

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

طراحی و شبیه سازی سیستم آب شیرین کن حرارتی رطوبت زنی-رطوبت زدایی با بازچرخش

آب شور و شیرین

نگارنده: یارمحمد شیرمحمدی

اساتید راهنما

دکتر محمد محسن شاه مردان

دکتر محسن نظری

بهمن ۱۴۰۰

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقديم اثر

به:

روح پدرم

بمشکروقدردانی

از راهنمایی دکتر محمد محسن شاه مردان و دکتر محسن نظری، همچنین تمامی اساتید دانشکده مکانیک
سپاسگزاری می کنم.

تهدنامه

اینجانب **یارمحمد شیرمحمدی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی** دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و شبیه سازی سیستم آب شیرین کن حرارتی رطوبت زنی-رطوبت زدایی با بازچرخش آب شور و شیرین تحت راهنمایی دکتر محمدمحسن شاهمردان و دکتر محسن نظری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در 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 بافتهای 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 .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در حال حاضر بحران کم‌آبی بعنوان یکی از بزرگترین خطرات جهانی گریبان‌گیر اکثر کشورهای دنیا از جمله ایران است. با وجود اینکه بیش از $\frac{2}{3}$ سطح کره زمین از آب تشکیل شده، اما بیشتر آن را آب دریاها شامل می‌شود و تنها ۰/۰۱۴٪ آن قابل شرب و در دسترس می‌باشد. لذا در شرایط فعلی چاره‌ای جز شیرین سازی آب دریاها قابل تصور نیست که در این زمینه اقدامات خوبی صورت گرفته اما اکثر روشهای شیرین سازی بدلیل وابستگی به سوخته‌های فسیلی و تصفیه آب‌شور دورریز حاصل از این کارخانجات هزینه‌بر بوده و همچنین به زیرساختهای اساسی نیاز دارد که در مقیاس بزرگ مقرون به صرفه می‌باشد و این برای مناطق توسعه یافته مناسب بوده اما برای مناطق محروم و دورافتاده قابل استفاده نیست. اما سیستم رطوبت زنی-رطوبت‌زدایی (HDH) این مزیت را دارد که با صرف هزینه کم و تجهیزات ساده برای جوامع کوچک و پراکنده راه‌اندازی شود. در این تحقیق با مطالعه انواع روشهای آب شیرین کن و بررسی کارهای انجام شده در زمینه‌ی HDH، چهار پیکربندی جدید a، b، c و d با بازچرخش آب‌شور پیشنهاد و طراحی شد تا میزان انرژی مصرفی و آب‌شور دورریز تا حد امکان کاهش داده شود. سپس با بدست آوردن معادلات حاکم، مدل‌سازی ترمودینامیکی صورت گرفت. نتایج حاصل بیانگر این است که سیستم ترکیبی HDH و پمپ حرارتی، کاهش قابل ملاحظه‌ای در مصرف انرژی داشته و باعث بهبود عملکرد می‌شود. بدین ترتیب که در پیکربندی بهینه شده‌ی d نسبت خروجی بدست آمده از ۰/۶۲۳ به ۳/۴۷۴ ارتقاء یافته و همچنین مقادیر نسبت بازیابی کلی و آب تولید شده به ترتیب ۲۰ و ۳۰٪ افزایش داشته‌اند. بعلاوه در این مطالعه تاثیر استفاده از اکونومایزر در سیستم برای افزایش بهره‌وری به‌خوبی در نتایج مشخص شد، که در پیکربندی a فقط با اضافه کردن اکونومایزر به یک سیستم HDH میزان نسبت خروجی بدست آمده تقریباً ۷۰٪ بهبود یافته و در پیکربندی c نیز تنها با یک تغییر نسبت به پیکربندی b (اضافه کردن اکونومایزر)، ضریب عملکرد پمپ حرارتی حدود ۴۵٪ کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: آب شیرین کن، رطوبت زنی-رطوبت زدایی، پمپ حرارتی، بازچرخش آب شور، بازیابی انرژی

فهرست مطالب

و	چکیده
ل	فهرست جداول
م	فهرست اشکال
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۱-۲ انواع روشهای آب شیرین کن
۴	۱-۲-۱ تقطیر چند اثره
۴	۱-۲-۲ تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای
۵	۱-۲-۳ اسمز معکوس
۵	۱-۲-۴ تراکم بخار
۶	۱-۲-۵ الکترو دیالیز
۷	۱-۲-۶ رطوبت زنی-رطوبت زدایی
۱۰	۱-۳ انگیزه تحقیق
۱۰	۱-۴ روش تحقیق
۱۱	فصل ۲: مروری بر تحقیقات پیشین
۱۲	۲-۱ مقدمه
۱۲	۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب
۱۳	۲-۲-۱ سیستم HDH با گرمایش آب و رطوبت زدای تماس غیرمستقیم
	۲-۲-۱-۱ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-
۱۳	آب باز

- ۲-۲-۱-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-
آب بسته ۱۵
- ۲-۲-۱-۳ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب
باز ۱۷
- ۲-۲-۱-۴ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب
بسته ۱۸
- ۲-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب و رطوبت‌زدای تماس مستقیم ۲۰
- ۲-۲-۲-۱ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب
باز ۲۰
- ۲-۲-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب
بسته ۲۲
- ۲-۲-۲-۳ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب
باز ۲۴
- ۲-۲-۲-۴ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب
بسته ۲۵
- ۲-۳ سیستم HDH با گرمایش هوا ۲۶
- ۲-۳-۱ سیستم HDH با گرمایش هوا و رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم ۲۶
- ۲-۳-۱-۱ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-
آب باز ۲۶
- ۲-۳-۱-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-
آب بسته ۲۸
- ۲-۳-۱-۳ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب
باز ۳۰
- ۲-۳-۱-۴ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب
بسته ۳۱

۲-۳-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا و رطوبت‌زدای تماس مستقیم ۳۳

۲-۳-۲-۱ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب

باز ۳۳

۲-۳-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب

بسته ۳۴

۲-۳-۲-۳ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب

باز ۳۵

۲-۳-۲-۴ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب

بسته ۳۶

۲-۴ اهداف پژوهش و نوآوری ۳۷

فصل ۳: پیکربندیها و معادلات حاکم ۳۹

۳-۱ مقدمه ۴۰

۳-۲ پیکربندیها ۴۰

۳-۳ معادلات و شرایط حاکم ۴۵

۳-۳-۱ معادلات بقای جرم و انرژی محفظه تبخیر ۴۵

۳-۳-۲ معادلات بقای جرم و انرژی محفظه چگالنده ۴۵

۳-۳-۳ معادلات بقای جرم و انرژی مخزن آب شور ۴۵

۳-۳-۴ معادله‌ی کار پمپ ۱ ۴۵

۳-۳-۵ معادله‌ی بقای انرژی اکونومایزر ۴۶

۳-۳-۶ معادله‌ی بقای جرم مخزن آب شیرین ۴۶

۳-۳-۷ معادله‌ی کار پمپ ۲ ۴۶

۳-۳-۸ دیگر معادلات پیکربندی a ۴۶

۳-۳-۹ دیگر معادلات پیکربندی b ۴۶

۴۷ ۳-۳-۱۰ دیگر معادلات پیکربندی C

۴۷ ۳-۳-۱۱ دیگر معادلات پیکربندی d

۴۹ فصل ۴: معتبرسازی برای شبیه‌سازی انجام شده

۵۰ ۴-۱ مقدمه

۵۰ ۴-۲ اعتبارسازی

۵۳ فصل ۵: تحلیل و نتیجه گیری

۵۴ ۵-۱ مقدمه

۵۴ ۵-۲ بهبود عملکرد پیکربندیهای طراحی شده

۵۷ ۵-۳ تغییر پارامترهای عملکرد سیستم

۵۷ ۵-۳-۱ اثر تغییرات فشار هوای ورودی

۶۱ ۵-۳-۲ اثر تغییرات دمای هوای ورودی

۶۴ ۵-۳-۳ اثر تغییرات رطوبت هوای ورودی

۶۷ ۵-۳-۴ اثر تغییرات دبی هوای ورودی

۷۰ ۵-۳-۵ اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی

۷۳ ۵-۳-۶ اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه

۷۶ ۵-۳-۷ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر

۷۹ ۵-۳-۸ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده

۸۲ ۵-۴ نتیجه گیری

۸۴ مراجع

فهرست جداول

جدول ۱	علائم استفاده شده.....	ن
جدول ۴-۱	مقادیر پارامترهای عملکرد سیستم شبیه‌سازی شده‌ی مرجع [33] در نقاط مختلف با توجه به شکل ۴-۱.....	۵۲
جدول ۵-۱	اثر تغییرات فشار هوای ورودی.....	۵۹
جدول ۵-۲	اثر تغییرات دمای هوای ورودی.....	۶۲
جدول ۵-۳	اثر تغییرات رطوبت هوای ورودی.....	۶۵
جدول ۵-۴	اثر تغییرات دبی هوای ورودی.....	۶۸
جدول ۵-۵	اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی.....	۷۱
جدول ۵-۶	اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه.....	۷۴
جدول ۵-۷	اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر.....	۷۷
جدول ۵-۸	اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده.....	۸۰

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ تقسیم‌بندی انواع روش‌های شیرین‌سازی آب بر اساس روش جداسازی ۳
- شکل ۲-۱ تقسیم‌بندی انواع روش‌های شیرین‌سازی آب بر اساس منابع انرژی مصرفی ۳
- شکل ۳-۱ سیستم رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی رایج ۸
- شکل ۱-۲ انواع روشهای آب‌شیرین‌کن HDH ۱۲
- شکل ۲-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [9] ۱۴
- شکل ۳-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [3] ۱۶
- شکل ۴-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [1] ۱۷
- شکل ۵-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [10] ۱۹
- شکل ۶-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [9] ۲۱
- شکل ۷-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [3] ۲۳
- شکل ۸-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [1] ۲۴
- شکل ۹-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [3] ۲۵
- شکل ۱۰-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [7] ۲۷
- شکل ۱۱-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [1] ۲۹
- شکل ۱۲-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [10] ۳۰
- شکل ۱۳-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [9] ۳۱
- شکل ۱۴-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [10] ۳۴
- شکل ۱۵-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [3] ۳۵
- شکل ۱۶-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [7] ۳۵
- شکل ۱۷-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [3] ۳۶
- شکل ۱-۳ پیکربندی a ۴۳
- شکل ۲-۳ پیکربندی b ۴۳
- شکل ۳-۳ پیکربندی c ۴۴
- شکل ۴-۳ پیکربندی d ۴۴
- شکل ۱-۴ پیکربندی سیستم HDH مرجع [33] ۵۱
- شکل ۲-۴ اعتبار سازی بوسیله شبیه‌سازی ۵۱
- شکل ۱-۵ بهبود عملکرد پیکربندیهای طراحی شده ۵۶
- شکل ۲-۵ اثر تغییرات فشار هوای ورودی ۶۰
- شکل ۳-۵ اثر تغییرات دمای هوای ورودی ۶۳
- شکل ۴-۵ اثر تغییرات رطوبت هوای ورودی ۶۶
- شکل ۵-۵ اثر تغییرات دبی هوای ورودی ۶۹
- شکل ۶-۵ اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی ۷۲
- شکل ۷-۵ اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه ۷۵
- شکل ۸-۵ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر ۷۸
- شکل ۹-۵ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده ۸۱

جدول ۱ جدول علائم استفاده شده

واحد‌ها	علائم	توضیحات
kJ/kg-C	C _p	ظرفیت گرمایی فشار ثابت
-	COP _h	ضریب عملکرد پمپ حرارتی
-	GOR	نسبت خروجی بدست آمده
-	HDH	رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی
%	RR	نسبت بازیابی
kJ/s	Q	نرخ انتقال حرارت
kJ/s	W	کار انجام شده
kJ/kg	h	انتالپی
kJ/kg	h _{fg}	گرمای نهان تبخیر
kPa	P	فشار
C	T	دما
-	rh	رطوبت نسبی
kg/h	$\dot{m}$	نرخ جریان جرمی
kg _w / kg _a	ω	رطوبت مخصوص
%	η	بازده
-	fw	آب شیرین
-	sw	آب شور یا آب دریا
-	dw	آب تقطیر شده یا آب شیرین تولید شده
-	br	آب شور غلیظ
-	bl	آب شور غلیظ دورریز
-	con	کندانسور
-	com	کمپرسور
-	eva	اوپراتور
-	b	پایین
-	t	بالا
-	R	مبرد

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

با وجود اینکه بیش از ۷۰ درصد کره زمین از آب تشکیل شده است، اما اکثر آن را آب شور اقیانوسها و دریاها تشکیل داده‌اند و درصد خیلی کمی از آن آب قابل شرب می‌باشد. با توجه به افزایش روز افزون جمعیت و سطح آسایش جوامع بشری نیاز به آب شیرین هر لحظه بیشتر احساس می‌شود [1].

بنابراین اهمیت شیرین‌سازی آب دریاها و اقیانوسها به عنوان یک منبع بسیارعظیم برای دستیابی به آب شرب بیشتر نمایان می‌شود. در کنار کمبود آب، دو مشکل دیگر کمبود انرژی و آب شور دورریز حاصل از کارخانجات آب شیرین‌کن را داریم که برای محیط زیست خطرآفرین است [1,2].

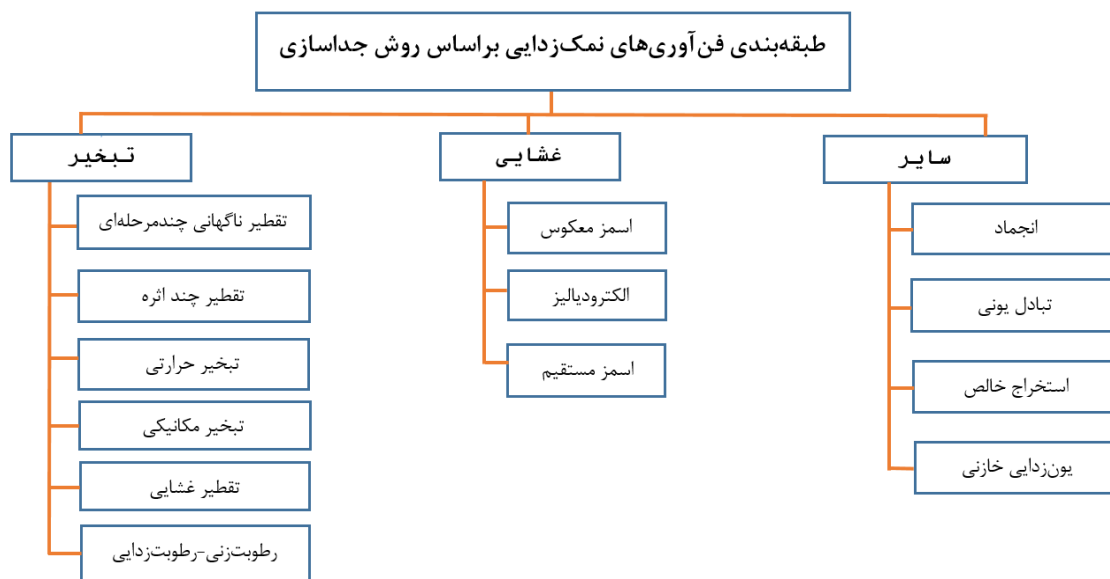
انرژی مورد نیاز برای تولید آب شیرین در ابتدا از منابع فسیلی تامین می‌شد که برای شیرین‌سازی هزار متر مکعب آب شور در روز، ده هزار تن نفت در سال مورد نیاز است. که این موضوع باعث افزایش آلودگی زیست محیطی و همچنین کاهش منابع انرژی فسیلی می‌شود. به همین دلیل بهتر است که از منابع انرژی تجدیدپذیر مثل انرژی خورشیدی به عنوان یک انرژی پاک برای تامین انرژی گرمایی مورد نیاز سیستم‌های آب شیرین‌کن استفاده گردد [3].

روشهای مختلف بکار رفته جهت دفع آب شور غلیظ، هزینه سیستم‌های آب شیرین‌کن را تا حد زیادی افزایش می‌دهد که این هزینه می‌تواند تا حدود ۳۳ درصد از کل هزینه شیرین‌سازی را به خود اختصاص دهد. بنابراین با کم کردن آب نمک خروجی از سیستم می‌توانیم از صرف هزینه‌ی بیشتر جلوگیری نماییم [4].

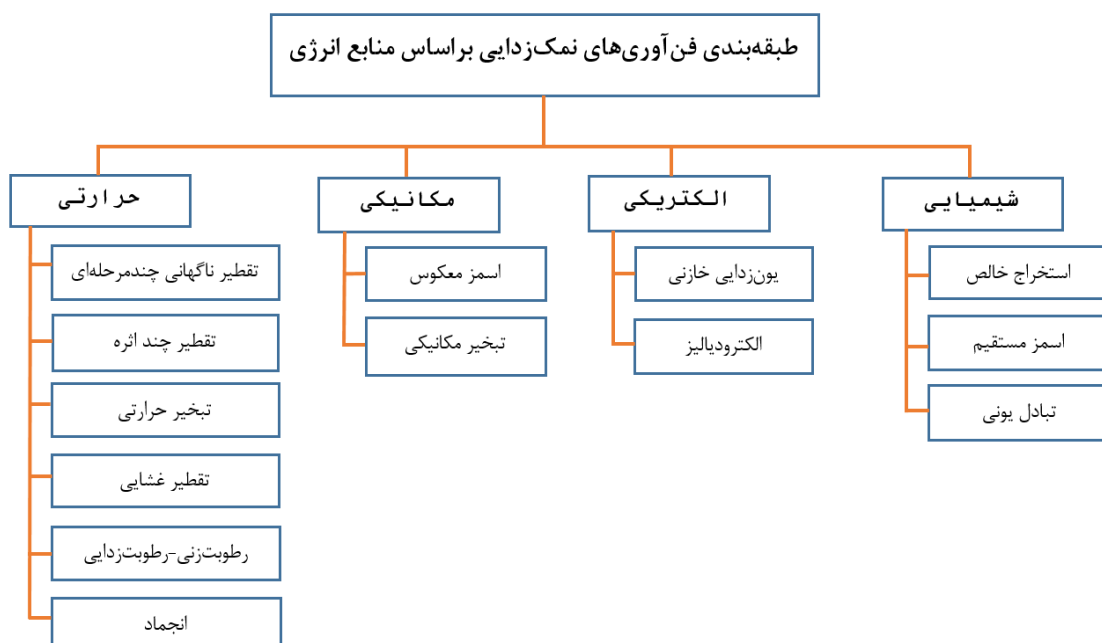
فرآیند آب شیرین‌کن (نمک‌زدایی) به تمامی فرآیندهای جداسازی جامدات محلول در آب گفته می‌شود. اولین گام در انتخاب فرآیند نمک‌زدایی مطالعه کیفیت آب خام در دسترس و مقایسه آن با کیفیت آب مورد نیاز و بررسی میزان حذف هر ناخالصی است.

۲-۱ انواع روشهای آب شیرین کن

روشهای آب شیرین کن بر اساس نوع روش جداسازی یا بر اساس منابع انرژی مصرفی تقسیم بندی می شوند. در شکل ۱-۱ و ۲-۱ می توانیم این تقسیم بندی را مشاهده نماییم و در ادامه به شرح تعدادی از روشهای کاربرد و رایج می پردازیم.



شکل ۱-۱ تقسیم بندی انواع روش های شیرین سازی آب بر اساس روش جداسازی



شکل ۲-۱ تقسیم بندی انواع روش های شیرین سازی آب بر اساس منابع انرژی مصرف

۱-۲-۱ تقطیر چند اثره^۱ (MED)

فرآیند تقطیر چند اثره داخل یک سری محفظه یا اتاقک‌هایی اتفاق می‌افتد که آب در هر واحد یا مرحله با فشار و دمای کمتر تبخیر می‌شود و عملیات به صورت سری انجام می‌گیرد و هر چه تعداد محفظه‌ها بیشتر باشد به تناسب آن عملکرد بهتر خواهد بود. فرآیند تولید بدین صورت است که در مرحله اول مقداری از آب تبدیل به بخار آب شده و در مرحله دوم با برخورد به لوله های آب خام سرد، چگالیده می‌شود. هر چه آب به واحدهای بعدی جریان می‌یابد درجه حرارت آن و فشار محفظه کمتر می‌شود ولی کار تبخیر ادامه می‌یابد و آب با شوری بیشتر از سیستم دفع می‌شود. لذا به جز در واحد اول در باقی محفظه‌ها هم تبخیر انجام می‌گیرد و هم تقطیر که بدین صورت از انرژی حرارتی چند بار استفاده می‌شود. گرمای مورد نیاز اتاقک اول از بخار داغ با فشار کم از دیگ بخار تأمین می‌شود. حداقل تعداد مراحل طراحی شده برای انجام این نوع فرآیند به دمای آب تغذیه وابسته است. بدین ترتیب که هر چه دمای آب تغذیه بیشتر و اختلاف آن با دمای جوش آب کمتر باشد تعداد مراحل انجام فرآیند هم می‌تواند کمتر شود. افزایش تعداد مراحل سبب می‌شود که نسبت آب شیرین تولیدی به بخار مصرفی و بالطبع بازده حرارتی طرح نیز افزایش یابد. البته در صورت افزایش تعداد مراحل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه نیز باید افزایش پیدا کند. سیستم تقطیر چند اثره معمولاً ظرفیتی بین ۶۰۰ تا ۳۰۰۰۰ متر مکعب در روز دارد [5,6].

۱-۲-۲ تقطیر ناگهانی چند مرحله‌ای^۲ (MSF)

در این فرآیند آب خام تحت فشار زیاد که دارای دمای بالایی است ناگهان وارد محفظه‌ای با فشار کم می‌شود و بخشی از آب به طور سریع یا ناگهانی تبخیر می‌گردد. سپس بقیه آب وارد محفظه‌ی بعدی که دارای فشار کمتری است می‌شود و این باعث تبخیر فوری مقدار دیگری از آب می‌شود، این فرآیند بطور متناوب در محفظه‌هایی که پشت سر هم قرار دارند تکرار می‌شود. بخار آبی که در هر بخش تولید

¹ Multi-Effect Distillation

² Multi-Stage Flash

شده در تماس با لوله‌های آب خام سرد، چگالیده می‌شود. برخلاف تقطیر چندمرحله‌ای در تبخیر ناگهانی در هر مرحله، هم بخار آب ناشی از تبخیر ناگهانی تولید می‌شود و هم در همان واحد تبدیل به آب خالص تولیدی می‌گردد. مقدار تولید بخار بستگی به اختلاف دمای دو مرحله دارد، لذا هر چه اختلاف دما بیشتر باشد تولید بخار و در نتیجه تولید آب بیشتر خواهد بود. ظرفیت این سیستم بسته به تعداد محفظه‌های بکار برده شده بین ۱۰۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ متر مکعب در روز متغیر است و هم‌اکنون در حدود ۲۵ درصد از ظرفیت جهانی واحدهای آب شیرین‌کن مربوط به این سیستم می‌باشد [5,7].

۳-۲-۱ اسمز معکوس^۱ (RO)

در فشار اتمسفر زمانیکه دو محلول رقیق و غلیظ آب‌نمک توسط غشاء در تماس قرار گیرند آب از محلول رقیق به سمت محلول غلیظ می‌رود این انتقال تا جایی ادامه می‌یابد که غلظت نمک در دو محلول به تعادل برسد، فشار معادل ارتفاع آب انتقال یافته را فشار اسمزی گویند. در فرآیند اسمز معکوس هدف انتقال آب از محلول غلیظ (آب‌شور) به محلول رقیق (آب خالص) می‌باشد. برای انجام این کار نیاز است آب‌شور با فشاری خیلی بیشتر از فشار اسمزی از درون غشاء (امکان عبور آب و جلوگیری از عبور نمک) عبور داده شود. اغلب واحدهای مدرن اسمز معکوس سیستم بازیافت انرژی دارند. استفاده از سیستم بازیافت انرژی و ارتقاء دهندگی غشاها منجر به یک کاهش کلی در هزینه‌ی سیستم نمک‌زدایی به روش اسمز معکوس می‌شود. امروزه سیستم اسمز معکوس یک تکنولوژی پیش‌تاز جهانی است که بیشترین سهم را در تولید آب شیرین نسبت به بقیه فرآیندهای نمک‌زدایی دارد [6,8].

۴-۲-۱ تراکم بخار^۲ (VC)

فرآیندی است که در آن انرژی حرارتی خارجی از فشرده‌سازی بخشی از بخار تولید شده ناشی می‌شود. بخارها را با دو روش تراکم مکانیکی^۳ (MVC) و تراکم حرارتی^۴ (TVC) می‌توان متراکم نمود. در تراکم

¹ Reverse Osmosis

² Vapor Compression

³ Mechanical Vapor Compression

⁴ Thermal Vapor Compression

مکانیکی از کمپرسور که با برق شبکه و یا دیزل مولد برق کار می‌کند استفاده می‌شود. در نوع تراکم حرارتی برای تولید بخار، حرارت لازم از بخار تحت فشار گرفته می‌شود. بخار گرم در داخل لوله‌ها جریان دارد و آب خام روی آنها پاشیده می‌شود، حال بخار تولید شده تحت فشار قرار می‌گیرد و حرارت حاصل از آن برای تولید دوباره بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد [7].

۵-۲-۱ الکترودیالیز^۱ (ED)

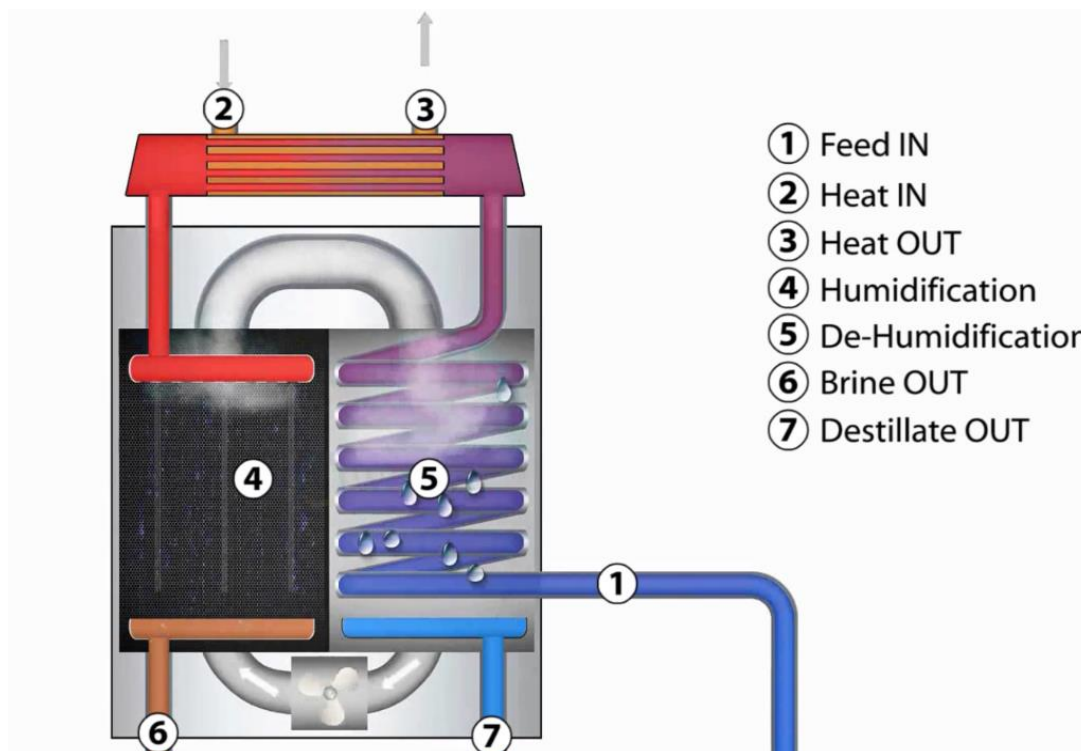
یک فرآیند غشایی شیرین‌سازی آب است. برخلاف RO که نیروی فشاری به عنوان نیروی محرکه برای عبور دادن آب خالص از غشاها استفاده می‌شود، ED براساس نیروی الکتریکی به منظور خارج ساختن نمک‌ها و سایر مواد معدنی محلول بنا شده است. آب خام از طریق کانال‌های باریک که به وسیله‌ی غشاها پوشانده شده است وارد سیستم آب شیرین‌کن ED می‌شود. غشاهای واقع در یک طرف کانال، یون‌های با بار مثبت یا کاتیون‌ها را از خود عبور داده و غشاهای طرف دیگر کانال، یون‌های با بار منفی یا آنیون‌ها را از خود عبور می‌دهد. هنگام کاربرد جریان الکتریسیته بین الکترودهای مثبت و منفی یون‌های باردار به طرف الکتروود با بار الکتریکی مخالف حرکت می‌کنند. کاتیون‌ها و آنیون‌ها به ترتیب از غشاهای مربوط عبور می‌کنند و آب خالص و شیرین‌سازی شده در کانال مرکزی جریان می‌یابد. ممکن است که با گذشت زمان در سطح غشاها، مشکلاتی از قبیل رسوب‌گذاری و جرم‌گرفتگی بروز نماید. برای جلوگیری از مشکلات بهره‌برداری، بسیاری از سیستم‌های مدرن ED به گونه‌ای طراحی شده‌اند که قطبیت الکتروودها در هر ۱۵ تا ۲۰ دقیقه عوض شود. این فرآیندهای تعویضی، تجمع مواد رسوبی و جرم‌ها را از سطح غشاء خارج می‌نماید و سیستم را در برابر تخریب‌های فیزیکی و شیمیایی مقاوم‌تر می‌سازد [5,7].

¹ Electrodialysis

۶-۲-۱ رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی^۱ (HDH)

در این بخش بدلیل اینکه مطالعه حاضر بر مبنای این تکنولوژی انجام شده توضیحات مبسوط‌تری داده می‌شود. این سیستم از دو بخش چگالنده و تبخیرکننده تشکیل می‌شود. روش معمول و رایج آن با توجه به شکل ۱-۳، آب‌شور ورودی با دمای پایین وارد تیوب‌های موجود در محفظه چگالنده می‌شود و با گذر از آن وارد قسمت حرارت‌دهی می‌شود که یا با استفاده از کلکتور خورشیدی و یا با استفاده از هیتر برقی دمای آن بالا رفته و سپس وارد محفظه تبخیر می‌شود. در این قسمت آب‌شور داغ بوسیله‌ی نازل‌هایی که در بالای محفظه قرار دارند به سمت پایین پاشیده می‌شود و هوا نیز از قسمت پایین وارد محفظه تبخیر می‌شود. داخل محفظه‌ی تبخیر پکینگ‌های متخلخل قرار دارند تا تبادل جرم و حرارت را بین آب‌شور داغ و هوای ورودی با بالا بردن نسبت سطح به حجم افزایش دهد. سپس آب‌شور غلیظ از انتهای محفظه تبخیر خارج می‌شود و هوای داغ اشباع نیز از بالای محفظه‌ی تبخیر خارج شده و وارد محفظه چگالنده می‌شود. هوای داغ اشباع پس از برخورد با تیوب‌های سرد محفظه‌ی رطوبت‌زدا، چگالیده شده و آب‌شیرین استحصال می‌شود.

¹ Humidification-Dehumidification



شکل ۱-۳ سیستم رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی رایج [1]

این تکنولوژی شامل روشهای مختلفی می‌باشد که از نظر باز یا بسته بودن چرخه‌ی هوا و آب‌شور تغذیه، به چهار دسته تقسیم می‌شود که عبارتند از: چرخه هوای بسته-آب باز^۱ (CAOW) که روش مرسوم قدیمی در بین روش‌های HDH می‌باشد و مکانیسم آن در قسمت بالا توضیح داده شد، چرخه هوای بسته-آب بسته^۲ (CACW)، چرخه هوای باز-آب باز^۳ (OAOW)، چرخه هوای باز-آب بسته^۴ (OACW) می‌باشد، همچنین از نظر گرمایش به دو دسته گرمایش آب یا هوا تقسیم می‌شوند و در دو حالت تماس مستقیم و غیرمستقیم رطوبت‌زدا ساخته می‌شوند. این نکته قابل ذکر است که رطوبت‌زدا با نوع ستون حباب نیز داریم که نسبت به دو حالت دیگر کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. فرآیند گرم کردن هوا یا آب‌شور تغذیه بطور مرسوم بوسیله‌ی کلکتور خورشیدی یا هیتر برقی انجام می‌شود و در برخی تکنولوژی‌ها به منظور استفاده بهینه از انرژی، این دو منبع تامین حرارت بصورت ترکیبی در سیستم

¹ Closed Air-Open Water

² Closed Air-Closed Water

³ Open Air-Open Water

⁴ Open Air-Closed Water

گنجانده می‌شود. سیستم ترکیبی هیتر و کلکتور بدین صورت است که در طول روز و ساعات تابش خورشید آب‌شور بوسیله کلکتور گرم می‌شود و در مخزن ذخیره قرار می‌گیرد. مقداری از آب تغذیه درون مخزن برای فرآیند شیرین‌سازی در همان ساعات تابش خورشید استفاده می‌شود و بخشی از آن نیز در ساعات پس از غروب خورشید باقی می‌ماند که با کاهش دمای هوای محیط و افت دمای آب‌شور درون مخزن ذخیره، هیتر برقی فعال شده و آب‌شور تغذیه را به دمای مورد نیاز می‌رساند. امروزه به منظور افزایش بهره‌وری سیستم HDH در فناوریهای جدید از پمپ‌حرارتی برای گرم کردن هوا یا آب‌شور تغذیه استفاده می‌شود. پمپ‌حرارتی بطور همزمان دارای منبع سرما (برای سرد کردن آب تغذیه محفظه چگالنده) و منبع گرما (برای گرم کردن هوا یا آب‌شور تغذیه محفظه تبخیر) می‌باشد که مصرف انرژی را کاهش داده و سبب افزایش راندمان سیستم می‌گردد. در سیستم‌های HDH تماس مستقیم رطوبت‌زدا، آب‌شور فقط با رطوبت‌ساز همراه است بنابراین مشکلات مربوط به خوردگی در رطوبت‌زدا از بین می‌رود و هزینه سرمایه‌گذاری سیستم در این مورد کمتر است. سه مزیت عمده آب‌شیرین‌کن رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی عبارتند از: سخت‌افزار مورد نیاز برای ساخت آب‌شیرین‌کن HDH ساده است و عمدتاً می‌تواند با استفاده از مواد موجود و در دسترس ساخته شود، به عنوان یک روش نمک‌زدایی حرارتی در دمای پایین، HDH به راحتی توسط گرمایش خورشیدی نیز راه‌اندازی می‌شود و انرژی الکتریکی مورد نیاز آن بسیار کم است و در نهایت به عنوان یک فرآیند نمک‌زدایی، آب تولیدی توسط HDH خلوص بسیار بالایی دارد و ظرفیت تولید آب‌خالص این نوع آب‌شیرین‌کن در حدود ۱۰۰-۱ مترمکعب در روز است [3,9,10,11].

۳-۱ انگیزه تحقیق

با توجه به وضعیت کنونی که اکثر کشورهای دنیا درگیر بحران کم‌آبی هستند، کشور خودمان ایران نیز حدود دو سوم از مساحتش خشک و بیابانی می‌باشد و بدلیل موقعیت جغرافیایی که هم در شمال و هم در جنوب به دریا دسترسی دارد باید به سمت فن‌آوری‌های آب شیرین‌کن روی آوریم. آب یکی از نیازهای اولیه جوامع بشری می‌باشد که اگر به صورت جدی برای رفع مشکل کم‌آبی کشور اقدامی نشود، قطعاً این مسئله در آینده نزدیک باعث ایجاد مشکلات فراوان در بخش صنایع، کشاورزی و مصارف خانگی خواهد شد. در حال حاضر روش‌های بسیار خوبی برای تولید آب شیرین وجود دارد که این راه‌حل‌ها با توجه به این واقعیت که این روش‌ها نیاز به زیرساخت‌های قابل توجهی دارند و وابسته به سوخت‌های فسیلی هستند برای مناطق توسعه یافته مناسب ولی برای مناطق درحال توسعه مناسب نمی‌باشند. از طرف دیگر استفاده از این روش‌ها به طور معمول تنها در مقیاس بسیار بزرگ مقرون به صرفه است. این درحالی است که بسیاری از روستاهایی که با کمبود آب آشامیدنی سالم مواجه‌اند، جوامع کوچک و پراکنده هستند. بنابراین توجه شود که هر راه‌حل برای این مشکل باید قابل اجرا در مقیاس کوچک و مقرون به صرفه باشد. سیستم HDH این توانایی را دارد که در مقیاس کوچک و در مناطق دورافتاده با هزینه کم بهره‌برداری شود.

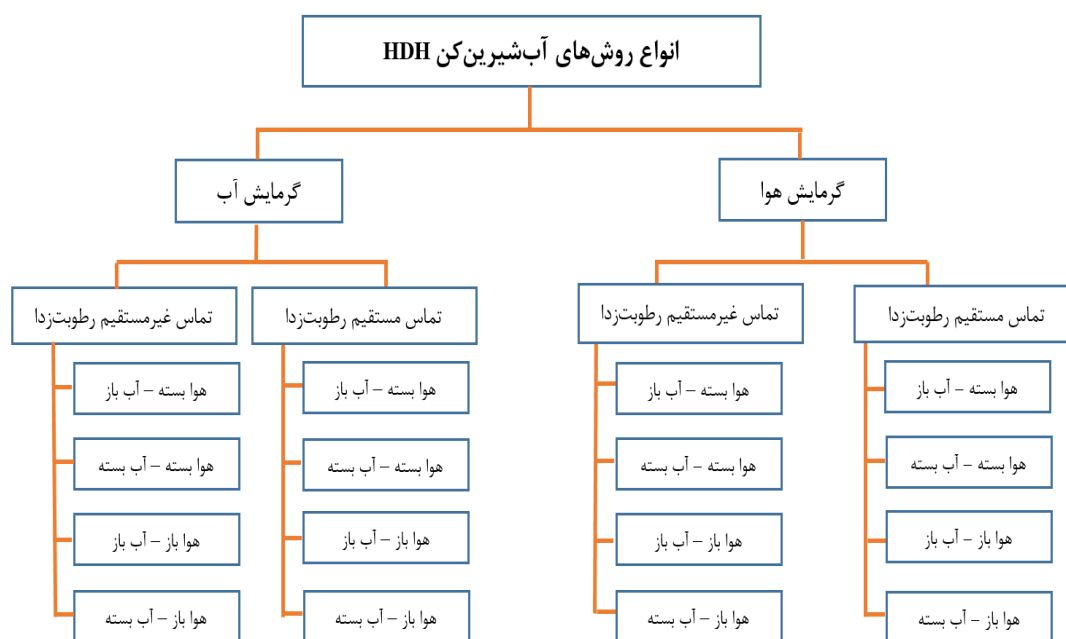
۴-۱ روش تحقیق

- ۱- مطالعه مقالات متعدد در زمینه آب شیرین‌کن و بررسی اقدامات انجام شده در این زمینه
- ۲- مطالعه و بررسی انواع روش‌های آب شیرین‌کن HDH
- ۳- طراحی و شبیه‌سازی چند پیکربندی بهینه برای سیستم آب شیرین‌کن HDH
- ۴- تحلیل و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد سیستم‌های طراحی شده

فصل دوم : مروری بر تحقیقات پیشین

۱-۲ مقدمه

در فصل قبل به روشهای مختلف نمک‌زدایی، خصوصا تکنولوژی HDH اشاره شده است. در این فصل ما به بررسی پژوهش‌هایی که در گذشته با این اهداف انجام شده است می‌پردازیم. در انتها نیز با بیان اهداف و نوآوری، طرح مسئله انجام می‌شود. برای بررسی بهتر و داشتن یک روند منظم در مرور تحقیقات پیشین سیستم HDH را ابتدا طبقه‌بندی نموده (شکل ۱-۲) سپس اقدامات انجام شده در این زمینه را بررسی می‌کنیم. سیستم HDH را بر اساس نوع گرمایش به دو دسته گرمایش آب و گرمایش هوا تقسیم می‌کنیم.



شکل ۱-۲ انواع روشهای آب‌شیرین‌کن HDH

۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب

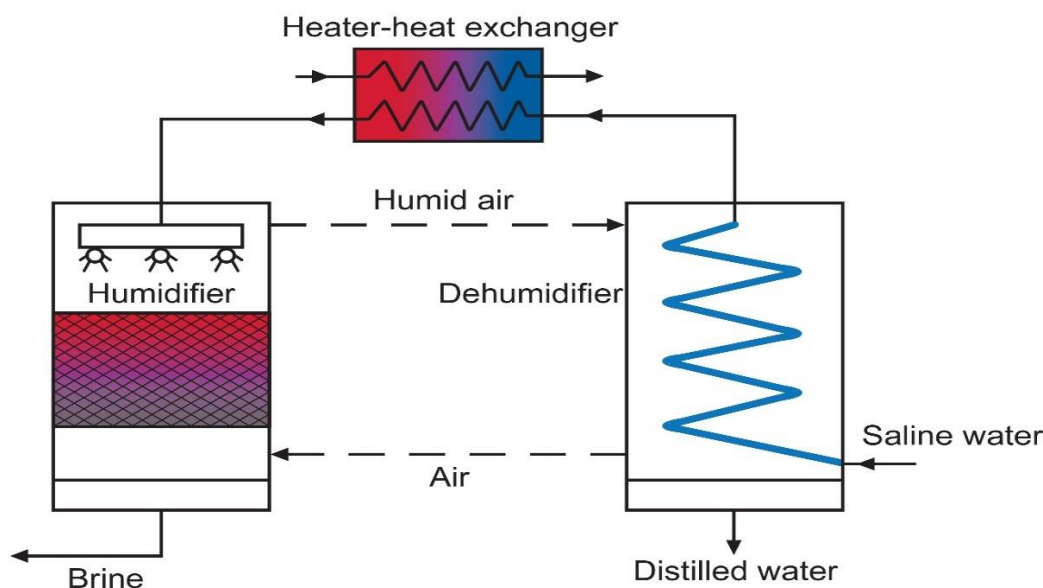
در این روش سعی بر آن است که آب‌شور تغذیه را گرم کنیم تا پس از برخورد با هوای ورودی به محفظه تبخیر، تبادل حرارت و جرم را انجام دهد. مزیت این روش بهره‌وری بالاتر آن می‌باشد. روش گرمایش آب را می‌توانیم به دو دسته تماس غیرمستقیم و مستقیم رطوبت‌زدا طبقه‌بندی نماییم.

۱-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب و رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم

در رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم داخل محفظه چگالنده تیوب‌هایی را جاگذاری می‌نماییم. آب‌شور تغذیه که دمای پایینی دارد از داخل این تیوب‌ها عبور می‌کند و هوای گرم اشباع که وارد محفظه رطوبت‌زدا می‌شود پس از برخورد به این تیوب‌ها چگالیده می‌شود و آب‌شیرین بدست می‌آید. مزیت این نوع سیستم در آب‌تغذیه محفظه چگالنده است که از همان آب‌شور تغذیه محفظه تبخیر می‌توان استفاده کرد و دیگر نیاز به آب‌شیرین برای تغذیه محفظه رطوبت‌زدا نیست. حال خود این سیستم را با توجه به نوع چرخه هوا و آب می‌توانیم به ۴ دسته، چرخه هوا بسته-آب باز، هوا بسته-آب بسته، هوا باز-آب باز، هوا باز-آب بسته تقسیم کنیم.

۱-۱-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز

این روش همانطور که در فصل قبل هم گفته شد، روش مرسوم و قدیمی سیستم HDH می‌باشد. هوا در بین محفظه تبخیر و چگالنده یک چرخه بسته را در حال گردش می‌باشد و آب‌شور تغذیه نیز در یک چرخه باز در فرآیند حرکت می‌کند. بدین ترتیب که آب‌شور در محفظه تبخیر پس از تبادل حرارت و جرم با هوا از این محفظه خارج می‌شود و دیگر بر چرخه باز نمی‌گردد (شکل ۲-۲).



شکل ۲-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [9]

پژوهش انجام شده در این زمینه، در سال ۲۰۲۱ سیستم جدید رطوبت‌زای خورشیدی جذب مستقیم طراحی و بررسی شده است. در این مطالعه بهترین مقدار نرخ تولید آب شیرین و نسبت خروجی بدست-آمده^۱ (GOR) با افزایش نرخ جریان هوا در نرخ بهینه جریان آب شور بدست می‌آید. بهترین مقدار GOR در دبی آب شور تغذیه و هوای ورودی ۱۸/۹ و ۳۳/۵ کیلوگرم بر ساعت بدست می‌آید که مقدار آن برابر ۱/۰۱ می‌باشد و همچنین بیشترین مقدار تولید آب شیرین این سیستم ۸/۲۶ لیتر بر مترمربع در روز است [12].

در مطالعه‌ی دیگری، یک مدل HDH با چرخه هوای بسته-آب باز به صورت ترمودینامیکی امتحان شده و مشخصات طرح در شرایط عملکرد متفاوت بدست آمده است. مطالعه موردی برای سیستمی که ۵ کیلوگرم در ساعت آب شیرین در شهر طهران تولید می‌کند ارائه شده است. اثربخشی انرژی بهینه ۷۸٪ می‌باشد که در آن میانگین حداقل و حداکثر دمای آب دریا در سیستم به ترتیب ۲۵ و ۷۰ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شده است [13].

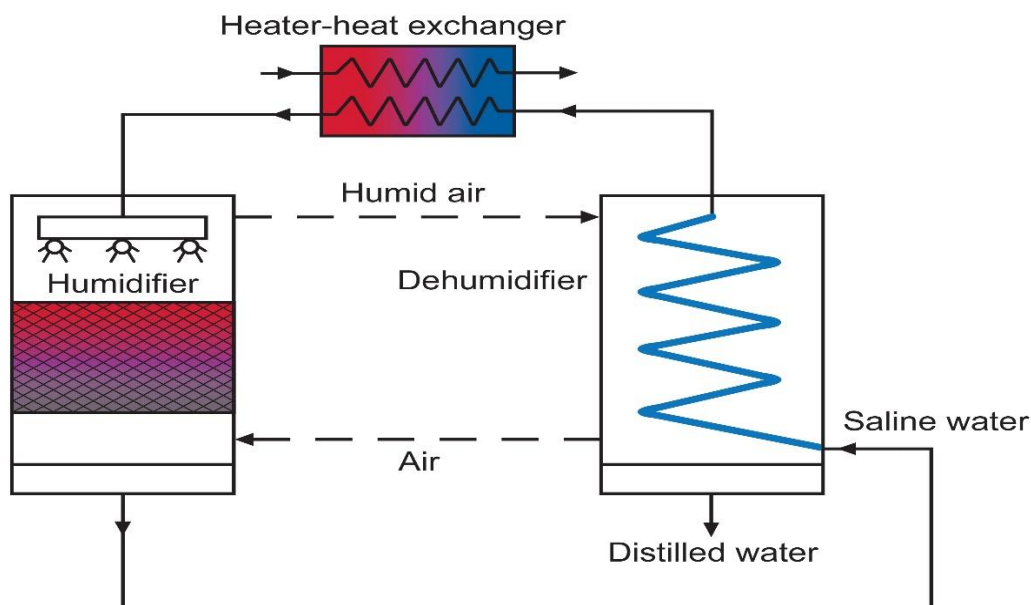
¹ Gained output ratio

در پژوهش دیگری برای یک سیستم ایده آل HDH و گرمایش خورشیدی آب تغذیه، کمینه کار مورد نیاز و بیشینه GOR بررسی شده است. کمینه کار مورد نیاز برای تولید یک کیلوگرم آب شیرین وقتی که سیستم در دمای کاری ۳۰۳ کلوین عمل می کند حدود ۱۰۰ کیلوژول است که با افزایش دمای عملکرد، میزان مصرف انرژی نیز افزایش می یابد. بیشینه GOR سیستم وقتی دمای رطوبت زنی سیستم بیشتر از ۳۴۰ کلوین باشد بدست می آید. همچنین GOR با کاهش دمای محیط بصورت خطی کاهش می یابد. با افزایش غلظت آب شور از ۱ به ۵/۶٪ کمینه کار از ۰/۴ به ۲/۴ کیلوژول بر کیلوگرم افزایش می یابد [14]. در تحقیقی دیگر، یک روش آب شیرین کن HDH برای تولید آب شیرین با ظرفیت پایین به صورت تجربی بررسی شده است. این فرآیند مزایای زیادی دارد که از جمله توانایی کار در دمای پایین، استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر به عنوان منبع تولید انرژی و با تجهیزات ساده ساخته می شود. در این مطالعه مدل آزمایشگاهی و محاسباتی تطابق خوبی را نشان می دهد. متوسط تولید آب شیرین در این سیستم ۲/۴۵ کیلوگرم بر ساعت می باشد [15].

در بررسی دیگری که بر اساس سیستم ترکیبی زمین گرمایی و HDH برای تولید توان و آب شیرین انجام شده است، سیستم ترکیبی تولید آب و قدرت به صورت سری و موازی در چرخه رانکین امتحان شده که نتایج نشان می دهد حالت سری عملکرد بهتری نسبت به سیستم موازی دارد و بیشترین مقدار بدست آمده برای توان ۵/۸۷ مگاوات و حداکثر آب شیرین تولیدی ۱۱/۴۲ کیلوگرم بر ساعت می باشد [16].

۲-۲-۱-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می باشد با این تفاوت که آب شور هم مانند هوا در یک چرخه بسته بین محفظه تبخیر و چگالنده در حال گردش می باشد. بدلیل اینکه در این روش آب شور خروجی نداریم از این روش برای شیرین سازی آب شور با غلظت بالا استفاده می شود (شکل ۲-۳).



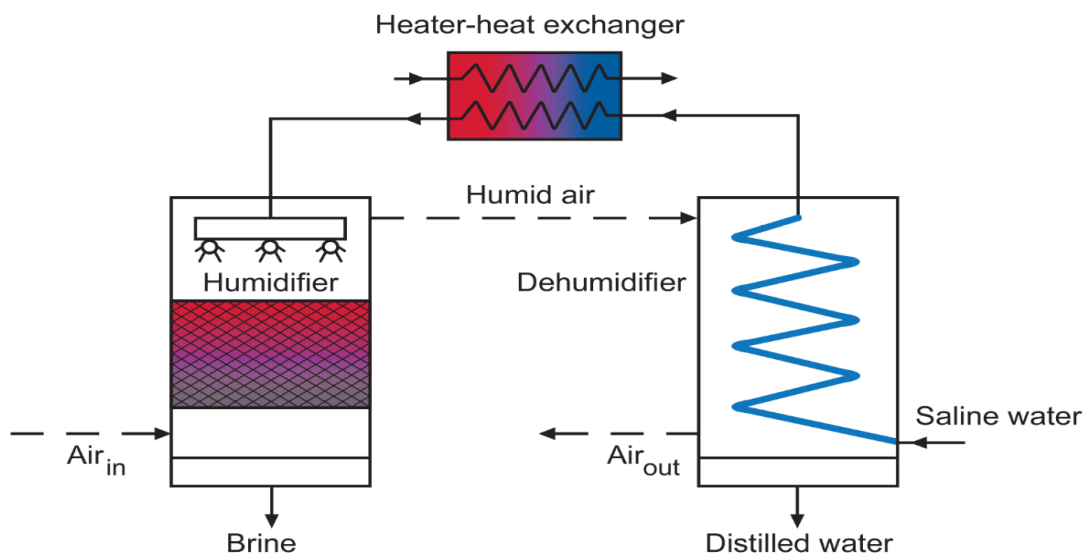
شکل ۲-۳ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [3]

پژوهش انجام شده در این حوزه یک سیستم تخلیه بدون مایع^۱ (ZLD) جدید بر اساس فرآیند HDH می‌باشد. امکان‌سنجی سیستم ابتدا به صورت تجربی مورد ارزیابی قرار گرفته سپس عملکرد ترمودینامیکی از طریق شبیه‌سازی تحلیل شده است. بر اساس نتایج بدست آمده دمای منبع گرما باید بیش از ۷۸ درجه سلسیوس باشد تا محفظه تبخیر بیشترین اثربخشی را از خود نشان دهد، همچنین نسبت جریان جرمی آب به هوا باید ۱/۰۵ باشد تا سیستم عملکرد بهینه را از خود نشان دهد. میزان مصرف انرژی حرارتی و الکتریکی به ترتیب برابر ۷۰۰-۹۰۰ و ۵-۱۱ کیلوژول به ازای هر کیلوگرم آب شور تغذیه می‌باشد. در مقایسه با کریستالایزر تبخیری، فرآیند پیشنهادی مصرف گرما و برق را به ترتیب تا ۵۹ و ۵۶ درصد کم می‌کند و هزینه کارخانه را ۵۸ درصد کاهش می‌دهد [17].

¹ Zero Liquid Discharge

۳-۱-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا-آب باز

در این روش هوا و آب شور هر دو در یک چرخه باز در فرآیند در حال حرکت هستند. هوای ورودی پس از عبور کردن از محفظه تبخیر و چگالنده در محیط رها می‌شود و آب شور ورودی نیز با گذر از محفظه چگالنده و تبخیر از مجموعه آب شیرین‌کن خارج می‌شود (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا-آب باز [1]

پژوهش انجام شده در این زمینه سیستم HDH جدید که از گرمایش تلف شده واحد تهویه مطبوع خانگی برای تولید آب شیرین استفاده می‌کند ارزیابی شده است. تاثیر پارامترهای اصلی مانند دمای هوای ورودی و میزان رطوبت آن، سرعت جریان آب شور و نرخ جریان مایع خنک‌کننده برای شناسایی شرایط بهینه به منظور حداکثرسازی بهره‌وری سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین مقدار تولید آب شیرین و GOR سیستم به ترتیب ۴/۷ کیلوگرم به ازای هر کیلووات ساعت انرژی و ۱/۲۷ می‌باشد [18].

در مطالعه‌ی دیگری یک سیستم نمک‌زدایی ترکیبی HDH که با پمپ حرارتی ادغام شده بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم تجزیه و تحلیل شده است.

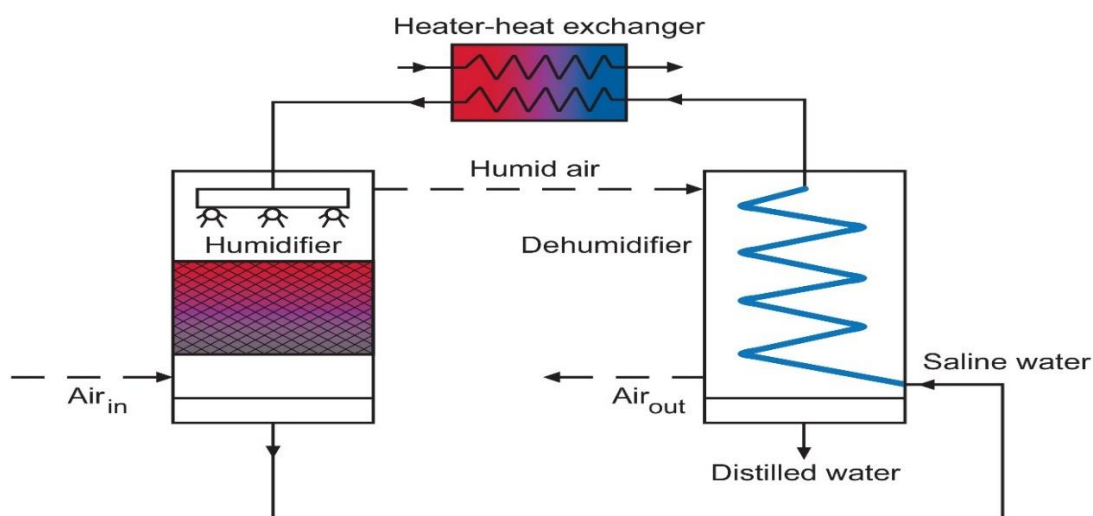
نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان تولید آب خالص و GOR به ترتیب ۲/۷۹ کیلوگرم در ساعت و ۲/۰۸ می‌باشد، همچنین افزایش رطوبت نسبی و سرعت حجمی هوای عبوری در بخش رطوبت‌زدایی منجر به افزایش GOR می‌شود. علاوه بر این مشاهده شده است که افزایش دمای هوای محیط منجر به کاهش GOR می‌شود [19].

در تحقیق دیگری یک سیستم HDH چند مرحله‌ای با گردش هوا باز-آب باز بصورت ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است که در مقیاس کوچک قابل ساخت و کم‌هزینه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ۱٪ شوری آب تغذیه میزان تولید آب شیرین ۰/۷۵٪ کاهش می‌یابد. در این تکنولوژی برای جلوگیری از کاهش راندمان انرژی سیستم، پیشنهاد می‌شود غلظت آب تغذیه کمتر از ۱۵٪ حفظ شود [20].

در بررسی دیگری سیستم ترکیبی نمک‌زدایی HDH و پمپ‌حرارتی با گرمایش خورشیدی در ۲ حالت هوا باز و بسته مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نرخ جریان هوا باعث بهبود میزان تبخیر آب و راندمان رطوبت‌زن می‌شود در حالی که چرخه هوای بسته منجر به کاهش نرخ تبخیر می‌شود. حداکثر مقدار تبخیر و تولید آب در حدود ۱/۳۸ و ۱ کیلوگرم در ساعت در مترمربع در متوسط تابش خورشیدی ۸۷۷ وات بر مترمربع می‌باشد. روش گردش هوای بسته منجر به رطوبت‌زدایی و تولید بالاتر آب شیرین در مقایسه با حالت مدار باز هوا می‌باشد. بیشترین مقدار GOR سیستم هنگام چرخش هوای بسته برابر ۲/۳۶ بدست می‌آید [21].

۴-۲-۱-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می‌باشد با این تفاوت که آب‌شور غلیظ خروجی از محفظه تبخیر از مدار خارج نمی‌شود و در یک چرخه بسته به محفظه چگالنده وارد می‌شود. این روش نیز برای نمک‌زدایی با درصد شوری بالا بکار برده می‌شود (شکل ۲-۵).



شکل ۲-۵ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [10]

در پژوهش مرتبط با این روش، فائق و همکاران [22] یک طرح جدید برای چرخه آب شیرین‌کن، ترکیبی از پمپ‌حرارتی و سیستم رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی به‌صورت آزمایشگاهی ارائه داده‌اند. در این مطالعه کندانسور و اواپراتور هیت‌پمپ وظیفه‌ی رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی را انجام می‌دهند. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که میزان آب شیرین تولیدی و GOR این سیستم به‌ترتیب برابر ۱/۰۸ کیلوگرم در ساعت و ۲ می‌باشد. میزان آب‌شیرین تولید شده با کاهش نرخ جریان هوا و افزایش دمای تر محیط، نرخ جریان اسپری آب و سرعت کمپرسور افزایش می‌یابد.

در تحقیق دیگری یک بررسی تجربی از عملکرد سیستم ترکیبی HDH با پمپ حرارتی انجام شده است. واحد پیشنهادی قادر به تولید آب‌شیرین و همچنین اثر خنک‌کننده برای تهویه فضای اطاقی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر GOR و نسبت بازبایی^۱ (RR) این سیستم به‌ترتیب برابر ۴/۰۷ و ۴/۸۶٪ با ضریب عملکرد^۲ (COP) ۴/۸۵ برای پمپ‌حرارتی می‌باشد. بیشترین میزان تولید آب‌شیرین ۲۸۷/۸ لیتر در روز است و همچنین این سیستم قادر به تولید ۳/۰۷ کیلووات بار سرمایی برای تهویه اطاقی می‌باشد [23].

¹ Recovery Ratio

² Coefficient of Performance

در بررسی دیگری مدل‌های ترمودینامیکی و افت فشار سیستم رطوبت‌زنی و رطوبت‌زدایی، توسعه یافته و توسط نتایج تجربی تایید شده است. تحلیل پارامتریک نشان می‌دهد که نقطه بهینه بازده انرژی ممکن است در برخی موارد تغییر کند. افت فشار در سیستم با دبی جرمی آب تغذیه و هوای ورودی و دمای بالای آب تغذیه افزایش می‌یابد. از نظر مصرف انرژی، نسبت مصرف برق به کل مصرف انرژی مقدار کم حدود ۱۰٪ می‌باشد. از نظر مصرف انرژی، میانگین نسبت مصرف برق ۲۹/۴ درصد و بالاترین آن ۴۰/۶ درصد است. می‌توان نتیجه گرفت که در بهینه‌سازی عملکرد سیستم HDH، اولویت تنظیم سرعت جریان آب تغذیه و دمای بالای آب تغذیه است [24].

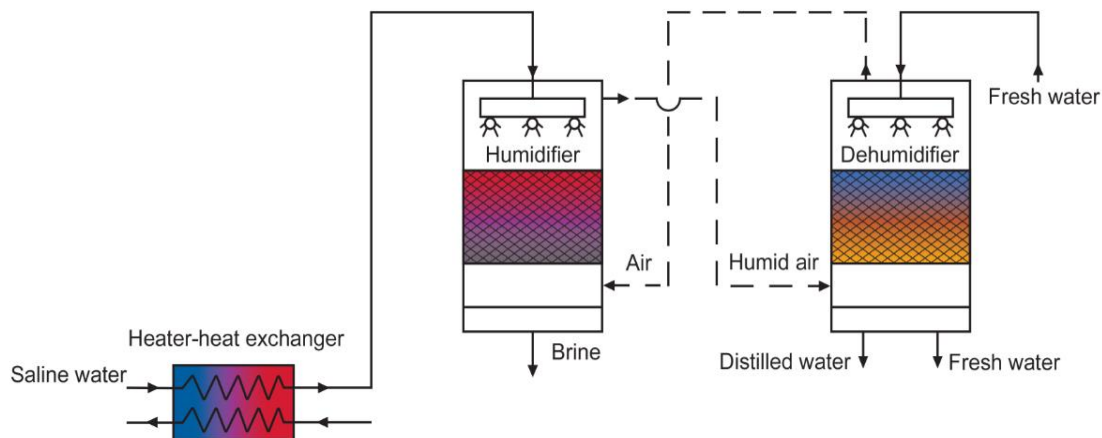
۲-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب و رطوبت‌زدای تماس مستقیم

رطوبت‌زدای تماس مستقیم بجای تیوب‌هایی که در سیستم تماس غیرمستقیم وجود داشت دارای پکینگ می‌باشد. وظیفه پکینگ‌ها بالا بردن سطح تبادل حرارت و جرم نسبت به حجم می‌باشد. در این روش، سیستم علاوه بر آب‌شور تغذیه باید آب‌شیرین تغذیه نیز داشته باشد بدین ترتیب که هوای اشباع گرم که از محفظه تبخیر وارد محفظه چگالنده می‌شود با آب‌شیرین سرد تغذیه که داخل محفظه چگالنده پاشش می‌شود تبادل جرم و حرارت نموده و باعث چگالیده شدن مقداری از هوای اشباع می‌شود، در نتیجه آب شیرین حاصل می‌گردد. مزیت این سیستم در این است که خوردگی مربوط به تیوب‌ها در رطوبت‌زدا را نداریم و هزینه ساخت آن نیز کاهش پیدا می‌کند. مشابه رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم این سیستم را با توجه به نوع چرخه هوا و آب می‌توانیم به ۴ دسته، چرخه هوا بسته-آب باز، هوا بسته-آب بسته، هوا باز-آب باز، هوا باز-آب بسته تقسیم کنیم.

۲-۲-۲-۱ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز

در این روش همانند روش رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم، هوا در بین محفظه تبخیر و چگالنده یک چرخه بسته را در حال گردش می‌باشد ولی علاوه بر آب‌شور تغذیه، آب‌شیرین تغذیه نیز در یک چرخه

باز در فرآیند حرکت می‌کند. بدین ترتیب که آب‌شور در محفظه تبخیر پس از تبادل حرارت و جرم با هوای ورودی از این محفظه خارج می‌شود و دیگر بر چرخه باز نمی‌گردد. همچنین آب‌شیرین در محفظه چگالنده پس از تبادل حرارت و جرم با هوای گرم از این محفظه خارج می‌شود و بازگشت بر چرخه باز ندارد (شکل ۶-۲).



شکل ۶-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [9]

مطالعه انجام شده در راستای این روش، یک سیستم HDH جدید ۴ مرحله‌ای با گرمایش خورشیدی آب‌تغذیه می‌باشد. در این سیستم نحوه تبادل حرارت و جرم محفظه‌های تبخیر و چگالنده چالش اصلی در ساخت مدل می‌باشد. همچنین در این پژوهش اثر تغییرات دما و نرخ آب‌شور تغذیه و نرخ حجم هوا بر روی میزان آب‌شیرین تولید شده و GOR بررسی شده است. بیشترین مقدار آب‌شیرین تولید شده، GOR و RR به ترتیب ۶۳ کیلوگرم بر ساعت، ۱/۴ و ۵/۷٪ وقتی که دمای آب‌شور تغذیه ۸۳ درجه‌ی سانتی‌گراد و نرخ حجم هوا ۳۰۰ مترمکعب بر ساعت باشد بدست می‌آید [25].

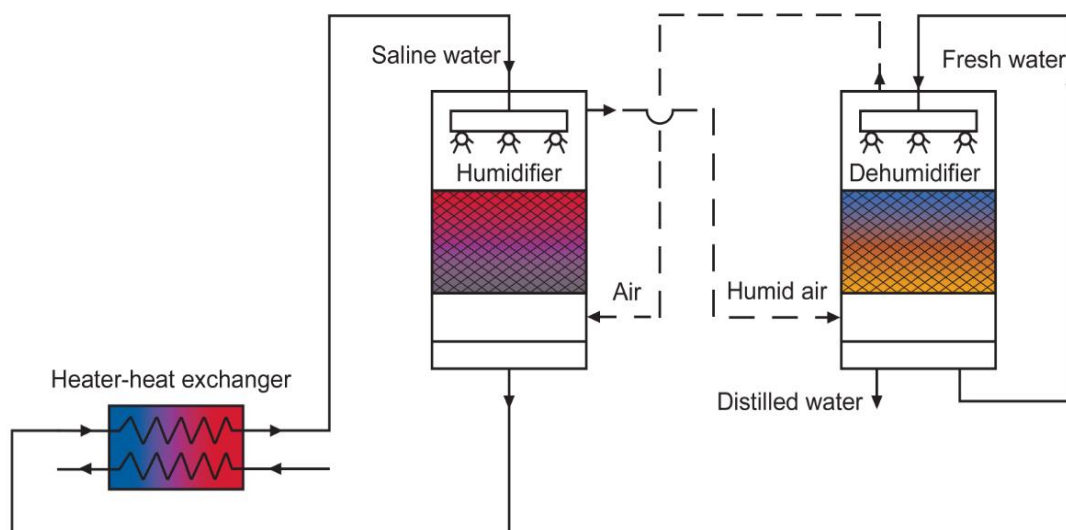
در پژوهشی دیگر، سیستم آب‌شیرین‌کنی طراحی شده است که بصورت پایدار براساس فرآیند رطوبت-زنی و رطوبت‌زدایی این کار را می‌تواند انجام دهد. این دستگاه از گرمای اتلاف خروجی از موتورهای دیزلی کشتی تغذیه می‌کند. رطوبت‌ساز و رطوبت‌گیر به گونه‌ای روی هم قرار می‌گیرند که سازه فشرده باشد. نتایج نشان می‌دهد که دستگاه ۱۹/۶ کیلوگرم در ساعت آب‌شیرین را با GOR برابر ۰/۵۳ می‌تواند

تولید کند، هنگامی که دمای آب تغذیه ۹۰ درجه سانتیگراد، سرعت جریان اسپری آب گرم و سرد به ترتیب ۱ و ۱/۲ تن در ساعت می باشد [26].

در تحقیق دیگری تکنولوژی HDH با گرمایش آب و بازیابی گرمای مبدل حرارتی نشان داده شده است. با توجه به مدل ریاضیاتی مبتنی بر بقای انرژی و تولید آنتروپی، ویژگی‌های سیستم نمک‌زدایی توصیه شده در پارامترهای کلیدی تعیین شده، تجزیه و تحلیل می شوند. بیشترین مقدار GOR سیستم برابر ۲/۰۱ مطابق با حداقل تلفات غیرقابل برگشت کل سیستم نمک‌زدایی بدست می آید. همچنین نتایج نشان می دهد، هزینه‌ی تمام شده در این روش تماس مستقیم رطوبت‌زدا نسبت به روش سنتی تماس غیرمستقیم کمتر است [27].

۲-۲-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می باشد با این تفاوت که آب شور و شیرین تغذیه هم مانند هوا در یک چرخه بسته در حال گردش می باشد. در این روش نیز بدلیل اینکه آب شور دورریز نداریم برای شیرین سازی آب شور با غلظت بالا استفاده می شود (شکل ۲-۷).



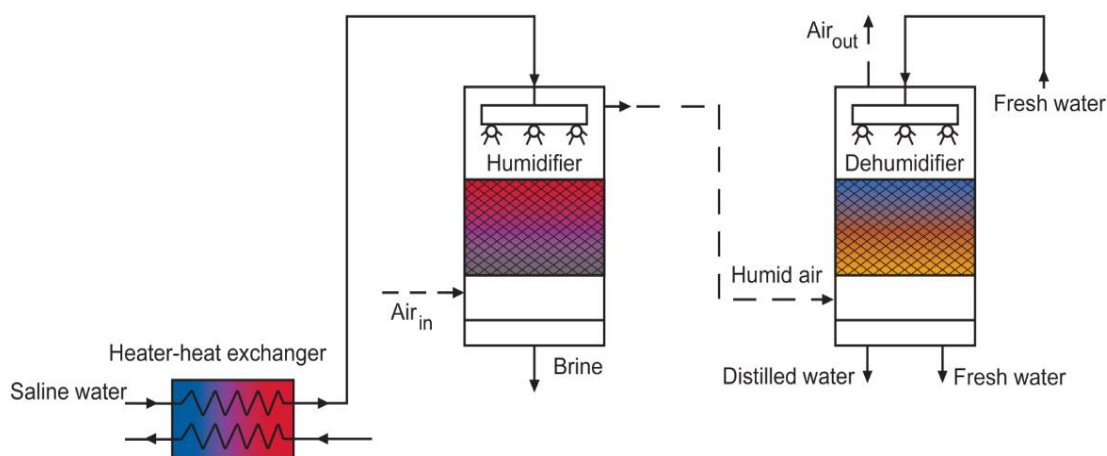
شکل ۲-۷ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [3]

تحقیق انجام شده در این زمینه، یک سیستم HDH با کلکتور خورشیدی گرمایش آب در فلوریدای آمریکا بصورت تجربی می‌باشد. یک حالت کاربردی منحصربه‌فرد که به سیستم اجازه می‌دهد بدون خنک‌کننده‌ی خارجی کار کند، میزان تولید آب شیرین را بهبود داده و مصرف انرژی را کاهش دهد مورد مطالعه قرار گرفته است. این روش به ازای هر متر مربع کلکتور خورشیدی $6/3$ لیتر آب شیرین تولید می‌کند و متوسط مصرف انرژی آن $3/6$ کیلووات ساعت به ازای هر متر مکعب آب خالص تولیدی می‌باشد [28].

در مطالعه‌ی دیگری یک سیستم HDH تماس مستقیم رطوبت‌زدا مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت جریان جرم آب تغذیه به هوای ورودی یکی از مهمترین پارامترهای عملیاتی می‌باشد و نسبت بهینه آن در حدود $1/5$ قرار دارد. هدایت حرارتی پکینگها برای عملکرد بهتر باید بیشتر از 2 W/m-K باشد، همچنین محیط با رسانایی حرارتی بالاتر و اندازه کوچکتر عملکرد بهتری داشته و از هزینه‌ی کمتری برخوردار خواهد بود [29].

۲-۲-۲-۳ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب باز

در این روش هوا، آب شور و شیرین تغذیه هر سه در یک چرخه باز در فرآیند در حال حرکت هستند. هوای ورودی پس از عبور کردن از محفظه تبخیر و چگالنده در محیط رها می‌شود و آب شور و شیرین ورودی نیز در محفظه تبخیر و چگالنده پس از تبادل جرم و حرارت با هوا از مجموعه آب شیرین‌کن خارج می‌شوند (شکل ۲-۸).



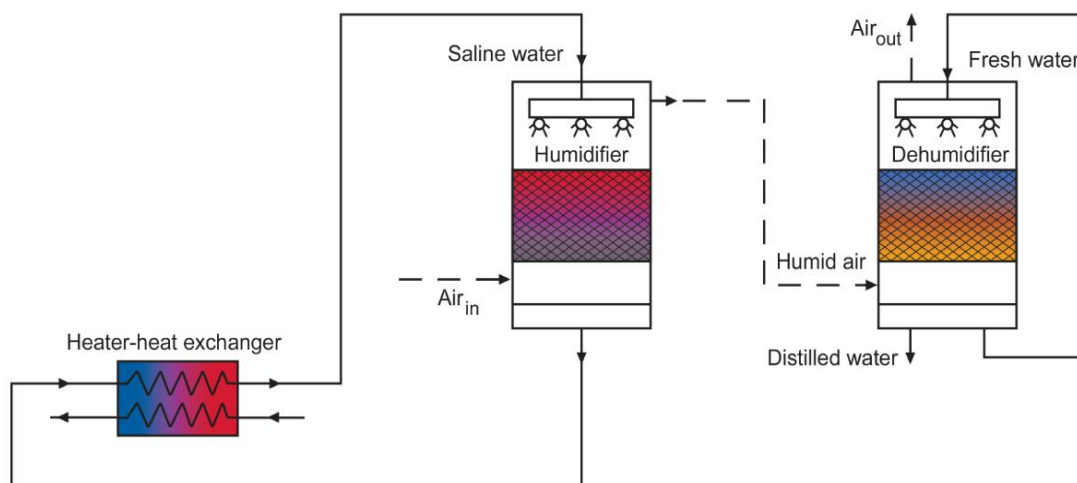
شکل ۲-۸ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [1]

پژوهش انجام شده در این حوزه، یک سیستم نمک‌زدایی تماس مستقیم رطوبت‌زدا بدون پکینگ به صورت عددی بررسی شده است. تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم و اثر هندسه نیز از طریق تغییر نسبت ارتفاع رطوبت‌ساز و رطوبت‌گیر مورد بررسی قرار گرفته است. از نتایج، مشاهده می‌شود که برای یک هندسه ثابت، تولید آب شیرین از طریق قطر قطرات کوچک، سرعت و دمای بالای آب دریا افزایش می‌یابد. بیشترین تولید آب خالص بدست آمده ۲۴۲ کیلوگرم در ساعت در نسبت ارتفاع ۲ بوده است. افزایش نسبت ارتفاع به سطح مقطع در حالت کلی مفید بوده اما بیشتر از ۱/۵ تأثیر آن بسیار ناچیز است. بدلیل نبود بازیابی گرما در این سیستم GOR مقدار پایینی دارد که در بهترین حالت ۰/۵۸ بدست می‌آید [30].

۴-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب

بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می‌باشد با این تفاوت که آب شور غلیظ خروجی از محفظه تبخیر و آب شیرین خروجی از محفظه چگالنده از سیستم خارج نمی‌شوند و در یک چرخه بسته در مدار حرکت می‌کنند. این روش نیز برای نمک‌زدایی با درصد شوری بالا بکار برده می‌شود (شکل ۲-۹).



شکل ۲-۹ شماتیک سیستم HDH با گرمایش آب، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [3]

مطالعه انجام شده در این زمینه، در سال ۲۰۲۱ روش جدید سیستم آب شیرین‌کن HDH با مبدل حرارتی زمین و کلکتور خورشیدی برای تولید هیدروژن و آب شیرین طراحی و آنالیز شده است. در این مطالعه انرژی خورشیدی و مبدل حرارتی زمین بصورت ترکیبی استفاده می‌شود. مقدار تولید آب شیرین و هیدروژن در حالت بیشینه ۱۶ و ۰/۱۶ کیلوگرم بر ساعت و همچنین بیشترین مقدار GOR سیستم ۰/۵ است [31].

در تحقیق دیگری در سال ۲۰۲۱ سیستم بازچرخش آب شور، رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی با هوای نیمه‌باز جدید و هوای بسته که منجر به تخلیه بدون مایع می‌شود بررسی شده است. این سیستم برای آب شور با درصد شوری بالا و همچنین آب‌های دورریز صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد [32].

در پژوهش دیگری دهقانی و همکاران [33] یک سیستم آب شیرین کن HDH بصورت آزمایشگاهی تحت تغذیه با شوری‌های متفاوت برای ارزیابی قابلیت زیست‌محیطی و عملکرد گرمایی روش بازچرخش آب‌شور بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار GOR در شوری ۱۰٪ به مقدار ۰/۶۵ و بیشترین مقدار نرخ بازیابی کلی^۱ (RR_o) و نرخ بازیابی محلی^۲ (RR_l) به ترتیب در شوری ۳۰ و ۱۰٪ به میزان ۸۸ و ۴/۶٪ می‌باشد.

۲-۳ سیستم HDH با گرمایش هوا

در این روش بجای گرم کردن آب‌شور تغذیه، هوای ورودی به محفظه تبخیر را گرم می‌کنیم تا با آب‌شور ورودی به این محفظه تبادل جرم و حرارت انجام دهد. مزیت این سیستم مصرف انرژی کمتر آن می‌باشد. این سیستم را هم مثل روش گرمایش آب می‌توانیم به دو دسته تماس غیرمستقیم و مستقیم رطوبت‌زدا طبقه‌بندی نماییم.

۱-۳-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا و رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم

در این روش نیز مانند سیستم HDH با گرمایش آب و رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم داخل محفظه چگالنده تیوب‌هایی قرار داده می‌شوند و تمام فرآیند داخل محفظه چگالنده مشابه روش گرمایش آب می‌باشد و همانند آن این سیستم را با توجه به نوع چرخه هوا و آب می‌توانیم به ۴ دسته، چرخه هوا بسته-آب باز، هوا بسته-آب بسته، هوا باز-آب باز، هوا باز-آب بسته تقسیم‌بندی نماییم.

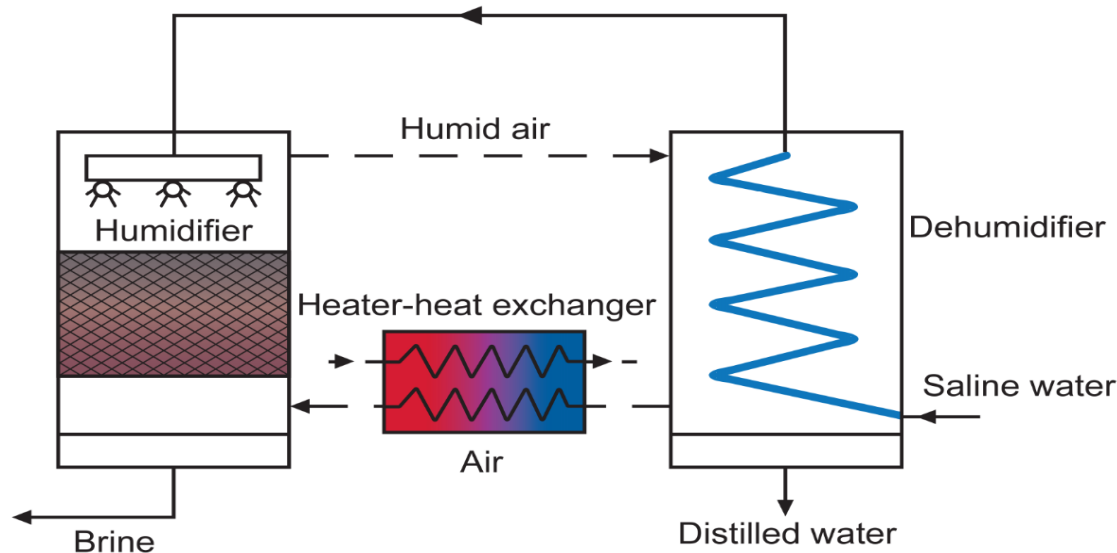
۱-۳-۲-۱ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز

در این روش هوا بین محفظه تبخیر و چگالنده یک چرخه بسته را در حال گردش می‌باشد و قبل از ورود به محفظه تبخیر گرم می‌شود. آب‌شور تغذیه نیز در یک چرخه باز در فرآیند حرکت می‌کند. بدین

¹ Recovery Ratio Overall

² Recovery Ratio Local

ترتیب که آب شور در محفظه تبخیر پس از تبادل حرارت و جرم با هوا از این قسمت خارج می‌شود و دیگر بر چرخه باز نمی‌گردد (شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [7]

مطالعه انجام شده در این حوزه، یک سیستم HDH گرمایش هوا با اتلاف حرارت پایین مبدل حرارتی صفحه‌ای می‌باشد که بعد از محفظه تبخیر قرار گرفته است. در این تحقیق عملکرد واحد رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی به‌مراه مبدل حرارتی بر اساس مدل ریاضیاتی تجزیه و تحلیل می‌شود. حداکثر GOR سیستم زمانی که میزان نسبت، نرخ جریان آب شور تغذیه به هوای ورودی $1/28$ باشد برابر $3/04$ بدست می‌آید. بر اساس بالا رفتن نرخ انتقال حرارت و کاهش ضریب انتقال حرارت، مساحت مبدل‌های حرارتی از $5/25$ به $15/90$ مترمربع می‌رسد [34].

در پژوهش دیگری سیستم نمک‌زدایی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی با چرخش هوای نیمه‌باز و گرمایش هوا و آب مطالعه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیستم گرمایش هوا و آب زمانی که درجه حرارت بالا ثابت باشد این نوع گردش هوا عملکرد مجموعه را بالا می‌برد. تجزیه و تحلیل پارامترهای دیگر نشان می‌دهد که تاثیر دمای محیط بر عملکرد سیستم مهمتر از رطوبت‌نسبی محیط است و بنابراین، برای هر دو آب و هوای خشک و مرطوب کارآمد است. همچنین هنگامی که دمای محیط بالا است، حلقه هوای

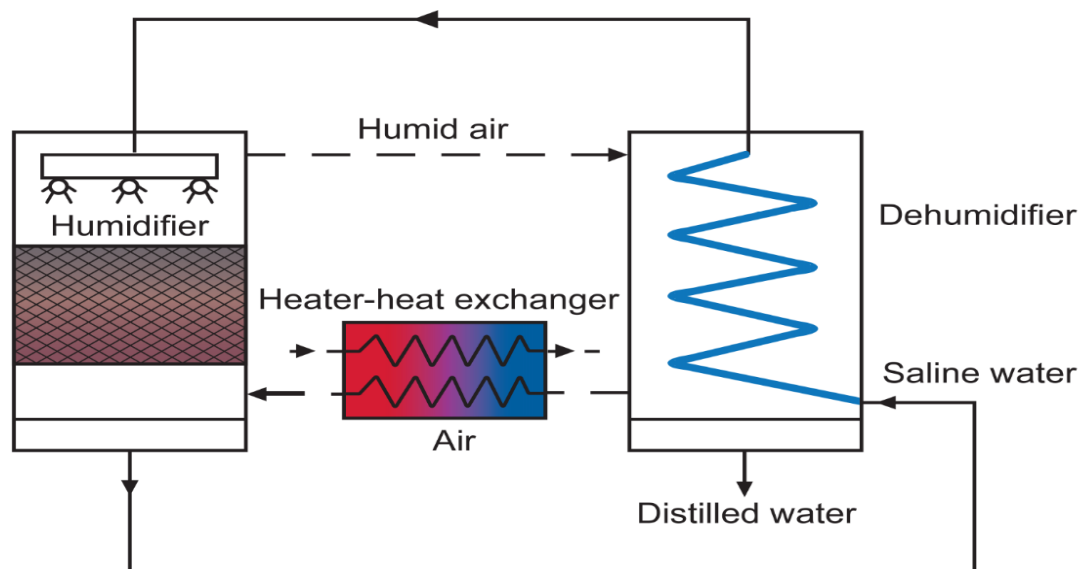
بسته عملکرد بهتری دارد. نتایج نشان می‌دهد که حداکثر عملکرد سیستم، زمانی که نسبت نرخ حرارت هوا به آب برابر ۱ باشد خواهد بود. در صورتی که یکی از جریانها گرم شوند و میزان انرژی دریافتی کم باشد گرمایش آب موثرتر و هنگامی که حرارت ورودی بالا باشد گرمایش هوا بهتر می‌باشد [35].

در تحقیق دیگری رطوبت‌زن سیستم HDH طراحی شده، با کلکتور خورشیدی دومرحله‌ای و دو سیال می‌باشد که بصورت ترکیبی با یک پمپ‌حرارتی ادغام شده است. بررسی تجربی سیستم در دمای چگالش مختلف و نرخ جریان آب‌دریای متفاوت انجام شده که نتایج نشان می‌دهد، بیشترین تبخیر آب در رطوبت ساز حدود ۴/۴۸ کیلوگرم (۱/۰۶ کیلوگرم در ساعت در مترمربع سطح رطوبت‌ساز) در نرخ جریان آب‌دریا ۰/۱۵ کیلوگرم بر ثانیه و دمای چگالش ۲۰ درجه سانتیگراد است و متوسط نرخ تولید آب‌شیرین سیستم بین ۰/۵۶ تا ۰/۹۹ کیلوگرم در ساعت به ازای هر متر مربع سطح رطوبت‌ساز می‌باشد [36].

در مطالعه دیگری سیستم گرمایش هوای اصلاح‌شده (گرمایش هوا بعد از محفظه تبخیر) با گرمایش آب مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که هر دو حالت GOR تقریباً مشابهی دارند با این حال روش گرمایش هوا قدرت پمپاژ هوای بیشتری دارد و به رطوبت‌ساز بزرگتر و رطوبت‌زدای کوچکتری نیاز دارد. در روش گرمایش آب، قدرت پمپاژ آب بیشتر است و به رطوبت‌زن کوچکتر و رطوبت‌زدا بزرگتری نیاز دارد [37].

۲-۱-۳-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می‌باشد با این تفاوت که آب‌شور هم مانند هوا در یک چرخه بسته بین محفظه تبخیر و چگالنده در حال گردش می‌باشد. بدلیل اینکه در این روش آب‌شور خروجی نداریم از این روش برای شیرین‌سازی آب‌شور با غلظت بالا استفاده می‌شود (شکل ۲-۱۱).

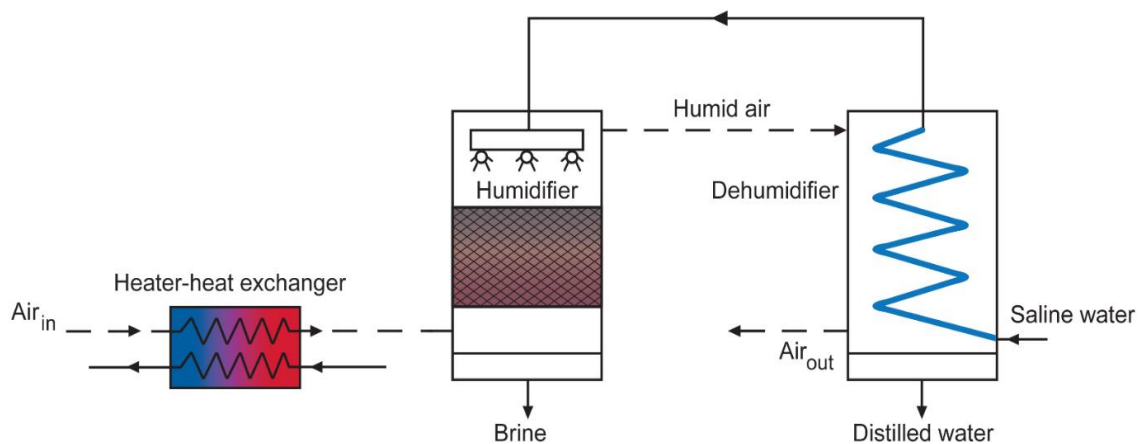


شکل ۲-۱۱ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [1]

در این حوزه یک مدل آزمایشگاهی با گرمایش هوای خورشیدی تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای طراحی، ساخته و آزمایش شده است. مطالعه نشان می‌دهد، افت فشار و اتلاف حرارت در خطوط لوله و اتصالات منجر به کاهش دمای سمت هوا شده که تأثیر زیادی در سیستم HDH گرمایش با هوا دارد، پروفیل دما از میزان تابش خورشید پیروی می‌کند که از اوایل صبح تا ظهر افزایش یافته و سپس تا غروب کاهش می‌یابد. همچنین میزان تولید آب شیرین نیز همین روند را دنبال می‌کند که مقدار تولید نوع تک‌مرحله‌ای $3/5$ و دومرحله‌ای ۶ لیتر در روز می‌باشد. بهره‌وری سیستم از طریق افزایش تعداد کلکتورهای خورشیدی، بهبود عایقکاری محفظه تبخیر، چگالنده و اتصالات سیستم افزایش می‌یابد [38]. در تحقیق دیگری عملکرد یک سیستم ترکیبی نمک‌زدایی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی با یک پمپ حرارتی بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. اثرات پارامترهای مختلف بر روی عملکرد سیستم مورد مطالعه قرار گرفته که حداکثر نسبت خروجی بدست‌آمده و تولید آب شیرین سیستم به ترتیب $4/82$ و 960 کیلوگرم در ساعت می‌باشد. این سیستم روشی موثر برای صرفه‌جویی در مصرف انرژی در مناطق دورافتاده با کمبود انرژی و کمبود منابع آب شیرین ارائه می‌دهد [39].

۳-۱-۳ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب باز

در این روش هوا و آب‌شور هر دو در یک چرخه باز در فرآیند در حال حرکت هستند. هوای ورودی پس از گرم شدن و عبور کردن از محفظه تبخیر و چگالنده در محیط رها می‌شود و آب‌شور ورودی نیز با گذر از محفظه چگالنده و تبخیر از مجموعه آب شیرین‌کن خارج می‌شود (شکل ۲-۱۲).



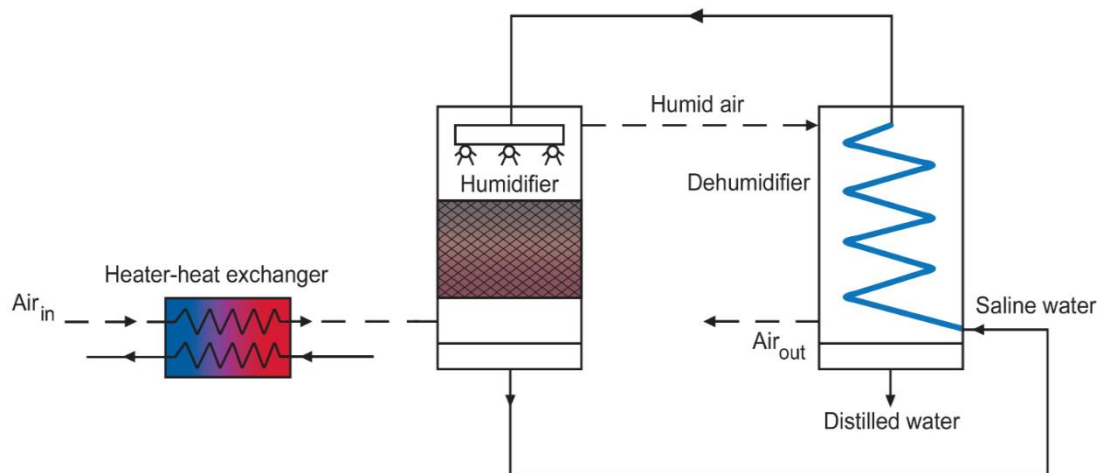
شکل ۲-۱۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [10]

در این زمینه یک مطالعه برای بالا بردن عملکرد سیستم HDH با پمپ‌حرارتی و بازیابی گرما انجام شده است. ۴ پیکربندی متفاوت در این پژوهش بررسی شده است که پیکربندی اول پیش‌سردکن و گرمایش مجدد آب دریا دارد، پیکربندی دوم گرمایش مجدد آب دریا، پیکربندی سوم پیش‌سردکن آب دریا و گرمایش مجدد هوای مرطوب و پیکربندی چهارم گرمایش مجدد هوای مرطوب دارد. نتایج نشان می‌دهد که عملکرد سیستم بوسیله‌ی افزایش رطوبت و دمای هوای محیط، افزایش نرخ جریان هوا و آب‌شور همچنین کاهش دمای آب دریا بالا می‌رود. پیکربندی دوم بهترین عملکرد را با تولید آب شیرین به مقدار ۶۱/۹۴ کیلوگرم بر ساعت و GOR برابر ۴/۹۷ نشان می‌دهد که نسبت به پیکربندی‌های چهار، یک و سه به ترتیب ۱۳، ۵۵ و ۸۵٪ آب شیرین بیشتر تولید می‌کند و همچنین مقدار GOR به ترتیب ۱۱، ۴۸ و ۷۵٪ افزایش می‌یابد [40].

در بررسی دیگری یک سیستم با گرمایش هوا در دو حالت کلکتور خورشیدی قبل و بعد از رطوبت زن مورد ارزیابی قرار گرفته است. تحقیقات نشان داده که کلکتورهای خورشیدی گرمایش هوا برای مکان با تابش زیاد مانند ظهران عربستان سعودی مناسب می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که GOR حالت اول یعنی گرمایش هوا قبل از رطوبت زن بطور متوسط حدود $1/5$ و در حالت دوم گرمایش بعد از رطوبت زن بطور میانگین حدود $4/7$ می‌باشد و این نشان دهنده آن است که گرمایش هوا بین رطوبت زن و رطوبت-زدا عملکرد بهتر و بهره‌وری بالاتری دارد [41].

۴-۱-۳-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می‌باشد با این تفاوت که آب‌شور غلیظ خروجی از محفظه تبخیر از مدار خارج نمی‌شود و در یک چرخه بسته به محفظه چگالنده وارد می‌شود. این روش نیز برای نمک‌زدایی با درصد شوری بالا بکار برده می‌شود (شکل ۲-۱۳).



شکل ۲-۱۳ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [9]

بررسی انجام شده در راستای این روش یک سیستم HDH با گرمایش هوا بوسیله‌ی کلکتور خورشیدی دوتایی در شهر آنکارای ترکیه می‌باشد. اثرات نرخ جریان آب‌شور تغذیه و هوای ورودی، کلکتور خورشیدی دوتایی و دمای آب تغذیه بر میزان تولید آب شیرین سیستم بصورت تجربی بررسی شده است.

نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در صورت عدم استفاده از کلکتور خورشیدی دوتایی بهره‌وری سیستم حدود ۱۵٪ کاهش می‌یابد و با افزایش دمای آب‌شور تغذیه میزان تولید آب‌خالص افزایش می‌یابد. علاوه با افزایش نرخ جریان آب‌تغذیه میزان تولید آب‌شیرین بیشتر می‌شود و با افزایش نرخ جریان هوای ورودی میزان تولید آب‌شیرین سیستم تقریباً ثابت می‌ماند [42].

یک پژوهش دیگر برای بررسی اثرات پارامترهای مختلف عملیاتی و طراحی، مانند نرخ جریان هوا و جریان آب‌تغذیه، دمای آب‌خنک‌کننده و زاویه شیب کلکتور روی نرخ تولید آب‌خالص تحت شرایط اقلیمی آنتالیا ترکیه انجام شده است. این تحقیق در دو حالت گرمایش هوا و گرمایش آب انجام شده و باهم مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نمک‌زدایی با استفاده از روش گرمایش آب راندمان بیشتری دارد و این بدلیل ظرفیت گرمایی بالاتر آب نسبت به هوا می‌باشد. تولید آب‌شیرین با افزایش نرخ جریان هوا و سرعت جریان آب‌تغذیه بهبود می‌یابد. علاوه بر این میزان شیب کلکتور بر مقدار تولید آب‌شیرین تاثیرگذار است که اندازه شیب با عرض جغرافیایی تنظیم شده است. حداکثر تولید سالانه آب‌شیرین این سیستم ۱۲ تن می‌باشد [43].

در تحقیق دیگری سیستم ترکیبی HDH گرمایش هوا و آب با خنک‌کننده تبخیری غیرمستقیم هوای داخل اطاق در شرایط اقلیمی طنطا واقع در کشور مصر بصورت آزمایشگاهی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بار سرمایی حاصل از سیستم بین ۲۵۳ تا ۴۱۷ وات در محدوده زمانی ۸ صبح تا ۶ عصر با نرخ هوادهی ۷۰ مترمکعب بر ساعت تغییر می‌کند، همچنین با همین مقدار هوادهی میزان تولید آب‌شیرین سیستم ۳۸/۶۵ لیتر در روز می‌باشد. افزودن حجم هوادهی سیستم تا ۹۰ مترمکعب بر ساعت، میزان تولید آب‌خالص را تا ۴۷/۲۱ لیتر در روز افزایش می‌دهد که در این حالت مقدار GOR سیستم به ۲/۲۵۶ می‌رسد [44].

در مطالعه‌ی دیگری یک سیستم نمک‌زدایی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی با گرمایش هوای خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب تلفات حرارتی هنگامی که سرعت جریان هوا ۱۴۰ مترمکعب بر ساعت است ۱/۶ می‌باشد، پاشش آب ورودی با دمای متفاوت ۹ تا ۲۷ درجه در

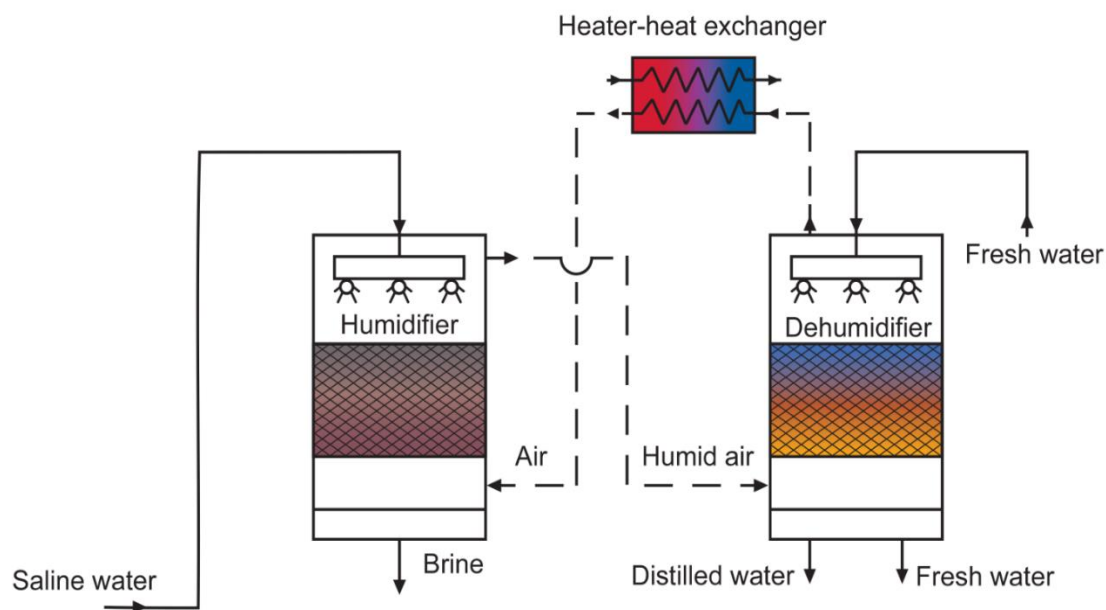
محفظه تبخیر می‌تواند رطوبت‌نسبی هوای خروجی را از ۸۹ تا ۹۷٪ بهبود بخشد و دمای هوای خروجی را از ۳۵ تا ۴۲ درجه سانتیگراد افزایش دهد که این سبب افزایش تولید آب‌شیرین می‌شود [45].

۲-۳-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا و رطوبت‌زدای تماس مستقیم

در این روش نیز مانند سیستم HDH با گرمایش آب و رطوبت‌زدای تماس مستقیم داخل محفظه چگالنده پکینگ قرار داده می‌شود و تمام فرآیند داخل محفظه چگالنده مشابه روش گرمایش آب می‌باشد و همانند آن، این سیستم را با توجه به نوع چرخه هوا و آب می‌توانیم به ۴ دسته، چرخه هوا بسته-آب باز، هوا بسته-آب بسته، هوا باز-آب باز، هوا باز-آب بسته تقسیم‌بندی نماییم.

۲-۳-۲-۱ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز

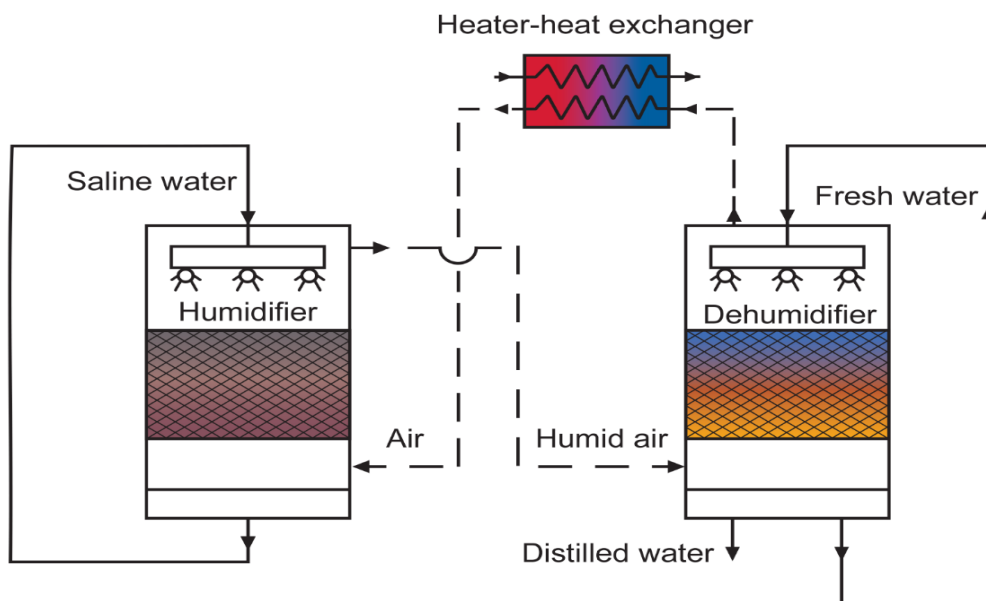
در این روش همانند روش رطوبت‌زدای تماس غیرمستقیم، هوا در بین محفظه تبخیر و چگالنده یک چرخه بسته را در حال گردش می‌باشد و قبل از ورود به محفظه تبخیر گرم می‌شود. ولی علاوه بر آب‌شور تغذیه، آب‌شیرین تغذیه نیز در یک چرخه باز در فرآیند حرکت می‌کند. بدین ترتیب که آب‌شور در محفظه تبخیر پس از تبادل حرارت و جرم با هوای ورودی از این قسمت خارج می‌شود و دیگر بر چرخه باز نمی‌گردد. همچنین آب‌شیرین در محفظه چگالنده پس از تبادل حرارت و جرم با هوای گرم از این محفظه خارج می‌شود و بازگشت بر چرخه ندارد (شکل ۲-۱۴).



شکل ۱۴-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب باز [10]

۲-۳-۲-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته

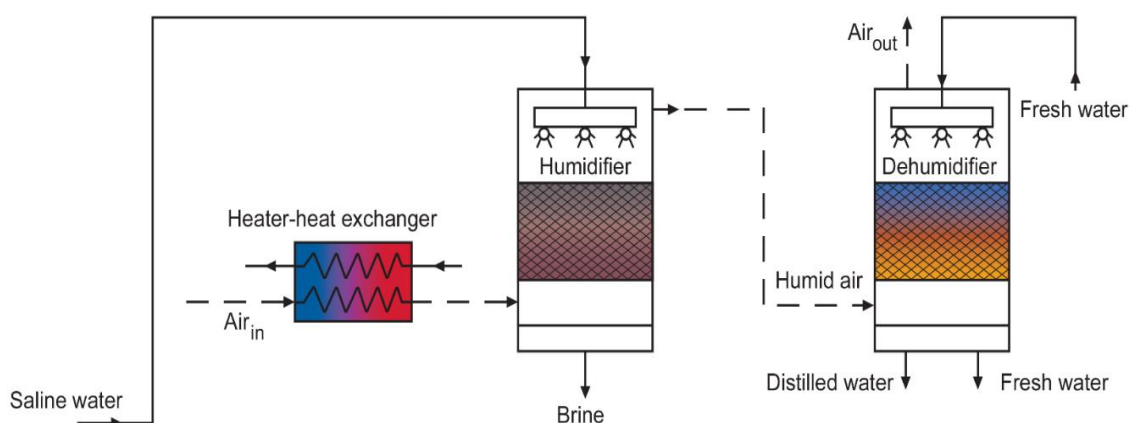
این روش مشابه سیستم قبلی می‌باشد با این تفاوت که آب شور و شیرین تغذیه هم مانند هوا در یک چرخه بسته در حال گردش می‌باشد. در این روش نیز بدلیل اینکه آب شور دورریز نداریم برای شیرین-سازی آب شور با غلظت بالا استفاده می‌شود (شکل ۱۵-۲).



شکل ۱۵-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا بسته-آب بسته [3]

۲-۳-۲ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب باز

در این روش هوای ورودی ابتدا گرم شده سپس با گذر از محفظه تبخیر و چگالنده در محیط دفع می‌شود. آب شور و شیرین ورودی نیز در محفظه تبخیر و چگالنده پس از تبادل جرم و حرارت با هوا از مجموعه آب شیرین‌کن خارج می‌شوند (شکل ۲-۱۶).

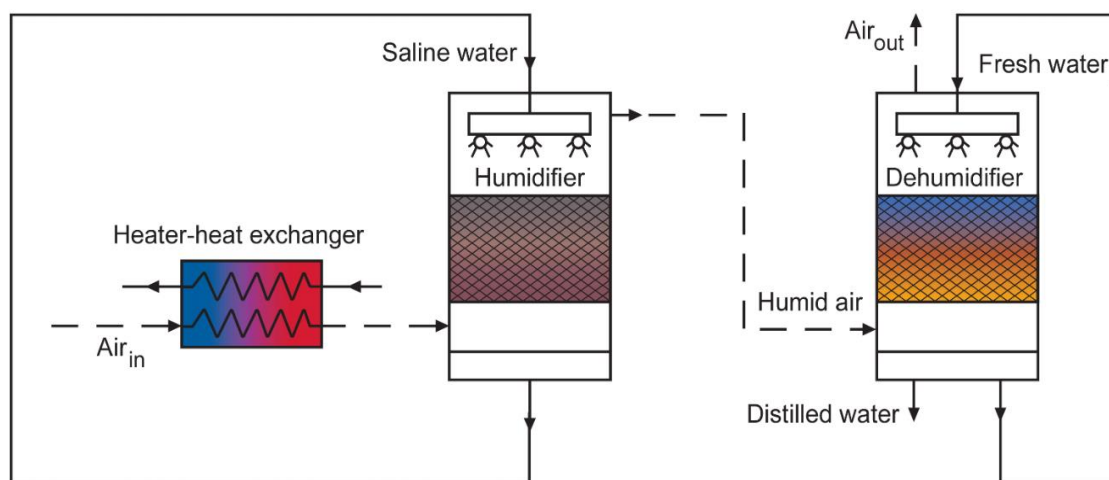


شکل ۱۶-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب باز [7]

۲-۳-۲-۴ سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب

بسته

این روش مشابه سیستم قبلی می‌باشد با این تفاوت که آب شور خروجی از محفظه تبخیر که درصد شوری بالاتری دارد و آب شیرین خروجی از محفظه چگالنده از سیستم خارج نمی‌شوند و در یک چرخه بسته در مدار در حال چرخش می‌باشند. این روش نیز برای نم‌زدایی غلظت بالا بکار برده می‌شود (شکل ۱۷-۲).



شکل ۱۷-۲ شماتیک سیستم HDH با گرمایش هوا، رطوبت‌زدای تماس مستقیم و چرخه هوا باز-آب بسته [3]

۴-۲ اهداف پژوهش و نوآوری

با توجه به شرایط کنونی و مشکلات مربوط به کمبود آب آشامیدنی تحقیق و بررسی در این زمینه ضرورت بالایی دارد. لذا هدف این پژوهش کمک به ارتقاء سطح علمی و ایجاد شرایط بهتر در بعد اجرایی تکنولوژی آب شیرین کن می باشد. در این تحقیق، نمک زدایی با استفاده از سیستم HDH با چرخش مجدد آب شور و شیرین بررسی شده است. روش چرخش مجدد، برای افزایش بازیابی آب است. چهار پیکربندی متفاوت HDH برای بررسی نمودن مقادیر نرخ خروجی بدست آمده، نرخ تولید آب شیرین و نرخ آب بازیابی شده طراحی و مدلسازی شده است. همچنین اثر تغییرات پارامترهای مختلف از جمله فشار، دما، رطوبت نسبی و دبی هوای ورودی و علاوه بر این دمای آب دریای ورودی، دبی آب شور تغذیه، دمای هوای خروجی محفظه تبخیر و چگالش بر روی عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل سوم: پیکربندیها و معادلات حاکم

۳-۱ مقدمه

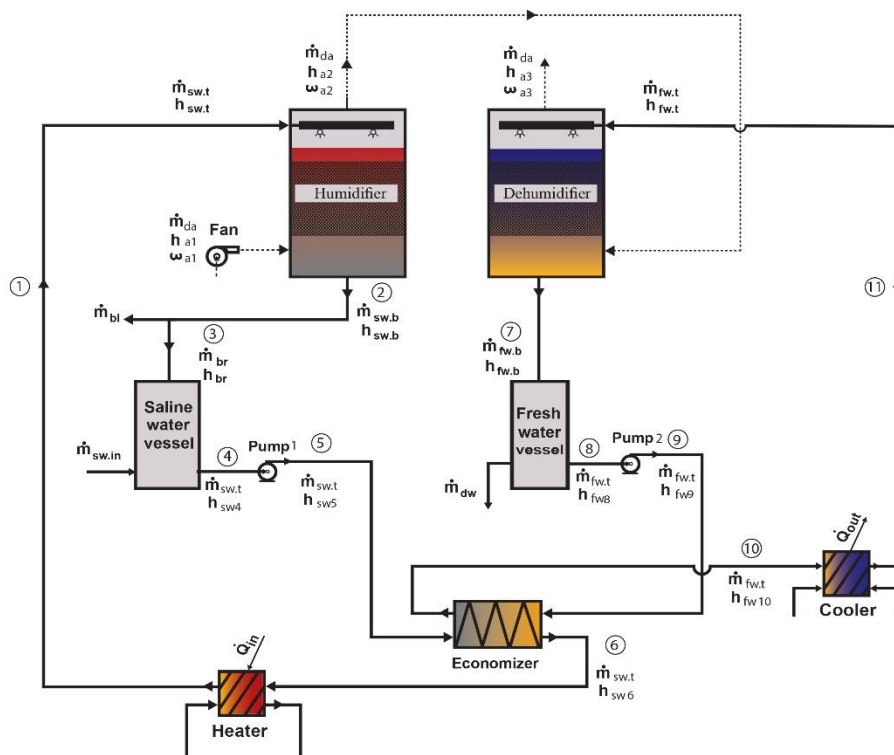
در این پژوهش چهار پیکربندی متفاوت سیستم نمک‌زدایی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی طراحی و شبیه-سازی شده است. در این فصل ابتدا پیکربندیهای طراحی شده را معرفی نموده و سپس معادلات و شرایط حاکم بر آنها شرح داده می‌شود.

۳-۲ پیکربندیها

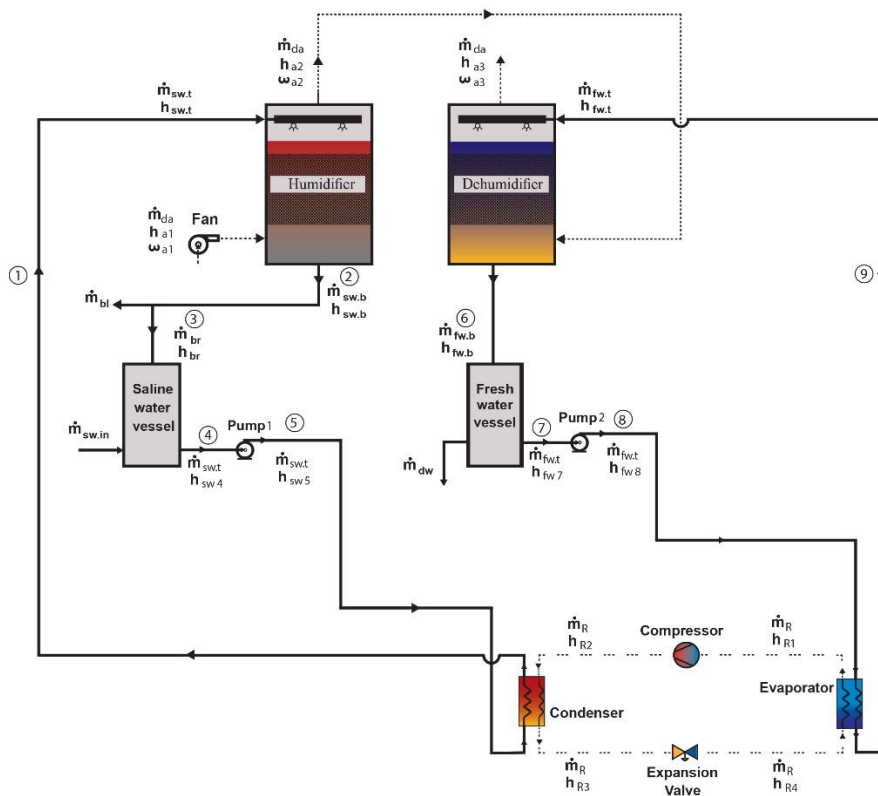
همانطور که قبلاً هم اشاره شده است، در این مطالعه چهار پیکربندی متفاوت HDH طراحی شده و در ادامه توضیحات مربوط به این پیکربندیها ارائه خواهد شد. در ابتدا توضیحات پیکربندی a داده می‌شود، با توجه به شکل ۱-۳ یک سیستم نمک‌زدایی رطوبت‌زنی-رطوبت‌زدایی با بازچرخش آب‌شور و شیرین مشاهده می‌شود. آب‌شور تغذیه در ابتدا از مخزن آب‌شور خارج شده و بوسیله پمپ به سمت محفظه تبخیر حرکت می‌کند اما قبل از آن باید به دمای مورد نیاز (۷۱ درجه سلسیوس) برسد که این امر بوسیله‌ی اکونومایزر و هیتر انجام می‌شود. در اکونومایزر، گرمای ناشی از تقطیر بخار داغ درون محفظه چگالنده تماس مستقیم به آب‌شور تغذیه انتقال داده می‌شود تا آب‌شور گرم‌تر شده و نیاز به صرف انرژی حرارتی کمتر شود. پس از پیش‌گرم شدن، آب‌شور تغذیه وارد هیتر شده و در اینجا به دمای مورد نیاز محفظه تبخیر می‌رسد. سپس آب‌شور تغذیه به سمت محفظه تبخیر می‌رود و بوسیله‌ی نازل‌هایی که در بالای آن تعبیه شده داخل آن پاشش می‌شود و با هوای ورودی از محیط به داخل محفظه تبادل جرم و حرارت می‌کند. فضای درون محفظه‌ی تبخیر بوسیله پکینگ‌ها پر شده است تا میزان تبادل جرم و حرارت بین آب‌شور داغ و هوای ورودی را افزایش دهد، سپس هوای ورودی از بالای محفظه تبخیر خارج شده و آب‌شور هم از پایین آن بیرون می‌آید و به سمت مخزن آب‌شور حرکت می‌کند. اما قبل از ورود به مخزن آب‌شور بدلیل اینکه مقداری از جرم آب خود را در تبادل جرم با هوا از دست داده است، شوری بالاتری دارد و چون این مطالعه بر مبنای میزان شوری ثابت ۱۰ و ۲۰٪ و یک دبی ثابت می‌باشد، باید مقداری از آب‌شور خروجی محفظه تبخیر از سیستم جدا شود (دورریز) و بجای آن مقداری آب‌دريا که

غلظت کمتری دارد (حدود ۳-۳/۵٪) به چرخه اضافه شود تا میزان غلظت و دبی آب‌شور تغذیه ثابت بماند. این چرخه برای آب‌شور، دائم در حال گردش می‌باشد. هوای گرم و مرطوب خروجی از محفظه تبخیر وارد محفظه‌ی چگالنده می‌شود و در اینجا با آب سردی که داخل محفظه پاشش می‌شود (بوسیله-ی نازل‌هایی که در بالای آن قرار دارد) تبادل جرم و حرارت نموده، تقطیر می‌شود و آب‌شیرین استحصال می‌گردد. داخل محفظه‌ی چگالنده هم مانند محفظه تبخیر بوسیله‌ی پکینگها پر شده است تا میزان سطح تبادل جرم و حرارت را نسبت به حجم افزایش دهد. هوای داغ و اشباع پس از اینکه دما و رطوبت خود را از دست داد، از بالای محفظه‌ی چگالنده خارج می‌شود و در محیط دفع می‌گردد. آب‌شیرین تولید شده و آب سردی که داخل محفظه چگالنده پاشش می‌شود از پایین آن خارج شده و به مخزن آب‌شیرین وارد می‌شود. آب‌شیرین تقطیر شده را بوسیله‌ی خروجی تعبیه شده در مخزن آب‌شیرین می‌توان برداشت نمود. اکنون آب پاشش شده در محفظه‌ی چگالنده از مخزن آب‌شیرین خارج می‌شود و بوسیله‌ی پمپ به سمت محفظه چگالنده هدایت می‌شود اما بدلیل اینکه گرمای هوای داغ و اشباع ورودی به محفظه‌ی چگالنده را گرفته است باید قبل از آن سرد شود تا کارایی لازم را داشته باشد. بدین منظور همانطور که قبلاً اشاره شد برای کاهش مصرف انرژی از اکونومایزر استفاده می‌شود. در اکونومایزر آب‌شیرین حرارت خود را به آب‌شور منتقل می‌کند تا هم در مصرف انرژی برای گرمایش آب‌شور صرفه‌جویی شده هم برای سرد کردن آب‌شیرین، مصرف انرژی کاهش یابد. آب تغذیه‌ی محفظه چگالنده پس از پیش سرد شدن وارد خنک کننده می‌شود. در اینجا آب تغذیه‌ی محفظه‌ی چگالنده پس از تبادل حرارت به دمای مورد نیاز خود می‌رسد (حدود ۱۰ درجه سلسیوس). سرمای مورد نیاز خنک کننده، بوسیله‌ی چیلر تامین می‌شود. سپس آب تغذیه‌ی سرد شده به محفظه چگالنده وارد شده و این چرخه برای آب‌شیرین ادامه می‌یابد. بعد از شرح پیکربندی a اکنون به سراغ پیکربندی b می‌رویم و آن را معرفی می‌نماییم. با توجه به شکل ۳-۲ واضح است که پیکربندی b شباهت زیادی به پیکربندی a دارد با این تفاوت که پیکربندی b اکونومایزر ندارد و همچنین منبع تامین گرمای مورد نیاز برای رساندن دمای آب‌شور تغذیه به حد ورودی محفظه تبخیر، بجای هیتر برقی پمپ حرارتی می‌باشد. یعنی در

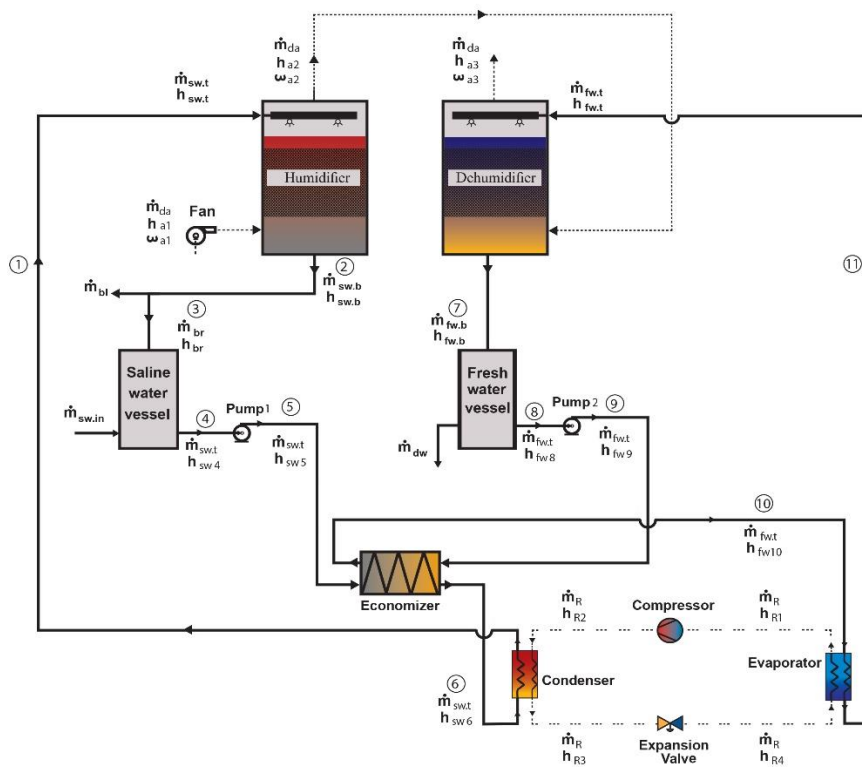
پیکربندی b یک سیستم ترکیبی HDH با پمپ حرارتی داریم، بدین ترتیب که کندانسور پمپ حرارتی وظیفه‌ی افزایش دمای آب‌شور تغذیه را تا حد مورد نیاز داشته و اواپراتور پمپ حرارتی باعث کاهش دمای آب‌شیرین تغذیه تا حد مورد نیاز محفظه‌ی چگالنده می‌شود. با توجه به شکل ۳-۳ مشخص است که پیکربندی c دقیقاً مشابه پیکربندی b می‌باشد با این تفاوت که در پیکربندی c اکونومایزر به سیستم اضافه می‌شود. در انتها با توجه به شکل ۴-۳ مشهود است که پیکربندی d مشابه پیکربندی c می‌باشد با این تفاوت که در این پیکربندی آب‌شور دورریز خروجی از محفظه تبخیر و هوای خروجی از محفظه‌ی چگالنده هر دو وارد کندانسور پمپ حرارتی می‌شوند. در اینجا هر دو گرم شده و باهم تبادل جرم و حرارت می‌کنند. هوای خروجی از کندانسور گرم و مرطوب شده و به سمت اواپراتور پمپ حرارتی حرکت می‌کند. همچنین آب شور دورریز که مقداری از جرم آب خود را در تبادل جرم با هوا از دست داده است غلیظ‌تر از قبل شده و از سیستم دفع می‌شود. نکته مهم در این پیکربندی این است که مقدار آب‌شور دفع شده از سیستم بسیار کم می‌باشد. هوای خروجی از کندانسور که گرم و مرطوب شده، پس از وارد شدن به اواپراتور و برخورد با تیوبهای سرد آن شروع به تقطیر شدن می‌کند، تا انتها که موقع خارج شدن از اواپراتور پمپ حرارتی بخش قابل ملاحظه‌ای از رطوبت خود را از دست می‌دهد و آب شیرین استحصال می‌گردد. در واقع در پیکربندی d هم میزان آب‌شیرین تولید شده بیشتر می‌باشد هم آب‌شور دفع شده از سیستم کمتر خواهد بود.



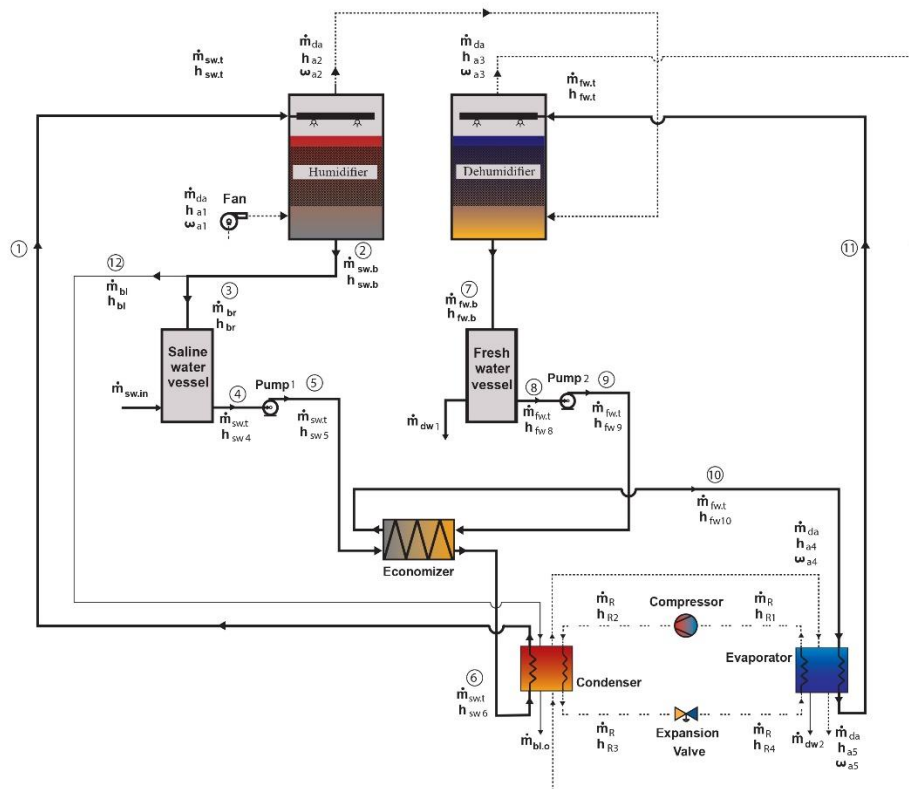
شکل ۳-۱ پیکربندی a



شکل ۳-۲ پیکربندی b



شکل ۳-۳ پیکربندی c



شکل ۳-۴ پیکربندی d

۳-۳ معادلات و شرایط حاکم

در ابتدا معادلات بقای جرم و انرژی را برای بخشهایی که در هر چهار پیکربندی شکل ثابت و یکسانی دارند نوشته می‌شود، سپس برای بخشهایی که فرم معادلات آنها تغییر می‌کند توضیحات مربوطه ارائه خواهد شد.

۳-۳-۱ معادلات بقای جرم و انرژی محفظه تبخیر

در این قسمت با ثابت گرفتن دما و دبی هوای ورودی و خروجی همچنین ثابت گرفتن رطوبت نسبی ورودی و خروجی، دما و دبی آب شور تغذیه، میزان دبی و دمای آب شور خروجی بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{sw,t} - \dot{m}_{sw,b} = \dot{m}_{da} \times (\omega_{a2} - \omega_{a1}) \quad (۱-۳)$$

$$\dot{m}_{sw,t} \times h_{sw,t} - \dot{m}_{sw,b} \times h_{sw,b} = \dot{m}_{da} \times (h_{a2} - h_{a1}) \quad (۲-۳)$$

۳-۳-۲ معادلات بقای جرم و انرژی محفظه چگالنده

در این قسمت با ثابت گرفتن دما و دبی هوای ورودی و خروجی همچنین ثابت گرفتن رطوبت نسبی ورودی و خروجی، دما و دبی آب خالص، میزان دبی و دمای آب شیرین خروجی بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{fw,t} - \dot{m}_{fw,b} = \dot{m}_{da} \times (\omega_{a3} - \omega_{a2}) \quad (۳-۳)$$

$$\dot{m}_{fw,t} \times h_{fw,t} - \dot{m}_{fw,b} \times h_{fw,b} = \dot{m}_{da} \times (h_{a3} - h_{a2}) \quad (۴-۳)$$

۳-۳-۳ معادلات بقای جرم و انرژی مخزن آب شور

در این قسمت با ثابت گرفتن دما و دبی آب شور تغذیه و ثابت گرفتن دمای آب دریا ورودی، میزان دبی آب دریا ورودی و دمای خروجی مخزن آب شور بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{br} + \dot{m}_{sw,in} = \dot{m}_{sw,t} \quad (۵-۳)$$

$$\dot{m}_{sw,t} \times h_{sw4} = \dot{m}_{br} \times h_{br} + \dot{m}_{sw,in} \times h_{sw,in} \quad (۶-۳)$$

۳-۳-۴ معادله‌ی کار پمپ ۱

در این قسمت با ثابت گرفتن دبی آب شور تغذیه و میزان فشار مورد نیاز، کار پمپ ۱ بدست می‌آید.

$$W_{p1} = \dot{m}_{sw,t} \times (h_{sw5} - h_{sw4}) \quad (۷-۳)$$

۵-۳-۳ معادله‌ی بقای انرژی اکونومایزر

در این قسمت با ثابت گرفتن دما و دبی آب خالص ورودی و خروجی همچنین با ثابت گرفتن دما و دبی آب شور تغذیه ورودی، میزان دمای خروجی آب شور تغذیه بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{fw,t} \times (h_{fw9} - h_{fw10}) = \dot{m}_{sw,t} \times (h_{sw6} - h_{sw5}) \quad (۸-۳)$$

۶-۳-۳ معادله‌ی بقای جرم مخزن آب شیرین

در این قسمت با استفاده از مقادیر دبی آب خالص ورودی و خروجی، میزان آب شیرین استحصال شده بدست می‌آید.

$$\dot{m}_{fw,b} = \dot{m}_{fw,t} + \dot{m}_{dw} \quad (۹-۳)$$

۷-۳-۳ معادله‌ی کار پمپ ۲

در این قسمت با ثابت گرفتن دبی آب خالص و میزان فشار مورد نیاز، کار پمپ ۲ بدست می‌آید.

$$W_{p2} = \dot{m}_{fw,t} \times (h_{fw9} - h_{fw8}) \quad (۱۰-۳)$$

۸-۳-۳ دیگر معادلات پیکربندی a

در این بخش ابتدا معادله‌ی مربوط به نرخ حرارت داده شده و گرفته شده از سیستم بیان شده و سپس به ترتیب معادلات مربوط به نسبت خروجی بدست آمده، نسبت بازیابی کلی و نسبت بازیابی محلی گفته می‌شود.

$$Q_{in} = \dot{m}_{sw,t} \times (h_{sw,t} - h_{sw6}) \quad (۱۱-۳)$$

$$Q_{out} = \dot{m}_{fw,t} \times (h_{fw10} - h_{fw,t}) \quad (۱۲-۳)$$

$$GOR = \frac{\dot{m}_{dw} \times h_{fg}}{Q_{in}} \quad (۱۳-۳)$$

$$RR_{overall} = (\dot{m}_{dw} / \dot{m}_{sw,in}) \times 100 \quad (۱۴-۳)$$

$$RR_{local} = (\dot{m}_{dw} / \dot{m}_{sw}) \times 100 \quad (۱۵-۳)$$

۹-۳-۳ دیگر معادلات پیکربندی b

نکته‌ی قابل ذکر در اینجا این است که معادله‌ی کار پمپ ۲ در پیکربندی b، نسبت به بقیه‌ی پیکربندیها متفاوت است و در ادامه ابتدا این معادله نوشته شده و سپس به ترتیب معادلات مربوط به بقای انرژی کندانسور و اواپراتور، کار کمپرسور، ضریب عملکرد پمپ حرارتی و نسبت خروجی بدست آمده گفته

خواهد شد. همچنین بدلیل مشابه بودن معادلات مربوط به RR_{local} و $RR_{overall}$ بقیه‌ی پیکربندیها با پیکربندی a در ادامه از آوردن آنها خودداری می‌شود.

$$W_{p2} = \dot{m}_{fw,t} \times (h_{fw8} - h_{fw7}) \quad (۱۶-۳)$$

$$Q_{con} = \dot{m}_{sw,t} \times (h_{sw,t} - h_{sw5}) = \dot{m}_R \times (h_{R2} - h_{R3}) \quad (۱۷-۳)$$

$$Q_{eva} = \dot{m}_{fw,t} \times (h_{fw8} - h_{fw,t}) = \dot{m}_R \times (h_{R4} - h_{R1}) \quad (۱۸-۳)$$

$$W_{com} = \frac{\dot{m}_R \times (h_{R2} - h_{R1})}{\eta} = \frac{Q_{con} - Q_{eva}}{\eta} \quad (۱۹-۳)$$

$$COP_h = Q_{con} / W_{com} \quad (۲۰-۳)$$

$$GOR = \frac{\dot{m}_{dw} \times h_{fg}}{W_{com} + W_{p1} + W_{p2}} \quad (۲۱-۳)$$

۱۰-۳-۳ دیگر معادلات پیکربندی c

در این قسمت به ترتیب معادلات مربوط به بقای انرژی کندانسور و اواپراتور نوشته می‌شود. همچنین به دلیل مشابه بودن معادلات W_{com} ، COP_h و GOR پیکربندی c و d با پیکربندی b در ادامه از ذکر آنها خودداری می‌شود.

$$Q_{con} = \dot{m}_{sw,t} \times (h_{sw,t} - h_{sw6}) = \dot{m}_R \times (h_{R2} - h_{R3}) \quad (۲۲-۳)$$

$$Q_{eva} = \dot{m}_{fw,t} \times (h_{fw10} - h_{fw,t}) = \dot{m}_R \times (h_{R4} - h_{R1}) \quad (۲۳-۳)$$

۱۱-۳-۳ دیگر معادلات پیکربندی d

در پیکربندی d معادله‌ی بقای جرم مخزن آب‌شیرین با بقیه پیکربندیها متفاوت است که ابتدا آن را بیان کرده، سپس به ترتیب معادلات مربوط به بقای جرم و انرژی کندانسور، اواپراتور و همچنین آب-شیرین استحصال شده نوشته می‌شود. گرفتن دما، دبی و رطوبت نسبی هوا در ورودی و خروجی، میزان دبی و دمای آب شیرین بدست آمده از اواپراتور را بدست می‌آوریم.

$$\dot{m}_{fw,b} = \dot{m}_{fw,t} + \dot{m}_{dw1} \quad (۲۴-۳)$$

$$\dot{m}_{da} \times (\omega_{a4} - \omega_{a3}) = \dot{m}_{bl} - \dot{m}_{bl,o} \quad (۲۵-۳)$$

$$Q_{\text{con}} = \dot{m}_{\text{sw.t}} \times (h_{\text{sw.t}} - h_{\text{sw6}}) + \dot{m}_{\text{a}} \times (h_{\text{a4}} - h_{\text{a3}}) + (\dot{m}_{\text{bl.o}} \times h_{\text{bl.o}} - \dot{m}_{\text{bl}} \times h_{\text{bl}}) = \dot{m}_{\text{R}} \times (h_{\text{R2}} - h_{\text{R3}}) \quad (26-3)$$

$$\dot{m}_{\text{da}} \times (\omega_{\text{a4}} - \omega_{\text{a5}}) = \dot{m}_{\text{dw2}} \quad (26-3)$$

$$Q_{\text{eva}} = \dot{m}_{\text{fw.t}} \times (h_{\text{fw10}} - h_{\text{fw.t}}) + \dot{m}_{\text{a}} \times (h_{\text{a4}} - h_{\text{a5}}) - \dot{m}_{\text{dw2}} \times h_{\text{dw2}} = \dot{m}_{\text{R}} \times (h_{\text{R4}} - h_{\text{R1}}) \quad (27-3)$$

$$\dot{m}_{\text{dw}} = \dot{m}_{\text{dw1}} + \dot{m}_{\text{dw2}} \quad (28-3)$$

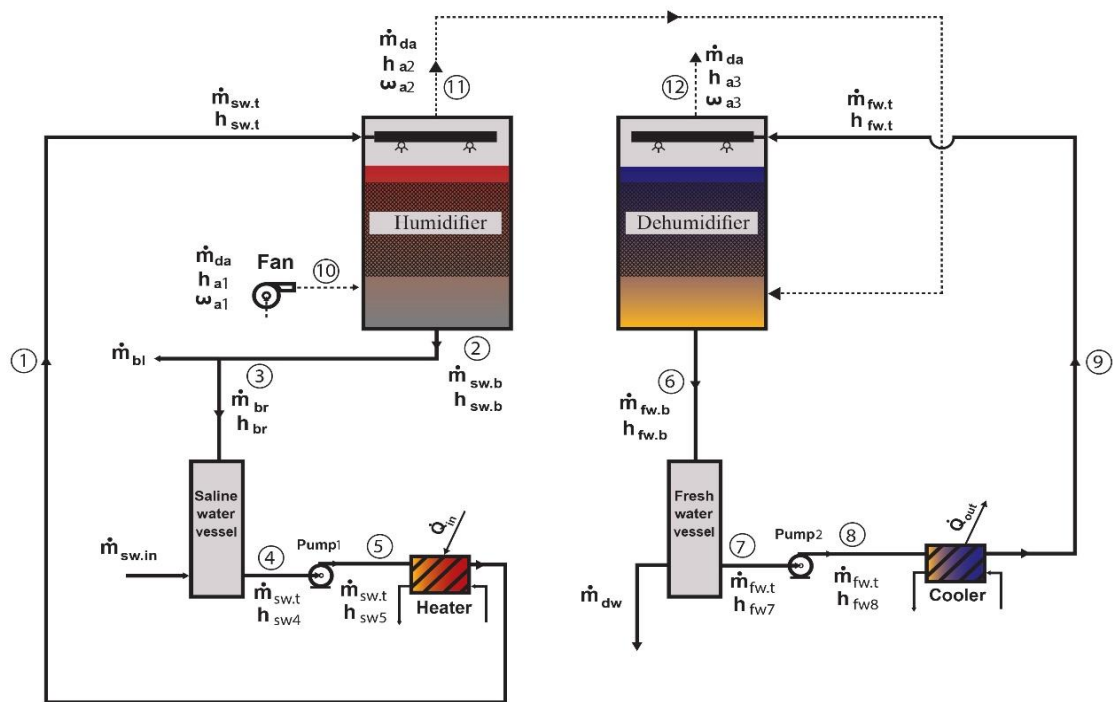
فصل چهارم: معتبرسازی برای شییه سازی انجام شده

۴-۱ مقدمه

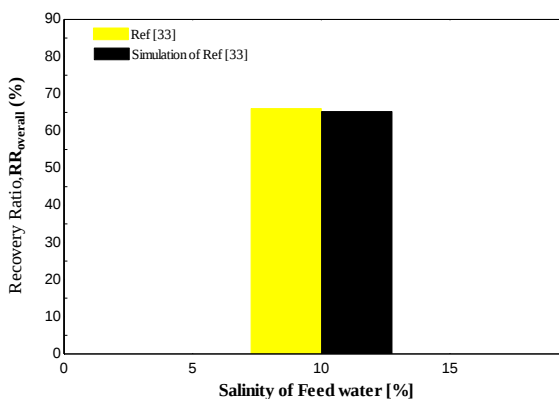
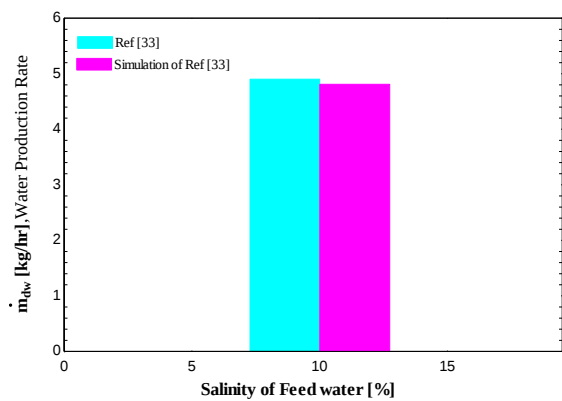
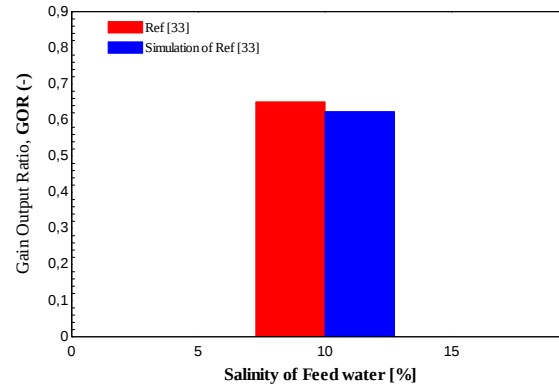
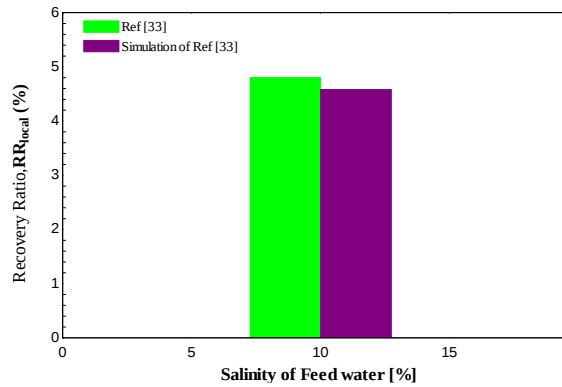
در این فصل نحوه‌ی اعتبارسازی برای پژوهش انجام شده شرح داده می‌شود. یک سیستم HDH که در مرجع [33] به‌صورت آزمایشگاهی بررسی شده، در اینجا بوسیله‌ی نرم‌افزار EES شبیه‌سازی شده است. سپس برای بهبود مطالعه‌ی انجام شده در مرجع [33] چهار پیکربندی جدید برای این سیستم طراحی گردیده است. پس از طراحی پیکربندیها برای هر چهار حالت، شبیه‌سازی انجام شده است که نتایج حاصل از آن در فصل بعد ارائه می‌گردد.

۴-۲ اعتبارسازی

سیستم HDH مورد مطالعه در مرجع [33] (شکل ۴-۱) با سه غلظت متفاوت ۱۰، ۲۰ و ۳۰٪ شوری آب تغذیه بررسی شده است. در اینجا اعتبارسازی برای آب تغذیه با شوری ۱۰٪ انجام شده (شکل ۴-۲)، به این دلیل که پارامترهای عملکرد در بررسی تجربی سیستم HDH مرجع [33] برای شوری‌های مختلف دارای تغییرات می‌باشد و چون در این مطالعه چهار پیکربندی متفاوت با شوری ۱۰ و ۲۰٪ آب تغذیه مورد بررسی قرار می‌گیرد (نرم افزار EES آب نمک را تا ۲۳٪ شوری می‌تواند تجزیه و تحلیل نماید) باید شرایط عملکرد در هر دو غلظت آب نمک یکسان باشد تا نتیجه گیری خوبی حاصل گردد. با توجه به شکل ۴-۲ نتایج حاصل از شبیه‌سازی، تطابق خوبی با نتایج تجربی مرجع [33] نشان می‌دهد. میزان درصد خطای نسبی شبیه‌سازی نسبت به نتایج تجربی مرجع [33] برای نسبت خروجی بدست آمده، نسبت بازیابی محلی، نسبت بازیابی کلی و آب شیرین تقطیر شده به ترتیب برابر ۴/۵۸، ۴/۱۳، ۱/۱۹ و ۱/۸۳ درصد می‌باشد. در جدول ۴-۱ مقادیر پارامترهای عملکرد سیستم شبیه‌سازی شده‌ی مرجع [33] در نقاط مختلف پیکربندی با توجه به شکل ۴-۱ داده شده است.



شکل ۴-۱ پیکربندی سیستم HDH مرجع [33]



شکل ۴-۲ اعتبار سازی بوسیله شبیه سازی

نقاط	فشار (کیلو پاسکال)	دما (سانتیگراد)	رطوبت نسبی (-)	دبی جرمی (کیلوگرم بر ساعت)
1	300	71	-	105
2	101	28	-	100
3	101	28	-	98
4	101	27/5	-	105
5	300	27/5	-	105
6	101	47	-	110
7	101	47	-	105
8	300	47	-	105
9	300	10	-	105
10	260	15	0/2	105
11	260	59	1	105
12	260	14	1	105

جدول ۴-۱ مقادیر پارامترهای عملکرد سیستم شبیه‌سازی شده‌ی مرجع [33] در نقاط مختلف با توجه به شکل ۴-۱

فصل پنجم: تحلیل و نتیجه گیری

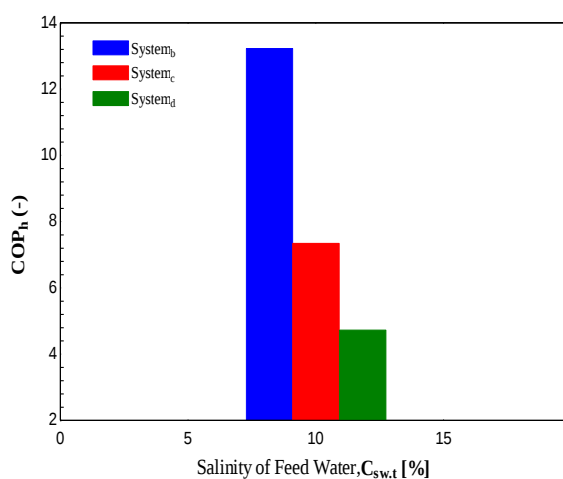
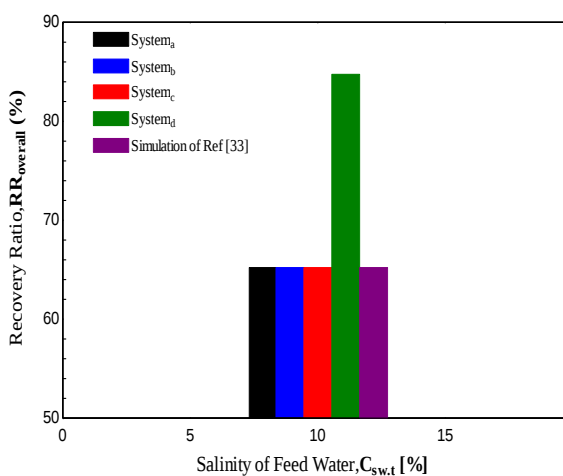
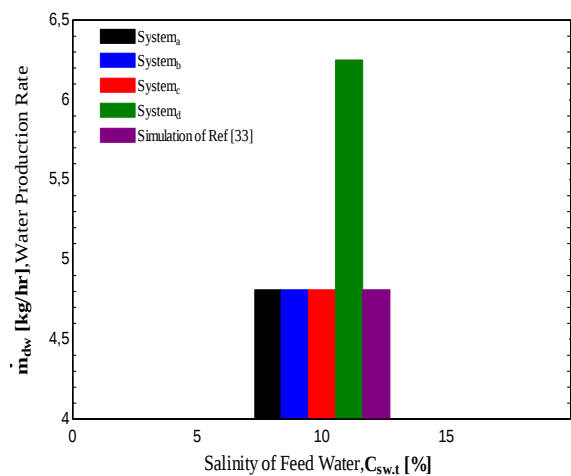
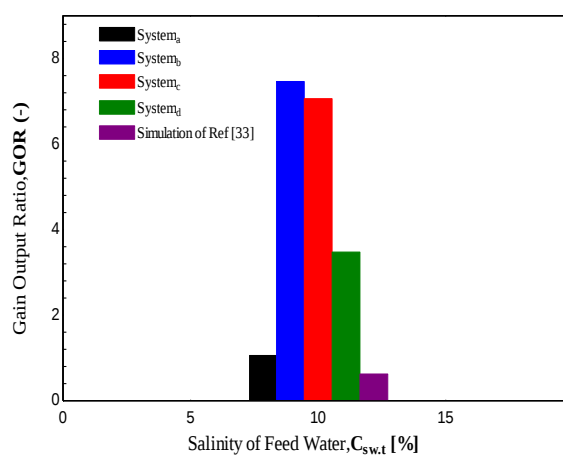
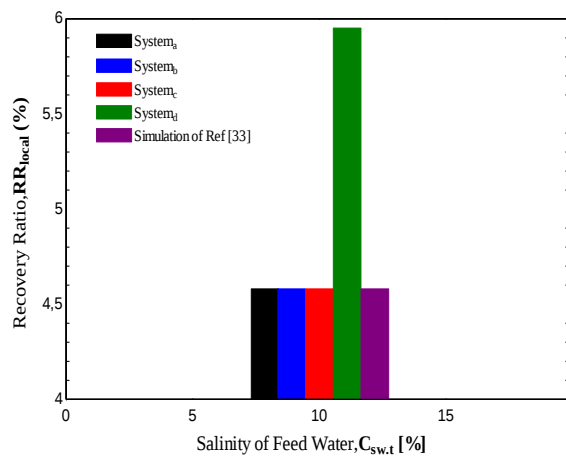
۵-۱ مقدمه

در این قسمت از تحقیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی چهار پیکربندی طراحی شده برای بهبود عملکرد سیستم HDH مرجع [33] بررسی شده و در انتها یک نتیجه گیری کلی گرفته می‌شود. برای این منظور ابتدا، میزان بهبود عملکرد چهار پیکربندی جدید طراحی شده نسبت به پیکربندی مرجع [33] بررسی می‌شود. سپس با تغییر پارامترهای عملکرد سیستم، میزان اثربخشی آنها بررسی می‌گردد تا بتوان متغیر با تأثیر بیشتر را شناسایی کرده و به حالت بهینه برای هر پیکربندی رسید. در انتها پیکربندی که بازدهی بالاتری داشته باشد انتخاب می‌گردد.

۵-۲ بهبود عملکرد پیکربندیهای طراحی شده

با توجه به شکل ۵-۱ نسبت خروجی بدست آمده در هر چهار پیکربندی، بیشتر از پیکربندی شبیه‌سازی شده‌ی مرجع [33] می‌باشد. مقدار GOR در پیکربندیهای a, b, c و d به ترتیب ۱/۰۵۶، ۷/۴۵۹، ۷/۰۵۸ و ۳/۴۷۴ بوده و همچنین در پیکربندی شبیه سازی شده‌ی مرجع [33] برابر ۰/۶۲۳۱ می‌باشد که بهبود بسیار چشمگیری را نشان می‌دهد. اما میزان نسبت بازیابی محلی، نسبت بازیابی کلی و آب شیرین تقطیر شده فقط در پیکربندی d تغییر کرده و در بقیه‌ی پیکربندیها ثابت می‌باشد. به این دلیل که در باقی پیکربندیهای طراحی شده بهبود عملکرد سیستم فقط در انرژی مصرفی اثرگذار بوده ولی در پیکربندی d بدلیل استفاده مجدد از آب شور دورریز و تبدیل آن به آب شیرین، مقادیر RR_{local} ، $\dot{m}_{dw}$ ، $RR_{overall}$ نیز افزایش پیدا می‌کند. مقدار RR_{local} برای پیکربندیهای a, b, c و شبیه سازی شده‌ی مرجع [33] برابر ۴/۵۸٪ بوده و مقادیر $RR_{overall}$ و $\dot{m}_{dw}$ برای این پیکربندیها به ترتیب برابر ۶۵/۲۱٪ و ۴/۸۱ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد. در پیکربندی d نیز مقادیر یاد شده در بالا به ترتیب برابر ۵۱/۹۵٪، ۸۴/۷۴٪ و ۶/۲۵ کیلوگرم بر ساعت می‌باشد که این بیانگر بهبود و ارتقای عملکرد پیکربندی d در تمام پارامترهای مورد بررسی این مطالعه می‌باشد. نکته‌ی مهم و قابل ذکر دیگر این است که در پیکربندیهای b, c و d بدلیل استفاده از پمپ حرارتی باید ضریب عملکرد آنها نیز بررسی شود. با یک

نگاه ساده به شکل ۵-۱ می‌توان دریافت که ضریب عملکرد پیکربندی d از دو پیکربندی دیگر کمتر بوده و پیکربندی b بیشترین ضریب عملکرد را دارا می‌باشد. تنها تفاوت دو پیکربندی b و c همانطور که در فصل سوم به طور مبسوط شرح داده شد، در اکونومایزر است که، در واقع پیکربندی c همان پیکربندی b می‌باشد که به آن اکونومایزر اضافه شده است. این مقدار زیاد کاهش ضریب عملکرد در پیکربندی c نسبت به پیکربندی b اثر اکونومایزر اضافه شده به سیستم را نشان می‌دهد. مقدار ضریب عملکرد پمپ حرارتی در پیکربندیهای b، c و d به ترتیب برابر ۱۳/۲۲، ۷/۳۴۲ و ۴/۷۲۶ می‌باشد. موضوع با اهمیتی که در اینجا باید به آن پرداخته شود این است که ضریب عملکرد در سیستمهای ترکیبی HDH و پمپ حرارتی باید در یک محدوده‌ای باشد که از لحاظ فنی و اجرایی قابل نصب و راه اندازی باشد. ضریب عملکرد پمپ حرارتی اگر کمتر باشد هزینه عملیاتی آن پایین آمده و قابلیت اجرایی آن بیشتر می‌شود. با توجه به تکنولوژی موجود عملاً قابلیت ساخت سیستمهایی که ضریب عملکرد بالای ۶ دارند بسیار کم می‌باشد و این مقدار اگر پایین بیاید امکان ساخت آن بیشتر شده و هزینه نصب و راه اندازی کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵-۱ بهبود عملکرد پیکربندیهای طراحی شده

۳-۵ تغییر پارامترهای عملکرد سیستم

حال تعدادی از پارامترهای عملکرد سیستم در پیکربندیها را تغییر داده تا نحوه‌ی اثر بخشی آنها مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. برای این منظور اثر تغییرات پارامترهای فشار، دما، رطوبت و دبی هوای ورودی همچنین دمای آب دریای ورودی، دبی آب شور تغذیه، دمای هوای خروجی محفظه تبخیر و دمای هوای خروجی محفظه‌ی چگالنده بررسی شده است که در ادامه بطور کامل به این موارد پرداخته می‌شود. در هنگام بررسی اثر تغییر هر کدام از پارامترها، باقی موارد طبق جدول ۴-۱ ثابت می‌باشد.

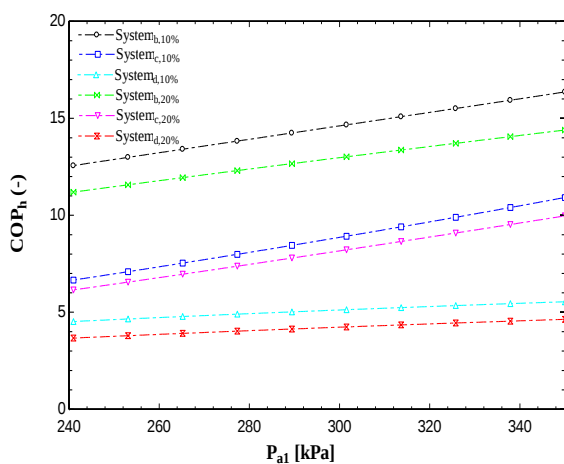
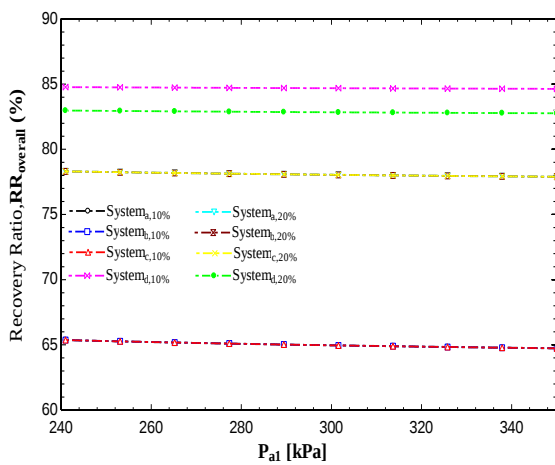
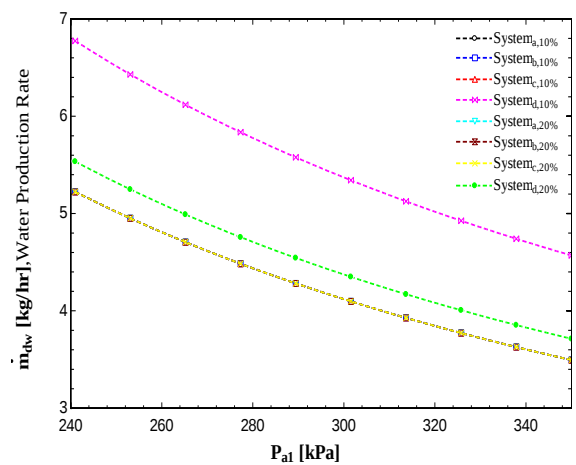
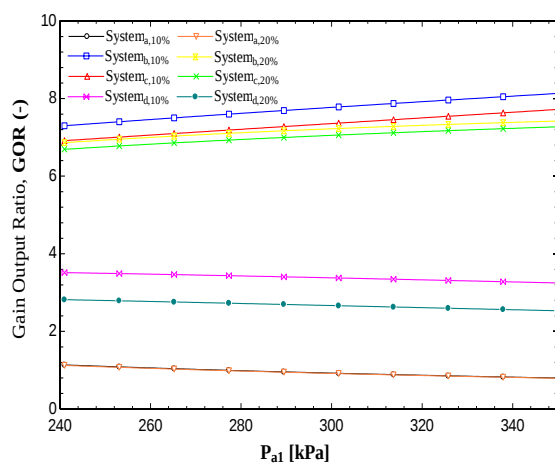
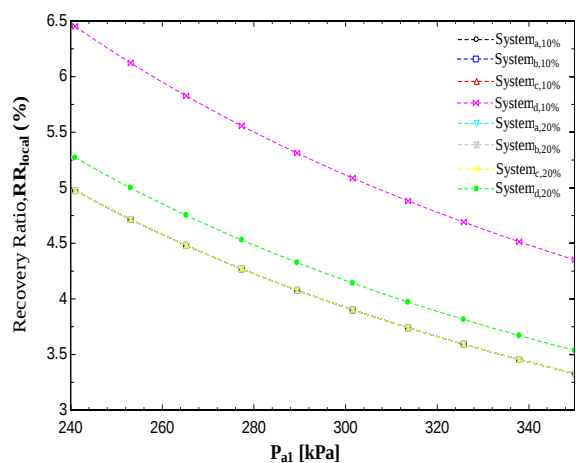
۱-۳-۵ اثر تغییرات فشار هوای ورودی

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دبی، دما و رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی، همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دبی و دمای آب شور تغذیه در رطوبت‌زن، اثر تغییرات فشار هوای ورودی در پیکربندیها بررسی می‌شود. افزایش فشار هوای ورودی باعث می‌شود که کار کمپرسور در پیکربندیهای b، c و d همچنین نرخ گرمای ورودی به سیستم در پیکربندی a کاهش پیدا کند و از طرف دیگر با توجه به جدول ۵-۱ و شکل ۵-۲ میزان آب‌شیرین بدست آمده در هر چهار حالت با افزایش فشار کاهش می‌یابد. پیکربندیهای a، b و c در هر دو شوری ۱۰ و ۲۰٪، مقدار آب تقطیر شده‌ی یکسانی دارند و به همین دلیل خطوط مربوط به این پیکربندیها در نمودار روی هم افتادگی پیدا کرده است. اما در پیکربندی d با افزایش شوری، میزان آب خالص تولید شده کاهش می‌یابد. با توجه به معادلات گفته شده در فصل سوم برای نسبت خروجی بدست آمده، میزان کاهش موارد ذکر شده (کار کمپرسور، نرخ گرمای ورودی و آب شیرین استحصال شده) در هر کدام از پیکربندیها بطوری است که در نهایت منجر به افزایش GOR پیکربندیهای b و c شده همچنین باعث کاهش GOR پیکربندیهای a و d می‌شود. با افزایش شوری آب تغذیه نیز از ۱۰ به ۲۰٪ مقدار GOR همه‌ی حالتها بدلیل کاهش ظرفیت گرمایی آب شور پایین می‌آید. میزان نسبت بازیابی محلی در هر چهار پیکربندی با افزایش فشار، بدلیل پایین آمدن میزان آب تقطیر شده کاهش می‌یابد که در نمودار مربوطه‌ی شکل ۵-۲ منحنی

پیکربندیهای a، b و c در دو حالت شوری ۱۰ و ۲۰٪ آب تغذیه بدلیل برابر بودن میزان آب شیرین استحصال شده‌ی آنها روی هم افتادگی دارند. اما در پیکربندی d با افزایش شوری آب تغذیه از ۱۰ به ۲۰٪ بدلیل کاهش آب شور دورریزی که در سیستم بطور مجدد استفاده می‌شود، مقدار آب تقطیر شده‌ی آن کاهش یافته در نتیجه باعث کم شدن نسبت بازیابی محلی می‌شود. نسبت بازیابی کلی نیز با افزایش فشار در هر چهار حالت کاهش یافته ولی شدت کاهش آن در مقابل نسبت بازیابی محلی خیلی کمتر می‌باشد. در نمودار مربوطه، منحنی پیکربندیهای a، b و c با شوری ۱۰ و ۲۰٪ آب تغذیه هم‌پوشانی دارند با این تفاوت که در شوری ۲۰٪ به دلیل کاهش مقدار آب دریای ورودی و با ثابت ماندن میزان آب شیرین استحصال شده، $RR_{overall}$ این سه پیکربندی افزایش پیدا می‌کند. اما در پیکربندی d با افزایش شوری بدلیل کاهش میزان آب تقطیر شده و همچنین غلبه‌ی اثر کاهش آب شیرین بدست آمده بر کاهش آب دریای ورودی، مقدار $RR_{overall}$ کاهش می‌یابد. ضریب عملکرد پیکربندی‌های b، c و d با افزایش فشار هوای ورودی افزایش یافته و همچنین با افزایش شوری آب تغذیه، میزان COP_h سیستم کاهش پیدا می‌کند.

عنوان		فشار هوای ورودی ۲۴۱ (kPa)		فشار هوای ورودی ۳۵۰ (kPa)	
		شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪	شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪
GOR (-)	پیکربندی a	۱/۱۳۴	۱/۱۲۲	۰/۷۹۶۱	۰/۷۹۰۵
	پیکربندی b	۷/۲۹۹	۶/۸۶۳	۸/۱۳۲	۷/۴۲۱
	پیکربندی c	۶/۹۱۴	۶/۶۹۱	۷/۷۲	۷/۲۷۱
	پیکربندی d	۳/۵۱۳	۲/۸۱۶	۳/۲۴۷	۲/۵۳
RR ₁ (%)	پیکربندی a	۴/۹۷۴	۴/۹۷۴	۳/۳۲۸	۳/۳۲۸
	پیکربندی b	۴/۹۷۴	۴/۹۷۴	۳/۳۲۸	۳/۳۲۸
	پیکربندی c	۴/۹۷۴	۴/۹۷۴	۳/۳۲۸	۳/۳۲۸
	پیکربندی d	۶/۴۵۱	۵/۲۷۱	۴/۳۵۱	۳/۵۳۶
RR _o (%)	پیکربندی a	۶۵/۳۷	۶۵/۳۷	۶۴/۷۳	۶۴/۷۳
	پیکربندی b	۶۵/۳۷	۶۵/۳۷	۶۴/۷۳	۶۴/۷۳
	پیکربندی c	۶۵/۳۷	۶۵/۳۷	۶۴/۷۳	۶۴/۷۳
	پیکربندی d	۸۴/۷۷	۸۲/۹۷	۸۴/۶۴	۸۲/۷۶
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۵/۲۲۳	۵/۲۲۳	۳/۴۹۵	۳/۴۹۵
	پیکربندی b	۵/۲۲۳	۵/۲۲۳	۳/۴۹۵	۳/۴۹۵
	پیکربندی c	۵/۲۲۳	۵/۲۲۳	۳/۴۹۵	۳/۴۹۵
	پیکربندی d	۶/۷۷۴	۵/۵۳۴	۴/۵۶۹	۳/۷۱۳
COP _h (-)	پیکربندی b	۱۲/۵۶	۱۱/۱۹	۱۶/۳۶	۱۴/۳۹
	پیکربندی c	۶/۶۶	۶/۱۵۱	۱۰/۹۲	۹/۹۶۹
	پیکربندی d	۴/۵۲۱	۳/۶۶۸	۵/۵۴۱	۴/۶۳۵

جدول ۵-۱ اثر تغییرات فشار هوای ورودی



شکل ۵-۲ اثر تغییرات فشار هوای ورودی

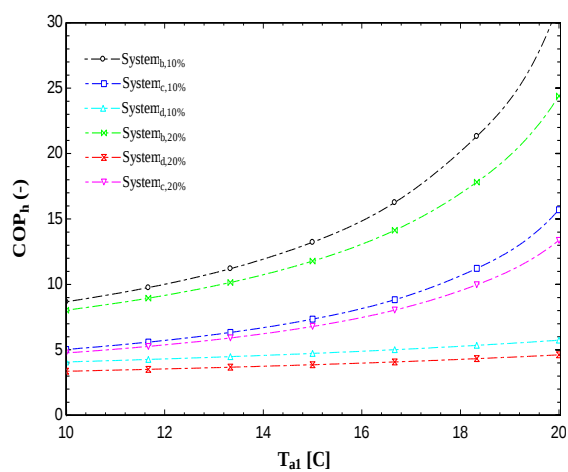
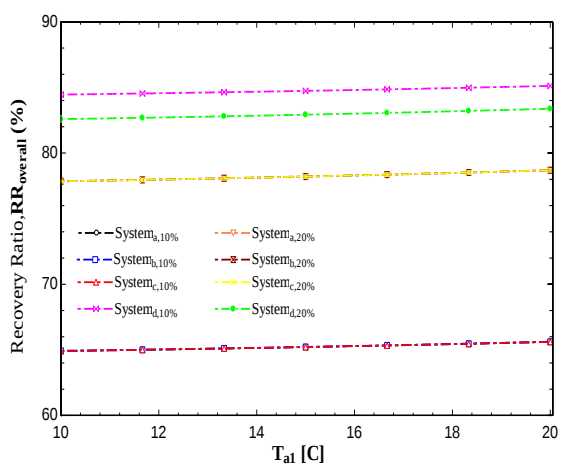
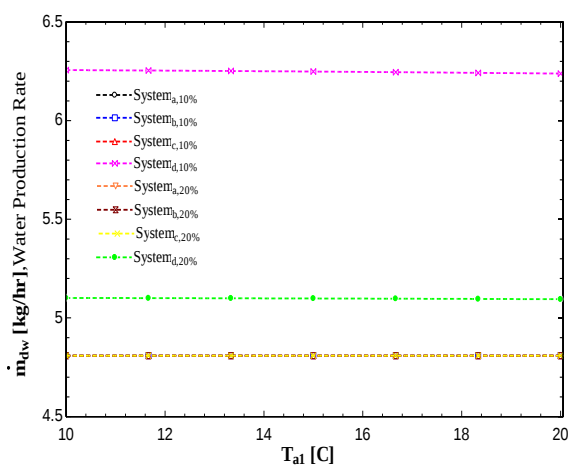
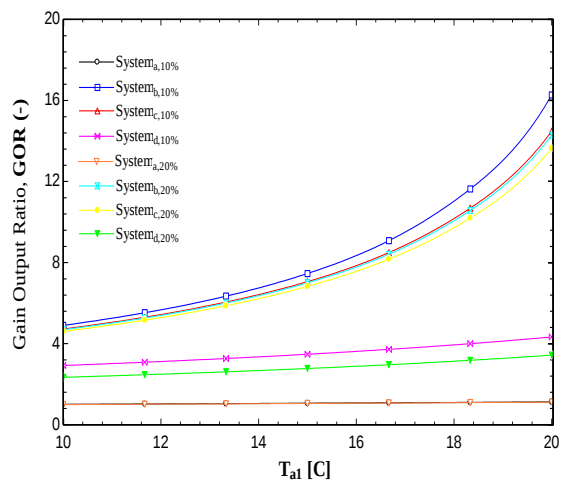
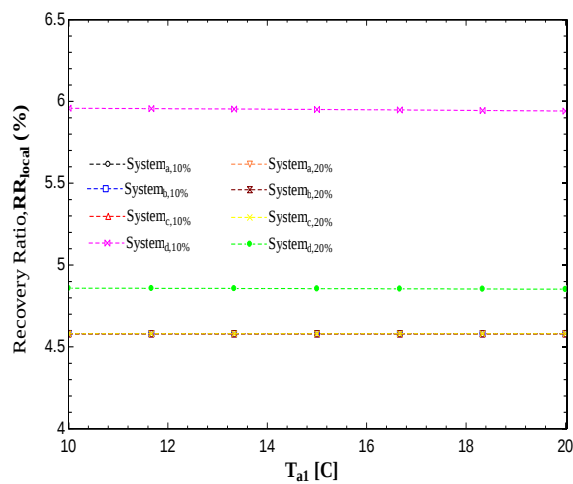
۲-۳-۵ اثر تغییرات دمای هوای ورودی

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دبی و رطوبت نسبی هوای ورودی و دبی، دما و رطوبت نسبی هوای خروجی، همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دبی و دمای آب شور تغذیه در رطوبت زن، اثر تغییرات دمای هوای ورودی (محیط) در پیکربندیها بررسی می شود. با توجه به جدول ۵-۲ و شکل ۵-۳ با افزایش دمای هوای ورودی، مقدار GOR در هر چهار حالت افزایش می یابد. بدلیل کاهش کار کمپرسور در پیکربندیهای b، c و d همچنین کاهش نرخ حرارت ورودی در پیکربندی a و ثابت ماندن آب شیرین تولید شده در همه ی پیکربندیها نسبت خروجی بدست آمده افزایش یافته است. همچنین با افزایش غلظت، کاهش GOR پیکربندیها مشهود می باشد (منحنی پیکربندی a در شوری ۱۰ و ۲۰٪ بدلیل نزدیک بودن مقدار GOR روی هم دیده می شوند که در واقع منحنی شوری ۱۰٪ اندکی بالاتر می باشد). آب تقطیر شده در پیکربندیهای a، b و c در هر دو غلظت کمینه و بیشینه مقدار یکسانی داشته و به همین دلیل خطوط مربوط به این پیکربندیها در نمودار همپوشانی دارد. در پیکربندی d افزایش شوری آب تغذیه باعث کاهش آب خالص تولید شده می گردد. نسبت بازیابی محلی نیز بدلیل ثابت ماندن آب تقطیر شده در پیکربندیها با افزایش دمای هوای ورودی بدون تغییر می باشد. خطوط پیکربندیهای a، b و c در هر دو غلظت آب تغذیه بدلیل برابر بودن RR_{local} روی هم افتادگی دارند و در پیکربندی d با افزایش شوری از ۱۰ به ۲۰٪ بدلیل کاهش آب شیرین تولید شده میزان نسبت بازیابی محلی نیز با کاهش مواجه می باشد. با افزایش دمای هوای ورودی، آب دریای تغذیه کننده ی سیستم کاهش می یابد که باعث می شود نسبت بازیابی کلی افزایش داشته باشد. میزان آب دریای ورودی نیز با افزایش شوری کاهش می یابد که باعث می شود $RR_{overall}$ در پیکربندیهای a، b و c با افزایش غلظت بیشتر شود ولی در پیکربندی d علاوه بر کاهش آب دریای ورودی میزان آب تقطیر شده نیز با افزایش شوری کمتر می شود. در نهایت، نسبت بازیابی کلی با افزایش غلظت در پیکربندی d کاهش می یابد. خطوط پیکربندیهای a، b و c در نمودار بدلیل برابر بودن $RR_{overall}$ در شوری ۱۰٪ همپوشانی داشته و همچنین در غلظت ۲۰٪ با افزایش $RR_{overall}$ روی هم افتادگی دارند. با افزایش دمای هوای ورودی،

کار کمپرسور پیکربندیهای b، c و d کمتر می شود در نتیجه ضریب عملکرد این پیکربندیها افزایش پیدا می کند و همچنین با بالا رفتن میزان غلظت آب تغذیه، COP_h سیستم بدلیل افزایش کار کمپرسور تنزل می یابد.

عنوان		دمای هوای ورودی ۱۰ (C)		دمای هوای ورودی ۲۰ (C)	
		شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %	شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %
GOR (-)	پیکربندی a	۱/۰۰۱	۰/۹۹۱	۱/۱۲	۱/۱۱
	پیکربندی b	۴/۸۹۵	۴/۶۸۶	۱۶/۲۷	۱۴/۲۹
	پیکربندی c	۴/۷۲	۴/۶	۱۴/۴۸	۱۳/۶۳
	پیکربندی d	۲/۹۱۸	۲/۳۳۵	۴/۳۲۷	۳/۴۳
RR_1 (%)	پیکربندی a	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی b	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی c	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی d	۵/۹۵۸	۴/۸۵۸	۵/۹۴۱	۴/۸۵۲
RR_o (%)	پیکربندی a	۶۴/۹۲	۷۷/۸۵	۶۵/۶۱	۷۸/۶۹
	پیکربندی b	۶۴/۹۲	۷۷/۸۵	۶۵/۶۱	۷۸/۶۹
	پیکربندی c	۶۴/۹۲	۷۷/۸۵	۶۵/۶۱	۷۸/۶۹
	پیکربندی d	۸۴/۴۵	۸۲/۵۸	۸۵/۱۲	۸۳/۳۸
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی b	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی c	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی d	۶/۲۵۶	۵/۱۰۱	۶/۲۳۸	۵/۰۹۵
COP_h (-)	پیکربندی b	۸/۶۷۱	۸/۰۲۶	۳۱/۴۹	۲۴/۴
	پیکربندی c	۵/۰۲۹	۴/۷۶۱	۱۵/۷۱	۱۳/۳۷
	پیکربندی d	۴/۰۷۴	۳/۳۶۴	۵/۷۳۷	۴/۶۲

جدول ۵-۲ اثر تغییرات دمای هوای ورودی



شکل ۵-۳ اثر تغییرات دمای هوای ورودی

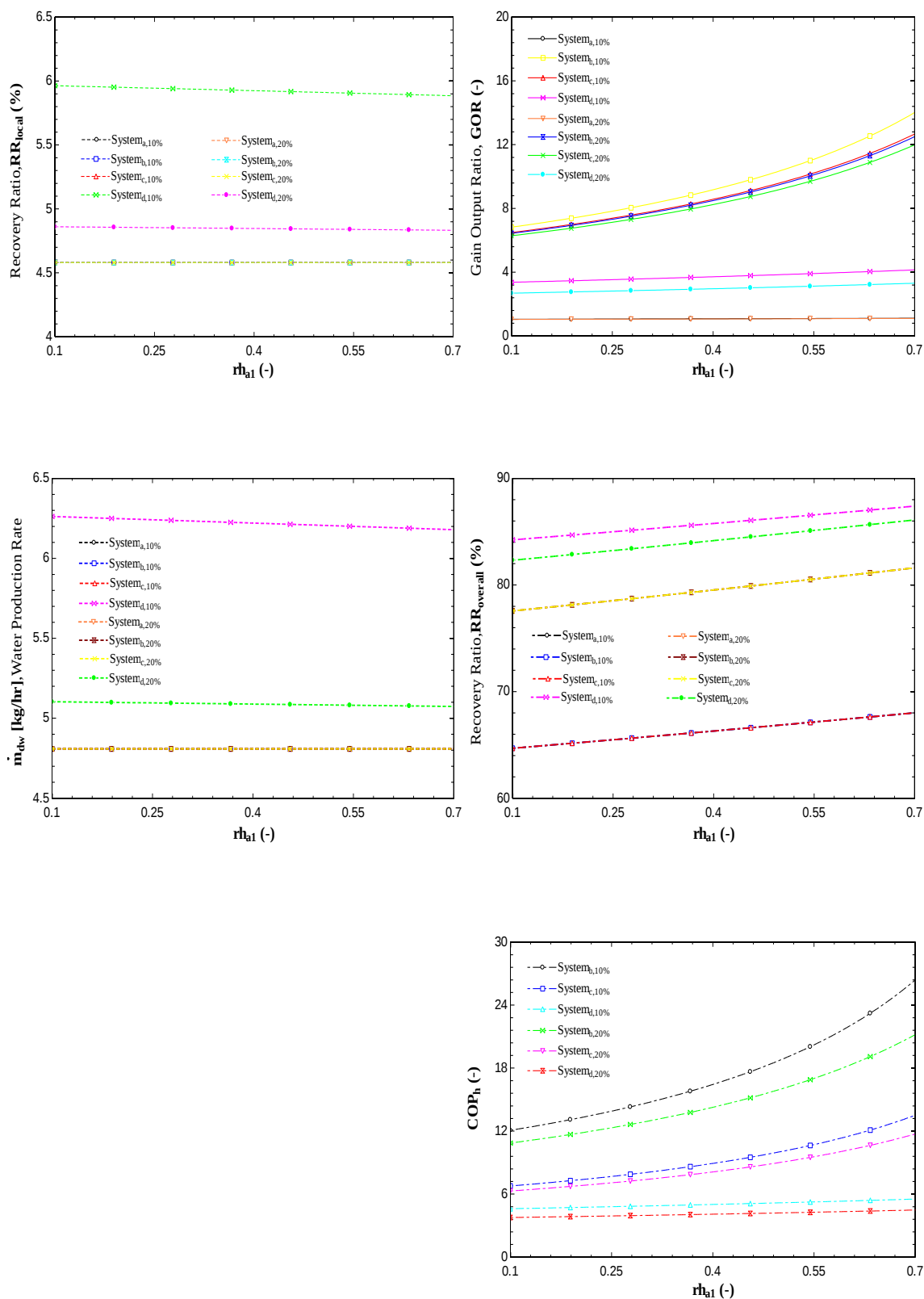
۳-۳-۵ اثر تغییرات رطوبت هوای ورودی

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دبی و دمای هوای ورودی و دبی، دما و رطوبت نسبی هوای خروجی، همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دبی و دمای آب شور تغذیه در رطوبت زن، اثر تغییرات رطوبت نسبی هوای ورودی (محیط) در پیکربندیها بررسی می شود. همینطور که در جدول ۳-۵ و شکل ۴-۵ مشاهده می شود با افزایش رطوبت هوای ورودی به سیستم، مقدار GOR پیکربندیها بیشتر می شود. علت افزایش نسبت خروجی بدست آمده مانند بخش قبلی (۲-۳-۵) می باشد با این تفاوت که در پیکربندی d با افزایش رطوبت هوا مقدار کمی از آب تقطیر شده کاسته می شود ولی در نهایت GOR افزایش می یابد. در اینجا هم مثل حالت های قبل با افزایش شوری میزان GOR پیکربندیها کاهش می یابد. همچنین در نمودار مربوطه، منحنی پیکربندی a در شوری ۱۰ و ۲۰٪ بدلیل نزدیک بودن مقدار GOR روی هم دیده می شوند که در واقع منحنی غلظت ۱۰٪ قدری بالاتر می باشد. پیکربندیهای a، b و c با افزایش رطوبت هوای ورودی و شوری آب تغذیه در میزان آب شیرین بدست آمده تغییری ندارند در نتیجه نسبت بازیابی محلی در این پیکربندیها ثابت خواهد بود (در هر دو نمودار RR_{local} و $\dot{m}_{dw}$ خطوط مربوط به این پیکربندیها در دو غلظت ۱۰ و ۲۰٪ آب تغذیه همپوشانی دارد). در پیکربندی d چون با افزایش رطوبت هوای ورودی مقداری از آب تقطیر شده کاسته می شود لذا باعث می گردد که RR_{local} کمی کاهش یابد. بعلاوه در این حالت با افزایش شوری، مقداری از آب شیرین تولید شده کاسته می شود که نتیجه ی آن پایین آمدن نسبت بازیابی محلی در این پیکربندی با افزایش غلظت می باشد. نکته قابل ذکر برای RR_{local} در پیکربندی d این است که میزان کاهش نسبت بازیابی محلی با افزایش رطوبت هوای ورودی در شوری ۱۰٪ بیشتر از شوری ۲۰٪ می باشد که علت این امر نیز میزان کاهش کمتر آب تقطیر شده در شوری ۲۰٪ نسبت به ۱۰٪ است. نسبت بازیابی کلی با توجه به شکل ۴-۵ در هر چهار حالت با افزایش رطوبت بدلیل کاهش آب دریای ورودی روند صعودی دارد. پیکربندیهای a، b و c با شوری ۱۰٪ بدلیل برابر بودن مقدار $RR_{overall}$ در نمودار روی هم افتادگی خطوط دارند. با افزایش شوری آب تغذیه نیز میزان نسبت بازیابی کلی در این سه حالت افزایش یافته که خطوط مربوط به این

پیکربندیها در نمودار با غلظت ۲۰٪ همپوشانی دارد. پیکربندی d نیز مانند بخشهای قبل که توضیح داده شد، با افزایش شوری با کاهش $RR_{overall}$ مواجه می‌شود. ضریب عملکرد پیکربندیهای b، c و d با بالا رفتن رطوبت هوای ورودی بیشتر شده همچنین با افزایش غلظت، مقدار ضریب عملکرد پمپ حرارتی کاهش می‌یابد.

عنوان		رطوبت هوای ورودی ۰/۱ (-)		رطوبت هوای ورودی ۰/۷ (-)	
		شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪	شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪
GOR (-)	پیکربندی a	۱/۰۴۶	۱/۰۳۶	۱/۱۱۱	۱/۱۰
	پیکربندی b	۶/۸۲۴	۶/۴۳۴	۱۴/۰۵	۱۲/۵۳
	پیکربندی c	۶/۴۸۷	۶/۲۸۴	۱۲/۸۵	۱۲/۰۷
	پیکربندی d	۳/۳۶۷	۲/۶۸۳	۴/۱۲۱	۳/۳۳۱
RR_1 (%)	پیکربندی a	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی b	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی c	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی d	۵/۹۶۴	۴/۸۶۱	۵/۸۸۴	۴/۸۳۲
RR_o (%)	پیکربندی a	۶۴/۶۹	۷۷/۵۷	۶۸/۰۵	۸۱/۶۱
	پیکربندی b	۶۴/۶۹	۷۷/۵۷	۶۸/۰۵	۸۱/۶۱
	پیکربندی c	۶۴/۶۹	۷۷/۵۷	۶۸/۰۵	۸۱/۶۱
	پیکربندی d	۸۴/۲۳	۸۲/۳۲	۸۷/۴۲	۸۶/۱۹
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۸۱
	پیکربندی b	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۸۱
	پیکربندی c	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۸۱	۴/۸۱
	پیکربندی d	۶/۲۶۲	۵/۱۰۳	۶/۱۷۸	۵/۰۷۴
COP_h (-)	پیکربندی b	۱۲/۰۷	۱۰/۸۶	۲۶/۵۲	۲۱/۴۳
	پیکربندی c	۶/۷۶۴	۶/۲۸۹	۱۳/۷۸	۱۱/۸۹
	پیکربندی d	۴/۶	۳/۷۶۱	۵/۵۱۱	۴/۵۰۴

جدول ۵-۳ اثر تغییرات رطوبت هوای ورودی



شکل ۴-۵ اثر تغییرات رطوبت هوای ورودی

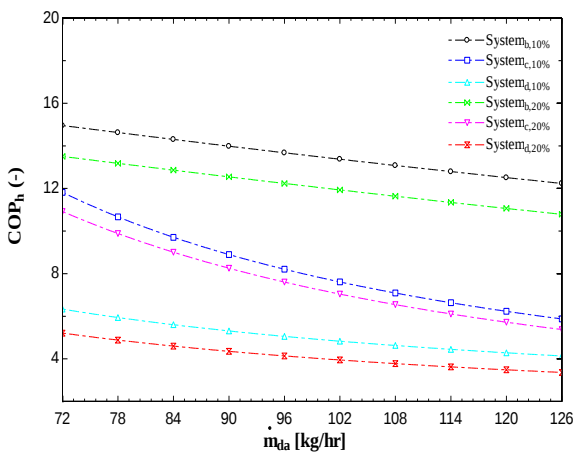
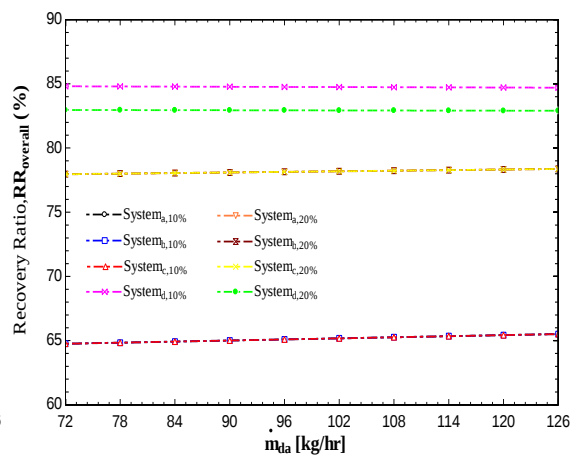
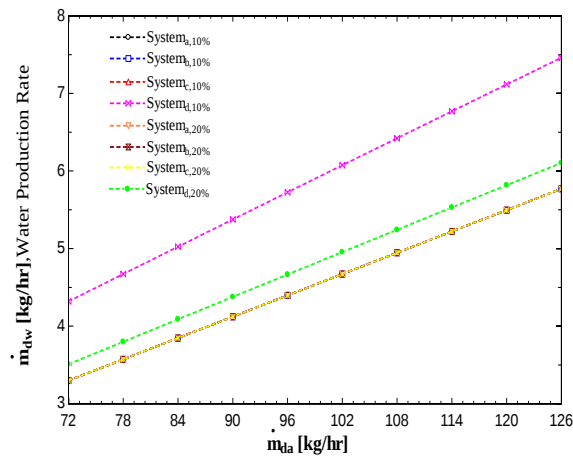
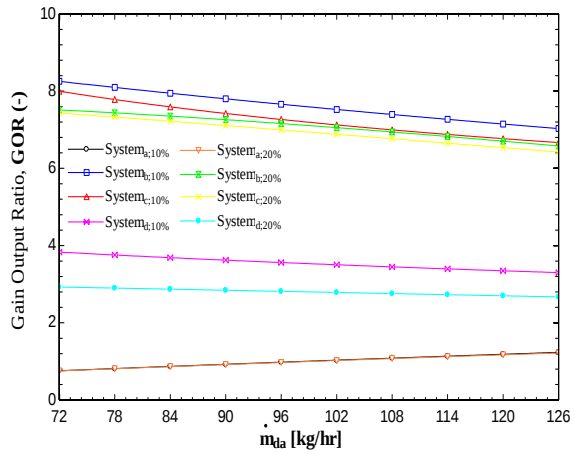
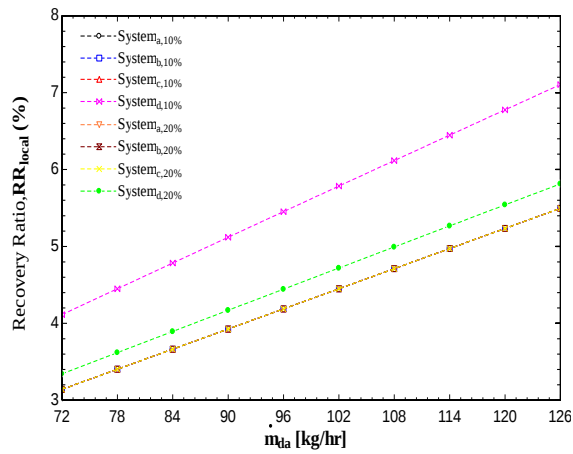
۴-۳-۵ اثر تغییرات دبی هوای ورودی

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دما و رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی، همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دبی و دمای آب شور تغذیه در رطوبت زن، اثر تغییرات دبی هوای ورودی در پیکربندیها بررسی می‌شود. با توجه به جدول ۴-۵ و شکل ۵-۵ با افزایش دبی هوای ورودی میزان آب تقطیر شده در تمام حالتها افزایش یافته است. پیکربندیهای a، b و c با افزایش شوری تغییری در میزان آب تولید شده‌ی آنها بوجود نمی‌آید (خطوط مربوط به آنها در نمودار روی هم افتادگی دارد) ولی پیکربندی d با افزایش شوری میزان تولید آب خالص آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر با افزایش دبی هوای ورودی کار کمپرسور و نرخ حرارت ورودی به سیستم نیز در پیکربندیها افزایش می‌یابد. برآیند این تغییرات به نحوی می‌باشد که در نهایت مقدار GOR در پیکربندیهای b، c و d کاهش یافته که علت آن غلبه‌ی مقدار افزایش کار کمپرسور بر افزایش آب شیرین تولید شده می‌باشد. اما در پیکربندی a بدلیل برتری میزان تولید آب خالص بر نرخ حرارت ورودی، نسبت خروجی بدست آمده افزایش می‌یابد. مطابق بخش‌های قبل با افزایش شوری میزان GOR پیکربندیها کاهش می‌یابد. نسبت بازیابی محلی نیز بدلیل افزایش آب تقطیر شده در پیکربندیها یک روند صعودی دارد، خطوط پیکربندیهای a، b و c با شوری ۱۰ و ۲۰٪ بدلیل برابر بودن RR_{local} در نمودار همپوشانی دارند. پیکربندی d نیز بدلیل کاهش آب خالص تولید شده با افزایش شوری، در مقدار نسبت بازیابی محلی با کاهش مواجه می‌شود. بالا رفتن دبی هوای ورودی علاوه بر افزایش آب تقطیر شده در سیستم، باعث افزایش آب دریای ورودی می‌شود نسبت این دو مقدار در پیکربندی d طوری است که نسبت بازیابی کلی کاهش بسیار کمی داشته و در بقیه‌ی پیکربندیها افزایش می‌یابد. مانند بخش‌های قبل پیکربندیهای a، b و c با افزایش شوری مقدار $RR_{overall}$ بیشتری خواهد داشت و پیکربندی d نیز با افزایش شوری با کاهش $RR_{overall}$ مواجه می‌شود (در نمودار مربوطه خطوط پیکربندیهای a، b و c با شوری ۱۰٪ همپوشانی داشته و برای شوری ۲۰٪ نیز با افزایش $RR_{overall}$ ، این پیکربندیها روی هم افتادگی خطوط دارند). با توجه به شکل ۵-۵ افزایش دبی هوای ورودی منجر به پایین آمدن ضریب عملکرد پیکربندیهای b، c و d می‌شود.

افزایش شوری آب تغذیه نیز مانند بخش های قبل باعث کاهش ضریب عملکرد پمپ حرارتی می شود.

عنوان		دبی هوای ورودی ۷۲ (kg/h)		دبی هوای ورودی ۱۲۶ (kg/h)	
		شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪	شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪
GOR (-)	پیکربندی a	۰/۷۵۵	۰/۷۵۱	۱/۲۳۱	۱/۲۱۴
	پیکربندی b	۸/۲۵۲	۷/۵۱۲	۷/۰۳	۶/۵۷۸
	پیکربندی c	۷/۹۹۸	۷/۴۳۲	۶/۶۶۷	۶/۴۲۱
	پیکربندی d	۳/۸۲۹	۲/۹۲۵	۳/۲۹۸	۲/۶۶۹
RR ₁ (%)	پیکربندی a	۳/۱۴	۳/۱۴	۵/۴۹۶	۵/۴۹۶
	پیکربندی b	۳/۱۴	۳/۱۴	۵/۴۹۶	۵/۴۹۶
	پیکربندی c	۳/۱۴	۳/۱۴	۵/۴۹۶	۵/۴۹۶
	پیکربندی d	۴/۱۱	۳/۱۴	۷/۱۰۵	۵/۸۱
RR _o (%)	پیکربندی a	۶۴/۷۵	۷۷/۹۶	۶۵/۵۱	۷۸/۳۷
	پیکربندی b	۶۴/۷۵	۷۷/۹۶	۶۵/۵۱	۷۸/۳۷
	پیکربندی c	۶۴/۷۵	۷۷/۹۶	۶۵/۵۱	۷۸/۳۷
	پیکربندی d	۸۴/۸	۸۲/۹۶	۸۴/۷	۸۲/۹
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۳/۲۹۷	۳/۲۹۷	۵/۷۷	۵/۷۷
	پیکربندی b	۳/۲۹۷	۳/۲۹۷	۵/۷۷	۵/۷۷
	پیکربندی c	۳/۲۹۷	۳/۲۹۷	۵/۷۷	۵/۷۷
	پیکربندی d	۴/۳۱۸	۳/۵	۷/۴۶۱	۶/۱
COP _h (-)	پیکربندی b	۱۴/۹۵	۱۳/۵	۱۲/۲۴	۱۰/۷۹
	پیکربندی c	۱۱/۸۲	۱۰/۹۲	۵/۸۷۳	۵/۳۷۶
	پیکربندی d	۶/۳۳۵	۵/۲۱۱	۴/۱۳۶	۳/۳۶۲

جدول ۴-۵ اثر تغییرات دبی هوای ورودی



شکل ۵-۵ اثر تغییرات دبی هوای ورودی

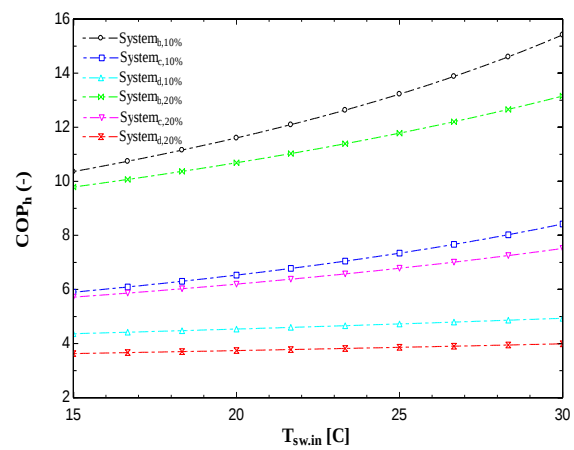
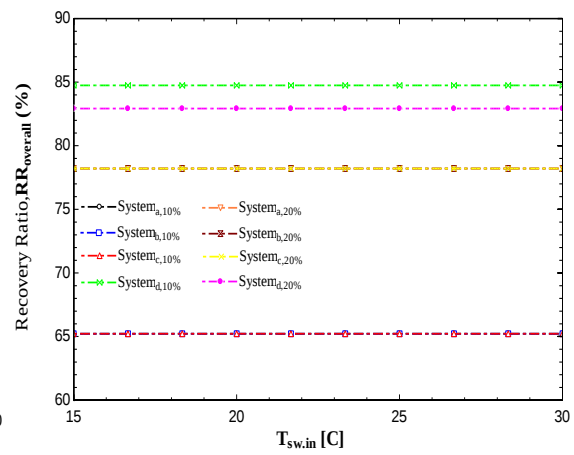
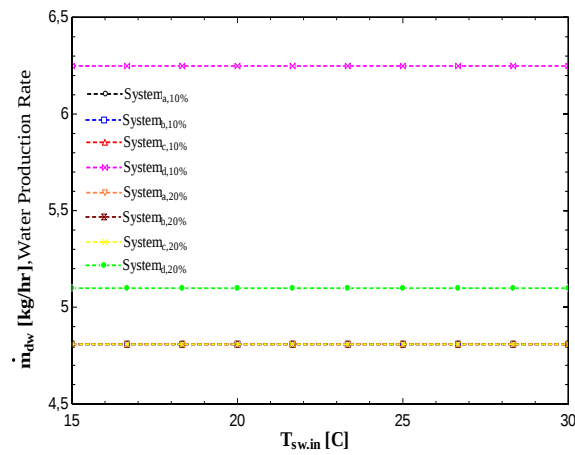
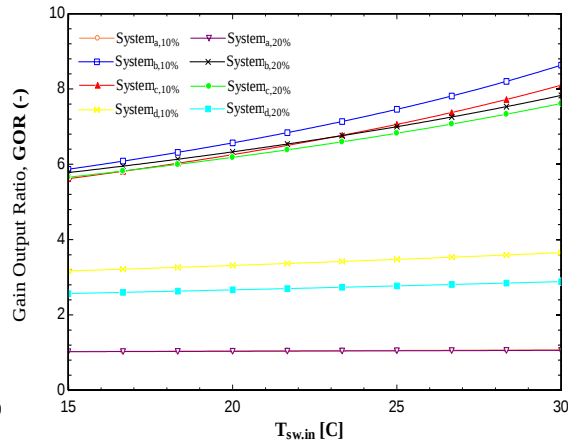
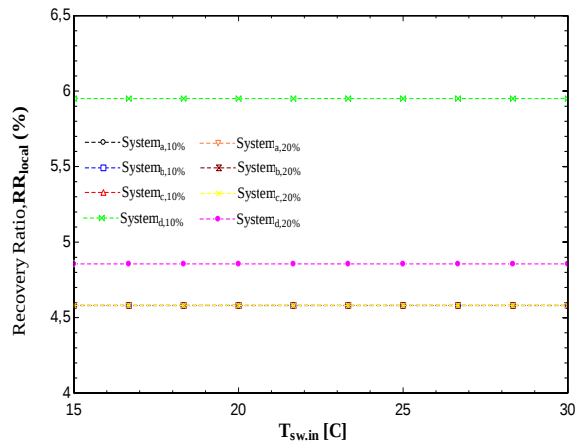
۵-۳-۵ اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی

در این بخش تمام پارامترهای مربوط به محفظه تبخیر و چگالنده از جمله دبی، دما و رطوبت نسبی هوا، همچنین دبی و دمای آب تغذیه ثابت بوده تا اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی بررسی شود. افزایش دمای آب دریای ورودی به سیستم با توجه به جدول ۵-۵ و شکل ۵-۶ هیچ تاثیری در مقدار آب شیرین تولیدشده‌ی پیکربندیهای طراحی شده نمی‌گذارد. مطابق بخشهای قبل، خطوط پیکربندیهای a، b و c در نمودار در هر دو غلظت ۱۰ و ۲۰٪ آب تغذیه بدلیل برابر بودن $\dot{m}_{dw}$ همپوشانی دارد و پیکربندی d با افزایش غلظت در میزان آب تقطیر شده با کاهش مواجه می‌شود. عدم تغییر آب تولید شده در پیکربندی باعث ثابت ماندن نسبت بازیابی محلی و کلی با تغییر دمای آب دریای ورودی می‌شود. همچنین خطوط پیکربندیهای a، b و c در نمودار RR_{local} در دو غلظت بالا و پایین کاری سیستم بدلیل برابر بودن آب تقطیر شده، روی هم افتادگی خطوط دارند ولی در نمودار $RR_{overall}$ ، با افزایش شوری بدلیل کاهش آب دریای ورودی بهبود وضعیت مشخص می‌باشد. پیکربندی d نیز با افزایش شوری در هر دو پارامتر RR_{local} و $RR_{overall}$ مطابق توضیحات قبلی با کاهش مواجه می‌شود. تا اینجای کار افزایش دمای آب دریای ورودی هیچ تاثیری روی عملکرد سیستم نگذاشته و آن هم به‌درستی می‌باشد زیرا افزایش دمای آب دریا فقط می‌تواند بر روی میزان انرژی مصرفی سیستم تأثیر گذار باشد و نتیجه‌ی آن نیز تغییرات در مقدار GOR پیکربندیها می‌باشد. تمام پیکربندیهای طراحی شده با افزایش دمای آب دریای ورودی با توجه به کاهش انرژی مصرفی در میزان نسبت خروجی بدست آمده با افزایش مواجه می‌شود. نکته‌ی مهم پژوهش در این بخش این است که در پارامترهای قبلی که اثر تغییرات آنها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت، همگی با افزایش شوری با کاهش GOR در پیکربندیها روبرو بوده‌اند، در اینجا نیز پیکربندیهای a، b و d از این قاعده پیروی می‌کند ولی در پیکربندی c با افزایش شوری، مقدار نسبت خروجی بدست آمده در حداقل دمای آب دریای ورودی افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش دمای آب دریا کم‌کم GOR پیکربندی c در شوری ۲۰٪ از غلظت ۱۰٪ کمتر می‌شود. مقدار ضریب عملکرد پیکربندیهای b، c و d نیز با افزایش دمای آب دریا بیشتر می‌شود و با افزایش غلظت این میزان

کاهش می‌یابد. اختلاف ضریب عملکرد در شوری کمینه و بیشینه‌ی پیکربندی b با افزایش دمای آب دریا نسبت به دو پیکربندی دیگر بیشتر می‌باشد.

عنوان		دمای آب دریا ورودی ۱۵ (C)		دمای آب دریا ورودی ۳۰ (C)	
		شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %	شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %
GOR (-)	پیکربندی a	۱/۰۲۷	۱/۰۲۲	۱/۰۷۱	۱/۰۵۹
	پیکربندی b	۵/۸۶۷	۵/۷۷۸	۸/۶۳۲	۷/۸۲۹
	پیکربندی c	۵/۶۱۶	۵/۶۵۵	۸/۱	۷/۶۱۴
	پیکربندی d	۳/۱۶۶	۲/۵۶۷	۳/۶۵۲	۲/۸۸۴
RR _۱ (%)	پیکربندی a	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی b	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی c	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸	۴/۵۸
	پیکربندی d	۵/۹۵۱	۴/۸۵۶	۵/۹۵۱	۴/۸۵۶
RR _۰ (%)	پیکربندی a	۶۵/۲۱	۶۵/۲۱	۷۸/۲۱	۷۸/۲۱
	پیکربندی b	۶۵/۲۱	۶۵/۲۱	۷۸/۲۱	۷۸/۲۱
	پیکربندی c	۶۵/۲۱	۶۵/۲۱	۷۸/۲۱	۷۸/۲۱
	پیکربندی d	۸۴/۷۴	۸۲/۹۲	۸۴/۷۴	۸۲/۹۲
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی b	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی c	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی d	۶/۲۴۸	۵/۰۹۸	۶/۲۴۸	۵/۰۹۸
COP _h (-)	پیکربندی b	۱۰/۳۶	۹/۷۸۸	۱۵/۴۲	۱۳/۱۵
	پیکربندی c	۵/۸۹۸	۵/۷۱۵	۸/۴۲۲	۷/۵۱۶
	پیکربندی d	۴/۳۶۴	۳/۶۲۸	۴/۹۳۶	۳/۹۹۱

جدول ۵-۵ اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی



شکل ۵-۶ اثر تغییرات دمای آب دریای ورودی

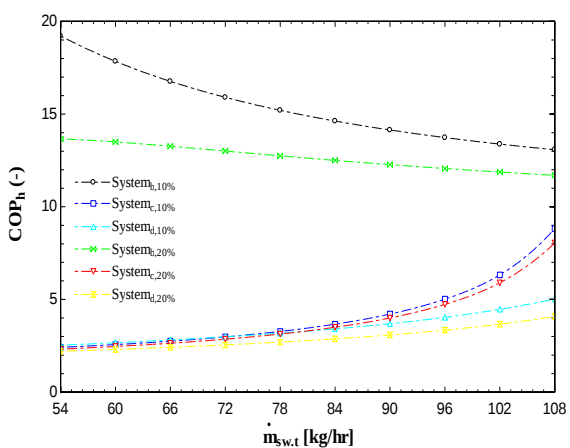
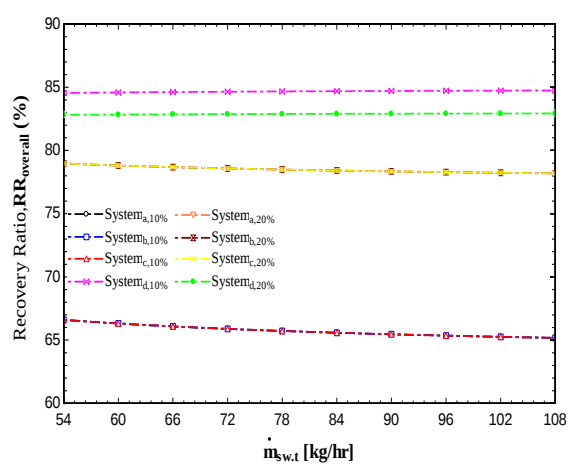
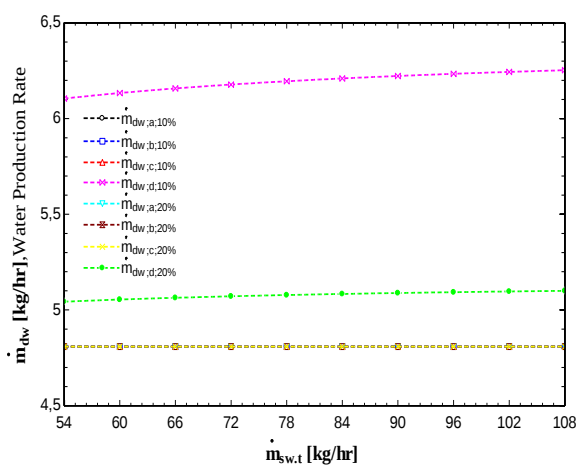
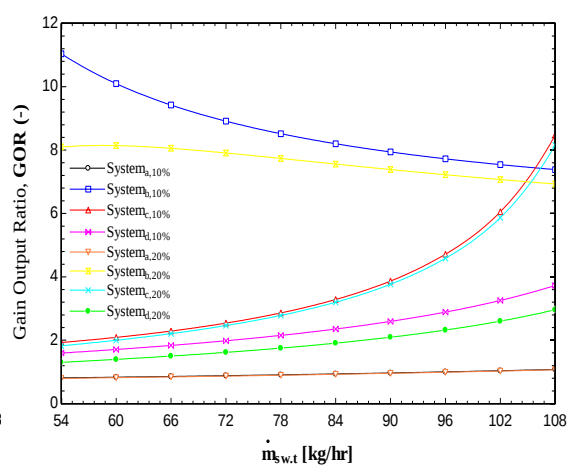
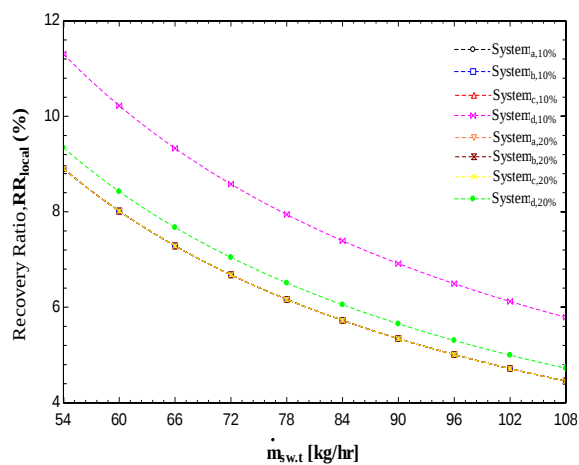
۶-۳-۵ اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دبی، دما و رطوبت نسبی هوای ورودی و خروجی، همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دمای آب شور تغذیه در رطوبت زن، اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه در پیکربندیها بررسی می شود. افزایش دبی آب شور تغذیه در میزان تولید آب شیرین پیکربندیهای a، b و c تأثیری ندارد ولی در پیکربندی d با بیشتر شدن دبی آب شور ورودی بدلیل افزایش آب شور دورریزی که مجدد استفاده می گردد مقدار کمی آب تقطیر شده بیشتر می شود (جدول ۵-۶ و شکل ۵-۷). پیکربندیهای a، b و c در شوری ۱۰ و ۲۰٪ مقدار تولید آب یکسانی دارند و به همین دلیل خطوط مربوط به آنها در نمودار همپوشانی دارد، پیکربندی d نیز با افزایش شوری میزان آب تقطیر شده ی آن کاهش می یابد. نسبت بازیابی محلی با افزایش آب شور تغذیه در تمامی پیکربندیها روند کاهشی دارد که پیکربندیهای a، b و c در هر دو غلظت کاری سیستم بدلیل برابر بودن آب تولید شده در نمودار روی هم افتادگی خطوط دارد و پیکربندی d نیز با افزایش شوری بدلیل کاهش آب تقطیر شده میزان RR_{local} با کاهش مواجه می شود. نسبت بازیابی کلی در پیکربندیها برعکس نسبت بازیابی محلی با افزایش میزان آب شور ورودی مقداری بیشتر می شود اما میزان تغییر آن نسبت به حالت محلی با توجه به نمودار خیلی کمتر می باشد. در نسبت بازیابی کلی، با افزایش شوری آب تغذیه مانند بخشهای قبل، پیکربندیهای a، b و c با افزایش $RR_{overall}$ مواجه می گردند اما پیکربندی d با کاهش نسبت بازیابی کلی روبرو می شود. نسبت خروجی بدست آمده در پیکربندیهای a، c و d با افزایش مقدار آب شور ورودی بیشتر می شود ولی در پیکربندی b این قضیه بطور عکس رخ می دهد. تمامی پیکربندیها با افزایش غلظت آب تغذیه با کاهش میزان GOR مواجه می شود (در نمودار مربوطه خط پیکربندی a در شوری ۱۰٪ کمی بالاتر از خط ۲۰٪ می باشد ولی بدلیل نزدیکی روی هم دیده می شوند). ضریب عملکرد پیکربندیهای b، c و d با توجه به شکل ۵-۷ تقریباً روند یکسانی با نسبت خروجی بدست آمده ی این پیکربندیها دارد. ضریب عملکرد پیکربندی b در حداقل میزان آب شور ورودی اختلاف زیادی در دو غلظت کاری سیستم دارد و این اختلاف با افزایش دبی آب شور، رفته رفته کمتر می شود. اما پیکربندیهای

c و d از کمینه تا بیشینه‌ی دبی آب شور یک اختلاف تقریباً ثابت را در دو شوری ۱۰ و ۲۰٪ دارا می‌باشد.

عنوان		دبی آب شور تغذیه ۵۴ (kg/h)		دبی آب شور تغذیه ۱۰۸ (kg/h)	
		شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪	شوری ۱۰٪	شوری ۲۰٪
GOR (-)	پیکربندی a	۰/۸۱۱	۰/۷۹۵	۱/۰۷۶	۱/۰۶۷
	پیکربندی b	۱۱/۰۴	۸/۰۹۸	۷/۳۸۳	۶/۹۲۹
	پیکربندی c	۱/۹۲۸	۱/۸۲۳	۸/۴۷۶	۸/۱۵۹
	پیکربندی d	۱/۵۹۵	۱/۳۰۲	۳/۷۲۶	۲/۹۶۱
RR _۱ (%)	پیکربندی a	۸/۹۰۵	۸/۹۰۵	۴/۴۵۲	۴/۴۵۲
	پیکربندی b	۸/۹۰۵	۸/۹۰۵	۴/۴۵۲	۴/۴۵۲
	پیکربندی c	۸/۹۰۵	۸/۹۰۵	۴/۴۵۲	۴/۴۵۲
	پیکربندی d	۱۱/۳	۹/۳۴	۵/۷۸۹	۴/۷۲۲
RR _۰ (%)	پیکربندی a	۶۶/۶	۷۸/۹۶	۶۵/۱۷	۷۸/۱۹
	پیکربندی b	۶۶/۶	۷۸/۹۶	۶۵/۱۷	۷۸/۱۹
	پیکربندی c	۶۶/۶	۷۸/۹۶	۶۵/۱۷	۷۸/۱۹
	پیکربندی d	۸۴/۵۴	۸۲/۸	۸۴/۷۴	۸۲/۹
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی b	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی c	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹	۴/۸۰۹
	پیکربندی d	۶/۱۰۴	۵/۰۴۳	۶/۲۵۲	۵/۱
COP _h (-)	پیکربندی b	۱۹/۲۲	۱۳/۶۵	۱۳/۰۸	۱۱/۷
	پیکربندی c	۲/۴۱۷	۲/۳۱۷	۸/۸۲۱	۸/۰۴۵
	پیکربندی d	۲/۵۳۳	۲/۲۰۱	۵/۰۲۴	۴/۰۸۱

جدول ۵-۶ اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه



شکل ۵-۷ اثر تغییرات دبی آب شور تغذیه

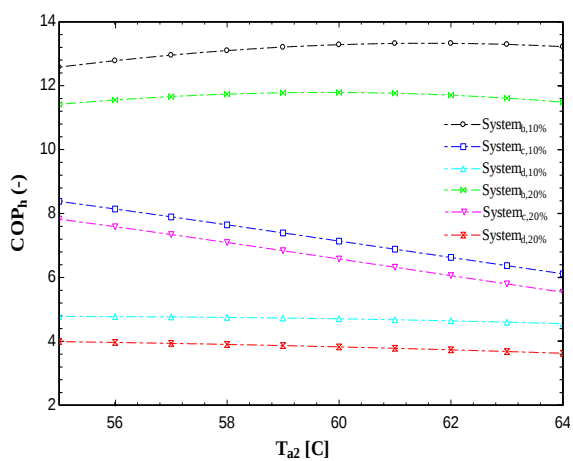
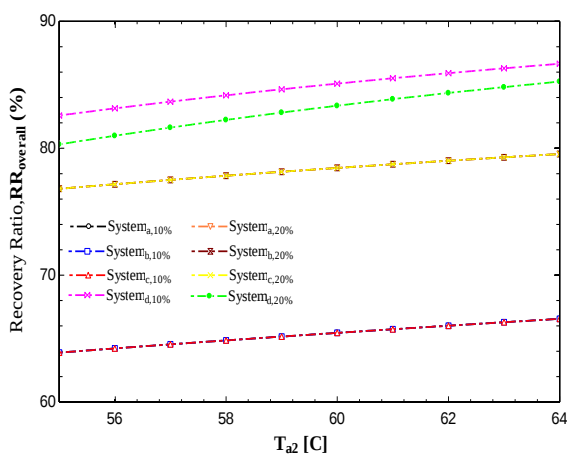
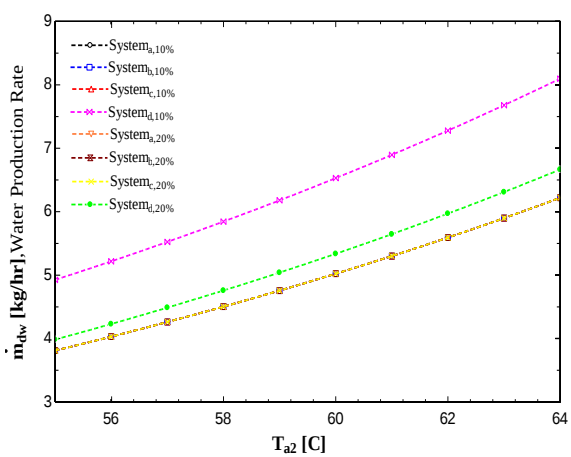
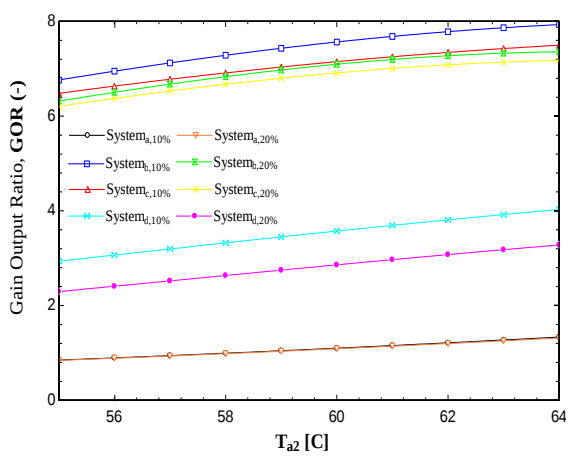
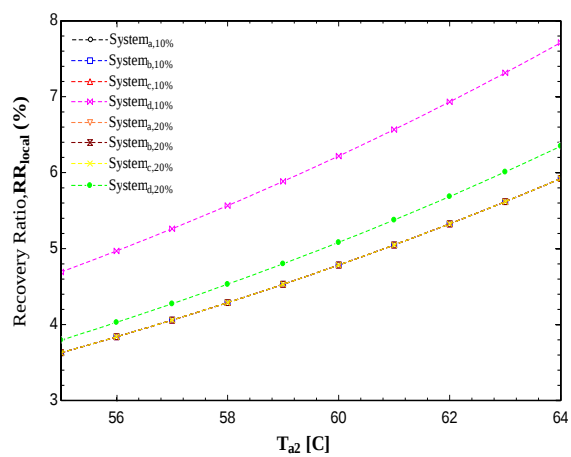
۷-۳-۵ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دبی، دما و رطوبت نسبی هوای ورودی، دبی و رطوبت نسبی هوای خروجی و همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دبی و دمای آب شور تغذیه در رطوبت زن، اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر در پیکربندیها بررسی می شود. دمای هوای خروجی محفظه تبخیر تنها پارامتری است که با افزایش آن، میزان تمام موارد مورد بررسی (GOR ، RR_{local} ، $RR_{overall}$ و $\dot{m}_{dw}$) در پیکربندیها افزایش می یابد. با مشاهده ی جدول ۷-۵ و شکل ۸-۵ دریافت می شود که بالا رفتن دمای هوای خروجی محفظه ی تبخیر، افزایش قابل ملاحظه ای در میزان تولید آب خالص چهار پیکربندی مورد بررسی دارد و مطابق بخشهای قبل پیکربندیهای a، b و c در هر دو شوری آب تغذیه، مقدار تولید آب شیرین یکسان دارند و خطوط مربوط به آنها در نمودار همپوشانی دارد. پیکربندی d نیز با افزایش شوری در میزان آب تقطیر شده با کاهش مواجه می شود. این روند تولید آب شیرین در نسبت بازیابی محلی نیز با توجه به شکل ۸-۵ قابل ملاحظه می باشد. نسبت بازیابی کلی نیز مانند نسبت بازیابی محلی با افزایش دمای هوای خروجی محفظه تبخیر بیشتر می شود با این تفاوت که پیکربندیهای a، b و c با افزایش شوری در میزان $RR_{overall}$ با افزایش مواجه می شوند اما پیکربندی d در میزان نسبت بازیابی کلی با افزایش شوری کمی روند کاهشی دارد. همچنین با توجه به نمودارهای مربوطه در شکل ۸-۵ مقدار افزایش نسبت بازیابی کلی با افزایش دمای هوای خروجی محفظه ی رطوبت زن نسبت به RR_{local} پیکربندیها کمتر می باشد. نسبت خروجی بدست آمده در پیکربندیها نیز روند افزایشی دارد و با توجه به نمودار، پیکربندی b بیشترین و پیکربندی a کمترین میزان GOR را دارا می باشد. همچنین با بیشتر شدن درصد شوری آب تغذیه نسبت خروجی بدست آمده در پیکربندیها با کاهش مواجه می شود (مقدار GOR پیکربندی a در غلظت ۱۰٪ کمی بیشتر از شوری ۲۰٪ می باشد ولی بدلیل نزدیک بودن آن، خطوط مربوطه روی هم دیده می شوند). ضریب عملکرد در پیکربندیهای b، c و d با افزایش دمای هوای خروجی محفظه ی چگالنده بیشتر می شود و با بالا رفتن غلظت این میزان کاهش می یابد. پیکربندی b بیشترین مقدار COP_h را دارد و اختلاف این مقدار در دو شوری ۱۰ و ۲۰٪ با افزایش

دمای هوای خروجی محفظه تبخیر بیشتر می‌شود، ولی پیکربندیهای c و d یک اختلاف تقریباً ثابت را در طول روند افزایش دمای هوای خروجی محفظه تبخیر دارا می‌باشد.

عنوان		دمای هوای خروجی محفظه تبخیر ۵۵ (C)		دمای هوای خروجی محفظه تبخیر ۶۴ (C)	
		شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %	شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %
GOR (-)	پیکربندی a	۰/۸۴۸	۰/۸۴۲	۱/۳۳	۱/۳۱
	پیکربندی b	۶/۷۶۱	۶/۳۱۵	۷/۹۳۱	۷/۳۵۷
	پیکربندی c	۶/۴۷۹	۶/۲۰۴	۷/۴۹۵	۷/۱۷۶
	پیکربندی d	۲/۹۳۶	۲/۲۹۵	۴/۰۲۸	۳/۲۷۸
RR ₁ (%)	پیکربندی a	۳/۶۲۹	۳/۶۲۹	۵/۹۲۳	۵/۹۲۳
	پیکربندی b	۳/۶۲۹	۳/۶۲۹	۵/۹۲۳	۵/۹۲۳
	پیکربندی c	۳/۶۲۹	۳/۶۲۹	۵/۹۲۳	۵/۹۲۳
	پیکربندی d	۴/۶۹۱	۳/۷۹۴	۷/۷۱۳	۶/۳۴۸
RR _o (%)	پیکربندی a	۶۳/۸۹	۷۶/۸	۶۶/۵۵	۷۹/۵۵
	پیکربندی b	۶۳/۸۹	۷۶/۸	۶۶/۵۵	۷۹/۵۵
	پیکربندی c	۶۳/۸۹	۷۶/۸	۶۶/۵۵	۷۹/۵۵
	پیکربندی d	۸۲/۵۸	۸۰/۳۱	۸۶/۶۶	۸۵/۲۶
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۳/۸۱	۳/۸۱	۶/۲۱۹	۶/۲۱۹
	پیکربندی b	۳/۸۱	۳/۸۱	۶/۲۱۹	۶/۲۱۹
	پیکربندی c	۳/۸۱	۳/۸۱	۶/۲۱۹	۶/۲۱۹
	پیکربندی d	۴/۹۲۵	۳/۹۸۴	۸/۰۹۸	۶/۶۶
COP _h (-)	پیکربندی b	۱۲/۵۸	۱۱/۴۱	۱۳/۲۲	۱۱/۴۸
	پیکربندی c	۸/۳۸	۷/۸۲۴	۶/۱۱۴	۵/۵۳۸
	پیکربندی d	۴/۷۸	۳/۹۹	۴/۵۵	۳/۶۲۶

جدول ۵-۷ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر



شکل ۵-۸ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه تبخیر

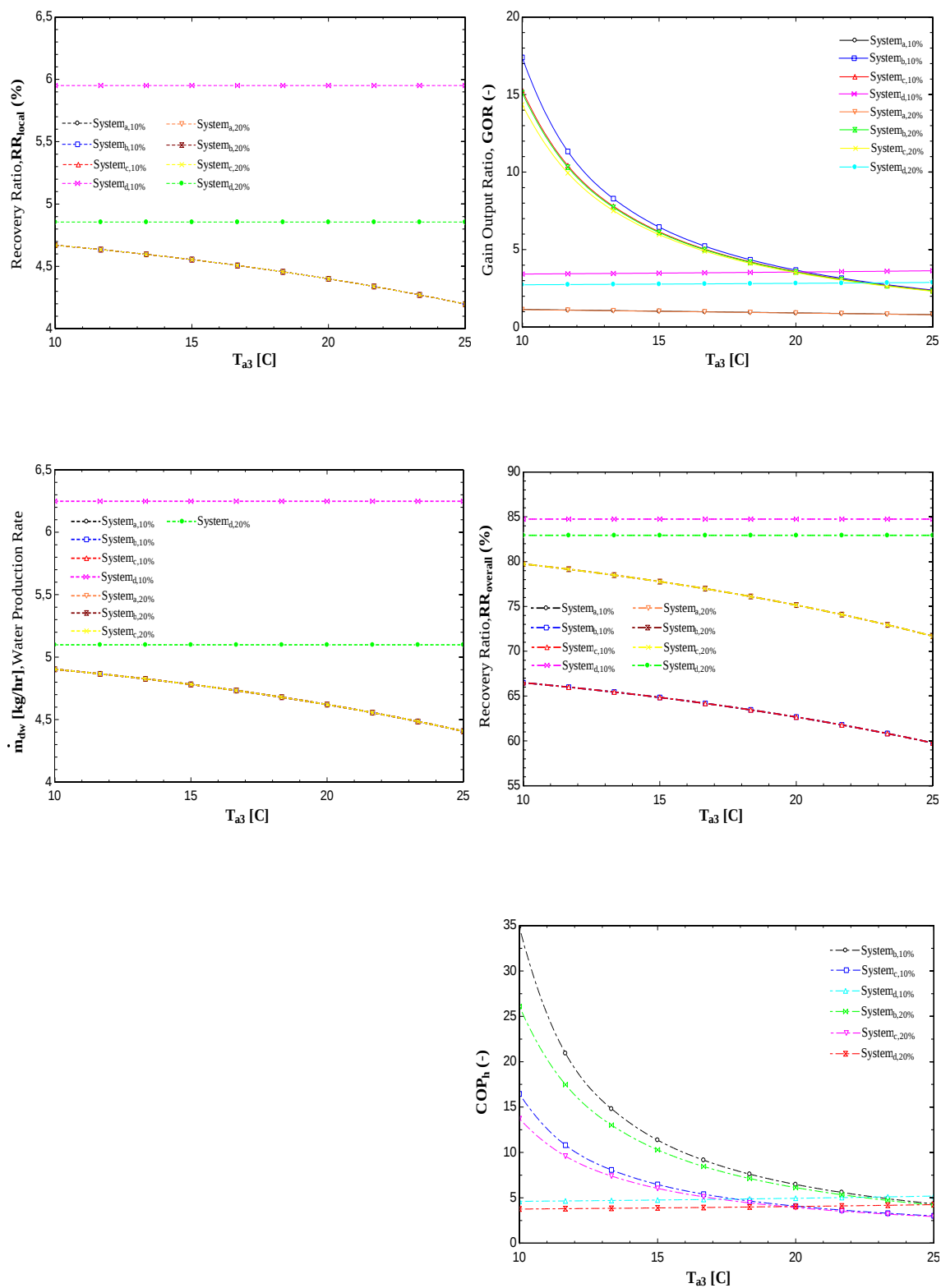
۸-۳-۵ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده

در این بخش با ثابت قرار دادن مقادیر مربوط به دبی، دما و رطوبت نسبی هوای ورودی، دبی و رطوبت نسبی هوای خروجی و همچنین با ثابت قرار دادن مقدار دبی و دمای آب خالص تغذیه در رطوبت‌زدا، اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده در پیکربندیها بررسی می‌شود. با توجه به جدول ۵-۸ و شکل ۵-۹ افزایش دمای هوای خروجی محفظه‌ی رطوبت‌زدا در پیکربندیهای a، b و c بدلیل کاهش تقطیر شدن رطوبت هوا، میزان آب شیرین تولید شده کمتر می‌شود ولی در پیکربندی d بدلیل جبران کاهش این مقدار در کندانسور سیستم، مقدار آب تولید شده با افزایش دمای هوای خروجی محفظه چگالنده بدون تغییر باقی می‌ماند. پیکربندیهای a، b و c در دو غلظت متفاوت، میزان آب تقطیر شده‌ی یکسانی دارند و به همین دلیل خطوط مربوط به این پیکربندیها همپوشانی پیدا می‌کند. پیکربندی d نیز با افزایش شوری با کاهش آب تولید شده مواجه می‌گردد. نسبت بازیابی محلی روند تقریباً مشابهی با میزان آب شیرین تولید شده دارد که در شکل ۵-۹ قابل ملاحظه می‌باشد. تغییرات نسبت بازیابی کلی هم مانند نسبت بازیابی محلی می‌باشد با این تفاوت که پیکربندیهای a، b و c با افزایش شوری بدلیل کاهش آب دریای ورودی با افزایش $RR_{overall}$ مواجه می‌شود. میزان نسبت خروجی بدست آمده در پیکربندیهای a، b و c با افزایش دمای هوای خروجی محفظه چگالنده کاهش می‌یابد که میزان کاهش در پیکربندیهای b و c خیلی بیشتر می‌باشد. عملکرد پیکربندی d در این پارامتر عکس دیگر پیکربندیها می‌باشد که مقدار GOR آن افزایش می‌یابد. تمامی پیکربندیهای طراحی شده با افزایش شوری با کاهش GOR مواجه می‌باشند، پیکربندی a نیز مطابق بخشهای قبل بدلیل نزدیک بودن مقدار GOR در دو شوری متفاوت، خطوط آنها در نمودار روی هم دیده می‌شود که خط مربوط به غلظت ۱۰٪ قدری بالاتر می‌باشد. ضریب عملکرد پیکربندیهای b و c با افزایش دمای هوای خروجی محفظه چگالنده کاهش می‌یابد ولی این اتفاق در پیکربندی d بصورت افزایشی می‌باشد. مانند بخشهای قبلی افزایش شوری باعث کاهش ضریب عملکرد پیکربندیها می‌گردد. نکته جالب توجه در مطالعه‌ی این پارامتر کاهش زیاد نسبت خروجی بدست آمده و ضریب عملکرد پیکربندیهای b و c در حداکثر دمای هوای

خروجی محفظه چگالنده است که حتی از مقادیر پیکربندی d نیز با وجود اختلاف زیاد در حداقل دمای خروجی محفظه‌ی رطوبت‌زدا کمتر می‌شود.

عنوان		دمای هوای خروجی محفظه چگالنده ۱۰ (C)		دمای هوای خروجی محفظه چگالنده ۲۵ (C)	
		شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %	شوری ۱۰ %	شوری ۲۰ %
GOR (-)	پیکربندی a	۱/۱۴۴	۱/۱۳۴	۰/۸۰۹	۰/۸۰۲
	پیکربندی b	۱۷/۳۹	۱۵/۱۲	۲/۳۹۳	۲/۳۳۹
	پیکربندی c	۱۵/۲۹	۱۴/۳۵	۲/۳۵۷	۲/۳۱۹
	پیکربندی d	۳/۴۲۷	۲/۷۳۷	۳/۶۳۹	۲/۸۸۷
RR ₁ (%)	پیکربندی a	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۱۹۷	۴/۱۹۷
	پیکربندی b	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۱۹۷	۴/۱۹۷
	پیکربندی c	۴/۶۷	۴/۶۷	۴/۱۹۷	۴/۱۹۷
	پیکربندی d	۵/۹۵	۴/۸۵	۵/۹۵	۴/۸۵
RR _o (%)	پیکربندی a	۶۶/۴۹	۷۹/۷۴	۵۹/۷۷	۷۱/۶۸
	پیکربندی b	۶۶/۴۹	۷۹/۷۴	۵۹/۷۷	۷۱/۶۸
	پیکربندی c	۶۶/۴۹	۷۹/۷۴	۵۹/۷۷	۷۱/۶۸
	پیکربندی d	۸۴/۷۴	۸۲/۹۲	۸۴/۷۴	۸۲/۹۲
$\dot{m}_{dw}$ (kg/h)	پیکربندی a	۴/۹۰۳	۴/۹۰۳	۴/۴۰۷	۴/۴۰۷
	پیکربندی b	۴/۹۰۳	۴/۹۰۳	۴/۴۰۷	۴/۴۰۷
	پیکربندی c	۴/۹۰۳	۴/۹۰۳	۴/۴۰۷	۴/۴۰۷
	پیکربندی d	۶/۲۴۸	۵/۰۹۸	۶/۲۴۸	۵/۰۹۸
COP _h (-)	پیکربندی b	۳۴/۸۲	۲۶/۱	۴/۳۳۹	۴/۱۹۱
	پیکربندی c	۱۶/۴۵	۱۳/۷۲	۳/۰۱۳	۲/۹۳۵
	پیکربندی d	۴/۶۱	۳/۷۶۵	۵/۱۹۴	۴/۲۵۲

جدول ۵-۸ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده



شکل ۵-۹ اثر تغییرات دمای هوای خروجی محفظه چگالنده

۴-۵ نتیجه گیری

در تمام پارامترهای بررسی شده، افزایش شوری سبب کاهش COP_h و GOR پیکربندیها می شود اما در پارامتر دمای آب دریای ورودی فقط پیکربندی c با افزایش شوری در حداقل دمای آب دریای ورودی با افزایش GOR مواجه می شود که این میزان رفته رفته کاهش یافته و در بیشینه دمای آب دریای ورودی، شوری 10% مقدار نسبت خروجی بدست آمده ی بیشتری از غلظت 20% پیدا می کند. همچنین در تمامی موارد بررسی شده پیکربندیهای a ، b و c در هر دو شوری 10% و 20% آب تغذیه مقدار RR_{local} و $\dot{m}_{dw}$ یکسان دارند ولی میزان $RR_{overall}$ این حالتها با افزایش شوری بیشتر می شود. پیکربندی d با افزایش غلظت در میزان RR_{local} ، $RR_{overall}$ و $\dot{m}_{dw}$ با کاهش مواجه می شود. افزایش فشار هوای ورودی باعث کاهش میزان آب شیرین تولید شده، نسبت بازیابی محلی و کلی در تمامی حالتها می شود، همچنین نسبت خروجی بدست آمده در پیکربندیهای a و d کاهش یافته اما در پیکربندیهای b و c بیشتر می شود. ضریب عملکرد پیکربندیهای b ، c و d با افزایش فشار در محدوده ی یاد شده بیشتر می شود. مقادیر $\dot{m}_{dw}$ و RR_{local} پیکربندیها با افزایش دمای هوای ورودی بدون تغییر مانده اما GOR و $RR_{overall}$ تمام حالتها بیشتر می شود، همچنین COP_h پیکربندیهای b ، c و d با افزایش دمای هوای ورودی بالا می رود. بالا رفتن رطوبت هوای ورودی باعث می شود میزان تولید آب شیرین و نسبت بازیابی محلی پیکربندیهای a ، b و c بدون تغییر بوده و پیکربندی d در این مقادیر با اندکی کاهش مواجه باشد. همچنین میزان نسبت بازیابی کلی، نسبت خروجی بدست آمده و ضریب عملکرد پیکربندیها با بیشتر شدن رطوبت هوای ورودی بصورت افزایشی می باشد. افزایش دبی هوای ورودی باعث می شود $\dot{m}_{dw}$ ، RR_{local} و $RR_{overall}$ تمام حالتها بیشتر شود، به جز پیکربندی d که در میزان نسبت بازیابی کلی با اندکی کاهش مواجه می شود. GOR و COP_h پیکربندیهای b ، c و d با افزایش دبی هوا کمتر شده و پیکربندی a با افزایش نسبت خروجی بدست آمده مواجه می گردد. افزایش دمای آب دریای ورودی فقط باعث افزایش GOR و COP_h پیکربندیها می شود و در میزان آب تقطیر شده، نسبت بازیابی محلی و کلی هیچ اثری ندارد. با افزایش دبی آب شور تغذیه مقدار GOR پیکربندیهای a ، c و d افزایش یافته

اما پیکربندی b با کاهش مواجه می‌گردد. میزان تغییرات COP_h پیکربندیهای b ، c و d نیز مانند نسبت خروجی بدست آمده‌ی آنها می‌باشد. میزان تولید آب خالص با افزایش دبی آب شور ورودی، به جز پیکربندی d که با اندکی افزایش همراه است در باقی حالتها بدون تغییر مانده، اما مقدار نسبت بازیابی محلی در تمام حالتها کاهش می‌یابد. نسبت بازیابی کلی نیز در پیکربندی d با افزایش آب شور تغذیه اندکی افزایش یافته اما در باقی پیکربندیها بصورت نزولی می‌باشد. در تمامی حالتها مقادیر GOR ، RR_{local} ، $RR_{over a}$ و $\dot{m}_{dw}$ با افزایش دمای هوای خروجی محفظه تبخیر افزایش یافته و COP_h پیکربندیها به جز پیکربندی b که افزایش می‌یابد بطور کاهشی می‌باشد. به جز پیکربندی b که ضریب عملکرد آن با افزایش دمای هوای خروجی محفظه تبخیر بیشتر می‌شود، در تمامی حالتهای مورد مطالعه و بررسی بهبود قابل ملاحظه‌ای مشاهده می‌شود و این نشان دهنده‌ی اهمیت بسیار زیاد بالا رفتن دمای هوای خروجی محفظه‌ی رطوبت‌زن می‌باشد. با افزایش دمای هوای خروجی محفظه چگالنده مقادیر GOR ، RR_{local} ، $RR_{overall}$ و $\dot{m}_{dw}$ در پیکربندیهای a ، b و c کاهش می‌یابد، اما در پیکربندی d نسبت خروجی بدست آمده کمی افزایش یافته و دیگر مقادیر بدون تغییر باقی می‌ماند. همچنین تغییرات ضریب عملکرد پیکربندیهای b ، c و d مانند نسبت خروجی بدست آمده‌ی آنها می‌باشد. با وجود اینکه پیکربندی b از بقیه‌ی پیکربندیها مقدار GOR بیشتری دارد اما بدلیل بسیار زیاد بودن COP_h ، عملاً ساخت آن امکان پذیر نمی‌باشد. همچنین ضریب عملکرد پیکربندی c با توجه به تکنولوژی موجود کمی بیشتر از محدوده‌ی قابل اجرا می‌باشد ولی پیکربندی d با یک ضریب عملکرد خوب از لحاظ قابلیت ساخت و اجرا، بهبود قابل ملاحظه‌ای در GOR از خود نشان می‌دهد مضاف بر اینکه پیکربندی d بر خلاف سایر حالتها علاوه بر نسبت خروجی بدست آمده در دیگر موارد مورد بررسی (RR_{local} ، $RR_{overall}$ و $\dot{m}_{dw}$) نیز بهبود حاصل کرده است. برای ادامه و بهبود این مطالعه می‌توان بر روی پمپهای حرارتی و محفظه رطوبت‌زن تمرکز نمود، تا با پیشرفت تکنولوژی در این زمینه و قابلیت ساخت هیت پمپ با ضریب عملکرد بالاتر و محفظه تبخیر با بیشترین دمای هوای خروجی، بهره‌وری بیشتری در آب شیرین-کن، با سیستم ترکیبی HDH و پمپ حرارتی ایجاد شود.

- [1] Kabeel. A. E, Hamed. M. H, Omara. Z. M, Sharshir. S. W, "Water desalination using a humidification-dehumidification technique-A detailed review," Journal of Natural Resources, Volume 4, Pages 286-305, 2013.
- [2] J. Morillo, J. Usero, D. Rosado, H. El Bakouri, A. Riaza, F. J. Bernaola, "Comparative study of brine management technologies for desalination plants," Journal of Desalination, Volume 336, Pages 32-49, 2014.
- [3] Mohamed. A. S. A, Ahmed. M. S, Maghrabie. H. M, Shahdy. A. G, "Desalination process using humidification–dehumidification technique: A detailed review," Journal of International Journal of Energy Research, Volume 45, Pages 3698-3749, 2020.
- [4] A. M. O. Mohamed, M. Maraqa, J. Al Handhaly, "Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater," Journal of Desalination, Volume 182(1), Pages 411-433, 2005.
- [5] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, A. Khaled, "Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies," Journal of Desalination, Volume 266, Pages 263-273, 2011.
- [6] Lam. S, "Development of a multi-stage bubble column dehumidifier for application in a humidification dehumidification desalination system," Bachelor of Science dissertation, Massachusetts Institute of Technology 2012.
- [7]Curto. D, Franzitta. V, Guercio. A, "A review of the water desalination technologies," Journal of Applied Science, Volume 11, Article 670, 2021.
- [8] Goh. P. S, Liang. Y. Y, and Ismail. A. F, "Energy efficient seawater desalination: strategies and opportunities," Journal of Energy Technology, Volume 9, Article 2100008, 2021.
- [9] Narayan. G. Prakash et al, "Thermodynamic analysis of humidification-dehumidification desalination cycles," Journal of Desalination and Water Treatment, Volume 16, Pages 339-353, 2010.
- [10] Dawood. M. M. K, Amer. A, Mansour. T, Teamah. M. A, Aref. A, "A review study of experimental and theoretical humidification dehumidification solar desalination technology," Journal of Computational Water; Energy and Environmental Engineering, Volume 9, Pages 48-74, 2020.

- [11] E. Mahdizade and M. Ameri, “Thermodynamic analysis of humidification-dehumidification desalination system with semi-open air circulation,” *Journal of Amirkabir J. Mechanic Engineer*, Volume 49(3), Pages 643-652, 2017.
- [12] T. Dave, V. Ahuja and S. Krishnan, “Economic analysis and experimental investigation of a direct absorption solar humidification-dehumidification system for decentralized water production,” *Journal of Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 46, Article 101306, 2021.
- [13] Abdulaziz A. AlSaif, Mohamed S. Elzayed, M. A. M. Ahmed, M. A. Antar, Syed M. Zubair, “A robust definition of energy effectiveness for humidification dehumidification desalination systems,” *Journal of Energy Conversion and Management*, Volume 238, Article 114058, 2021.
- [14] Gang Wu, Cagri Kutlu, Hongfei Zheng, Yuehong Su, Dandan Cui, “A study on the maximum gained output ratio of single-effect solar humidification-dehumidification desalination,” *Journal of Solar Energy*, Volume 157, Pages 1-9, 2017.
- [15] A.S.A. Mohamed, M. Salem Ahmed, Abanob. G. Shahdy, “Theoretical and experimental study of a seawater desalination system based on humidification-dehumidification technique,” *Journal of Renewable Energy*, Volume 152, Pages 823-834, 2020.
- [16] Mohammad-Reza Kolahi, Majid Amidpour, Mortaza Yari, “Multi-objective metaheuristic optimization of combined flash-binary geothermal and humidification dehumidification desalination systems,” *Journal of Desalination*, Volume 490, Article 114456, 2020.
- [17] Qian Chen, Faheem Hassan Akhtar, Muhammad Burhan, Kumja M, Kim Choon Ng, “A novel zero-liquid discharge desalination system based on the humidification-dehumidification process: A preliminary study,” *Journal of Water Research*, Volume 207, Article 117794, 2021.
- [18] R. Santosh, G. Kumaresan, G. Krishna Kumar, R. Velraj, “Experimental parametric investigation of waste heat powered humidification dehumidification system for production of freshwater from wastewater,” *Journal of Desalination*, Volume 484, Article 114422, 2020.
- [19] Mohammad Behshad Shafii, Hamed Jafargholi, Meysam Faegh, “Experimental investigation of heat recovery in a humidification-dehumidification desalination system via a heat pump,” *Journal of Desalination*, Volume 437, Pages 81-88, 2018.

- [20] Xin Huang, Hang Wang, Weihong Liu, Xiang Ling, Yang Li, Yichuan Wang, Juan Li, "Performance analysis of a multi-stage humidification-dehumidification desalination system with different salinity levels," *Journal of Energy Conversion and Management*, Volume 215, Article 112928, 2020.
- [21] Shojaei. M, Morteza pour. H, Jafarinaeimi. K, "Experimental investigation of a heat pump-assisted solar humidification-dehumidification desalination system with a free-flow solar humidifier," *Journal of International Journal of Environmental Science and Technology*, Volume 17, Pages 2401-2414, 2020.
- [22] Meysam Faegh, Mohammad Behshad Shafii, "Thermal performance assessment of an evaporative condenser-based combined heat pump and humidification-dehumidification desalination system," *Journal of Desalination*, Volume 496, Article 114733, 2020.
- [23] Dahiru U. Lawal, Mohamed A. Antar, Atia Khalifa, Syed M. Zubair, Fahad Al-Sulaiman, "Experimental investigation of heat pump driven humidification-dehumidification desalination system for water desalination and space conditioning," *Journal of Desalination*, Volume 475, Article 114199, 2020.
- [24] Xin Huang, Tingfen Ke, Xiangqian Yu, Weihong Liu, Yang Li, Xiang Ling, "Pressure drop modeling and performance optimization of a humidification-dehumidification desalination system," *Journal of Applied Energy*, Volume 258, Article 114065, 2020.
- [25] Yunsheng Zhao, Hongfei Zheng, Shen Liang, Nan Zhang, Xing long Ma, "Experimental research on four-stage cross flow humidification dehumidification (HDH) solar desalination system with direct contact dehumidifiers," *Journal of Desalination*, Volume 467, Pages 147-157, 2019.
- [26] Shen Liang, Xinglong Ma, Nan Zhang, Hongfei Zheng, "Effectiveness of a built-in air duct desalination machine with absorption process," *Journal of Applied Thermal Engineering*, Volume 189, Article 116708, 2021.
- [27] W. F. He, L. Huang, J. R. Xia, W. P. Zhu, D. Han, Y. K. Wu, "Parametric analysis of a humidification dehumidification desalination system using a direct-contact dehumidifier," *Journal of International Journal of Thermal Sciences*, Volume 120, Pages 31-40, 2017.

- [28] Fadi Alnaimat, James F. Klausner, "Solar diffusion driven desalination for decentralized water production," *Journal of Desalination*, Volume 289, Pages 35-44, 2012.
- [29] Tao Hu, Abdel Hakim Hassabou, Markus Spinnler, Wolfgang Polifke, "Performance analysis and optimization of direct contact condensation in a PCM fixed bed regenerator," *Journal of Desalination*, Volume 280, Pages 232-243, 2011.
- [30] A. Alvarez, F. Carranza, I. Zavala, D. Saucedo, "Theoretical investigation of a direct contact humidification-dehumidification desalination system," *Journal of Desalination and Water Treatment*, Volume 142, Pages 11-23, 2019.
- [31] Hurdogan Ertac, Osman Kara, "Performance assessment of a desalination system integrated with ground heat exchanger for hydrogen and fresh water production," *Journal of Environment Progress & Sustainable Energy*, e 13745, 2021.
- [32] Iraj Ghofrani, Ali Moosavi, "Robust and efficient zero liquid discharge design strategy using four novel desalination systems: A comprehensive 4E assessment," *Journal of Cleaner Production*, Volume 310, Article 127362, 2021.
- [33] Saeed Dehghani, Abhijit Date, Aliakbar Akbarzadeh, "An experimental study of brine recirculation in humidification-dehumidification desalination of seawater," *Journal of Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 14, Article 100463, 2019.
- [34] W. F. He, L. N. Xu, D. Han, L. Gao, "Performance analysis of an air-heated humidification–dehumidification desalination plant powered by low grade waste heat," *Journal of Energy Conversion and Management*, Volume 118, Pages 12-20, 2016.
- [35] Efaf Z. Mahdizade, Mehran Ameri, "Thermodynamic investigation of a semi-open air, humidification dehumidification desalination system using air and water heaters," *Journal of Desalination*, Volume 428, Pages 182-198, 2018.
- [36] Shiva Tahmasb Pourafshar, Kazem Jafarinaemi, Hamid Morteza pour, "Development of a photovoltaic-thermal solar humidifier for the humidification-dehumidification desalination system coupled with heat pump," *Journal of Solar Energy*, Volume 205, Pages 51-61, 2020.
- [37] Mostafa H. Sharqawy, Mohamed A. Antar, Syed M. Zubair, Abubaker M. Elbashir, "Optimum thermal design of humidification dehumidification desalination systems," *Journal of Desalination*, Volume 349, Pages 10-21, 2014.

- [38] Mohamed A. Antar & Mostafa H. Sharqawy, "Experimental investigations on the performance of an air heated humidification-dehumidification desalination system," *Journal of Desalination and Water Treatment*, Volume 51, Pages 837-843, 2013.
- [39] Liu. J, Sun. Y, Yv. S, Wang. J, Hu. K, "Design and experimental study on a new closed-cycle desalination system based on ambient temperature," *Journal of Processes*, Volume 8(9), Article 1131, 2020.
- [40] Elattar. H. F, Nada. S. A, Al-Zahrani. A, Fouda. A, "Humidification-dehumidification water desalination system integrated with multiple evaporators/condensers heat pump unit," *Journal of International Journal of Energy Research*, Volume 44, Pages 6396- 6416, 2020.
- [41] Fahad A. Al-Sulaiman, M. Ifras Zubair, Maimoon Atif, Palanichamy Gandhidasan, Salem A. Al-Dini, Mohamed A. Antar, "Humidification dehumidification desalination system using parabolic trough solar air collector," *Journal of Applied Thermal Engineering*, Volume 75, Pages 809-816, 2015.
- [42] C. Yamali and I. Solmus, "A solar desalination system using humidification-dehumidification process: experimental study and comparison with the theoretical results," *Journal of Desalination*, Volume 220, Pages 538-551, 2008.
- [43] Cihan Yildirim, Ismail Solmus, "A parametric study on a humidification–dehumidification (HDH) desalination unit powered by solar air and water heaters," *Journal of Energy Conversion and Management*, Volume 86, Pages 568-575, 2014.
- [44] A.E. Kabeel, Mohamed Abdelgaied, M'Barek Feddaoui, "Hybrid system of an indirect evaporative air cooler and HDH desalination system assisted by solar energy for remote areas," *Journal of Desalination*, Volume 439, Pages 162-167, 2018.
- [45] Xing Li, Guofeng Yuan, Zhifeng Wang, Hongyong Li, Zhibin Xu, "Experimental study on a humidification and dehumidification desalination system of solar air heater with evacuated tubes," *Journal of Desalination*, Volume 351, Pages 1-8, 2014.

Abstract

Currently, the water shortage crisis is one of the biggest global threats facing most countries in the world, including Iran. Although more than 2/3 the earth's surface is made up of water, but most of it is seawater is included and only 0.014% of it is drinkable and available .Therefore, in the current situation, no solution is conceivable other than desalination of seawater, which has been well taken in this regard, but most desalination methods have been costly due to dependence on fossil fuels and brine water treatment of waste from these factories and it also needs basic infrastructure that is large-scale cost-effective, and this for developed areas are suitable but not suitable for deprived and remote areas. But the humidification-dehumidification system has the advantage of being set up for small and scattered communities with low cost and simple equipment. In this research, by studying various desalination methods and reviewing the work done in the field of HDH, four new configurations a, b, c, and d were proposed and designed with brine water recirculation to reduce energy consumption and brine waste as much as possible. Then, by obtaining the governing equations, thermodynamic modeling was performed. The results show that the hybrid system of HDH and heat pump significantly reduces energy consumption and improves performance. Thus, in the d optimized configurations, the gained output ratio increased from 0.623 to 3.474, and also the values of recovery ratio and water produced increased by 20 and 30%, respectively. In addition, in this study, the effect of using an economizer in the system to increase productivity was well identified in the results, That in configurations a, only by adding an economizer to an HDH system, the gained output ratio is almost 70% improved, and in configurations c, with only by one change to configurations b(adding economizer), the coefficient of performance of the heat pump is reduced about 45%.

Keywords: desalination, humidification-dehumidification, heat pump, brine recirculation, energy recovery



Shahrood University of
Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in

***Design and Simulation Thermal Desalination System Humidification-Dehumidification
with Brine and Freshwater Recirculation***

By: Yarmohammad Shirmohammadi

Supervisor:
Dr. Mohammadmohsen Shahmardan
Dr. Mohsen Nazari

January, 2022