

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی - تکنولوژی انرژی

مدل سازی و ارزیابی فنی اقتصادی آب شیرین کن HD با جریان مخالف در
کندانسورهای تماس مستقیم و غیرمستقیم

نگارنده: رضا عابدینی

استاد راهنما

جناب آقای دکتر محمد ضامن

مهر ۱۴۰۰



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد

شماره:

۹۷۱۱۵۴-۱۲۲۱

تاریخ:

۱۴۰۱/۱۰/۲۸

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 رضا عابدینی با شماره دانشجویی ۹۷۱۱۵۴ رشته سیستم‌های انرژی گرایش تکنولوژی انرژی تحت عنوان مدل سازی و ارزیابی فنی اقتصادی آب شیرین کن HD با جریان مخالف در کندانسورهای تماس مستقیم و غیر مستقیم که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۷/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☒	ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹	☐
ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐	د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹	☐
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 ضامن	استادیار	
۲- استاد مشاور	-	استادیار	
۳- استاد داور اول	دکتر محمد حسن کبهانی	استاد	
۴- استاد داور دوم	دکتر اکبر ملکی	استادیار	
۵- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی خالقی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۱۴۰۱/۱۰/۲۸

تقدیم اثر

تقدیم به همه کسانی که مهربان پروردگارم عشقشان را در وجودم دمید و تمام تجربه‌های یکتا و زیبای

زندگی‌ام، مدیون حضور سبز آنهاست

مادر عزیزتر از جانم؛ او که دریای بیکران فداکاری و عشق است، او که وجودم برای همه رنج بود و

وجودش برایم

پدر بزرگوaram او که عشق و مهربانی بی‌دریغ را به من آموخت و حاصل دستان خسته‌اش رمز موفقیت من

شد

تشکر و قدردانی

سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید، به طریق علم و دانش رهنمونمان شد، به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌ای از علم و معرفت را روزیمان ساخت. شایسته است از خانواده و تمامی کسانی که در مراحل مختلف این پایان‌نامه مرا یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم. از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمد ضامن که در تمامی مراحل با توصیه‌ها و راهنمایی‌های ارزنده خود اینجانب را یاری نمودند کمال سپاسگزاری را دارم.

تعهدنامه

اینجانب رضا عابدینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تکنولوژی انرژی دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و ارزیابی فنی اقتصادی آب شیرین کن HD با جریان مخالف در کندانسورهای تماس مستقیم و غیرمستقیم تحت راهنمایی جناب دکتر محمد ضامن متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو



چکیده

یکی از چالش‌هایی که جهان امروزی با آن دست‌وپنجه نرم می‌کند تأمین آب شیرین مصرفی است. با افزایش جمعیت و صنعتی‌شدن بیشتر شهرها و کشورها میزان تقاضای آب شیرین نیز رو به افزایش است. نمک‌زدایی و شیرین کردن آب دریا یکی از مهم‌ترین فرایندها برای برآورد نیاز آبی است. در بین روش‌های مختلف شیرین‌سازی آب‌شور، رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی دارای برخی مزیت‌ها از جمله استفاده از منابع انرژی دما پایین و به‌کارگیری در ظرفیت‌های پایین تولید آب است. این نوع از آب‌شیرین‌کن از دو قسمت اصلی رطوبت‌زنی و کندانسور رطوبت‌زدایی تشکیل می‌شود. بخش چگالنده این نوع آب‌شیرین‌کن به دلیل ارتباط با آب‌شور همواره مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفته است تا مشکلات مربوط به آن به‌خصوص در زمان بهره‌برداری کاهش پیدا کند؛ لذا در این تحقیق در ابتدا فرایند رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی تشریح گردیده و سپس مدل‌سازی این آب‌شیرین‌کن با در نظر گرفتن دو حالت مختلف رطوبت‌زدایی تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم در نرم‌افزار متلب انجام گرفته است. اعتبارسنجی دو بخش اصلی مدل با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی موجود صورت پذیرفت. سپس تأثیر پارامترهای اساسی بر میزان تولید آب شیرین در هر دو نوع سیستم مورد بررسی قرار گرفت. مدل‌سازی و تحلیل این سیستم با استفاده از قوانین ترمودینامیکی و بقای جرم و حرارت در بخش‌های مختلف واحد آب‌شیرین‌کن انجام شده است. در مرحله‌ی بعد با توجه به هزینه‌های در نظر گرفته شده برای هزینه اولیه و هزینه جاری شامل هزینه انرژی و تعمیرات و نگهداری، دو مدل کندانسور از دیدگاه اقتصادی با یکدیگر مقایسه گردید. در انتها مشخص شد که با در نظر گرفتن هزینه و میزان تولید آب شیرین آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس غیرمستقیم هزینه‌ی بالاتر برای طراحی و ساخت را داراست و تولید هر مترمکعب آب شیرین حدود ۳۸۳۷۱۵ ریال می‌باشد اما میزان تولید آب شیرین در سال حدود ۳۷۵ مترمکعب تخمین زده می‌شود. اما در آب‌شیرین‌کن با کندانسور مستقیم دارای هزینه پایین‌تر برای ساخت و مطابقاً تولید کمتر با شرایط یکسان می‌باشد به‌طوری‌که هزینه تولید هر مترمکعب آب شیرین در حدود ۳۲۸۸۲۰ ریال می‌باشد و میزان تولید آب شیرین در سال حدود ۳۲۵

مترمکعب تخمین زده می‌شود. با مقایسه این دو حالت می‌توان گفت با برتری اهمیت میزان نیاز تولید آب شیرین بر هزینه آن کندانسور تماس غیرمستقیم ارجحیت پیدا می‌کند و به طور بلعکس برای کاهش هزینه‌های تولید هر مترمکعب آب شیرین میزان تولید کل سالیانه نیز کمتر خواهد بود.

کلمات کلیدی: آب شیرین کن، فرایند رطوبت، رطوبت زدایی، کندانسور تماس مستقیم، کندانسور تماس غیرمستقیم، شدت مصرف انرژی، هزینه تمام شده

فهرست

فهرست علائم

ز

- فصل اول..... ۱
- معرفی انواع آب شیرین کن..... ۱
- ۱-۱ مقدمه..... ۲
- ۱-۲ دسته بندی کلی آب شیرین کن ها..... ۴
- ۱-۲-۱ آب شیرینکن اسمز معکوس (RO)..... ۵
- ۱-۳ تقسیم بندی آب شیرین کن های رطوبت زنی-رطوبت زدایی (HD)..... ۱۵
- ۱-۳-۱ تقسیم بندی بر اساس ترکیب با سایر چرخه ها..... ۱۵
- ۱-۳-۲ تقسیم بندی بر اساس نوع چرخه ی هوا و آب..... ۱۶
- ۱-۳-۳ بر اساس نوع تبادل حرارت با منبع حرارتی..... ۱۷
- ۱-۴ جمع بندی..... ۱۸
- فصل دوم مروری بر تحقیقات انجام شده..... ۱۹
- ۲-۱ مقدمه..... ۲۰
- ۲-۲-۱ پژوهش های انجام شده با رطوبت زدایی تماس غیرمستقیم..... ۲۱
- ۲-۲-۲ پژوهش های انجام شده با رطوبت زدایی تماس مستقیم..... ۲۶
- ۲-۳ معرفی پژوهش حاضر و نوآوری..... ۲۸
- فصل سوم..... ۳۱
- مدل سازی..... ۳۱

۳۲

فصل ۳

- ۳-۱ مقدمه..... ۳۲
- ۳-۲ تشریح عملکرد سیستم..... ۳۳

۳-۳	مدل سازی رطوبت زنی	۳۶
۳-۴	معادلات حاکم در رطوبت زنی	۳۹
۳-۵	مدل سازی رطوبت زدایی	۴۳
۳-۵-۱	کندانسور تماس مستقیم	۴۳
۳-۵-۲	مدل سازی رطوبت زدایی تماس غیرمستقیم	۴۵
۳-۶	الگوریتم حل معادلات واحد آب شیرین کن رطوبت زنی رطوبت زدایی	۵۲
۳-۶-۱	الگوریتم حل معادلات رطوبت زنی	۵۴
۳-۶-۲	الگوریتم حل معادلات رطوبت زدایی	۵۵
فصل چهارم	نتایج و بررسی مدل سازی	۵۷

فصل ۴

۴-۱	مقدمه	۵۸
۴-۲	اعتبارسنجی مدل با داده های تجربی	۵۹
۴-۲-۱	رطوبت زنی	۵۹
۴-۲-۲	محاسبه ی میزان خطای مدل رطوبت زنی	۶۱
۴-۲-۳	رطوبت زدایی تماس غیرمستقیم	۶۲
۴-۲-۴	محاسبه ی میزان خطای مدل رطوبت زدایی تماس غیرمستقیم	۶۴
۴-۳	تحلیل پارامتری	۶۶
۴-۳-۱	تأثیر دبی آب گرم ورودی رطوبت زنی	۶۷
۴-۳-۲	تأثیر دبی هوا	۷۰
۴-۳-۳	تأثیر دمای آب گرم	۷۲
۴-۳-۴	تأثیر ارتفاع برج رطوبت زنی	۷۴
۴-۳-۵	تأثیر دبی آب ورودی به رطوبت زدایی	۷۶

۷۸.....	۴-۳-۶ تأثیر ارتفاع برج رطوبت‌زدایی.....
۸۱.....	۴-۴ تحلیل اقتصادی.....
۸۱.....	۴-۴-۱ هزینه.....
۸۲.....	۴-۴-۲ هزینه رطوبت‌زنی.....
۸۳.....	۴-۴-۳ هزینه کندانسور.....
۸۳.....	۴-۴-۴ هزینه پمپ و فن.....
۸۳.....	۴-۴-۵ هزینه پایه و پوشش سازه.....
۸۴.....	۴-۴-۶ هزینه ثابت سالیانه.....
۸۵.....	۴-۴-۷ هزینه نگهداری و تعمیرات.....
۸۵.....	۴-۴-۸ هزینه مصرف برق.....
۸۶.....	۴-۴-۹ هزینه نهایی.....
۸۷.....	فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۸۸.....	۵-۱ نتیجه‌گیری.....
۹۰.....	۵-۲ پیشنهادات.....
۹۱.....	پیوست الف.....

فهرست علائم

علائم لاتین	علامت اختصاری
A	مساحت
A_s	سطح فین
A_p	سطح لوله بین دو فین
a	سطح ویژه آکنه
C_p	گرمای ویژه
Cost	هزینه
D	قطر لوله
F_p	گام فین
G	شار جرمی هوای خشک
H_g	آنتالپی هوا
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی
j	ضریب کولبرون
K	ضریب هدایت حرارتی
kg	ضریب انتقال جرم
L	شار جرمی آب روی آکنه
Le	عدد لوییس
N	تعداد ردیف لوله
P	فشار هوا
pr	عدد پرانتل
Q	نرخ انتقال حرارت
Q_{Sen}	شار گرمای محسوس
Q_{Lat}	شار گرمای نهان
S	فاصله لوله ها در کندانسور تماس
	غیرمستقیم
T	دما
T_g	دمای هوای مرطوب
T_w	دمای آب
t	ضخامت فین

V	سرعت هوا
X	طول آکنه
Y	عرض آکنه
U	ضریب انتقال حرارت کلی
Z	ارتفاع آکنه

حروف یونانی

ω	رطوبت مطلق
α	ضریب جذب
λ	گرمای نهان تبخیر آب
ϕ	بازده فین
ω	رطوبت مطلق
μ	سرعت هوای مرطوب
ρ	نیز چگالی

زیرنویس‌ها

A	فاز هوا
G	هوای مرطوب
H	مربوط به بخش رطوبت زنی
I	فصل مشترک دو فاز تماس مستقیم
m	هوای مه‌آلود
S	حالت اشباع
v	بخار آب
w	آب
if	فصل مشترک در تماس غیرمستقیم
co	بیرون از کندانسور
c	کندانسور تماس غیرمستقیم
fg	مخلوط هوا و بخار در کندانسور تماس غیرمستقیم
P	پمپ
F	فن
cc	هزینه سرمایه‌گذاری

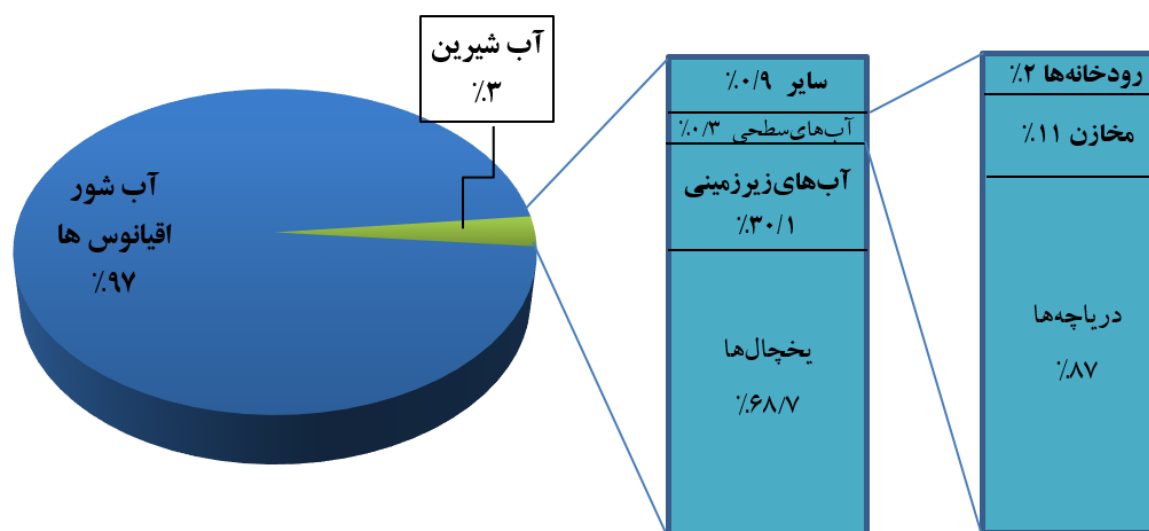
فصل اول

معرفی انواع آب شیرین کن

۱-۱ مقدمه

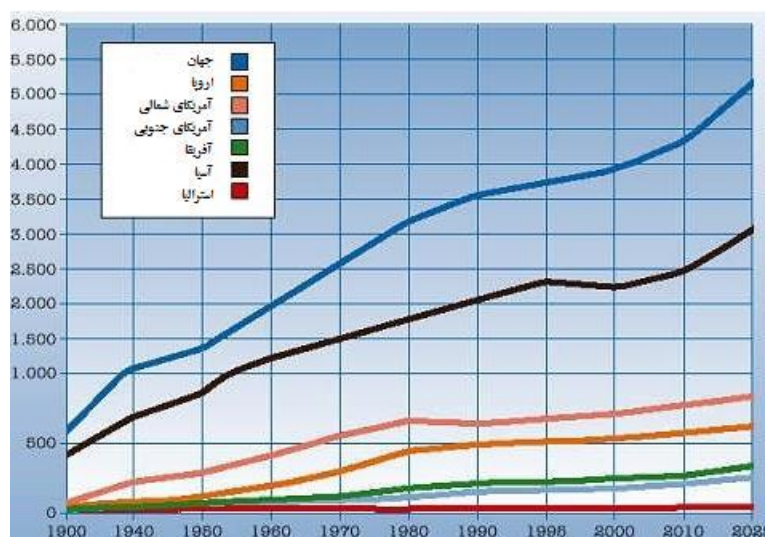
از گذشته تا کنون آب جز نیازهای اولیه هر انسان بوده و اهمیت آن در زندگی و حیات انکارنشده است. با صنعتی شدن هرچه بیشتر کشورها و افزایش سطح زندگی، مصرف آب در جهان روزبه روز در حال افزایش است. برخی از مناطق جهان به دلیل کمبود آب تحت فشار شدید اجتماعی و اقتصادی هستند. مشکلات کم‌آبی و بی‌آبی در سطح جهان نگرانی‌ها را برای رفع نیاز آبی افزایش داده است به‌طوری‌که بیش از ۸۰ کشور کم آب کره زمین این مسئله را تهدیدی برای سلامت اقتصاد خود می‌دانند.

کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک کره‌ی زمین قرار دارد. از این‌رو موجب شده است تولید آب شیرین در مورد توجه بسیاری از محققان و پژوهشگران قرار بگیرد. بر اساس برآوردهای سازمان ملل متحد، تا سال ۲۰۲۵، نزدیک به ۱۸۰۰ میلیون نفر در سراسر جهان با بحران بی‌آبی مواجه خواهند شد. حدود ۷۰ درصد سطح زمین را آب پوشانده است. اما بیش از ۹۷ درصد آب زمین را اقیانوس‌های شور، با شوری 3000 ppm تشکیل داده و تنها ۳ درصد از کل آب زمین شیرین است. آب شیرین، آبی است که غلظت نمک در آن کم و ترکیبات محلول در آن بسیار ناچیز است. طبق اعلام سازمان بهداشت جهانی، آب با غلظت کمتر از 500 ppm به‌عنوان آب آشامیدنی تعریف می‌شود. [۱]



شکل (۱-۱): توزیع آب بر روی کره زمین [۱]

آب شیرین از منابع آب زیرزمینی از جمله چاه‌ها و آب‌های سطحی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن تأمین می‌شود. شکل ۱-۱ درصد هر یک از این منابع را به‌خوبی نشان می‌دهد. یکی دیگر از منابع تأمین آب شیرین، بارندگی است که در شکل ۱-۱ به‌عنوان سایر منابع نشان داده شده است. میزان مصرف آب شیرین در سطح جهان در حال حاضر بیش از 4×10^{12} مترمکعب در سال برآورد شده است. شکل (۱-۲) روند تغییرات تقاضای جهانی برای مصرف آب شیرین را نشان می‌دهد. [۲]



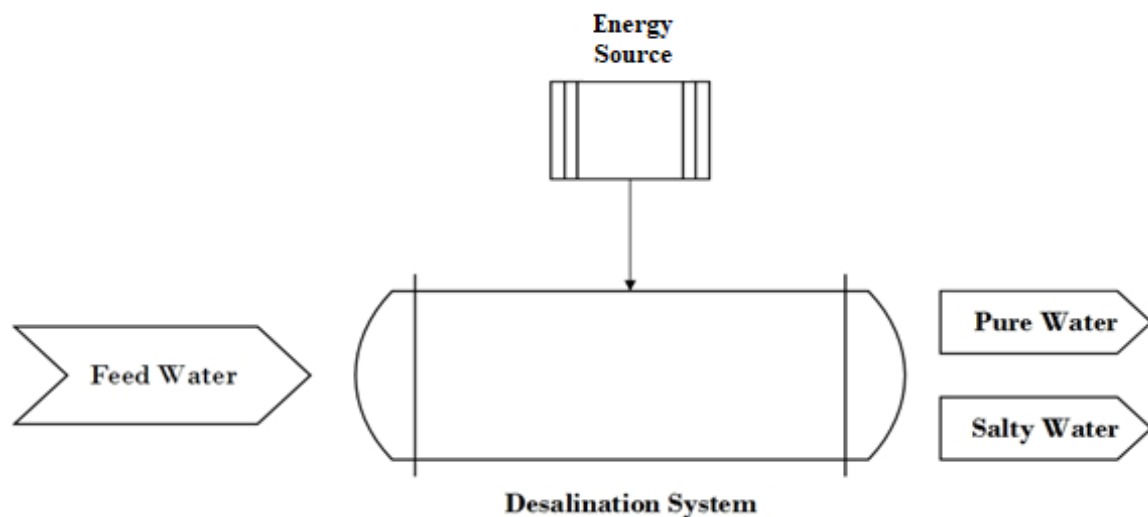
شکل (۱-۲): تقاضای جهانی برای مصرف آب شیرین [۲]

نکته حائز اهمیت در فرایند تولید آب شیرین، میزان مصرف انرژی آب شیرین کن است. به همین دلیل است که بسیاری از آب شیرین کن‌های بزرگ و صنعتی دارای نیروگاه هستند و یا در برخی موارد در نزدیکی نیروگاه نصب و راه‌اندازی می‌شوند. اما پراکندگی جمعیت و هزینه‌های ساخت نیروگاه این اجازه را نخواهد داد که در مناطق دورافتاده و صعب‌العبور این نوع از استفاده صورت بگیرد. راهکار منطقی و مقرون به صرفه‌ی این حالت استفاده از واحدهای تولید و شیرین‌سازی آب در مقیاس‌های کوچک‌تر و به عبارتی خانگی است. همین امر موجب شده است رویکرد به سمت واحدهای تولید با ظرفیت‌های کمتر در سال‌های اخیر مورد توجه و بررسی بیشتری قرار بگیرد که در فصل دوم به برخی از این موارد اشاره شده پرداخته شده است.

۱-۲ دسته‌بندی کلی آب شیرین کن‌ها

با وجود منابع عظیم آب شور در سطح کره‌ی زمین مانند اقیانوس‌ها و دریاها و حتی منابع آب شور در منطق کویری و خشک، احداث واحدهای شیرین‌سازی و نم‌زدایی از این منابع مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته شده است؛ لذا این راهکار راه می‌توان جز مطمئن‌ترین و منطقی‌ترین روش‌های مقابله با بحران‌های ذکر شده دانست. در حال حاضر روش‌های متفاوتی برای شیرین‌سازی آب وجود دارد که در این بخش سعی داریم دسته‌بندی کلی برای انواع این روش‌ها را به اختصار بیان کنیم.

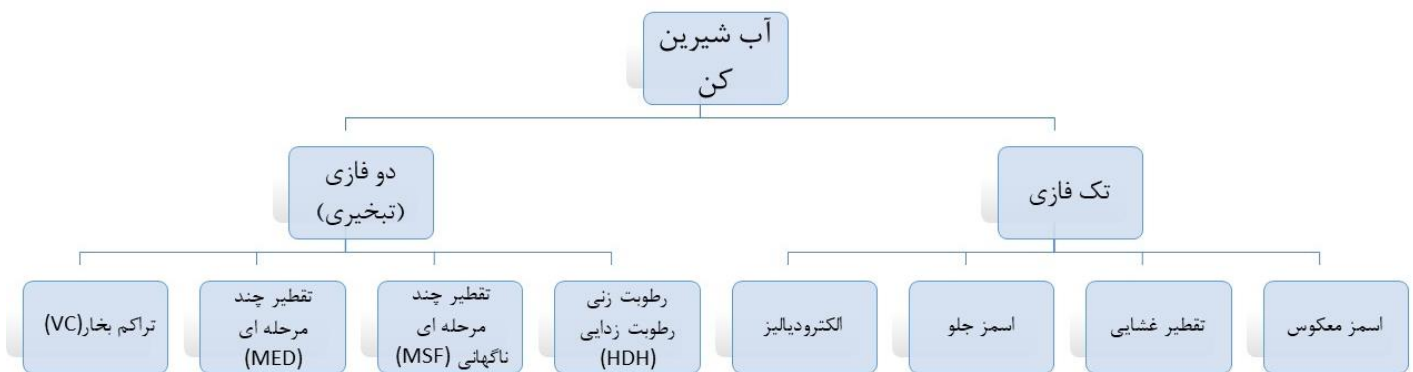
روند کلی شیرین‌سازی از طریق آب شور در شکل (۱-۳) نشان داده شده است. در این روند با صرف انرژی، آب خالص از آب شور جدا می‌شود. پساب نیز با درصد شوری بالاتر از آب ورودی از مدار خارج می‌شود. بر اساس تعاریف کل مواد جامد محلول در آب^۱ (TDS) با واحد گرم در لیتر یا ppm اندازه‌گیری می‌شود.



شکل (۱-۳): شماتیک کلی عملکرد آب شیرین کن

^۱Total Dissolved Solids (TDS)

بخش عظیمی از واحدهای بزرگ و صنعتی شیرین سازی از نوع تک فازی یا غشایی می باشند و برخی دیگر با مقیاس های کوچک تر از نوع دو فازی یا تبخیری هستند. شکل ۱-۴ شماتیک کلی دسته بندی را نشان می دهد. لازم به ذکر است هر بخش و یا قسمت خود دارای ویژگی ها و زیر گروه های بیشتری است که در ادامه به توضیحات آن می پردازیم [۳].



شکل (۱-۴): شماتیک دسته بندی آب شیرین کن ها

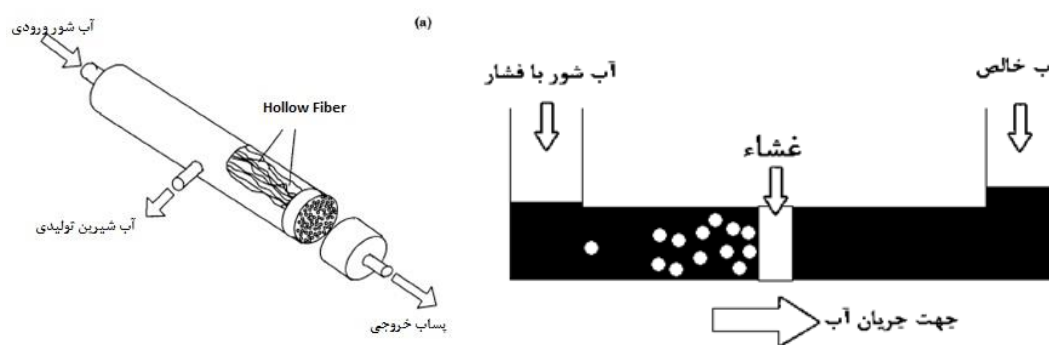
۱-۲-۱ آب شیرین کن اسمز معکوس (RO)

به طور کلی می توان گفت که این روش یک حالت از فیلتراسیون تحت فشار آب است. فیلترهای این روش تشکیل شده از لایه های غشایی نیمه تراواست. این لایه های نام برده شده با آب پر فشار در تماس بوده و می توان آب شیرین را عبور داده و ناخالصی ها را جدا کند. چرخه ی عملکرد کلی این روش شامل ۴ مرحله اصلی:

- پیش تصفیه
- پمپاژ فشار بالا
- برخورد با غشا
- تصفیه نهایی می باشد.

روش اسمز معکوس در صنعت کاربرد بالایی دارد و می‌توان تا حدود ۳۹۵۰۰۰ مترمکعب آب را در طول روز با این روش تصفیه کرد [۴].

اما همان‌طور که انتظار می‌رود هزینه‌های ساخت، نصب و بهره‌برداری، تعمیرات و نگهداری و... در این روش بسیار بالا است. همچنین به علت رسوب مواد ناخالصی و همچنین پساب‌های صنعتی تولید شده در این روش، دارای مشکلات زیادی نیز می‌باشد. با این وجود همچنان این روش یک تکنولوژی نوین و قابل‌اتکا در زمینه شیرین‌سازی آب شور است به‌طوری‌که این روش بیش از ۳۰ درصد سهم شیرین‌سازی آب در سطح جهان را به خود اختصاص داده است. [۴]



شکل (۵-۱): نحوه عملکرد سیکل آب شیرین کن اسمز معکوس [۵]

۲-۲-۱ آب شیرین کن تقطیر غشایی

در این روش از غشاء آب‌گریز و متخلخل استفاده می‌شود. بخارهای محلول به‌صورت دما بالا با تماس مستقیم با این غشاء هستند. عملکرد این غشا بدین‌گونه است که به علت اختلاف فشار بخار بین سطوح مختلف غشاء جداسازی صورت می‌گیرد. لازم به ذکر از در این نوع روش از نم‌زدایی و شیرین‌سازی آب تنها بخارها قادر به عبور از این مدل غشاء می‌باشند. [۶]

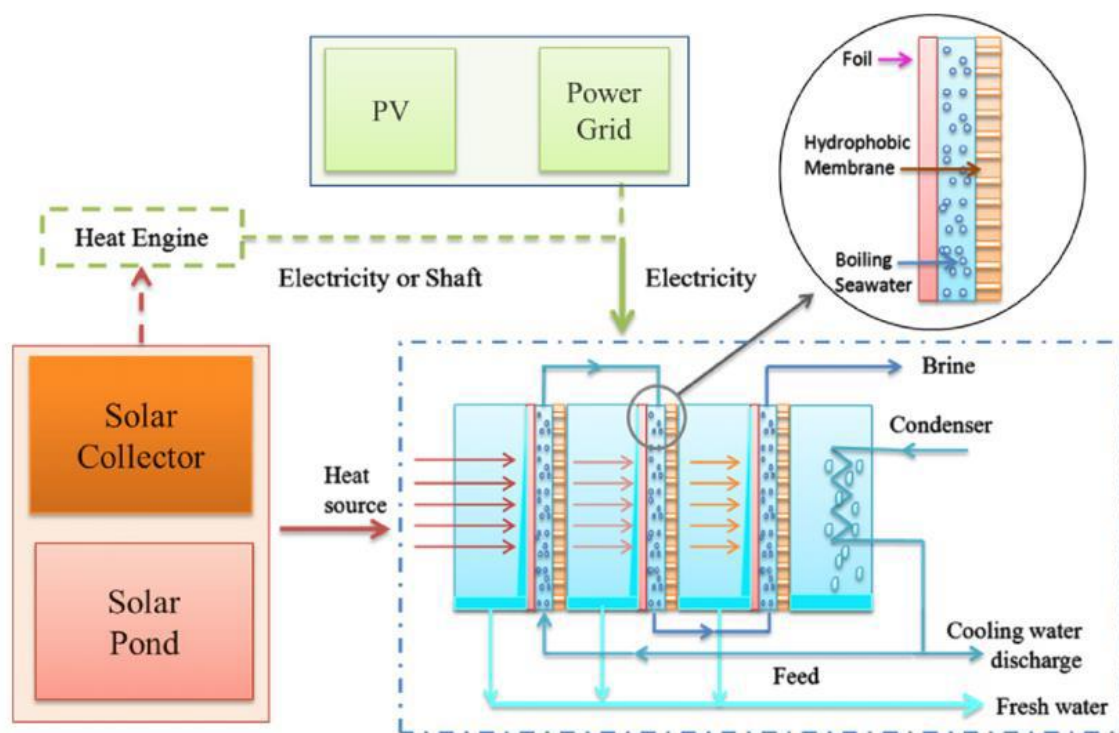
روش تقطیر غشایی عمدتاً به چهار شکل مختلف تقسیم می‌شود:

- تقطیر غشایی با شکاف هوا
- تقطیر فراگیر گاز

- تقطیر غشایی تماس مستقیم

- تقطیر غشایی تماس مستقیم در خلأ

غشاء سیستم در این روش حکم قلب این روش را دارد بنابراین دور از ذهن نیست که هزینه‌های این سیستم نیز تا حد بسیار زیادی وابسته به طول عمر غشاء باشد. اما در طرف دیگر سایر هزینه‌ها مانند هزینه‌ی انرژی لازم برای تولید آب تا حد مطلوبی با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر قابل کاهش می‌باشد. [۴]

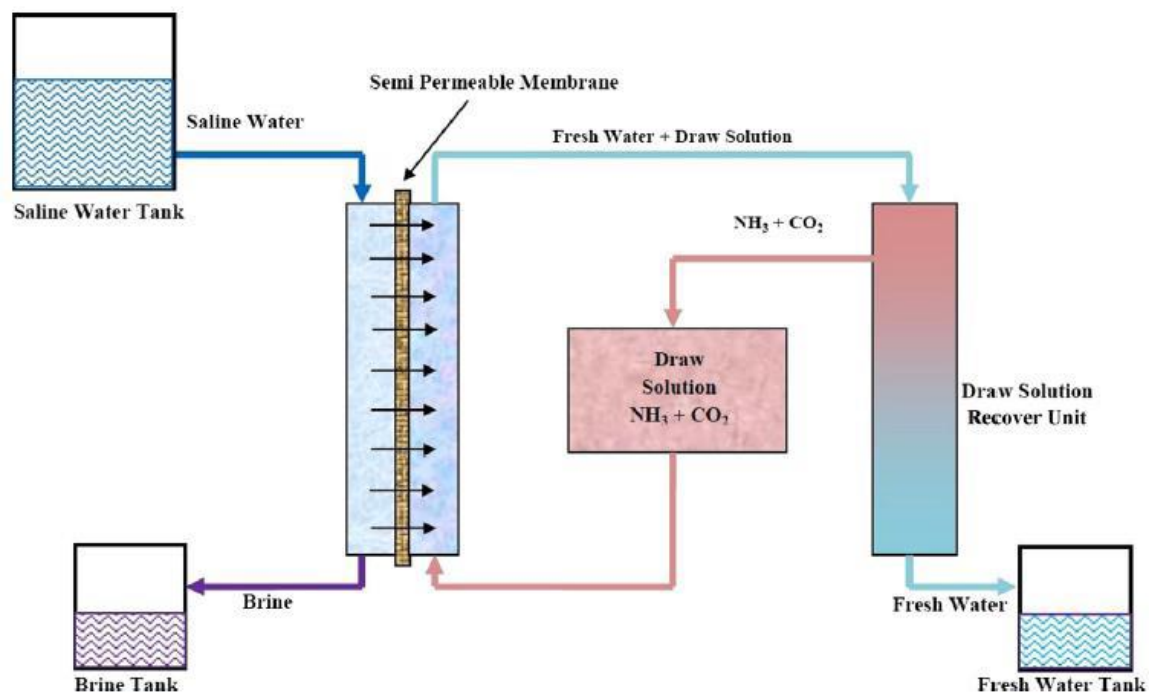


شکل (۶-۱): نحوه عملکرد آب‌شیرین‌کن تقطیر غشایی [۴]

۳-۲-۱ آب‌شیرین‌کن اسمز مستقیم

در روش اسمز مستقیم یا اسمز روبه‌جلو همانند بقیه روش‌های تک‌فاز از غشاء استفاده می‌شود. جنس غشاء در این روش نیمه نفوذپذیر است به همین دلیل در روش اسمز مستقیم مولکول‌های آب ناشی از آب‌شور از طریق این غشاء به سمت محلول دیگری حرکت می‌کند. این محلول دارای غلظتی بالاتر از غلظت آب‌شور ورودی به سیستم دارد و مبنای کار این روش نیز همین حرکت مولکول‌های آب بر غشاء نیمه

نفوذپذیر می‌باشد. لازم به ذکر است در روش‌هایی مانند اسمز معکوس قسمت قابل توجهی از هزینه‌های ثابت و متغیر صرف تأمین فشار هیدرولیکی لازم در سیستم شیرین‌سازی آب می‌شود. از مزایای محسوس این سیستم می‌توان به این امر اشاره نمود که فشار کاری این سیستم فشار اسمزی است و دیگر نیاز به صرف هزینه‌های بالا برای تحت فشار قراردادن آب مانند روش‌های اسمز معکوس نیست. [۴]



شکل (۷-۱): آب شیرین کن تک‌فازی به روش اسمز جلو [۴]

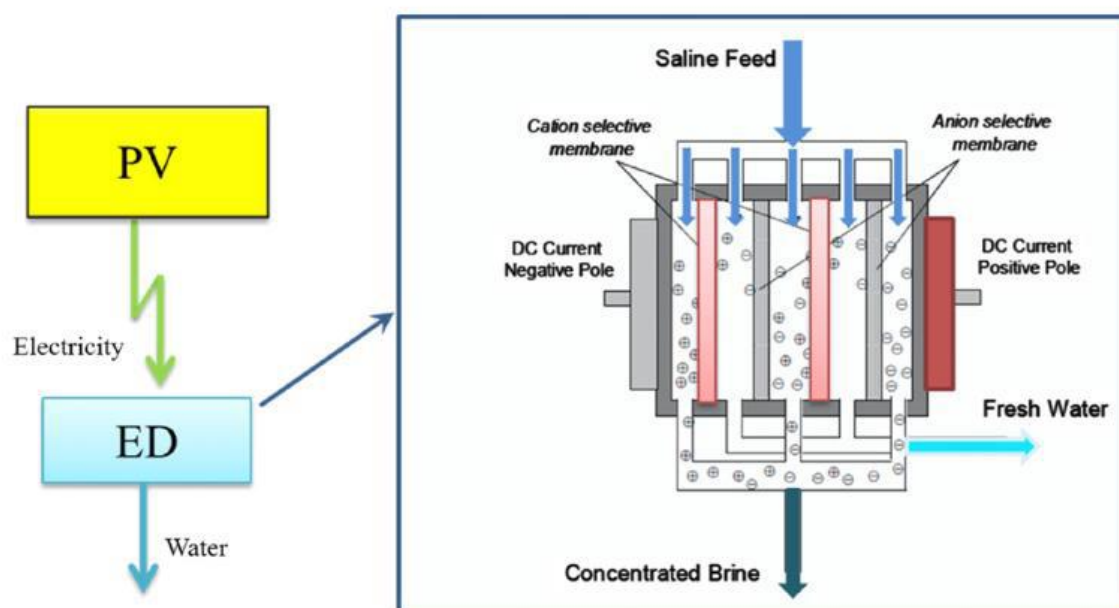
۴-۲-۱ آب شیرین کن الکترودیالیز

الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس رفتار و ساختاری بسیار مشابه دارد به همین دلیل هر دو را می‌توان در یک گروه جای داد. شیرین‌سازی به روش الکترودیالیز و الکترودیالیز معکوس با کمک انرژی الکتریکی انجام می‌شود. برای اولین بار در سال ۱۹۵۰ به صورت تجاری این روش در جهان معرفی شد. این فرایند بدین صورت که از انرژی الکتریکی برای تحریک و اجبار یون‌های نمک موجود در آب بهره می‌بریم. این

فرایند یک نوع فرایند الکتروشیمیایی محسوب می‌شود. در این روش مانند روش‌های قبل از یک غشا نیز استفاده می‌شود و این حرکات در بستر غشاء رخ می‌دهد.

بعد از اتصال جریان الکتریسیته یون‌های مثبت نمک در بستر غشاء کاتیونی حرکت کرده و به سمت الکترود مثبت حرکت می‌کند و به طور مشابه یون‌های منفی در بستر غشاء آنیونی حرکت کرده و به سمت الکترود منفی جذب می‌شوند. در نتیجه‌ی این عمل تعداد یون‌های نمک کاهش یافته و از شوری آب کاسته می‌شود. اما باید در نظر داشت به علت ذات طراحی این سیستم این روش برای آب‌ها با شوری خیلی بالا کاربرد بالایی ندارد. اما در رابطه با استفاده برای آب‌هایی که شوری بسیار بالایی ندارد بسیار کارآمد و قابل‌اتکا می‌باشد. به گونه‌ای که ظرفیت معمول این سیستم از ۲ تا ۱۴۵۰۰۰ مترمکعب در روز در دسترس است. [۴, ۶]

در الکترودیالیز معکوس قطب‌های الکترود به طور متناوب عوض شده و جهت حرکت یون‌ها تغییر می‌کند. این کار به این دلیل انجام می‌شود که بتوان قدری از رسوبات و فرسایش غشاء جلوگیری نمود.

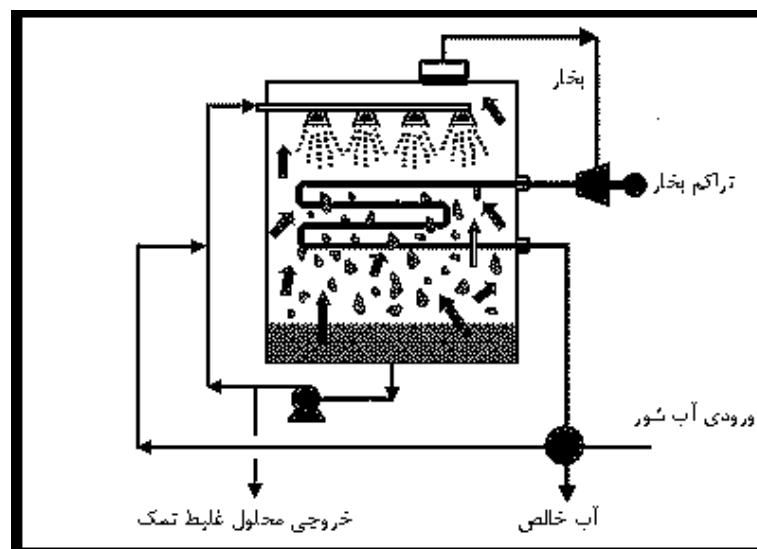


شکل (۸-۱): آب شیرین کن تک‌فازی به روش الکترودیالیز [۴]

۵-۲-۱ آب شیرین کن تبخیری به روش تراکم بخار

شیرین سازی آب به روش تراکم بخار یک سیکل حرارتی محسوب می شود. در ابتدای این سیکل انرژی حرارتی با استفاده از فشرده سازی بخشی از بخار و انرژی الکتریسیته تولید می شود. بخارها در این روش با روش تراکم مکانیکی منقبض می شود به طوری که در تراکم بخار حرارتی یک جت بخار مقدار کمتری از این روش تراکمی است. در مرحله بعدی این بخار وارد یک اواپراتور شده و آب شور پاشیده شده را بخار می کند و از کندانس این بخارات آب شیرین مورد نظر فراهم می شود.

همان طور که پیداست به علت تکنولوژی مورد استفاده در این روش مقیاس تولید آب شیرین در آن اندازه ی بزرگی نیست و در دسته بندی متوسط و کوچک جای می گیرد. برای شفاف سازی بیشتر در این موضوع می توان گفت تراکم بخار مکانیکی در این روش ظرفیتی ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ مترمکعب در روز را داراست. [۴] با توجه به سیستم و عملکرد آن اثرات زیست محیطی این روش تقریباً پایین می باشد که می توان آن را از مزیت های بزرگ این سیستم دانست. اما هزینه های ساخت و نصب تجهیزات این سیستم به گونه ایست که این روش را جز معدود انتخاب های جهانی برای شیرین سازی آب قرار داده است.



شکل (۹-۱): آب شیرین کن تک فاز ی به روش تراکم بخار [۷]

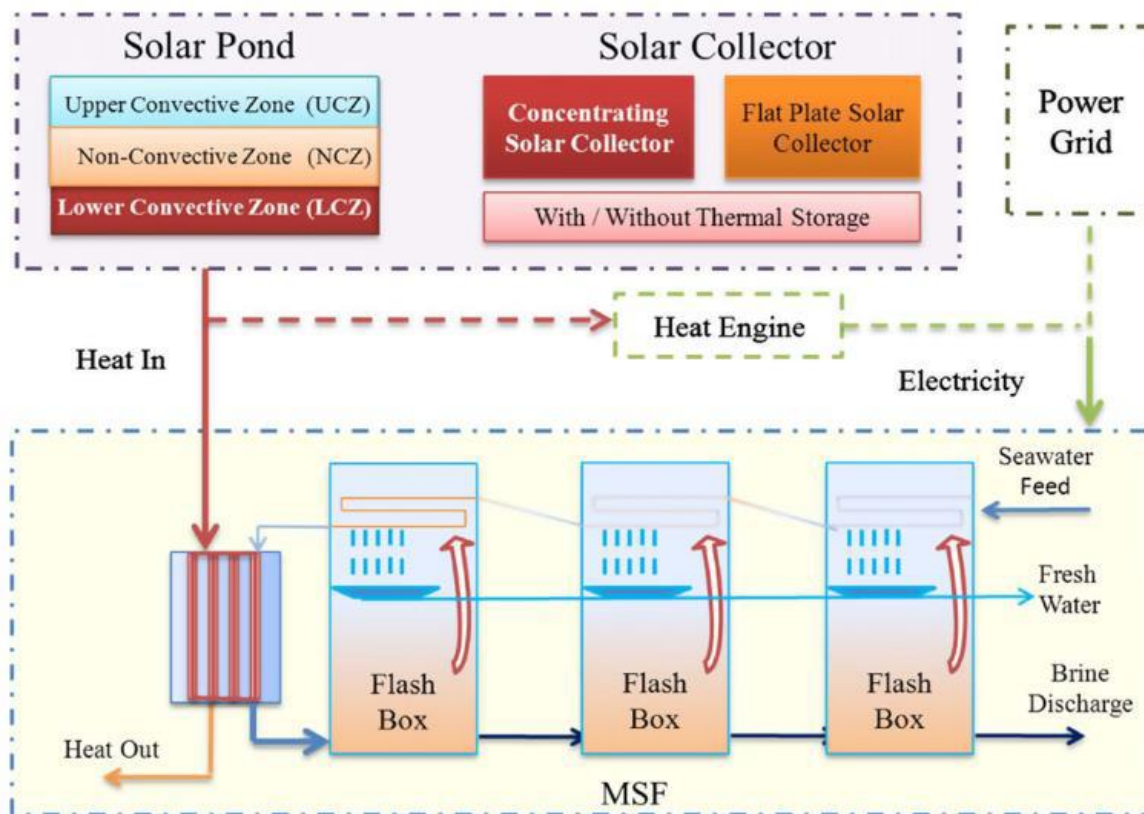
۶-۲-۱ آب شیرین کن تبخیری به روش تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای

این سیستم یکی از پرمصرف‌ترین روش‌های تولید آب شیرین است که هم‌زمان انرژی حرارتی برای گرم کردن آب شور و انرژی الکتریکی برای راه‌اندازی و استفاده از تعدادی پمپ و تجهیزات را نیاز دارد. اما در طرفی دیگر ظرفیت خروجی قابل قبولی را در مقیاس کوچک داراست. این ظرفیت باتوجه به طراحی می‌تواند از ۱۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ مترمکعب در روز قابل دسترسی باشد. این سیستم شامل مجموعه‌ای سری از برج‌های رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی می‌باشد که تعداد این برج‌ها از ۴ تا ۴۰ برج قابل تغییر است. فشار و دما در هر برج از فشار و دمای برج قبلی کمتر است و این امر موجب تبخیر ناگهانی آب شور و سپس چگالش آن به عنوان آب شیرین تولیدی می‌شود.

یکی از مزایای این روش این است که قابلیت کوپل شدن برای تأمین انرژی حرارتی مورد نیاز با سیستم های تولید انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی است که علاوه بر کمتر شدن هزینه‌های مورد نیاز برای تأمین انرژی، ضررهای زیست محیطی این سیستم را نیز به حداقل می‌رساند. اما تعمیر و نگهداری لوله‌ها به علت تبخیر و رسوب گذاری باعث شده این سیستم نیاز به تعمیرات و تمیزکاری دوره‌ای پیدا کرده باشد.

این روش پس از اسمز معکوس دومین روش پر استفاده تولید آب شیرین در جهان می‌باشد که این امر

بیشتر در کشورهای حوضه‌ی خلیج فارس صادق است. [۴]



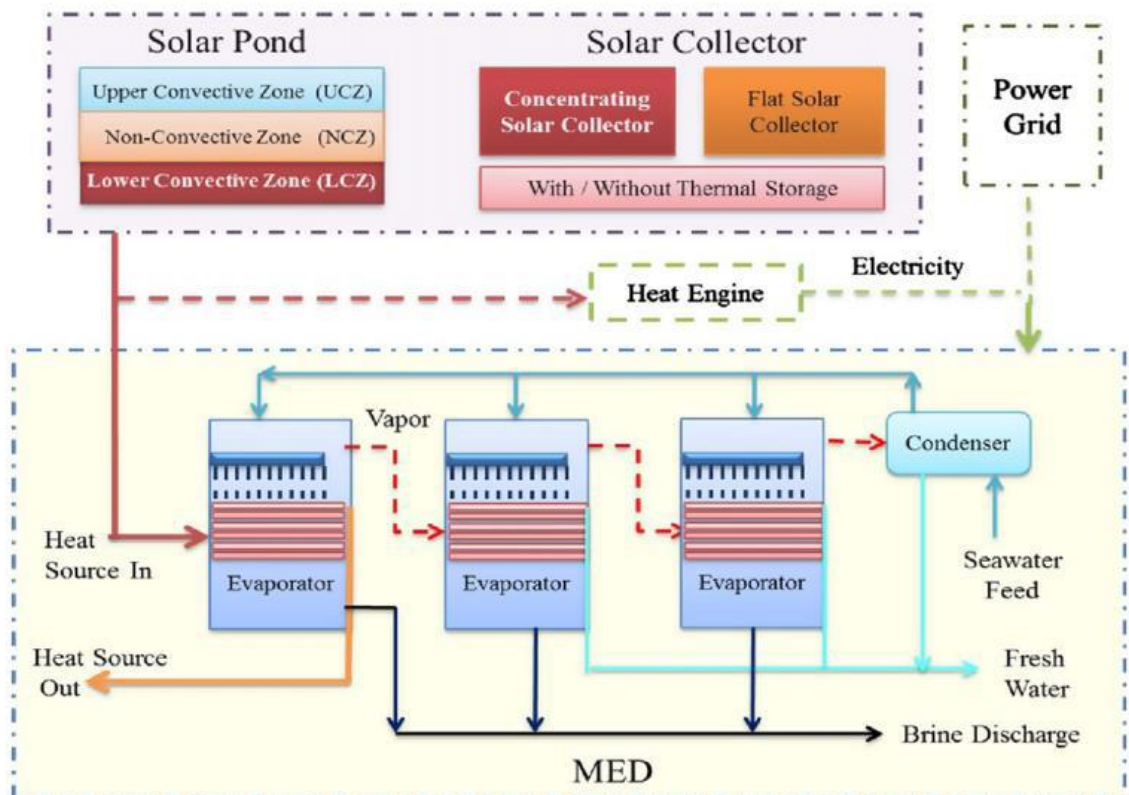
شکل (۱۰-۱): آب شیرین کن تک فازی به روش تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای [۴]

۷-۲-۱ آب شیرین کن تبخیری به روش تبخیر چند مرحله‌ای

این سیستم ساختار بسیار مشابهی با سیستم تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای دارد و فشار و دما در هر مرحله از فشار و دمای مرحله قبلی کمتر است. اما نحوه‌ی تبخیر آب شور و چگالش با روش قبل متفاوت است. در این روش در مرحله اول آب شور بر روی لوله‌های حاوی بخار پاشش می‌شود و مقداری از این آب شور بخار می‌شود. در مرحله بعدی باقی‌مانده‌ی آب شور بر روی لوله‌های حاوی بخار آب تولید شده در مرحله قبلی پاشش می‌شود. این امر از یک سو باعث تبخیر آب شور و از سوی دیگر موجب چگالش بخار آب درون لوله‌ها می‌شود. با کنترل فشار هر مرحله فرایند تبخیر و چگالش کنترل می‌شود به طوری که مرحله اول دارای بیشترین فشار و دما و مرحله آخر دارای کمترین فشار و دما می‌باشد.

ظرفیت این سیستم با توجه به طراحی می‌تواند از ۶۰۰ تا ۳۰۰۰۰ مترمکعب در روز قابل دسترسی باشد. مشابه سیستم قبلی این روش نیازمند هر دو نوع انرژی الکتریکی و حرارتی می‌باشد. اما از نظر تولید

گازهای گلخانه‌ای این سیستم در رتبه‌ی بهتری نسبت به سیستم تقطیر چندمرحله‌ای ناگهانی است و همین مهم باعث شده است همچنان جایگاه خود را در کنار روش تقطیر چندمرحله‌ای ناگهانی حفظ کند. [۴، ۶]

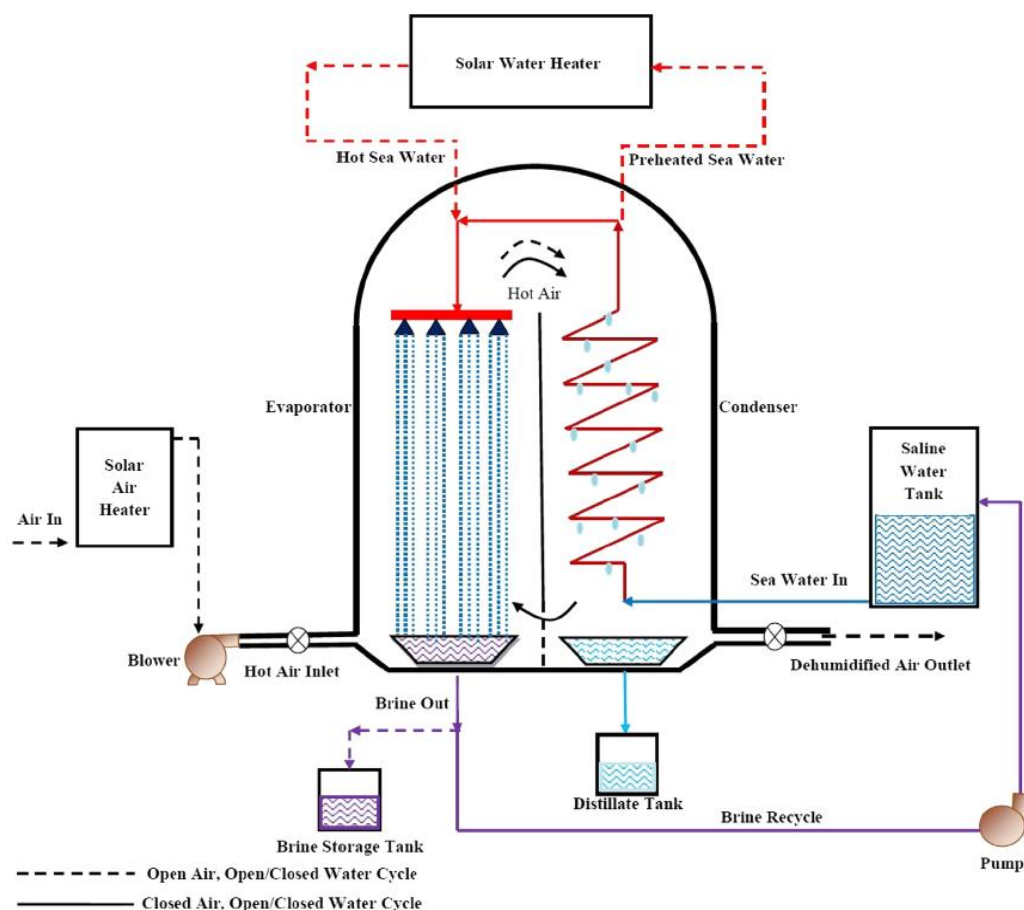


شکل (۱۱-۱): آب شیرین کن تک‌فازی به روش تقطیر چندمرحله‌ای [۴]

۸-۲-۱ آب شیرین کن تبخیری به روش HD

هوای طبیعی دارای خاصیت‌ها و ویژگی‌های شناخته شده‌ای می‌باشد. یکی از این ویژگی‌ها این است که میزان رطوبت اشباع در هوا به طور تقریبی به‌ازای هر ۱۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش حدود ۲ برابر می‌شود. به طور مثال هوا در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد حدوداً دو برابر همان مقدار هوا در دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌تواند در خود رطوبت حفظ کند و این خاصیت شروع کار فرایندهای رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی می‌باشد.

زمانی که هوا با آب شور گرم برخورد نماید می‌تواند مقدار قابل توجهی از بخار و رطوبت را در خود حل کند و با تقطیر این رطوبت محلول در هوا می‌توان آب شیرین با درجه سختی بسیار مناسبی تولید کرد. چرخه‌ی تولید آب در این فرایند به این صورت است که ابتدا آب شور با استفاده از یک منبع حرارتی گرم شده و سپس وارد برج رطوبت‌زنی می‌شود. در برج رطوبت‌زنی هوا با آب گرم برخورد داشته و افزایش رطوبت و دما را در پی خواهد داشت. سپس وارد برج رطوبت‌زدایی می‌شود و با کاهش دما و چگالش رطوبت تولید آب صورت می‌گیرد. در بخش بعدی به طور کامل‌تر به دسته‌بندی و شرح آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت-زنی-رطوبت‌زدایی می‌پردازیم.



شکل (۱۲-۱): آب‌شیرین‌کن تبخیری به روش (HD) [۴]

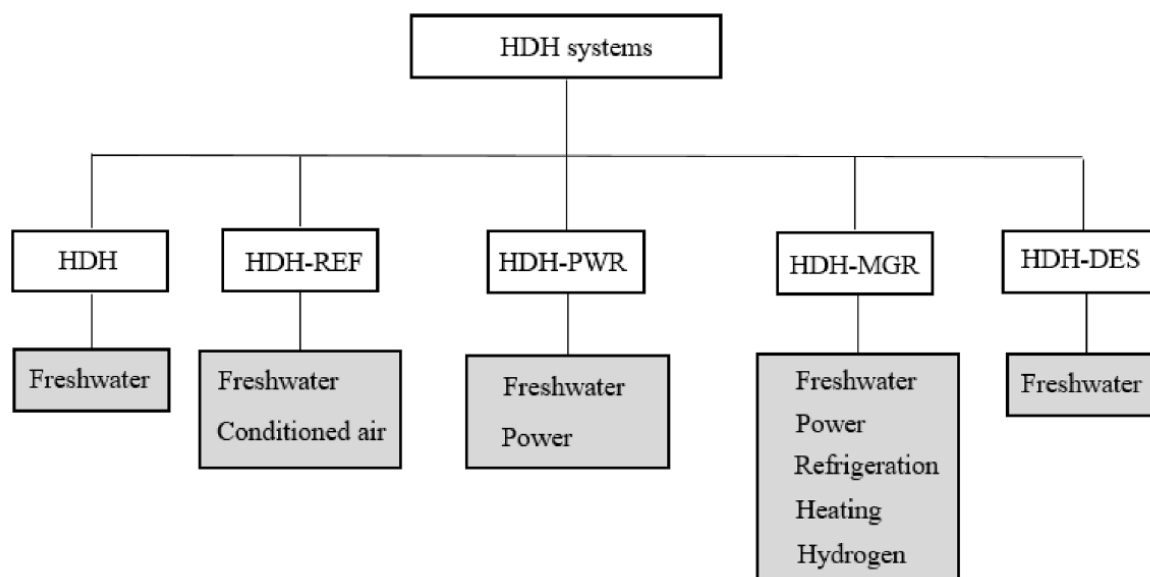
۳-۱ تقسیم‌بندی آب شیرین کن‌های رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی (HD)

۳-۱-۱ تقسیم‌بندی بر اساس ترکیب با سایر چرخه‌ها

آب شور موجود در منابع عظیم آب شور مانند دریاها و اقیانوس‌ها می‌تواند گزینه‌های مناسبی برای استفاده در این روش قرار گیرند. آب دریا در انتقال حرارت با منبع حرارتی افزایش دما داشته و وارد قسمت رطوبت زنی می‌شود. این آب شیرین کن نیز به علت عدم نیاز به منبع حرارتی با دماهای بسیار بالا قابلیت ترکیب با منابع انرژی تجدیدپذیر را داراست.

از طرفی تأمین آب شیرین و انرژی یکی از چالش‌های اصلی جهان در سال‌های اخیر است. آب شیرین کن‌های رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی یک روش کارآمد برای برآوردن تقاضای آب شیرین است. در مقایسه با سایر روش‌های نمک‌زدایی، این روش دارای مزایای متعددی مانند طراحی ساده، هزینه نگهداری و سرمایه اولیه کم، استفاده از انرژی با دمای پایین، قابلیت استفاده در مناطق کم‌جمعیت و صعب‌العبور برای تأمین نیاز آب شیرین است. [۸] این ویژگی‌های متمایز سیستم‌های HD محققان را بر آن داشته است تا بر روی چرخه‌های مختلف تبرید، توان و نمک‌زدایی با سیستم‌های HD تمرکز کنند تا میزان آب شیرین تولید شده، سرمایه‌ش، برق و غیره را هم‌زمان افزایش دهند.

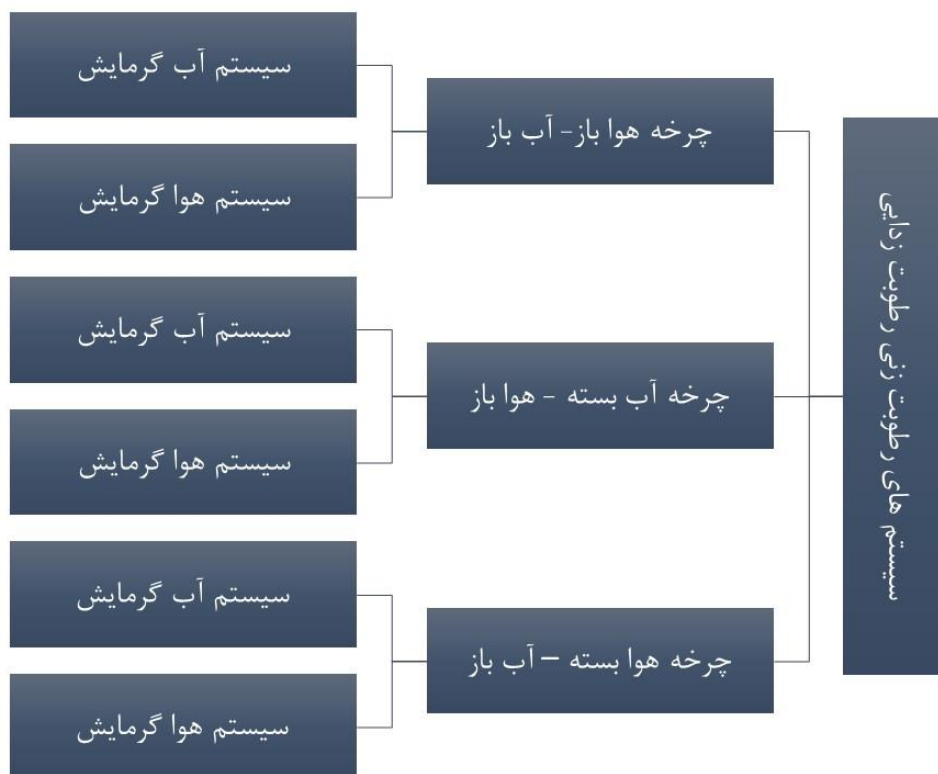
براین اساس می‌توان آب شیرین کن‌های رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی را ابتدا بر اساس کوپل شدن با چرخه‌های دیگر دسته‌بندی نمود.



شکل (۱۳-۱): دسته‌بندی آب‌شیرین‌کن‌های HD بر اساس کوپل با دیگر چرخه‌ها [۹]

۱-۳-۲ تقسیم‌بندی بر اساس نوع چرخه‌ی هوا و آب

در این دسته‌بندی نیز سیستم رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی می‌تواند از نوع آب گرمایش و یا هوا گرمایش تقسیم شوند و همچنین چرخه‌ی باز آب مصرفی در این سیکل و یا چرخه‌ی هوا به صورت باز یا بسته صورت بگیرد که در شکل ۱-۱۴ شماتیک کلی برای ترکیب هر دو نوع دسته‌بندی را مشاهده می‌کنید. [۴]



شکل (۱۴-۱): شماتیک دسته‌بندی آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی

۳-۳-۱ بر اساس نوع تبادل حرارت با منبع حرارتی

در قسمت قبلی اشاره شد چرخه‌های آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی می‌تواند از ۲ نوع هوا گرمایش و یا آب گرمایش باشد. این بدان معنی است که برای گرم کردن آب یا هوا نیاز به انتقال حرارت از منبع حرارتی به یکی از این دو عامل هستیم. در این قسمت می‌توان سیستم‌های تولید آب شیرین را بر اساس روش انتقال گرما از منبع حرارتی با سیال نیز به ۲ بخش تقسیم نمود.

- گرمایش مستقیم آب‌شور یا هوا قبل از ورود به برج‌ها
 - تأمین گرمایش و سرمایش انتقال غیرمستقیم حرارت از طریق رابط با منبع حرارتی
- در این تقسیم‌بندی اگر آب یا هوا مستقیم وارد یک منبع حرارتی شود و با انتقال حرارت از آن وارد بخش

رطوبت‌زدایی شود، می‌توان آب‌شیرین‌کن را در دسته‌بندی اول قرارداد. اما اگر آب یا هوا در تماس با یک مبدل حرارتی این انرژی را از سیالی دیگر دریافت کند و آن سیال وارد منبع حرارتی شود، می‌توان آب شیرین‌کن را در دسته‌بندی دوم قرارداد.

۴-۱ جمع‌بندی

باتوجه به اهمیت بالای موضوع تأمین آب شیرین در کشور، روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی هوا که روش مناسبی برای ظرفیت‌های پایین می‌باشد مورد بررسی قرار گرفته است. سیکل موردنظر در این پایان‌نامه آب‌شیرین‌کن با جریان بسته‌ی هوا و جریان باز آب و همچنین از نوع گردش اجباری هوا و با آب گرمایش می‌باشد. هدف اصلی از این تحقیق بررسی و ارزیابی نقاط قوت و نقاط ضعف در هر یک از روش‌های چگالش آب در کندانسورهای تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم از دیدگاه مصرف انرژی و اقتصادی می‌باشد.

فصل دوم مروری بر تحقیقات انجام شده

۱-۲ مقدمه

برای بررسی و تحلیل دقیق اطلاعات در ابتدا این امر ضروری است که مطالعات و تحقیقات از گذشته تا کنون مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور به دلیل گستردگی روش‌های شیرین‌سازی آب و توجه ویژه‌ای که در سال‌های اخیر به این موضوع شده است لازم است به توضیحی مختصر از تاریخچه برخی از دستاوردهای محققان بپردازیم. طبق مقالات موجود برای اولین بار استفاده از تقطیر خورشیدی برای نمک‌زدایی به قرن شانزدهم میلادی بازمی‌گردد. این شیمی‌دان عرب در سال ۱۵۵۱ به طور مستند از این روش برای نمک‌زدایی از آب‌شور استفاده نمود. وی از تعدادی ظرف شیشه‌ای را برای تقطیر آب استفاده نمود. سپس بلسون یک مهندس اهل سوئد به‌عنوان اولین فرد در سال ۱۸۷۲ دستگاه تقطیر خورشیدی را طراحی نمود. این دستگاه ابتدایی دارای مخزن بود که مستلزم پرشدن روزانه با آب شیرین بود. سپس آب در اثر جذب تابش خورشید تبخیر شده و روی جداره داخلی پوشش شیشه‌ای کندانس می‌شد. آب مقطر به میزان کم اولین بار از این روش به دست می‌آمد [۱۰]. با پیشرفت تکنولوژی و بهبود سرعت محاسبات و رواج رایانه النشر [۱۱] در سال ۱۹۹۲ با بهینه‌سازی سه پارامتر مؤثر بر خروجی دستگاه تقطیر توانست برای اولین بار برنامه‌ای در جهت بهبود راندمان آب‌شیرین‌کن‌ها تنظیم کند.

اوایل دهه ۹۰ مطالعات جدی‌تری در سیستم‌های رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی شکل گرفت. در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۶ میلادی، سه پروژه آب‌شیرین‌کن نیز در عراق، اردن و مالزی توسط یک گروه تحقیقاتی به بهره‌وری رسید [۱۲]. در ادامه به بررسی جدیدترین تحقیقات بر روی این زمینه که در ارتباط با این پایان‌نامه می‌باشند پرداخته شده است.

۲-۲ بررسی پژوهش‌های انجام شده

باتوجه به اینکه هدف از این پایان‌نامه بررسی و مقایسه دو نوع کندانسور تماس مستقیم و غیرمستقیم است لذا در ادامه پیشینه هر یک از این دو نوع آب‌شیرین‌کن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲-۱ پژوهش‌های انجام شده با رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم

دکتر محمد فرید و همکاران [۱۲] در سال ۱۹۹۰ اولین دستگاه آب‌شیرین‌کن را در عراق به ظرفیت ۱۲ $\text{lit}/\text{m}^2.\text{day}$ حوادث نمودند. تولید این دستگاه میزان قابل قبولی در نظر گرفته می‌شود اما میزان مصرف انرژی الکتریکی دمنده هوا به نسبت تولید بالا بود. دو واحد ساخته شده در اردن نیز از زحمات همین گروه می‌باشد که یکی در مقیاس صنعتی و دیگری در مقیاس آزمایشگاهی است [۱۳]. سپس سیکل هوا بسته و یا محفظه رطوبت‌زنی پر شده از پرده‌های چوبی، دو حالت جابه‌جایی طبیعی و اجباری هوا را مورد بررسی قرار دادند و پس از تجزیه و تحلیل جریان‌های طبیعی و جریان‌های اجباری به این مهم دست یافتند که جریان طبیعی مطلوب تر از جریان اجباری است [۱۴]. همچنین بررسی ضریب انتقال حرارت و انتقال جرم در HD صورت گرفت که تأثیر دبی آب را بر روی این ضرایب قابل توجه تأثیر دبی هوا را غیر قابل توجه دانستند. [۱۵]

گوسن و همکاران [۱۶] نیز با بکارگیری از انرژی خورشیدی در آب‌شیرین‌کن های HD به تحلیل برخی از پارامتر های اقتصادی و ترمودینامیکی پرداختند. در نتیجه منتشر شده از آن ها می‌توان دریافت که از لحاظ اقتصادی و راندمان، ساخت آب‌شیرین‌کن خورشیدی عملکردی قابل قبول دارد.

الحلاج و همکارانش [۱۷] با تحلیلی اقتصادی به بررسی سیستم های آب‌شیرین‌کن HD پرداخته اند، آنها با آنالیز عوامل مختلف مانند تغییر سطح کلکتور، چگالنده، و تبخیر کننده و مقایسه سیستم های HD با دیگر انواع آب‌شیرین‌کن‌ها مانند اسمز معکوس و ... توانستند بهینه‌سازی هزینه ای انجام دهند.

در سال ۲۰۱۳ ال هارون [۱۸] با مدل سازی ریاضی آب شیرین کن HD تأثیر عوامل سطح کندانسور، سطح اواپراتور، ظرفیت گرمایی و دبی آب را بر میزان تولید آب آنالیز نمود، همچنین برای مشاهدات بیشتر در پژوهش خود از ۳ نوع آکنه در اواپراتور استفاده کرده است. زیرا وی درصدد بود به بهترین عملکرد انتقال حرارتی را در رطوبت زنی دست یابد. ، مهم ترین نتایجی که ال هارون به آن ها دست یافت را می توان به ۳ بخش تقسیم نمود.

۱. با ثابت نگه داشتن ظرفیت گرمایی، سطح کندانسور و سطح رطوبت زنی و افزایش دبی آب، در هر سه نوع از پکینگ افزایش تولید را شاهد بودیم اما پکینگ اسفنجی میزان تولید بیشتری داشته است.

۲. با ثابت نگه داشتن ظرفیت گرمایی، دبی آب و سطح رطوبت زنی و افزایش سطح کندانسور میزان تولید کاهش می یابد اما پکینگ اسفنجی کمترین میزان کاهش تولید آب شیرین را داشت.

۳. افزایش دبی آب، باعث کاهش اختلاف حرارت بین ورودی و خروجی کندانسور می شود. اما در پکینگ اسفنجی نسبت به دیگر پکینگ ها با سرعت کمتری کاهش می یابد و در دبی ثابت آب، پکینگ اسفنجی استفاده شده در واحد شیرین سازی بیشترین اختلاف دما را داراست.

بهینه سازی مصرف انرژی در آب شیرین کن های رطوبت زنی رطوبت زدایی برای اولین بار توسط هو و همکاران [۱۹] در کشور چین انجام شده است. آن ها با استفاده از نمودارهای ترکیبی پینچ برای فرایند رطوبت زنی و رطوبت زدایی، حداقل مصرف انرژی را با استفاده از حداکثر بازیافت حرارت کندانسور بررسی نمودند.

در سال های اخیر سیستم های حرارتی با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک تحلیل انرژی و بهینه سازی شده اند. در سیستم های آب شیرین کن HD دو پدیده ی اصلی انتقال جرم و انتقال حرارت، وجود دارد که برخی از محققان توجه بسیاری به تحلیل و بررسی قانون دوم در انتقال هم زمان جرم و حرارت داشته اند.

روش‌های بهینه‌سازی متنوعی از سال ۲۰۰۷ تا به امروز توسط عمید پور و همکاران انجام شده است که مهم‌ترین آنها استفاده از دو مبدل برای ایجاد جریان اجباری و طبیعی جهت تولید بیشتر آب شیرین با در نظر گرفتن پارامترهای عملکردی مختلف [۱۹]، استخراج هندسه بهینه [۲۰] و همچنین افزایش بهره‌وری با استفاده از سیکل‌های چندمرحله‌ای می‌باشد [۲۱]. در این مطالعه، یک روش جهت بهینه‌سازی نرخ تولید آب به وسیله ی روش لاگرانژ مضاعف، انجام شد. در ادامه نیز اشرفی زاده و عمید پور، به تحلیل اگزرژی سیکل آب‌شیرین کن HD، با مدل چشمه و چاه پرداختند [۲۲].

سوفاری [۲۳] در سال ۲۰۰۹ بهینه‌سازی عملکرد سیستم آب‌شیرین کن HD را با سه متغیر به‌عنوان توابع هدف پیشنهاد کرد. در نتیجه ی این تحقیق موجب شد که نسبت دبی جرمی آب به هوا (L/G) و دمای آبگرم ورودی را به‌عنوان عوامل بسیار مؤثر در عملکرد آب‌شیرین کن معرفی شوند.

نارایان و همکارانش [۲۴] با تحلیل ترمودینامیکی چرخه آب‌شیرین کن HD را در دستور کار خود قرار دادند و بازدهی چرخه‌های مختلف HD را به‌صورت نظری بررسی نمودند. این چرخه‌ها با راندمان بالا شامل چرخه‌هایی نظیر تراکم گرمایی بخار چندگانه و فشار چندگانه می‌باشند. بعد از تشریح و بررسی نظری به این نتیجه دست یافتند که میزان GOR در سیستم تولید آب شیرین به روش HD می‌تواند تا حدود ۵ افزایش پیدا کند.

در سال ۲۰۱۴ ضامن [۲۱] و همکارانش موفق به ساخت یک واحد شیرین‌سازی آب‌شور به روش HD دو مرحله‌ای در مقیاس نیمه صنعتی شدند. پس از بررسی به‌صورت تجربی و مشخص کردن پارامترهای مؤثر بر تولید آب شیرین آنها به این مهم دست یافتند که با به کار گیری بخش‌های متعدد و چندمرحله‌ای سازی واحد شیرین‌سازی می‌توان تولید را تا ۲۰ درصد افزایش داد.

در همان سال شرقاوی [۲۵] روش‌های آب گرمایش و هوا گرمایش پارامترهای تأثیرگذار بر سیستم تولید آب شیرین به روش HD را بررسی نمود. وی با تشریح و بررسی به این نتیجه رسید که به دلیل رابطه مستقیم افزایش راندمان با افزایش سائز آب‌شیرین کن می‌توان به GOR بالاتری در این حالت رسید.

همچنین رابطه ی افزایش دمای ورودی و GOR در حالت هوا گرمایش مستقیم و در حالت آب گرمایش معکوس می باشد.

لی و همکارانش [۲۶] نیز در سال ۲۰۱۴ موفق به ساخت یک واحد کوچک آزمایشگاهی برای تولید آب شیرین به روش HD و برپایه هوا گرمایش شدند. طی تحقیقات و آزمایشات صورت گرفته بر روی این مدل و تغییر دمای آب پاششی از ۹ درجه سانتی گراد تا ۲۷ درجه سانتی گراد دریافتند که رطوبت نسبی هوای مرطوب خروجی از ۸۹٪ تا ۹۸٪ تغییر می کند و به طور همزمان دمای هوای خروجی نیز از ۳۵ درجه سانتی گراد تا ۴۵ درجه سانتی گراد افزایش میابد.

در همین سال عباسی [۲۷] و همکارانش با مدل سازی و بهینه سازی یک سیستم تولید همزمان آب با روش HD با کندانسور تماس غیرمستقیم استفاده ی دوگانه ی دیگری از این سیستم را پیشنهاد دادند. در ادامه با بهینه سازی چند هدفه ی این سیستم دریافتند که نقاط بهینه برای راندمان انرژی سیستم برابر با ۲۲,۴۹٪ ، هزینه ی تولید آب شیرین برابر با ۲,۹۴ دلار به ازای هر مترمکعب و هزینه ی تولید هیدروژن ۷,۳۷ دلار به ازای هر کیلوگرم از هیدروژن می باشد.

راجاسینیواسان و دیگر همکارش [۲۸] در سال ۲۰۱۷ سیستم رطوبت زدایی ستون حباب در مقیاس آزمایشگاهی با انرژی زیست توده را مورد بررسی قرار دادند. مشاهدات حاکی از آن بود که کارکرد رطوبت زنی با افزایش عمق آب ، دمای آب ، سرعت جریان جرمی هوا و سرعت جریان آب خنک کننده و کاهش قطر سوراخ لوله حبابی افزایش می یابد. از تجزیه و تحلیل تاگوشی مشخص شده است که دمای آب در کنترل عملکرد رطوبت زنی در مقایسه با سایر پارامترها غالب است. رطوبت بالاتر با قطر سوراخ لوله حبابی ۱ میلی متر ، عمق آب ۱۷۰ میلی متر و دمای آب ۶۰ درجه سانتی گراد ثبت می شود.

در سال ۲۰۱۷ نیز احمد [۲۹] و همکارانش به صورت عملی آزمایشاتی را بر روی یک واحد تولیدی آب شیرین با روش HD انجام دادند. در این سری از پژوهش های وی از آکنه های چین دار همراه با ورق های آلومینیومی در واحد رطوبت زنی استفاده شد و آنها دریافتند که با نسبت تولید آب با دمای آب رطوبت

زنی، دبی آب ورودی به رطوبت زنی و دبی آب کندانسور مستقیم است و با افزایش هر کدام از این عوامل تولید نیز افزایش پیدا می کند.

در سال ۲۰۱۹ هوانگ [۳۰] با بررسی تجربی یک آب شیرین کن HD مصرف کل انرژی یک سیستم را بهینه سازی نمود. بر این اساس، مدل بهینه سازی برای حداقل سازی مصرف کل انرژی اختصاصی پیشنهاد شده است. نتایج بهینه سازی نشان می دهد که ارزش بهینه با افزایش میزان تبخیر افزایش می یابد. مقدار جریان جرم هوا باید تا حد ممکن کوچک باشد. تنظیم سرعت جریان هوا و دمای ورودی در دستگاه نیز بیشترین تأثیر را بر انرژی مصرفی دارد. حداقل مقدار بهینه شده ۸۲۲,۶۷۶ کیلوژول بر کیلوگرم است.

ساجدو و [۳۱] همکارانش نیز در سال ۲۰۲۰ با تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم تولید آب شیرین HD با کندانسور تماس غیرمستقیم و سیکل هوا گرم همراه با برج بادی و چرخه آب باز و بسته دریافتند که میزان جریان جرم هوا ۰,۰۳۲-۰,۰۳۵ کیلوگرم بر ثانیه برای گرمایش هوا به وسیله ی خورشیدی برای حداکثر راندمان ۵ و ۴,۲ کیلوگرم در روز به ترتیب برای چرخه آب بسته و باز مناسب است. میزان جریان دبی آب رطوبت زدایی نیز ۰,۰۳۵-۰,۰۳۸ کیلوگرم بر ثانیه برای افزایش ۲۰۰ درصدی بهره وری بهینه شناخته شده است.

همچنین کومار [۳۲] نیز در سال ۲۰۲۰ با ترکیب دو روش اسمز معکوس و HD با کندانسور تماس مستقیم به بررسی ترمودینامیکی واحد تولید با استفاده از چرخه رانکین آلی پرداخت.

وی و همکارانش تأثیر پارامترهای مختلف مؤثر مانند فشار استخراج، نرخ استخراج بخار، دمای چگالش آب و فشار ورودی توربین را بر عملکرد این سیستم بررسی نمودند و به این مهم دست یافتند که پارامترهای توان، راندمان کل و تولید آب به ترتیب ۱۶,۷۴ کیلووات، ۴۲,۱۰ درصد و ۷۵,۱۸ کیلوگرم در ساعت تخمین زده می شود.

در سال ۲۰۲۱ عباسی [۳۳] و همکارانش به مدل سازی و بررسی ترمودینامیکی سیکل ترکیبی پیل سوختی و واحد شیرین سازی آب HD با کندانسور تماس غیرمستقیم برای تولید هم زمان توان و آب شیرین پرداختند.

با انجام تجزیه و تحلیل ترمودینامیکی این سیستم می‌تواند به طور تئوری قدرت، سرمایش و آب شیرین تولید کند. نتایج نشان می‌دهد که بازده انرژی و انرژی فعلی هنگامی که چگالی جریان در پیل سوختی برابر با (A/m^2) ۵۵۰ است، به ترتیب ۵۵٪ و ۶۰٪ می‌باشد.

قیاسی راد و همکارانش [۳۴] نیز در سال ۲۰۲۱ با بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی یک سیستم تولید هم‌زمان برق، گرمایش، سرمایش که با یک واحد شیرین‌سازی HD کوپل شده پرداخته‌اند. در این تحقیق دریافتند که از نظر تئوری توان خروجی سیستم، میزان تولید آب شیرین، ظرفیت گرمایش و سرمایش به ترتیب ۷۸,۴۷ کیلووات، ۹۲,۱ مترمکعب در روز، ۶۲۵۱ کیلووات و ۴۹۹۱ کیلووات می‌تواند قابل دسترس باشد.

۲-۲-۲ پژوهش‌های انجام شده با رطوبت‌زدایی تماس مستقیم

جهت انجام عمل رطوبت‌زدایی از هوا روش‌های مختلفی وجود دارد. بخار آب ناشی از تبخیر آب‌شور، وارد هوا (که به‌عنوان گاز حامل عمل می‌کند) می‌شود و سپس به‌عنوان هوای سرد مرطوب، متراکم می‌گردد. در کندانسور تماس مستقیم با برخورد مستقیم هوای گرم و مرطوب با آب سرد و شیرین انتقال گرما از هوا به آب صورت گرفته و باعث چگالش رطوبت موجود در هوا می‌شود. اما در کندانسور تماس غیرمستقیم با کاهش دمای تا زیر نقطه شبنم باعث تشکیل قطرات رو روی لوله‌ها و پره‌ها تولید آب صورت می‌گیرد. در سال‌های گذشته پژوهش‌های کمتری مرتبط با کندانسور تماس مستقیم صورت گرفته است که در ادامه به شرح مختصری از این پژوهش‌ها می‌پردازیم.

ضامن و همکارانش در سال ۲۰۱۳ با انجام پژوهش جدید بر سیستم تولید آب شیرین با روش HD موفق به مدل‌سازی دینامیکی این سیستم شدند. [۳۵] آنها در این مدل‌سازی با روش جدید از سیستم رطوبت‌زدایی تماس مستقیم به جای سیستم رطوبت‌زدایی غیرمستقیم و سیستم گرمایش آب خورشیدی استفاده نمودند. در نتیجه این سیستم با بازده بالا و منطق‌های اقتصادی موفق به تولید آب شیرین در حدود ۲۲-۶ مترمکعب در سال بسته به شرایط فصلی و اقلیمی شدند.

در سال ۲۰۱۷ [۳۶] هی و همکارانش یک سیستم آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس مستقیم را مدل‌سازی و مورد بررسی قرار دادند. مبنای مدل ریاضی قانون بقای انرژی و تولید آنتروپی می‌باشد. در این تحقیق نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که میزان GOR حداکثری در حالتی ممکن است که کمترین میزان برگشت ناپذیری را محیا نماییم. همچنین این شخص [۳۷] در سال ۲۰۱۹ با بررسی ترمودینامیکی و بهینه‌سازی یک پمپ حرارتی کوپل شده با آب‌شیرین‌کن HD که دارای سیکل باز هوا و باز آب است که نشان می‌دهد که بهترین عملکرد سیستم به میزان ۸۹/۲ کیلوگرم در ساعت برای تولید آب در این سیستم قابل دسترسی می‌باشد. همچنین با توجه به پارامترهای اقتصادی، هزینه تولید آب شیرین در شرایط بهینه ۰,۰۱۶ دلار به‌ازای هر لیتر به دست می‌آید.

ژائو و همکارانش در سال ۲۰۱۹ [۳۸] یک پژوهش عملی بر روی یک واحد آب‌شیرین‌کن HD۴ مرحله‌ای با روش تماس مستقیم انجام دادند. آنها تأثیر عواملی همچون دمای پاششی آب گرم، مقدار پاشش و حجم هوای در گردش را بر روی میزان تولید آب شیرین و GOR مورد بررسی قرار دادند و همچنین با بررسی پارامترهای اقتصادی تولید آب دریافتند در مقایسه با سیستم‌های معمولی، سیستم مورد بررسی آنها دارای راندمان بیشتر و هزینه عملکرد پایین‌تر است.

دهقانی و همکارانش [۳۹] نیز در سال ۲۰۱۸ به بررسی عملکرد سیستم تولید آب‌شیرین کوپل شده با پمپ حرارتی پرداختند. پمپ حرارتی به منظور تأمین همزمان بارهای سرمایش و گرمایش چرخه HD استفاده شده است. پارامترهای مورد تجزیه و تحلیل شامل مصرف انرژی الکتریکی، نسبت بازیابی و ضریب عملکرد برای ارزیابی سیستم استفاده شده است. در این تحقیق نشان داده شده است که با استفاده از دمای آب‌شور و دمای آب شیرین، یک سیستم HDH همراه با پمپ حرارتی بدون نیاز به افزودن کولر اضافی می‌تواند با تغییر نسبت جریان جرمی آب دریا به آب شیرین یا آب دریا به هوای خشک عمل نماید.

در سال ۲۰۱۹ دهقانی و همکارانش [۴۰] با مطالعه تجربی گردش مجدد آب دریا در مدیریت آب‌شور این سیستم‌ها انجام دادند. برای به حداقل رساندن حجم آب نمک بلودان شده و افزایش نسبت بازیابی آب

کلی در سیستم آب شیرین کن ، یک روش گردش مجدد آب نمک با در نظر گرفتن جریان پاششی جریان آب نمک متمرکز اجرا شد. این سیستم را قادر بود در حالت پایدار با آب شور با غلظت بالا در ورودی کار کند. با آزمایش هایی بر دستگاه آب با شوری ۱۰ تا ۳۰ درصد را بررسی نمودند تا قابلیت عملکرد حرارتی روش بازگرداندن آب نمک پیشنهادی را ارزیابی کند. نتایج نشان داد که نسبت بازیابی کلی نزدیک به ۸۸ درصد در شوری ۳۰ درصد را می توان با اجرای روش گردش مجدد آب نمک پیشنهاد کرد.

در سال ۲۰۲۱ نادا و همکارانش [۴۱] در طی بررسی به صورت عملی با ترکیب یک سیکل HD و یک سیستم تهویه مطبوع سعی در استفاده ی دوگانه از این سیستم برای تولید آب و همچنین تهویه هوا به این نتیجه دست یافتند که سیستم ترکیبی پیشنهادی می تواند آب شیرین تولید کرده و بار خنک کننده فضا را نیز برای حفظ راحتی مورد نیاز تأمین کند همچنین میزان تولید آب شیرین ، ظرفیت بار خنک کننده و عملکرد سیستم با افزایش جریان هوا و دمای آب و ضخامت آکنه افزایش میابد.

۲-۳ معرفی پژوهش حاضر و نوآوری

در این پژوهش مدل سازی ترمودینامیکی سیستم تولید آب شیرین با روش رطوبت زنی و رطوبت زدایی انجام خواهد شد و میزان تولید آب با دو کندانسور تماس مستقیم و غیرمستقیم بررسی و مقایسه می شود. در قسمت طراحی دقیق ترین روش برای مدل سازی حالت جریان مخالف با در نظر گرفتن حالت اشباع و فوق اشباع در قسمت رطوبت زنی مورد نظر می باشد.

همان طور که در بررسی پیشینه ی تحقیق اشاره شد، در استفاده های مختلف این سیکل، از کندانسورهای مختلفی استفاده شده است. اما جای خالی بررسی دقیق تر این موضع برای مقایسه عوامل مؤثر در تولید و مصرف انرژی در کندانسورهای مختلف همچنان محسوس است. به همین دلیل در این پایان نامه تصمیم بر این است با مقایسه دو کندانسور تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم بتوانیم در جهت بهبود عملکرد این سیستم، عوامل مؤثر را بررسی نماییم. در این مقایسه شرایط ورودی واحد رطوبت زدایی یکسان فرض خواهد شد؛ بنابراین واحد رطوبت زنی هر دو سیستم کاملاً مشابه هم فرض می شود.

پژوهش‌هایی در زمینه‌های تولید آب شیرین توسط پژوهشگران علوم مهندسی انجام شده است اما استفاده از روش رطوبت‌زنی جریان مخالف و مقایسه‌ی رطوبت‌زدایی با کندانسورهای تماس مستقیم و غیرمستقیم تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. از این جهت تحلیل فنی و اقتصادی جهت مقایسه این دو روش می‌تواند نوآوری این پژوهش باشد.

فصل سوم

مدل سازی

۳-۱ مقدمه

مدل سازی در تجزیه و تحلیل و طراحی آب شیرین کن ها بسیار مهم است. زیرا هزینه های ساخت و آزمایش عملی بسیار زیاد است و همچنین می توان پارامترهای مؤثر در تولید آب و مصرف انرژی را با سرعت بیشتری تجزیه و تحلیل کرد.

در این فصل به مدل سازی قسمت های رطوبت زنی، رطوبت زدایی تماس مستقیم و رطوبت زدایی تماس غیرمستقیم پرداخته شده است. مبنای مدل سازی واحدهای مختلف رطوبت زنی و رطوبت زدایی بر اساس قوانین ترمودینامیکی، معادلات بقای جرم و حرارت است.

در رطوبت زنی با استفاده از دو دستگاه معادلات مجزا در حالت اشباع و فوق اشباع و انتخاب نزدیک ترین جواب ها به حالت عملی سعی در کوچک کردن خطاهای برنامه ی نویسی و افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل داشته شده است.

در بخش رطوبت زدایی تماس مستقیم از معادلات مشابه ای با رطوبت زنی برای حل المان های کندانسور آکنه ای کمک گرفته ایم. زیرا اساس کار هر دو قسمت انتقال جرم و انرژی از هوا و آب است؛ بنابراین می توان با بازنویسی معادلات و تغییر جهت جریان انتقال جرم و انرژی المان های تعریف شده در رطوبت زدایی را نیز مورد بررسی قرار دهیم و در بخش رطوبت زدایی تماس مستقیم نیز با استفاده از روابط ترمودینامیکی انتقال حرارت توانسته ایم به مدلی مطلوب برای به دست آوردن مقادیر دمای آب و هوا و دیگر پارامترهای مورد بررسی در هر المان دست پیدا کنیم.

الگوریتم حل دستگاه معادلات نیز به صورت شماتیک در این بخش توضیح داده شده است. برای حل دستگاه های معادلاتی گفته شده از نرم افزار متلب کمک گرفته شده است. علت این انتخاب دقت بالا و سرعت محاسباتی بالای این نرم افزار می باشد.

۳-۲ تشریح عملکرد سیستم

یک سیستم آب‌شیرین‌کن با چرخه‌ی بسته‌ی رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی به‌طور کلی دارای چند بخش زیر است:

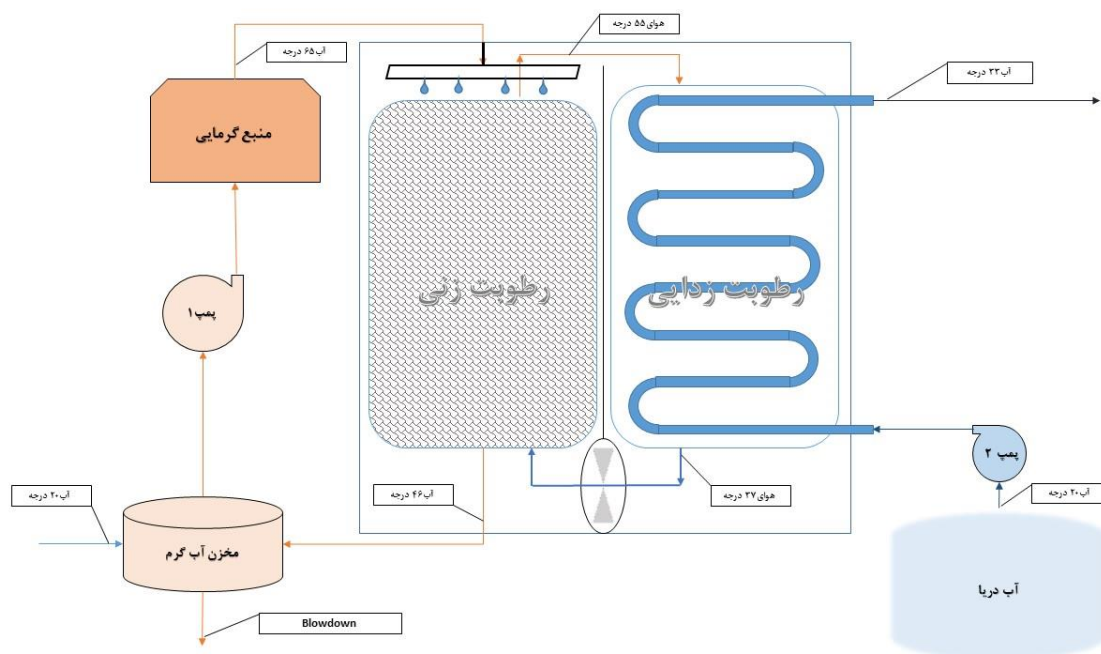
- منبع حرارتی
 - واحد رطوبت‌زنی
 - واحد رطوبت‌زدایی
 - مخزن آب گرم
 - مخزن آب سرد
 - پمپ‌های مدار رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی
 - مبدل‌های حرارتی
 - فن
 - اسکلت پایه برای قرارگیری هر واحد
 - لوله‌ها و مجاری انتقال آب
 - نازل‌ها یا دوش‌های پاشش آب
- شماتیک کلی مسیر گردش هوا و آب در این بخش را می‌توان به‌صورت شماتیک در اشکال ۱۵- ۳ و ۱۶- ۳ نشان داد. در ادامه با بررسی جزئی‌تر اجزای رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی به بررسی سیستم و معادلات هر بخش پرداخته شده است.

در سیستم آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس غیرمستقیم ابتدا دمای آب‌شور تغذیه سیستم با تبادل گرما با منبع حرارتی افزایش دما می‌یابد. سپس آب‌شور گرم شده وارد قسمت رطوبت‌زنی شده و روی جداره‌ی پکینگ پاشش می‌شود. هوای خنک در جهت مخالف با پاشش آب گرم با کمک فن در قسمت پایین برج رطوبت‌زنی دمیده می‌شود و پس از مجاورت و تماس با آب گرم، رطوبت هوا بالا رفته و وارد قسمت رطوبت

زدایی می‌گردد.

در برج رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم، آب سرد مورد استفاده به عنوان منبع سرد با استفاده از یک پمپ وارد کندانسور شده و هوای مرطوب با مجاورت و برخورد به لوله‌ها و پره‌های کندانسور کاهش دما را در برخواهد داشت. بدین ترتیب رطوبت موجود در هوا تقطیر شده و مجدد هوا وارد قسمت رطوبت‌زنی می‌شود.

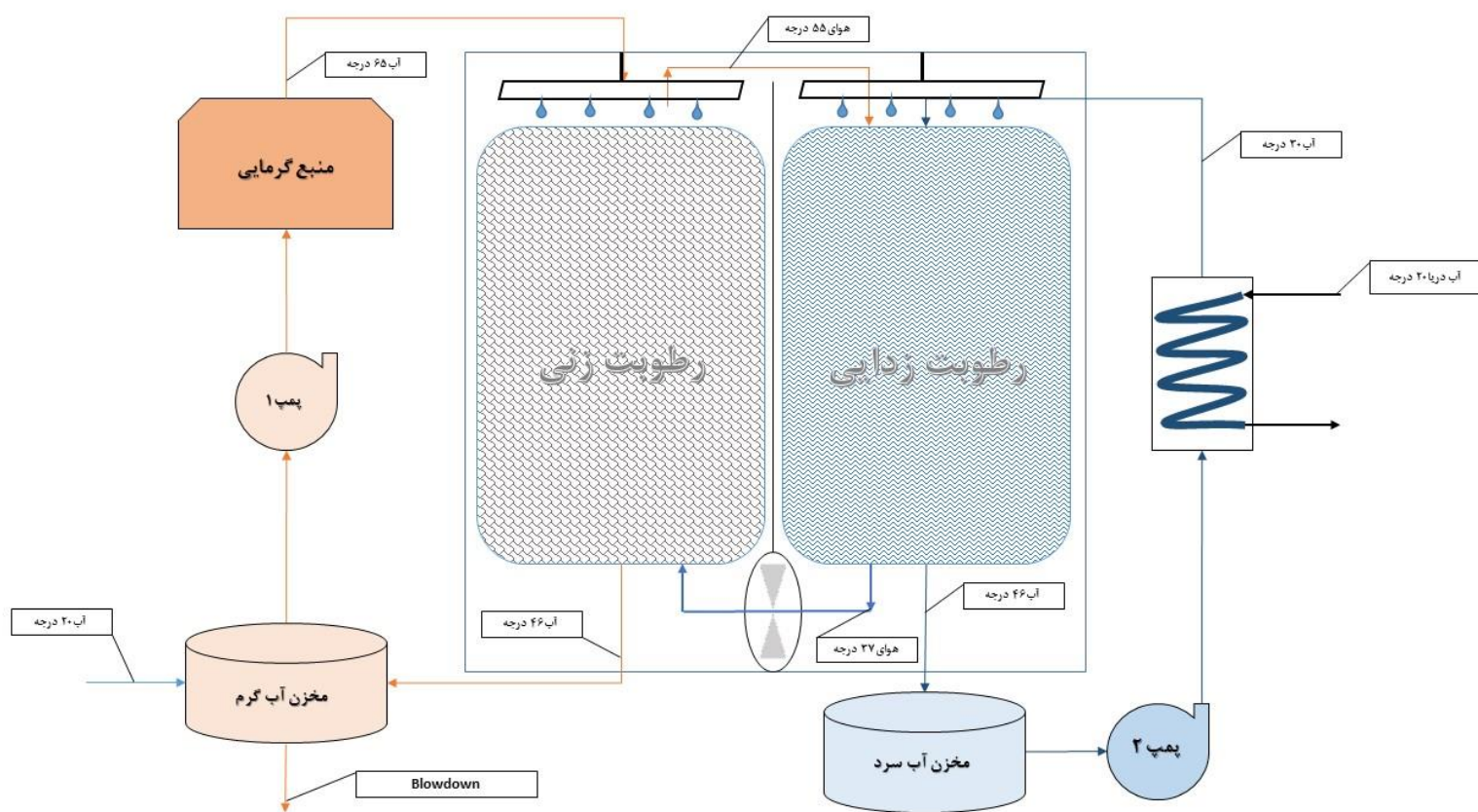
شکل ۱۵-۳ شماتیک کلی این چرخه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۵-۳): سیستم HD با کندانسور تماس غیرمستقیم

در سیستم آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس مستقیم نیز کاملاً مشابه با آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس غیرمستقیم، ابتدا دمای آب‌شور تغذیه سیستم با تبادل گرما با منبع حرارتی افزایش دما می‌یابد. سپس آب‌شور گرم شده وارد قسمت رطوبت‌زنی شده و روی جداری پکینگ پاشش می‌کند. هوای خنک در جهت مخالف با پاشش آب گرم با کمک فن در قسمت پایین برج رطوبت‌زنی دمیده می‌شود و پس از مجاورت و تماس با آب گرم، رطوبت هوا بالا رفته و وارد قسمت رطوبت‌زدایی می‌شود.

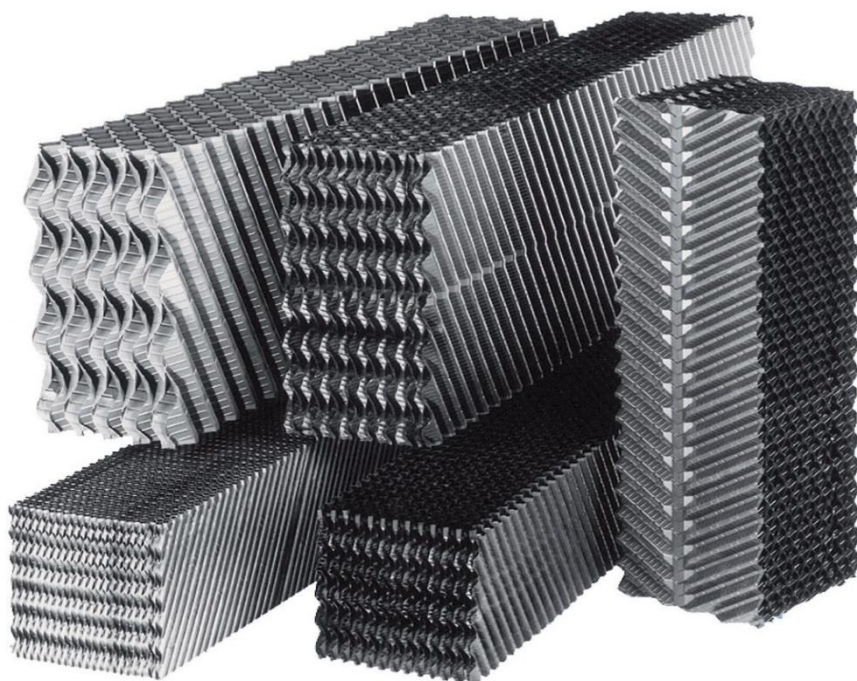
واحد رطوبت‌زنی در آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس غیرمستقیم کاملاً مشابه آب‌شیرین‌کن با کندانسور تماس غیرمستقیم عمل می‌کند. زیرا برای بررسی دقیق نقاط قوت و ضعف هر کندانسور باید ورودی‌های رطوبت‌زنی هر دو سیستم مشابه هم دیگر باشد. اما در قسمت رطوبت‌زدایی با استفاده از پاشش آب شیرین خنک شده و برخورد مستقیم هوای مرطوب با آب انتقال حرارت صورت گرفته و تقطیر صورت می‌گیرد. شکل ۱۶-۳ شماتیک کلی این چرخه را نشان می‌دهد.



شکل (۱۶-۳): سیستم HD با کندانسور تماس غیرمستقیم

۳-۳ مدل سازی رطوبت زنی

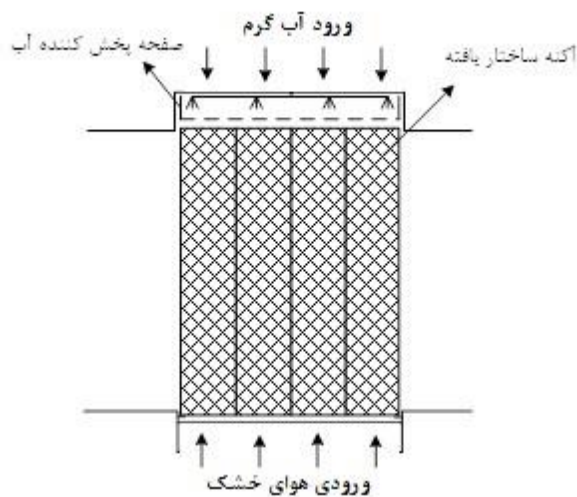
رطوبت زنی بخش مشترک و مهم همه چرخه های آب شیرین کن رطوبت زنی و رطوبت زدایی است. یکی از رایج ترین فرایندهای رطوبت زنی تماس مستقیم هوا با آب است که در نتیجه ی آن مولکول های آب تبخیر شده و به هوا نفوذ می کنند. در فرایند رطوبت زنی می توان از وسایلی مانند برج های دیواره مرطوب، برج ها و محفظه های اسپری و پاشش و... استفاده کرد. در این پروژه، استفاده از برج های آکنه معمولی در نظر گرفته شده است. این آکنه ها در صنایع شیمیایی و پتروشیمی و همچنین در برج های خنک کننده کاربرد زیادی دارند. این آکنه ها برای جریان های همسو و ناهمسو آب و هوا یا جریان های ترکیبی هر دو استفاده می شوند.



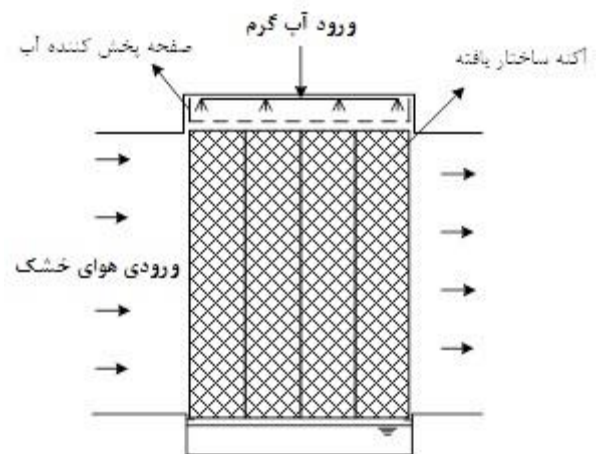
شکل (۱۷-۳): آکنه

امروزه با پیشرفت فناوری‌های تولید این نوع آکنه‌ها، استفاده از انواع مختلف آن از جنس پلی ونیل کلراید و پلی پروپیلن رو به افزایش است از مزیت‌های این آکنه‌های پلی پروپیلنی تحمل دمای بالای ۸۰ درجه سانتی گراد و طول عمر بالای این آکنه‌ها است. اما همچنان آکنه‌های ساخته شده از PVC به علت هزینه‌ی کمتر تولید، محبوبیت بالاتری دارد. سطح ویژه‌ی آکنه‌های مصرفی در صنعت آب‌شیرین‌کن‌های رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی معمولاً در بازه‌ی ۱۲۰ تا ۲۴۰ مترمربع بر مترمکعب می‌باشد.

همان‌طور که در شکل‌های (۳-۱۹) و (۳-۱۸) مشهود است، در آب‌شیرین‌کن HD طراحی بدین شکل است که هوا ابتدا از برج رطوبت زنی عبور کند. باتوجه‌به جهت حرکت آب و هوا در برج رطوبت زنی، آنها به دو حالت متقابل و جریان متقاطع تقسیم می‌شوند.



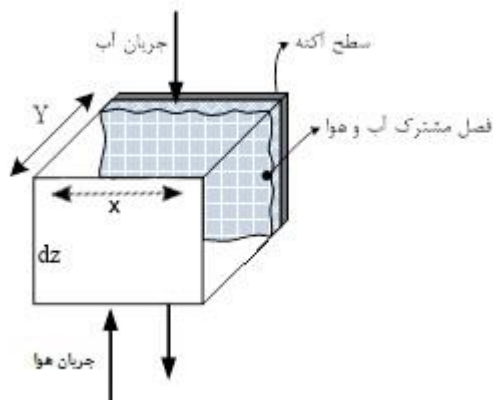
شکل (۳-۱۸) رطوبت زنی جریان مخالف



شکل (۳-۱۹) رطوبت زنی جریان متقاطع

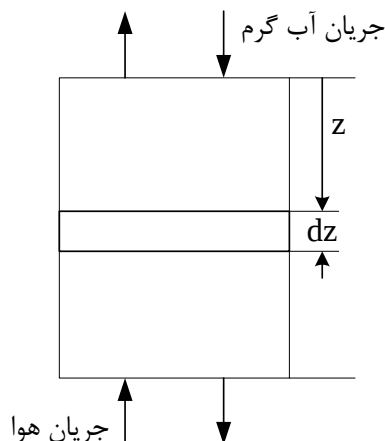
در تجربه‌ها و مقالات گذشته مدل‌سازی جریان متقاطع انجام شده است و نتیجه‌های مربوطه در مقالات به انتشار درآمده‌اند. در این پروژه هدف ما مدل‌سازی جریان مخالف برج رطوبت‌زنی ابتدا در حالت اشباع و سپس بررسی و پیدا کردن روابط در حالت فوق اشباع می‌باشد.

برای بررسی و تحلیل دقیق معادلات حاکم حجم کنترلی مشابه شکل ۲۰-۳ در نظر گرفته می‌شود. در حالت حجم کنترل ذکر شده دو فاز هوا و آب از روی یکدیگر می‌گذرند و به وسیله‌ی یک فصل مشترک از هم جدا می‌شوند. سطح این فصل مشترک برابر حاصل ضرب سطح ویژه آکنه در حجم این المان از آکنه می‌باشد. سطح ویژه آکنه به عنوان مساحت سطح آکنه در واحد حجم آن تعریف شده است و غالباً توسط سازندگان به عنوان یکی از ویژگی‌های آکنه ارائه شده است.



شکل (۲۰-۳): چگونگی در نظر گرفتن دو فاز در حجم کنترل جریان متقاطع

- باتوجه به جهت جریان‌ات آب و هوا بر روی آکنه، حجم کنترل مناسب باید مطابق شکل ۱ انتخاب شود. معادلات اصلی در جریان آب و هوای مخالف باید به صورت یک بعدی و المان افقی در نظر گرفته شود. بر اساس نحوه تغییر مشخصات آب و هوا در آکنه، می‌توان از فرضیه‌های زیر استفاده کرد:
- تغییرات دمایی و رطوبت هوا فقط در جهت جریان هوا (محور Z) است و تغییرات آنها در جهت دیگر چشم‌پوشی خواهد شد.
 - تغییرات دمایی و دبی آب فقط در جهت عمودی (محور Z) بوده و از تغییرات در راستای دیگر چشم‌پوشی خواهد شد.



شکل (۳-۲۱): حجم کنترل در نظر گرفته شده بر روی آکنه با جریان مخالف

۳-۴ معادلات حاکم در رطوبت‌زنی

از دیدگاه نظری و عملی ممکن است که هوا قبل از خروج از برج رطوبت‌زنی و به حالت اشباع رسیده باشد. همان‌طور که در شکل ۳-۱۵ مشخص است در ادامه مسیر هوای درون برج، دمای هوای مجاور فصل مشترک (T_i) از دمای توده هوا (T_g) که به‌تازگی به حالت اشباع رسیده بالاتر است؛ بنابراین امکان انتقال جرم از فصل مشترک آب‌وهوا به توده هوا وجود دارد. در این حالت بخار آب اضافه شده به جریان هوا به‌صورت قطره‌های آب به توده اضافه می‌شود و به بیانی دیگر توده هوا همراه با مه از برج رطوبت‌زنی خارج می‌شود. زمانی که این اتفاق رخ می‌دهد روابط حالت اشباع دیگر پاسخ‌گوی نیاز ما برای بررسی و تشریح دقیق اطلاعات نیست. در ادامه تلاش بر این است مدل مناسبی برای این حالت ارائه شود.

در مدل‌سازی و بیان معادلات حاکم در هوای مه‌آلود نیز از حجم کنترل ذکر شده در شکل ۳-۲۰

استفاده می‌شود. ارائه معادلات حالت فوق اشباع قبلاً در پژوهش ضامن و همکارانش [۴۲] در حالت

جریان متقاطع صورت‌گرفته است. در این بخش ما این حالت را با تغییر المان‌های انتخابی به حالت

جریان مخالف بررسی می‌کنیم. عنصر مه در معادلات با نماد متغیر w_m فرض شده است. این مقدار نشان

دهنده ی نسبت جریان جرمی این قطرات است. به صورت مشابه با تعریف رطوبت مطلق هوا (ω) نسبت جرم این قطرات به جریان جرمی هوای خشک با متغیر ω_m نشان داده می شود. استفاده از این متغیر سبب ساده سازی و قابل فهم تر شدن روابط و مدل سازی می شود. در ابتدا با برخی تعاریف مورد استفاده آشنا میشویم و سپس بقای جرم و گرما برای حجم کنترل نشان داده شده مطابق شکل ۲۰-۳ بیان می شود. به همین منظور لازم به ذکر است که در کلیه روابط جریان جرمی هوا و آب بر واحد سطح مقطع عبوری از آن استفاده شده است. بر این اساس L شار جرمی آب پاششی بر واحد سطح بالایی آکنه و G شار جرمی هوای خشک عبوری از سطح مقطع کانال عمودی می باشد.

با در نظر گرفتن قطرات در دمای توده هوا قرار دارند، آنتالپی جریان هوای مه آلود بر واحد جرم هوای خشک در درجه حرارت T_g نسبت به درجه حرارت مبنای T_0 به صورت زیر محاسبه می شود:

$$H_m = C_{pa}(T_{gH} - T.) + \omega_{sH}(C_v(T_{gH} - T.) + \lambda.) \quad (3-1)$$

$$+ \omega_{mH}C_{pw}(T_{gH} - T.) = C_{pm}(T_{gH} - T.) + \omega_s\lambda.$$

در این فرمول λ گرمای نهان تبخیر آب در درجه حرارت مبنای (در این پژوهش صفر درجه سانتیگراد) می باشد. زیر نویس S مربوط به حالت اشباع و زیر نویس m نشان دهنده هوای مه آلود اشباع است. C_{pm} نیز گرمای ویژه مخلوط هوا و بخار آب در این حالت به صورت زیر محاسبه می شود:

$$C_{pm} = C_a + \omega_s C_v + \omega_m C_w \quad (3-2)$$

در رابطه بالا λ در دمای مبنای $T.$ و ضرایب C_{pa} ، C_{pv} و C_{pw} در دمای متوسط $(T_{gH} + T.)/2$ محاسبه می شود. با توجه به تحقیقات گذشته می توان گفت درصد قطرات آب در جریان هوا پایین است. بنابراین فرض می شود که ضریب انتقال جرم در هوای مه آلود با حالت غیر اشباع برابر باشد. قانون بقای جرم برای کل حجم کنترل به صورت زیر محاسبه می شود:

$$L_H|_z XY - L_H|_{z+\Delta z} XY + G\Delta z Y \omega_{sH}|_z - G\Delta z Y \omega_{sH}|_{z+\Delta z} \quad (3-3)$$

$$+ G\Delta z Y \omega_{mH}|_z - G\Delta z Y \omega_{mH}|_{z+\Delta z} = 0.$$

که می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\partial L_H}{\partial z} = -G \left(\frac{\partial \omega_{sH}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial z} \right) \quad (3-4)$$

جریان جرمی هوای خشک ثابت در نظر گرفته شده است؛ بنابراین بقای جرم برای بخار و قطرات آب همراه با جریان هوا به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G \Delta z X Y \omega_{sH}|_z - G \Delta z X Y \omega_{sH}|_{z+\Delta z} + G \Delta z X Y \omega_{mH}|_z - G \Delta z X Y \omega_{mH}|_{z+\Delta z} + k_g a (\omega_i - \omega_s) X \Delta z Y = 0 \quad (3-5)$$

که حالت دیفرانسیلی آن به‌صورت زیر می‌باشد:

$$G \left(\frac{\partial \omega_{sH}}{\partial z} + \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial z} \right) = k_g a (\omega_i - \omega_s) \quad (3-6)$$

اصل بقای انرژی برای کل حجم کنترل به‌صورت زیر است. مشتق جزئی آنتالپی هوا باتوجه‌به تعریف آنتالپی هوای مه‌آلود، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_m}{\partial z} &= C_{pa} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} + \omega_{sH} C_{pv} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} \\ &\quad + (C_{pv}(T_{gH} - T.) + \lambda.) \frac{\partial \omega_{sH}}{\partial z} + \omega_{mH} C_{pw} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} \\ &\quad + C_{pw}(T_{gH} - T.) \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial z} \\ \Rightarrow \frac{\partial H_m}{\partial z} &= C_{pm} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} + (C_{pv}(T_{gH} - T.) + \lambda.) \frac{\partial \omega_{sH}}{\partial z} \\ &\quad + C_{pw}(T_{gH} - T.) \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial z} \end{aligned} \quad (3-7)$$

لذا قانون بقای انرژی با در نظر گرفتن هوای مه‌آلود به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$\begin{aligned}
& L_H C_{pw} \frac{\partial T_{wH}}{\partial z} \\
& + G \left(C_{pm} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} \right. \\
& + (C_{pv}(T_{gH} - T.) - C_{pw}(T_{wH} - T.) + \lambda.) \frac{\partial \omega_{sH}}{\partial z} \\
& \left. + C_{pw}(T_{gH} - T_{wH}) \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial z} \right) = .
\end{aligned} \tag{۳-۸}$$

بقای انرژی برای جریان هوا نیز به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned}
& G \Delta z Y H_m|_z - G \Delta z Y H_m|_{z+\Delta z} \\
& + k_g a (\omega_i - \omega_{sH}) (C_{pv}(T_{gH} - T.) + \lambda.) X \Delta z Y \\
& = h_g a X \Delta z Y (T_{gH} - T_i)
\end{aligned} \tag{۳-۹}$$

پس از جاگذاری مشتق جزئی آنتالپی در شکل دیفرانسیلی رابطه فوق و بقای انرژی برای جریان هوا برابر است با:

$$\begin{aligned}
G C_{pm} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} & = \left(G (C_{pv}(T_{gH} - T.) + \lambda.) \right. \\
& \left. - G C_{pw}(T_{gH} - T.) \right) \frac{\partial \omega_{mH}}{\partial z} + h_g a (T_i - T_{gH})
\end{aligned} \tag{۳-۱۰}$$

با در نظر داشتن ثابت بودن فاز آب می توان از معادله های قبلی برای این فاز استفاده کرد و می توان از رابطه ی وکسلر استفاده نمود. برای فصل مشترک آب و هوا، رطوبت مطلق هوا با استفاده از فشار جزئی آن از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\omega_i = 0.622 \frac{P_i}{P - P_i} \tag{۳-۱۱}$$

در فصل مشترک، هوا در حالت اشباع است، از این رو می توان از روابط تجربی ارائه شده برای محاسبه فشار جزئی بر حسب دمای فصل مشترک استفاده نمود. به همین منظور رابطه ارائه شده توسط وکسلر^۱ که از دقت قابل قبولی برخوردار است مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\ln(P_i) = \sum_{j=1}^4 \alpha_j T_i^{j-2} + \alpha_5 \ln(T_i)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -0.60951748 \times 10^4 \\ \alpha_2 &= 0.2116173595 \times 10^2 \\ \alpha_3 &= -0.27222404 \times 10^{-1} \\ \alpha_4 &= 0.16840790 \times 10^{-4} \\ \alpha_5 &= 2.4505058 \end{aligned} \quad (3-12)$$

با حل معادلات به دست آمده از روابط فوق می توان مشخصات خروجی آب و هوا را به همراه دما و رطوبت مطلق فصل مشترک محاسبه نمود.

۳-۵ مدل سازی رطوبت زدایی

۳-۵-۱ کندانسور تماس مستقیم

هوا پس از گذر از واحد رطوبت زنی وارد به قسمت بعدی یعنی رطوبت زدایی می شود. در قسمت رطوبت زدایی هوا با کاهش دما همراه بوده و رطوبت موجود در آن تقطیر می شود. از تقطیر این رطوبت و جمع آوری آب حاصل از آن آب شیرین مدنظر تولیدی دستگاه سنجیده می شود. این حرارت توسط آب شور سرد از هوا دریافت می شود و به طبیعت بازگردانده می شود. همان طور که در شکل ۱۶-۳ مشخص است رطوبت زدایی تماس مستقیم بسیار شبیه به رطوبت زنی بوده با این فرق که جهت انتقال انرژی و جرم عوض می شود به همین منظور در این قسمت نیز حجم کنترلی مشابه با حجم کنترل قبلی فرض می شود و تمامی روابط قسمت قبل در این بخش نیز صادق است.

برای جلوگیری از توضیحات تکراری مشابه بخش قبل داریم:

$$\frac{\partial L_H}{\partial z} = G \frac{\partial \omega_H}{\partial z} \quad (3-13)$$

$$G \frac{\partial \omega_H}{\partial z} = k_g a(\omega_i - \omega_H) \quad (3-14)$$

$$G \frac{\partial H_{gH}}{\partial z} - C_{pw}(T_{wH} - T.) \frac{\partial L_H}{\partial z} - L_H C_{pw} \frac{\partial T_{wH}}{\partial z} = . \quad (3-15)$$

$$L_H C_{pw} \frac{\partial T_{wH}}{\partial z} - G \left(C_{pg} \frac{\partial T_{gH}}{\partial z} + (C_{pv}(T_{gH} - T.) - C_{pw}(T_{wH} - T.) + \lambda.) \frac{\partial \omega_H}{\partial z} \right) = . \quad (3-16)$$

$$L_H C_{pw} \frac{\partial T_{wH}}{\partial z} = - \left(h_w a + C_{pw} \frac{\partial L_H}{\partial z} \right) (T_i - T_{wH}) \quad (3-17)$$

$$\omega_i = .\text{.}\text{.}\text{.}\frac{P_i}{P - P_i} \quad (3-18)$$

$$\ln(P_i) = \sum_{j=1}^f \alpha_j T_i^{j-\gamma} + \alpha_\delta \ln(T_i)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -.60951748 \times 10^4 \\ \alpha_\gamma &= .2116173595 \times 10^7 \\ \alpha_\gamma &= -.27222404 \times 10^{-1} \\ \alpha_f &= 0.16840790 \times 10^{-4} \\ \alpha_\delta &= 2.4505058 \end{aligned} \quad (3-19)$$

۳-۵-۲ مدل سازی رطوبت زدایی تماس غیرمستقیم

فرایند انتقال حرارت از هوای اشباع به سطح فیلم شامل انتقال حرارت محسوس به صورت جابه جایی و انتقال حرارت نهان به واسطه کندانس شدن بخار می باشد.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{sen} + \dot{Q}_{lat} \quad (3-20)$$

که در آن $\dot{Q}_{sen}$ شار گرمای محسوس انتقال یافته و $\dot{Q}_{lat}$ شار گرمای نهان انتقال یافته می باشد.

شار گرمای محسوس انتقال یافته توسط رابطه زیر ارائه می گردد:

$$\dot{Q}_{sen} = h_{co} (T_g - T_{if}) \quad (3-21)$$

که در آن T_g, T_{if}, h_{co} به ترتیب ضریب انتقال حرارت جابه جایی در قسمت بیرون کندانسور، دمای سطح فیلم و دمای هوا می باشد.

برای ضریب انتقال حرارت محسوس از رابطه تجربی برای مبدل های فین-لوله ساده (شکل ۳) برای رینولدز بین ۳۰۰ تا ۵۰۰۰ که توسط وانگ و همکاران ارائه شده است استفاده گردیده است.

$$j = 19.36 \text{Re}_{DC}^{j1} \left(\frac{F_p}{D_c} \right)^{1.352} \left(\frac{S_L}{S_T} \right)^{0.6795} N^{-1.291} \quad (3-22)$$

در این رابطه j ضریب کولبرن می باشد که توسط رابطه زیر معرفی می گردد.

$$j = \frac{h_{co}}{G_c C_{pa}} \text{Pr}^{2/3} \quad (3-23)$$

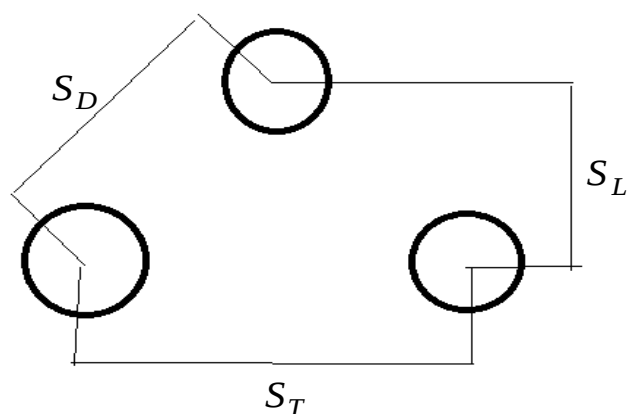
$$G = \rho_a V_{\max} \quad (3-24)$$

که در آن F_p, N به ترتیب تعداد ردیف لوله و گام فین می‌باشد و D_c توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$D_c = D_{out} + 2t_f \quad (3-25)$$

که در آن D_{out}, t_f به ترتیب ضخامت فین و قطر خارجی لوله می‌باشد.

V_{max} باتوجه به آرایش مثلی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.



شکل (۳-۲۴): گام‌های لوله

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت در چگالش بخار خالص بر روی مبدل فین-لوله، برای حالت کندانس

فیلمی از رابطه زیر استفاده گردیده است.

$$h = 0.689 \left[\frac{\rho_l^2 k_l^3 g h_{fg}}{\mu_l (t_{sat} - t_s) D_e} \right]^{1/4} \quad (3-26)$$

$$\frac{1}{D_e^{1/4}} = 1.30 \frac{A_s \phi}{A_{eff} L_{mf}^{1/4}} + \frac{A_p}{A_{eff} D^{1/4}}$$

$$L_{mf} = \pi (D_o^2 - D_r^2) / D_o$$

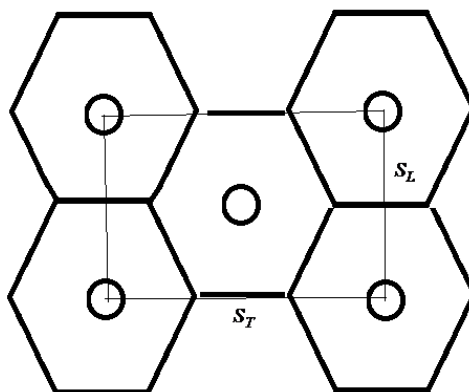
$$A_{eff} = A_s \phi + A_p$$

که در آن ϕ بازده فین، D_o قطر خارجی لوله (شامل فین)، D_r قطر ریشه فین، A_s سطح فین و A_p سطح لوله بین دو فین، μ سرعت هوای مرطوب، Cg ظرفیت حرارتی هوای مرطوب و ρ نیز چگالی هوای مرطوب می باشد.

برای محاسبه D_o و سطح فین حالت دوزنقه را در اطراف لوله در نظر می گیریم. باتوجه به شکل ۳-۲۲ سطح فین و D_o از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$A_s = (S_T \times S_L) \quad (۳-۲۷)$$

$$D_o = 4\sqrt{(S_T \times S_L)/(2\pi)} \quad (۳-۲۸)$$



شکل (۳-۲۲): شمای نحوه تعیین سطح فین و D_o

اگر در ترکیب بخار-گاز گازهای غیر قابل کندانس وجود داشته باشد ضریب انتقال حرارت به شدت کاهش می یابد. در ترکیب بخار-گاز، جزء قابل کندانس شدن را بخار و جزء غیر قابل کندانس شدن را گاز می نامند. با اضافه شدن درصد ترکیب گاز ضریب انتقال حرارت به صورت خطی کاهش می یابد. در ترکیبی که دارای ۲,۸۹ درصد هوا داشته باشد ضریب انتقال حرارت از ۱۱,۴ به $۳,۴ \text{ kw/m}^2 \text{ K}$ می رسد. سطح سردی با دمای که پایین تر از دمای اشباع بخار باشد را در نظر بگیرید.

و اگر $2 \times (S_D - D_{out}) \geq (S_T - D_{out})$

$$V_{\max} = V_a \left(\frac{S_T}{(S_T - D_{out})} \right) \quad (3-30)$$

که در آن V_a سرعت هوا می باشد.

گرمای انتقال یافته توسط گرمای نهان توسط رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$Q_{lat} = h_m h_{fg} (w_a - w_{if}) \quad (3-31)$$

گرمای نهان تبخیر می باشد که به وسیله h_{fg} رطوبت مطلق در دمای هوای مرطوب و دمای w_a و w_{if} و رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$h_{fg} = \frac{c_1 (1 - T_r)^{(c_2 + c_3 T_r + c_4 T_r^2)}}{18.05} \quad (3-32)$$

$$T_c = 647.13$$

$$T_r = T_{if} / T_c$$

$$c_1 = 5.2053 \times 10^7$$

$$c_2 = 0.3199$$

$$c_3 = -0.212$$

$$c_4 = 0.25795$$

، دمای بحرانی آب و دمای سطح فیلم می باشد. T_c و T_{if} که ضریب انتقال جرم می باشد که از تشابه

انتقال جرم و حرارت محاسبه می گردد.

$$h_m = \frac{h_{co}}{Le.C_{pa}} \quad (3-33)$$

عدد لوییس می باشد که برای ترکیب هوا و بخار آب، یک می باشد. Le که در آن رطوبت مطلق توسط

رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$w = 0.62198 \frac{(P_s \phi)}{P - (P_s \phi)} \quad (3-34)$$

رطوبت نسبی می‌باشد که در اینجا به دلیل اشباع بودن هوا، یک است. فشار ترکیب هوا و بخار است که برابر فشار محیط در نظر گرفته شده است. فشار جزئی بخار می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\ln(P_s) = \frac{c_0}{T} + c_1 + c_2 T + c_3 T^2 + c_4 T^3 + c_5 \ln(T) \quad (3-35)$$

که در آن:

$$c_0 = -0.58002206 \times 10^4$$

$$c_1 = -0.5516256 \times 10^1$$

$$c_3 = -0.48640239 \times 10^{-1}$$

$$c_4 = 0.41764768 \times 10^{-1}$$

$$c_6 = -0.14452093 \times 10^{-4}$$

$$c_6 = 0.65459673 \times 10^1$$

گرمای انتقال یافته به سطح فیلم، از لایه فیلم عبور می‌کند که با رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\dot{Q}_f = h_f (T_{if} - T_s) \quad (3-36)$$

که T_s دمای سطح لوله می‌باشد و h_f توسط رابطه (3-25) محاسبه می‌شود.

گرمای انتقال یافته به سطح فیلم، سرانجام به سیال خنک کننده انتقال می‌یابد:

$$\dot{Q}_w = h_i (T_s - T_w) \quad (3-37)$$

که T_w, h_i ضریب انتقال حرارت در داخل لوله و دمای آب خنک کننده می باشد. h_i توسط رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$h_i = 0.5 \frac{f_i (\text{Re}_i - 1000) \text{Pr}}{1.07 + 12.7 (f_i / 2)^{0.5} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \times \frac{K_w}{D_{in}} \quad (3-38)$$

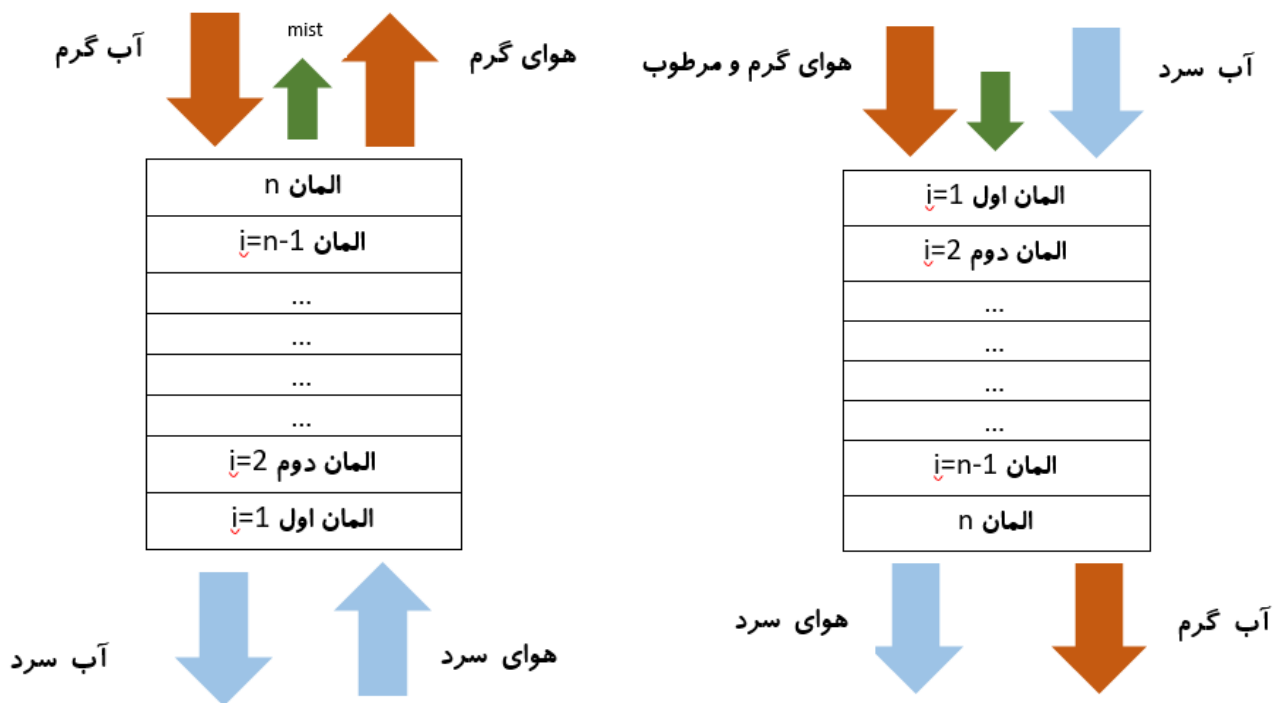
$$f_i = \frac{1}{(1.58 \log \text{Re}_i - 3.28)^2} \quad (3-39)$$

$$\text{Re}_i = \frac{\rho_w D_{in} V_w}{\mu_w} \quad (3-40)$$

که در آن K_w, μ_w, V_w, ρ_w به ترتیب دانسیته، سرعت، ویسکوزیته و ضریب هدایت آب و D_{in} قطر داخلی لوله می باشد.

۳-۶ الگوریتم حل معادلات واحد آب شیرین کن رطوبت زنی رطوبت زدایی

در روش رطوبت زنی با جریان مخالف تعیین دمای آب ورودی از طریق آزمون و خطا و حل المان به المان برج رطوبت زنی و نهایتاً رسیدن به دمای مطلوب ورودی مشخص می شود. همان طور که در شکل ب نمایش داده شده است حجم کنترل المان اول ابتدا حل شده و سپس ورودی های المان دوم برابر با خروجی های المان اول لحاظ می شود. این کار تا رسیدن به المان آخر ادامه دارد. سپس دمای آب خروجی از المان آخر با حالت در نظر گرفته ی مطلوب ما مقایسه می شود. دلیل این کار مشخص نبودن ورودی های دمای هوا و دمای آب هر المان به صورت مجزا است. پس از رسیدن برج رطوبت زنی خروجی های آن به عنوان ورودی های برج رطوبت زدایی قرار می گیرد. رطوبت زدایی نیز با این ورودی ها با ترتیب المان های نشان داده در شکل (۳-۲۴) الف شروع به حل دستگاه معادلات می شود.



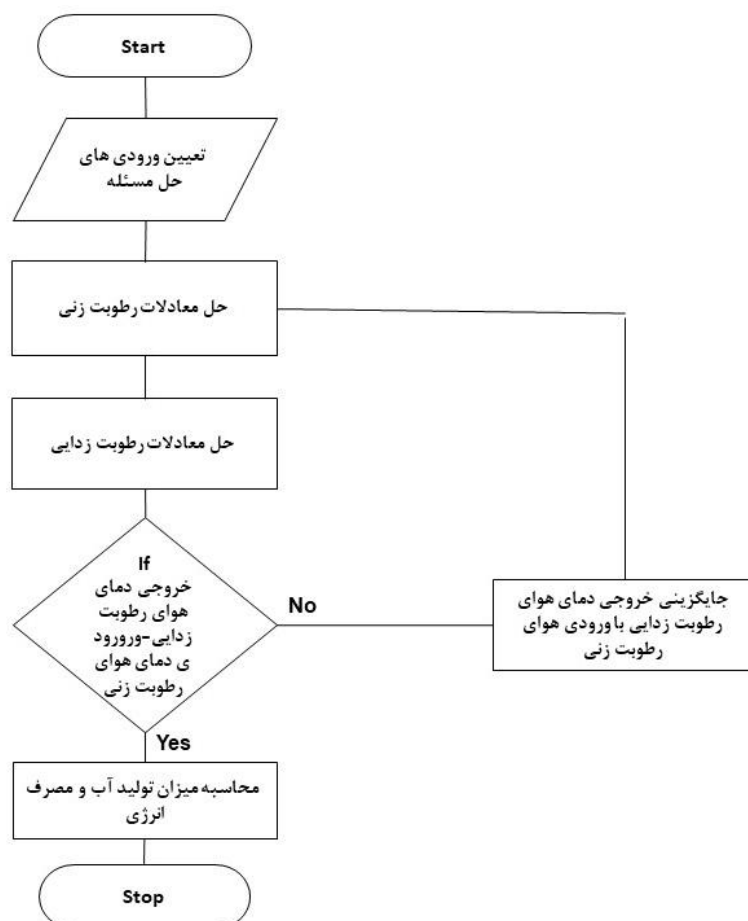
شکل (۳-۲۴) ب: المان های رطوبت زنی

شکل (۳-۲۴) الف: المان های رطوبت زدایی

در مرحله بعدی حلقه ی اصلی حل دستگاه آب شیرین کن رطوبت زنی و رطوبت زدایی شکل می گیرد. ابتدا با

فرضیات ترمودینامیکی و هندسی مسئله یکبار معادلات رطوبت‌زنی و سپس رطوبت‌زدایی حل می‌شود. سپس به علت بسته بودن سیستم در نظر گرفته شده خروجی‌های رطوبت‌زدایی با ورودی‌های فرض شده‌ی اولیه جایگزین می‌شود و مجدد رطوبت‌زنی و طبعاً رطوبت‌زدایی حل می‌شوند و مجدد خروجی‌های کندانسور با ورودی‌های رطوبت‌زنی مقایسه می‌شود. این عمل آن‌قدر تکرار می‌شود تا به برابری ورودی‌های رطوبت‌زنی و خروجی‌های رطوبت‌زدایی برسیم.

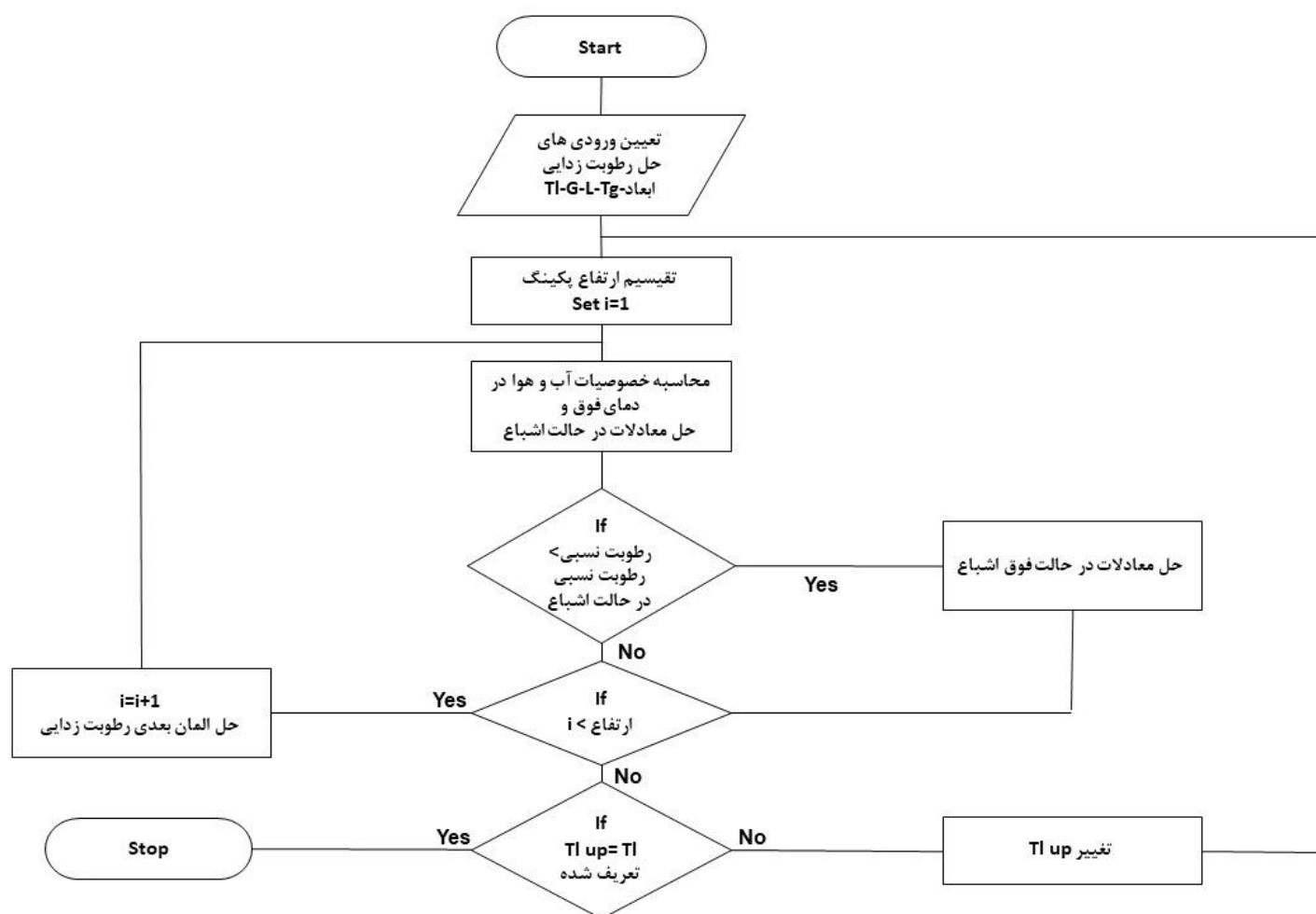
سپس باتوجه به خواص ترمودینامیکی و تغییرات دبی و انرژی می‌توانیم میزان تولید آب و انرژی مصرفی سیستم را محاسبه نماییم. این عمل به‌اختصار در فلوچارت (۲۵-۳) رسم شده است.



شکل (۲۵-۳):فلوچارت حل آب‌شیرین‌کن

۳-۶-۱ الگوریتم حل معادلات رطوبت‌زنی

در برج رطوبت‌زنی تماس مستقیم هوا در مجاورت آب گرم گذرانیده می‌شود. ابتدا نیاز به شفاف‌سازی مشخصات ترمودینامیکی و هندسی این برج داریم. سپس معادلات مدل‌سازی در بخش قبل با روش تفاضل محدود در دستگاه حل معادلات شروع به حل کردن المان به المان در این برج می‌شود. المان‌های در نظر گرفته شده به اندازه‌ی ۱ سانتی‌متر و به تعداد ارتفاع رطوبت‌زنی می‌باشد. بعد از حل هر المان میزان رطوبت نسبی در خروجی آن با رطوبت نسبی اشباع مقایسه می‌شود. بیشتر بودن رطوبت نسبی از رطوبت نسبی حالت اشباع ما را مجاب می‌نماید که هوا وارد حالت مافوق اشباع شده است و مجدد شروع حل معادلات فوق اشباع کرده و خروجی‌های المان جایگزین خروجی‌های قبل می‌شود. حل مدل ریاضی شبیه‌سازی شده به اختصار در فلوچارت (۳-۲۶) رسم شده است.



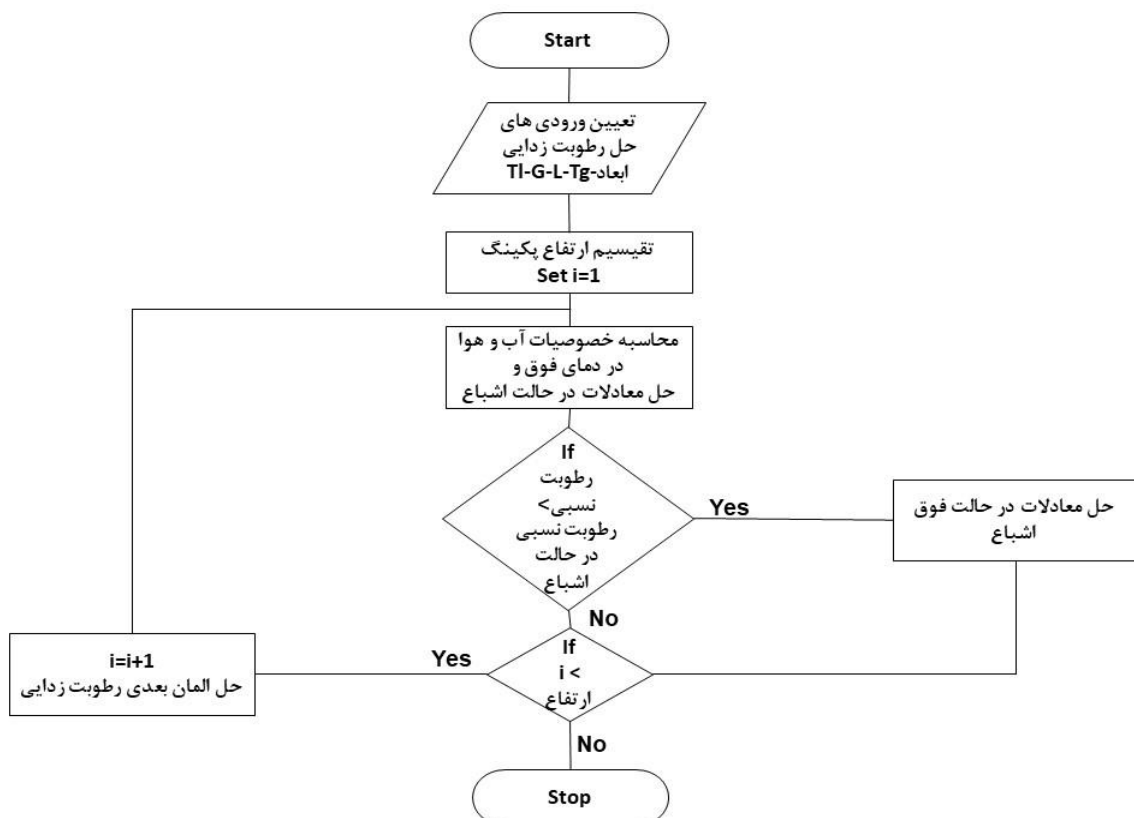
شکل (۳-۲۶): فلوچارت حل رطوبت‌زنی

۳-۶-۲ الگوریتم حل معادلات رطوبتزدایی

۳-۶-۲-۱ تماس مستقیم

در برج رطوبتزدایی تماس مستقیم هوای گرم و مرطوب در مجاورت آب سرد گذرانیده می‌شود. این روش بسیار مشابه برج رطوبت‌زنی بوده با این تفاوت که جهت انتقال جرم و حرارت از هوا به سمت آب می‌باشد. معادلات در کندانسور نیز مشابه معادلات حاکم در رطوبت‌زنی می‌باشد.

نکته حائز اهمیت در حل معادلات ذکر شده این است که در این بخش بر خلاف بخش رطوبت‌زنی جهت جریان هوا و جریان آب همسو بوده و الگوریتم حل معادلات به علت معلوم بودن دماهای ورودی آب و هوا و در نظر گرفتن حالت اشباع هوا نیاز به آزمون و خطا نداشته و ساده‌سازی می‌شود. هوا بعد از عبور از برج رطوبت‌زنی وارد کندانسور می‌شود. در این بخش بخار آب اضافه شده به هوا چگالیده شده و تولید آب صورت می‌گیرد. حل مدل ریاضی شبیه‌سازی شده به اختصار در فلوچارت ۳-۲۷ رسم شده است.



شکل (۳-۲۷): فلوچارت حل رطوبت‌زدایی

۳-۶-۲-۲ تماس غیرمستقیم

در برج رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم آب سرد در لوله‌های کندانسور و در خلاف جهت جریان هوا حرکت می‌کند و با استفاده از روابط گفته شده انرژی گرمایی را از هوا گرفته و باعث خنک شدن هوا می‌شود. الگوریتم حل این بخش نیز همانند بخش قبلی شامل چند مرحله زیر است:

- ۱- ابتدا مبدل را به چند قسمت تقسیم می‌کنیم و با داشتن دبی هوا، دبی آب؛ دمای هوای ورودی، دمای هوای خروجی و دمای آب ورودی، دمای آب خروجی را محاسبه می‌کنیم.
- ۲- یک مقدار اولیه برای تعداد ردیف لوله در نظر می‌گیریم.
- ۳- مقدار h را باتوجه به تعداد ردیف لوله محاسبه می‌کنیم.
- ۴- باتوجه به رابطه Q ، درجه‌ی تغییر هر المان را پیدا می‌کنیم.

فصل چهارم نتایج و بررسی مدل سازی

۴-۱ مقدمه

بعد تکمیل مدل ریاضی واحد رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی در نرم‌افزار متلب اعتبارسنجی آن یک امر حیاتی بشمار می‌رود. پس از اعتبارسنجی و بررسی در صدهای خطای آن می‌توان به بررسی و تجزیه و تحلیل پارامتری پرداخت و نتایج مورد بحث قرار می‌گیرند.

برای تحلیل پارامتری می‌بایست یک فرض اولیه‌ی طراحی در نظر گرفته شود و رفتار هر پارامتر را با ثبت نگه‌داشتن بقیه عوامل بررسی کرد. از این‌روی ما در این پایان‌نامه طبق جداول زیر طراحی سیستم خود را بنا نهادیم. در جدول (۴-۱) مشخصات فیزیکی و هندسی واحد شیرین‌سازی آب بیان شده است. در قسمت رطوبت‌زنی ما از آکنه‌های پلیمری استفاده می‌کنیم. این آکنه‌ها کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله برج‌های خنک‌کننده دارند. در این طراحی حجم ویژه‌ی آکنه که یک ویژگی قابل انتخاب و تولید توسط سازندگان آن است ۱۵۰ مترمربع در هر مترمکعب در نظر گرفته شده است. در واحد رطوبت‌زدایی تماس مستقیم نیز به طور مشابه با رطوبت‌زنی از همان آکنه و مشخصات یاد شده استفاده می‌شود.

جدول (۴-۱): ابعاد هندسی

ابعاد رطوبت‌زنی			ابعاد کندانسور تماس مستقیم			ابعاد کندانسور تماس غیرمستقیم		
طول	عرض	ارتفاع	طول	عرض	ارتفاع	طول	عرض	ارتفاع
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۸۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۸۰
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)

در جدول (۴-۲) مشخصات ترمودینامیکی طراحی بیان شده است. با توجه به داده‌های عملی در مقالات مربوطه برای تدقیق مدل و بررسی رفتار بر آن بودیم اعدادی شبیه با مقادیر واقعی و عملی در نظر گرفته شود. این امر باعث کاربردی‌تر شدن هرچه بیشتر تحلیل‌ها و بررسی‌های بخش‌های بعدی نیز می‌شود.

جدول (۴-۲): مشخصات ترمودینامیکی

دمای آب گرم ورودی رطوبت‌زنی	دمای آب سرد ورودی کندانسور تماس مستقیم تماس غیرمستقیم	دبی آب گرم در رطوبت‌زنی	دبی آب سرد در رطوبت‌زدایی	دبی هوا
۶۵ (درجه سانتیگراد)	۳۰ (درجه سانتیگراد)	۲۰ (درجه سانتیگراد)	۱ (لیتر بر ثانیه)	۱ (لیتر بر ثانیه)
۰.۵ (کیلوگرم بر ثانیه)				

۴-۲ اعتبارسنجی مدل با داده‌های تجربی

۴-۲-۱ رطوبت‌زنی

در این بخش با استفاده از داده‌ها و مطالعات صورت‌گرفته توسط ضامن و همکارانش در حالت جریان مخالف آب‌وهوا در برج رطوبت‌زنی اعتبارسنجی مدل انجام شده است.

مدل رطوبت‌زنی شبیه‌سازی شده به صورت تجربی در دو پروژه‌ی مختلف در استان‌های قم و البرز در ابعاد مختلف تجاری‌سازی شده است. با توجه به اهمیت تعیین دقت مدل و اصلاح خطاهای ساده‌سازی شده راستی‌آزمایی این مدل با دو پروژه‌ی ذکر شده انجام شد. دقت محاسبه‌ی دمای هوای ورودی و خروجی و همچنین دمای آب ورودی و خروجی در تمامی ابعاد پروژه از جمله تعیین هزینه‌های اقتصادی و بهینه‌سازی بسیار مؤثر است که در این مدل تا حد مطلوبی نتایج با گزارش‌های تجربی همخوانی دارد.

داده‌های تجربی مورد استفاده در این اعتبارسنجی در جدول زیر شرح داده شده است. به علت تعدد نقاط فقط برخی نقاط با شرح کامل اطلاعات در جدول زیر آورده شده‌اند.

جدول (۳-۴): مشخصات نقاط رطوبت‌زنی

ردیف	دمای هوای ورودی تجربی	دمای هوای خروجی تجربی	دمای آب ورودی تجربی	دمای آب خروجی تجربی	دمای هوای ورودی مدل	دمای هوای خروجی مدل	دمای آب ورودی مدل	دمای آب خروجی مدل
۱	۴۱.۵	۴۹.۴	۵۲.۷	۴۵.۲	۴۱.۵	۵۱.۷۹۷۱۴	۵۲.۷	۴۴.۳۰۶
۲	۴۹.۵	۵۸.۵	۶۱.۷	۵۰.۰	۴۹.۵	۵۸.۲۵۱۹۹	۶۱.۷	۴۹.۹۱۲
۳	۴۷.۹	۵۹.۴	۶۳.۶	۵۰.۹	۴۷.۹	۶۰.۰۳۱۶۷	۶۳.۶	۴۹.۰۰۶
۴	۴۸.۱	۶۰.۲	۶۳	۵۰.۹	۴۸.۱	۵۹.۷۵۴۴۱	۶۳	۴۹.۲۲۴
۵	۴۹.۰	۶۰.۲	۶۷	۵۱.۰	۴۹.۰	۶۱.۳۸۷۳۷	۶۷	۴۹.۶۹۸
۶	۴۸.۰	۶۰.۱	۶۳.۶	۵۱.۳	۴۸.۰	۵۹.۹۰۵۱۸	۶۳.۶	۴۸.۹۹۴
۷	۴۸.۴	۶۰.۱	۶۴.۳	۵۱.۲	۴۸.۴	۶۰.۰۲۳۲۹	۶۴.۳	۴۹.۱۶۸
۹	۴۸.۲	۶۰.۹	۶۴.۳	۵۱.۰	۴۸.۲	۶۰.۲۲۰۵۵	۶۴.۳	۴۹.۱
۱۰	۴۸.۴	۶۱.۰	۶۴.۳	۵۱.۲	۴۸.۴	۶۰.۲۲۹۴۶	۶۴.۳	۴۹.۲۵۴
۱۱	۴۷.۹	۶۰.۶	۶۳.۹	۵۱.۱	۴۷.۹	۵۹.۹۰۲۳۴	۶۳.۹	۴۸.۸۱۴
۱۲	۴۷.۸	۶۰.۰	۶۳.۳	۵۰.۷	۴۷.۸	۵۹.۳۵۰۹۸	۶۳.۳	۴۸.۶۴۲
۱۳	۴۶.۷	۵۸.۷	۶۱.۸	۴۹.۹	۴۶.۷	۵۸.۲۹۸۷	۶۱.۸	۴۷.۷۱۲
۱۴	۴۵.۶	۵۷.۳	۶۰.۲	۴۹.۳	۴۵.۶	۵۷.۰۶۸۲۵	۶۰.۲	۴۶.۷۶۸
۱۵	۴۵.۱	۵۷.۳	۵۹.۷	۴۹.۰	۴۵.۱	۵۷.۰۳۱۶۶	۵۹.۷	۴۶.۶۴۸

۴-۲-۲ محاسبه‌ی میزان خطای مدل رطوبت‌زنی

پس از بررسی و اجراهای مدل ریاضی در بخش رطوبت‌زنی در حالات در دسترس از پروژه‌های عملی می‌توان برای دمای هوا و دمای آب در این بخش میزان خطا را بدین شکل تعریف کرد:

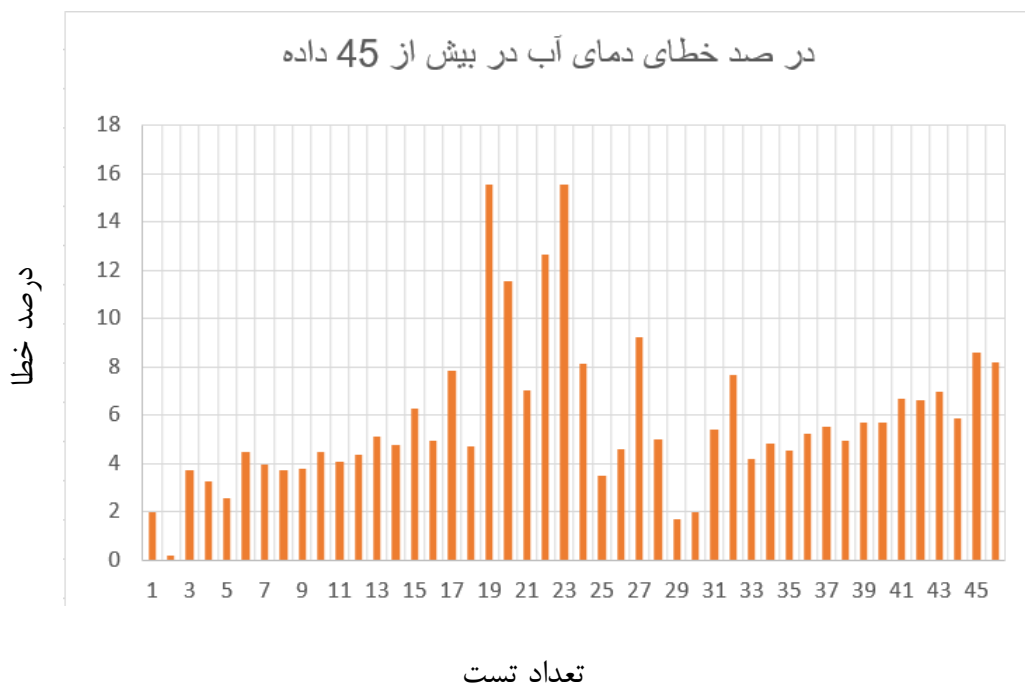
(۴-۴۱)

$$\text{درصد خطا دمای آبگرم} = \frac{\text{اختلاف دمای آب تئوری و عملی}}{\text{دمای آب عملی}} \times 100$$

(۴-۴۲)

$$\text{درصد خطا دمای هوا} = \frac{\text{اختلاف دمای هوا تئوری و عملی}}{\text{دمای هوا عملی}} \times 100$$

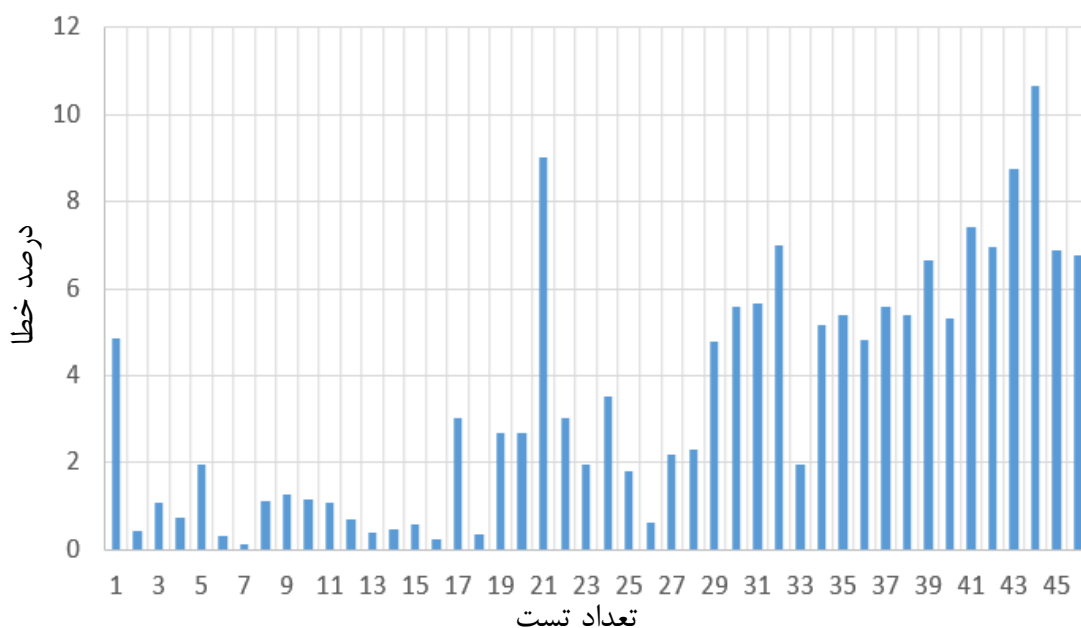
سپس در این قسمت تمامی خطاها در نقاط در دسترس رطوبت‌زنی محاسبه شدند و در نمودار شکل ۴-۲۹ برای مقایسه نتایج به‌دست‌آمده رسم گردیده است.



شکل (۴-۲۹): نمودار درصد خطای دمای آب

با بررسی دقیق‌تر می‌توان به این نتیجه رسید که میانگین خطای دمای آبگرم در واحد رطوبت‌زنی تنها ۵,۸ درصد می‌باشد و بازه‌ی تغییرات آن نیز از ۰,۱ درصد تا ۱۵,۵ درصد در نوسان است؛ لذا مدل‌سازی مربوطه با میانگین ۵,۸ درصد مورد تصدیق قرار می‌گیرد و می‌توان گفت دقت لازم در مدل‌سازی را داراست.

در بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه‌ی درصدهای خطای هوا در واحد رطوبت‌زدایی می‌توان گفت طبق نمودار نتایج از نتایج به‌دست‌آمده در نمودار قبل نیز بهتر بوده و تنها با میانگین خطای ۳,۵ درصد و بازه‌ی نوسان ۰,۱ تا ۱۰,۶ درصد مدل ریاضی تعریف شده دارای اعتبار قابل قبولی برای ادامه بررسی و شبیه‌سازی می‌باشد.



شکل (۳۰-۴): نمودار درصد خطای دمای هوا

۳-۲-۴ رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم

در این بخش نیز به طور مشابه با استفاده از داده‌ها و مطالعات در دسترس مدل‌سازی کندانسور پره لوله مورد اعتبارسنجی مدل انجام شده است.

مدل رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم شبیه‌سازی شده به صورت تجربی در ابعاد مختلف بررسی شده است.

در این جا نیز لازم به ذکر است با توجه به اهمیت تعیین دقت مدل و اصلاح خطاهای ساده‌سازی شده

راستی آزمایی این مدل انجام شد. داده‌های تجربی مورد استفاده در این اعتبارسنجی در جدول زیر شرح داده شده است. به علت تعدد نقاط فقط برخی نقاط با شرح کامل اطلاعات در جدول زیر آورده شده‌اند.

جدول (۴-۴): مشخصات نقاط رطوبت‌زدایی

ردیف	دمای هوای ورودی تجربی	دمای هوای خروجی تجربی	دمای آب ورودی تجربی	دمای آب خروجی تجربی	دمای هوای ورودی در مدل	دمای هوای خروجی در مدل	دمای آب ورودی در مدل	دمای آب خروجی در مدل
۱	۵۸.۵	۴۹.۵	۳۰.۸	۴۰.۷	۵۸.۵	۴۸.۹۵	۳۰.۸	۳۹
۲	۵۹.۴	۴۷.۹	۳۰	۴۰.۶	۵۹.۴	۴۸.۶۸	۳۰	۳۸
۳	۶۰.۲	۴۸.۱	۲۹.۳	۴۰.۳	۶۰.۲	۴۸.۷۵	۲۹.۳	۳۷.۵
۴	۶۰.۲	۴۹	۲۹	۴۰.۲	۶۰.۲	۴۸.۹۳	۲۹	۳۷.۵
۵	۶۰.۱	۴۸	۲۸.۷	۴۰.۴	۶۰.۱	۴۸.۵۶	۲۸.۷	۳۷
۶	۶۰.۱	۴۸.۴	۲۸.۵	۴۰.۵	۶۰.۱	۴۸.۶۵	۲۸.۵	۳۷
۷	۶۰.۶	۴۷.۹	۲۸.۳	۴۰.۴	۶۰.۶	۴۸.۶	۲۸.۳	۳۷
۹	۵۸.۷	۴۶.۷	۲۷.۹	۳۹.۶	۵۸.۷	۴۷.۵۹	۲۷.۹	۳۶.۵
۱۰	۵۷.۳	۴۵.۶	۲۸.۱	۳۸.۲	۵۷.۳	۴۶.۲	۲۸.۱	۳۶
۱۱	۵۶.۳	۴۴.۷	۲۷.۸	۳۷.۹	۵۶.۳	۴۵.۷۹	۲۷.۸	۳۵
۱۲	۵۵	۴۳	۲۷.۹	۳۶.۴	۵۵	۴۵.۴۹	۲۷.۹	۳۵
۱۳	۵۲.۵	۴۱.۶	۲۷.۵	۳۵.۲	۵۲.۵	۴۳.۲۵	۲۷.۵	۳۳.۵
۱۴	۵۵	۴۷	۲۴.۶	۲۸.۹	۵۵	۴۵.۷۱	۲۴.۶	۳۳.۵
۱۵	۵۷.۱	۴۲.۶	۲۵.۲	۳۷.۱	۵۷.۱	۴۵.۳۶	۲۵.۲	۳۱.۵

۴-۲-۴ محاسبه‌ی میزان خطای مدل رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم

همانند بخش قبل در این مدل نیز مهم‌ترین عوامل برای بررسی دمای آب سرد و دمای هوای در گردش

می‌باشد؛ بنابراین میزان خطا در این دو پارامتر نیز بدین شکل تعریف شد:

(۴-۴۳)

$$\text{درصد خطای دمای آب سرد} = \frac{\text{اختلاف دمای آب تئوری و عملی}}{\text{دمای آب تئوری}} \times 100$$

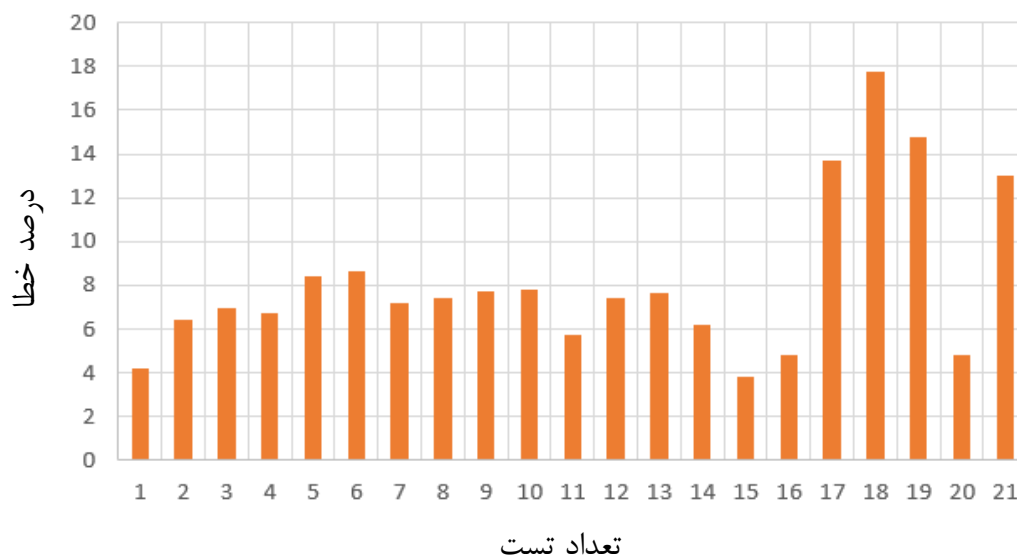
(۴-۴۴)

$$\text{درصد خطای دمای هوا} = \frac{\text{اختلاف دمای هوا تئوری و عملی}}{\text{دمای هوا تئوری}} \times 100$$

سپس در این قسمت تمامی خطاها در نقاط در دسترس رطوبت‌زنی محاسبه شدند و در نمودار برای

مقایسه نتایج به‌دست‌آمده رسم گردیده است.

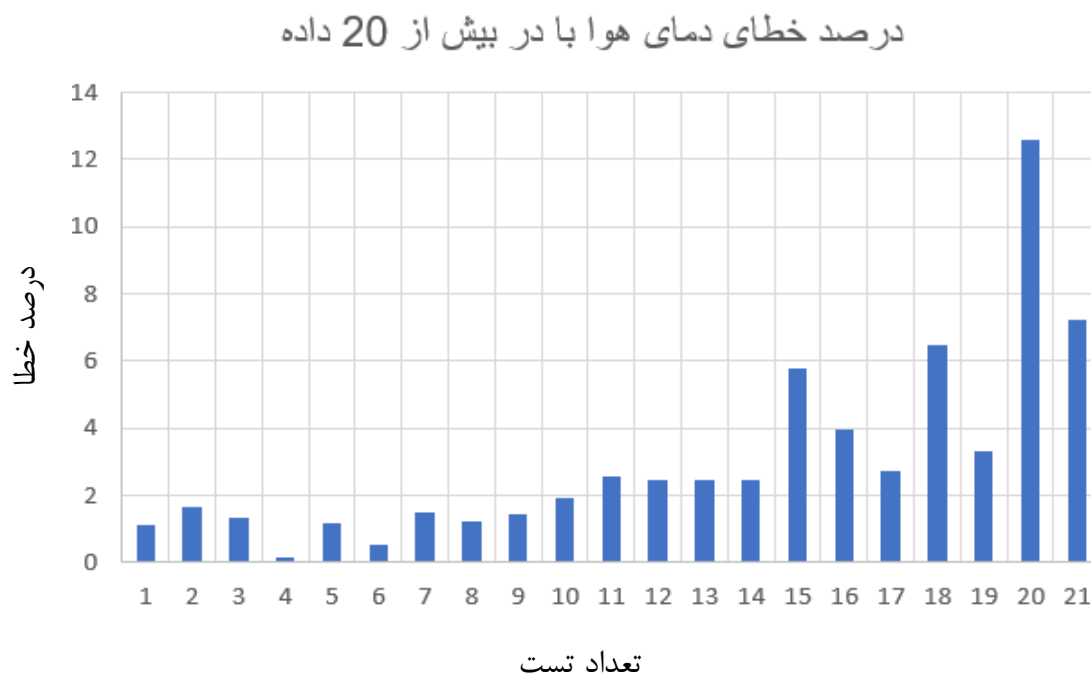
درصد خطای دمای آب در بیش از 20 داده



شکل (۴-۳۱): نمودار درصد خطای دمای آب

با بررسی دقیق‌تر می‌توان به این نتیجه رسید که میانگین خطای دمای آبگرم در واحد رطوبت زنی تنها ۸,۱۵ درصد می‌باشد و بازه‌ی تغییرات آن نیز از ۳,۸ درصد تا ۱۷,۷ درصد در نوسان است؛ لذا مدل‌سازی مربوطه با میانگین ۸,۱۵ درصد مورد تصدیق قرار می‌گیرد و می‌توان گفت دقت لازم در مدل‌سازی را دارد.

در بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از محاسبه‌ی درصدهای خطای هوا در واحد رطوبت‌زدایی می‌توان گفت طبق نمودار ۳۱-۴ نتایج از نتایج به‌دست‌آمده در نمودار قبل نیز بهتر بوده و تنها با میانگین خطای ۳,۰۴ درصد و بازه‌ی نوسان ۰,۱ تا ۱۲,۶ درصد مدل ریاضی تعریف شده دارای اعتبار قابل قبولی برای ادامه بررسی و شبیه‌سازی می‌باشد.



شکل (۳۲-۴): نمودار درصد خطای دمای آب

۳-۴ تحلیل پارامتری

در فصل قبل روابط حاکم در المان حجم کنترل در نظر گرفته شده تشریح شد. سپس با روش تفاضل محدود این معادلات در دستگاهی حل شدند و انتها در بخش ابتدایی این فصل با اعتبارسنجی هر قسمت مشخص شد این مدل ریاضی قابلیت لازم برای تجزیه و تحلیل عوامل مؤثر را داراست. در این بخش با طراحی در نظر گرفته شده به بررسی دقیق تر و تأثیر عوامل مختلف بر روی عملکرد آب شیرین کن رطوبت زنی رطوبت زدایی می پردازیم.

برای بررسی عملکرد سیستم ما نیاز به معیارهایی برای سنجش این واحد داریم. در تحقیقات پژوهشگران مختلف از معیارهایی متفاوتی در سنجش استفاده شده است. از جمله ی این معیارها همان طور که از نام این دستگاه مشخص است میزان تولید آب شیرین است. برای معیار بعدی سنجش، ما مقدار شدت مصرف انرژی را در نظر می گیریم.

تعریف شدت مصرف انرژی بدین شکل بیان می شود:

(۴-۴۵)

$$\text{میزان مصرف انرژی} = \frac{\text{شدت مصرف انرژی}}{\text{واحد آب تولیدی}}$$

در این تعریف در واقع پارامتر مدنظر ما میزان مصرف انرژی می باشد. اما برای یکسان سازی مصرف انرژی در حالات مختلف و میزان تولیدهای مختلف این واحد بر اساس تولید یک واحد آب شیرین بیان می شود. حال با استفاده از این دو پارامتر می توان بررسی فنی سیستم را می توان با خط کش این دو معیار بررسی نمود. کاملاً مشهود است که حالت مطلوب دستگاه آب شیرین کن مدل سازی شده به گونه ای است که بیشترین میزان تولید آب شیرین و کمترین میزان شدت مصرف انرژی را دارا باشد.

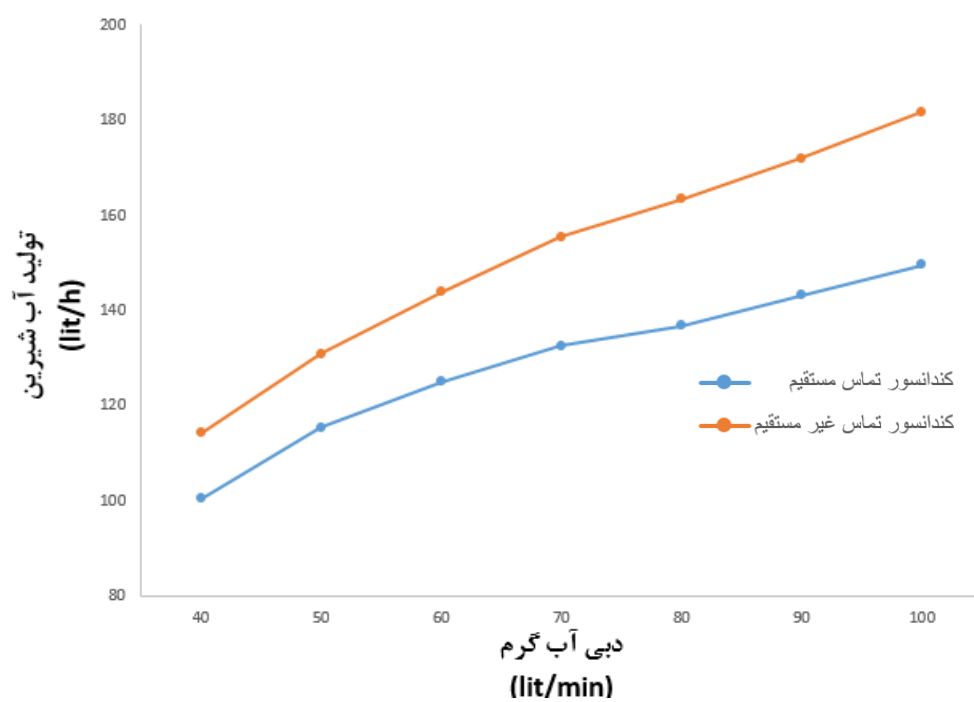
در هر بخش فرضیات کلی مسئله برای بررسی تأثیرات پارامترهای گوناگون طبق جداول (۴-۱ و ۴-۲) در نظر گرفته شده است.

۴-۳-۱ تأثیر دبی آب گرم ورودی رطوبت‌زنی

آب گرم پاششی در رطوبت‌زنی به کمک یک نازل بر روی آکنه اسپری می‌شود. به همین دلیل برای تنظیم دبی این آب‌پاششی دارای محدودیت‌هایی هستیم. در این آنالیز بازه‌ی تغییر دبی آب گرم از ۴۰ لیتر بر دقیقه تا ۱۰۰ لیتر بر دقیقه افزایش داشته است. این مقدار با توجه به محدودیت ذکر شده بازه‌ای مناسب برای بررسی می‌باشد؛ نمودار (۴-۳۳) تغییر رفتار تولید آب شیرین با افزایش دبی آب‌گرم را نشان می‌دهد. به‌وضوح در شکل (۴-۳۳) پیداست که با افزایش دبی آب گرم میزان تولید افزایش پیدا می‌کند. نرخ این افزایش تقریباً ثابت و کاملاً صعودی می‌باشد که نمایانگر این است برای سیستم مدنظر ما هرچقدر میزان دبی بیشتر شود تولید قابل‌توجه‌تری را خواهیم داشت.

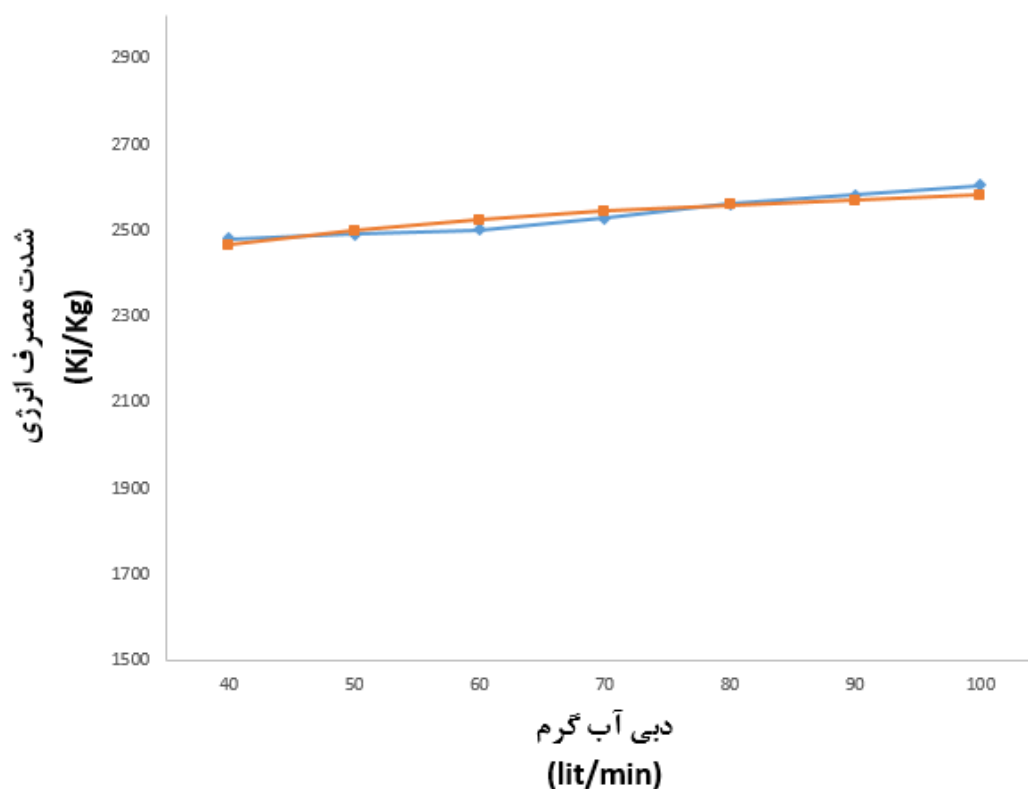
از طرفی دیگر میزان تولید نیز در حالت رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم به میزان قابل‌توجهی بالاتر از رطوبت‌زدایی تماس مستقیم می‌باشد. با بررسی و نگاهی جامع‌تر می‌توان دریافت علت این امر به ذات طراحی این سیستم وابسته است.

همان‌طور که در جدول (۴-۲) ذکر شده است دمای آب ورودی کندانسور در حالت تماس مستقیم حدود ۱۰ درجه بالاتر از دمای آب ورودی کندانسور در حالت تماس غیرمستقیم می‌باشد؛ لذا این اختلاف غیرقابل‌چشم‌پوشی در مقدار تولید آب شیرین نیز به همین دلیل می‌باشد. لازم به ذکر است که در این بخش به علت رفتار مشابه در پارامتر GOR (نسبت خروجی به دست‌آمده) و پارامتر شدت مصرف انرژی تنها نمودارهای شدت مصرف انرژی رسم شده و نمودارهای GOR به حذف شده‌اند.



شکل (۳۴-۴): نمودار میزان تولید آب

طبق نمودار (۴-۳۳) می‌توان به این مهم دست‌یافت که نرخ افزایش شدت مصرف انرژی با افزایش دبی بسیار کم است.



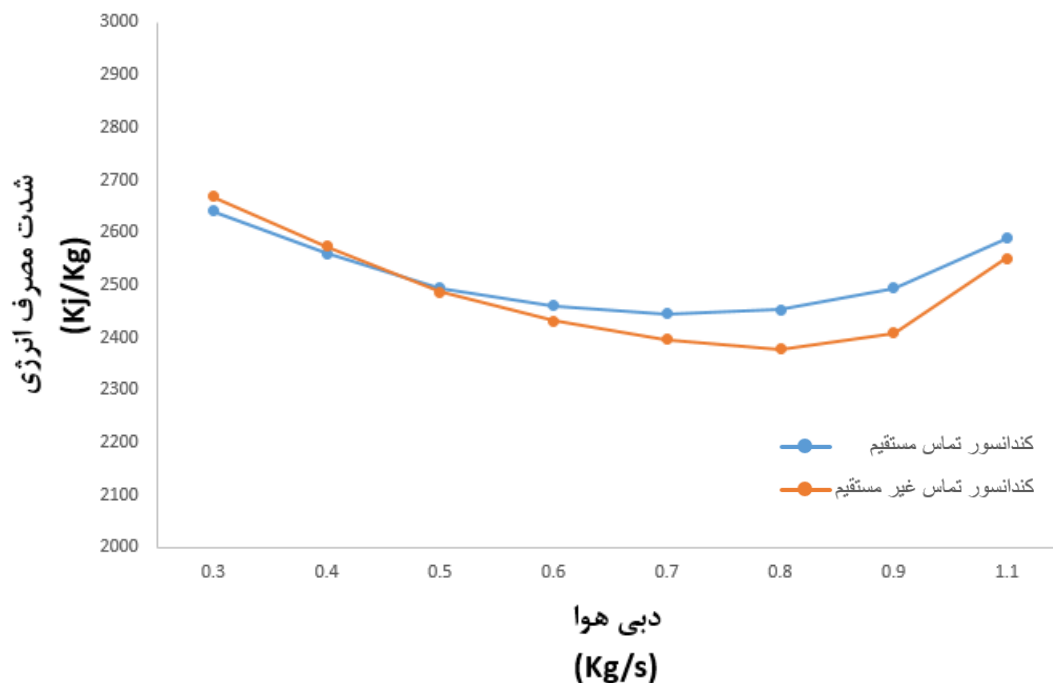
شکل (۳۳-۴): نمودار شدت مصرف انرژی

شدت مصرف انرژی با حتی دو برابر شدن میزان دبی آب گرم پاششی کمتر از ۴ درصد تغییر را شاهد است. اما با وجود نرخ کم دارای روندی صعودی و تقریباً یکنواخت می باشد. از مقایسه میان دو حالت تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم می توان دریافت شدت مصرف انرژی در حالت تماس مستقیم به میزان ناچیزی در برخی از نقاط از شدت مصرف در حالت تماس غیرمستقیم بالاتر است و می توان شدت مصرف انرژی را در هر دو حالت یکسان فرض کرد. این امر به سبب تفاوت دمایی است که آب در برج رطوبت زنی شاهد می باشد. همان طور که قبلاً گفته شده است مصرف انرژی این سیستم صرف گرمایش آب پاششی می شود. از این روی می توان گفت به علت برابری گرادیان دمای آب در هر دو حالت مقدار ثابتی را برای عدد شدت مصرف انرژی شاهد هستیم.

۴-۳-۲ تأثیر دبی هوا

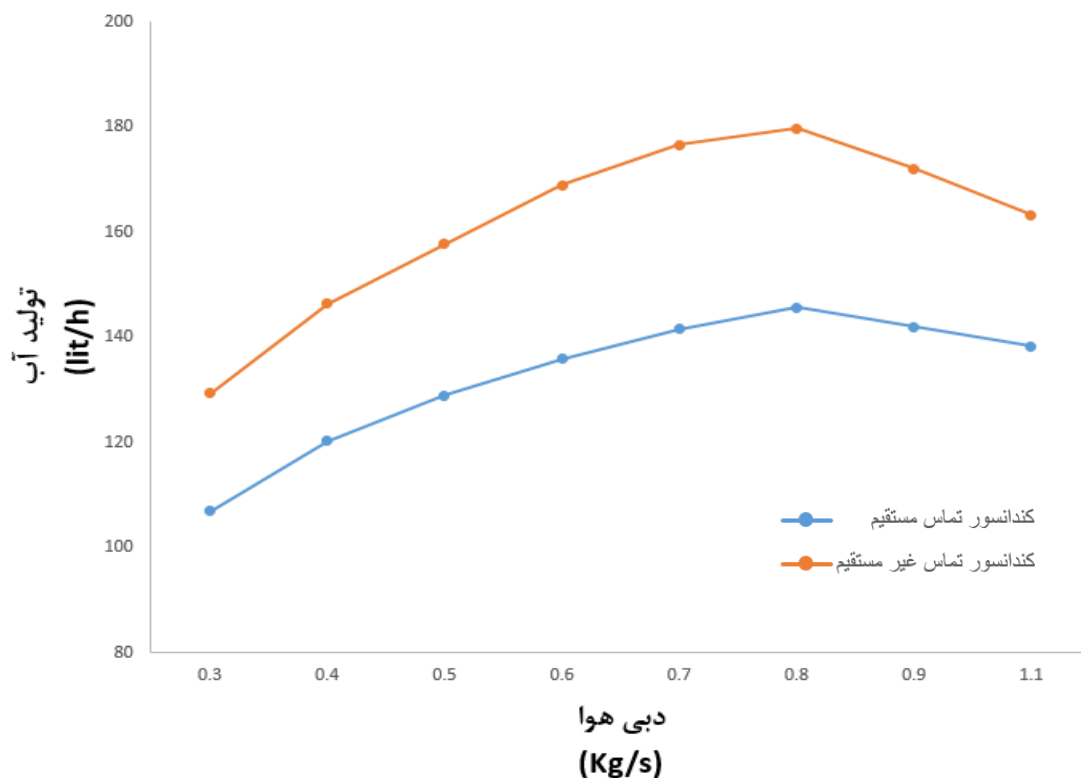
یکی از پرچالش‌ترین و تأثیرگذارترین پارامترهای مؤثر بر عملکرد سیستم تولید آب شیرین دبی هوا می‌باشد. در چرخه‌های بسته‌ی هوا با جریان اجباری این دبی معمولاً توسط یک فن تأمین می‌شود. فن‌های مورد استفاده در واحدهای آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی به طور معمول قابل تنظیم در سرعت‌های چرخش متفاوت می‌باشد و در نتیجه‌ی تغییر سرعت دبی هوای مختلف هوا حاصل می‌شود.

با بررسی و تشریح نقاط به‌دست‌آمده می‌توان دریافت رفتار سیستم تولید آب ما با افزایش دبی ثابت نبوده و خط حاصل از برخورد این نقاط دارای اکسترمم می‌باشد. نمودار (۴-۳۵) تغییرات شدت مصرف انرژی را در بازه‌ی تغییر دبی از ۰,۳ کیلوگرم بر ثانیه تا ۱,۱ کیلوگرم بر ثانیه نشان می‌دهد.



شکل (۴-۳۵): نمودار شدت مصرف انرژی

رفتار هر دو سیستم تولید آب شیرین با کندانسور تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم تقریباً یکسان بوده است. اما نکته‌ی قابل توجه در این نمودار اختلاف شدت مصرف انرژی است که در حالت اکسترمم آن رخ داده است. این اختلاف را می‌توان با استفاده از نمودار (۴-۳۶) توضیح داد.



شکل (۳۶-۴): نمودار میزان تولید آب

همان‌طور که در نمودار (۳۶-۴) محسوس است، میزان تولید آب شیرین نیز دارای نقطه‌ی بهینه می‌باشد که با افزایش دبی هوا از ۰,۳ کیلوگرم بر ثانیه تا ۱,۱ کیلوگرم بر ثانیه ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند.

اما نرخ تغییر نمودار در حالت رطوبت‌زدایی با کندانسور تماس غیرمستقیم بیشتر از نرخ تغییر تولید آب شیرین در حالت رطوبت‌زدایی با کندانسور تماس مستقیم است. همین امر سبب شده است که در اختلافی را در رفتار نمودار شدت مصرف انرژی نیز شاهد باشیم.

به‌طوری کلی می‌توان گفت واحد شیرین‌سازی آب با کندانسور پره لوله با افزایش دبی هوا دست خوش تغییر بیشتری نسبت کندانسور تماس مستقیم می‌شود و در طرفی دیگر حالت مطلوب تولید بیشتر آب و شدت مصرف کمتری را نیز دارا می‌باشد.

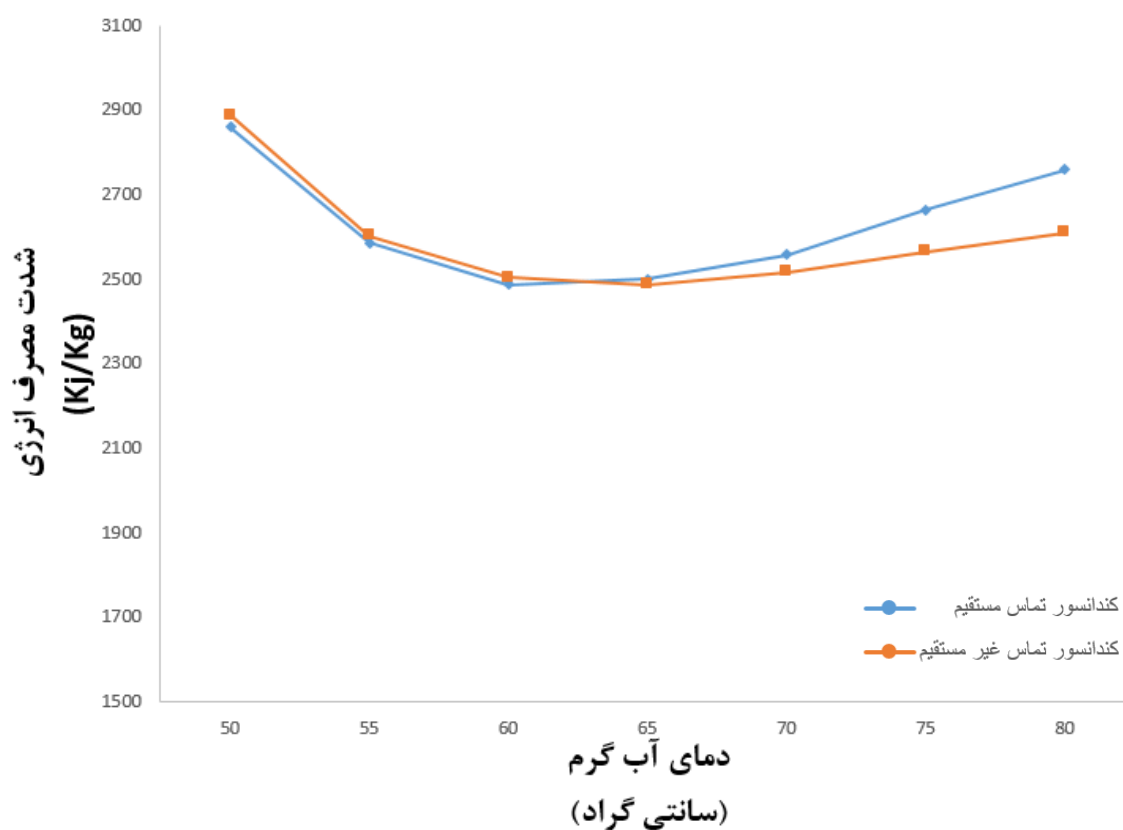
۳-۳-۴ تأثیر دمای آب گرم

در سال‌های اخیر بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته بر روی سیستم تولید آب شیرین به روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی با کوپل این سیستم در چرخه‌های مختلف همراه بوده است.

از این‌رو منبع حرارتی در نظر گرفته شده برای گرمایش آب غالباً از گرمایی است که تلف می‌شود؛ لذا برای صرف هزینه کمتر در سرمایه اولیه و یا سوخت مصرفی نمی‌توان منبع حرارتی دما بالایی را در این روش در نظر گرفت. منابع حرارتی تجدیدپذیر مانند نور خورشید و یا بازیابی تلفات حرارتی در دیگر سیستم‌ها ما را به این سمت سوق می‌دهد که بازه‌ی دمایی ۵۰ تا ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را برای بررسی عملکرد این پارامتر لحاظ کنیم.

با افزایش دمای آب گرم شدت مصرف ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد. نمودار (۳۷-۴) به‌وضوح نشان می‌دهد تغییرات دمایی آب گرم بر شدت مصرف نیز دارای نقطه اکسترمم می‌باشد. این نقاط بهترین راهنما برای مهندسی و طراحی سیستم ما می‌باشند.

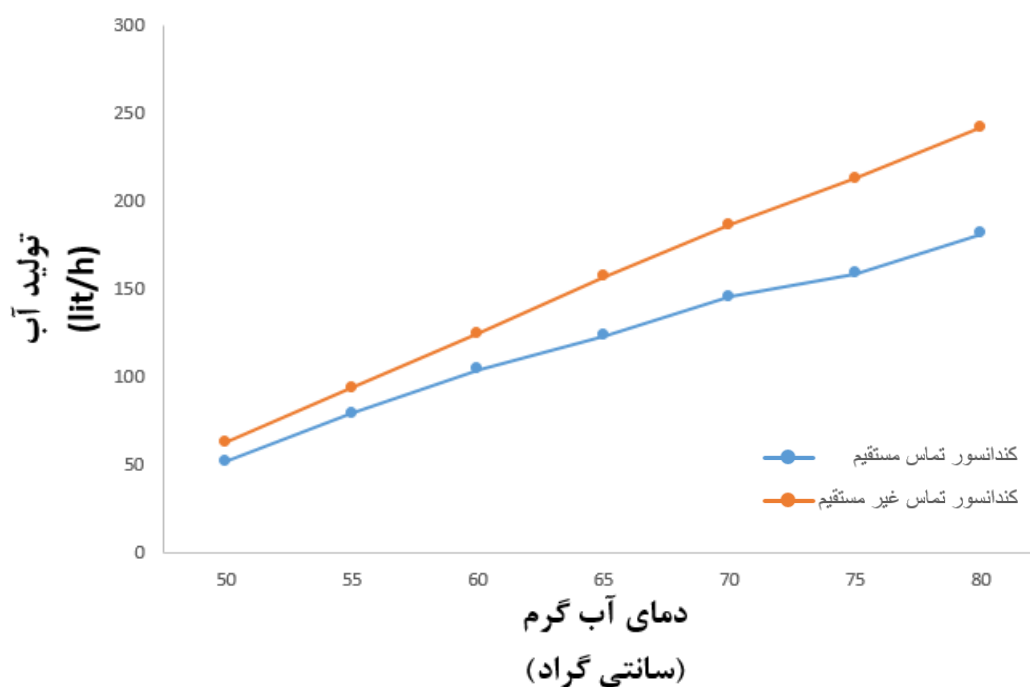
با مقایسه نمودار (۳۷-۴) می‌توان دریافت شدت مصرف انرژی با افزایش دما در رطوبت‌زدایی با کندانسور تماس مستقیم با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد علت این امر نیز در نمودار (۳۸-۴) نهفته است.



شکل (۳۷-۴): نمودار شدت مصرف انرژی

با افزایش دمای آب گرم میزان تولید آب شیرین در هر دو نمودار کاملاً صعودی است. اما نرخ تغییر میزان تولید آب شیرین در رطوبت‌زدایی به روش تماس مستقیم کمتر از رطوبت‌زدایی به روش تماس غیرمستقیم است.

همین امر باعث شده است که در شیب نمودار شدت مصرف نیز ما شاهد تغییر نرخ افزایشی بین دو حالت باشیم.



شکل (۳۸-۴): نمودار میزان تولید آب

۴-۳-۴ تأثیر ارتفاع برج رطوبت‌زنی

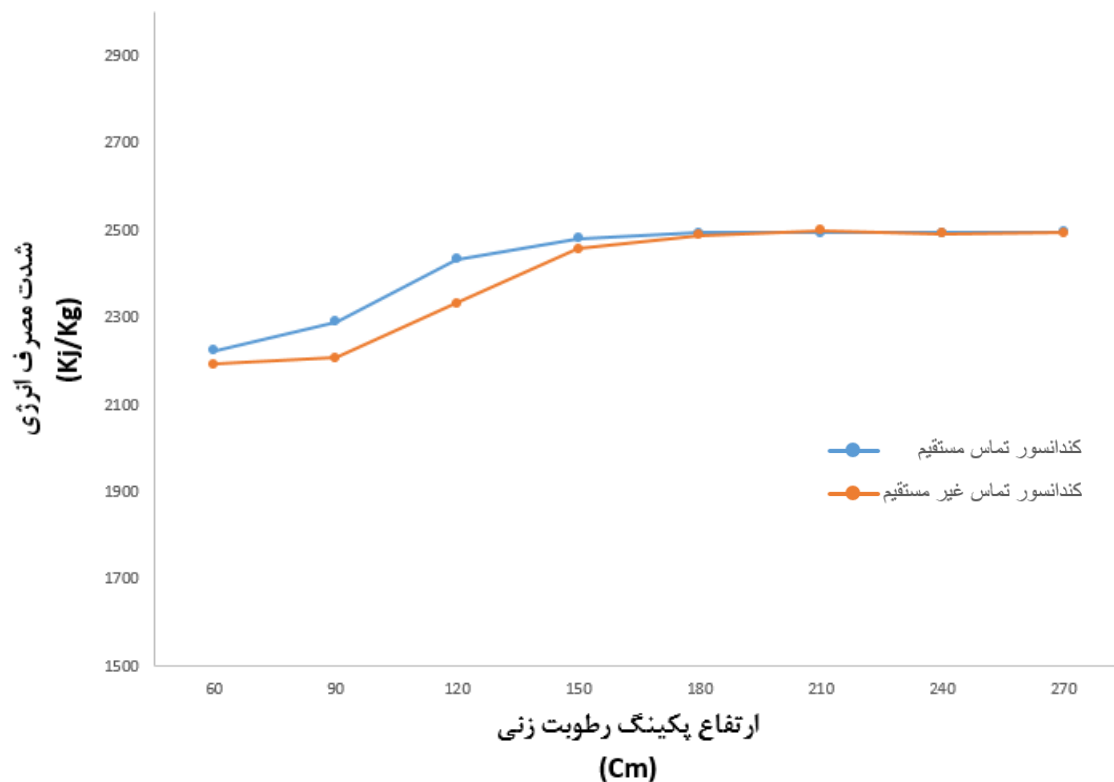
یکی از بنیادی‌ترین و مؤثرترین عوامل برای طراحی سیستم نمک‌زدایی از آب‌شور در روش رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی ارتفاع سیستم طراحی شده می‌باشد. همان‌طور که در فصل ابتدایی گفته شد واحد رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی در سیستم مورد بحث و بررسی ما از نوع جریان مخالف آب و هوا می‌باشد. این امر سبب شده است تأثیر ارتفاع بر عملکرد سیستم ما دوچندان شود.

با افزایش ارتفاع پکینگ رطوبت‌زنی میزان شدت مصرف انرژی افزایش می‌یابد. اما رفته‌رفته نرخ این تغییرات به سمت صفر میل می‌کند. این بدان معنی است که با افزایش ارتفاع بالاتر از نقطه‌ی حدی، این عامل دیگر تأثیری بر عملکرد سیستم نخواهد داشت و صرفاً هزینه‌ی ساخت دستگاه را افزایش می‌دهد. این نکته همواره برای طراحی و ساخت این واحدهای شیرین‌سازی مدنظر قرار گرفته می‌شود و می‌توان با

این روش از اسراف منابع جلوگیری نمود.

نمودار (۴-۳۹) تغییر شدت مصرف انرژی را با افزایش ارتفاع رطوبت‌زنی نشان می‌دهد. به سادگی می‌توان

در نمودار نیز مشاهده نمود شدت مصرف انرژی با افزایش ارتفاع به سمت عدد حدی میل می‌کند.



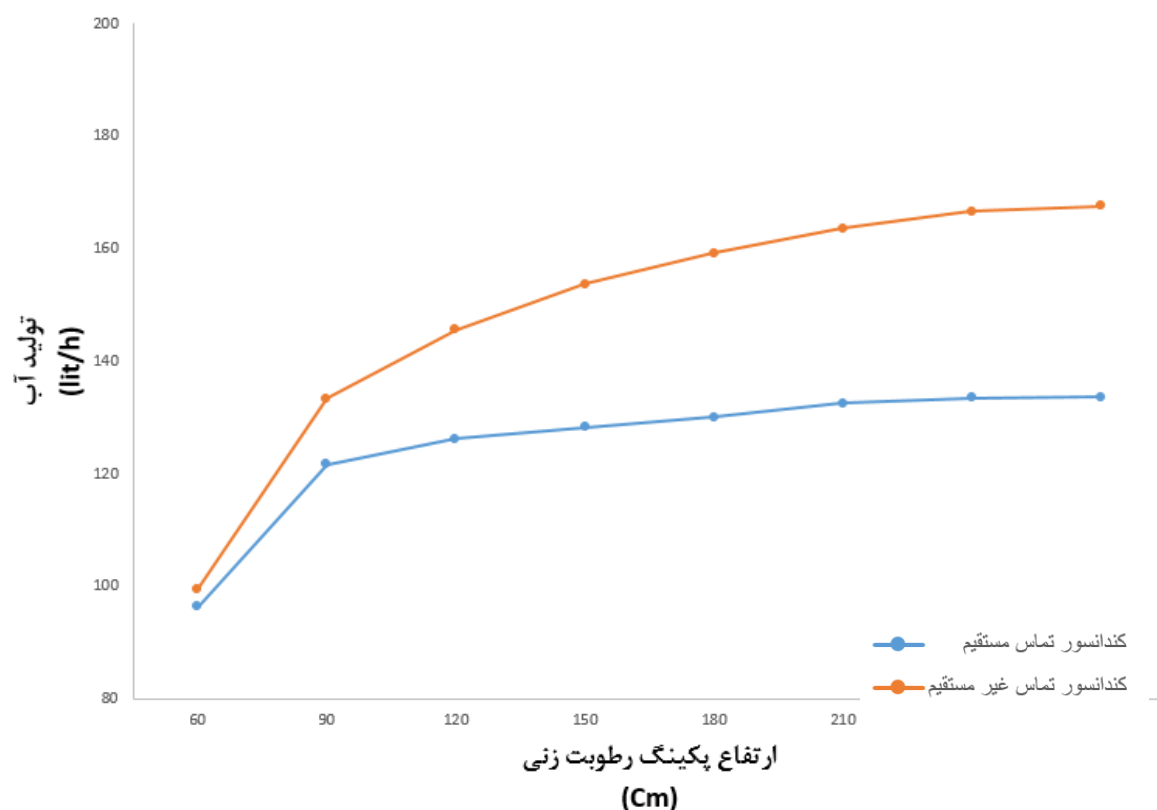
شکل (۴-۳۹): نمودار شدت مصرف انرژی

در طرف دیگر با افزایش ارتفاع شاهد افزایش محسوس تولید آب هستیم زیرا با بالارفتن ارتفاع انتقال جرم

و حرارت بیشتر از آب گرم پاششی در رطوبت‌زنی به هوا منتقل می‌شود. با بالارفتن دمای هوا میزان رطوبت

اشباع هوا نیز به طرز قابل توجهی افزایش پیدا کرده و می‌تواند آب بیشتری را در خود حمل کند.

نمودار (۴۰-۴) تغییرات تولید آب شیرین را با افزایش ارتفاع پکینگ نمایش می‌دهد. مشابه با نمودار قبل این نمودار نیز بیانگر این مسئله است که با افزایش بیش از حد ارتفاع تأثیر چشم‌گیری در تولید آب شیرین نخواهیم داشت. حال در ارتفاع‌های کمتر این موضوع کاملاً معکوس است و با افزایش ارتفاع می‌توانیم به طور کاملاً چشمگیری شاهد افزایش تولید آب باشیم.

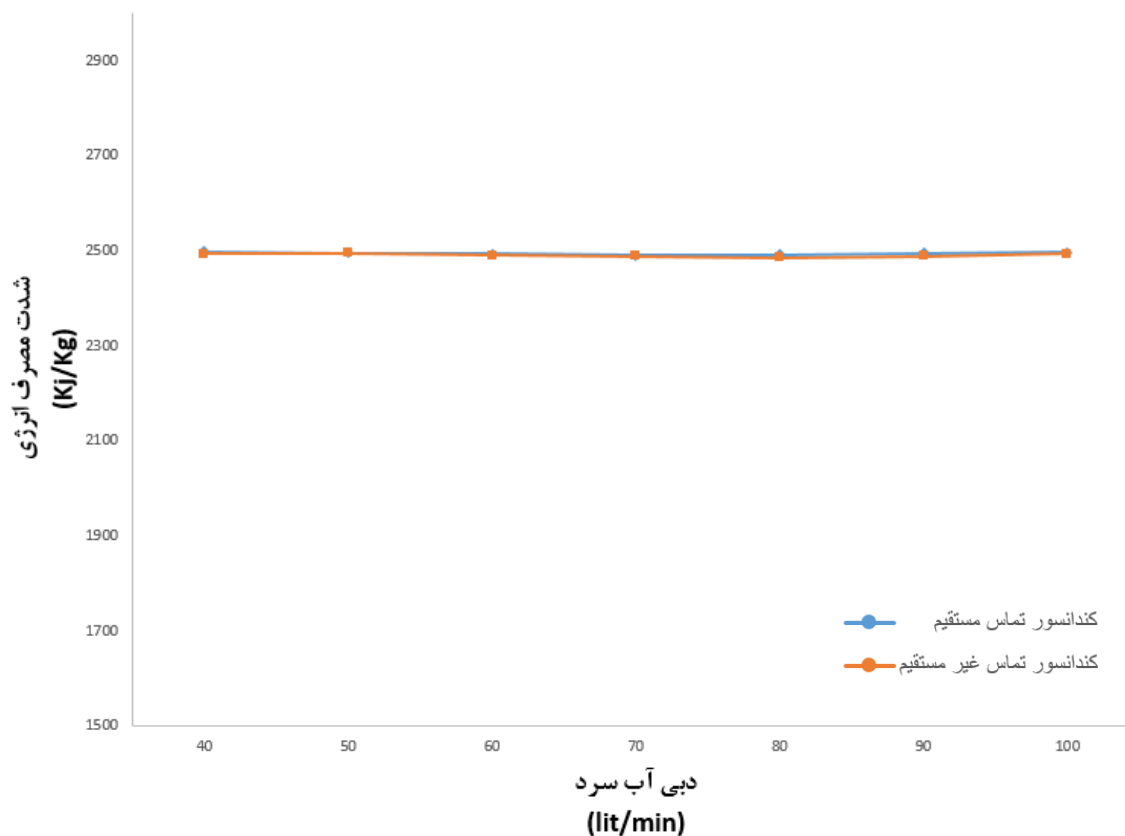


شکل (۴۰-۴): نمودار میزان تولید آب

۴-۳-۵ تأثیر دبی آب ورودی به رطوبت‌زدایی

آب سرد مصرفی در رطوبت‌زدایی با انتقال حرارت و کاهش دمای هوا سبب چگالش قطرات آب می‌شود. از این رو همواره دبی و دما آن مورد بحث و بررسی محققان برای طراحی بهتر واحدهای شیرین‌سازی رطوبت زنی رطوبت‌زدایی می‌باشد. در سیستم مدنظر ما آب سرد مصرفی بعد از افزایش دما به صورت پساب وارد دریا می‌شود.

با افزایش دبی آب سرد می‌توان گفت شدت مصرف انرژی کاملاً ثابت بوده و هیچ تغییری نمی‌کند.



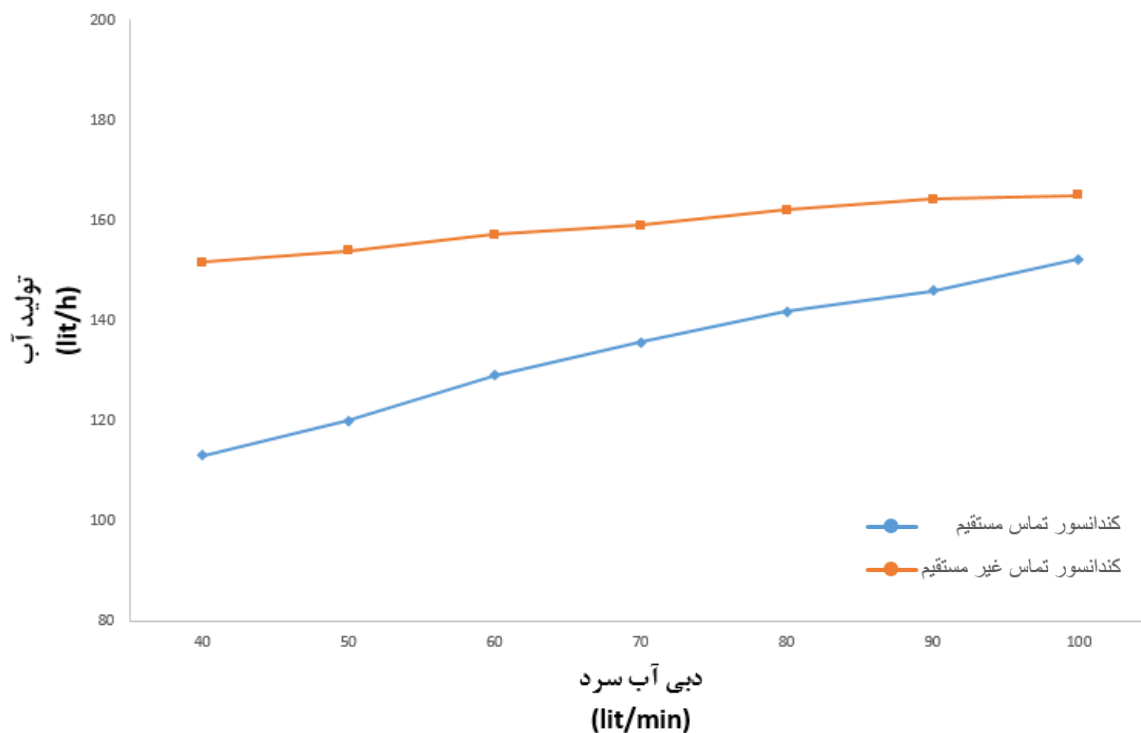
شکل (۴۱-۴): نمودار شدت مصرف انرژی

اما بر روی پارامتر دیگر مورد آنالیز یعنی تولید آب تأثیر بسیار چشمگیر و محسوسی دارد. نرخ تغییر تولید آب شیرین با افزایش دبی آب سرد کاملاً صعودی و تقریباً ثابت می‌باشد.

نمودار (۴۲-۴) به‌وضوح رفتار واحد نمک‌زدایی با افزایش دبی آب سرد در کندانسور را نشان می‌دهد.

با مقایسه دو حالت مختلف رطوبت‌زدایی تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم می‌توان دریافت که شیب تغییر میزان تولید آب شیرین در کندانسور تماس مستقیم بسیار بیشتر از کندانسور پره لوله می‌باشد.

این امر نیز به علت طراحی ذاتی سیستم و دماهای در نظر گرفته شده برای آب سرد ورودی در دو حالت می باشد.



شکل (۴۲-۴): نمودار میزان تولید آب

۴-۳-۶ تأثیر ارتفاع برج رطوبتزدایی

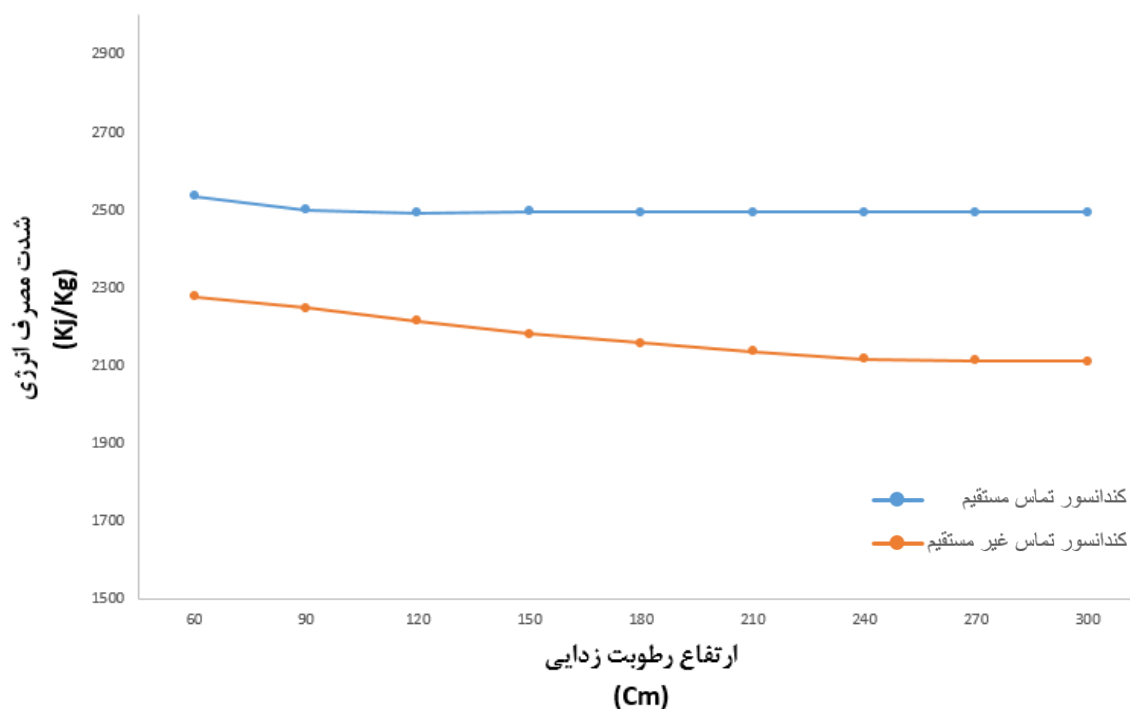
به طور مشابه با تأثیرات ارتفاع برج رطوبتزدایی، تغییرات ارتفاع در برج رطوبتزدایی نیز یکی از بنیادی ترین و مؤثرترین عوامل برای طراحی سیستم نمکزدایی از آب شور در روش رطوبتزدایی و رطوبتزدایی می باشد.

در مقایسه با برج رطوبتزدایی می توان گفت چون در رطوبتزدایی به روش تماس مستقیم جهت جریان آب و هوا همسو بوده اما در رطوبتزدایی جریان مخالف می باشد، لذا تأثیرات ارتفاع در برج رطوبتزدایی چشمگیرتر از تأثیرات ارتفاع در برج رطوبتزدایی تماس مستقیم است.

با افزایش ارتفاع پکینگ رطوبتزدایی میزان شدت مصرف انرژی با شیب بسیار کمی کاهش میابد. اما رفته رفته نرخ این تغییرات به سمت صفر میل می کند. این بدان معنی است که با افزایش ارتفاع بالاتر از

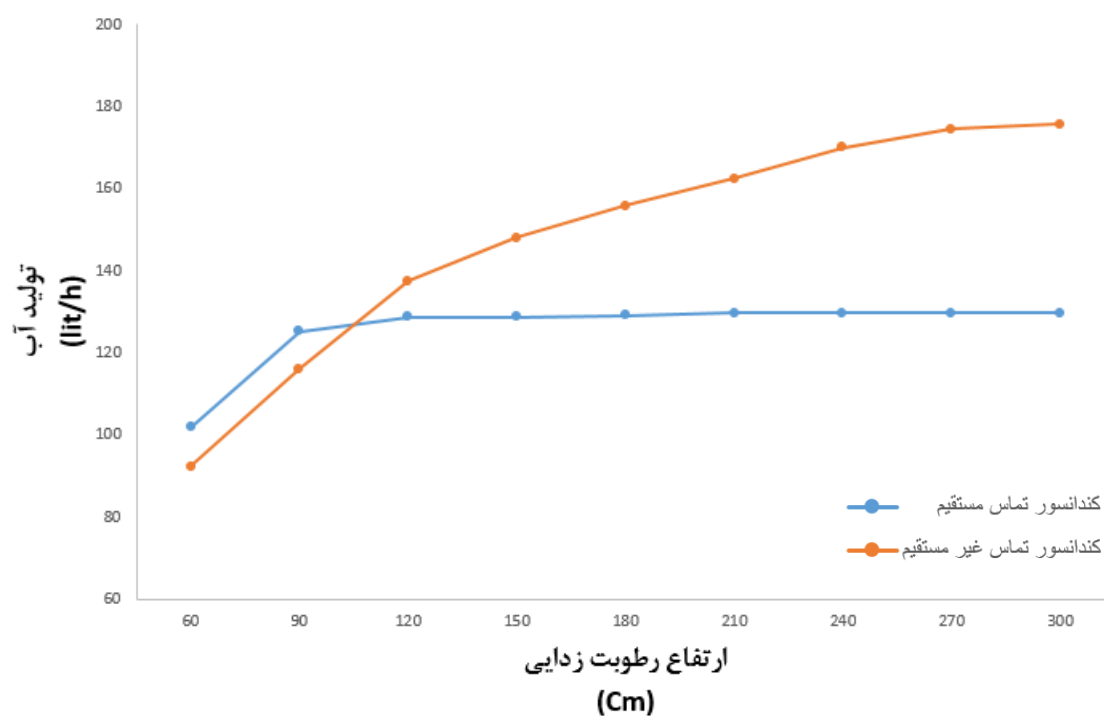
نقطه‌ی حدی، این عامل دیگر تأثیری بر عملکرد سیستم نخواهد داشت و صرفاً هزینه‌ی ساخت دستگاه را افزایش می‌دهد.

نمودار ۴۳-۴ تغییر شدت مصرف انرژی را با افزایش ارتفاع رطوبت‌زدایی نشان می‌دهد. به‌سادگی می‌توان در نمودار نیز مشاهده نمود شدت مصرف انرژی با افزایش ارتفاع به سمت عدد حدی میل می‌کند.



شکل (۴۳-۴): نمودار شدت مصرف انرژی

در بررسی و تحلیل تأثیر ارتفاع رطوبت‌زدایی بر میزان تولید آب می‌توان گفت رفتار دو سیستم تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم همسو اما دارای تفاوت‌های چشمگیری نیز می‌باشد. این تفاوت از آنجا نشئت می‌گیرد که جهت جریان آب‌وهوا در رطوبت‌زدایی تماس مستقیم همسو بوده ولی در رطوبت‌زدایی تماس غیرمستقیم ناهمسو می‌باشد. این امر موجب شده تأثیر ارتفاع در برج رطوبت‌زدایی با کندانسور لوله‌پره با شتاب بسیار کمتری نسبت به کندانسور پکینگ کاهش پیدا کند.



شکل (۴-۴۴): نمودار میزان تولید آب

۴-۴ تحلیل اقتصادی

۴-۴-۱ هزینه

منظور از تحلیل اقتصادی در این پروژه برآورد هزینه‌ی تولید ۱ مترمکعب آب شیرین در سیستم آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی با استفاده از کندانسورهای تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم می‌باشد.

نحوه محاسبه‌ی هزینه‌ی آب‌شیرین‌کن بدین شکل است که ابتدا هزینه اولیه جهت خرید و یا ساخت تجهیزات، نصب و راه‌اندازی دستگاه و سپس هزینه‌های جاری را در طی سال مشخص می‌شود. توابع هزینه‌ی ثابت شامل: توابع هزینه‌ی آکنه‌اوپراتور، آکنه کندانسور، کندانسور لوله پره، سازه و پایه و محفظه آب‌شیرین‌کن، پمپ، فن و هزینه‌ی نصب می‌باشد. هزینه‌های جاری را نیز می‌توان به هزینه‌ی مصرف برق اجزای الکتریکی و هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات اختصاص داد. خالد عبدالعزيز در مقاله‌ای آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی رطوبت‌زدایی را از نگاه اقتصادی آنالیز نمود و سپس مدل را بهینه‌سازی کرد. اکثر روابط استفاده شده در قسمت هزینه‌های ثابت مانند هزینه پمپ و فن از مستندات تحقیق عبدالعزيز استخراج شده و دیگر اجزا نیز باتوجه به ساختار آب‌شیرین‌کن براساس قیمت‌های اجزای آن محاسبه شده است. در این پژوهش هزینه‌ها و نرخ بهره مطابق جدول ۴-۱۰ به‌عنوان فرضیات مربوط به احداث این آب‌شیرین‌کن در حالت بین‌المللی و حالت داخلی ایران در نظر گرفته شده است. در این پژوهش فرض بر این است که از هزینه تأمین آب‌شور مانند هزینه انتقال آب‌شور و ... صرف‌نظر کنیم.

جدول (۱۰-۴): بررسی پارامترهای هزینه

فرضیات	داخلی	بین‌المللی
هزینه خرید آکنه	۴۰۰۰۰۰۰ (Rial/m ³)	۲۰۰ (\$/m ³)
هزینه‌ی خرید کندانسور پره لوله	۹۵۰۰۰۰۰ (Rial/m ³)	۴۰۰ (\$/m ³)
هزینه ساخت	۵۰۰۰۰۰۰ (Rial)	۳۰۰ (\$)
هزینه برق	۱۰۰۰ (Rial/Kwh)	۰/۳۹ (\$/Kwh)
هزینه تعمیرات و نگهداری	۱۰٪ (CapitalCost/year)	۱۰٪ (CapitalCost/year)
هزینه خرید پمپ و فن	۶۰۰۰۰۰۰ (Rial)	۲۵۰ (\$)
نرخ بهره	۱۸٪	۲٪
طول عمر سیستم	۲۰ (year)	۲۰ (year)

۴-۴-۲ هزینه رطوبت‌زنی

در این قسمت باتوجه‌به استاندارد فروش آکنه هزینه‌ی پکینگ مورد‌استفاده بر حسب مترمکعب استفاده می‌شود. همان‌طور که در فصل قبل اشاره شد، استفاده از آکنه پلی‌پروپیلن باعث کاهش هزینه‌ی اولیه‌ی سیستم می‌شود. با استعلام از فروشندگان [۴۳][۴۴] این نوع آکنه، قیمت هر مترمکعب از این جنس آکنه حدود ۴ میلیون تومان در ایران و حدود ۲۰۰ دلار در خارج از ایران می‌باشد. با تبدیل قیمت واحد حجم به دلار به دست می‌آید:

$$Cost_H = V_{Pack} \times Cost_{H/m^3} \quad (۴-۴۶)$$

که در اینجا V_{Pack} حجم آکنه و تمامی توابع هزینه بر حسب دلار و ریال محاسبه شده است.

۴-۴-۳ هزینه کندانسور

برای محاسبه‌ی تابع هزینه‌ی کندانسور تماس مستقیم با می‌بایست مانند بخش قبل هزینه‌ی پکینگ را لحاظ کنیم و برای کندانسور لوله پره باید طول لوله را مورد ارزیابی قرار بدهیم. با استعلام از سازندگان [۴۵] کندانسور تماس غیرمستقیم با لوله‌های مسی یک اینچ و پره صاف، به‌ازای هر مترمکعب از حجم کندانسور مورد طراحی، هزینه حدود ۹,۵ میلیون تومان باید در نظر گرفته شود.

$$Cost_{DH} = V_{Pack} \times Cost_{DH/m3} \quad (۴-۴۷)$$

$$Cost_D = V_{F.T.} \times Cost_{D/m3} \quad (۴-۴۸)$$

۴-۴-۴ هزینه پمپ و فن

همان‌طور که در اشکال ۳-۱۵ و ۳-۱۶ مشاهده می‌کنید در سیستم‌های آب‌شیرین‌کن از ۲ پمپ، یکی برای واحد رطوبت‌زنی و پمپی دیگر برای واحد رطوبت‌زدایی در نظر گرفته شده است، با استفاده از دبی موردنیاز کندانسور و اواپراتور می‌توان، تابع هزینه‌ی پمپ‌ها را محاسبه نمود. با استعلام از سازندگان [۴۶] هزینه برای پمپ ۱ اسب برای دبی مورد استفاده در طراحی نیز محاسبه شد.

$$Cost_P = ۲(۲۵\dot{m}_h + ۲۵\dot{m}_d) \quad (۴-۴۹)$$

برای محاسبه‌ی تابع هزینه‌ی فن نیز [۶۷]:

$$Cost_F = ۷۳.۴ G_{Air} \rho_{Air} \quad (۴-۵۰)$$

که در آن G دبی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

۴-۴-۵ هزینه پایه و پوشش سازه

آب‌شیرین‌کن مورد طراحی دارای یک پایه و قاب، مقادیری از ورق ضدزنگ و همچنین اتصالات می‌باشد. به‌منظور محاسبه‌ی هزینه‌ی سازه که شامل مشخصات طراحی است و از ورق استیل ۳۰۴ با ضخامت ۱

میلی متر استفاده شده است، بدین گونه محاسبه می شود. طبق آنچه گفته شد تابع هزینه ی زیر تابع هزینه ی سازه به همراه هزینه ی نصب آن می باشد.

$$Cost_{Str} = A_{Str} \times Cost_{Str/m^3} \quad (4-51)$$

هزینه ی نصب نیز در همین تابع هزینه جای داده شده است که در اینجا A_{Str} مساحت جانبی سازه می باشد و بر حسب ابعاد طول، عرض و ارتفاع هر یک از بخش های HD و فواصل ثابتی برای بین این دو بخش و ورودی و خروجی هوا محاسبه می شود.

۴-۴-۶ هزینه ثابت سالیانه

نرخ بهره نرخی است که بابت جلوگیری از کاهش ارزش پول پرداختی در زمان حال و دریافتی در آینده، در نظر گرفته می شود. هزینه ی متغیر به صورت سالیانه محاسبه شده است و تابع نهایی بر حسب تولید سالیانه می باشد، هزینه های ثابت نیز که در طول عمر مفید دستگاه که ۲۰ سال در نظر گرفته می شود، نیز باید به صورت معادل سالیانه تبدیل شود. قابل ذکر است هزینه ی نصب تمامی واحدها ۱۰ درصد هزینه ی ثابت سرمایه گذاری در نظر گرفته شده است؛ لذا:

$$Capital_{Cost} = 1.1(Cost_{Str} + Cost_F + Cost_P + Cost_D + Cost_H) \quad (4-52)$$

با در نظر گرفتن نرخ بهره ۱۸٪ برای ایران و نرخ بهره ۲٪ در اروپا و زمان کارکرد ۲۰ سال (P)، هزینه سالیانه ی ثابت کل عبارت است از:

$$Annual_{CC} = Capital_{Cost} \left(\frac{I(1+I)^P}{(1+I)^{P-1}} \right) \quad (4-53)$$

۴-۴-۷ هزینه نگهداری و تعمیرات

هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات ۱۰٪ هزینه‌ی سالیانه کل اولیه‌ی سیستم ترکیبی در نظر گرفته شده است [۱۷].

$$Cost_{MO} = 0.1 Annual_{CC} \quad (4-54)$$

۴-۴-۸ هزینه مصرف برق

پمپ‌ها و فن در سیستم به انرژی الکتریکی نیازمند می‌باشند، برای محاسبه‌ی تابع هزینه‌ی انرژی الکتریکی در ابتدا با داشتن افت فشار کل هوا و افت فشار آب می‌توان توان مصرفی فن و پمپ را محاسبه و سپس باتوجه به زمان استفاده آن‌ها در سال تابع هزینه‌ی کل برق را محاسبه کنیم.

میزان مصرف برق پمپ و فن در طول کل ساعات یک سال عبارت است از:

$$Fan_{cons} = Fan_{Power} \times 24 \times 365 \quad (4-55)$$

$$Pump_{cons} = Pump_{Power} \times 24 \times 365 \quad (4-56)$$

باتوجه به نیاز به تعمیرات دستگاه و عدم کارکرد پیوسته آن، با نظر گرفتن ضریب ۰/۹ کارکرد برای سیستم در طول سال و با در نظر گرفتن هزینه هر کیلووات ساعت برق مصرفی، هزینه الکتریسیته در یک سال برابر است با:

$$Cost_{Elec} = (Fan_{cons} + 2Pump_{cons}) \times Cost_{Elec/Kwh} \times 0.9 \quad (4-57)$$

قیمت هر کیلووات ساعت برق صنعتی طبق آخرین اعلام اداره برق برای مناطق گرمسیر ۱ حدود ۱۰۰ تومان در نظر گرفته شده است و برای اروپا نیز این نرخ برابر ۳۹ سنت می‌باشد. حال با محاسبه‌ی هزینه های متغیر که شامل هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری و هزینه‌ی برق می‌باشد می‌توان تابع هزینه‌ی نهایی را محاسبه نمود.

۴-۴-۹ هزینه نهایی

با محاسبه‌ی تابع هزینه‌ی کل اولیه به صورت سالیانه و هزینه‌های متغیر به صورت سالیانه می‌توانیم تابع هزینه‌ی نهایی که شامل میزان هزینه یک سال بر میزان تولید آب شیرین (در ۹۰٪ ساعات کارکرد یک سال)، است را محاسبه کرد:

$$C_{fun} = \frac{Annula_{CC} + Variable_{Cost}}{(Pure_{Water}) \times 0.9} \left(\frac{\$}{m^3} \right) \quad (4-58)$$

در جدول ۴-۱۱ با محاسبه مقادیر فوق‌الذکر می‌توان نسبت به مقایسه بین دو کندانسور اقدام نمود.

جدول (۴-۱۱): بررسی پارامترهای هزینه

پارامتر	آب شیرین کن با کندانسور تماس مستقیم (داخلی)	آب شیرین کن با کندانسور تماس غیرمستقیم (داخلی)	آب شیرین کن با کندانسور تماس مستقیم (بین‌المللی)	آب شیرین کن با کندانسور تماس غیرمستقیم (بین‌المللی)
هزینه سرمایه‌گذاری کل	۲۷۹۱۸۰۰۰ (Rial)	۳۸۸۰۸۰۰۰ (Rial)	۱۳۹۰ (\$)	۱۸۸۵ (\$)
هزینه سرمایه‌گذاری سالانه	۵۹۲۹۷۸۳۲ (Rial)	۸۲۴۲۸۱۹۲ (Rial)	۲۸/۴ (\$)	۳۸/۵ (\$)
هزینه‌های برق	۱۱۶۱۸۸۸۳ (Rial)	۱۱۶۱۸۸۸۳ (Rial)	۴۵۳۱ (\$)	۴۵۳۱ (\$)
هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه	۲۷۹۱۸۰۰۰ (Rial)	۳۸۸۰۸۰۰۰ (Rial)	۱۳۹ (\$)	۳۷۷ (\$)
کل هزینه سالانه سیستم	۹۸۸۳۴۷۱۵ (Rial)	۱۳۲۸۵۵۰۷۵ (Rial)	۴۶۹۸/۷ (\$)	۴۹۴۶/۸ (\$)
تولید آب شیرین (m ³ /year)	۹۷۷	۱۱۲۷	۹۷۷	۱۱۲۷
هزینه تولید هر مترمکعب آب شیرین	۱۰۱۰۹۷ (Rial)	۱۱۷۸۴۰ (Rial)	۴/۴ (\$)	۴/۸ (\$)

فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادهات

۵-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه به مدل سازی و بررسی ترمودینامیکی و اقتصادی یک واحد آب شیرین کن رطوبت زنی رطوبت زدایی با کندانسور تماس مستقیم و کندانسور تماس غیرمستقیم پرداخته شد. در قسمت رطوبت زنی برای تدقیق اطلاعات و مدل سازی هرچه بهتر، حالات مختلف اشباع و فوق اشباع در نظر گرفته شده است.

سپس با کمک اطلاعات و داده های عملی اعتبارسنجی مدل های ریاضی انجام گرفت و میانگین درصد خطای آب در کندانسور پره لوله ۸,۱۵ درصد و برای درصد خطای هوا عدد ۳,۰۴ درصد به دست آمد. در رطوبت زنی نیز با کمک داده های عملی اعتبارسنجی انجام شده میزان خطای دما هوا را تنها ۳,۵ درصد و میزان خطای دمای آب را ۸,۵ درصد به دست آمد.

سپس با بررسی و تحلیل پارامتری عوامل مؤثر بر تولید آب شیرین و شدت مصرف انرژی به این مهم دست یافته شد که این عوامل تأثیری مطابق جدول ۱۲-۵ دارد.

برای طراحی و ساخت یک واحد شیرین سازی آب شور باید برای جلوگیری از هدررفت منابع و دسترسی به بالاترین راندمان سیستم لازم است مشخصات هندسی و شرایط ترمودینامیکی را تا حد ممکن به حالت

ایده آل برای سیستم نزدیک کرد. با در نظر گرفتن هزینه و میزان تولید آب شیرین آب شیرین کن با

کندانسور تماس غیرمستقیم هزینه ی بالاتر برای طراحی و ساخت را داراست و تولید هر مترمکعب آب

شیرین حدود ۱۷۸۴۰ ریال می باشد اما میزان تولید آب شیرین در سال حدود ۱۱۲۷ مترمکعب تخمین

زده می شود. اما در آب شیرین کن با کندانسور مستقیم دارای هزینه پایین تر برای ساخت و مطابقاً تولید

کمتر با شرایط یکسان می باشد به طوری که هزینه تولید هر مترمکعب آب شیرین در حدود ۱۰۱۰۹۵ ریال

می باشد و میزان تولید آب شیرین در سال حدود ۹۷۷ مترمکعب تخمین زده می شود. با مقایسه این دو

حالت می توان گفت با برتری اهمیت میزان نیاز تولید آب شیرین بر هزینه آن کندانسور تماس

غیرمستقیم ارجحیت پیدا می کند و به طور بلعکس برای کاهش هزینه های تولید هر مترمکعب آب

شیرین میزان تولید کل سالیانه نیز کمتر خواهد بود.

جدول (۵-۱۲): بررسی پارامترهای تحلیل شده

پارامتر	بازه‌ی تغییر	نسبت تغییر با شدت مصرف انرژی	نسبت تغییر با تولید آب شیرین
دبی آب گرم	۴۰ تا ۱۰۰ (lit/min)	مستقیم	مستقیم
دبی هوا	۰,۳ تا ۱,۱ (Kg/s)	دارای نقطه بهینه	دارای نقطه بهینه
دمای آب گرم	۵۰ تا ۸۰ (C°)	دارای نقطه بهینه	مستقیم
ارتفاع رطوبت زنی	۶۰ تا ۲۷۰ (Cm)	مستقیم و حدی	مستقیم و حدی
دبی آب سرد	۴۰ تا ۱۰۰ (lit/min)	ثابت	مستقیم
ارتفاع رطوبت زنی	۶۰ تا ۳۰۰ (Cm)	معکوس و حدی	مستقیم و حدی

۵-۲ پیشنهادات

- بررسی و مقایسه عملکرد سیستم رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی در حالت چندمرحله‌ای با کندانسورهای تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم به طور ترکیبی
- بررسی و ارزیابی تجربی سیستم رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی با کندانسور تماس مستقیم و کندانسور تماس غیرمستقیم در یک پایلوت
- بررسی و مقایسه عملکرد سیستم رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی با کندانسورهای تماس مستقیم و تماس غیرمستقیم با منابع حرارتی و انرژی متفاوت مانند خورشیدی یا ...

پیوست الف خواص آب و هوا

خواص هوا در دمای میانگین بین ورود و خروج هوا محاسبه می گردد.

ظرفیت گرمایی هوا

$$Cp = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4T^4 + c_5T^5 \quad (الف-۱)$$

$$\begin{aligned} c_0 &= 1.004571427 \\ c_1 &= 2.05063275 \times 10^{-3} \\ c_2 &= -1.631537093 \times 10^{-4} \\ c_3 &= 6.2123003 \times 10^{-6} \\ c_4 &= -8.830478888 \times 10^{-8} \\ c_5 &= 5.071307038 \times 10^{-10} \end{aligned}$$

در این رابطه ظرفیت گرمایی بر حسب $KJol/kg$ و دما بر حسب کلون است.

دانشیه هوای مرطوب:

$$\rho_a = 101.325 \times 28.9 \times ((1 + X_{sat}) / (8.313 \times T(1 + 1.6078 X_{sat})_a)) \quad (الف-۲)$$

که در آن X_{sat}

$$X_{sat} = 2.19 \times 10^{-6} T_a^3 - 1.85 \times 10^{-4} T_a^2 + 7.06 \times 0.001 T_a - 0.077 \quad (الف-۳)$$

در این رابطه دما بر حسب سانتیگراد می باشد.

ویسکوزیته هوا:

$$\mu_a = c_0 + c_1 T_a + c_2 T_a^2 + c_3 T_a^3 + c_4 T_a^4 \quad (4-الف)$$

$$c_0 = 1.715747771 \times 10^{-5}$$

$$c_1 = 4.722402075 \times 10^{-8}$$

$$c_2 = 3.663027156 \times 10^{-10}$$

$$c_3 = 1.873236686 \times 10^{-12}$$

$$c_4 = 8.050218737 \times 10^{-14}$$

دمای هوا بر حسب سانتیگراد و ویسکوزیته بر حسب می باشد.

خواص آب در لایه فیلم، در دمای متوسط فیلم و برای جریان سیال خنک کننده در دمای میانگین بین

ورودی و خروجی تعیین می گردد.

دانسیته آب:

$$\rho_w = \left(\frac{c_1}{c_2 \left(1 + \left(\frac{T_w}{c_3} \right)^4 \right)} \right) \times 18.015 \quad (5-الف)$$

$$c_1 = 5.459$$

$$c_2 = 0.3059$$

$$c_3 = 647.3$$

$$c_4 = 0.081$$

ظرفیت گرمایی هوا

(6-الف)

$$Cp_w = \frac{c_1 + c_2 T_w + c_3 T_w^2 + c_4 T_w^3 + c_5 T_w^4}{18.015}$$

$$c_1 = 2.76 \times 10^5$$

$$c_2 = -2.0901 \times 10^3$$

$$c_3 = 8.125$$

$$c_4 = -1.4116 \times 10^{-2}$$

$$c_5 = 9.3701 \times 10^{-6}$$

مراجع

١. <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/where-earths-qt-science-center-objects.#water?qt-science-center-objects=Emissions>, The Bellona Foundation, ٢ Stangeland A., *Scenarios for Global CO* (٢٠٠٧).
٢. Ali, M.T., H.E.S. Fath, and P.R. Armstrong, *A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ٤١٨٧-٤١٩٩: p. ٨ (١٥. ٢٠١١).
٣. Sharon, H. and K.S. Reddy, *A review of solar energy driven desalination technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١٠٨٠-: p. ٤١. ٢٠١٥.
٤. Azevedo, F.D.A.S.M., *Renewable Energy Powered Desalination Systems: Technologies and Market Analysis*. ٢٠١٤.
٥. Li, C., Y. Goswami, and E. Stefanakos, *Solar assisted sea water desalination: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, ١٣٦-١٦٣: p. ١٩. ٢٠١٣.
٦. Z. Taqdees, "Desalination System Diagrams," ٢٠١٤ Z. Taqdees, D.S.D., "Comparative analysis of regenerative and air-extraction multi-stage humidification-dehumidification desalination system using pinch technology". Desalination, ١٥٨-١٦٦: p. ٣٨٥. ٢٠١٦.
٧. Faegh, M., P. Behnam, and M.B. Shafii, *A review on recent advances in humidification-dehumidification (HDH) desalination systems integrated with refrigeration, power and desalination technologies*. Energy Conversion and Management, ١٠٠٢-١٠٣٦: p. ١٩٦. ٢٠١٩.
٨. Delyannis, E., *Historic background of desalination and renewable energies*. Solar Energy, ٣٥٧-٣٦٦: p. ٥ (٧٥. ٢٠٠٣).
٩. Optimizing the operating parameters of a solar desalination plant, El-Nashar A M, (٢٠٧-٢١٣), ٤ (٤٨), ١٩٩٢ Solar energy, (Farid, M. and Al-Hajaj, A.W., ٤٢٧-٤٢٩), pp. ١ (١٠٦) dehumidification cycle. Desalination, ١٩٩٨ Al-Hallaj, S., Farid, M.M. and Tamimi, A.R., humidificationdehumidification cycle: performance of the unit. Desalination, ٢٧٣-٢٨٠), pp. ٣ (١٢٠).
١٠. Solar ١٩٩٩ Nawayseh, N.K., Farid, M.M., Omar, A.A. and Sabirin, A., desalination based on humidification process—II. Computer simulation. Energy ١٤٤١-١٤٦١), pp. ١٣ (٤٠ conversion and management, Solar ١٩٩٩ Nawayseh, N.K., Farid, M.M., Al-Hallaj, S. and Al-Timimi, A.R., desalination based on humidification process—I. Evaluating the heat and mass transfer coefficients. Energy Conversion and Management, ١٤٢٣-), pp. ١٣ (٤٠ transfer coefficients. Energy Conversion and Management, ١٤٣٩).
١١. M. F. A. Goosen, S. S. Sablani, W. H. Shayya, C. Paton, and H. Al-Hinai, "Thermodynamic and economic considerations in solar desalination," ٢٠٠٠, Jun. ٨٩-٦٣, pp. ١ no. , ١٢٩ Desalination, vol.

- Al-Hallaj, S., et al., *Solar desalination with humidification–dehumidification cycle*: . ١٧
 . ١٦٩-١٨٦): p. ١-٣ (١٩٥. ٢٠٠٦ *Review of economics*. Desalination,
 A. A. El-Haroun, “*Desalination System with Humidification-Dehumidification of* . ١٨
 . ٢٠١٣, ٥٢-٤٤, pp. ١, no. ١ *Air*,” *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol*, vol.
 Mehrgoo, M. and M. Amidpour, *Constructal design of humidification–* . ١٩
): p. ١-٣ (٢٧١. ٢٠١١ *dehumidification desalination unit architecture*. Desalination,
 . ٦٢-٧١
 Mehrgoo, M. and M. Amidpour, *Derivation of optimal geometry of a multi-effect* . ٢٠
humidification–dehumidification desalination unit: A constructal design.
 . ٢٣٤-٢٤٢: p. ٢٨١. ٢٠١١ Desalination,
 Zamen, M., et al., *Experimental investigation of a two-stage solar humidification–* . ٢١
 . ١-٦): p. ١ (٣٣٢. ٢٠١٤ *dehumidification desalination process*. Desalination,
 Ashrafizadeh, S.A. and M. Amidpour, *Exergy analysis of humidification–* . ٢٢
dehumidification desalination systems using driving forces concept. Desalination,
 . ١٠٨-١١٦p. : ٢٨٥. ٢٠١٢
 . *Performance optimization of* ٢٠٠٩ Soufari, S.M., Zamen, M. and Amidpour, M., . ٢٣
the humidification-dehumidification desalination process using mathematical
 . ٣٠٥-٣١٧), pp. ١-٣ (٢٣٧ *programming*. Desalination,
 Narayan, G.P., et al., *Thermodynamic analysis of humidification dehumidification* . ٢٤
 ٣٣٩-): p. ١-٣ (١٦. ٢٠١٢ *desalination cycles*. Desalination and Water Treatment,
 . ٣٥٣
 Sharqawy, M.H., et al., *Optimum thermal design of humidification* . ٢٥
 . ١٠-٢١p. : ٣٤٩ . ٢٠١٤ *dehumidification desalination systems*. Desalination,
 Li, X., et al., *Experimental study on a humidification and dehumidification* . ٢٦
 . ٢٠١٤ *desalination system of solar air heater with evacuated tubes*. Desalination,
 . ١-٨: p. ٣٥١
 Abbasi, H.R. and H. Pourrahmani, *Multi-criteria optimization of a renewable* . ٢٧
hydrogen and freshwater production system using HDH desalination unit and
 . ٢١٤. ٢٠٢٠ *thermoelectric generator*. Energy Conversion and Management,
 Rajaseenivasan, T. and K. Srihar, *An investigation into a laboratory scale bubble* . ٢٨
column humidification dehumidification desalination system powered by biomass
 . ٢٣٢-٢٤٤: p. ١٣٩. ٢٠١٧ *energy*. Energy Conversion and Management,
 Ahmed, H.A., et al., *Experimental investigation of humidification-dehumidification* . ٢٩
desalination system with corrugated packing in the humidifier. Desalination,
 . ١٩-٢٩: p. ٤١٠. ٢٠١٧
 Xin Huang, T.K., Yang Li, Xiang Ling, *Experimental investigation and* . ٣٠
optimization of total energy consumption in humidification-dehumidification
 . (٢٠١٩ (١٥٨. ٢٠١٩ *system*. Energy Procedia
 Sachdev, T., V.K. Gaba, and A.K. Tiwari, *Performance analysis of desalination* . ٣١
system working on humidification-dehumidification coupled with solar assisted air
 : ٢٠٥. ٢٠٢٠ *heater and wind tower: Closed and open water cycle*. Solar Energy,
 . ٢٥٤-٢٦٢p.

- Kumar, R., et al., *Thermodynamic investigation of water generating system through HDH desalination and RO powered by organic Rankine cycle*. Materials .۳۲
 .۵۲۵۶-۵۲۶۱: p. ۴۶. ۲۰۲۱ Today: Proceedings,
 tri-generation system using Abbasi, H.R., et al., *Thermodynamic analysis of a* .۳۳
SOFC and HDH desalination unit. International Journal of Hydrogen Energy,
 .۲۰۲۱
 Ghiasirad, H., et al., *Thermoeconomic assessment of a geothermal based combined* .۳۴
cooling, heating, and power system, integrated with a humidification-
dehumidification desalination unit and an absorption heat transformer. Energy
 .۲۳۵. ۲۰۲۱ Conversion and Management,
 Zamen, M., M. Amidpour, and M.R. Firoozjaei, *A novel integrated system for* .۳۵
fresh water production in greenhouse: Dynamic simulation. Desalination,
 .۵۲-۵۹: p. ۳۲۲
 He, W.F., et al., *Parametric analysis of a humidification dehumidification* .۳۶
desalination system using a direct-contact dehumidifier. International Journal of
 .۳۱-۴۰: p. ۱۲۰. ۲۰۱۷ Thermal Sciences,
 He, W., H. Yang, and D. Han, *Thermodynamic investigation and optimization of a* .۳۷
heat pump coupled open-air, open-water humidification dehumidification
desalination system with a direct contact dehumidifier. Desalination,
 .۴۶۹. ۲۰۱۹
 Zhao, Y., et al., *Experimental research on four-stage cross flow humidification* .۳۸
dehumidification (HDH) solar desalination system with direct contact
 .۱۴۷-۱۵۷: p. ۴۶۷. ۲۰۱۹ dehumidifiers. Desalination,
 Dehghani, S., A. Date, and A. Akbarzadeh, *Performance analysis of a heat pump* .۳۹
driven humidification-dehumidification desalination system. Desalination,
 .۹۵-۱۰۴: p. ۴۴۵
 Dehghani, S., A. Date, and A. Akbarzadeh, *An experimental study of brine* .۴۰
recirculation in humidification-dehumidification desalination of seawater. Case
 .۱۴. ۲۰۱۹ Studies in Thermal Engineering,
 Nada, S.A., et al., *Experimental investigation of air-conditioning and HDH* .۴۱
desalination hybrid system using new packing pad humidifier and strips-finned
 .۱۸۵. ۲۰۲۱ helical coil. Applied Thermal Engineering,
 Zamen, M., M. Amidpour, and N. Rezakhani, *Theoretical and experimental* .۴۲
investigation of humidification process in supersaturated state. Desalination,
 .۱۶۵-۱۷۴: p. ۳۶۹. ۲۰۱۵
<http://www.almasgharb.co/>. .۴۳
<https://www.vistechcooling.co.uk/>. .۴۴
<https://elimamobadel.ir/home/>. .۴۵
www.kalasanati.com. .۴۶

Abstract

One of the challenges that the world is facing is supply of fresh water. nowadays the increase of population and industrialization, more cities and countries, the demand for fresh water is increasing too. Desalination of seawater is one of the most important processes for producing water demand. Among the various methods of desalination, HumidificationDehumidification has some advantages such as the use of low temperature energy sources and use in low water production capacities. This type of desalinators consists of two main units, humidifier and dehumidifier. The condensing unit of this type of desalination plant has always been studied and researched due to saline water in order to reduce its related problems, especially during operation; Therefore, in this research, first the process of humidification and dehumidification is described and then the modeling of this desalination plant has been done by considering two different modes of dehumidification, direct contact and indirect contact in MATLAB software. Validation of the two main parts of the model was performed using existing data. Then the effect of basic parameters on freshwater production in both systems was investigated. Modeling and analysis of this system has been done using the laws of thermodynamics and mass and heat in different parts of the desalination unit. In the next step, according to the costs considered for the capital cost and operation cost, including energy costs and maintenance, the two condenser models were compared from an economic point of view. In the end, it was found that considering the cost and amount of fresh water production, fresh water with indirect contact with the condenser has a higher cost for design and construction and production per cubic meter of fresh water is about 383715 Rials, but the amount of fresh water production per year is estimated at 375 cubic meters. But in direct desalination condenser has a lower cost for construction and therefore less production with the same conditions, so that the cost of production per cubic meter of fresh water is about 328820 Rials and the amount of fresh water production per year is estimated at 325 cubic meters. By comparing these two cases, it can be said that with the superiority of the need for fresh water production over the cost of the indirect contact condenser, and conversely to reduce production costs per cubic meter of fresh water, the total annual production will be lower.

Keywords: Desalination, Humidification, Dehumidification, Direct contact condenser, Indirect contact condenser, Energy intensity, HD



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Technology Engineering

Modeling and technical and economical assessment of HD desalination with counter
flow and direct and indirect contact condenser

Reza Abedini

Supervisors:

Dr. Mohammad Zamen

October 2021