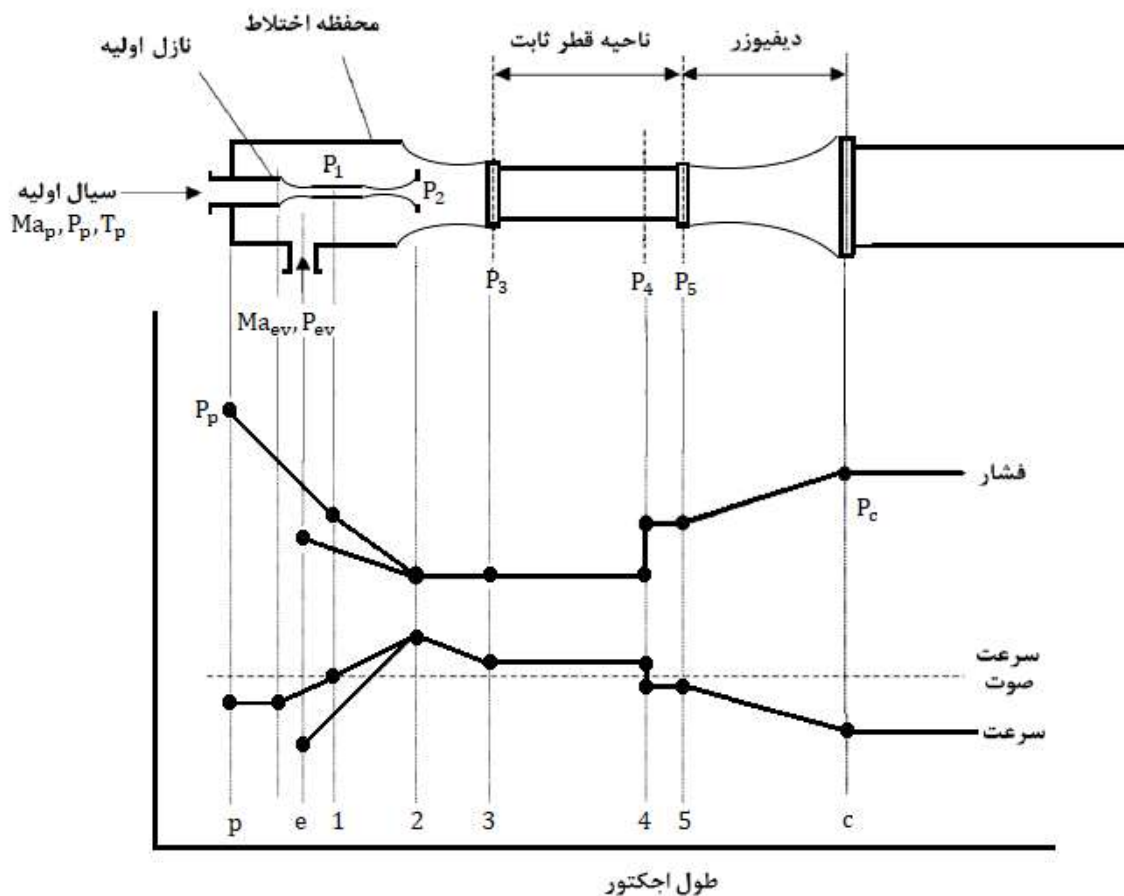
۳-۲ مدل سازی ترموکمپرسور

ترموکمپرسور نقش اساسی را در عملکرد یک آب شیرین کن MED-TVC بازی می کند. واحد TVC برای فشرده سازی مجدد و بازیابی یک بخشی از بخار جذب شده از آخرین افکت استفاده می شود، که به منظور استفاده از بخار گرمایش در اولین افکت است. به منظور اجرای یک ابزار شبیه سازی پیش بینی کننده برای اجکتور حرارتی، یک مدل نظری معروف توسط آل دسوکی و همکاران [۳۸] به دست آمده است.

مدل بر اساس معادلات دینامیکی سیال حرارتی برای جریان تراکم پذیر است، که پروفیل فشار و اعداد ماخ جریان داخل اجکتور 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 MED-TVC که منجر به توصیف دینامیک بسیار سریع رفتار واحد TVC بازمان های مشخصه ی چند میلی ثانیه در مقایسه با زمان های مشخص دقیق یا ساعت های کامل کارخانه MED می شود در نظر گرفته شده است.

قبل از اجرای مدل در فرایند شبیه سازی، معادلات در یک الگوریتم معکوس به منظور شناسایی مقادیر پارامترهای هندسی متناسب با متغیرهای عملیاتی آزمایشگاهی واقعی اجکتور TVC کار شده در تراپانی استفاده شده اند.

مدل اجرا شده برای اجکتور بخار TVC بر اساس مکانیک سیال جریان های تراکم پذیر، مومنتوم و بالانس های انرژی در جهت محوری اجکتور بیان شده است. طرح ساده شده ی اجکتور بخار که از واحدهای MED-TVC به دست آمده است در شکل ۲-۳ مشاهده است.



شکل ۲-۳ طرح ساده‌شده‌ی ترموکمپرسور بخار [۴۳]

۲-۳-۱ معادلات حاکم بر ترموکمپرسور

معادلات به‌دست‌آمده برای ترموکمپرسور بخار به‌صورت زیر است:

۱- عدد ماخ جریان اولیه در موقعیت شماره ۲:

$$M_{p_2} = \sqrt{\frac{2\eta_n}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}{P_2} \right) - 1 \right]} \quad (۲-۱۳۱)$$

۲- عدد ماخ جریان سیال واردشده در خروجی نازل (بعد انبساط آیزونتروپیک):

$$M_{e_r} = \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{P_e}{P_r} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (132-2)$$

۳- عدد ماخ در پایان فرآیند ترکیب (معادله بالانس مومنتوم برای بخارهای وارد شده و محرک بعد ترکیب):

$$M_{\varphi}^* = \frac{M_{p_r}^* + \left[\omega \cdot M_{e_r}^* \cdot \left(\frac{T_e}{T_p} \right)^{0.5} \right]}{\sqrt{\left(1 + \omega \right) \cdot \left(1 + \frac{\omega T_e}{T_p} \right)}} \quad (133-2)$$

$M_{e_r}^*$ و $M_{p_r}^*$ و M_{φ}^* اعداد ماخ بحرانی هستند. (سرعت سیال محلی در شرایط بحرانی بر سرعت صدا تقسیم می شود).

$$M^* = \sqrt{\frac{M^r \cdot (\gamma + 1)}{[M^r \cdot (\gamma - 1)] + 2}} \quad (134-2)$$

۴- عدد ماخ جریان ترکیب شده بعد از شوک موج:

$$M_{\Delta}^r = \frac{M_{\varphi}^r + \frac{2}{\gamma - 1}}{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \cdot M_{\varphi}^r - 1} \quad (135-2)$$

۵- افزایش فشار بعد از شوک موج:

$$P_{\Delta} = P_{\varphi} \frac{1 + \gamma \cdot M_{\varphi}^r}{1 + \gamma \cdot M_{\Delta}^r} \quad (136-2)$$

نکته: P_{φ} برابر با P_r به دلیل فرض ثابت بودن فشار در طول ثابت بودن مقطع لوله اجکتور

۶- رشد فشار در طول پخش کننده^۱ اجکتور:

$$P_c = P_\delta \cdot \left[\frac{\eta_d \cdot (\gamma - 1) \cdot M_\delta^2}{2} + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (137-2)$$

۷- معادلات طراحی می‌توانند برای ارتباط خصوصیات هندسی ترموکمپرسور بخار با متغیرهای عملیاتی

تعریف شده بالا استفاده شوند، مطابق با سه عبارت زیر:

$$A_1 = \frac{m_p}{P_p} \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T_p \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}{\gamma \cdot \eta_n}} \quad (138-2)$$

$$\frac{A_r}{A_1} = \sqrt{\frac{1}{M_{p_r}^2 \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \cdot \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_{p_r}^2 \right) \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}} \quad (139-2)$$

$$\frac{A_1}{A_r} = \frac{P_c}{P_p} \cdot \sqrt{\frac{1}{\left((1+\omega) \left(1 + \left(\omega \left(\frac{T_e}{T_p} \right) \right) \right) \right)}} \cdot \frac{\left(\frac{P_r}{P_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_r}{P_c} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}}{\left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)}} \quad (140-2)$$

معادلات بالا اول به منظور تعیین مقادیر پارامترهای هندسی A_1 و A_r و A_p توسط قراردادن مقادیر تجربی مربوط به فشرده سازی بخار حرارتی مرجع تراپانی که در جدول زیر گزارش شده است، به دست آمده است. سپس معادلات مشابهی برای پیش بینی عملکرد اجکتور تحت شرایط عملیاتی به دست آمده است و همچنین با اطلاعات تجربی قابل دسترس از عملکرد واحد TVC در تراپانی مقایسه شده است.

¹ diffuser

فصل ۳ : طراحی کنترل کننده فازی برای آب شیرین کن چند

اثره

۳-۱ مقدمه

در این فصل اول به توضیح در مورد مبحث کنترل فازی و کاربرد آن پرداخته می‌شود و در ادامه نحوه به‌کارگیری آن در آب‌شیرین‌کن چند اثره بیان می‌شود.

۳-۲ منطق فازی

ارل کاکس بنیان‌گذار و مدیر اجرایی گروه متوس^۱، یک سازمان مشاوره علوم دستگاه‌های پیشرفته و خدمات نرم‌افزاری در چاباکوا شهر نیویورک است. قبل از آن، او فناوری‌های مبتنی بر دانش را تأسیس کرد، جایی که او تلوس^۲، یک سیستم خبره منطق فازی مبتنی بر فریم اصلی را توسعه داد. او در سال ۱۹۹۲ [۴۴] مقاله‌ای را تحت عنوان مبانی فازی منتشر کرد.

منطق فازی به سرعت به یکی از موفق‌ترین فناوری‌های امروزی برای توسعه دستگاه‌های کنترل پیچیده تبدیل شده است. با کمک آن، الزامات پیچیده ممکن است در کنترل‌کننده‌های بسیار ساده، به راحتی نگهداری و ارزان قیمت اجرا شوند. همان فناوری فازی، به شکل استدلال تقریبی، در فناوری اطلاعات نیز در حال ظهور است، جایی که دستگاه‌های پشتیبانی تصمیم و خبره را با قابلیت‌های استدلال قدرتمندی که با حداقل قوانین محدود شده‌اند، فراهم می‌کند.

بر اساس حداقل قوانین البته منطق فازی بهترین رویکرد برای هر مشکل کنترلی نیست. همان‌طور که طراحان به قدرت و بیان آن نگاه می‌کنند، باید تصمیم بگیرند که در کجا از آن استفاده کنند، و همچنین بهترین نحوه مدیریت پروژه‌های نرم‌افزاری بر اساس این فناوری جدید. به‌طور فزاینده‌ای، مدیران پروژه، معماران سیستم و مهندسان طراحی این سؤالات سخت را می‌پرسند: چه نوع پروژه‌هایی می‌توانند از استفاده از منطق

¹ Metus Systems

² Telus

فازی بهره‌مند شوند؟ چگونه پروژه‌ها را با این فناوری کنترل کنیم؟ بهترین راه برای طراحی، توسعه، ارائه و آزمایش دستگاه‌ها با استفاده از منطق فازی و فناوری‌های مرتبط با آن چیست؟

مناسب برای مبهم بودن. منطق فازی روشی برای نمایش آسان فرآیندهای آنالوگ در رایانه دیجیتال است. این فرآیندها مربوط به پدیده‌های پیوسته‌ای هستند که به راحتی به بخش‌های مجزا تقسیم نمی‌شوند و مدل‌سازی مفاهیم درگیر دشوار است - گاهی اوقات به طور فوق‌العاده‌ای در امتداد خطوط ریاضی یا قانون‌گذاری انجام می‌شود.

یک مثال ممکن است یک سیستم ترمز ضد قفل برای یک خودرو باشد. قوانین کنترل برای دستگاهی از این نوع ممکن است شامل متغیرهایی مانند سرعت خودرو، فشار ترمز، دمای ترمز، فاصله بین اعمال ترمزها و زاویه حرکت جانبی خودرو نسبت به حرکت روبه‌جلو باشد. این متغیرها همگی پیوسته هستند و دامنه مقادیر آنها منوط به تفسیر توسط طراح سیستم است.

بنابراین متغیر "دما" ممکن است طیفی از حالت‌ها را داشته باشد: سرد، خنک، متوسط، گرم، گرم، بسیار گرم. با این حال تغییر از یک حالت به حالت دیگر دقیقاً تعریف نشده است. در هیچ نقطه‌ای نمی‌توان گفت که افزایش یک‌دهم درجه باعث تغییر "این گرم است" به "این گرم است". در نتیجه، این ایده که چه چیزی سرد، چه چیزی گرم و چه چیزی داغ است، در معرض تفاسیر متفاوتی توسط کارشناسان مختلف در نقاط مختلف حوزه متغیر است.

این ذهنیت پیامدهای عمیقی برای مدل‌سازی سیستم پیوسته دارد و در قلب قدرت و انعطاف‌پذیری منطق فازی قرار دارد. با منطق فازی، گزاره‌های کنترلی بر اساس این ایده‌های نادقیق از آنچه حالت‌های متغیر را تشکیل می‌دهد، نوشته می‌شوند. به عنوان مثال، یک قانون فازی در سیستم ترمز ضد قفل ممکن است:

- اگر دمای ترمز گرم باشد و سرعت آن خیلی سریع نباشد، فشار ترمز اندکی کاهش می‌یابد، در حالی که یک قانون در یک کنترل‌کننده مشتق انتگرال متناسب معمولی (PID) باید بسیار خاص باشد:

- اگر دمای ترمز بیشتر از ۲۸۰ و سرعت کمتر از ۴۵ باشد، فشار ترمز ۱۹۰ است.

قانون منطق فازی نه تنها طبیعی تر و از نظر فنی گویاتر است، بلکه در محدوده وسیع تری از دمای ترمز و سرعت خودرو فعال تر می شود. درجه ای که متغیرها گرم یا نه خیلی سریع در نظر گرفته می شوند درجه ای است که قانون یک فازی می تواند جایگزین بسیاری از قوانین مرسوم شود که فشار ترمز آرام است. بنابراین یک قانون فازی می تواند جایگزین بسیاری از قوانین مرسوم و اغلب بسیار زیاد شود. و از آنجایی که منطق فازی با ترکیب قوانین و مجموعه های فازی سطح کنترلی ایجاد می کند، به طراحان اجازه می دهد تا کنترل کننده ها را حتی زمانی که درک آن ها از رفتار ریاضی سیستم ناقص است بسازند.

بنابراین چه زمانی استفاده از منطق فازی مناسب است؟ زمانی که یک یا چند متغیر کنترلی پیوسته هستند: زمانی که یک مدل ریاضی از فرآیند وجود ندارد، یا وجود دارد، اما رمزگذاری آن بسیار دشوار است، یا آن قدر پیچیده است که به اندازه کافی سریع برای عملیات بی درنگ ارزیابی نمی شود، یا شامل حافظه بیش از حد روی معماری تراشه تعیین شده؛ زمانی که باید با سطوح بالای نویز محیط برخورد کرد یا استفاده از حسگرهای ارزان قیمت و/یا میکروکنترلرهای کم دقت مهم است (زیرا قابلیت درون یابی منطق فازی با کنترل کننده های ۴ و ۸ بیتی به خوبی کار می کند). و شاید بالاتر از همه، زمانی که یک متخصص در دسترس است که می تواند قوانین زیربنایی رفتار سیستم و مجموعه های فازی را که نشان دهنده ویژگی های هر متغیر است، مشخص کند.

۳-۲-۱ مدل فازی

اجزای دستگاه های مرسوم و فازی کاملاً شبیه هم هستند و عمدتاً در این تفاوت که دستگاه های فازی حاوی فازی ساز ها^۱ هستند، که ورودی ها را به نمایش های فازی خود تبدیل می کنند و فازی زدایی کننده ها^۲ که خروجی منطق فرآیند فازی را به متغیرهای حل دقیق تبدیل می کنند شکل ۳-۱ در یک سیستم فازی، مقادیر

^۱ fuzzifier

^۲ defuzzifier

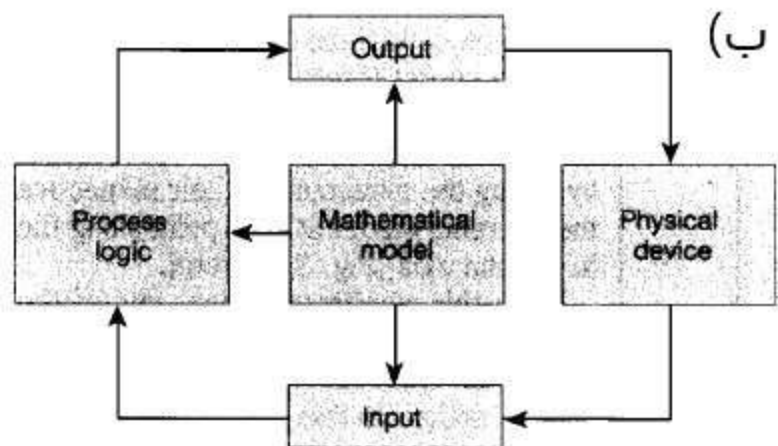
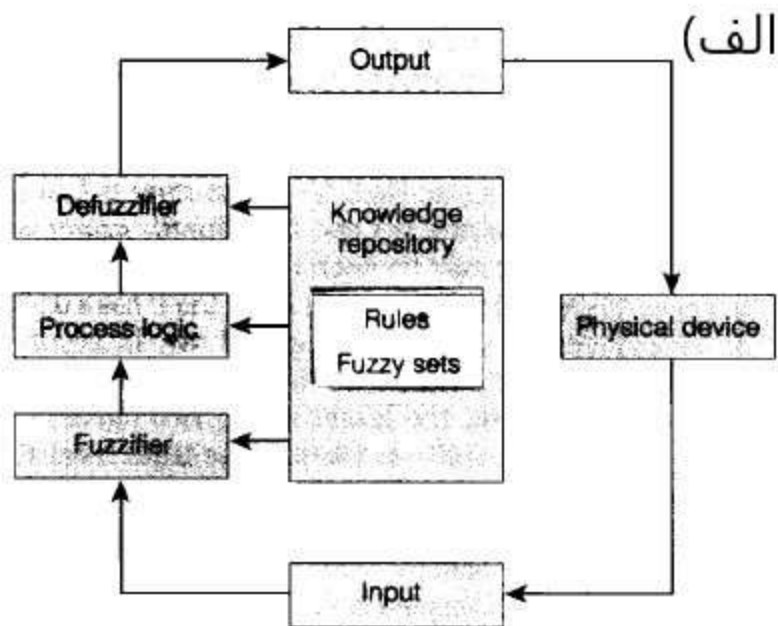
یک ورودی فازی شده تمام قوانین موجود در مخزن دانش را اجرا می‌کند که ورودی فازی شده را به‌عنوان بخشی از فرضیه خوددارند. این فرآیند یک مجموعه فازی جدید تولید می‌کند که هر خروجی یا متغیر راه‌حل را نشان می‌دهد. فازی زدایی یک مقدار برای متغیر خروجی از مجموعه فازی جدید ایجاد می‌کند.

برای دستگاه‌های فیزیکی، مقدار خروجی اغلب برای تنظیم تنظیمات یک محرک استفاده می‌شود که به‌نوبه خود وضعیت سیستم فیزیکی را تنظیم می‌کند. این تغییر توسط حسگرها دریافت می‌شود و کل فرآیند دوباره شروع می‌شود.

در مقابل، یک کنترل‌کننده PID بر اساس یک مدل ریاضی دقیق برخی فرآیندهای خطی است شکل ۱-۳-۱. پایین. این مدل‌ها با استفاده از مکان ریشه یا روش‌های دیگر، مجموعه‌ای از معادلات را توسعه می‌دهند که وضعیت تعادل پایدار سطح کنترل را با ضرایبی که به جنبه‌های متناسب، انتگرال و مشتق سیستم اختصاص داده می‌شوند، توصیف می‌کنند. یک کنترل‌کننده PID یک مقدار حس‌گر دقیق را می‌خواند، مدل ریاضی را اعمال می‌کند و یک خروجی خاص از الگوریتم ریاضی تولید می‌کند.

درحالی‌که مدل PID ممکن است ساده‌تر به نظر برسد و از این‌رو، نمایش اقتصادی‌تر داشته باشد، معمولاً برعکس این حالت بیشتر اوقات صادق است. کنترل‌کننده‌های فازی درواقع نمونه‌سازی و پیاده‌سازی ساده‌تر، توصیف و بازیابی ساده‌تر دارند و می‌توانند با دقت بیشتری در زمان کمتری نگهداری و گسترش داده شوند. علاوه بر این، آن‌ها به دلیل اتکا به قوانین و دانش، به محیط خود چیزی می‌دهند که لطفی زاده^۱ آن را «ضریب هوش ماشینی» بالاتر می‌نامد.

^۱ پدر منطق فازی



شکل ۳-۱ الف) در یک سیستم فازی معمولی، ورودی از یک منبع خارجی خوانده می‌شود و قبل از پردازش توسط منطق فازی، فازی سازی می‌شود. خروجی منطق فرآیند قبل از ارسال به سیستم فیزیکی خارجی تحت کنترل، فازی زدایی می‌شود. ب) یک سیستم کنترل معمولی [پایین سمت چپ] ساختار کلی بسیار مشابهی دارد، اما بدون عناصر فازی [۴۴].

۳-۲-۲ توربین بخار

طراحی یک کنترل کننده فازی ساده برای یک توربین بخار نحوه عملکرد این فرآیند را نشان می دهد. طراحی عملکرد دریچه گاز توربین بر اساس دو متغیر کنترلی است: دما و فشار. برای ساختن کنترل کننده ای که رابطه بین ورودی ها و خروجی ها را نشان می دهد، ابتدا هر متغیر کنترلی باید به مجموعه ای از مناطق کنترل تجزیه شود [شکل ۳-۲، بالا و وسط] و خروجی یا متغیر حل شده داخل مجموعه ای از مناطق فازی مجدداً تعریف شود [شکل ۳-۲، پایین].

هنگامی که مجموعه های فازی تعریف شدند، مدل مفهومی با نوشتن قوانینی که اقدامات انجام شده بر روی هر ترکیبی از متغیرهای کنترل را توصیف می کند، تکمیل می شود. برخی از این قوانین ممکن است به صورت زیر ظاهر شوند:

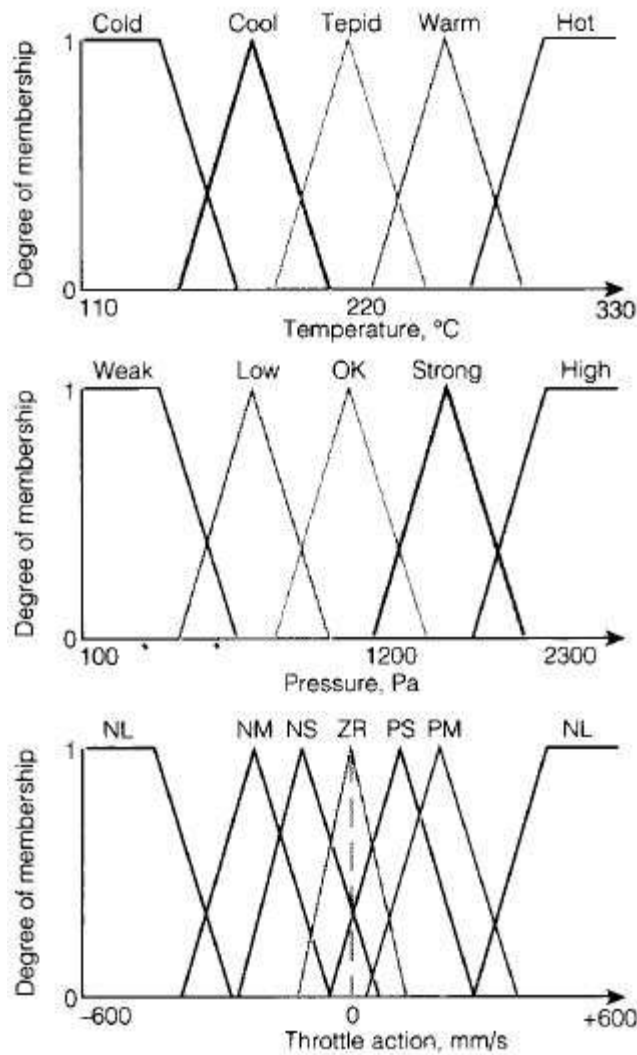
۱. اگر دما سرد و فشار ضعیف باشد، دریچه گاز PL است.

۲. اگر معتدل سرد است و فشار پایین است، دریچه گاز PM است.

۳. اگر دما سرد و فشار خوب باشد، دریچه گاز ZR است.

۴. اگر دما سرد و فشار قوی باشد، دریچه گاز NM است.

آنچه برای تکمیل این مثال مورد نیاز است، وسیله ای برای تبدیل این مجموعه ها و قوانین فازی ورودی به مجموعه فازی خروجی و سپس به یک خروجی واضح برای کنترل دریچه گاز است. توجه داشته باشید که یک مدل فازی به یک معنا یک پردازنده موازی است. تمام قوانینی که هرگونه حقیقتی در محل خود دارند، شلیک می شوند و به مجموعه فازی خروجی کمک می کنند، مجموعه ای که متغیر کنترل عمل دریچه گاز را در مثال توربین بخار نشان می دهد.

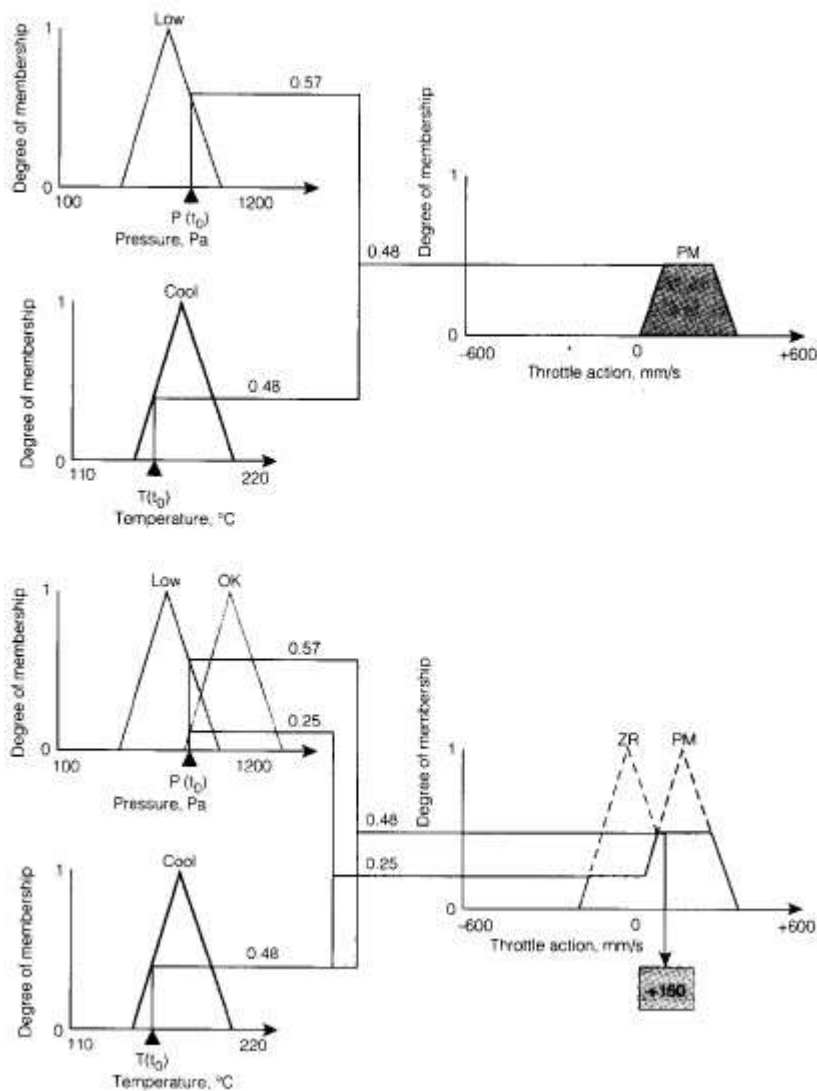


شکل ۳-۲ هر دو ورودی (دما و فشار) و خروجی (عمل دریچه گاز) به عنوان مناطق فازی در یک سیستم منطق فازی تعریف می شوند. برای متغیر عملکرد دریچه گاز، مناطق عبارت اند از: منفی بزرگ (NL^1)، منفی متوسط (NM^2)، منفی کوچک (NS^3)، صفر (ZR^4)، مثبت کوچک (PS^5)، مثبت متوسط (PM^6) و مثبت بزرگ (PL^7) [۴۴].

فرض کنید در زمان معین t ، حس گرهای سیستم فشار توربین را $P(t)$ و دما را $T(t)$ تعیین می کنند [شکل ۳-۳]. همان طور که شکل نشان می دهد، در یک منطقه واحد از متغیر T یعنی Cool قرار می گیرد.

¹ Negative Large
² Negative Medium
³ Negative Small
⁴ Zero
⁵ Positive Small
⁶ Positive Medium
⁷ Positive large

اما $P(t)$ درجاتی از عضویت در دو ناحیه مجموعه فازی خود دارد: Low و OK. این ترکیب باعث ایجاد قوانین شماره ۲ و شماره ۳ می‌شود.



شکل ۳-۳ مکان‌های متصل شده توسط یک AND با در نظر گرفتن درجه عضویت کوچک‌تر از این دو به‌عنوان مقدار ترکیب [بالا] ترکیب می‌شوند. برای ترکیب قوانین، آن‌ها را باهم یا با در نظر گرفتن بزرگ‌تر از دو مقدار به‌عنوان مقدار ترکیب در هر نقطه در محور افقی [پایین] [۴۴].

این دو قانون باید به نحوی باهم ترکیب شوند تا یک خروجی سیستم را تشکیل دهند. روش سه مرحله‌ای زیر نشان می‌دهد که چگونه:

- برای بیان هر فرض که با یک AND متصل می‌شود، حداقل درستی عبارات را به‌عنوان سطح درستی فرض در نظر بگیرید.

- مجموعه فازي خروجی در حال ساخت در سطح درستی فرض کوتاه کنید.

- مجموعه فازي اصلاح‌شده جدید را در مجموعه فازي متغیر خروجی کپی کنید. اگر آن ناحیه خالی نیست، آن را با محتویات فعلی ترکیب کنید و حداکثر ناحیه فازي جدید و ناحیه فازي فعلی را در هر نقطه از دامنه (در امتداد محور افقی) بگیرید. به عبارت دیگر، اگر منطقه خالی نیست، سپس OR خروجی‌ها باهم دیگر.

با بازگشت به مثال توربین بخار، قانون شماره ۲ (اگر دما خنک باشد و فشار پایین باشد، پس عمل دریچه گاز PM است)، ممکن است مشاهده شود که T دارای ۰,۴۸ درجه عضویت در Cool و P دارای ۰,۵۷ درجه عضویت در Low. بنابراین، مطابق با مرحله اول رویه، کمترین دو رقم یعنی ۰,۴۸۴ به‌عنوان سطح درستی فرض در نظر گرفته می‌شود. سپس مطابق با مرحله دوم، سطح خروجی قانون شماره ۲، به‌عنوان مثال PM در آن سطح کوتاه شده و در مجموعه فازي متغیر خروجی کپی می‌شود [شکل. ۳-۳، بالا].

هنگامی که قانون شماره ۳ فعال می‌شود، مجموعه فازي ZR نیز در اصل خود کوتاه می‌شود (کمتر از ۰,۲۵ و ۰,۴۸) و سپس در ناحیه عمل دریچه گاز خروجی کپی می‌شود. اما از آنجایی که منطقه خالی نیست، این مجموعه فازي اصلاح‌شده با مجموعه فازي PM با حداکثر درجه عضویت مربوطه در هر نقطه در امتداد محور افقی ترکیب می‌شود [شکل. ۳-۳، پایین].

از این منطقه ترکیبی، یکی از چندین فن فازي سازی برای تولید یک مقدار مورد انتظار برای عمل دریچه گاز اعمال می‌شود. در این حالت با استفاده از مرکز ثقل یا مرکز ثقل ناحیه ترکیبی، مقدار +۱۵۰ میلی‌متر بر ثانیه تولید می‌شود.

این مقدار برای تنظیم دریچه گاز استفاده می‌شود. پس‌از آن، حس‌گرهای فشار و دما اندازه‌گیری‌های جدیدی را انجام می‌دهند و چرخه را دوباره شروع می‌کنند.

۳-۲-۳ روش‌ها

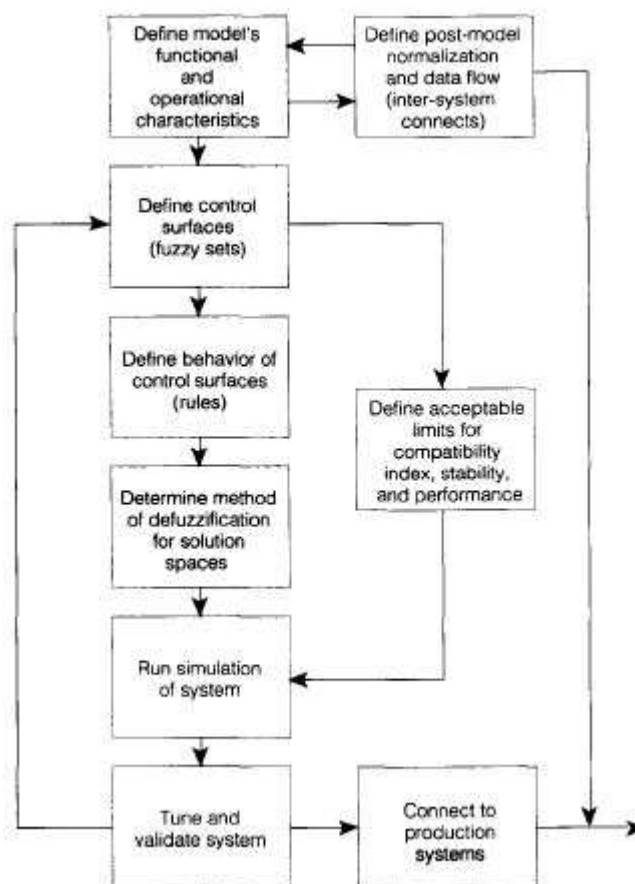
اگرچه مثال قبلی نحوه عملکرد دستگاه‌های فازی را نشان می‌دهد، اما نکات کمی در مورد چگونگی مشخص کردن، توسعه و ارائه یکی ارائه می‌دهد. با این حال، داشتن یک متدولوژی طراحی خوب برای دستگاه‌های فازی مهم است، اگر فقط به این دلیل که برای اکثر طراحان جدید هستند، که بنابراین هیچ تجربه‌ای ندارند که برای راهنمایی بر آن تکیه کنند.

مدل‌های فازی، خواه در کنترل فرآیند یا فناوری اطلاعات به کار گرفته شوند، تمایل دارند از چرخه توسعه برنامه‌های کاربردی مشابهی پیروی کنند. شکل ۳-۴. روش‌شناسی تلاش می‌کند رویه‌ای را رسمی‌سازی و ساختار دهد که در آن طراحی مفهومی روی کاغذ انجام می‌شود، و مراحل بعدی یک چرخه تکراری مدل‌سازی و شبیه‌سازی، با استفاده از ابزارهای توسعه منطق فازی بر روی کامپیوتر انجام شد و تا زمانی ادامه یافت که مدل مطابق دلخواه رفتار کند. نمی‌توان بیش‌ازحد تأکید کرد که بخش کاغذی فرآیند حیاتی است: درک مکانیک پشت رفتار یک سیستم، و شناسایی پویایی سیستم از نظر مدل ورودی-فرآیند-خروجی معمولی بخش کاملاً ضروری طراحی سیستم فازی است.

۳-۲-۳-۱ چهار گام

چهار مرحله از چرخه نشان داده شده در شکل ۳-۴ برای این فرآیند مرکزی هستند. در اول، "تعریف ویژگی‌های عملکردی و عملیاتی مدل"، هدف تعیین ویژگی‌های معماری سیستم، و همچنین تعریف ویژگی‌های عملیاتی خاص مدل فازی پیشنهادی است. سیستم همیشه در قالب یک مدل ورودی-فرآیند-خروجی توصیف می‌شود.

اولین گام در طراحی یک سیستم فازی از فن‌های تجزیه و تحلیل استفاده شده توسط تحلیلگران دستگاه‌های کاربردی تجاری و مهندسین دانش دستگاه‌های هوشمند پیروی می‌کند.

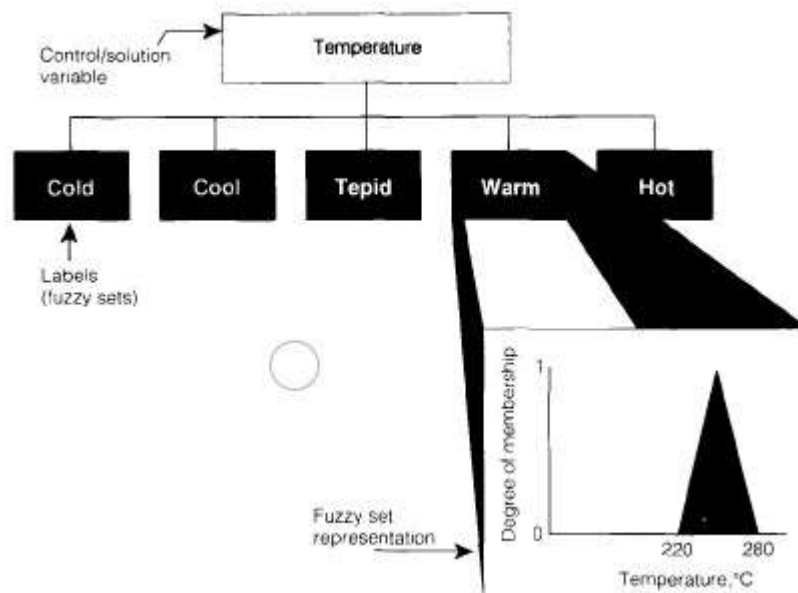


شکل ۳-۴ اکثر پروژه‌های موفق توسعه منطق فازی از یک چرخه توسعه تکراری مانند این پیروی می‌کنند. چهار مرحله اصلی در فرآیند طراحی را ارسال کرد [۴۴].

وظیفه طراح سیستم فازی در تعریف این است که چه اطلاعاتی (نقاط داده) به سیستم جریان می‌یابد، چه تغییرات اساسی روی داده‌ها انجام می‌شود و چه عناصر داده‌ای از سیستم خروجی می‌شود. حتی اگر طراح فاقد یک مدل ریاضی از فرآیند سیستم باشد، ضروری است که او درک عمیقی از این سه پدیده داشته باشد. این مرحله همچنین برای تعریف دقیق محل قرارگیری زیرسیستم فازی در کل معماری سیستم است که تصویر

واضحی از نحوه جریان ورودی و خروجی به زیرسیستم و از آن ارائه می‌دهد. قراردادن زیرسیستم فازی در سیستم کلی به طراح کمک می‌کند تا تعداد و محدوده ورودی‌ها و خروجی‌های موردنیاز را تخمین بزند. همچنین مرحله طراحی ورودی-فرآیند-خروجی را تقویت می‌کند. و معمولاً بهتر است قبل از پرداختن به جزئیات ورودی و خروجی انجام شود زیرا دومی ممکن است تحت تأثیر محلی سازی قرار گیرد.

در مرحله دوم، "سطوح کنترل را تعریف کنید"، هر متغیر کنترل و حل در مدل فازی به مجموعه‌ای از مناطق فازی تجزیه می‌شود. به این مناطق، نام‌های منحصربه‌فردی که برچسب نامیده می‌شوند، در دامنه متغیر داده می‌شوند. درنهایت، یک مجموعه فازی که به‌صورت معنایی مفهوم مرتبط با برچسب را نشان می‌دهد ایجاد می‌شود [شکل ۳-۵].



شکل ۳-۵ رابطه بین متغیرها، برچسب‌ها و مجموعه‌های فازی ساده اما مهم است. بدیهی است که نام برچسب‌ها باید منحصربه‌فرد باشد و از نظر معنایی با مفاهیمی که هرکدام نشان‌دهنده آن هستند مرتبط باشد [۴۴].

برخی از قوانین سرانگشتی به تعریف مجموعه‌های فازی کمک می‌کنند. اول، تعداد برچسب‌های مرتبط با یک متغیر به‌طور کلی باید عددی فرد بین پنج تا نه باشد. دوم، هر برچسب باید تا حدودی با همسایگان خود همپوشانی داشته باشد. این همپوشانی، درواقع چیزی است که به یک کنترل‌کننده فازی سطح صاف و پایدار آن را می‌دهد. همپوشانی باید بین ۱۰ تا ۵۰ درصد فضای همسایه باشد و مجموع نقاط عمودی همپوشانی باید همیشه کمتر از یک باشد.

درنهایت، چگالی مجموعه‌های فازی باید در اطراف نقطه کنترل بهینه سیستم بالاترین باشد و با افزایش فاصله از آن نقطه باید نازک شود. این قانون به‌وضوح در متغیر عمل دریچه گاز در مثال توربین بخار اعمال می‌شود، جایی که برچسب‌ها در وسط دامنه به هم چسبیده‌اند اما فاصله بیشتری به سمت لبه‌ها دارند.

مرحله سوم، «تعریف رفتار سطوح کنترل»، شامل نوشتن قوانینی است که مقادیر ورودی را به ویژگی‌های مدل خروجی مرتبط می‌کند. زمانی که متغیرها پیوسته باشند و یا مدل‌های ریاضی وجود نداشته باشند، منطق فازی به بهترین وجه برازنده می‌شود. درجایی که گزاره‌های فازی به شکل " $x \ Y$ " یا " $x \ Y$ نیست" هستند، x یک متغیر اسکار و Y یک مجموعه فازی مرتبط با آن متغیر است.

چنین گروهی از قوانین یک حافظه انجمنی فازی را تشکیل می‌دهند. هنگامی که مجموعه‌ای از مقادیر ورودی خوانده می‌شود، هر یک از قوانینی که هرگونه حقیقتی در مقدمه خود دارند، اجرا می‌شوند. از آنجایی که این قوانین به‌جای رویه‌ای، اظهاری هستند، ترتیب آن‌ها در مخزن دانش بی‌اهمیت است. با این وجود، برای حفظ قابلیت نگهداری، توصیه می‌شود که قوانین بر اساس متغیرهای کنترل مقدماتی خود گروه‌بندی شوند.

به‌طورکلی، تعداد قوانین موردنیاز یک سیستم به‌سادگی با تعداد متغیرهای کنترل مرتبط است. برای مثال سیستم توربین بخار دارای دو متغیر کنترل دما و فشار است که هرکدام به پنج ناحیه فازی تقسیم می‌شوند. از آنجایی که درمجموع ۲۵ ترکیب ورودی ممکن وجود دارد، سیستم به ۲۵ قانون نیاز دارد.

در برخی موارد، می‌توان از قوانین کمتری استفاده کرد، اما این کار با خطراتی همراه است. قوانین نشان‌دهنده دانش هستند، بنابراین اگر هر یک از آن‌ها حذف شود، دانش از دانش سیستم حذف می‌شود که اگر سیستم بعداً اصلاح شود ممکن است مهم شود.

چهارمین مرحله مرکزی، «انتخاب یک روش فازی زدایی»، آخرین بخش ایجاد مدل فازی پایه است. راه‌های مختلفی برای تبدیل مجموعه فازی خروجی به یک متغیر حل واضح وجود دارد، اما دو روش رایج عبارت‌اند از حداکثر ترکیبی و ممان مرکب یا مرکز.

روش مرکز ثقل، مرکز ثقل فضای فازی نهایی را می‌گیرد و نتیجه‌ای ایجاد می‌کند که به تمام قوانین حساس است - به‌ویژه، نتایج تمایل دارند به آرامی در سطح کنترل حرکت کنند. از سوی دیگر، حداکثر مرکب نتیجه‌ای ایجاد می‌کند که به حقیقتی که توسط قاعده واحدی که بالاترین صدق محمول را دارد، حساس است. به‌طور کلی، برنامه‌های کاربردی کنترل فرآیند از centroid استفاده می‌کنند، درحالی‌که برنامه‌های کاربردی مبتنی بر اطلاعات مانند ارزیابی ریسک و تجزیه و تحلیل زمین از حداکثر ترکیبی استفاده می‌کنند.

هنگامی که مدل فازی ساخته شد، فرآیند شبیه‌سازی و چرخه اولیه آغاز می‌شود. در این ضمیمه به روش، مدل با موارد آزمایش شناخته‌شده مقایسه می‌شود تا نتایج آن تأیید شود. هنگامی که نتایج آن‌طور که می‌خواهید نیست، تغییراتی در توصیف مجموعه فازی یا نگاشت‌های کدگذاری شده در قوانین ایجاد می‌شود. ابزارهایی برای کمک به مدیران پروژه و طراحان سیستم در ارزیابی مدل‌های فازی و جداسازی مشکلات در سطح مجموعه فازی یا قوانین موجود هستند. این ابزارها عواملی مانند سازگاری آماری بین مدل و داده‌های بستر آزمایش و پایداری مدل بر اساس از دست دادن اطلاعات را اندازه‌گیری می‌کنند. با این حال، به‌طور کلی، یک روش فقط به اندازه درک طراح از مسئله خوب خواهد بود.

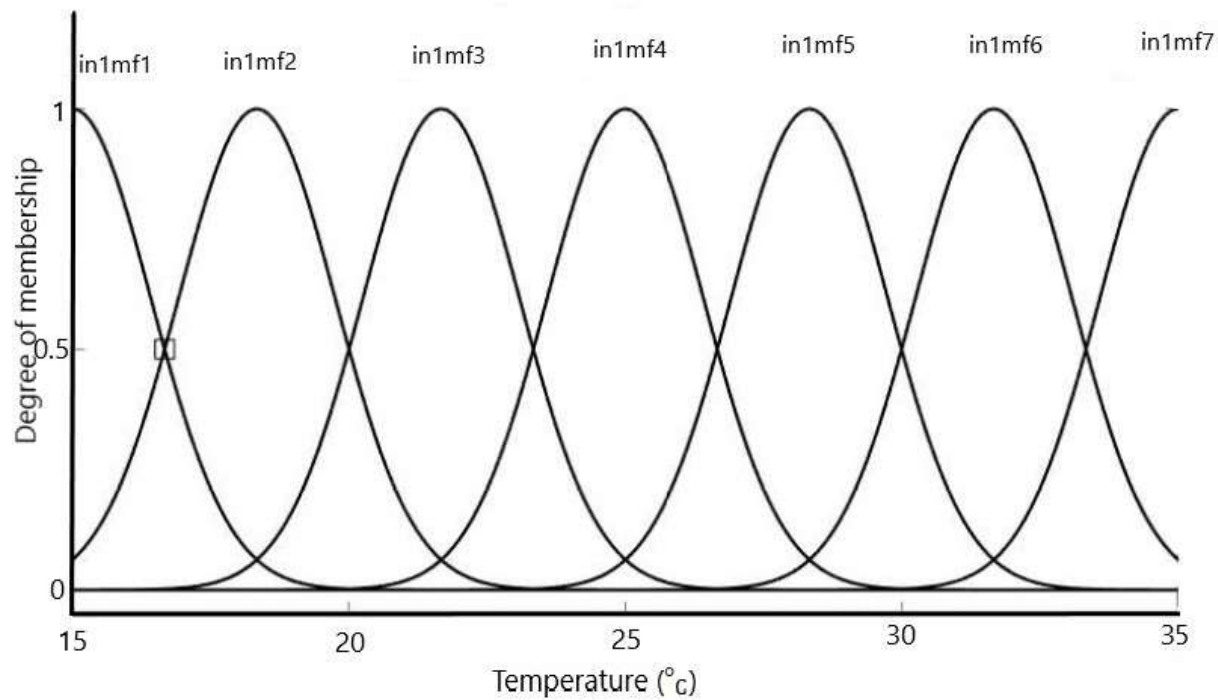
۳-۳ به کارگیری منطق فازی در آب شیرین کن MED-TVC

طراحی یک کنترل کننده فازی ساده برای یک آب شیرین کن MED-TVC نحوه عملکرد این فرآیند را نشان می دهد. طراحی عملکرد تغییرات دبی آب دریا بر اساس دو متغیر کنترلی است:

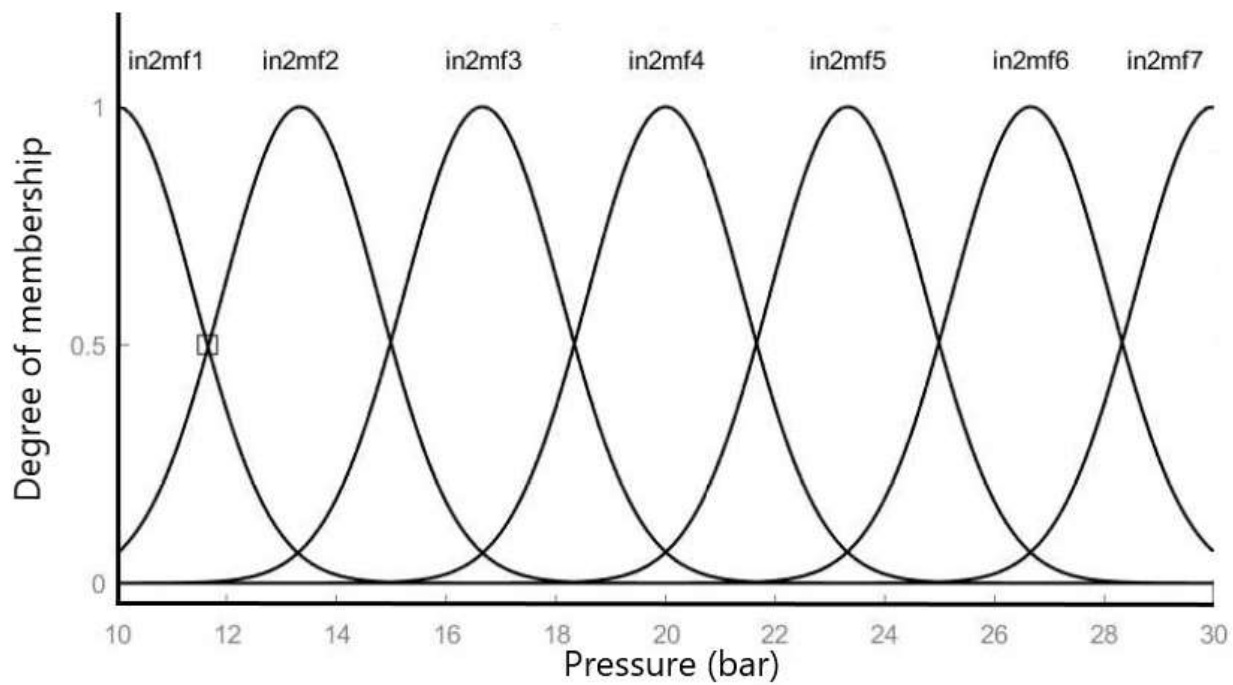
۱- دما آب دریا

۲- فشار بخار محرک

برای کنترل دستگاه های MED از یک کنترل کننده سوگنو استفاده شده است. رویکرد این نوع کنترل ها شبیه کنترل کننده های زمان بندی بهره هستند. در این روش چندین کنترل کننده تعریف می شود که هر یک از آنها در یک ناحیه خاص از فضای ورودی کنترل کننده معتبر است. خروجی کنترل کننده کلی با درونیابی کنترل کننده های خطی محلی به دست می آید. به طور مثال در دستگاه های MED-TVC اگر فشار بخار محرک ورودی به سیستم ۱۰ بار باشد و دما آب دریا ورودی به سیستم ۱۵ درجه سانتی گراد باشد. آنگاه کنترل کننده فازی باید متوجه شود که دبی آب دریا را به ۲۵۲ کیلوگرم بر ثانیه کاهش دهد. همان طور که در شکل های ۳-۶ و ۳-۷ مشاهده می کنید، به ترتیب متغیرهای کنترلی دما آب دریا و فشار بخار محرک ورودی به سیستم به مجموعه ای از مناطق کنترل تجزیه می شود.



شکل ۳-۶ تعریف دما آب دریا به عنوان منطقه فازی در سیستم فازی



شکل ۳-۷ تعریف فشار بخار محرک به عنوان منطقه فازی در سیستم فازی

فصل ۴ : نتایج

۴-۱ مقدمه

جهت اعتبار سنجی^۱ مدل سازی انجام شده برای حالت پایا و ناپایا آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور، از داده های تجربی نیروگاه آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور طرابلس^۲ [۲۵] 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 [۴] اعتبار سنجی شده است. بنابراین در این فصل به بررسی و شبیه سازی مدل تجربی پرداخته و نتایج حاصل از آن در ادامه نمایش داده می شود.

۴-۲ حل عددی

در این پژوهش با استفاده از روش گام متغیر-مرتبه متغیر^۳ دستگاه معادلات دیفرانسیل معمولی غیرخطی مرتبه اول برای کندانسور و هر اواپراتور به طور هم زمان از طریق سیمولینک متلب حل می شوند. نتایج حل با روش دورمند-پرینس^۴ نیز مقایسه شده است که بر هم منطبق بوده اما روش گام متغیر-مرتبه متغیر بسیار سریع تر از روش دورمند-پرینس برای این مسئله به پاسخ نهایی دست یافت. در ابتدا پاسخ حالت پایای سیستم از طریق کد پایا به دست می آید و نتایج آن در ضرایب مورد نیاز کد ناپایا قرار می گیرد. در حالت پایا دما، دبی تغذیه ورودی، دبی آب نمک خروجی، دبی بخار خروجی و شوری آب در هر افکت محاسبه شده است و نتایج حل پایا به عنوان یک مرجع برای محاسبات پاسخ دینامیکی استفاده می شود. در مدل ناپایا دما، ارتفاع مایع و شوری در هر گام زمانی برای هر افکت محاسبه می شود. همچنین دما و ارتفاع آب چگالیده کندانسور و دمای آب ورودی به اواپراتورها نیز حاصل می شود. میزان نمک و جریان بخار بر اساس سطح مایع و فشار اشباع در هر افکت بررسی شده است. نسبت مکش کمپرسور حرارتی در هر گام زمانی با استفاده از رابطه های داده شده در بخش

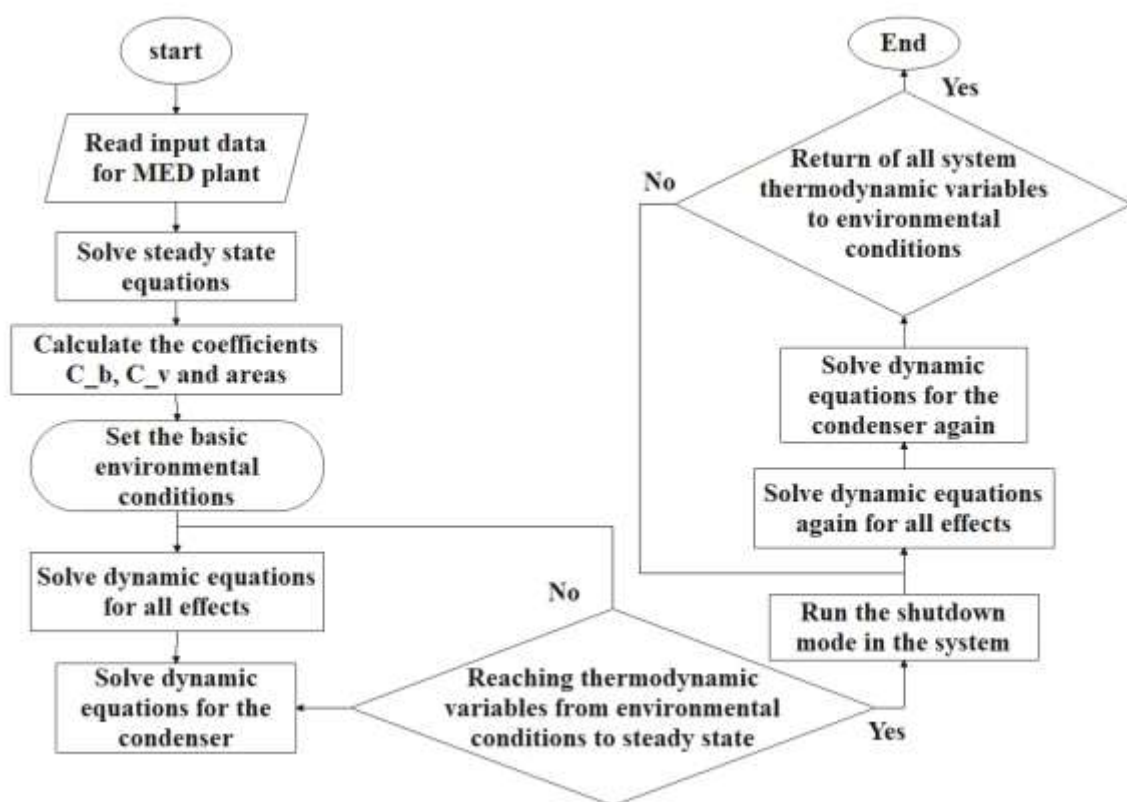
¹ validation

² Tripoli

³ Variable Step Variable Order (VSVO)

⁴ Dormand-Prince

قبل و مقادیر فشار در آخرین افکت و فشار بخار محرک تغییر می‌کند. گام‌های زمانی به صورت خودکار توسط حل‌گر^۱ *ODE15s* 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 اجکتور خاموش می‌شود و مجدداً تمامی متغیرهای ترمودینامیکی سیستم به شرایط محیطی خود بازمی‌گردند. فلوچارت مدل در شکل ۴-۱ ارائه شده است.



شکل ۴-۱ فلوچارت حل مدل ناپایا دستگاه آب شیرین کن چند اثره

¹ Solver (in MATLAB)

۳-۴ اعتبار سنجی مدل پایا

نتایج حاصل از حل پایا در برابر داده‌های واقعی کارخانه تجاری آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور در طرابلس [۲۵] بررسی می‌شود. در جدول ۴-۱ پارامترهای عملکردی محاسبه‌شده در مدل حاضر با داده‌های مدل مقاله السید [۴] و مقدار واقعی دستگاه مقایسه شده است. بااینکه در مدل‌سازی حالت‌پایا از فرضیاتی برای ساده‌سازی معادلات استفاده‌شده است، نتایج مدل‌سازی در حالت‌پایا ارتباط بسیار نزدیکی با داده‌های واقعی نیروگاه طرابلس [۲۵] و مدل السید [۴] دارد که دارای میانگین خطای کمتر از ۳ درصد با مقادیر واقعی و میانگین خطای کمتر از ۱/۳ درصد با مقادیر مدل السید [۴] است.

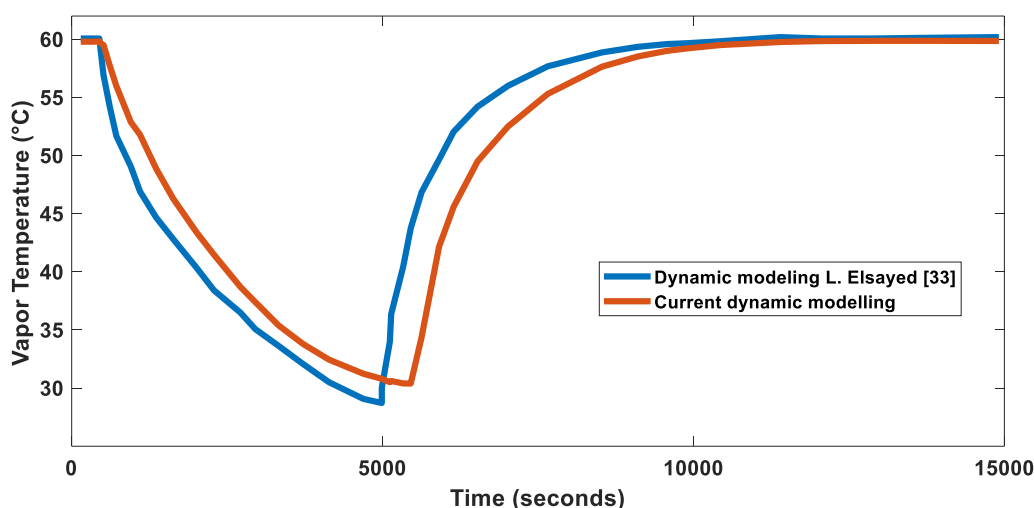
جدول ۴-۱ اعتبار سنجی نتایج مدل‌سازی آب‌شیرین‌کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور در مقابل نتایج داده‌های واقعی نیروگاه طرابلس [۲۵]

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

۴-۴ اعتبار سنجی مدل ناپایا

داده‌های پاسخ دینامیکی منتشرشده کمی برای آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره و فلش چندمرحله‌ای وجود دارد. بنابراین نتایج مدل ناپایا با یک دستگاه آب‌شیرین‌کن سه اثره از نوع اوپراتورها پوسته ولوله تحت کنترل آزمایشگاه با تولید کل آب شیرین ۳ مترمکعب در روز مقایسه شده است [۴۵]. منبع حرارتی مورد استفاده در

این آب‌شیرین‌کن یک جریان آب گرم است. برای بررسی اعتبار مدل پویا در شرایط مشابه تجربی، حرارت ارائه‌شده به اولین اثر به‌عنوان یک پارامتر کنترلی در مدل عددی تنظیم‌شده 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 به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مدل پویا و داده‌های ارائه‌شده در دستگاه [۴۵] در شکل ۲-۴ نشان‌داده‌شده است. ماکزیمم خطای نسبی بین داده‌های واقعی و شبیه‌سازی‌شده برای اثر اول ۳۰/۵۳ درصد، مینیمم خطای نسبی ۰/۳۳ درصد و میانگین خطای نسبی ۶/۸۹ درصد است که نشان‌دهنده توافق خوب بین شبیه‌سازی و داده‌های تجربی اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲-۴ اعتبارسنجی مدل ناپایا حاضر و مدل مقاله السید [۴۵]

۴-۵ نتایج و بحث

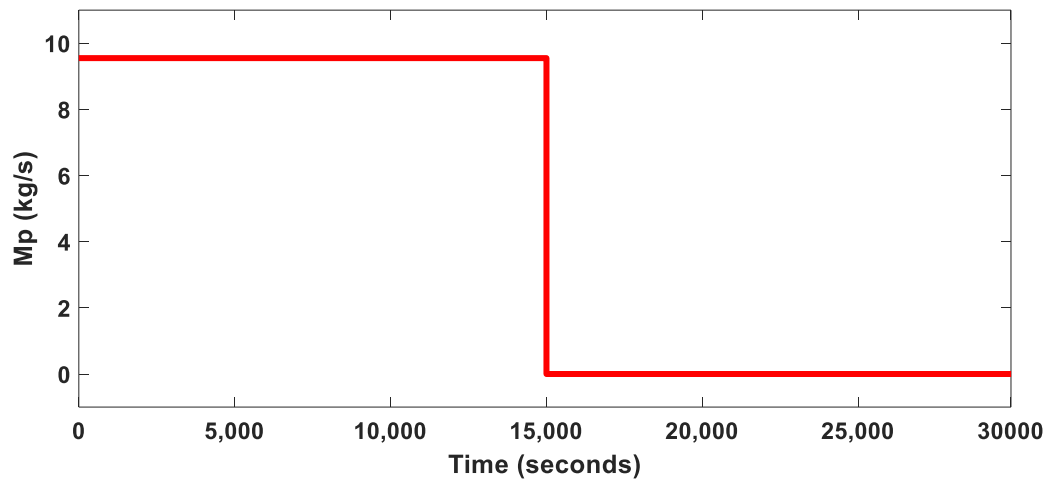
به‌منظور مطالعه پاسخ دینامیکی آب‌شیرین‌کن‌های چند اثره همراه با ترموکمپرسور، مدل توسعه‌یافته برای یک کارخانه در مقیاس صنعتی واقع در طرابلس، لیبی [۲۵] استفاده می‌شود. تمام داده‌های موجود برای این کارخانه در نظر گرفته‌شده است. در کار حاضر از دو سناریو برای آزمون گرفتن استفاده‌شده است. در حالت اول

سیستم در حالت خاموش است، یعنی تمامی متغیرهای کمی سیستم اعم از دبی محرک ترموکمپرسور، دبی بخار افکت‌ها، دبی آب‌نمک و آب تغذیه در افکت‌ها و ارتفاع سطح آب‌نمک در هر افکت در میزان صفر قرار دارد. همچنین دمای داخل افکت‌ها و لوله‌های مبدل نیز در شرایط دمای محیط است. با راه‌اندازی سیستم، تمامی متغیرها شروع به افزایش می‌کنند تا به مقدار پایای خود برسند. در آزمون دوم، دستگاهی که در حالت روشن است و تمامی متغیرهای آن پایا شده‌اند با اعمال خاموشی (به صفر رساندن دبی محرک ترموکمپرسور) در سیستم متغیرهایی نظیر دبی بخار تولیدشده و دمای هر افکت شروع به کاهش کرده تا به حالت اولیه و شرایط محیطی خود برگردند. اما از آنجاکه دبی تغذیه در هنگام خاموشی قطع نمی‌شود (زیرا جزو متغیرهای موردبررسی این مقاله نیست) ارتفاع سطح آب‌نمک و دبی آن در هر افکت افزایش خواهد یافت. در هر آزمایش رابطه متغیرهایی نظیر دبی بخار تولیدشده، دبی آب‌نمک و ارتفاع سطح آب‌نمک در هر افکت با زمان مشخص خواهد شد. هنگامی که تمامی شرایط اولیه کارخانه مطابق جدول ۴-۲ در شرایط محیطی تعریف‌شده‌اند، پاسخ دینامیکی کارخانه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

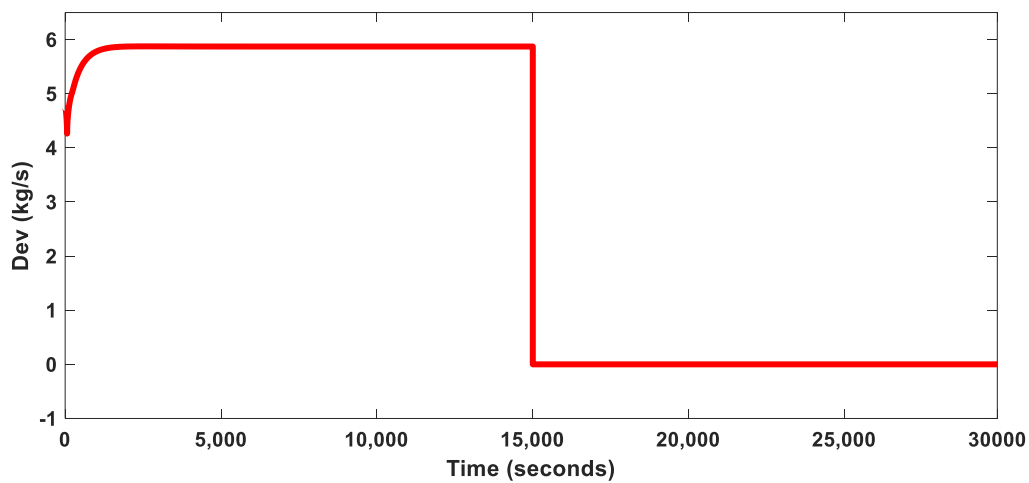
جدول ۴-۲ شرایط اولیه مدل‌سازی

شرایط اولیه	مقدار	شرایط اولیه	مقدار	شرایط اولیه	مقدار
دمای کندانسور ($^{\circ}\text{C}$)	۳۱٫۵	ارتفاع مایع کندانسور (m)	۰٫۰۰۱	دمای آب تغذیه ($^{\circ}\text{C}$)	۳۱٫۵
شوری آب‌نمک افکت اول	۳٫۵٪	ارتفاع آب‌نمک افکت اول (m)	۰٫۰۰۱	دمای بخار افکت اول ($^{\circ}\text{C}$)	۳۱٫۵
شوری آب‌نمک افکت دوم	۳٫۵٪	ارتفاع آب‌نمک افکت دوم (m)	۰٫۰۰۱	دمای بخار افکت دوم ($^{\circ}\text{C}$)	۳۱٫۵
شوری آب‌نمک افکت سوم	۳٫۵٪	ارتفاع آب‌نمک افکت سوم (m)	۰٫۰۰۱	دمای بخار افکت سوم ($^{\circ}\text{C}$)	۳۱٫۵
شوری آب‌نمک افکت چهارم	۳٫۵٪	ارتفاع آب‌نمک افکت چهارم (m)	۰٫۰۰۱	دمای بخار افکت چهارم ($^{\circ}\text{C}$)	۳۱٫۵

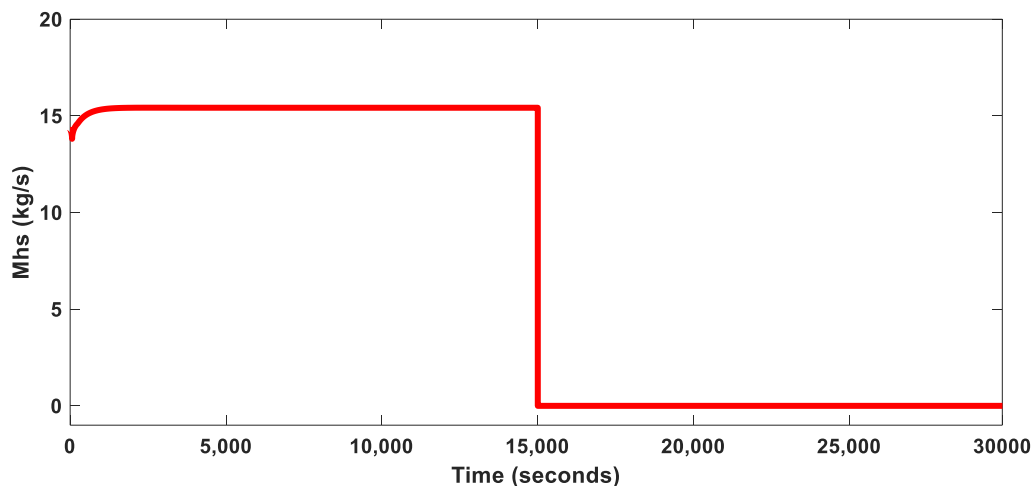
با اعمال خاموشی در سیستم جریان بخار محرک ورودی به ترموکمپرسور قطع می‌شود، در نتیجه هیچ‌گونه بخاری به سیستم وارد نمی‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌کنید با اعمال خاموشی در زمان ۱۵۰۰۰ ثانیه مقدار جریان بخار محرک صفر می‌شود.



شکل ۲-۴ تغییرات جریان بخار محرک به ترموکمپرسور



شکل ۳-۴ تغییرات جریان بخار مکش شده به ترموکمپرسور



شکل ۴-۴ تغییرات جریان بخار گرمایش افکت اول

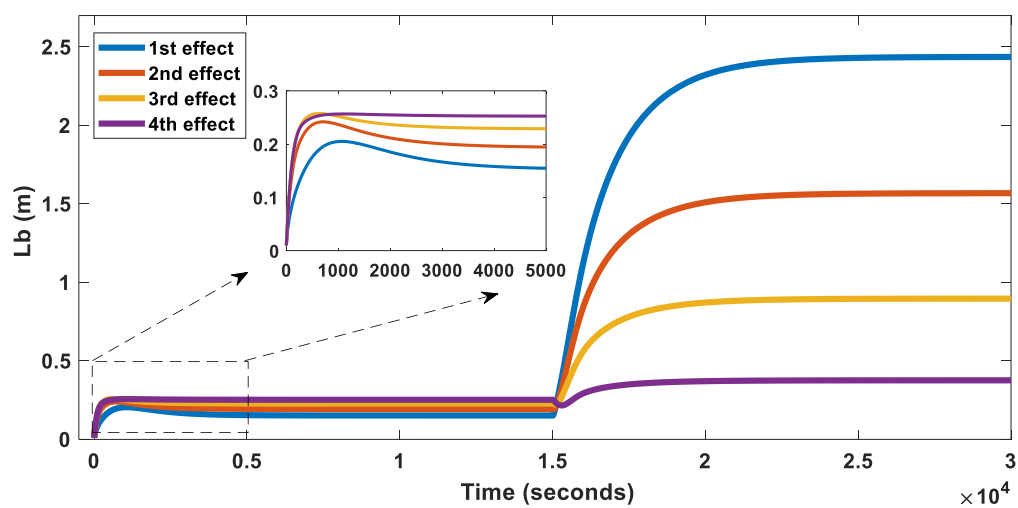
به طبع آن همان طور که در شکل های ۴-۴ و ۴-۵ نیز مشاهده می کنید به ترتیب جریان بخار مکش شده و جریان بخار گرمایش افکت اول نیز در زمان ۱۵۰۰۰ ثانیه به مقدار صفر می رسد.

بعد از قراردادن شرایط اولیه در حالت شرایط محیطی نتایج تغییرات ارتفاع آب نمک، دمای بخار، شوری آب نمک، دبی بخار خروجی، دبی آب نمک خروجی، دمای آب تغذیه ورودی در طول زمان پس از شبیه سازی اواپراتورها (افکت ها) و کندانسور توسط سیمولینک نرم افزار متلب قابل مشاهده است. برای شبیه سازی آب شیرین کن در دو حالت خاموش و روشن مورد بررسی قرار گرفته است به گونه ای که اول سیستم روشن می شود تا پارامترهای ترمودینامیکی از حالت شرایط محیطی به مقدار پایای خود برسند، سپس سیستم خاموش می شود تا پارامترهای ترمودینامیکی به حالت شرایط محیطی خود بازگردند.

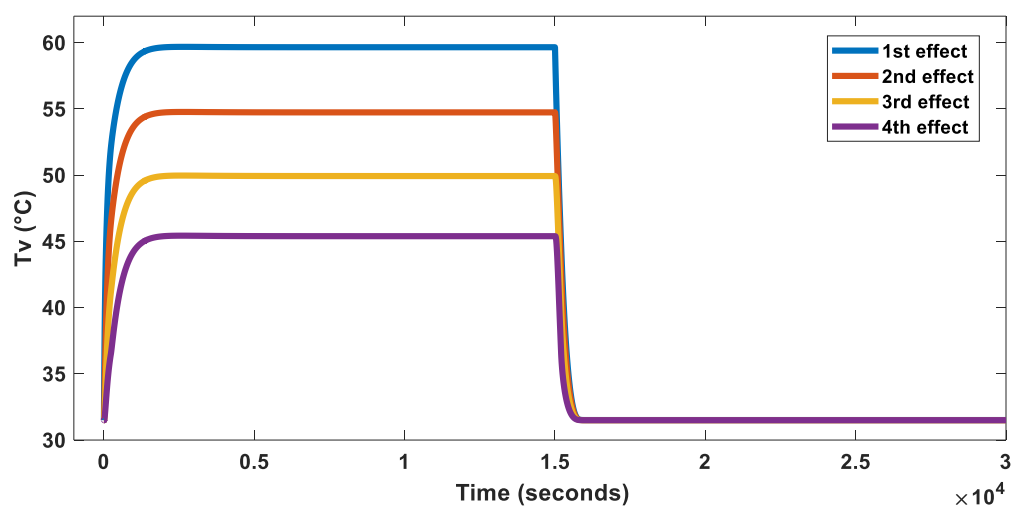
با روشن شدن سیستم، بخار گرمایش وارد لوله های افکت اول شده و به تدریج با گرم شدن لوله ها، آب تغذیه شروع به تبخیر می کند و دمای بخار افزایش می یابد، سپس بخار تولید شده وارد افکت بعد شده و این روند تا افکت آخر ادامه می یابد. در این هنگام تمام دبی بخار و دبی آب نمک از مقدار صفر به حالت پایای خود می رسند و ارتفاع آب نمک نیز از صفر به میزان پایای خود افزایش می یابد. با توجه به شکل های ۱۰ تا ۱۲ بیشترین دمای بخار، بیشترین دبی بخار و بیشترین نسبت تغلیظ مربوط به افکت اول است و به ترتیب تا افکت آخر، این مقادیر

به میزان کمتری پایا می‌شوند. اما با توجه به این که آب‌نمک هر افکت وارد افکت بعد می‌شود، بیشترین دبی آب‌نمک و ارتفاع آب‌نمک مربوط به افکت آخر است و به ترتیب تا افکت اول به مقادیر کمتری پایا می‌شود (شکل‌های ۴-۶ و ۴-۱۰). اما هنگام خاموشی ارتفاع آب‌نمک افکت اول بیشترین ارتفاع و به ترتیب تا افکت چهارم به کمترین ارتفاع می‌رسد. علت این پدیده نیز به خاطر کوچک‌تر بودن قطر لوله‌های رابط آب‌نمک در افکت‌های اول نسبت به افکت‌های آخر و از بین رفتن اختلاف فشار بین افکت‌ها است. لذا ارتفاع آب‌نمک در افکت‌ها نسبت به افکت بعدی افزایش می‌یابد تا بتواند فشار لازم برای دبی آب‌نمک را تأمین کند. این اتفاق موجب می‌شود که برای مدتی در حدود ۴۰۰ ثانیه بعد از خاموشی دبی‌های آب‌نمک کاهش یابد تا بتواند موجب افزایش ارتفاع آب‌نمک هر افکت شود، سپس بعد از گذر ۸۰۰ ثانیه از خاموشی دبی آب‌نمک دوباره به سطح قبلی خود رسیده و به علت تبخیر نشدن آب، از آن سطح نیز عبور کرده و به میزانی در حدود ۴۹ درصد بیشتر نسبت به حالت روشن افزایش می‌یابد (شکل ۴-۱۰).

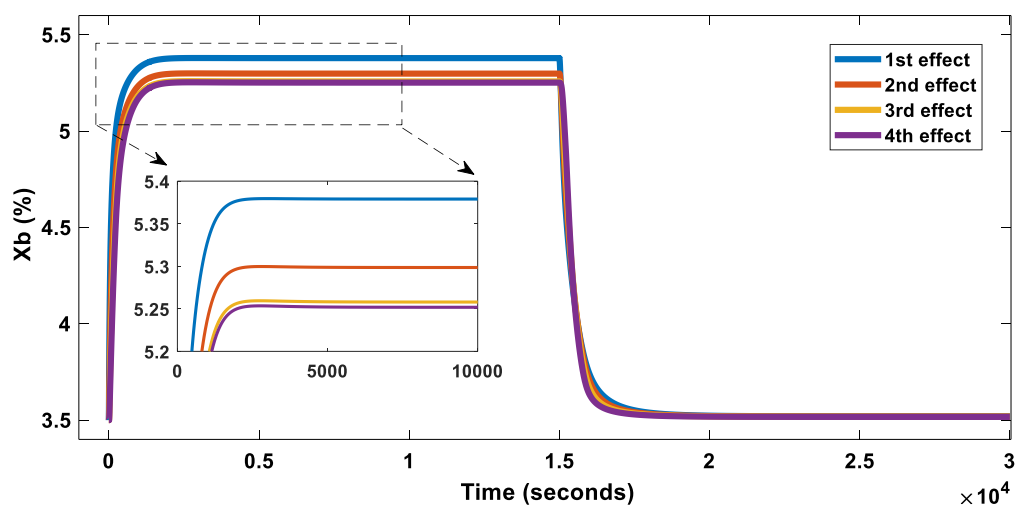
دمای بخار در لحظه خاموشی سیستم به سمت دمای محیط می‌رود چون دیگر بخار به لوله‌های افکت اول وارد نمی‌شود، در نتیجه تولید بخار در افکت اول و به طبع آن در بقیه افکت‌ها نیز کاهش می‌یابد و با کاهش تولید بخار، دمای افکت‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند. شکل‌های ۴-۷ و ۴-۹ بیانگر این موضوع هستند. همان‌طور که در شکل ۴-۸ مشاهده می‌کنید در شرایط خاموشی، به دلیل کاهش تولید بخار دیگر آب دریا بخار نمی‌شود و موجب کاهش غلظت آب‌نمک نیز می‌شود.



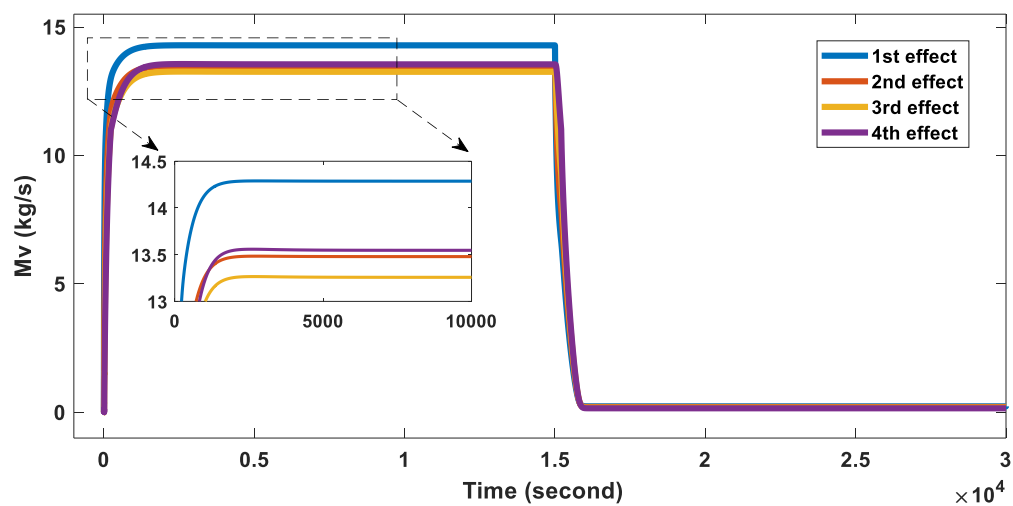
شکل ۴-۵ تغییرات ارتفاع آب نمک در تمامی افکت‌ها در حالت خاموش و روشن



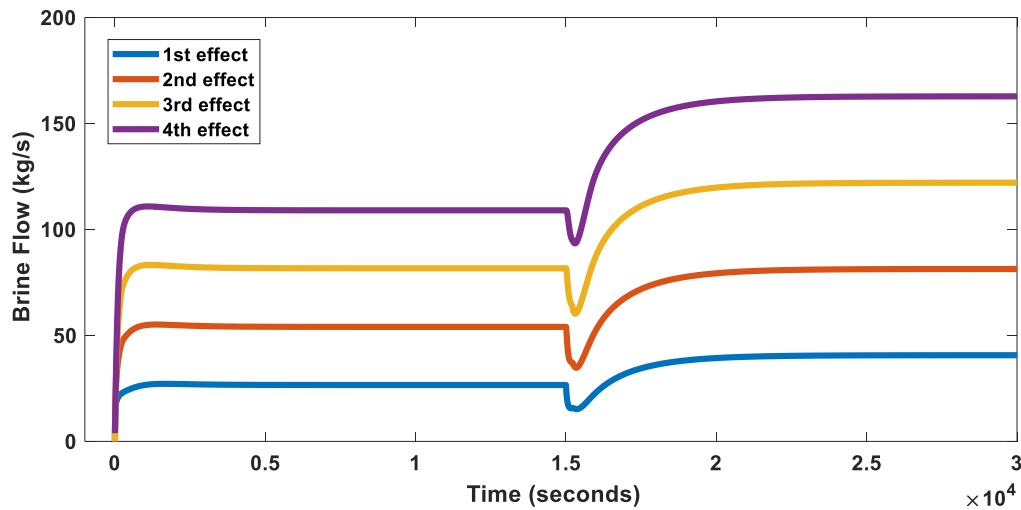
شکل ۴-۶ تغییرات دمای بخار در تمامی افکت‌ها در حالت روشن و خاموش



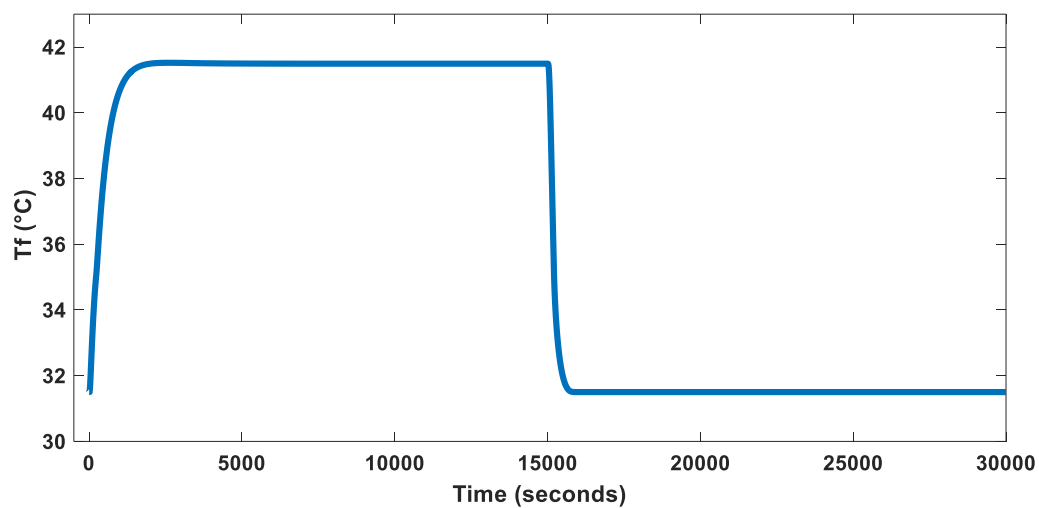
شکل ۴-۷ تغییرات غلظت نمک آب دریا در تمامی افکت‌ها



شکل ۴-۸ تغییرات دبی بخار خروجی از تمامی افکت‌ها



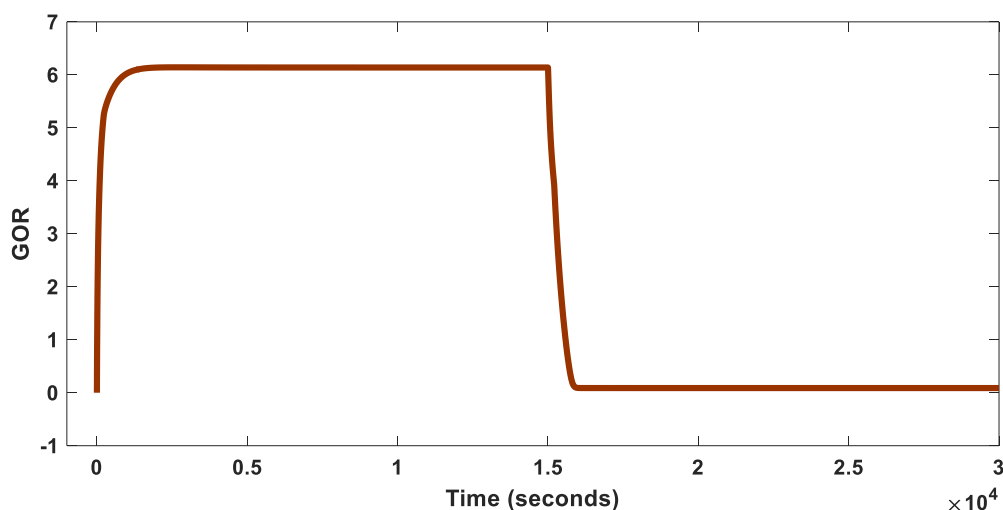
شکل ۴-۹ تغییرات دبی آب نمک خروجی از تمامی افکت‌ها



شکل ۴-۱۰ تغییرات دمای تغذیه ورودی به افکت‌ها

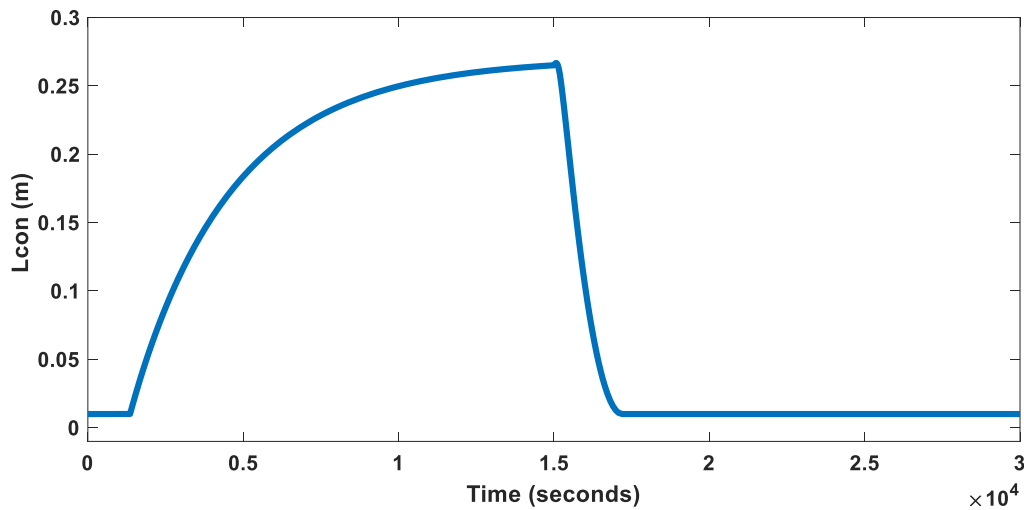
در شکل ۴-۱۱ مشاهده می‌شود که در هنگام روشن شدن سیستم، دمای آب تغذیه ورودی به افکت‌ها از شرایط محیطی به مقدار پایا خود می‌رسد و بعد از اعمال خاموشی در سیستم، دمای آب تغذیه ورودی به افکت‌ها تا حدی که به مقدار دما محیطی خود برسد، کاهش پیدا می‌کند. بخارهای تولیدشده در هر افکت به این دلیل که خالی از نمک می‌باشند، با استفاده از فرآیند چگالش به آب شیرین قابل استفاده تبدیل می‌شوند. که مجموع این

آب‌های شیرین به‌دست‌آمده از هر افکت، مقدار آب شیرین کل سیستم است. نسبت خروجی به‌دست‌آمده سیستم در شکل ۱۲-۴ مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱-۴ نسبت خروجی به‌دست‌آمده سیستم

در بخش کندانسور، همان‌طور که در شکل ۱۳-۴ مشاهده می‌شود که ارتفاع مایع کندانس شده با راه‌اندازی سیستم شروع به افزایش می‌کند و بعد از اعمال خاموشی مقدار آن با یک شیب ملایم به مقدار محیطی خود می‌رسد. به دلیل این‌که بعد از اعمال خاموشی در سیستم هنوز مقدار کمی بخار در اثرات و کندانسور باقی‌مانده است. ارتفاع آب با یک شیب ۲۰۰۰ ثانیه‌ای کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۲ تغییرات ارتفاع مایع کندانس شده

۴-۶ اثر کنترل کننده فازی

در ادامه حالتی فرض شده است که ممکن است در سیستم اغتشاشی ایجاد شود، که ممکن است اثر این اغتشاش سبب به هم ریختن متغیرهای ترموفیزیکی سیستم شود. جهت از بین رفتن یا کم شدن اثر اغتشاش از سیستم کنترل فازی استفاده شده است.

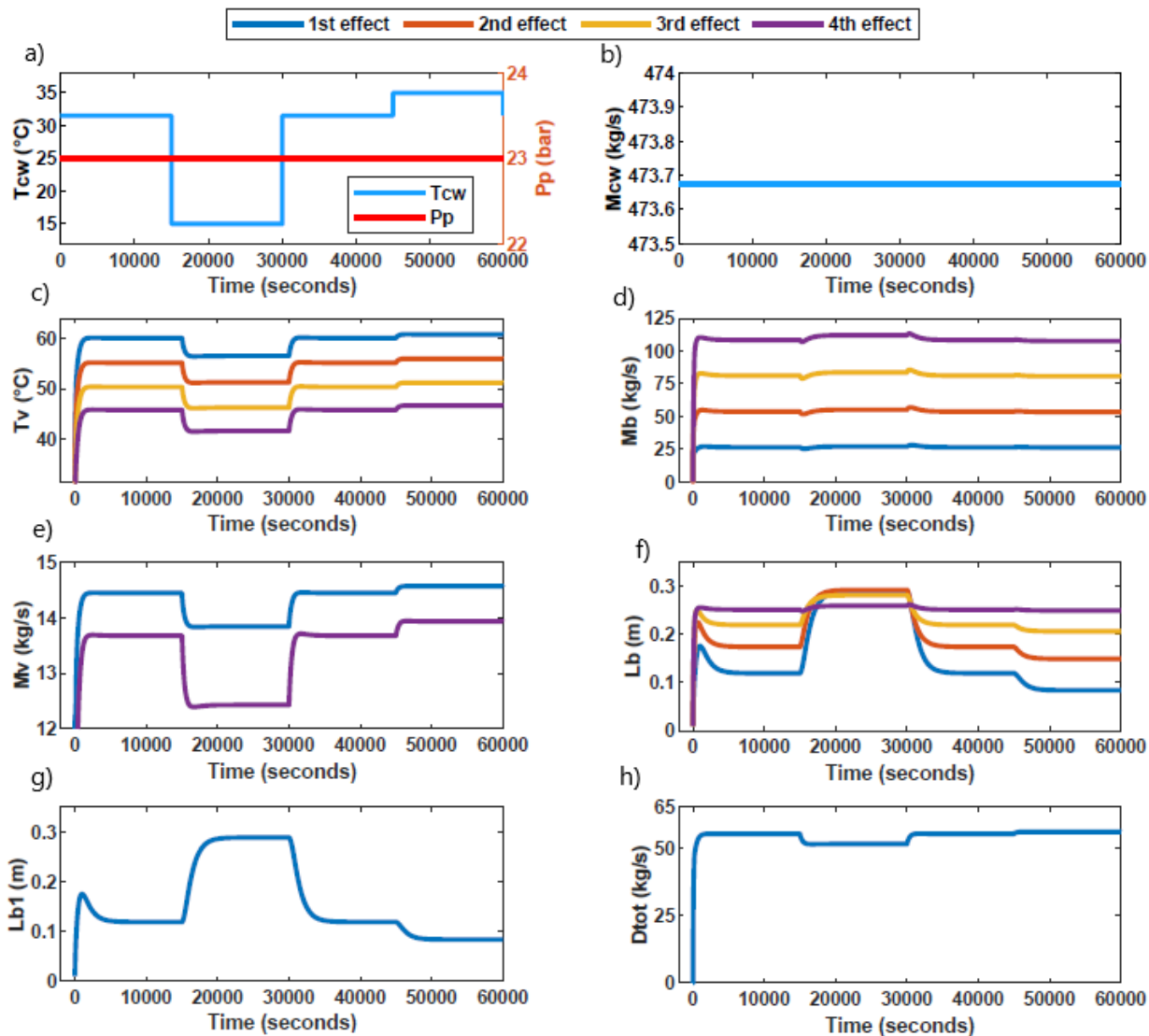
تجربه در سیستم MED فعال در حالت پایدار نشان می‌دهد که سخت‌ترین متغیر برای کنترل به‌منظور تثبیت سیستم، سطوح آب‌نمک داخل اثرات است زیرا یک اغتشاش جزئی ورودی می‌تواند با سطوح آب‌نمک تداخل داشته باشد. علاوه بر این، تغییرات در سطوح همچنین می‌تواند اختلالات دیگری را در مورد سایر متغیرها، مانند دما یا نرخ تولید بخار، تحریک کند و منجر به ناپایداری‌های بزرگ شود.

بنابراین، توسعه یک استراتژی کنترل که دوباره سیستم را به حالت پایدار برساند، لازم است. که برای این استراتژی کنترل از یک کنترل کننده فازی استفاده شده است. که دما آب دریا ورودی به کندانسور و فشار بخار

محرک ورودی به ترموکمپرسور به عنوان ورودی های این کنترل کننده فازی در نظر گرفته شده اند و خروجی آن نیز میزان تغییرات دبی آب دریا است.

۴-۶-۱ اثر اغتشاش در دما آب دریا

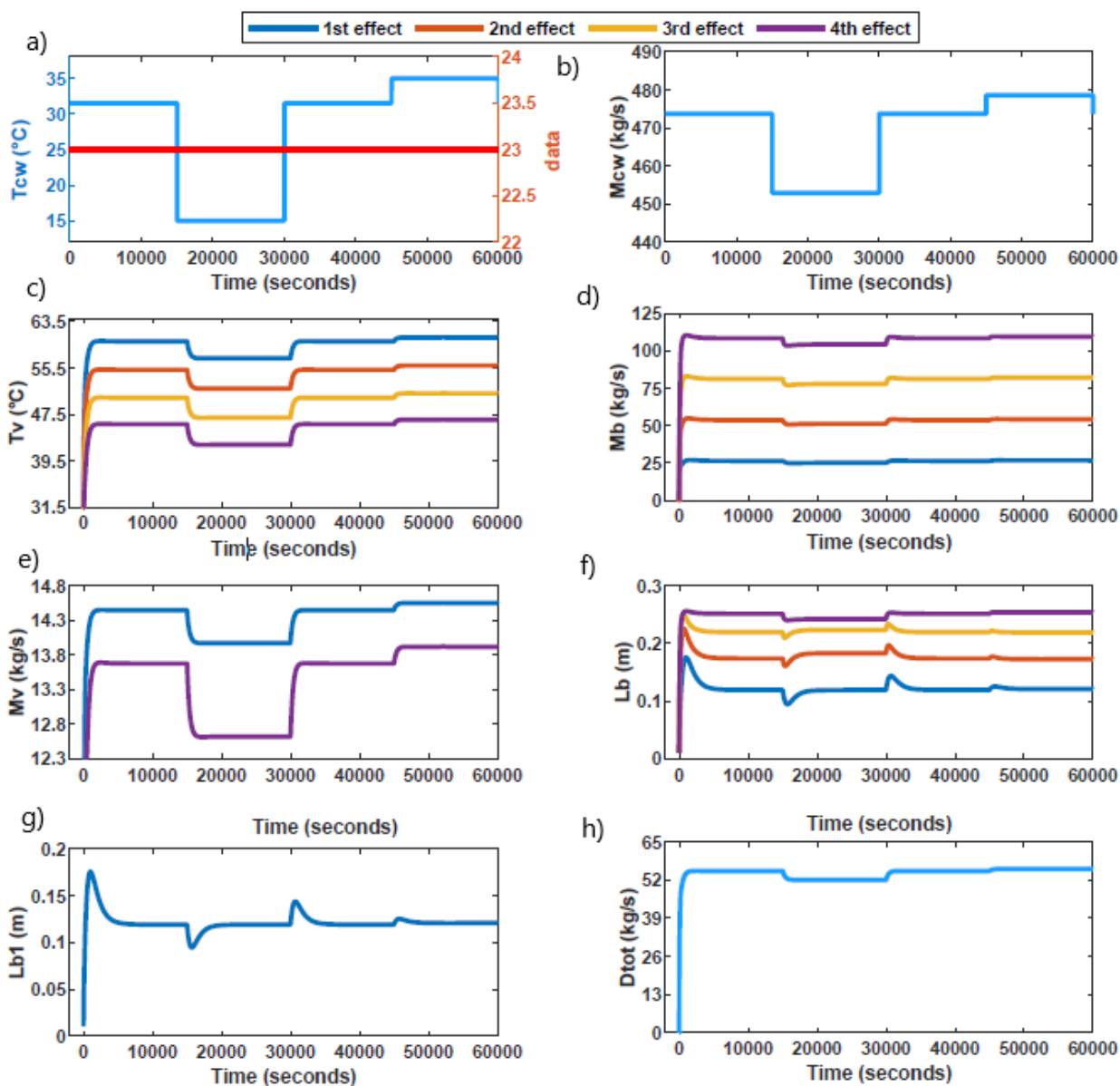
دما آب دریا در فصول مختلف سال متفاوت است و ممکن است بین ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتی گراد باشد، شکل ۲-۳، اثر اغتشاشات دما آب دریا در فصول مختلف را نشان می دهد، دو گام تغییر در دما آب دریا در نظر گرفته شده است، که در گام اول دما آب دریا به کمترین مقدار خود، که ۱۵ درجه سانتی گراد است، می رسد و در گام دوم دما آب دریا به بیشترین مقدار خود، که ۳۵ درجه سانتی گراد است، می رسد. شبیه سازی نیز از لحظه ای که سیستم در شرایط محیطی قرار دارد، آغاز شده است. همان طور که در شکل ۴-۱۴ مشاهده می کنید با کاهش دما آب دریا ورودی، دما آب تغذیه ورودی به افکت ها کاهش می یابد و این کاهش دما سبب کاهش دما و دبی بخار افکت ها می شود، در نتیجه آب نمک بیشتری در داخل افکت ها جمع شده و سبب افزایش ارتفاع و دبی آب نمک می شود، آب شیرین تولیدی کل نیز با کاهش تولید بخار، کاهش می یابد و با افزایش تولید بخار، افزایش می یابد.



شکل ۴-۱۳ تغییرات دما آب دریا

با ایجاد یک سیستم کنترل فازی، که دبی آب دریا ورودی به سیستم را افزایش و کاهش می‌دهد، می‌توان ارتفاع آب‌نمک افکت‌ها به حالت پایدار قبلی خود برگرداند. همان‌طور که در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌کنید، با کاهش دما آب دریا ورودی به سیستم، دبی آب دریا نیز کاهش‌یافته است و همچنین با افزایش دما آب دریا ورودی به سیستم، دبی افزایش می‌یابد و ارتفاع آب‌نمک افکت‌ها و دبی آب‌نمک خروجی از افکت‌ها نیز به حالت پایدار قبلی خود بازمی‌گردند. اما چون دما آب دریا کاهش و افزایش‌یافته است، نمی‌توان دما و دبی بخار را به حالت

پایدار قبلی خود، بازگرداند. به دلیل اینکه آن میزان بخار موردنظر دیگر در افکت‌ها تولید نمی‌شود. در نتیجه میزان آب شیرین تولیدی کل نیز تغییر چندانی نمی‌کند.

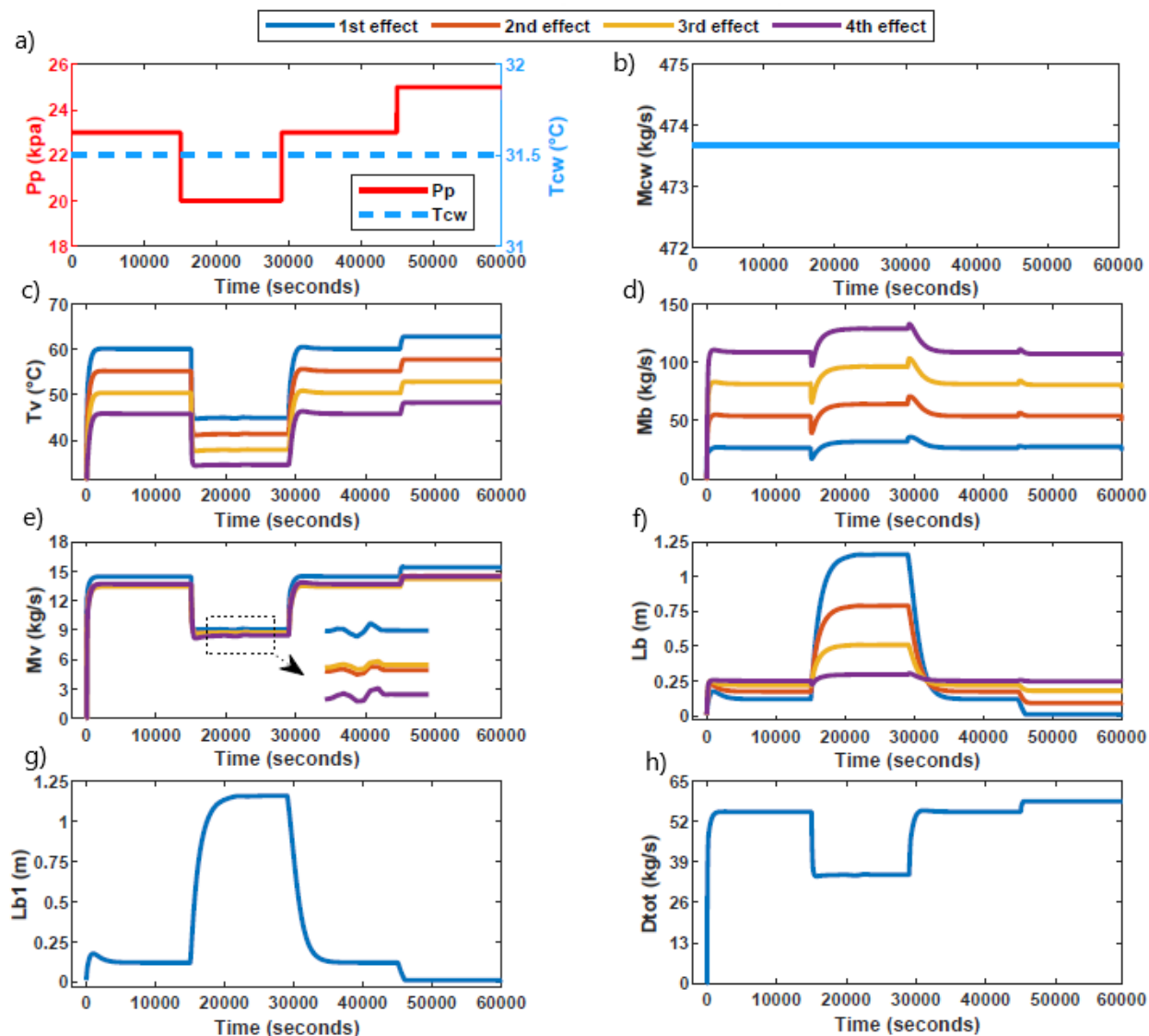


شکل ۴-۱۴ اثر کنترل‌کننده فازی در تغییرات دما آب دریا

۴-۶-۲ اثر اغتشاش در فشار بخار محرک

شکل ۴-۱۶ اثر تغییرات در فشار بخار محرک سیستم را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی از شرایط محیطی آغاز شده است. بعد از ۱۵۰۰۰ ثانیه که سیستم به حالت پایدار خود رسیده است، فشار بخار محرک از حالت اسمی خود که ۲۳ بار باشد به ۲۰ بار کاهش یافته است، این کاهش فشار تا ۳۰۰۰۰ ثانیه ادامه می‌یابد تا اثر اغتشاش به‌طور کامل نمایان شود و سپس دوباره فشار به حالت اسمی خود بازمی‌گردد و دوباره بعد از ۱۵۰۰۰ ثانیه فشار بخار محرک به ۲۵ بار افزایش می‌یابد. تا اثر افزایش فشار نیز بررسی شود.

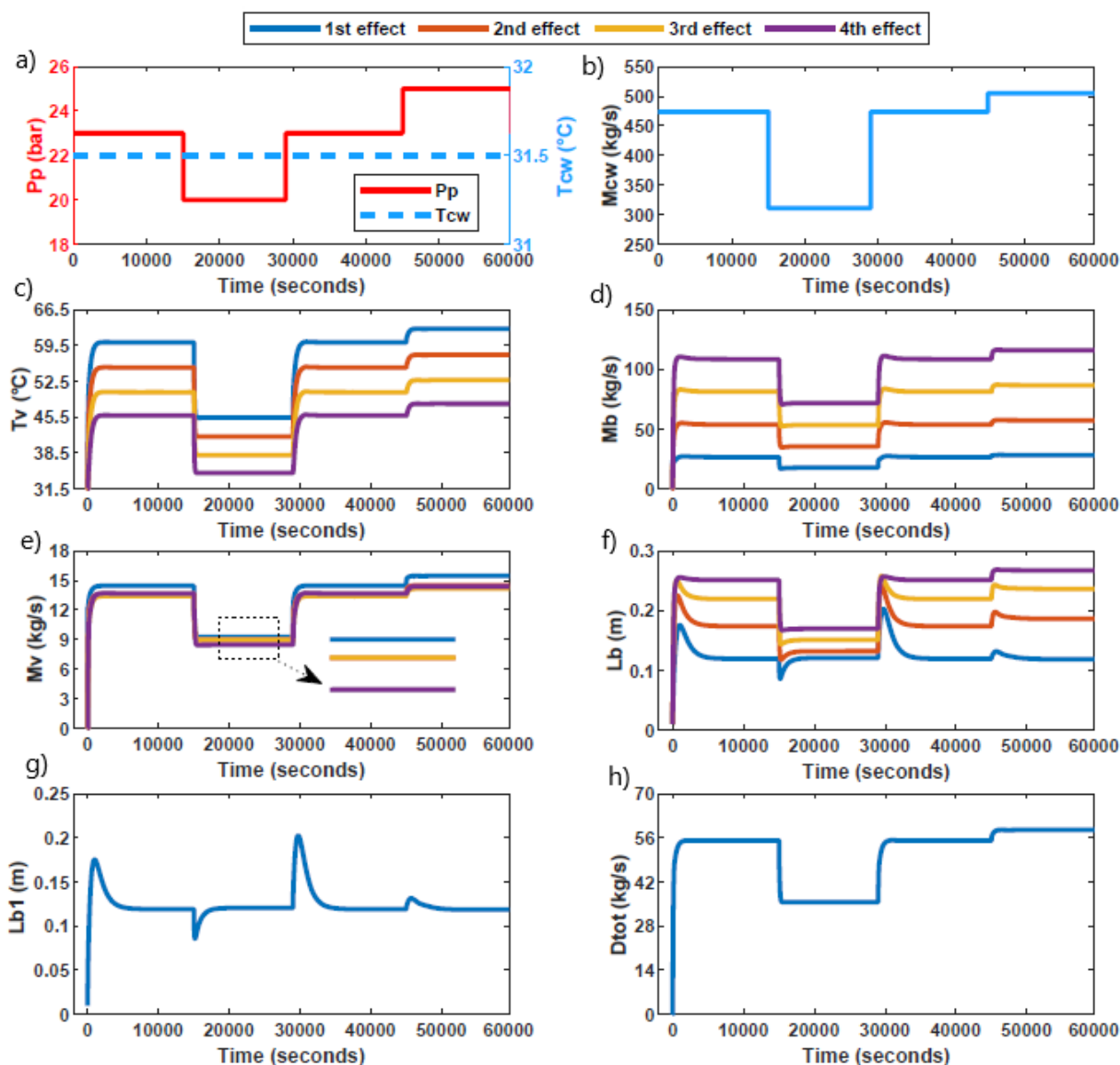
همان‌طور که در شکل ۴-۱۶ مشاهده می‌کنید، با کاهش فشار بخار محرک دما و دبی بخار تولیدشده داخل افکت‌ها کاهش می‌یابد، اما این داستان در مورد تولید آب‌نمک داخل افکت‌ها کاملاً برعکس است زیرا با کاهش فشار بخار محرک میزان کمتری از آب تغذیه ورودی که بر روی لول‌های افکت اول می‌ریزد بخار می‌شود، در نتیجه این سبب افزایش ارتفاع و دبی آب‌نمک می‌شود.



شکل ۴-۱۵ تغییرات فشار بخار محرک

با ایجاد یک سیستم کنترل فازی، که دبی آب دریا ورودی به سیستم را افزایش و کاهش می‌دهد، می‌توان ارتفاع آب‌نمک افکت‌ها به حالت پایدار قبلی خود برگرداند. همان‌طور که در شکل ۴-۱۷ مشاهده می‌کنید، با کاهش فشار بخار محرک ورودی به سیستم، دبی آب دریا نیز کاهش یافته است و همچنین با افزایش فشار بخار محرک ورودی به سیستم، دبی افزایش می‌یابد و ارتفاع آب‌نمک افکت‌ها و دبی آب‌نمک خروجی از افکت‌ها نیز به حالت پایدار قبلی خود بازمی‌گردند. اما چون فشار بخار محرک کاهش و افزایش یافته است، نمی‌توان دما و دبی بخار را به حالت پایدار قبلی خود، بازگرداند. به دلیل اینکه با کاهش فشار بخار محرک، بخار محرک با دما کمتری وارد

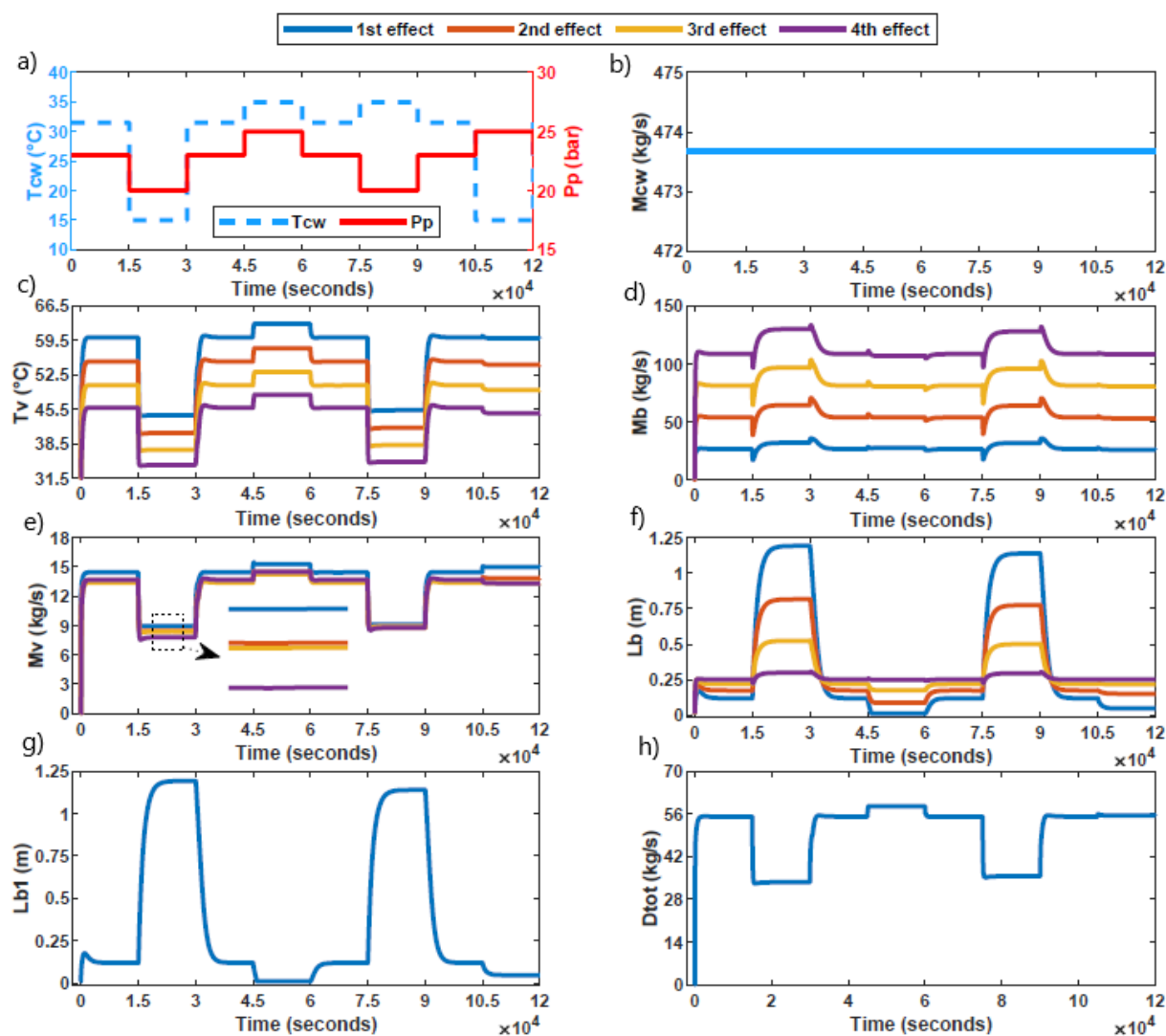
لوله‌های افکت اول می‌شود، در نتیجه آن میزان بخار موردنظر دیگر در افکت‌ها تولید نمی‌شود و دما بخار نیز دیگر به مقدار اسمی قبلی خود بازمی‌گردد. همچنین با افزایش فشار بخار محرک، بخار محرک با دما بیشتری وارد لوله‌های افکت اول می‌شود، میزان بخار تولیدشده داخل افکت‌ها از میزان اسمی بیشتر می‌شود و دما بخار داخل افکت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین میزان آب شیرین تولیدی کل نیز تغییر چندانی نمی‌کند.



شکل ۴-۱۶ اثر کنترل‌کننده فازی در تغییرات فشار بخار محرک

۴-۶-۳ اثر اغتشاش در فشار بخار محرک و دما آب دریا به طور هم زمان

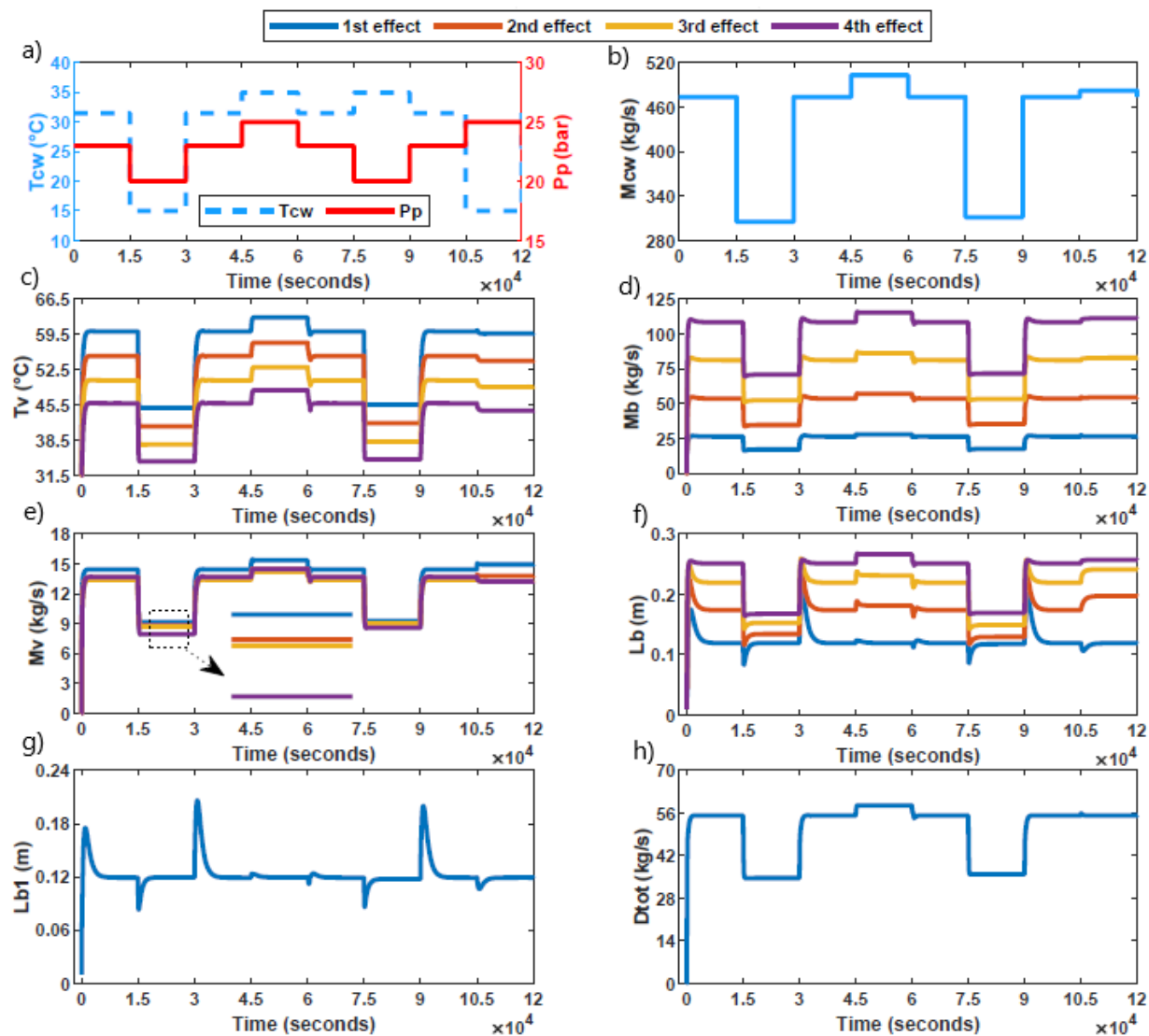
دما آب دریا ورودی به سیستم پارامتری است که تغییرات آن در حوزه اختیارات ما نیست، وابسته به تغییرات جوی است. در همین راستا، همراه با اغتشاش در فشار بخار محرک، ممکن است دما آب دریا ورودی به سیستم نیز دچار تغییراتی شود. همان طور که در شکل ۴-۱۸ مشاهده می کنید، اثر اغتشاش هر دو پارامتر فشار بخار محرک و دما آب دریا به طور هم زمان قابل مشاهده است. در زمان های ۱۵۰۰۰ ثانیه تا ۳۰۰۰۰ ثانیه هر دو پارامتر کاهش یافته اند، در زمان ۴۵۰۰۰ ثانیه تا ۶۰۰۰۰ ثانیه هر دو پارامتر افزایش داشته اند، ولی در زمان ۷۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ ثانیه فشار بخار محرک با کاهش همراه بوده است و از فشار اسمی ۲۳ بار به ۲۰ بار کاهش یافته است ولی دما آب دریا از دما اسمی $31/5$ درجه سانتی گراد به ۳۵ درجه سانتی گراد افزایش یافته است، در زمان ۱۰۵۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ ثانیه برعکس این قضیه رخ داده و با افزایش فشار تا ۲۵ بار، دما به ۱۵ درجه سانتی گراد کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۷ تغییرات فشار بخار محرک و دما آب دریا به طور همزمان

با ایجاد یک سیستم کنترل فازی، که دبی آب دریا ورودی به سیستم را افزایش و کاهش می دهد، می توان ارتفاع آب نمک افکت ها به حالت پایدار قبلی خود برگرداند. همان طور که در شکل ۴-۱۹ مشاهده می کنید، در حالت اول در زمان ۱۵۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ ثانیه، با کاهش فشار بخار محرک و دما آب دریا ورودی به سیستم، دبی آب دریا نیز کاهش یافته است، با این تفاوت که مقدار کاهش دبی آب دریا نسبت به حالتی که فقط در یک پارامتر اغتشاش ایجاد می شد بیشتر است. در حالت دوم در زمان ۴۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ ثانیه، با افزایش فشار بخار محرک و دما آب دریا ورودی به سیستم، دبی آب دریا نیز افزایش می یابد، در اینجا هم همانند حالت قبل مقدار

افزایش دبی آب دریا از حالتی که فقط در یک پارامتر اغتشاش ایجاد می‌شد بیشتر است. در حالت سوم در زمان ۷۵۰۰۰ تا ۹۰۰۰۰ ثانیه، با کاهش فشار بخار محرک و افزایش دما آب دریا، به دلیل اثر قوی‌تر فشار بخار محرک بر روی سیستم بازهم دبی آب دریا کاهش می‌یابد. در حالت چهارم، فشار بخار محرک افزایش داشته ولی دما آب دریا کاهش یافته است ولی بازهم به دلیل اثر قوی‌تر فشار، دبی آب دریا افزایش می‌یابد. در همه این حالت‌ها با افزایش و کاهش دبی آب دریا، ارتفاع آب‌نمک افکت‌ها و دبی آب‌نمک خروجی از افکت‌ها نیز به حالت پایدار قبلی خود بازمی‌گردند. اما چون فشار بخار محرک و دما آب دریا کاهش و افزایش یافته است، نمی‌توان دما و دبی بخار را به حالت پایدار قبلی خود، بازگرداند. به دلیل اینکه با کاهش فشار بخار محرک و دما آب دریا، بخار محرک با دما کمتری وارد لوله‌های افکت اول می‌شود و آب تغذیه ورودی به افکت نیز دما کمتری دارد، در نتیجه آن میزان بخار موردنظر دیگر در افکت‌ها تولید نمی‌شود و دما بخار نیز دیگر به مقدار اسمی قبلی خود بازمی‌گردد. همچنین با افزایش فشار بخار محرک و دما آب دریا، بخار محرک با دما بیشتری وارد لوله‌های افکت اول می‌شود و دما آب تغذیه ورودی به افکت‌ها نیز افزایش می‌یابد، میزان بخار تولیدشده داخل افکت‌ها از میزان اسمی بیشتر می‌شود و دما بخار داخل افکت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین میزان آب شیرین تولیدی کل نیز تغییر چندانی نمی‌کند.



شکل ۴-۱۸ اثر کنترل کننده فازی در تغییرات فشار بخار محرک و دما آب دریا به طور همزمان

فصل ۵: نتیجه گیری

۵-۱ نتیجه گیری

یک مدل جدید و جامع برای شبیه سازی پویا عملکرد یک آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور با داده های عملیاتی واقعی از نیروگاهی واقع در طرابلس (لیبی) اجرا و اعتبار سنجی شد. فرمول بندی مدل شامل توصیف پدیده هایی پیچیده مانند اتصال دینامیکی بین افکت ها، چگالش جزئی بخار درون لوله ها، تغییر ارتفاع آب نمک، تغییر دمای بخار تولید شده، تغییر غلظت نمک آب نمک، تغییر دمای تغذیه آب دریا ورودی به افکت ها است. بنابراین این مدل توانسته با کمک گرفتن از کارهای قبلی انجام شده در این زمینه به بررسی راه اندازی و خاموش کردن یک آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور از لحظه راه اندازی تا لحظه رسیدن به یک حالت پایدار و در ادامه خاموش کردن سیستم را به ما نشان دهد. علاوه بر این، به جای استفاده از رابطه های تجربی که به طور معمول در آثار دیگر مقالات اتخاذ شده است، مدل دقیق تری از عملکرد ترموکمپرسور بخار بر اساس معادلات اصول اولیه ارزیابی اجرا شده است. در ادامه نیز با ایجاد یک مدل کنترل فازی نحوه کنترل سیستم را در زمان ایجاد اغتشاش در پارامترهای ورودی سیستم به ما نشان می دهد.

فرمول بندی مدل به طور کامل در فصل ۲ ارائه شده است، بنابراین امکان درک فیزیکی کامل از تمام معادلات را فراهم می کند. علاوه بر این، ساختار سلسله مراتب مدل، پیاده سازی آن را برای واحدهای نمک زدایی چند اثره با تعداد افکت های مختلف یا شکل های مختلف نیروگاه نمک زدایی چند اثره آسان می کند.

سرانجام پس از اعتبار سنجی با داده های تجربی از نیروگاه صنعتی واقعی آب شیرین کن چند اثره همراه با ترموکمپرسور طرابلس، قابلیت پیش بینی مدل نشان می دهد که پاسخ دینامیکی مدل از زمان راه اندازی 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، همان طور که در قسمت نتایج مشاهده کردید، باز خواهند گشت. همچنین مدل به شما اجازه می دهد 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 و همچنین با استفاده از کنترل کننده فازی ارائه شده می توان اثر تغییرات را خنثی نمود.

در نتایج مشاهده می شود که زمانی در حدود ۱۸۰۰ ثانیه لازم است تا سیستم پس از راه اندازی از حالت محیط به حالت پایای خود برسد، همچنین در مدت زمان ۸۰۰ ثانیه بعد از خاموشی، سیستم دوباره به حالت محیط برمی گردد. در طول زمان راه اندازی تا خاموشی کامل نتایج زیر حاصل گردیده است:

دمای بخار افکت اول تا آخر در حالت پایا به ترتیب به ۵۹/۹، ۵۴، ۴۹ و ۴۵ درجه سانتی گراد می رسد و همچنین دمای آب تغذیه به ۴۱/۵ درجه سانتی گراد می رسد. دبی بخار تولید شده در افکت اول در حالت پایا به ۱۴/۲ کیلوگرم بر ثانیه می رسد که بیشترین مقدار است و پس از آن دبی بخار افکت چهارم ۱۳/۵ و افکت دوم ۱۳/۴ و افکت سوم ۱۳/۲ کیلوگرم بر ثانیه است. که بعد از خاموشی دبی بخار تولید شده در هر افکت به صفر خواهد رسید. بیشترین نسبت تغلیظ مربوط به افکت اول و برابر ۵/۳۸ درصد است و به ترتیب تا افکت آخر به ۵/۲۴ کاهش می یابد. بعد از خاموشی نسبت تغلیظ به میزان اولیه خود یعنی ۳/۵ درصد برای هر افکت بر خواهد گشت. دلیل افزایش دبی بخار افکت چهارم نسبت به افکت های دوم و سوم این است که دمای آب ورودی به افکت چهارم به دمای اشباع آن افکت نزدیک تر است و موجب صرف انرژی کمتر برای رساندن دمای آب به دمای اشباع می شود. این در حالی است که در افکت های بعد از افکت اول به علت کاهش راندمان تبخیر، باید تولید بخار کمتر شود.

از مهم ترین نتایج در هنگام خاموش کردن دبی بخار ورودی این است که ارتفاع سطح آب نمک در هر افکت افزایش می یابد و در صورت دیر بسته شدن آب ورودی به هر افکت می تواند دستگاه را با مشکل سرریز شدن آب یا همان طغیان^۱ روبرو کند. دبی آب نمک افکت اول بعد از خاموشی ۲۰ درصد افزایش می یابد و این افزایش دبی در افکت آخر ۴۲ درصد است. ارتفاع آب نمک در افکت اول ۱۱ برابر و به همین ترتیب تا افکت آخر به ۱/۲ برابر حالت پایا می رسد. علاوه بر این افزایش دبی آب نمک عبوری از هر افکت به علت تبخیر نشدن آب تغذیه، موجب

^۱ Flooding

کاهش غلظت آب‌نمک هر افکت تا رسیدن به غلظت آب دریای ورودی می‌شود. همچنین در حالت پایا، ارتفاع آب‌نمک در افکت اول کمترین میزان است و تا افکت آخر به بیشترین مقدار خود می‌رسد. اما بعد از قطع شدن بخار گرمایش ورودی به دستگاه، بیشترین میزان ارتفاع آب‌نمک مربوط به افکت اول است و تا افکت آخر به کمترین میزان خود می‌رسد. علت این پدیده واکنش حالت گذرای سیستم به کم شدن فشار اشباع در افکت‌ها و نبود فشار کافی برای عبور آب‌نمک از اریفیس‌ها است. لذا سیستم با افزایش سطح ارتفاع آب‌نمک در افکت‌های اول نسبت به افکت‌های آخر، این کمبود فشار را برای عبور دبی آب‌نمک لازم از اریفیس‌ها فراهم می‌کند.

از دیگر نتایج مهم به‌دست‌آمده این 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 افکت‌های دستگاه به‌صورت هم‌زمان در حال تغذیه از آب ورودی هستند و خنک شدن آب تغذیه تمام افکت‌ها را باهم سرد می‌کند. اما در هنگام روشن شدن، بخار گرمایش باید به‌صورت مرحله‌ای دمای بخار افکت‌ها را به‌تدریج افزایش دهد تا درنهایت این اثر به کندانسور رسیده و دمای آب تغذیه افزایش یابد و این چرخه ادامه می‌یابد تا بخار گرمایش دمای تمام افکت‌ها را افزایش دهد و به حالت پایا برساند، لذا گرم شدن سیستم اثری آهسته‌تر از خنک شدن آن دارد. این اطلاعات می‌تواند برای سیستم کنترلی بسیار سودمند باشد. به‌عنوان مثال بعد از خاموشی ناگهانی منبع گرمایش، سیستم کنترلی تنها ۴۰۰ ثانیه زمان دارد تا دبی آب تغذیه را قطع کند در غیر این صورت افکت‌ها با پدیده طغیان مواجه شده و پر از آب می‌شوند و ممکن است مخاطراتی را برای سیستم به وجود آورد. همچنین اگر سیستم بعد از ۱۸۰۰ ثانیه از زمان روشن شدن به دبی حالت پایای خود نرسید، مشخص است که مشکلی پیش‌آمده و باید درصدد رفع آن برآمد. چنین تجزیه و تحلیل مقدماتی نشان‌دهنده پتانسیل‌های مدل ارائه‌شده به‌عنوان ابزاری برای تحلیل نظری عملیات گذرا و برای طراحی دستگاه‌های کنترل است.

در ادامه نتایج اثر اغتشاش در فشار بخار محرک و دما آب دریا بررسی شده بود که نتایج آن نشان می‌دهد:

- با کاهش دما آب دریا به ۱۵ درجه سانتی‌گراد، میزان تولید بخار کاهش می‌یابد ولی میزان تولید آب‌نمک افزایش می‌یابد، در نتیجه دما و دبی بخار کاهش یافته و دبی و ارتفاع آب‌نمک افزایش می‌یابد. ارتفاع آب‌نمک افکت اول از ۱۱/۹ سانتی‌متر به ۲۸/۹۲ سانتی‌متر می‌رسد و برای رسیدن به این مقدار به ۴۰۰ ثانیه زمان احتیاج دارد.
 - با افزایش دما آب دریا به ۳۵ درجه سانتی‌گراد تولید بخار افزایش می‌یابد ولی میزان تولید آب‌نمک کاهش می‌یابد در نتیجه دما و دبی بخار افزایش یافته و دبی و ارتفاع آب‌نمک کاهش می‌یابد. ارتفاع آب‌نمک افکت اول از ۱۱/۹ سانتی‌متر به ۸/۳۸ سانتی‌متر می‌رسد.
 - با کاهش فشار بخار محرک به ۲۰ بار میزان تولید بخار کاهش یافته ولی میزان تولید آب‌نمک افزایش می‌یابد. ارتفاع آب‌نمک افکت اول از ۱۱/۹ سانتی‌متر به ۴۷/۶۵ سانتی‌متر افزایش می‌یابد.
 - با افزایش فشار بخار محرک به ۲۵ بار میزان تولید بخار افزایش می‌یابد تا حدی که افکت اول خالی از آب‌نمک می‌شود. آنچه مشخص است تأثیر فشار بخار محرک نسبت به دما آب دریا بر روی سیستم قوی‌تر است، به‌طوری‌که میزان کمی تغییر در آن سبب ایجاد پدیده سیل یا خالی شدن می‌شود.
- در ادامه نتایج، تأثیر کنترل‌کننده فازی در مهار اغتشاشات ایجاد شده کاملاً واضح است که ارتفاع آب‌نمک افکت اول پس از ۴۰۰ ثانیه دوباره به مقدار اسمی خود بازمی‌گردد که این نشان‌دهنده دقت خوب کنترل‌کننده است.

۵-۲ پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود جهت توسعه این تحقیق مطالعات زیر صورت پذیرد:

- در نظر گرفتن وجود گاز غیرقابل چگالش^۱ در مدل‌سازی جهت درک بهتر از عملکرد آب‌شیرین‌کن

MED-TVC

- به‌کارگیری یک سیستم کنترلی هوشمند فازی برای دیگر پیکربندی‌های مختلف MED

¹ Non-Gas Condense

مراجع

- [١] K. C. Ng, K. Thu, S. J. Oh, L. Ang, M. W. Shahzad, and A. B. Ismail, "Recent developments in thermally-driven seawater desalination: Energy efficiency improvement by hybridization of the MED and AD cycles," *Desalination*, vol. ٣٥٦, pp. ٢٥٥-٢٧٠, ٢٠١٥.
- [٢] I. S. Al-Mutaz and I. Wazeer, "Current status and future directions of MED-TVC desalination technology," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٥٥, no. ١, pp. ١-٩, ٢٠١٥.
- [٣] M. Al-Shammiri and M. Safar, "Multi-effect distillation plants: state of the art," *Desalination*, vol. ١٢٦, no. ١-٣, pp. ٤٥-٥٩, ١٩٩٩.
- [٤] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Transient performance of MED processes with different feed configurations," *Desalination*, vol. ٤٣٨, pp. ٣٧-٥٣, ٢٠١٨.
- [٥] H. T. El-Dessouky and H. M. Ettouney, *Fundamentals of salt water desalination*. Elsevier, ٢٠٠٢.
- [٦] N. H. Aly and A. K. El-Figi, "Thermal performance of seawater desalination systems," *Desalination*, vol. ١٥٨, no. ١-٣, pp. ١٢٧-١٤٢, ٢٠٠٣.
- [٧] M. A. Darwish, F. Al-Juwayhel, and H. K. Abdulraheim, "Multi-effect boiling systems from an energy viewpoint," *Desalination*, vol. ١٩٤, no. ١-٣, pp. ٢٢-٣٩, ٢٠٠٦.
- [٨] K. H. Mistry, M. A. Antar, and J. H. Lienhard V, "An improved model for multiple effect distillation," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٥١, no. ٤-٦, pp. ٨٠٧-٨٢١, ٢٠١٣.
- [٩] P. Druetta, P. Aguirre, and S. Mussati, "Optimization of multi-effect evaporation desalination plants," *Desalination*, vol. ٣١١, pp. ١-١٥, ٢٠١٣.
- [١٠] P. Palenzuela, D. Alarcon, G. Zaragoza, J. Blanco, and M. Ibarra, "Parametric equations for the variables of a steady-state model of a multi-effect desalination plant," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٥١, no. ٤-٦, pp. ١٢٢٩-١٢٤١, ٢٠١٣.
- [١١] P. Palenzuela, A. S. Hassan, G. Zaragoza, and D.-C. Alarcón-Padilla, "Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant," *Desalination*, vol. ٣٣٧, pp. ٣١-٤٢, ٢٠١٤.

- [١٢] H. El-Dessouky, H. Ettouney, and F. Al-Juwayhel, "Multiple effect evaporation—vapour compression desalination processes," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. ٧٨, no. ٤, pp. ٦٦٢-٦٧٦, ٢٠٠٠.
- [١٣] H. E.-D. Ettouney, Hisham, "Single-effect thermal vapor-compression desalination process: thermal analysis," *Heat transfer engineering*, vol. ٢٠, no. ٢, pp. ٥٢-٦٨, ١٩٩٩.
- [١٤] R. B. Power, "Steam jet ejectors for the process industries.[Glossary included]," ١٩٩٤.
- [١٥] R. Kamali and S. Mohebinia, "Experience of design and optimization of multi-effects desalination systems in Iran," *Desalination*, vol. ٢٢٢, no. ١-٣, pp. ٦٣٩-٦٤٥, ٢٠٠٨.
- [١٦] J. H. Keenan, E. P. Neumann, and F. Lustwerk, "An investigation of ejector design by analysis and experiment," ١٩٥٠.
- [١٧] M. Ameri, S. S. Mohammadi, M. Hosseini, and M. Seifi, "Effect of design parameters on multi-effect desalination system specifications," *Desalination*, vol. ٢٤٥, no. ١-٣, pp. ٢٦٦-٢٨٣, ٢٠٠٩.
- [١٨] A. Trostmann, "Improved approach to steady state simulation of multi-effect distillation plants," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٧, no. ١-٣, pp. ٩٣-١١٠, ٢٠٠٩.
- [١٩] A. B. Amer, "Development and optimization of ME-TVC desalination system," *Desalination*, vol. ٢٤٩, no. ٣, pp. ١٣١٥-١٣٣١, ٢٠٠٩.
- [٢٠] S. E. Shakib, M. Amidpour, and C. Aghanajafi, "A new approach for process optimization of a METVC desalination system," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٣٧, no. ١-٣, pp. ٨٤-٩٦, ٢٠١٢.
- [٢١] A. S. Hassan and M. A. Darwish, "Performance of thermal vapor compression," *Desalination*, vol. ٣٣٥, no. ١, pp. ٤١-٤٦, ٢٠١٤.
- [٢٢] S. Casimiro, J. Cardoso, C. Ioakimidis, J. Farinha Mendes, C. Mineo, and A. Cipollina, "MED parallel system powered by concentrating solar power (CSP). Model and case study: Trapani, Sicily," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٥٥, no. ١٢, pp. ٣٢٥٣-٣٢٦٦, ٢٠١٥.

- [۲۳] B. Ortega-Delgado, P. Palenzuela, and D.-C. Alarcón-Padilla, "Parametric study of a multi-effect distillation plant with thermal vapor compression for its integration into a Rankine cycle power block," *Desalination*, vol. ۳۹۴, pp. ۱۸-۲۹, ۲۰۱۶.
- [۲۴] جهانشاهی جواران, "مدلسازی آبشیرینکن تقطیر چندمرحله‌ای ا. ع. جواد پور, خ. لاری MED-TVC," presented at the اولین کنفرانس بین‌المللی فناوری‌های نوین در علوم, ۱۳۹۶. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/۶۷۳۱۷۳>.
- [۲۵] M. M. Ashour, "Steady state analysis of the Tripoli West LT-HT-MED plant," *Desalination*, vol. ۱۵۲, no. ۱-۳, pp. ۱۹۱-۱۹۴, ۲۰۰۳.
- [۲۶] S. M. Tonelli, J. Romagnoli, and J. Porras, "Computer package for transient analysis of industrial multiple-effect evaporators," *Journal of food engineering*, vol. ۱۲, no. ۴, pp. ۲۶۷-۲۸۱, ۱۹۹۰.
- [۲۷] A. M. El-Nashar and A. Qamhiyeh, "Simulation of the performance of MES evaporators under unsteady state operating conditions," *Desalination*, vol. ۷۹, no. ۱, pp. ۶۵-۸۳, ۱۹۹۰.
- [۲۸] N. H. Aly and M. Marwan, "Dynamic response of multi-effect evaporators," *Desalination*, vol. ۱۱۴, no. ۲, pp. ۱۸۹-۱۹۶, ۱۹۹۷.
- [۲۹] S. Dardour, S. Nisan, and F. Charbit, "Development of a computer-package for MED plant dynamics," *Desalination*, vol. ۱۸۲, no. ۱-۳, pp. ۲۲۹-۲۳۷, ۲۰۰۵.
- [۳۰] Z. Ge, X. Du, L. Yang, Y. Yang, and S. Wu, "Simulation on the start-up of MED seawater desalination system coupled with nuclear heating reactor," *Applied thermal engineering*, vol. ۲۸, no. ۲-۳, pp. ۲۰۳-۲۱۰, ۲۰۰۸.
- [۳۱] L. Roca, L. J. Yebra, M. Berenguel, and D. C. Alarcón-Padilla, "Modeling of a solar seawater desalination plant for automatic operation purposes," *Journal of solar energy engineering*, vol. ۱۳۰, no. ۴, ۲۰۰۸.
- [۳۲] M. W. Shahzad, K. C. Ng, K. Thu, B. B. Saha, and W. G. Chun, "Multi effect desalination and adsorption desalination (MEDAD): a hybrid desalination method," *Applied Thermal Engineering*, vol. ۷۲, no. ۲, pp. ۲۸۹-۲۹۷, ۲۰۱۴.
- [۳۳] M. T. Mazini, A. Yazdizadeh, and M. H. Ramezani, "Dynamic modeling of multi-effect desalination with thermal vapor compressor plant," *Desalination*, vol. ۳۵۳, pp. ۹۸-۱۰۸, ۲۰۱۴.

- [٣٤] A. de la Calle, J. Bonilla, L. Roca, and P. Palenzuela, "Dynamic modeling and simulation of a solar-assisted multi-effect distillation plant," *Desalination*, vol. ٣٥٧, pp. ٦٥-٧٦, ٢٠١٥.
- [٣٥] S. Azimibavil and A. J. Dehkordi, "Dynamic simulation of a Multi-Effect Distillation (MED) process," *Desalination*, vol. ٣٩٢, pp. ٩١-١٠١, ٢٠١٦.
- [٣٦] M. C. Georgiou and A. M. Bonanos, "A transient model for forward and parallel feed MED," *Desalination and Water Treatment*, vol. ٥٧, no. ٤٨-٤٩, pp. ٢٣١١٩-٢٣١٣١, ٢٠١٦.
- [٣٧] A. Cipollina *et al.*, "A dynamic model for MED-TVC transient operation," *Desalination*, vol. ٤١٣, pp. ٢٣٤-٢٥٧, ٢٠١٧.
- [٣٨] M. L. Elsayed, O. Mesalhy, R. H. Mohammed, and L. C. Chow, "Effect of disturbances on MED-TVC plant characteristics: Dynamic modeling and simulation," *Desalination*, vol. ٤٤٣, pp. ٩٩-١٠٩, ٢٠١٨.
- [٣٩] L. Guimard *et al.*, "New considerations for modelling a MED-TVC plant under dynamic conditions," *Desalination*, vol. ٤٥٢, pp. ٩٤-١١٣, ٢٠١٩.
- [٤٠] Z. Dong, M. Liu, X. Huang, Y. Zhang, Z. Zhang, and Y. Dong, "Dynamical modeling and simulation analysis of a nuclear desalination plant based on the MED-TVC process," *Desalination*, vol. ٤٥٦, pp. ١٢١-١٣٥, ٢٠١٩.
- [٤١] A. E. Hakim, A. Abouelsoud, R. Abobeah, and E. E. Ebrahiem, "Enhancement of Feed Forward Multi Effect Evaporator Performance for Water Desalination Using PI Control," *Journal of Advanced Engineering Trends*, ٢٠٢٠.
- [٤٢] J. Hua, L. Wua, Y. Wangb, W. Zhanga, and Y. Hua, "Dynamic modeling and simulation of the multi-effect distillation desalination process," *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, vol. ٢١٧, pp. ٣١-٤١, ٢٠٢١.
- [٤٣] H. El-Dessouky, H. Ettouney, I. Alatiqi, and G. Al-Nuwaibit, "Evaluation of steam jet ejectors," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. ٤١, no. ٦, pp. ٥٥١-٥٦١, ٢٠٠٢.
- [٤٤] E. Cox, "Fuzzy fundamentals," *IEEE spectrum*, vol. ٢٩, no. ١٠, pp. ٥٨-٦١, ١٩٩٢.

- [40] H.-J. Joo and H.-Y. Kwak, "Performance evaluation of multi-effect distiller for optimized solar thermal desalination," *Applied thermal engineering*, vol. 61, no. 2, pp. 491-499, 2013.

Abstract

Due to the high use of thermal desalination plants, there is a great tendency to simulate the behavior of these plants. Most of the researches is focused on modeling steady behavior, but to design control systems and evaluate their performance, we also need to study unsteady behavior modeling. Also, few researches have studied system shut down. In this research, steady and unsteady numerical modeling multi effect of desalination with thermocompressor plant (MED-TVC) on an industrial scale with four effects, a condenser and a thermal vapor compressor (TVC) has been investigated. The variable-step, variable-order method (VSVO) has been used to solve differential equations. Each evaporator is divided into three phases: vapor, tubes and brine, and for each of these phases, the equations of mass and energy conservation in unsteady conditions are written. 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. In the following, the effect of fuzzy controller in the system is also shown. The results show that the largest change in brine flow rate after shutting down is in the last effect, which increases by 42%. Also, the biggest change in the height of the brine is in the first effect, which after 800 seconds will reach 11 times the steady state, that will cause the phenomenon of flooding and possible damages. Also, by increasing or decreasing the Motive steam pressure and seawater temperature, the fuzzy controller returns brine levels of the effects to their previous nominal state. This series of results can only be achieved by unsteady modeling of the system by turning it on and off and creating a controller.

Keywords: Thermal desalination, Unsteady behavior modeling, multi-effect desalination with thermocompressor (MED-TVC), variable-step, variable-order method (VSVO), Mass and energy survival equations, Fuzzy controller



Shahroud University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

Unsteady thermodynamic modeling and numerical analysis of multi-effect desalination with TVC

By: Sobhan Khajeh Namaghi

Supervisors:

Dr. Mohammad Mohsen Shahmardan & Dr. Mohsen Nazari

Advisor:

Dr. Mostafa Nazari

January 2022